

1
2008

JMO

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA FINE MECHANICS AND OPTICS

**ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY
PADESÁTILETÝ**



**ÚPT
AVČR**

**Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.,
Královopolská 147, 612 64 Brno**





IMEKO TC 2 Symposium on Photonics in Measurements 2008

Olympik Hotel, Prague, Czech Republic, August 25 – 26, 2008

Organized by Czech and Slovak Society for Photonics

Photonics has dramatically expanded and progressed in recent years. Photonics technologies and solutions are widely implemented in measuring and testing because of their flexibility, reliability and contact-less nature. The 18th IMEKO TC 2 Symposium on Photonics in Measurements 2008 will summarise the impact and contribution of Photonics to the field of measurements.

PROGRAM COMMITTEE

Miloš Klíma (Czech Republic) – Chair, klima@fel.cvut.cz

Armando Albertazzi Gonçalves, Jr (Brazil)

Petr Balling (Czech Republic)

Jan Brouček (Czech Republic)

Brian Culshaw (United Kingdom)

Christophe Gorecki (France)

Steffen Görlich (Germany)

Keneth T.V. Grattan (United Kingdom)

Patrick Guillaume (Belgium)

Fow-Sen Choa (USA)

Yuri V. Chugui (Russia)

Shangzhong Jin (People's Republic of China)

Gerd Jäger (Germany)

Bernard Journet (France)

Claus Keferstein (Switzerland)

Emil Košťál (Czech Republic)

Maciej Kucharski (Czech Republic)

Gerhard Linß (Germany)

Peter Němeček (Slovakia)

Wolfgang Osten (Germany)

Tilo Pfeifer (Germany)

Pramod K. Rastogi (Switzerland)

Enrico Savio (Italy)

János Schanda (Hungaria)

Marek Šmíd (Czech Republic)

Hans J. Tiziani (Germany)

Rainer Tutsch (Germany)

František Uherek (Czech Republic)

Steve Vanlanduit (Belgium)

Boxiong Wang (People's Republic of China)

ORGANIZING COMMITTEE

Miroslav Jedlička – Chair, jedlickam@volny.cz

Miloš Klíma

Emil Košťál

Maciej Kucharski

Petr Páta

Pavel Tománek

Milena Zeithamlová

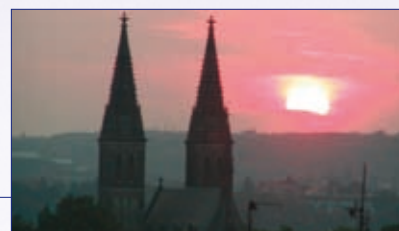
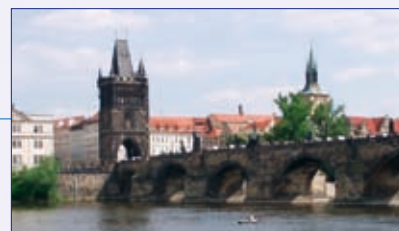
SYMPOSIUM TOPICS

1. Interferometry & Optical Testing Techniques
2. Development of Optical Measurement Systems
3. Optical Measurement in Micro – and Nanotechnologies
4. Image Processing and Simulation
5. Optoelectronic Sensor-Technologies and Light Sources
6. Applications for optical 1D and 2D sensors
7. Fiber Optical Sensors
8. Structured Illumination Techniques
9. Spectroscopy and Scattering Techniques

SYMPOSIUM DATE

IMEKO TC 2 Symposium 2008

August 25 – 26, 2008



IMPORTANT DATES

Abstract Submission	April 4, 2008
Notification of Acceptance	May 5, 2008
Manuscript due Date	June 2, 2008
Early Registration	June 13, 2008
Accommodation Deadline	July 4, 2008
Cancellation of Registration and Accommodation	August 4, 2008
Late Registration	August 19, 2008

REGISTRATION, ACCOMMODATION

Milena Zeithamlova
Action M Agency, Czech Republic
milena@action-m.com

REGISTRATION, REGISTRATION FEE, PAYMENT, CANCELLATION, ACCOMMODATION, SOCIAL PROGRAM

All relevant up-to-date information can be found on

<http://imekotc2.photon-czsk.org>
<http://prague2008.photon-czsk.org>

REDAKČNÍ RADA

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

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

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

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

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

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

Odpovědný zástupce vydavatele: prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc.
Šéfredaktor: dipl. tech. Jaroslav NEVŘALA

Adresa redakce v Olomouci (předplatné, nakladatelské služby):

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

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

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

Předplatné: Celoroční 420,- Kč/rok. Ceny jsou jednotné pro Českou 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 zaslání poštou 300,- Kč/rok.

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

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

V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá:

prof. Ing. Ivo Čáp, CSc., Žilinská univerzita - FPV, Hurbanova 15, SK - 010 26 Žilina, tel.: +421 415 136 350, e-mail: ivo.cap@fpv.utc.sk
Tiskne TYPOservis Holešov, Masarykova 650, 769 01 Holešov,
tel.: 573 398 746, e-mail: dtp@typoservis.cz

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

Odborné články jsou lektorovány.

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2008

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS
ROČNÍK 53 1/2008

OBSAH

Ústav přístrojové techniky padesátiletý (L. Frank) 3

Laboratoř optických mikromanipulačních technik – nové výzkumné směry (P. Zemánek, A. Jonáš, J. Ježek, P. Ják, M. Šerý, T. Čížmár, V. Karásek, M. Šiler, O. Brzobohatý, J. Trojek) 6

Zápis tvarovaným elektronovým svazkem (V. Kolařík, F. Matějka, B. Lencová, S. Kokrhel, M. Horáček, T. Radlička, M. Urbánek, L. Daněk) 11

Laboratoř interferometrie a vysoce koherentních laserů (J. Lazar, O. Číp, P. Jedlička, B. Mikel, B. Růžička, Z. Buchta, J. Hrabina, R. Šmíd, M. Čížek) 16

Zajímavé výsledky skupiny kryogeniky a supravodivosti ÚPT AV ČR (P. Urban, P. Hanzelka, J. Jelínek, T. Králík, V. Musilová, Aleš Srnka) 20

Nukleární magnetická rezonance v ÚPT – tradice a perspektivy (Z. Starčuk jr., J. Starčuková) 24

Prototyp stolní elektronové svářečky MEBW-60/2 (I. Vlček, M. Zobač, L. Dupák, J. Dupák, P. Kapounek) 27

Za Ing. Františkem Petřem, DrSc. (J. Lazar) 30

OPTA 2008 zaostří na dětské brýle (M. Strítěcký) 31

Obsah časopisu Jemná mechanika a optika je uveden na internetu: <http://jmo.fzu.cz>

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

Cena čísla 40 Kč včetně DPH

ADVISORY BOARD

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

Members: Ján BARTL - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Zdeněk BOUCHAL - Palacky Univ. (Czech Rep.), Igor BREZINA - Bratislava (Slovak Rep.), Pavol HORNÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav HRABOVSKÝ - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP - Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRA-BÍK - 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.), Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Bohumila LENCOVÁ - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric. Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠTÁK - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), František MÁČA, Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Ing. Monika MÍČHALOVÁ, PHILIPS Slovakia s.r.o., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav MILER - Inst. of Photonics and Electronics of Academy of Sciences, v.v.i., Praha (Czech Rep.) Jan PEŘINA - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jaromír PIŠTORA - Tech. Univ., Ostrava (Czech Rep.), Jaroslav POSPÍŠIL - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Dagmar SENDEŘÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Petr SCHOVÁNEK - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Karel STU-DENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

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

FINE MECHANICS AND OPTICS

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

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

Editor: Miroslav HRABOVSKÝ

Managing Editor: Jaroslav NEVŘALA

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

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

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

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

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

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

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

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

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2008

FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL
VOLUME 53 1/2008

CONTENTS

- Fifty years of the Institute of Scientific Instruments**
(L. Frank) 3
- Laboratory of optical micro-manipulation techniques – new directions of research** (P. Zemánek, A. Jonáš, J. Ježek, P. Jákl, M. Šerý, T. Čížmár, V. Karásek, M. Šiler, O. Brzobohatý, J. Trojek) 6
- Writing System with Shaped Electron Beam**
(V. Kolařík, F. Matějka, B. Lencová, S. Kokrhel, M. Horáček, T. Radlička, M. Urbánek, L. Daněk) 11
- Laboratory of interferometry and high coherence lasers**
(J. Lazar, O. Číp, P. Jedlička, B. Mikel, B. Růžička, Z. Buchta, J. Hrabina, R. Šmíd, M. Čížek) 16
- Some results of the Group of cryogenics and superconductivity at the Institute of Scientific Instruments** (P. Urban, P. Hanzelka, J. Jelínek, T. Králík, V. Musilová, Aleš Srnka) 20
- Nuclear magnetic resonance in the Institute of Scientific Instruments – tradition and prospects**
(Z. Starčuk jr., J. Starčuková) 24
- Desktop electron beam welder EBWM-60/2**
(I. Vlček, M. Zobač, L. Dupák, J. Dupák, P. Kapounek) 27
- Ing. František Petrů, DrSc. deceased** (J. Lazar) 30
- Opta 2008 stimulates its focus on glasses for children**
(M. Strítecký) 31

You can also find the contents of the Journal on internet:
<http://jmo.fzu.cz>

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

Price for single copy: 40 Kč incl. VAT

Ústav přístrojové techniky Československé akademie věd vznikl k 1. lednu 1957 sloučením několika menších akademických laboratoří. Současně se vstupem do statutu veřejné výzkumné instituce se tak

k 1. 1. 2007 dočkal padesátin. Oslavil je až v červnu po ukončení přechodného období naplněného tvorbou nových vlastních předpisů a konstituováním nových řídicích orgánů. Na začátku roku 2008 již ústav, pod nepatrně doplněným názvem, opět žije svým standardním životem. Vrátil se do obvyklého obranného postoje české vědecké instituce v očekávání příštích úderů namířených proti jistotám, na nichž staví svoje vědecké, personální, ekonomické a jiné koncepce a výhledy. Je tedy snad vhodná chvíle ke krátkému zastavení se nad nedávným jubileem.

Při svém založení dostal ústav do vínku úkol vyvíjet některé typy přístrojů (nejen) pro ostatní ústavy ČSAV, zejména v oborech odpovídajících zaměření jeho tří oddělení. Od samého začátku jimi byla **oddělení elektronové optiky a mikroskopie, jaderné magnetické rezonance a kvantových generátorů světla**. O chvályhodné prozíravosti zakladatelů i o stabilitě rozvoje ústavu svědčí skutečnost, že dnešní oddělení se od těchto směrů jen nepříliš odchylují – všechny tři obory totiž zůstaly nosné ne méně než na počátku. Pozměnil se ovšem styl práce. Po desetiletí byla podstatná část úsilí věnována vývoji funkčních vzorů nebo i prototypů přístrojů pro jejich následnou výrobu v tuzemských národních podnicích. Vyžadovala si to existence železné opony, nedostatek volně směnitelných finančních prostředků a všechny ostatní bariéry, které vědce oddělovaly od svobodného světa snad ještě důkladněji než jiné profese. Jestliže čeští výrobci po celá desetiletí dosahovali úspěchu, a to nejen na „východním“ trhu, v sektorech elektronových mikroskopů, spektrometrů jaderné magnetické rezonance a plynových laserů, byla to především zásluha pracovníků ústavu. Klíčem byly jak výsledky jejich bádání a následného vývoje, tak i enormní

úsilí spojené s převodem prototypů nebo funkčních vzorů do výroby v málo motivovaných, centrálně řízených podnicích. Poděl této klopotné cesty stojí milníky úspěšných přístrojů – nebyl problém jich vybrat stovku pro prezentaci při oslavě padesátin.

Některá minulé díla pracovníků ústavu vynikla nad ostatní. Jestliže první elektronový mikroskop, postavený pracovníky budoucího ÚPT, spadá již do roku 1951, výrazného úspěchu dosáhl zejména stolní prozařovací elektronový mikroskop dokončený v roce 1955. V roce 1956 byla započata jeho sériová výroba pod označením BS 242 (*obr. 1*), a co do velikosti série dosáhl tento typ rekordu, který již stěží bude překonán – přes 1000 kusů. Na EXPO 58 v Bruselu byl mikroskop oceněn zlatou medailí. První plynový laser v infračervené oblasti byl v ústavu spuštěn již v roce 1963 (*obr. 2*), tedy ve velmi rané fázi tohoto oboru vůbec. Na vývoj plynových laserů později navázaly úspěšné práce v oblasti použití laserů k přesným měřením, mimo jiné i v průmyslové praxi.



Obr. 1 Stolní prozařovací elektronový mikroskop, vyráběný po dobu cca 20 let pod označením Tesla BS 242, který byl oceněn zlatou medailí EXPO 58



Obr. 2 První československý plynový laser na snímku z roku 1963



Obr. 3 Prototyp spektrometru jaderné magnetické rezonance pracující na frekvenci 30 MHz (rok 1965)

První spektrometr jaderné magnetické resonance na frekvenci 30 MHz byl postaven v roce 1960 pro potřeby akademie. Po třech letech byly spektrometry zralé pro výrobu (obr. 3) a od roku 1966 také vyráběny, stejně jako elektronové mikroskopy, v brněnské Tesle. Všechny tyto tři druhy přístrojů byly ve své době v tuzemském rámci unikátní a jejich další rozvoj v ústavu měl monopol i v mnohem širším rozsahu světa za železnou oponou.

V osmdesátých letech minulého století se ústav postupně odkláněl od vývoje kompletních funkčních vzorků nebo dokonce prototypů rozsáhlejších zařízení a více se soustředil na přístrojové prvky a nové experimentální metody. Výjimkou byl elektronový litograf, který byl vyvíjen od konce sedmdesátých let a posléze vyráběn, opět v Tesle Brno. Z hlediska zázemí, prostoru, času a prostředků, které měl řešitelský tým k dispozici, bylo dosaženo vynikajícího výsledku. Přesto se tento obor přístrojové techniky, dnes patřící mezi absolutní technologickou špičku, u nás neujal na delší dobu. Dopravdy kvalitní totiž byla jen mikroskopická část přístroje. Připojená výpočetní technika z východního zahraničí však celek degradovala na neperspektivní úroveň. Za zmínku nicméně stojí, že třicet roků starý litograf je stále v ústavu v provozu, samozřejmě se zcela novým elektronickým systémem, a produkuje řady extrémně složitých masterů pro holografické difrakční struktury sloužící zejména jako ochranné prvky na nejrůznější výrobky a dokumenty.

Na počátku devadesátých let se ÚPT spolu s celou akademií „zmenšil“. Redukce ÚPT byla velmi výrazná – zůstalo jen přibližně 40% pracovníků. Současně ústav posunul své zaměření od prakticky zaměřeného výzkumu s navazujícím vývojem směrem k výzkumu základnímu. Namísto fenoménu předávání do výroby nastoupil fenomén scientometrie. V ústavu proto setrvali spíše badatelsky zaměřeni lidé, zatímco praktičtější kolegové odešli do firem, částečně i do vlastních. Přesto ústav setrval na svých stěžejních programech. Elektronová optika a mikroskopie na aktuálnosti spíše získávaly, obor kvantových generátorů světla se rozšířil i na polovodičové lasery s vnějšími rezonátory a zejména na metodologii využití světelných svazků na manipulaci s mikro- a nano-objekty, a konečně oddělení magnetické rezonance přibralo do svého programu nové metody přesného vícerozměrného měření biosignálů pro medicínské účely.

V současné době zůstává zaměření ÚPT stále převážně metodologické. Ideálním projektem pro řešení je vytvořit novou měřicí nebo diagnostickou metodu, a to v celé hloubce problému od příslušné fyzikální teorie přes návrh a ověření metody, její laboratorní odzkoušení, případný vývoj potřebných přístrojových prvků, až po zmapování možných aplikací a také jejich demonstraci. V poslední fázi (a často i ve fázích předchozích) tak pracovníci ústavu

potřebují a vyhledávají spolupráci s partnery ve zvolených aplikačních oblastech, ať již na akademických nebo vysokoškolských pracovištích zabývajících se odpovídajícími biomedicínskými, resp. materiálovými disciplinami, anebo i v průmyslových podnicích. Uvedený styl práce vyžaduje týmy pracovníků v zásadě schopných produkovat jak technologie, funkční vzory a prototypy, tedy teprve odněkud znovu oficiálně registrované aplikované výsledky, tak i kvalitní publikace. Samozřejmě je jedno vždy na úkor druhého a ústav by tedy velice uvítal politické rozhodnutí, spolehlivě platné alespoň pro střednědobý výhled, které by konečně stanovilo „žádanou“ proporcii mezi oběma typy výstupů, jaká povede k příznivému hodnocení instituce z hlediska její státní finanční podpory.

Poslední léta přinesla ústavu řadu významných úspěchů, na jejichž počátcích stály dobré nápady. Ze zkušeností s měřeními a počítačovým zpracováním komplexních funkcí v časové ose ve spektrometech jaderné magnetické resonance vykristalizovala myšlenka měřit podobně kvalifikovaným způsobem i takové veličiny, jako časové průběhy srdečního tepu a krevního tlaku, a poté na data nasadit vhodné statistické postupy zpracování. V ÚPT tak vzniklo nové odvětví lékařských přístrojů, které dnes již zahrnuje celou řadu typů nebývale jemných čidel a jejich programovatelných elektronik. Aplikace byly samozřejmě prováděny ve spolupráci s fakultní nemocnicí a publikované výsledky přitáhly pozornost slavné americké Mayo Clinic. Po několika letech dospěla tato spolupráce až k projektu Mezinárodního centra klinického výzkumu, kterému se říká brněnská mayo klinika.

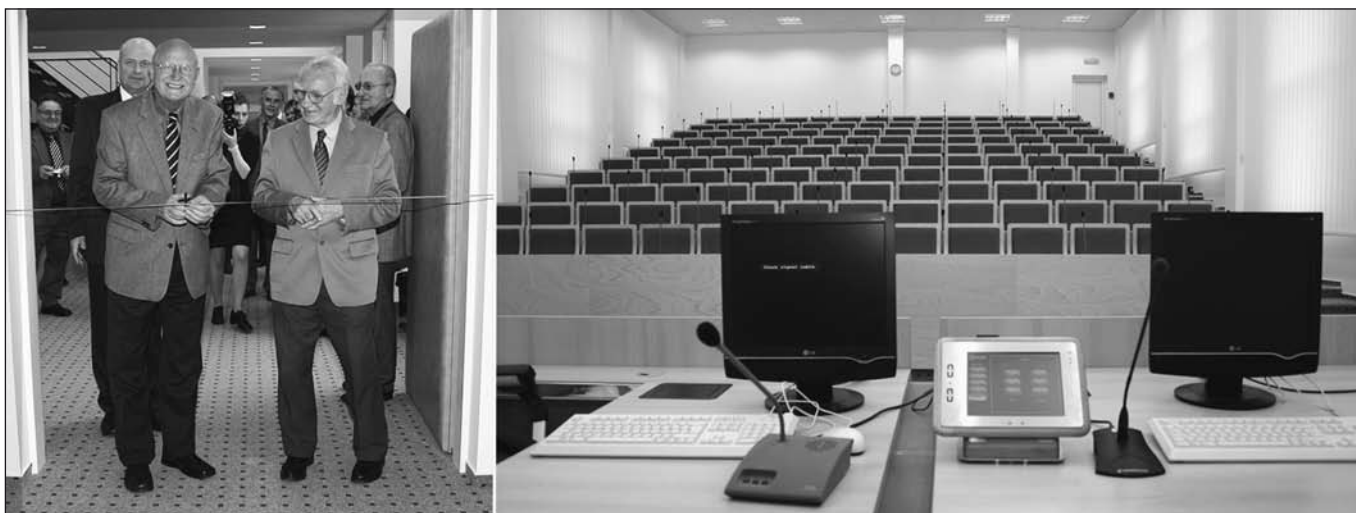
Skutečnost, že soustředěný světelný paprsek je schopen silově působit na dostatečně malé a lehké objekty, byla na pozadí nápadu vytvořit z protiběžných světelných vln vlnu stojatou a do jejích uzlů pak zachycovat jednotlivé částice. Stojatou vlnou lze samozřejmě pohybovat a tak vznikl tzv. optický dopravník, nástroj pro přesné třídění nanočástic podle velikosti, vícerozměrná past, atd.

Myšlenka zpomalit svazek elektronů brzdícím elektrickým polem těsně nad povrchem pozorovaného objektu se v historii elektronové mikroskopie několikrát vynořila a opět zapadla. Teprve v první polovině devadesátých let se však v ÚPT podařilo získat série mikrosnímků povrchů v rastrovacím elektronovém mikroskopu v celé škále energií od desítek kiloelektronvoltů až k prakticky nulové energii dopadu elektronů. Podstatné bylo, že se jednalo o snímky s téměř neměnným rozlišením. Během dalších let rastrovací mikroskopie velmi pomalými elektrony pronikla do celé řady aplikačních oblastí a přinesla pracovníkům ústavu množství uznávaných priorit a také pozvaných přednášek.

Čas od času si ústav dokazuje, že neztratil svoje inženýrské dovednosti. Nejlépe na vývoji prototypu zařízení založeného



Obr. 4 Pavilon mikroskopických laboratoří otevírala dne 1. října 2004 předsedkyně AV ČR prof. Illnerová společně s primátorem Brna dr. Duchoněm



Obr. 5 Nový sál otevřel 30. listopadu 2006 svojí přednáškou předseda AV ČR prof. Pačes; pásku přestříhal společně s prof. Delongem

na vlastním dobrém nápadu anebo umožňujícího takový nápad využít. Nedávno byl dokončen prototyp malé, počítačem řízené elektronové svářečky (viz titulní strana obálky a příspěvek I. Vlčka a spoluautorů na str. 27) a předán k licenční výrobě kvalitnímu německému producentu fyzikálních přístrojů. Svářečka umožňuje aplikovat originální postup svařování kovů běžnými metodami nersvařitelných, jak je tomu třeba u spojů nerezů s hliníkem a jiných.

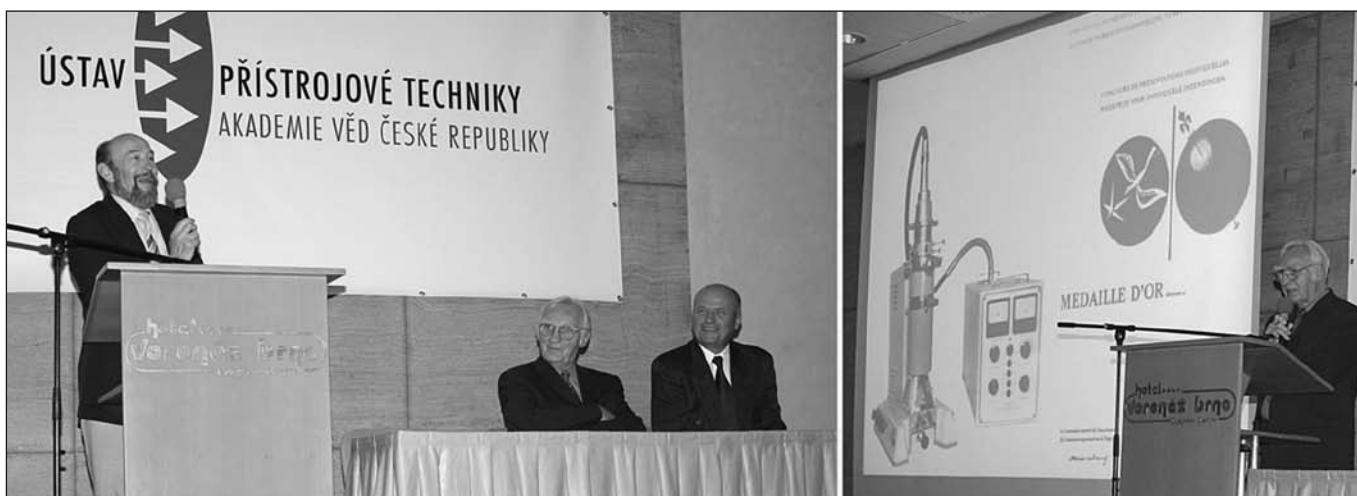
Úspěšné nápady i na ně navazující procesy tvorby a ověření nové metody ovšem stojí na fundamentech dlouhodobých programů, jakým je třeba teoretická elektronová optika a její vyústění v programových souborech pro počítačově asistované elektronové optické návrhy. Metodologie snímání a zpracování spekter jaderné magnetické resonance anebo světelných interferenčních polí jsou dalšími příklady. A rozhodně by to nešlo bez kvalitního technického oddělení s dílnami.

Od roku 1960 sídlí ÚPT v budově, která pro něj byla tehdy postavena. Nicméně po následující půlstoletí bylo do objektu investováno jen minimálně a tak se nahromadil značný vnitřní dluh. V posledních letech ústav věnuje všechny dostupné prostředky do postupné obnovy vnitřních prostor, laboratoří i kanceláří. Dokonce se podařilo získat financování na dvě velké investiční akce. Převážně z prostředků Akademie věd byl v letech 2003/4 postaven pavilon mikroskopických laboratoří (obr. 4) a s podstatným příspěvkem ze Strukturálního regionálního operačního programu EU byla

v letech 2005/6 realizována nadstavba přednáškového centra se sálem a dvěma zasedacími místnostmi (obr. 5). Současně byly pod nadstavbou přebudovány prostory garáží na novou knihovnu ústavu. V současnosti si ústav klade za cíl nepromarnit prozatím dosti mlhavou příležitost účastnit se inovace infrastruktury české vědy za podpory nově otevíraných operačních programů EU. Bylo by nanejvýš žádoucí a pro budoucnost ústavu nezbytné doplnit a zmodernizovat přístrojový park pro všechna tři vědecká oddělení.

Na oslavě padesátin v prostorách brněnského hotelu Voroněž vyslechli pracovníci ústavu, jak jinak, mnohá pochvalná i povzbudivá slova. Jednak z vlastních řad - kdo jiný mohl být hlavním řečníkem než prof. Ing. Armin Delong, DrSc., ředitel ústavu po tři desetiletí a první nositel Národní ceny vlády ČR Česká hlava z roku 2005. Uvítali jsme však i početnou delegaci Akademické rady AV ČR (obr. 6) a další hosty. Přidržíme-li se optimistické atmosféry této oslavy a zopakujeme větu tam vyslovenou, totiž že oslavenec je chlap v nejlepších letech, tedy již překonavší zbrkllost a nevědomost mládí a dosud nepropadnuvší skepticizmu pokročilého věku, můžeme si troufnout na pohled do budoucnosti tak optimistický, jak je to jen možné bez újmy na svrchované ostražitosti a neutuchajícím úsilí o přežití v podmínkách jednadvacátého století.

Luděk Frank
ředitel ÚPT AV ČR, v.v.i.



Obr. 6 Z oslavy padesátiletého jubilea ústavu

RNDr. Luděk Frank, DrSc., Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Královopolská 147, 612 64 Brno, tel.: 541 514 204, e-mail: ludek@isibrno.cz

Laboratoř optických mikromanipulačních technik – nové výzkumné směry

Článek podává stručný přehled historie a aktuálních trendů v oblasti využití optických mikromanipulačních technik a prezentuje nejnovější výsledky, kterých v této oblasti dosáhla skupina Optických mikromanipulačních technik Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Tyto výsledky se týkají zejména integrace optických mikromanipulací do mikroanalytických systémů typu „lab-on-a-chip“ (doprava a separace mikro- a nanočástic suspendovaných v kapalině, příprava komponent výše zmíněných systémů pomocí fotopolymerace, kombinace optických mikromanipulací s optickou spektroskopií) a studia interakce mezi světlem a hmotou manifestované prostřednictvím fenoménu optického vázání objektů.

HISTORIE VYUŽITÍ SILOVÉHO PŮSOBNÍ SVĚTLA

Bezkontaktní manipulace s mikroobjekty a nanoobjekty prostřednictvím světla jsou založeny na přenosu hybnosti mezi hmotou a částicemi světla – fotony. Světlo se po dopadu na hmotné objekty odráží, lomí, rozptyluje a absorbuje; tyto jevy vedou ke změně intenzity a směru šíření proudu fotonů dopadajících na objekt a tudíž i ke změně hybnosti nesené světlem. Podle zákona zachování hybnosti pro spojený systém světelné vlny a objektu pak následně musí dojít i ke změně hybnosti ozářeného objektu: dopadající světlo působí na objekt silou. Jelikož hybnost jediného fotonu je velmi malá, je k vyvolání pozorovatelných silových účinků i pro objekty mikrometrových rozměrů zapotřebí spolupůsobení obrovského množství fotonů. Jako zdroj světla pro optické mikromanipulace se tudíž využívají lasery, které disponují dostatečnými optickými výkony a umožňují soustředit emitovaný proud fotonů na manipulované objekty.

Studium a praktické aplikace optických sil jsou neoddelitelně spjaty se jménem Arthura Ashkina, který během 70. a 80. let minulého století uskutečnil základní typy experimentů [1] – optické urychlení objektů ve směru šíření jediného dopadajícího laserového svazku, stabilní prostorové zachycení objektů ve dvou protiběžných svazcích, levitační uspořádání, zejména však dnes již klasickou jednosvazkovou past nazývanou též optická/laserová pinzeta. Ashkin demonstroval zachycení objektů ve škále velikostí od desítek nanometrů po desítky mikrometrů a rovněž ukázal, že pomocí laserové pinzety lze uvěznit i živé objekty – buňky, viry - a libovolně je přemísťovat v prostoru. V následujících experimentech demonstroval jedinečnost optických sil, které umožňují prostřednictvím světla manipulovat i s objekty umístěnými za mechanicky neprostupnými stěnami, pokud jsou tyto stěny transparentní pro použité světlo. Tato unikátní vlastnost našla uplatnění zejména při zásazích uvnitř živých buněk, při manipulacích se subbuněčnými strukturami nebo při studiu elasticity cytoplazmy rostlinných buněk. Dalším kvalitativním krokem byla kombinace optické pinzety a systému pro detekci polohy zachyceného objektu [2], která umožnila monitorovat nanometrové výchylky objektu z rovnovážné polohy v optické pasti a určit velikost sil, které na něj působí. Takto doplněná optická pinzeta zrodila nový směr ve využití laserů v biologii provázený vlnou převratných experimentů trvajících do dnešních dnů, kdy se na molekulární úrovni studuje závislost vyvíjené síly a délky kroku různých molekulárních motorů, enzymů zpracovávajících nukleové kyseliny, mechanické vlastností mikrotubulů, aktinových vláken, DNA a dalších biopolymerů [3,4]. Protože jednotlivé molekuly jsou příliš malé pro přímou mikromanipulaci, využívá se při těchto experimentech mikrokuliček zachycených v optické pinzetě a současně navázaných na konce studovaných molekulárních vláken.

Rostoucí popularita optické pinzety vedla k postupným modifikacím klasického experimentálního schématu s jediným silně fokusovaným laserovým svazkem, které zvyšovaly jeho flexibilitu a umožnily nové typy experimentů. Byly navrženy a realizovány systémy s více optickými pastmi (ohnisky laserů), které byly generovány zvýšením počtu použitých svazků, rozdělením jednoho svazku na více např. polarizačním děličem, mřížkou, hologramem nebo rychlými přeběhy jediného svazku mezi optickými pastmi [5]. V poslední době na tomto poli dominuje metoda počítačem generovaných hologramů, které jsou realizovány prostorovými modulátory světla. Tato metoda dosáhla snad nejvyššího stupně univerzality, protože umožňuje vytvořit libovolný počet optických pastí (s limitem daným dostupným výkonem laseru) umístěných libovolně v prostoru a navíc umožňuje dynamicky měnit jejich parametry s frekvencí danou možnostmi prostorového modulátoru světla [6,7] Mimo standardního schématu optické manipulace „jeden svazek - jedna částice“ se též objevily a objevují nové přístupy, které k lokalizaci částic nevyužívají silně zaostřených svazků, ale např. organizace tepelného pohybu mnoha částic v širších svazcích [8], nezářivých (evanescentních) polí [9] a neklasických svazků (nedifrakčních či vírových), které umožňují přenos momentu hybnosti ze světelného pole na objekty následovaný jejich roztočením [10].

SOUČASNÉ TRENDY V APLIKACÍCH OPTICKÝCH MIKROMANIPULAČNÍCH TECHNIK

Současné trendy v oblasti optických mikromanipulací se soustřeďují zejména na kombinace optického zachytávání s komplementárními experimentálními technikami, které umožňují značné rozšíření jejich aplikačních možností. Ilustrativním příkladem tohoto synergetického přístupu je nasazení optických mikromanipulačních technik v mikrofluidních systémech pro analytické a separační aplikace typu „lab-on-chip“.

Vývoj mikrofluidních čipů je stimulován požadavkem na zmenšení objemu reagentů potřebných k provádění chemických, buněčně-biologických a lékařských analýz, což vede k výraznému zrychlení těchto procedur díky jejich masivní paralelizaci. Mikrofluidní čipy jsou tvořeny systémem kanálků a pracovních komor s typickými příčnými rozměry v řádu jednotek až desítek mikrometrů a obecně komplikovanou architekturou [11]. Klíčovou součástí funkčního mikrofluidního čipu jsou kontrolní prvky - pumpy, ventily, spínače, mixéry – které umožňují ovládání toku kapaliny mezi pracovními komorami, mísení jednotlivých reakčních komponent, injektáž buněk do systému, jejich stimulaci zvolenou látkou apod. Právě v oblasti kontrolních prvků pro mikrofluidní

systemy se otevírá prostor pro využití optických mikromanipulací. Koloidní částice o průměru několika mikrometrů zachycené v časově sdílené optické pasti byly využity ke konstrukci miniaturních peristaltických a rotačních pump s plynule ovladatelnou rychlostí a směrem toku kapaliny [12]. Obdobného efektu bylo dosaženo s využitím dvojlomných mikročástic rotujících v důsledku zachycení v kruhově polarizovaném laserovém svazku [13]. Opticky ovládané mikroventily posloužily k přepínání toku kapaliny mezi dvěma výstupními kanály [12]. Pomocí optické pinzety byly rychle přesouvány kvasinkové buňky mezi oblastmi v mikrofluidním kanále obsahujícími odlišná média; tato řízená manipulace umožnila sledovat odezvu buněk na definovaný vnější podnět [14].

Světlo laseru, ve kterém je zachycen studovaný objekt, může být využito také pro získání spektroskopických informací o objektu. Mezi různými technikami optické spektroskopie zachycených částic si stále větší popularitu získává Ramanova spektroskopie, která umožňuje selektivně, bez nutnosti vnějšího značení, analyzovat molekulární složení zachyceného objektu [15]. Tímto způsobem je možno vytvořit kompaktní a efektivní analytický systém využitelný například ke studiu oxidačního stavu červených krvinek [16, 17], obsahu vesikul nanometrových rozměrů [18], či identifikaci bakteriálních kmenů v suspenzi [19]. Výrazného zmenšení experimentální sestavy bylo dosaženo integrací zdrojů laserového záření přímo do mikrofluidního čipu [20].

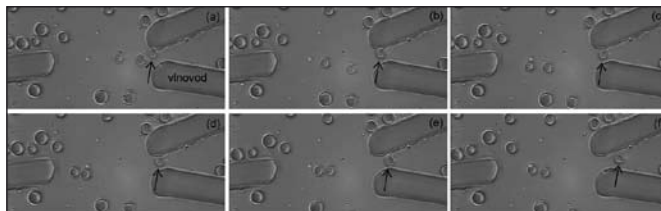
Silová interakce mezi světlem a mikroskopickými objekty nemusí vždy vést ke stabilnímu prostorovému zachycení objektů; objekty nacházející se v optických polích s komplexním rozložením maxim a minim intenzity budou těmito poli různě silově ovlivňovány v závislosti na velikosti a optických vlastnostech objektů a prostorové distribuci intenzity pole. Tohoto fenoménu lze využít k separaci objektů na základě jejich velikosti a materiálu [21]. Třídění objektů využívající optických sil může být založeno na statických i dynamických distribucích optické intenzity a jeho účinnost může být zvětšena prostřednictvím proudění kapaliny, ve které jsou separované objekty suspendovány. Flexibilita experimentálního uspořádání vzrůstá kombinací s mikrofluidními čipy, které umožňují cíleně přivádět a odvádět separované objekty.

Všechny výše zmíněné aplikace optických sil využívají vhodně tvarovaných světelných polí, ve kterých dochází k vytvoření stabilních potenciálových jam pro částice mikrometrových a submikrometrových rozměrů. Proti tomu stojí tzv. optické vázání mikroobjektů, ve kterém hraje klíčovou úlohu silové interakce mezi vázanými objekty prostřednictvím jimi rozptýleného světla [22, 23, 24]. Ozářené objekty se samouspořádají do prostorové konfigurace – tzv. opticky vázané hmoty - ve které dojde k vytvoření silové rovnováhy. Tento proces je analogický krystalizaci pevných látek z amorfni taveniny a výsledná konfigurace opticky vázaných objektů a její stabilita velmi závisí na optických parametrech objektů a okolního prostředí i dopadající světelné vlny. Optické vázání tak může sloužit jako modelový systém pro procesy probíhající při vzniku pevných látek i jako citlivý detektor reagující na změny optických parametrů systému.

VÝZKUMNÉ AKTIVITY V ÚSTAVU PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY AV ČR, v.v.i.

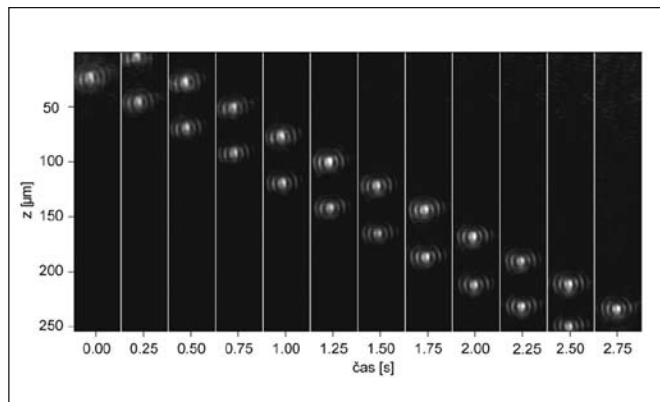
Skupina Optických mikromanipulačních technik (OMITEC) v ÚPT AV ČR, v.v.i. se dlouhodobě zabývá teoretickým a experimentálním studiem mechanismů silové interakce mezi světlem a hmotnými objekty. V laboratořích OMITECu byla navržena a realizována řada originálních systémů pro prostorové zachytávání a přemísťování mikroobjektů a nanoobjektů a pro využití takto zachycených objektů k mapování prostředí v jejich okolí. Některé z těchto systémů již byly představeny v JMO 1/2006. Současný výzkum je zaměřen zejména na kombinaci optických mikromanipulací s dalšími experimentálními technikami (mikrofluidika, Ramanova spektroskopie) s cílem jejich případných aplikací v chemických a biologických vědách a na studium jevu optického vázání objektů.

Ve spolupráci s Institute of Biophysics, Biological Research Centre of the Hungarian Academy of Sciences v Szegedi byl prostřednictvím laserové fotopolymerace vytvořen kompaktní systém optických vlnodů pro aplikace v mikrofluidních systémech [25] (viz obr. 1). Tento systém usnadňuje propojení mezi „mikro“ světem mikrofluidního čipu a „makro“ světem, představovaným zejména zdrojem laserového záření; laserové záření je do pracovní komůrky na čipu zavedeno prostřednictvím optických vláken přilepených ke koncům integrovaných vlnodů.



Obr. 1 Optická manipulace s polystyrénovými kuličkami o průměru 5 μm v prostoru mezi integrovanými vlnodvy vytvořenými fotopolymerací. Kulička označená šipkou je radičním tlakem svazku vycházejícího z levého vlnodvy vytlačena z prostoru mezi vlnodvy a tudíž separována od ostatních částic nacházejících se v tomto prostoru. Směr pohybu kuliček a jejich rychlost jsou řízeny výkonem svazků vycházejících z jednotlivých vlnodů.

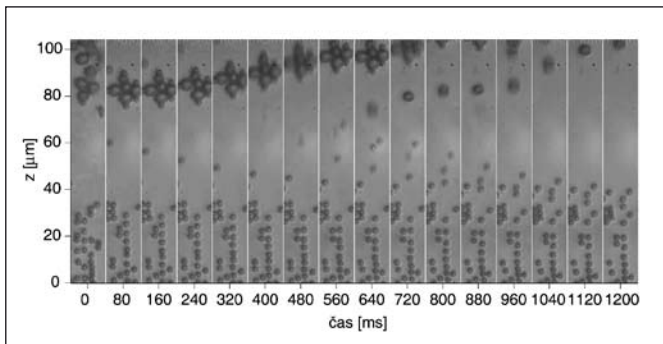
Ve spolupráci s katedrou optiky Univerzity Palackého v Olomouci a University of St. Andrews ve Skotsku byly nalezeny metody pro využití interferujících nedifrakčních svazků k zachycení až tisíců submikrometrových objektů do lineárního řetězce dlouhého až 1mm [26]. Změnou fáze jednoho z interferujících svazků je možné zachycené objekty najednou přemístit na vzdálenosti odpovídající délce nedifrakčního svazku [27, 28] (viz obr. 2).



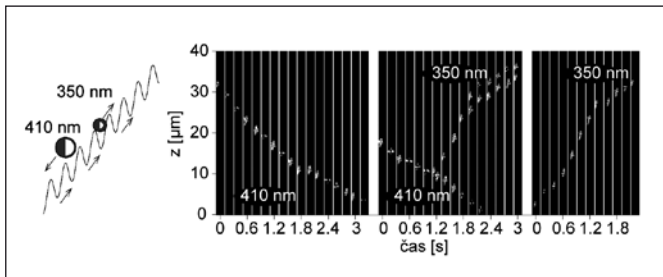
Obr. 2 Optický dopravník vytvořený interferencí dvou protiběžných nedifrakčních svazků. Dvě kuličky o průměru 410 nm jsou současně dopravovány na vzdálenost 250 μm v pohybuující se interferenční struktuře; pohybu interferenčního obrazce je dosaženo změnou fáze jednoho ze dvou interferujících svazků.

Z fyzikálního hlediska je nesmírně zajímavá problematika chování stochasticky buzené přetlumené částice umístěné v systému mnoha stacionárních nebo časově proměnných potenciálových jam. V této konfiguraci lze studovat dynamiku přeskoků částice mezi sousedními potenciálovými jamami či výrazně ovlivnit difúzi částice a vhodným prostorovým rozložením potenciálu dosáhnout usměrnění stochastického tepelného (brownovského) pohybu částic na makroskopické úrovni. Pochopení těchto mechanismů pak umožňuje nalezení nových metod separace složek v heterogenních suspenzích pouhým osvětlením těchto suspenzí vhodně strukturovaným optickým polem. V této oblasti OMITEC navrhl

a realizoval několik metod využívajících jak zářivých tak i nezářivých (evanescentních) optických polí. Obr. 3 zachycuje třídění směsi polystyrénových kuliček v zářivém interferenčním poli tří svazků. Separace je v tomto případě dosaženo ve dvou krocích: nejprve jsou částice různých velikostí separovány ve směru kolmém na proužky do intenzitních maxim a minim (světých a tmavých proužků) v důsledku jejich odlišné citlivosti na periodické modulace intenzity. Vhodným nastavením výkonu a prostorové konfigurace svazků (úhlu, které mezi sebou tyto svazky svírají) lze pak dosáhnout stavu, kdy se částice různých velikostí pohybují podél interferenčních proužků opačnými směry v důsledku nerovnováhy mezi radiačními tlaky jednotlivých svazků. Obr. 4 pak ilustruje třídění nanočástic v evanescentní stojaté vlně [29]. Toto třídění opět využívá rozdílné citlivosti objektů různých velikostí na přítomnost periodických modulací optické intenzity ve stojaté vlně.



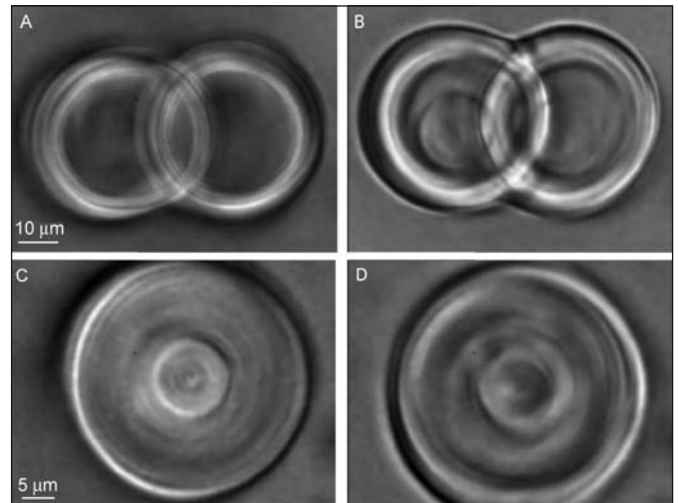
Obr. 3 Optické třídění 2 μm a 5 μm polystyrénových kuliček suspenovaných ve vodě v interferenčním poli tří svazků. Vhodným nastavením parametrů interferujících svazků (výkon jednotlivých svazků, šifka interferenčních proužků) lze dosáhnout separace kuliček obou velikostí: menší objekty se pohybují podél interferenčních proužků směrem dolů, větší objekty směrem vzhůru.



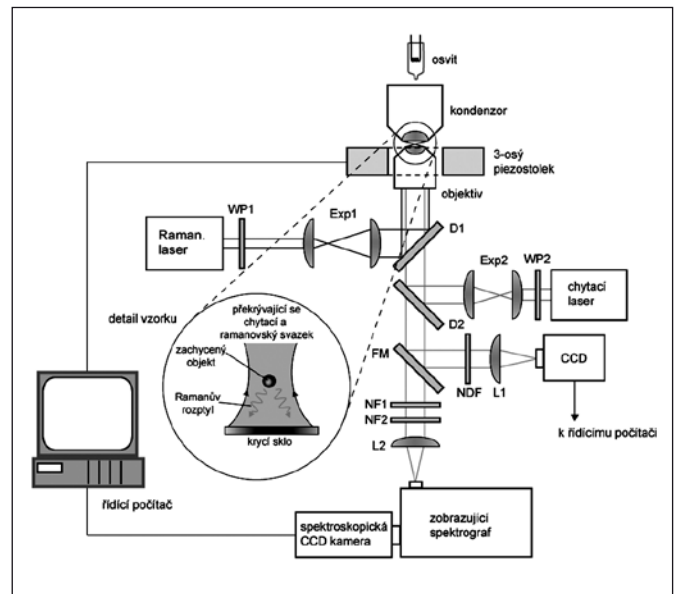
Obr. 4 Optické třídění koloidních částic podle jejich velikosti v evanescentní stojaté vlně. Větší částice necítí stojatou vlnu a jsou větším radiačním tlakem tlačeny doleva (naklonění je způsobeno větší optickou intenzitou svazku jdoucího zprava). Menší částice jsou zachyceny do stojaté vlny a principem světelného dopravníku jsou pohyblivou stojatou vlnou přemísťovány doprava. Obrázek vpravo ukazuje experimentální třídění polystyrénových kulových objektů o průměru 410 nm (pohyb k menším hodnotám z) a 350 nm (pohyb k větším hodnotám z).

Unikátních vlastností nedifrakčních svazků – neměnného přičného rozložení intenzity světla během jejich šíření - bylo využito k vytváření polymerových vláken několik centimetrů dlouhých a jen 2 mikrometry širokých prostřednictvím fotopolymerace iniciované nedifrakčním svazkem v roztoku monomeru [30]. Pokud je nedifrakční svazek skenován v roztoku monomeru, lze snadno vytvořit i duté polymerní struktury, jako např. protínající se či do sebe vnořené sousedé válce (viz obr. 5).

V laboratoři OMITEC byla vybudována experimentální sestava pro Ramanovu mikrospektroskopii opticky zachycených objektů (obr. 6). Sestava využívá dvou nezávislých laserů pro optické mikromanipulace a buzení spekter Ramanova rozptylu; tento

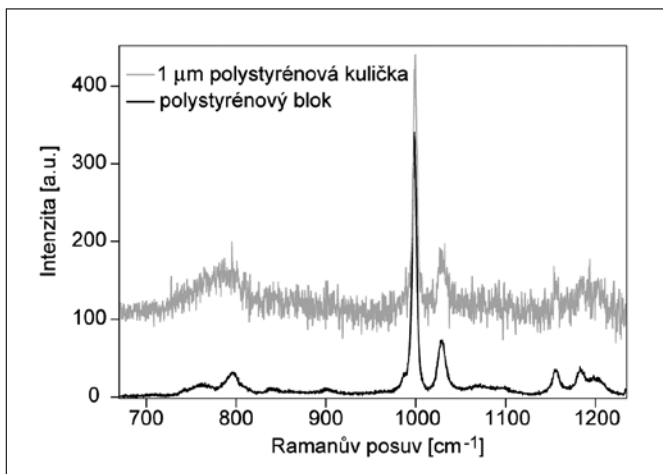


Obr. 5 Přední (A, C) a zadní (B, D) strana dutých vláknových struktur vytvořených fotopolymerací využívající nedifrakčního laserového svazku. (A, B) Dvě protínající se vláknové struktury o délce 150 μm a vnějším průměru 40 μm . (C, D) Dvě koncentrické vláknové struktury. Průměr vnějšího vlákna je 35 μm , průměr vnitřního vlákna je 10 μm .

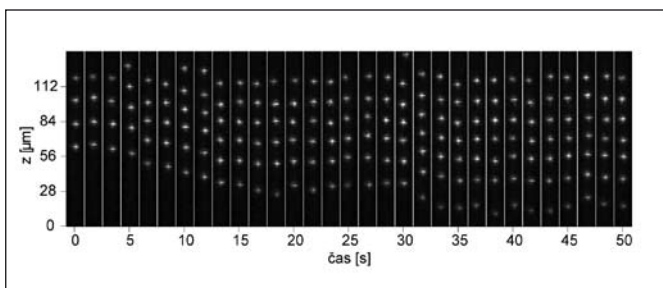


Obr. 6 Experimentální sestava pro ramanovskou mikrospektroskopii opticky zachycených objektů. D1-2 – dichroidní zrcadla, Exp1,2 – expandéry svazku, FM – otočné zrcadlo, L1-2 – čočky, NDF – šedý filtr, NF1-2 – notch filtry pro chytací a ramanovský laser, WP1,2 – půlvlnné destičky. Ramanovský laser – Ti:safír, vlnová délka 785 nm, chytací laser – Nd:YAG, vlnová délka 1064 nm.

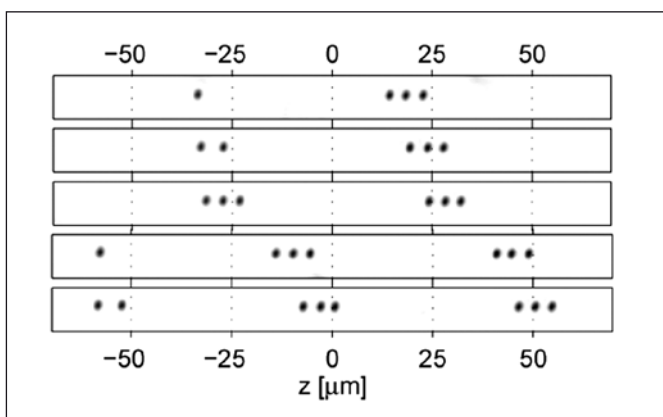
přístup umožňuje nezávislou optimalizaci parametrů laserových svazků pro chytání a spektroskopii a implementaci fázově citlivé metody detekce spekter Ramanova rozptylu, která je založena na periodické modulaci polohy zachyceného mikroobjektu vůči ohnisku ramanovského laseru [31]. Vlnové délky obou použitých laserů leží v blízké infračervené oblasti pro potlačení případné autofluorescence při pozorování biologických vzorků (buněk). Citlivost mikrospektroskopického systému byla testována na opticky zachycených mikrokuličkách. Obr. 7 zachycuje spektrum polystyrénové kuličky o průměru 1 μm ; pro srovnání je v obrázku též ukázáno spektrum masivního polystyrénového bloku pořízené na téže experimentální sestavě jako reference. Z obrázku je zřejmé, že i při malém výkonu ramanovského laseru jsou ve spektru zřetelně rozlišitelné všechny hlavní spektrální píky polystyrénu.



Obr. 7 Spektrum Ramanova rozptylu z opticky zachycené polystyrénové kuličky o průměru 1 μm . Kulička je fixována ve vodě chytacím laserovým svazkem (výkon cca 350 mW), spektrum je buzeno ramanovským laserovým svazkem (výkon cca 10 mW) (viz obr. 2); integrační doba pro pořízení spektra je 10 s. Jako reference je ukázáno spektrum Ramanova rozptylu z masivního polystyrénového bloku; pro snazší srovnání je toto spektrum normalizováno a vertikálně posunuto.



Obr. 8 Optické vázání polystyrénových kuliček o průměru 802 nm ozářených dvěma protiběžnými evanescentními vlnami. V čase $t = 5$ s se ke čtyřem opticky vázaným kuličkám připojí pátá, pro $t = 10$ s šestá, a pro $t = 30$ s sedmá. Na rozdíl od situace zachycené v obr. 4 mají obě vlny navzájem kolmou polarizaci, nedochází tudíž k jejich interferenci a ke vzniku stojaté evanescentní vlny.



Obr. 9 Optické vázání polystyrénových kuliček o průměru 1070 nm ozářených dvěma protiběžnými nedifrakčními svazky o průměru jádra 1,8 μm . V důsledku interakcí mezi kuličkami prostřednictvím rozptýleného světla dochází k jejich samoorganizaci na dvou úrovních (krátkodosahové uspořádání do skupin obsahujících tři kuličky, dlouhodosahová organizace jednotlivých skupin). Konkrétní konfigurace kuliček (počet a vzdálenost kuliček ve skupinách, vzdálenost jednotlivých skupin) závisí na velikosti kuliček a průměru jádra svazků. Oba svazky jsou navzájem nekoherentní, nedochází tudíž k jejich interferenci a ke vzniku stojaté vlny.

Další problematikou, které se skupina intenzívně věnuje, je samouspořádání mikroobjektů ve světelných svazcích prostřednictvím optického vázání. V tomto případě se nejedná o zachytávání do předem vytvořených optických pastí, nýbrž částice samotné svou přítomností modifikují prostorové rozložení světelného pole a tento svázaný systém částice-pole se vyvíjí k rovnovážnému uspořádání. V některých případech to vede k uspořádání, ve kterém se jednotlivé částice nedotýkají a vzdálenosti mezi nimi jsou velmi citlivé na nepatrnou změnu parametrů systému (indexu lomu částic či okolí, velikost částic apod. [32]). Studovali jsme samouspořádání částic na povrchu v nezářivém poli (viz obr. 8) a rovněž v prostoru v nedifrakčních svazcích (viz obr. 9). Adaptovali jsme metodu vázaných dipólů pro výpočet silových interakcí mezi opticky vázanými částicemi a úspěšně porovnali teoretické výpočty s experimentálními pozorováními.

VÝHLED DO BUDOUCNA

V následujících letech se skupina OMITEC bude dále věnovat novým trendům v optických mikromanipulačních metodách a zejména jejich novým aplikacím. Bude posíleno jejich biologické a lékařské využití založené hlavně na složitějších mikrofluidních systémech kombinovaných s optickými mikromanipulacemi a Ramanovou mikrospektroskopií.

I nadále budou rozvíjeny teoretické metody popisující interakci světla s mnoha mikroobjekty s cílem lépe pochopit brownovskou dynamiku částic v komplexních světelných polích a nalézt nové možnosti v optickém třídění suspenzí a koloidních směsí či jejich samouspořádání světlem.

Literatura

- [1] Ashkin A. 2000. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particles, atoms, and molecules. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **6**: 841-856.
- [2] Svoboda K., Schmidt Ch. F., Schnapp B. J., and Block S. M. 1993. Direct observation of kinesin stepping by optical trapping interferometry. *Nature* **365**: 721-727.
- [3] Bustamante C., Bryant Z., and Smith S. B. 2003. Ten years of tension: single-molecule DNA mechanics. *Nature* **421**: 423-427.
- [4] Mehta A. D. *et al.* 1999. Single-molecule biomechanics with optical methods. *Science* **283**: 1689-1695
- [5] Lang M. J. and Block S. M. 2003. Resource Letter: LBOT-1: Laser-based optical tweezers. *Am. J. Phys.* **71**: 201-215.
- [6] Grier D. M. and Roichman Y. 2005. Holographic optical trapping, arXiv: cond- mat/0506284
- [7] Rodrigo P. J., Daria V. R., Gluckstad J. 2005. Four-dimensional optical manipulation of colloidal particles. *Appl. Phys. Lett.* **86**: 074103.
- [8] Garcés-Chávez V., Quidant R., Reece P. J., Badenes G., Torner L., and Dholakia K. 2006. Extended organization of colloidal microparticles by surface plasmon polariton excitation. *Phys. Rev. B* **73**: 085417-1- 085417-5
- [9] Garcés-Chávez V., Dholakia K., Spalding G. C. 2005. Extended-area optically induced organization of microparticles on a surface. *Appl. Phys. Lett.* **86**: 031106.
- [10] Friese M. E. J. *et al.* 1998. Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles. *Nature* **394**: 348-350.
- [11] Thorsen T., Maerkl S. J., Quake S. R. 2002. Microfluidic Large-Scale Integration. *Science* **298**: 580-584
- [12] Terray A., Oakey J. and Marr D. W. M. 2002. Microfluidic control using colloidal devices. *Science* **296**: 1841-1844.
- [13] Leach J., Mushfique H., di Leonardo R., Padgett M., and Cooper J. 2006. An optically driven pump for microfluidics. *Lab on a Chip* **6**: 735-739

- [14] Eriksson E., Enger J., Nordlander B., Erjavec N., Ramser K., Goksor M., Hohmann S., Nystrom T., and Hanstorp D. 2007. A microfluidic system in combination with optical tweezers for analyzing rapid and reversible cytological alterations in single cells upon environmental changes. *Lab on a Chip* **7**: 71-76
- [15] Petrov V. 2007. Raman spectroscopy of optically trapped particles. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9**: S139-S156
- [16] Ramser K., Enger J., Goksor M., Hanstorp D., Logg K., and Kall M. 2005. A microfluidic system enabling Raman measurements of the oxygenation cycle in single optically trapped red blood cells. *Lab on a Chip* **5**: 431-436
- [17] Eriksson E., Scrimgeour J., Graneli A., Ramser K., Wellander R., Enger J., Hanstorp D., and Goksor M. 2007. Optical manipulation and microfluidics for studies of single cell dynamics. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9**: S113-S121
- [18] Cherney D. P., Conboy J. C., and Harris J. M. 2003. Optical-Trapping Raman Microscopy Detection of Single Unilamellar Lipid Vesicles. *Anal. Chem.* **75**: 6621-6628
- [19] Xie C., Mace J., Dinno M. A., Li Y. Q., Tang W., Newton R. J., and Gemperline P. J. 2005. Identification of Single Bacterial Cells in Aqueous Solution Using Confocal Laser Tweezers Raman Spectroscopy. *Anal. Chem.* **77**: 4390-4397
- [20] Cran-McGreehin S., Krauss T. F., and Dholakia K. 2006. Integrated monolithic optical manipulation. *Lab on a Chip* **6**: 1122-1124
- [21] Dholakia K., MacDonald M. P., Zemánek P., and Čižmár T. 2007. Cellular and colloidal separation using optical forces. *Methods in Cell Biology* **82**: 467-495
- [22] Burns M. M., Fournier J.-M., and Golovchenko J. A. 1989. Optical Binding. *Phys. Rev. Lett.* **63**: 1233-1236
- [23] Tatarkova S. A., Carruthers A. E., and Dholakia K. 2002. One-Dimensional Optically Bound Arrays of Microscopic Particles. *Phys. Rev. Lett.* **89**: 283901-1- 283901-4
- [24] Singer W., Frick M., Bernet S., and Ritsch-Marte M. 2003. Self-organized array of regularly spaced microbeads in a fiber-optical trap. *J. Opt. Soc. Am. B* **20**: 1568-1574
- [25] Jákl P., Šerý M., Ježek J., Zemánek P., Ormos P., Valkai S., Kelemen L. 2007. Opto-fluidic micromanipulation system based on integrated polymer waveguides. *J. Optoelectron. Adv. Mat.* **9**: 2148 - 2151
- [26] Čižmár T., Šiler M., and Zemánek P. 2006. An optical nanotrap array movable over a millimetre range. *Appl. Phys. B* **84**: 197-203
- [27] Čižmár T., Garcés-Chávez V., Dholakia K., and Zemánek P. 2005. Optical conveyor belt for delivery of submicron objects. *Appl. Phys. Lett.* **86**: 174101-1- 174101-3
- [28] Čižmár T., Kollárová V., Bouchal Z., and Zemánek P. 2006. Sub-micron particle organization by self-imaging of non-diffracting beams. *New J. Phys.* **8**: 1-23
- [29] Čižmár T., Šiler M., Šerý M., and Zemánek P. 2006. Optical sorting and detection of submicrometer objects in a motional standing wave. *Phys. Rev. B* **74**: 035105-1- 035105-6
- [30] Ježek J., Čižmár T., Neděla V., and Zemánek P. 2006. Formation of long and thin polymer fiber using nondiffracting beam. *Opt. Express* **14**: 8506-8515
- [31] Rusciano G., De Luca A. C., Pesce G., and Sasso A. 2006. Phase-sensitive detection in Raman Tweezers. *Appl. Phys. Lett.* **89**: 261116-1- 261116-3
- [32] Karásek V., Dholakia K., and Zemánek P. 2006. Analysis of optical binding in one dimension. *Appl. Phys. B* **84**: 149-156

doc. RNDr. Pavel Zemánek, Ph.D., tel.: 541 514 202, e-mail: zemanek@isibrno.cz, Mgr. Alexandr Jonáš, Ph.D., Ing. Jan Ježek, Ph.D., Ing. Petr Jákl, Ph.D., Ing. Mojmír Šerý, Ph.D., Mgr. Tomáš Čižmár, Ph.D., Mgr. Vítězslav Karásek, Mgr. Martin Šiler, Mgr. Oto Brzobohatý, Mgr. Jan Trojek, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Královopolská 147, 612 64 Brno

Technické pokyny pro autory

Příspěvky se přijímají v elektronické formě.

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

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

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

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

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

Pokyny k předávání příspěvku

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

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

Soubory je možno dodat na disketě, CD nebo na médiu ZIP 100 MB.

Ke každému příspěvku připojte seznam všech předávaných souborů a u každého souboru uveďte pomocí jakého software byl vytvořen.

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

Zápis tvarovaným elektronovým svazkem

Článek popisuje úpravu původního elektronového litografu BS 600 pracujícího s urychlovacím napětím 15 kV, který prošel v posledních letech výraznou rekonstrukcí. Základní požadavky jsou kladeny na zlepšení rozlišení a zvýšení expoziční rychlosti. Kromě vlastností a dosažených parametrů jsou uvedeny rovněž příklady struktur vytvořených pomocí tohoto systému. Litograf je využíván pro přípravu masek, přímou litografii i realizaci reliéfních struktur. Pro kontrolu realizovaných struktur byl použit mikroskop s rastrující sondou a rastrovací elektronový mikroskop.

Klíčová slova: Elektronový litograf, tvarovaný svazek, elektronově-optická soustava, rozptyl elektronů, rychlost zápisu.

ÚVOD

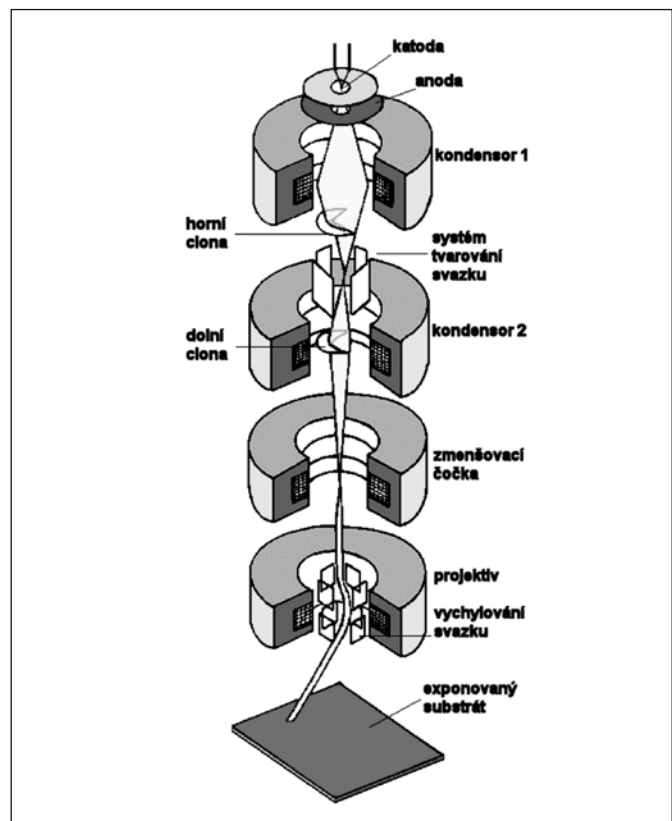
Systémy pro vytváření struktur pomocí elektronového svazku pracují obvykle s gaussovským svazkem kruhového průřezu. Zvláštní kategorií jsou systémy pracující s tvarovaným (obdélníkovým) svazkem proměnné velikosti. Elektronový litograf BS 600 pracující s konstantním urychlovacím napětím 15 kV a s tvarovaným svazkem byl původně navržen pro rozlišení 100 nm [1]. Tvarovaný segment primárního svazku, resp. elementární expozici tímto segmentem, označujeme v dalším textu pojmem razítko. Cílem úprav elektronového litografu bylo zlepšit parametry stávajícího zařízení a technologických postupů tak, aby bylo možno realizovat struktury s nejlepším možným rozlišením a nejvyšší možnou rychlostí. Zatímco požadavek na vysoké rozlišení by bylo nutno řešit celkovou změnou koncepce nebo snahou o pořízení nového litografu, požadované zlepšení rozlišení a zvýšení rychlosti umožňuje uvažovat o stávajícím zařízení s vhodnými úpravami [2].

2. ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE

2.1 Elektronově optická soustava

Elektronově optický systém litografu s proměnným razítkem pravoúhlého průřezu byl původně navržen před celým čtvrtstoletím. Vychází z původní koncepce založené na vytváření razítka projekcí z bodového zdroje. Schottkyho katoda je zobrazena kondenzorem 1 do křižičště o submikrometrovém průměru [3] umístěném mezi dvěma clonami (obr. 1). Výsledný svazek má velikost až $120 \times 120 \mu\text{m}^2$ a proud až $1 \mu\text{A}$. Změnu tvaru razítka pak zajišťuje elektrostatický vychylovací systém mezi clonami. Spodní clona uvnitř kondenzoru 2, a razítko definované průřezem svazku na této cloně, je zmenšovací čočkou a projekтивem přeneseno s dvacetinásobným zmenšením na substrát, křižičště je pak zobrazeno do středu projektivu.

Rigorózní analýza elektronově optické soustavy byla provedena pomocí programu EOD [4], na jejím základě byla zmenšena velikost tvarovaného svazku (razítka) pomocí změny buzení zmenšovací čočky (obr. 1). Standardní proud čočky je asi 0,13 A, tomu odpovídá poměr velikostí (razítka v rovině substrátu a razítka v oblasti clon) 0,0654 [5]. Při novém způsobu nastavení se buzení čočky zvýší na $\sim 0,19$ A, tím se změní poměr velikostí na $\sim 0,032$. Vlivem zvýšeného buzení dojde rovněž k výraznější rotaci svazku; v rovině substrátu jsou osy tvarování razítka otočeny vzhledem k osám vychylování svazku o 45° . Testovací expozice ukazuje úspěšnost dokončené realizace. Změnou velikosti svazku (zmenšení průřezu na čtvrtinu) se současně zvýší proudová hustota čtyřnásobně. Při stejných ostatních podmínkách (proud primárního svazku, expoziční dávka) se rovněž může zkrátit doba jedné elementární expozice.



Obr. 1 Schéma elektronově optické soustavy

2.2 Expozice rezistu

Při expozici elektronového rezistu dochází k rozptylovým jevům, zejména k dopřednému rozptylu svazku primárních elektronů (PE) a k expozici zpětně odraženými elektrony (BSE, back scattered electrons). Hustota rozložení absorbované energie (energy density profile) v závislosti na laterální vzdálenosti od svazku elektronů se dle [6] obvykle vyjadřuje jako součet dvou gaussovských rozložení, normovaný tvar této funkce $f(r)$ [μm^{-2}] je

$$f(r) = \frac{1}{1+\eta} \left[\frac{1}{\pi\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\pi\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) \right]. \quad (1)$$

Parametr α představuje dopředný rozptyl, β rozptyl BSE a η poměr absorbované energie od BSE vůči PE (α , β , a r mají rozměr mm, η je bezrozměrné). Hlavním parametrem ovlivňujícím rozlišení je dopředný rozptyl elektronů, který závisí na urychlovacím napětí V_b (beam voltage) a na tloušťce exponovaného rezistu R_f (resist thickness); podle [7] jej lze vyjádřit jako efektivní průměr svazku d_f (forward beam diameter) empirickým vztahem

$$d_f = 0,9 * \left(\frac{R_f}{V_b} \right)^{1,5} \quad [\text{nm; mm, kV}]. \quad (2)$$

2.3 Modulační přenosová funkce

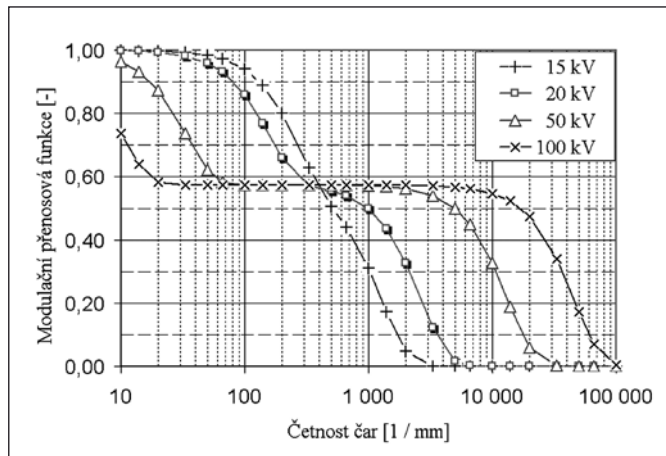
Pro přehledné zobrazení možností elektronové litografie při realizaci periodických čar se používá modulační přenosová funkce (MTF – Modulation Transfer Function) [6], která udává závislost rozdílu absorbované energie v exponovaných a neexponovaných oblastech na periodě exponovaných čar.

Model hustoty absorbované energie je aplikován na exponovanou geometrii struktury (v tomto případě soustava čar a mezer):

$$\text{MTF} = \frac{1}{1 + \eta} \left[\exp\left(-\frac{\pi^2 \alpha^2}{p^2}\right) + \eta \exp\left(-\frac{\pi^2 \alpha^2}{p^2}\right) \right]. \quad (3)$$

Struktura je charakterizována periodou čar p [mm], resp. četností čar $1/p$. Následující obrázek (obr. 2) ukazuje průběh MTF pro urychlovací napětí v rozsahu 15 až 100 kV.

Střední část křivky (perioda 1 μm , tedy 1 000 čar / mm) ukazuje situaci, kdy je dostatečný kontrast rozložení energie v exponovaných a neexponovaných oblastech. Pro dosažení velkého rozlišení (10 nm) je nutné vysoké urychlovací napětí svazku. Systém s urychlovacím napětím 15 kV je pro tloušťku rezistu 500 nm málo vhodný a použitelné rozlišení se pohybuje kolem periody 1,5 μm .

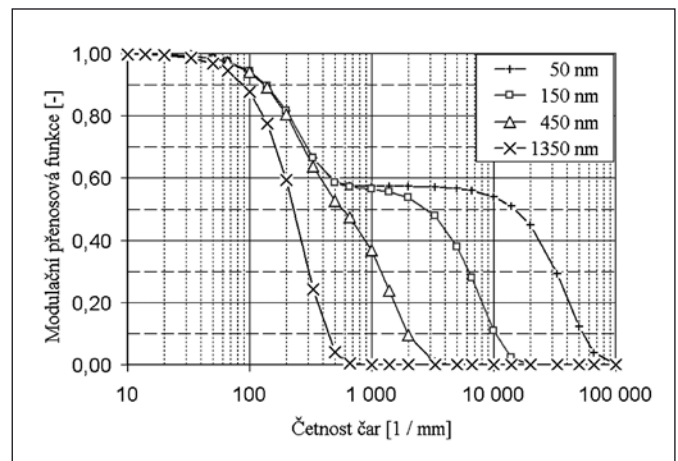


Obr. 2 Modulační přenosová funkce (viz text) pro různá urychlovací napětí a tloušťku rezistu 500 nm

Struktury s vyšším rozlišením lze realizovat v rezistu menší tloušťky. Jednou možností je expozice do tenkého až velmi tenkého rezistu (200 - 100, resp. 50 nm), druhou možností je expozice do rezistu tlustého (např. 1 μm), ale vyvolání rezistu se provede pouze v tenké vrstvě na povrchu rezistu. Tloušťku rezistu nelze snižovat libovolně. Obecně je nutno brát na zřetel požadavek na výšku reliéfu výsledné struktury.

Dosažitelné rozlišení litografu pracujícího na 15 kV je tedy prakticky dáno pracovní tloušťkou rezistu a pro jeho určení je možné orientačně použít následující obrázek (obr. 3).

Realizace struktur s rozlišením lepším než 100 nm je možná při tloušťce rezistu menší než 100 nm. Pro korektní vyvolání struktury je nezbytná vývojka s dostatečnou selektivitou (poměr rychlosti



Obr. 3 Modulační přenosová funkce (viz text) pro urychlovací napětí 15 kV a různé tloušťky rezistu

rozpouštění rezistu v oblastech exponovaných různou dávkou). Pro poměr dávek 75 : 25 (což odpovídá MTF – tedy rozdílu dávek – 50 %) může být poměr rychlosti rozpouštění 10:1 až 100:1.

2.4 Binární a reliéfní litografie

Při binární (klasické) litografii se vyvolání provádí do dna rezistové vrstvy, hrany čar jsou strmé, výsledkem může být např. chromová maska na skleněném substrátu nebo optická struktura. Tloušťka rezistu je v tomto případě dána požadavkem na výšku reliéfu nutnou pro následující operaci (leptání substrátu přes rezistovou masku při přenášení geometrie do pracovní vrstvy) nebo požadavkem na výšku reliéfu vhodnou pro optimální optické chování realizovaných struktur, např. naladění výšky reliéfu na $\lambda/4$ pro červené světlo ($\lambda = 640 \text{ nm}$) definuje požadovanou tloušťku struktury po vyvolání na 160 nm. Minimální tloušťka rezistu má ještě praktické omezení, při průběžných optických kontrolách substrátu je nutné pracovat s takovou tloušťkou, která má alespoň nějakou interferenční odezvu, aby byla odlišitelná od čistého substrátu (Si). Pro rezist PMMA s indexem lomu 1,5 je minimální tloušťka asi 40 nm.

V případě reliéfní litografie (označované rovněž greyscale lithography) není požadavek na vyvolání struktury do dna, ale cílem je realizace víceúrovňových nebo vyhlazených reliéfů. Takové typy reliéfů jsou významné pro aplikaci v oblasti optických struktur.

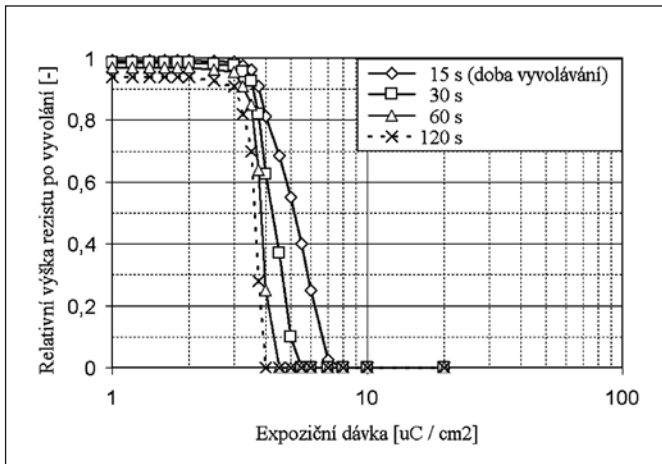
2.5 Technologie zpracování rezistu

Při vyvolávání pozitivního rezistu dochází k rozpouštění exponovaných oblastí. Rychlost rozpouštění rezistu závisí na dávce elektronů absorbované v daném expozičním elementu. Základními parametry soustavy rezist-vývojka je citlivost D_0 (minimální expoziční dávka potřebná pro vyvolání rezistu dané tloušťky) a kontrast γ , který je definován:

$$\gamma = \left(\log \frac{D_0}{D_1} \right)^{-1} \quad [; \mu\text{C}, \mu\text{C}]. \quad (4)$$

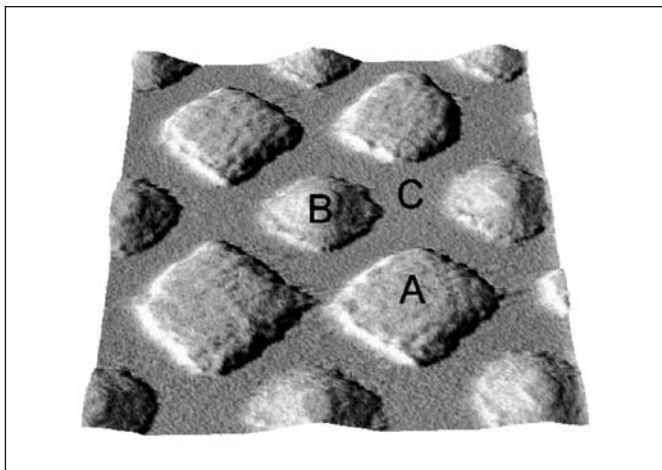
Pro struktury binární požadujeme vysoký kontrast, zatímco pro struktury reliéfní (víceúrovňové) by měl být kontrast relativně nízký. Čím vyšší je citlivost rezistu, tím menší dávka je potřebná k expozici.

Běžně používanou soustavou rezist-vývojka byla dosud v našich podmínkách soustava pozitivního rezistu PMMA (poly-methyl-metakrylát) a vývojky n-AAc (amylacetát). Tato soustava má pro dosažení vysokého kontrastu relativně nízkou citlivost. Proto jsme uvažovali o rezistu chemicky zesíleném (CAR – Chemically Amplified Resist), jehož citlivost by měla být výrazně lepší. Finálně použitý rezist Fuji (FEP-171) a vývojka TMAH splňují základní požadavky (obr. 4).



Obr. 4 Křivka citlivosti rezistu FEP tloušťky 200 nm

Kontrast soustavy při těchto podmínkách a době vyvolávání 30 s je 3,6 a její citlivost je 5,5 mC / cm². Technologický proces je poněkud komplikovanější, před nanesením rezistu je nutné nanést vrstvu promotoru adheze (bez něj dochází k utržení struktur od substrátu při odstředování vývojky) a po expozici je nutné vypékání (*post exposure baking*) dle podmínek výrobce rezistu [8]. Zajímavostí tohoto rezistu je negativní chování (v oblasti vysokých expozičních dávek se mění mechanismus expozice, který se projeví výrazným snižováním rychlosti rozpouštění). V případě rezistu FEP-171 k němu dochází při relativně nízké expoziční dávce (obvykle se toto negativní chování projevuje u expozičních dávek o dva až tři řády vyšších než je citlivost rezistu, zatímco v tomto případě je tento rozdíl asi jen jeden řád); výrobce tuto vlastnost nezmiňuje. Jednotlivé oblasti na obr. 5 jsou A: neexponovaná oblast, B: negativní chování rezistu v oblasti expozice primárními elektrony (vysoká dávka) a C: pozitivní chování rezistu v oblasti expozice zpětně odraženými elektrony (běžná dávka).



Obr. 5 Negativní chování rezistu FEP při vysoké dávce (viz text), křížová mřížka s periodou 3 mm, razítka 1,5 μm

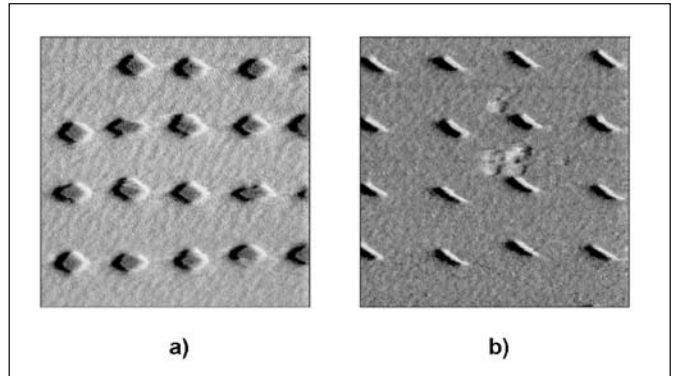
2.6 Kontrola a vyhodnocení struktur

Mikroskop s rastrující sondou (SPM – *Scanning Probe Microscope*), obvykle též AFM – *Atomic Force Microscope*) lze použít ve dvou fázích vyhodnocení vytvářených struktur. Během kontroly procesu vyvolávání rezistu je použití AFM nezbytné (pomocí optické mikroskopie je tato kontrola velmi obtížná až nemožná; pomocí rastrovací elektronové mikroskopie – SEM – principiálně nemožná, dojde k expozici rezistu). Finální zobrazení vytvořených struktur je možné pomocí AFM případně SEM.

3. DOSAŽENÉ PARAMETRY

3.1 Tvarování svazku

V zásadě existují dvě možnosti zmenšení rozměru tvarovaného svazku. První možností je zjemnění D/A převodníku tvarovacího systému – zmenšení minimálního segmentu, který se vybírá z primárního svazku. Tento přístup je sice poměrně jednoduchý, ale něčím požadavek na maximální rychlost expozice: zmenšením velikosti segmentu se rovněž zmenšuje proud v tomto segmentu a musíme používat delší expoziční časy, protože nedokážeme současně zvýšit směrovou hustotu proudu ze zdroje elektronů. Druhé řešení je mnohem náročnější a spočívá ve výraznějším zmenšení obdélníkového svazku v oblasti zmenšovací čočky litografu tak, jak bylo popsáno dříve. Obr. 6 ukazuje zmenšená a otočená razítka.



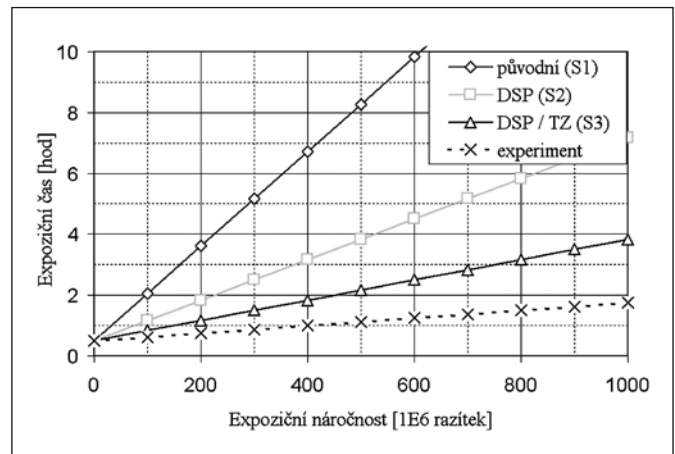
Obr. 6 AFM snímky ukazující otočené a zmenšené razítka, rozteč bodů 1 200 nm: a) čtvercové razítka 500 x 500 nm, b) obdélníkové razítka 750 x 250 nm

3.2 Komunikační modul

Úpravou komunikačního modulu (*DSP modul, Digital Signal Processing*) mezi expozičním počítačem a vlastní elektronikou litografu bylo dosaženo větší propustnosti datového kanálu (snížení režijní doby elementární expozice). Praktickou úsporu expozičního času je možno demonstrovat na relativně jednoduché expozici (100 milionů razítek), kdy se režijní čas zkrátí z 1,1 hodiny na 13 minut. Praktické expozice jsou v rozsahu 300 - 900 milionů razítek, což odpovídá ploše několika cm² (v závislosti na jemnosti struktury).

Význam zrychlení datového přenosu je možné ukázat na následujícím obrázku (obr. 7). Zatímco v původním uspořádání byla doba potřebná k expozici 0,6 x 10⁹ razítek asi 10 hodin, v případě upraveného systému se celková expoziční doba výrazně zkracuje.

Tento příklad ukazuje strukturu velikosti 25 x 25 mm různé složitosti realizovanou po expozičních polích 2 mm (odtud konstantní režie na pojezdy stolu 30 minut).



Obr. 7 Expoziční doba v závislosti na složitosti expozice (viz text)

3.3 Vychylování svazku

Ke zjemnění vychylování svazku (pod 100 nm) je možné použít tři přístupy: zvýšení rozlišení D/A převodníku vychylování, využití kroku 70 nm v diagonálním směru vychylování, softwarová korekce pozice razítka pomocí dvojexpozice s odpovídajícím nastavením časů.

Prakticky byly vyzkoušeny všechny tři přístupy. Na druhou stranu došlo k relativnímu zvýraznění šumu systému; tento šum se povedlo částečně zmenšit úpravou kabeláže a elektroniky. Aktuální změřená hodnota šumu (σ) v osách X, resp. Y je 50 nm, resp. 80 nm. Další zlepšování šumových vlastností je předmětem dalšího dlouhotrvajícího úsilí.

4. SROVNÁNÍ EXPOZIČNÍ RYCHLOSTI

4.1 Expoziční rychlost

Expoziční rychlost (nebo také rychlost zápisu) je významným parametrem litografického zařízení. Často však není výrobcem přímo udávána, a proto je srovnání různých expozičních systémů nesnadnou záležitostí. Pokusili jsme se o alespoň kvalitativní porovnání různých systémů s využitím dostupných údajů. Pro srovnání se systémem BS 600 jsou použity dostupné údaje o litografech Hitachi HL-700F (dále označujeme G1 – *Gaussian Beam*) a Raith e-Line (G2), viz *tabulka I*. Pro systém BS 600 jsou uvedeny tři varianty: původní (S1 – *Shaped Beam*), nové rychlejší DSP (S2) a režim zmenšeného svazku TZ (S3).

Za základní parametr pro určení zápisové rychlosti s_w (*writing speed*) lze považovat proud v expozičním svazku I . Čas t potřebný pro vyplnění dané plochy A_E (*exposed area*) při požadované expoziční dávce D (*exposure dose*) lze vyjádřit z definičních vztahů pro dávku

$$D = Q / A_E \quad [\text{mC} / \text{cm}^2; \mu\text{C}, \text{cm}^2] \quad (5)$$

a náboj Q

$$Q = It \quad [\mu\text{C}; \mu\text{A}, \text{s}]. \quad (6)$$

Vzhledem k tomu, že nemá valný smysl exponovat jednotlivou plochu, uvažujeme ještě zaplnění plochy p [%] prvku, jehož celková plocha je A_0

$$A_E = A_0 p / 100 \quad [\text{cm}^2; \text{cm}^2, \%]. \quad (7)$$

Pro zápisovou rychlost s_w pak můžeme psát

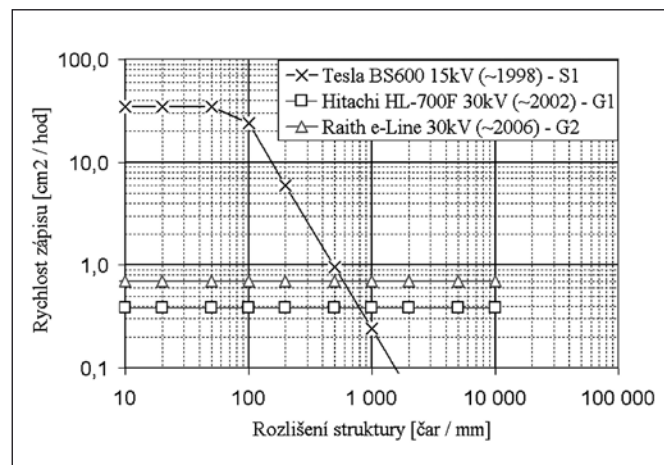
$$s_w = \frac{A_0}{t / 3600} = 3600 \frac{I}{D} \frac{p}{100} \quad (8)$$

[cm² / hod; cm², s; nA, nC / cm², %].

Zvolená jednotka [cm²/hod.] má praktický význam pro vyjádření plochy běžně exponovaných prvků v reálném čase. Tato maximální rychlost zápisu je dále omezena rychlostí přenosu dat mezi řídicím a expozičním modulem. Zhruba je možno ji vyjádřit jako rychlost modulu DSP. Rychlosti tohoto modulu pro vybrané systémy shrnuje *tabulka I*.

4.2 Expoziční rychlost pro systém rezist/vývojka s nízkou citlivostí – velká dávka

Základní porovnání rychlosti systémů s gaussovským svazkem a systémů s tvarovaným svazkem – při expoziční velkou dávkou (75 $\mu\text{C} / \text{cm}^2$) – ukazuje následující obrázek (*obr. 8*). Jak vyplývá z principu systémů pracujících s gaussovským svazkem, rychlost zápisu je prakticky konstantní a nezávislá na rozlišení. Tyto systémy jsou určeny pro výzkumné účely, kde rychlost zápisu není stěžejním parametrem. S vývojem nových katod, které jsou schopny emitovat větší proud, se zápisová rychlost zvyšuje (e-Line).

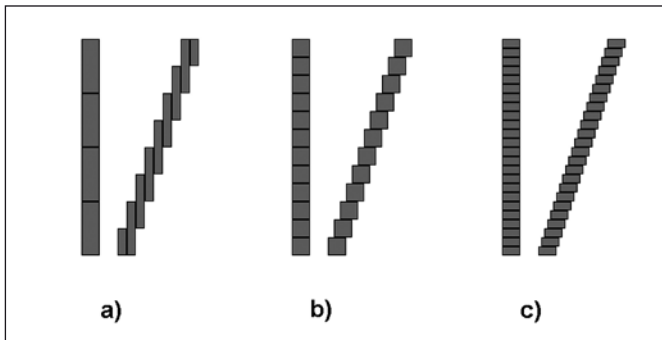


Obr. 8 Porovnání rychlosti zápisu (velká dávka)

Systém s tvarovaným svazkem (parametry zde uvedené platí pro systém BS 600 po úpravách do roku 1998 – systém S1) dosahuje při nízkém rozlišení maximální hodnoty rychlosti zápisu, což je dáno maximálním využitím proudu primárního svazku. Se zvyšujícím se rozlišením je nutno používat razítka menších rozměrů a rychlost expozice se výrazně snižuje. V grafu uvažujeme pouze čtvercová razítka. Pro jednotlivé případy topologie struktury může být zápisová rychlost vyšší (podélně podlouhlá obdélníková razítka ve vodorovných a kolmých čarách) i nižší (obdélníková razítka vyplňující šikmé čáry a obecné plochy), viz *obr. 9*.

Tabulka I. Vybrané parametry jednotlivých systémů

		systém				
		BS 600 (viz text)			HL700-F	e-Line
parametr		S1	S2	S3	G1	G2
urýchlovací napětí	[kV]	15	15	15	30	30
rychlost DSP	[MHz]	0.025	2	2	100	10
proud ve svazku	0,01 μm^2	0,1	0,1	0,4	4	<40
	1 μm^2	10	10	40		
	10 μm^2	100	100	400		
krok vychylování	[nm]	100	100	50	20	50
min dávka	[$\mu\text{C} / \text{cm}^2$]	40	0,5	2	10	75



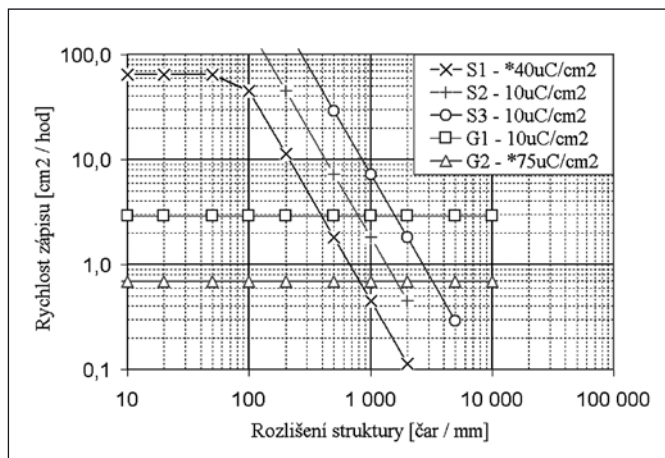
Obr. 9 Způsoby zápisu čáry: a) podélně podlouhlá razítka, b) čtvercová razítka, c) příčně podlouhlá razítka

Vzhledem k relativně vysoké expoziční dávce není v obr. 8 patrné omezení rychlosti zápisu vlivem omezené rychlosti DSP. Je zřejmé, že takovéto systémy s gaussovským svazkem nelze prakticky použít pro expozice velkoplošných masek (např. 100 cm²). Prezentovaný systém s proměnným svazkem (S1) je možno použít pro vytváření takových masek jen v případě, že významná část plochy masky je v malém rozlišení a jen nepatrná část (např. 1 %) v rozlišení vysokém (např. lepším než jeden mikrometr).

4.3 Expoziční rychlost pro systém rezist/vývojka s vysokou citlivostí – malá dávka

Pro dané expoziční zařízení je nejjednodušším způsobem zvýšení rychlosti zápisu použití citlivějšího rezistu. Snížením nutné expoziční dávky dojde ke zkrácení času pro elementární expozici. Obr. 10 ukazuje takový případ – expoziční dávka je snížena na 10 μC / cm². U systému G1 dojde k očekávanému zvýšení rychlosti. Systém G2 má omezenou rychlost DSP, rychlost zápisu zůstává stejná jako v případě vysoké dávky. V případě systému s tvarovaným svazkem (S1) dojde k mírnému zvýšení rychlosti (opět vlivem rychlosti DSP). Upravená varianta S2 již umožňuje zcela využít snížení expoziční dávky. Poslední varianta S3 pak umožňuje další zvýšení rychlosti díky vyššímu proudu v tvarovaném svazku.

S využitím vyšší citlivosti rezistu je tedy zápisová rychlost systémů G1, S2 a S3 několik cm²/hod při rozlišení 500 nm (1000 čar/mm), což je důležité pro velkoplošné struktury.



Obr. 10 Porovnání rychlosti zápisu (malá dávka)

4.4 Expoziční rychlost při reliéfní litografii – malá expoziční dávka

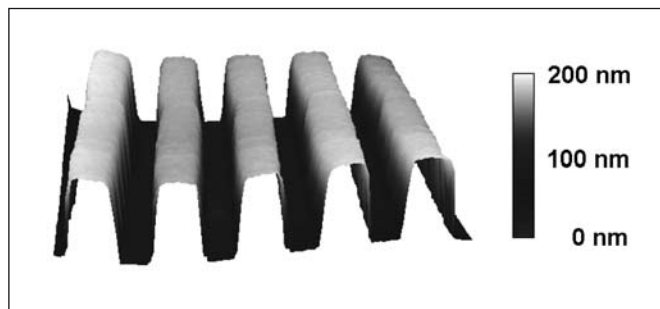
Při reliéfní (víceúrovňové) litografii se dále zintenzivňuje požadavek na snížení minimální dávky, neboť zápis jednotlivých úrovní je realizován pomocí zlomků dávky základní. Lze ukázat, že pro takovéto struktury je výhoda systému s tvarovaným svazkem

ještě markantnější. Například [9] uvádí 8 hodin jako dobu potřebnou pro zápis pravidelné čtyřúrovňové struktury s četností čar 570 mm⁻¹ a celkovém rozměru 5 x 5 mm (Leica LION LV1). Tento údaj odpovídá rychlosti 0,03 cm² / hod, což je o 2 řády nižší rychlost než jaké lze dosáhnout se systémem S2 resp. S3 (viz obr. 10).

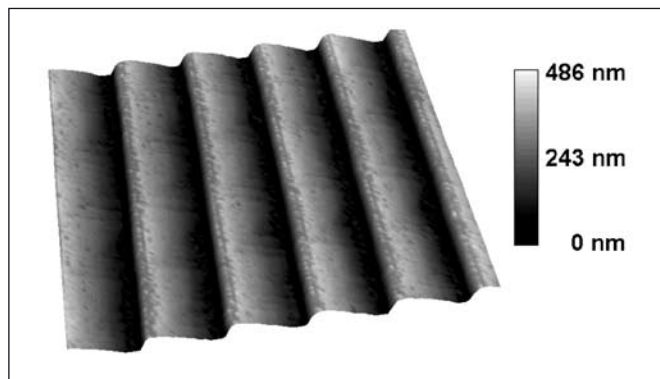
5. REALIZOVANÉ STRUKTURY

Příklad **binární struktury** ukazuje následující obrázek (obr. 11). Jedná se o mřížku s periodou 1 200 nm realizovanou ve vrstvě rezistu FEP tloušťky 200 nm.

Na dalším obrázku obr. 12 je příklad **reliéfní struktury** pro optickou aplikaci. Jedná se o mřížku s asymetrickým reliéfem (*blazed grating*) s periodou 4 μm a hloubkou asi 500 nm.



Obr. 11 Binární mřížka 1 200 nm realizovaná v rezistu FEP tloušťky 200 nm



Obr. 12 Reliéfní struktura (viz text), perioda 4 μm

ZÁVĚR

Článek seznamuje s výsledky dosaženými při úpravách elektronového litografu s tvarovaným svazkem. Pomocí úprav expozičního systému i změny rezistové technologie bylo dosaženo znatelného zlepšení rozlišení realizovaných struktur i zvýšení zápisové rychlosti. Čtyřnásobné zvýšení rychlosti expozice bylo dosaženo zvýšením proudové hustoty v razítku a zrychlením datového přenosu.

Úspěšnost zmíněného přístupu lze rovněž ukázat na skutečnosti, že v současné době (rok 2007) jsou na území ČR využívána tři zařízení typu BS 600 (v roce 2000 to byl pouze jeden systém).

Tento článek se vztahuje k výzkumnému záměru č. AV0 Z20650511: Rozvoj experimentálních metod studia fyzikálních vlastností hmoty a jejich aplikací v pokročilých technologiích. Práce byla rovněž částečně podpořena Grantovou agenturou ČR pod číslem 102/05/2325: Elektronová litografie pro přípravu nanostruktur.

Literatura

[1] kolektiv: Elektronový litograf BS 600 a jeho technologické aplikace, editor: MATĚJKA, F., Zpravodaj ČSAV, ÚPT Brno, 1988, 45 stran.

- [2] KOLAŘÍK, V., *et al.*, Towards the sub-100 nm e-beam writing system. Conference Nano '05. ISBN 80-214-3044-3. Brno 2005.
- [3] DELONG, A. – KOLAŘÍK, V. (*sr.*): Field-emission gun for microengineering application. J. Phys. E: Sci. Instrum. **22** (1989), 612-614.
- [4] LENCOVÁ, B. – ZLÁMAL, J.: The development of EOD program for the design of electron optical devices. *Microscopy and Microanalysis*. 2007, vol. **13**, sup. 3, ISSN 1431-9276, pp. 2-3.
- [5] MATĚJKA, F. – HORÁČEK, M. – LENCOVÁ, B. – KOLAŘÍK, V.: Reducing the Size of a Rectangular-Shaped Electron Beam in E-Beam Writing System, Proc. of the 8th Multinational Congress on Microscopy, Prague, Czech Republic, 17-21 June, 2007.
- [6] OWEN, G.: Methods for Proximity Effect Correction in Electron Lithography, Journal Vacuum Science Technology B **8** (6), Nov/Dec 1990, 0734-211X/90/061889-04, pp. 1889-1892.
- [7] MCCORD, M. A. – ROOKS, M. J.: Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, Volume 1: Microlithography, Chapter 2, SPIE, (available at http://www.cnf.cornell.edu/cnf_spietoc.html – last download 1.10.2007), pp. 139-249.
- [8] FUJIFILM Arch Co., Ltd., FEP-171 EB positive Resist for mask process, Technical Data, 2002.
- [9] LAAKKONEN, P. *et al.*, Electron-Beam-Fabricated Asymmetric Transmission Gratings for Microspectroscopy, Applied Optics, Vol. **39**, No. 19, 1 July 2000, pp. 3187-3191.

Doc. Ing. Vladimír Kolařík Ph.D. (tel.: 541 514 336, e-mail: kolariq@isibrno.cz), Mgr. František Matějka, prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc., Mgr. Svatopluk Kokrhel, Ph.D., Ing. Miroslav Horáček, Ph.D., Mgr. Tomáš Radlička, Ph.D., Mgr. Michal Urbánek, Ing. Lukáš Daněk, Ústav přístrojové techniky, v.v.i., Akademie věd České republiky, Královopolská 147, 612 64 Brno, <http://www.isibrno.cz>, fax: 541 514 402.

Josef LAZAR, Ondřej ČÍP, Petr JEDLIČKA, Břetislav MIKEL, Bohdan RŮŽIČKA, Zdeněk BUCHTA, Jan HRABINA, Radek ŠMÍD, Martin ČÍŽEK
Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno

Laboratoř interferometrie a vysoce koherentních laserů

Článek podává přehled nejnovějších výsledků skupiny Koherentních laserů a interferometrie Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Nové výsledky se týkají použití stabilizovaných polovodičových laserů pro hyperpolarizaci vzácných plynů, realizace nových laserových systémů pro metrologii optických frekvencí na bázi molekulárního jódu, využití optického hřebenového syntezátoru v metrologii délek a v neposlední řadě oblasti interferometrických měření délek s velkým rozlišením. Článek také pojednává o hlavních tématech výzkumu, která jsou nyní a budou předmětem zájmu skupiny v blízké budoucnosti.

ÚVOD

Skupina Koherentních laserů a interferometrie na Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně byla prezentována na stránkách Jemné mechaniky a optiky v nedávné době, v lednovém čísle roku 2006. V následujícím shrnutí se zaměříme především na výsledky dosažené a prezentované v období uplynulých dvou let. Tradiční zaměření skupiny je na metrologické aplikace laserů, konstrukci speciálních laserů a laserových systémů především s vysokou koherencí, interferometrická měření délek, výzkum metodiky v interferometrii se zaměřením na velké rozlišení a v neposlední řadě na nanometrologii. S tím souvisí i téma refraktometrie – měření indexu lomu vzduchu nezbytné pro přesná interferometrická měření. Prohloubili jsme spolupráci s Českým metrologickým institutem, nejen s Laboratořemi primární metrologie v Praze, ale i pracovištěm ČMI v Brně, kde sídlí generální ředitelství. Dále v rámci projektů podporovaných ministerstvem průmyslu a obchodu orientovaných na průmyslový výzkum jsme navázali kontakty s firmou Mesing spol. s r. o. vyrábějící speciální a jednoúčelové měřicí přístroje především pro automobilový průmysl. Tradičně směřují naše vazby též na Vysoké učení technické v Brně, na Fakultu elektrotechniky a komunikačních technologií a na Fakultu strojního inženýrství, odkud pochází naši studenti doktorandského studia. Naše skupina

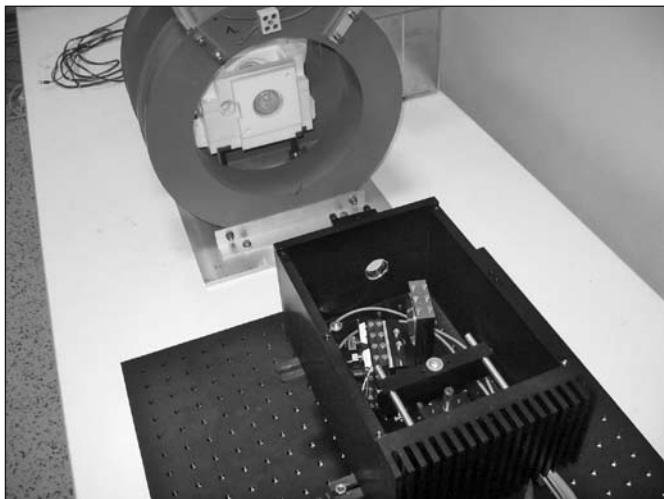
byla v prosinci roku 2007 zasažena velkou ztrátou – úmrtím dlouholetého vedoucího našeho oddělení a zakladatele oboru na našem ústavu, Ing. Františka Petrů, DrSc. a úmrtím našeho zkušeného skláře pana Richarda Vašíčka.

STABILIZOVANÉ POLOVODIČOVÉ LASERY

Na předchozí zkušenosti s návrhem a konstrukcí jednofrekvenčních stabilizovaných polovodičových laserů navázaly nové projekty [1,2]. Mezioborovým tématem se společně s kolegy z oddělení Magnetické rezonance a bioinformatiky stala příprava a využití hyperpolarizovaných vzácných plynů. Jedná se o kontrastní látku pro experimenty magnetické rezonance (MR), spektroskopie i tomografie s velkým potenciálem v medicíně a materiálových vědách. Hyperpolarizované plyny, především helium a xenon, je možné detekovat v MR systému s poměrem signál/šum až o několik řádů vyšším, než je tomu u ostatních látek, navíc plynné skupenství nabízí možnost zobrazovat prázdné tělní dutiny nebo v oblasti materiálového výzkumu např. charakter poréznych materiálů.

Příprava hyperpolarizovaného xenonu probíhá prostřednictvím výměny spinu s atomy vhodného média, nejčastěji rubidia opticky čerpaného výkonným laserem na vlnové délce 795 nm. V naší

skupině jsme se věnovali vývoji laserového systému právě pro toto efektivní čerpání. Pilotní experimenty pro ověření principu a měření základních parametrů procesu byly prováděny s laditelným kontinuálním Ti:Sa laserem, který není příliš vhodným pro provoz mimo laboratorní prostředí. Vlnová délka 795 nm přímo vybízí k použití polovodičových laserů, jichž je v této oblasti spektra velký výběr. Snažili jsme se navrhnout systém, který by byl optimalizován pro dosažení co nejvyšší účinnosti optického čerpání, spíše než jít cestou „hrubé síly“ s velmi výkonným laserem. Znamenalo to vyřešit zúžení spektrální šířky polovodičového laseru a zajistit stabilitu vlnové délky. Výsledkem tohoto projektu je tak kompaktní laser s externím rezonátorem (obr. 1) na bázi výkonové laserové diody typu „broad stripe“, pro který jsme navrhli systém optimalizace optické zpětné vazby [3,4].

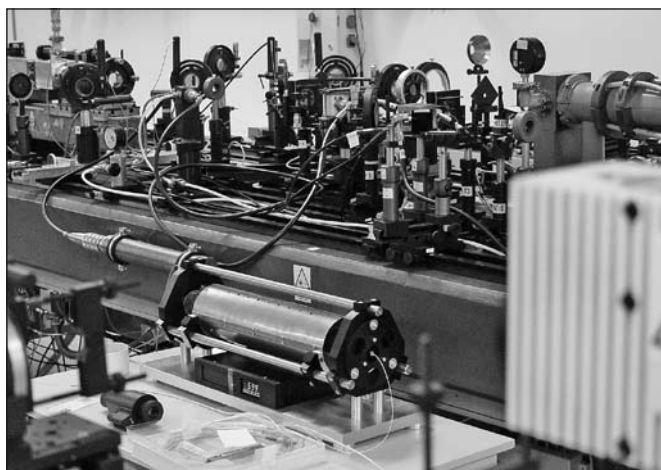


Obr. 1 Kompaktní výkonový polovodičový laser s externím rezonátorem pro optické čerpání rubidia a přípravu hyperpolarizovaného xenonu

Pro kontinuální provoz aparatury přípravy hyperpolarizovaného xenonu jsme navrhli a ověřili sestavu s výkonovým polem laserových diod, pro něž se uspořádání s externím rezonátorem neukázalo jako vhodné. Nicméně se podařilo dosáhnout technikou externího „injection locking“ až desetinásobného zvýšení výkonové spektrální hustoty na požadované vlnové délce, což bylo v souvislosti s polem laserových diod unikátní řešení.

V oblasti stabilizovaných laserů jsme v uplynulém období navázali spolupráci s badatelským centrem PALS (Prague Asterix Laser System) v Praze, jehož hlavním předmětem experimentální činnosti je výkonový pulsní laserový systém schopný generovat laserový svazek s výstupní energií v jednotlivém pulzu až 1 kJ. V rámci projektu přestavby laseru a zvýšení výkonu laseru na úroveň pettawattových pulzů metodou OPCPA (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification) a zlepšení časování trasy laserového svazku jsme pro toto pracoviště navrhli a realizovali polovodičový stabilizovaný laser s optovláknovým výstupem („front end“).

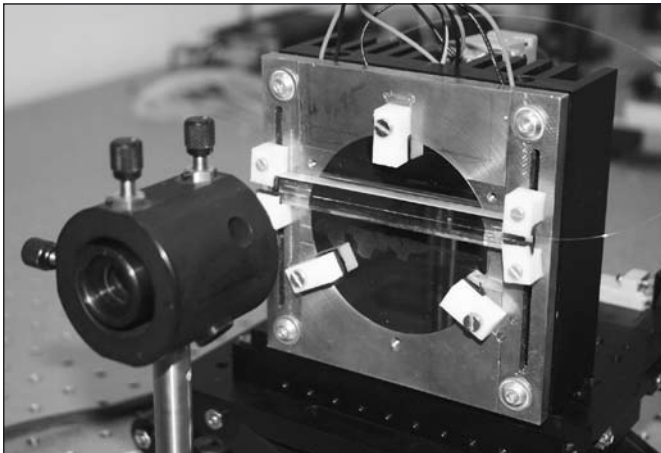
Náš laserový systém (obr. 2) využívá jednofrekvenční laserové diody typu DFB se stabilizací na tepelně disociované páry jodu. Stabilizace je tedy odvozena od stejných absorpčních čar, které využívá pro svůj provoz výkonový pulsní laser pracoviště PALS. Pro tento projekt jsme navrhli a realizovali termostatizovanou a vyhřívanou absorpční kyvetu a elektronický systém výběru absorpční čáry včetně stabilizace vlnové délky podle požadavků pracoviště PALS. Systém máme realizován jako autonomní a umožňuje plně automatizovaný provoz [5,6]. V tomto výzkumném projektu našly uplatnění naše zkušenosti s velmi citlivými laserovými diodami a konstrukcí obslužné elektroniky s vysokou mírou zabezpečení proti elektromagnetickému, zvláště impulznímu rušení [7]. V prostředí výkonového pulzního laseru čerpaného masivními výboji



Obr. 2 Stabilizovaný laserový systém – vláknový „front end“ pro buzení pulzního laseru na pracovišti PALS

v xenonových výbojkách je toto více než opodstatněné. Vlastní řízení, zpracování signálu a regulace vlnové délky je plně digitální včetně autodiagnostiky s možností dálkové správy.

Jak jsme již uvedli, náš tým se v minulosti velmi intenzivně věnoval výzkumu zvyšování koherence záření laserových diod pomocí externího rezonátoru. Drtivá většina těchto prací byla orientována na externí rezonátor, jehož klíčovou součástí je vysoce selektivní filtr – optická difrakční mřížka, která vybírá určitou vlnovou délku dopadajícího záření a toto záření směřuje následně zpět do aktivního prostředí laserové diody. Díky současnému rozvoji polovodičových laserů pro oblast tzv. vláknové optiky je však výhodnější, aby tento externí rezonátor byl realizován přímo ve vlákně, do kterého je vyváděno záření z laserové diody. Naskytá se tak možnost, že zvýšení koherence záření laserové diody lze realizovat externím rezonátorem vytvořeným přímo ve vlákně, tedy pomocí tzv. vláknové mřížky. Jeden z našich dalších projektů je orientován právě na využití vláknových mřížek jako prvku selektivní zpětné vazby laserů s optovláknovým výstupem. V rámci tohoto projektu jsme se zaměřili i na výzkum technologie výroby vláknových mřížek (obr. 3) navržených a optimalizovaných pro tyto aplikace [8].



Obr. 3 Sestava pro expozici vláknové mřížky

METROLOGIE OPTICKÝCH FREKVENČÍ NA BÁZI MOLEKULÁRNÍHO JODU

Saturačně absorpční spektroskopie molekulárního jodu je ve viditelné oblasti spektra základem metrologie optických frekvencí. Na její bázi jsou postavené He-Ne laserové etalony na vlnové délce 633 nm používané ke kalibraci vlnové délky stabilizovaných He-Ne laserů pro laserovou interferometrii [9,10,11]. Stejnou techniku využívají dnes i stále rozšířenější Nd:YAG lasery pracující se zdvojnásobením optického kmitočtu na vlnové délce 532 nm. Zvláště tyto lasery s nízkým šumem a s vlnovou délkou, která v koincidenci s absorpčními čarami nabízí vysoký poměr signál/šum, umožňují konstrukci laserových etalonů délky s relativní stabilitou blízkou hodnotě 10^{-14} . Naše pracoviště je etablováno v metrologických kruzích jako výrobce kyvet plněných jodem o vysoké čistotě. Kvalita plnění a čistota jodu ovlivňuje nejen dosažitelný poměr signál/šum v detekčním řetězci, ale ovlivňuje také frekvenční posuv absorpčních čar. Snažíme se tedy ještě dále zkvalitnit naši technologii přípravy kyvet a poznat vliv jednotlivých kroků při plnění na výslednou čistotu.

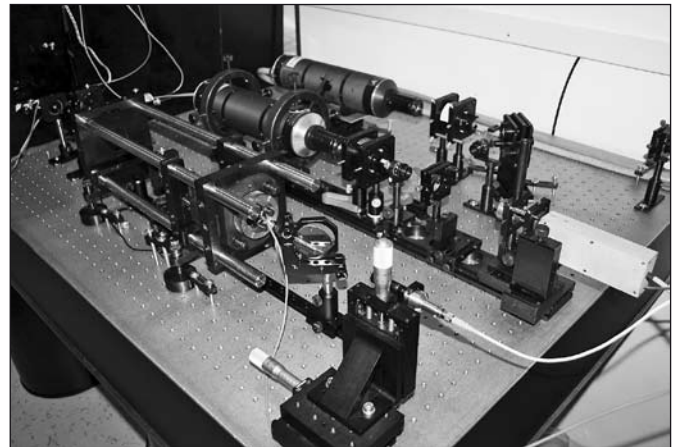
V rámci jednoho z našich projektů jsme se proto zaměřili na výzkum vlivu nečistot na absolutní přesnost jodem stabilizovaných laserů a na ověřování čistoty jodu různými nezávislými metodami. Sestavili jsme aparaturu pro měření úrovně indukované fluorescence a její vyhodnocení Stern-Vollmerovou metodou používanou v metrologické praxi a vylepšili jsme detekční systém o kompenzace vlivu kolísání výkonu a výkonové spektrální hustoty čerpacího laseru. Významně se tak podařilo zlepšit reprodukovatelnost měření. Pro ověření frekvenčního posuvu způsobeného nečistotami v jodu jsme použili sestavy se dvěma Nd:YAG lasery s referenční a měřicí kyvetou a detekcí rozdílového kmitočtu [12].

VYUŽITÍ OPTICKÉHO HŘEBENOVÉHO SYNTÉZÁTORU V METROLOGII DÉLEK

Pulzní lasery generující sekvenci pulzů o délce v řádu několika femtosekund už si našly cestu do mnohých metrologických laboratoří a úspěšně slouží k transferu relativní stability radiofrekvenčních etalonových oscilátorů (atomových hodin) do spektra optických kmitočtů. Umožňují tak kalibraci stabilizovaných laserů „absolutně“, to znamená přímo určením hodnoty optické frekvence laseru s přesností odvozenou např. od cesiových hodin. Význam takovýchto syntézátorů hřebene optických frekvencí je ovšem daleko širší, lze očekávat, že v opačném směru, tj. při transferu relativní stability z optické do radiofrekvenční oblasti pomohou vytvořit „optické hodiny“, tedy zdroj velmi přesného radiofrekvenčního kmitočtu odvozeného od etalonu optické frekvence. Mezinárodní výzkum vysoce stabilních laserů k tomu spěje.

V naší skupině jsme v této oblasti zaměřili na využití optického syntézátoru v nanometrologii délek, čímž jsme navázali na naše

předcházející experimenty s převodem délky na optický kmitočet. Sestavili jsme experiment (obr. 4), v němž je použit Fabry-Perotův rezonátor stabilizovaný na rezonanční maxima odvozená od jednotlivých komponent hřebene optického syntézátoru. Díky možnosti v určitém rozsahu přeladovat opakovací kmitočet a stabilizovat jeho hodnotu s návazností na základní etalon frekvence se tak naskytá možnost realizovat polohování referenční plochy takového rezonátoru. Výsledkem je pak geometrická délka definovaná délkou rezonátoru, jejíž relativní nejistota je odvozena např. přímo od cesiových hodin [13].

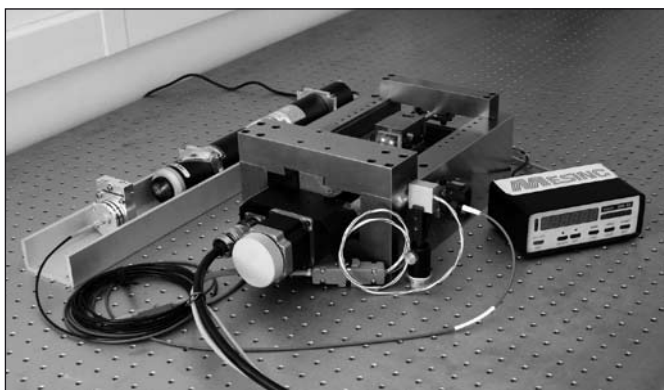


Obr. 4 Experimentální uspořádání rezonátoru s odvozením přesnosti posuvů referenční plochy od optického hřebenového syntézátoru

INTERFEROMETRICKÉ MĚŘENÍ DÉLEK S VELKÝM ROZLIŠENÍM

Také výzkum v oblasti laserové interferometrie pro přesné odměřování délek je stále významnou náplní práce naší skupiny [14,15,16]. Rozvoj nových interferometrických metod je v současnosti motivován mimo jiné zvyšující se poptávkou z průmyslové sféry, zejména z automobilového průmyslu. V loňském roce jsme s našimi partnery z Českého metrologického institutu a z firmy MESING, s.r.o. zahájili nový projekt, jehož cílem je výzkum speciálních interferometrů pro kalibrace indukčnostních snímačů. Indukčnostní snímače patří mezi velmi dobré elektromechanické odměřovače délky s absolutní stupnicí, avšak mají částečně nelineární průběh. Díky své relativně nízké ceně jsou však mohutně nasazovány v kontrolních stanicích výrobních linek pro výroby přesného strojírenství. Aby bylo možno s těmito snímači dosáhnout přesnosti měření v řádu až desítek nanometrů, je nezbytné, aby tyto snímače byly kalibrovány s přímou návazností na normál délky, tj. frekvenčně stabilizovaný laser.

V rámci uvedeného projektu jsme již realizovali pilotní optickou soustavu laserového interferometru, o jehož měřicí zrcadlo (pomyšlý měřicí hrot) se při kalibraci opírá měřicí hrot indukčnostního snímače. Kalibrace pak probíhá vzájemným porovnáním údajů o naměřené délce z interferometru a z vyhodnocovací elektroniky indukčnostního snímače. Polohování měřicího zrcadla interferometru máme zajištěno vysoce stabilním lineárním vedením s kulíčkovým šroubem. Vzhledem k tomu, že i takto stabilní vedení způsobuje při polohování zrcadla úhlové odchylky od osy měření, vyvinuli jsme netradiční metodu aktivní stabilizace polohy měřicího zrcadla. Ta spočívá v tom, že případné úhlové odchylky měřicího zrcadla od osy měření detekujeme změnou polohy laserových svazků v interferometru pomocí souboru optických detektorů a následně kompenzujeme tyto odchylky řízením polohy zrcadla pomocí piezoelektrických měničů. Tento proces probíhá v reálném čase, ve zpětné vazbě. Předpokládáme, že díky této metodě a dále možnosti nastavit individuálně převodní charakteristiku každého testovaného indukčnostního snímače bude dosaženo přesnosti snímače v požadovaném řádu, tj. desítek nanometrů (obr. 5).



Obr. 5 Interferometrický kalibrátor určený pro indukčnostní snímače polohy

VÝHLED DO BLÍZKÉ BUDOUCNOSTI

Naše úsilí na poli metrologie malých vzdáleností se dočkalo dalšího využití v rámci projektu směřovaného do dnes aktuální nanometrologie. Ve spolupráci s Českým metrologickým institutem a Přírodovědeckou fakultou Masarykovy univerzity pracujeme na projektu nanometrologie využívající metod rastrovací sondové mikroskopie. Náš příspěvek v tomto projektu spočívá v návrhu interferometrického systému odměřujícího polohu nanopolohovacího stolku mikroskopu s lokální sondou. Tímto způsobem bude měření mikroskopem povýšeno na metrologickou úroveň díky zajištění jeho přímé návaznosti na primární etalon vlnové délky (frekvenčně stabilizovaný laser). Odměřování stolku ve všech šesti stupních volnosti navíc zajistí i eliminaci všech nepřesností způsobených odchylkami od přímosti pohybu.

Na poli refraktometrie navazujeme na předchozí výsledky a pracujeme na systému, který umožní přímé absolutní měření indexu lomu vzduchu opět rezonátorovými metodami, bez nutnosti evakuace při každém měření [17]. Takováto měřicí technika by výrazně přiblížila měření indexu lomu vzduchu průmyslové praxi a je možné předpokládat, že by mohla v budoucnosti nahradit nepřímé určování indexu lomu založené na měření parametrů atmosféry a na empirické Edlénově formuli.

ZÁVĚR

Uvedený stručný přehled si nečiní a ani nemůže činit nároky na vyčerpávající zprávu o veškerém metrologickém výzkumu v našem oddělení. Nicméně hlavní trendy nebyly opomenuty a úsilí skupiny Oddělení koherenční optiky Ústavu přístrojové techniky AV ČR je zmíněno v příslušném kontextu.

Poděkování

Aktuální výsledky byly dosaženy díky podpoře projektů: GA AV ČR IAA200650504, AV ČR KAN311610701, MŠMT 2C06012, GA ČR GA102/07/1179, MPO FT-TA3/133, MPO 2A-1TP1/127, GA AV ČR KJB200650503, AV0 Z20650511.

Literatura

- [1] J. Lazar, O. Číp, P. Jedlička: Tunable extended-cavity diode laser stabilized on iodine at $\lambda = 633$ nm. *Applied Optics* 39, 3085-3088 (2000)
- [2] A. Zarka, A. Abou-Zeid, D. Chagniot, J.-M. Chartier, O. Číp, J. Cliche, C. Edwards, F. Imkenberg, P. Jedlička, B. Kabel, A. Lassila, J. Lazar, M. Merimaa, Y. Millerioux, H. Simonsen, M. Tetu, and J. Wallerand: International comparison of eight semiconductor lasers stabilized on $^{127}\text{I}_2$ at $\lambda = 633$ nm. *Metrologia* 37, 329-339 (2000)
- [3] Z. Buchta, O. Číp, J. Lazar: High-power extended cavity laser optimized for optical pumping of Rb. *Meas. Sci. Technol.* 18, N77-N80 (2007)
- [4] Z. Buchta, J. Rychnovský, J. Lazar: Optical pumping of Rb by Ti:Sa laser and high-power laser diode. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 8, 350-354 (2006)
- [5] J. Lazar, O. Číp, B. Růžička: The design of a compact and tunable extended-cavity semiconductor laser. *Meas. Sci. Technol.* 15, N6-N9 (2004)
- [6] P. Jedlička, J. Lazar, O. Číp: Fully digital frequency stabilization of IR fiber-coupled laser. *Rev. of Sci. Instr.* 77, Art. No. 063111 (2006)
- [7] J. Lazar, P. Jedlička, O. Číp, B. Růžička: Laser diode current controller with a high level of protection against electromagnetic interference. *Rev. of Sci. Instr.* 74, 3816-3819 (2003)
- [8] B. Mikel, R. Helán: Fiber Bragg gratings for laser interferometry with VCSEL diode at 760 nm wavelength. *Optical Manufacturing and Testing VII, San Diego, Proc. SPIE* 6671, 66711F (2007)
- [9] F. Petrů, B. Popela, Z. Veselá: Design and performance of compact iodine stabilized He-Ne lasers at $\lambda = 633$ nm with a short optical resonator. *Meas. Sci. Technol.* 4, 506-512 (1993)
- [10] J. Lazar, O. Číp: Electronics for He-Ne-I-2 stabilized laser with digital control. *Rev. of Sci. Instr.* 68, 3660-3665 (1997)
- [11] F. Petrů, J. Lazar, O. Číp, et al.: Frequency comparison of He-Ne/iodine lasers at $\lambda = 633$ nm between the NILPRP and the ISI, and traceability through the BIPM. *Metrologia* 34, 515-518 (1997)
- [12] J. Hrabina, F. Petrů, P. Jedlička, O. Číp, J. Lazar: Purity of iodine cells and optical frequency shift of iodine-stabilized He-Ne lasers. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 5, 202-206 (2007)
- [13] O. Číp, R. Šmíd, J. Lazar, F. Petrů, Z. Buchta, M. Čížek: An ultra-stable generator of absolute length based on femtosecond mode-lock laser and optical resonator. *Frequency Control Symposium, IEEE, ISBN: 978-1-4244-0647-0, 659-662* (2007)
- [14] O. Číp, F. Petrů: A scale-linearization method for precise laser interferometry. *Meas. Sci. Technol.* 11, 133-141 (2000)
- [15] B. Mikel, O. Číp, J. Lazar: Absolute distance measurements with tunable semiconductor laser. *Physica Scripta T118, 41-44* (2005)
- [16] O. Číp, F. Petrů, Z. Buchta, J. Lazar: Small displacement measurements with subatomic resolution by beat frequency measurements. *Meas. Sci. Technol.* 18, 2005-2013 (2007)
- [17] O. Číp, F. Petrů, V. Matoušek, J. Lazar: Direct measurement of index of refraction of air by means of high-resolution laser interferometry. *Physica Scripta T118, 48-50* (2005)

Ing. Josef Lazar, e-mail: lazar@isibrno.cz, tel. +420 541 514 253, fax +420 541 514 402, Dr., Ing. Ondřej Číp, Ph.D., Ing. Petr Jedlička, Ph.D., Ing. Břetislav Mikel, Ph.D., Ing. Bohdan Růžička, Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D., Ing. Jan Hrabina, Mgr. Radek Šmíd, Ing. Martin Čížek, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Královopolská 147, 612 64 Brno

Zajímavé výsledky skupiny kryogeniky a supravodivosti ÚPT AV ČR

Hlavní náplní laboratoře nízkých teplot, založené v roce 1968, bylo využití jevu supravodivosti k vytváření silných homogenních magnetických polí pro potřeby NMR. Oborem nízkých teplot se zabývá současná skupina kryogeniky a supravodivosti. Předmětem jejího studia je m.j. měření přenosu tepla zářením za nízkých teplot a dosahování vysokého a čistého vakua kryočerpáním. V laboratoři vznikají další nízkoteplotní zařízení jak pro vlastní experimenty tak i pro jiná vědecká pracoviště.

Klíčová slova: kryogenika, supravodivost, přenos tepla zářením, kryogenní vývěva

SUPRAVODIVÉ MAGNETY

V roce 1968 byla v ÚPT AV ČR Brno založena Laboratoř nízkých teplot, která vznikla z popudu oddělení vysokofrekvenční spektroskopie. Jejím založením byl pověřen Ing. Josef Jelínek, později spoluautor monografie o kryogenice [4]. Primárním úkolem laboratoře bylo vytváření velmi silných, homogenních a časově stabilních magnetických polí pro spektrometry NMR. Za počátek činnosti laboratoře lze považovat rok 1968, kdy byla vybavena zkapařovačem dusíku Philips a zkapařovačem hélia Ferox, který byl v roce 1981 nahrazen výkonnějším typem od fy CTI – USA.

U klasických elektromagnetů se železným magnetickým obvodem, používaných zpočátku ve spektrometrech NMR, je dosažitelná maximální indukce asi 2 Tesla. K přechodu na ještě vyšší hodnoty magnetické indukce bylo využito jevu supravodivosti. Technicky využitelnými jsou supravodivé materiály na bázi slitin (NbTi) nebo sloučenin (Nb₃Sn) a v poslední době vysokoteplotních supravodičů připravených ve formě vodičů, z nichž lze vinout cívky. V Laboratoři nízkých teplot bylo pro nejrůznější fyzikální experimenty vyvinuto a realizováno 15 typů supravodivých magnetů zhotovených ze supravodiče NbTi a chlazených kapalným héliem. Supravodivý systém kryostatu s magnetem 4,7 T byl zaveden do výroby v n.p. Tesla Brno pro nový typ NMR spektrometru Tesla BS 588. Po roce 1989 byly vývoj a výroba těchto zařízení v n.p. Tesla ukončeny. V souvislosti s reorganizací pracovišť Akademie věd přecházela postupně Laboratoř nízkých teplot na řešení jiných vědeckých úkolů podporovaných grantovými agenturami, výrobními podniky a vědeckými institucemi a později byla přejmenována na Skupinu kryogeniky a supravodivosti.

MĚŘENÍ PŘENOSU TEPLA ZÁŘENÍM ZA NÍZKÝCH TEPLIT

Pro minimalizaci nežádoucích tepelných toků tepelným zářením do nízkoteplotních částí kryogenických zařízení je důležitá znalost tepelně radiačních vlastností materiálů jako je totální hemisférická absorptivita a emisivita.

Velký rozptyl publikovaných dat, často desítky až stovky procent, je pravděpodobně způsoben značnou citlivostí tepelně radiačních vlastností materiálů na úpravu a stav povrchu. Absorptivita a emisivita řady materiálů je tabelována většinou jen pro teploty 300 K a vyšší, méně často pro hodnoty 77 K a jen vzácně pro teplotu 4 K. Publikovaná data změřená za nízkých teplot byla často získána nesystematicky jako vedlejší výsledek prací na projektech využívajících nízkých teplot.

Měření emisivity a absorptivity tepelného záření pro potřeby návrhů kryotechnických aparatur bylo na ÚPT prováděno již v r. 1986 [3]. Toto zařízení bylo založeno na měření absorbovaného

toku tepla tepelného záření z průtoku plynu z odpařující se kryo-kapaliny, která chladí měřený vzorek. Na tomto zařízení bylo provedeno přibližně 40 měření emisivity a absorptivity při teplotě zdroje záření 300 K a teplotě vzorku 77 K. V roce 2001 bylo měření tepelně radiačních vlastností materiálů nově řešeno v rámci cíleného výzkumu podporovaného Akademií věd pod názvem „Materiály pro minimalizaci přenosu tepla zářením v kryogenních zařízeních“ číslo IBS2065109 a KSK 2067107. Práce na tomto tématu pokračuje až do současnosti v podobě disertační práce s názvem „Metody měření emisivity tepelného záření konstrukčních materiálů pro kryotechniku“ a v rámci spolupráce s průmyslem.

EMISIVITA A ABSORPTIVITA

Totální hemisférickou emisivitu definujeme jako poměr intenzity vyzařování reálného povrchu na všech vlnových délkách do všech úhlů poloprostoru ku intenzitě vyzařování černého povrchu o stejné teplotě. Totální hemisférická absorptivita je poměrem toku energie absorbovaného reálným povrchem ku dopadajícímu toku energie z poloprostoru v celém spektru vlnových délek. Totální hemisférická absorptivita, na rozdíl od emisivity, závisí i na zdroji záření a jeho teplotě.

Zde popsaná aparatura měří výkon Q_R přenášený tepelným zářením mezi paralelními povrchy o teplotách T_R (zářič) a T_A (přijímač), z nichž každý má plochu A . Vzájemnou emisivitu ϵ_{12} definujeme jako poměr mezi tokem tepla Q_R a tokem mezi dvěma černými povrchy se stejnou geometrií a teplotami jako měřené povrchy.

$$\epsilon_{12} = \frac{Q_R}{A\sigma(T_R^4 - T_A^4)}, \quad 0 \leq \epsilon_{12} \leq 1, \quad (1)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta.

REALIZACE METODY

Přenášený výkon Q_R je absorbován přijímačem a sveden přes tepelný odpor do lázně kapalného hélia (obr. 1). Výkon Q_R určujeme měřením vzniklého teplotního spádu na tomto odporu. Tepelný odpor je kalibrován elektrickým topným tělesem, jehož výkon je přesně měřen.

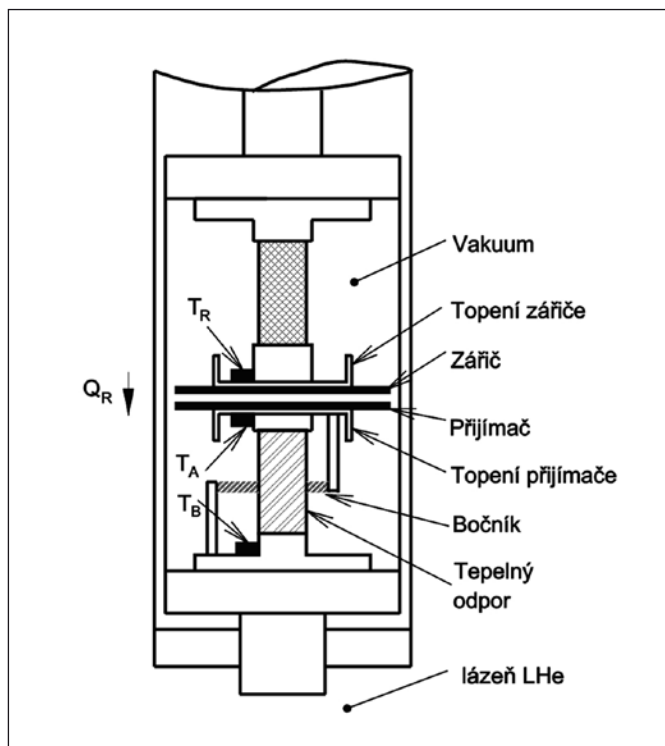
Zařízení na obr. 1 umožňuje měření jak emisivity, tak i absorptivity povrchu vzorku ve tvaru disku o průměru 40 mm. Platí přibližný vztah

$$\frac{1}{\epsilon_{12}} = \frac{1}{\epsilon_R} + \frac{1}{\alpha_A} - 1. \quad (2)$$

Má-li jeden z povrchů absorptivitu/emisivitu mnohem vyšší než druhý, pak se změřená vzájemná emisivita ϵ_{12} přibližně shoduje s menší z obou hodnot.

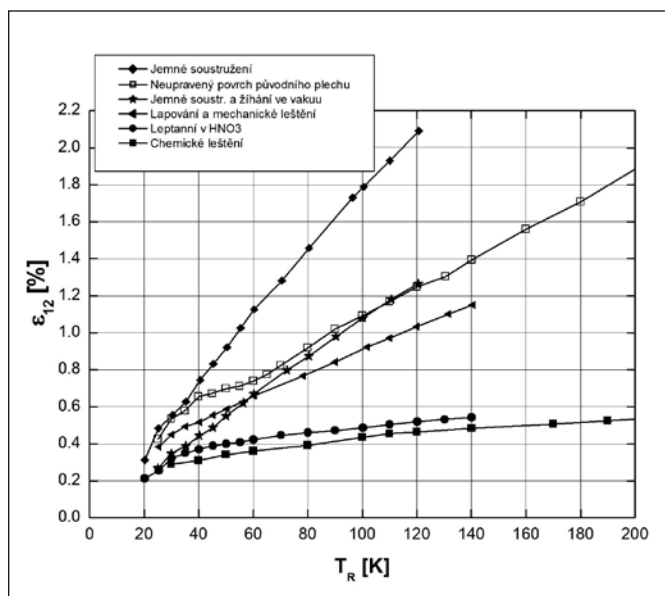
V případě měření emisivity je vzorek s emisivitou ϵ_R upevněn na zářiči, jehož teplota je řízena teplotním kontrolérem Lakeshore. Na přijímači je pak upevněn povrch s vysokou absorptivitou ϵ_A („černý povrch“). Při měření absorptivity se vzorek upevní na přijímači a na zářiči se umístí „černý povrch“. Jako „černé povrchy“ používáme vrstvy epoxidů na měděné podložce. Jejich absorptivita/emisivita dosahuje hodnot 40 - 90 % při $T_R = 20$ K - 300 K.

Celé zařízení má podobu trubky o délce přibližně 1 m a průměru 48 mm. Po předchlazení spodní části aparatury v LN₂ se aparatura zasune do komerčně dostupné širokohrdlé Dewarovy nádoby.



Obr. 1 Schéma spodní nízkoteplotní části aparatury

Výsledky



Obr. 2 Emisivita a absorptivita různě upravených povrchů mědi

Teplotu zářiče je možné měnit v rozsahu 10 K až 300 K. Teplota přijímače se mění v závislosti na absorpci tepelného záření a zpravidla se pohybuje v rozsahu 5 K až 20 K. Její maximální výši a také citlivost detekce toku tepla lze ovlivnit výměnou bočníku tepelného odporu. Bez použití bočníku je citlivost tepelného odporu přibližně 20 μ W/K. Teplotní kontrolér měří teplotu zářiče T_R , přijímače T_A a paty tepelného odporu T_B s milikelvinovým rozlišením.

Za dobu řešení tématu bylo provedeno více jak 100 měření emisivity a absorptivity na přibližně 50 vzorcích především kovových materiálů používaných v kryotechnice. Z těchto měření byl získán základní přehled vlivů různých chemických a mechanických úprav povrchů kovů na emisivitu a absorptivitu. Na obr. 2 je uvedeno několik průběhů závislosti absorptivity různě upravených povrchů plechu z Cu (99,5 %) na teplotě zdroje tepelného záření. Obecně lze říci, že mechanické úpravy podstatně zvyšují absorptivitu, což platí i pro úpravu povrchu k zrcadlovému lesku. Nejlepších výsledků bylo dosaženo na vzhledově matném chemicky leštěném povrchu, a to i u jiných kovů.

V souvislosti s tímto tématem jsme navázali vědeckou spolupráci se zahraničními firmami zabývajícími se vývojem tepelných izolací kryostatů a zařízení pro výzkum vesmíru. Realizace metody a některé výsledky byly publikovány v časopise Cryogenics [6], [7] a na mezinárodních konferencích. Na tuto práci navazujeme řešením tématu „Přenos tepla zářením na mikroskopické vzdálenosti“ podporovaným od roku 2008 grantovou agenturou GAAV.

ULTRAVAKUOVÁ KRYOGENNÍ VÝVĚVA

Na Ústavu přístrojové techniky byly realizovány dvě verze malých heliových kryogenních vývěv lázněového typu s nízkým odparem helia. Kryovývěvy jsou určeny především k udržování a vylepšování vakua v dobře odplyněných a předčerpávaných vakuových aparaturách v rozsahu tlaků 10^{-6} Pa až 10^{-8} Pa.

První verze kryovývěvy, s přírubou čerpacího hrdla DN 40 CF [1], byla navržena k čerpání ultravakuového rastrovacího elektronového mikroskopu s pomalými elektrony (s energií až jednotek eV), kde v prostoru preparátu je třeba dosáhnout tlaku nižšího než 10^{-7} Pa. Hlavním důvodem pro vývoj malé lázněové kryovývěvy bylo vyloučení rušivých vlivů působících na svazek elektronů, jako jsou elektromagnetická pole obvykle používaných iontových vývěv či mechanické vibrace turbomolekulárních vývěv nebo refrigerátorových kryovývěv. Realizovaná kryovývěva je bez rozptylových elektromagnetických polí a téměř bez vibrací, je snadno přenositelná i v prochlazeném stavu a nezávislá na zdroji elektrické energie. Vytváří čisté vakuum, nepoužívá žádné médium, které by mohlo znečistit vakuový prostor.

Na základě výsledků vývoje první kryovývěvy byla postavena její druhá verze s rozšířeným vstupním hrdlem osazeným přírubou DN 63 CF a s vyšší čerpací rychlostí.

PRINCIP ČINNOSTI

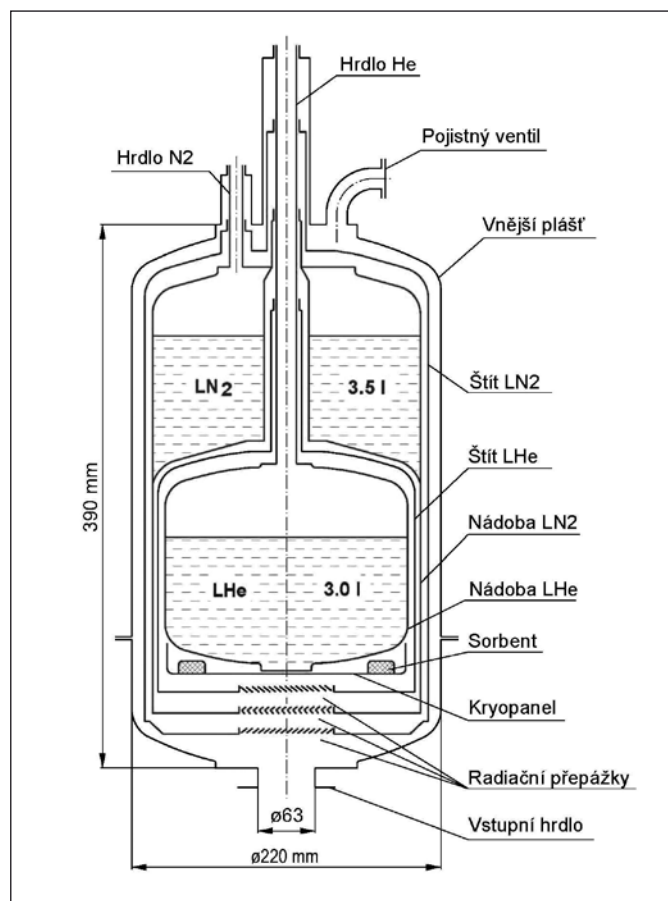
Hlavním principem činnosti kryovývěv je kondenzace plynů na chlazeném povrchu, tzv. kryopanelu. Plyny, které nekondenzují při dané teplotě kryopanelu, je možno zachycovat kryosorpcí. Kryosorpcí lze vytvořit přibližně pouze jednu monomolekulární vrstvu nekondenzovatelného plynu, což vyžaduje kryopanel o velmi velkém povrchu. Ke zvětšení povrchu pro adsorpci se na chlazené kryopanely nanášejí částice aktivního uhlí nebo molekulových sít (zeolitů) s efektivním povrchem řádu až 10^3 m²/g. Protože se čerpané plyny ukládají uvnitř vývěvy, žádná tato vývěva nemůže pracovat kontinuálně neomezeně dlouho. Potřeba její regenerace se projevuje zvýšením dosažitelného mezního tlaku jako důsledek nasycení sorbentu nebo vytvoření příliš silné vrstvy kondenzátu na kryopanelu. Regenerace se provádí za zvýšené teploty (např. 200 °C) dlouhodobým odčerpáváním (až desítky hodin) zachycených plynů jinou vývěvou.

Schéma kryovývěvy s hrdlem DN 63 CF je na obr. 4. Kryovývěva sestává z nádoby s kapalným heliem (LHe) o teplotě 4,2 K. Na dno heliové nádoby je připevněn kryogenní panel, na kterém

jsou umístěny schránky s aktivním uhlím pro kryosorpci (čerpání He a částečně H₂). Aby odpar LHe zejména vlivem radiačního tepelného toku z okolí byl co nejnižší, je kolem heliové nádoby protažen stínicí plášť nádoby s kapalným dusíkem (LN₂) o teplotě 77 K. Nádoby s kryokapalinami jsou navíc stíněny mezipláští, které jsou tepelně ukotveny na hrdla nádob. K jejich chlazení se využívá studených par odpařovaných z kryokapalin.

Všechny vnitřní části kryovývěvy jsou zavěšeny ve vakuovém prostoru vnějšího pláště na centrálním tenkostěnném nerezovém hrdle s velmi nízkou tepelnou vodivostí.

Jednotlivé stínicí pláště jsou uzavřeny dny, ve kterých jsou umístěny radiační přepážky žaluziového typu, které stíní kryopanel proti radiačnímu tepelnému toku z otvoru čerpacího hrdla. Přepážky jsou navrženy tak, aby co nejučinněji zachytávaly tepelné záření a současně měly co nejvyšší molekulární propustnost čerpaných plynů ke kryopanelu.



Obr. 3 Schéma kryovývěvy s hrdlem DN 63 CF

APLIKACE KRYOVÝVĚVY (DN 40 CF) V ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPII

Použitelnost první verze kryovývěvy s hrdlem DN 40 CF k dosažení a dlouhodobému udržení vysokého vakua byla ověřena několika experimenty na jednoduché UHV komoře [2], [5]. Komoře byla vybavena hmotnostním spektrometrem pro měření složení zbytkových plynů, kalibrovanou He netěsností pro určení čerpací rychlosti [8], ionizační vakuovou měrkou a iontovou vývěvou VARIAN s čerpacím hrdlem DN 40 CF s nominální čerpací rychlostí 20 l/s pro N₂. V porovnání s iontovou vývěvou bylo pomocí kryovývěvy dosaženo významně nižšího mezního tlaku v řádu 10⁻⁷ Pa a vyšší čerpací rychlosti. Obě vývěvy udržovaly vakuum s obdobným složením zbytkových plynů. Kryovývěva byla následně úspěšně použita k čerpání pracovní komory mikroskopu SLEEM.

Získané výsledky vedly k návrhu druhé verze kryovývěvy s rozšířeným čerpacím hrdlem na DN 63 CF. Dosažené parametry obou kryovývěv jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Parametry kryovývěv

	DN 40 CF	DN 63 CF
Interval doplňování LHe	35 dnů (3,01)	30 dnů (3,01)
Interval doplňování LN2	6 dnů (3,41)	4.5 dne (3,41)
Mezní tlak	1,5 × 10 ⁻⁷ Pa*	4,3 × 10 ⁻⁸ Pa
Čerpací rychlost pro He	25 l/s	25 l/s**
Max. teplota pro odplynění	170 °C	170 °C

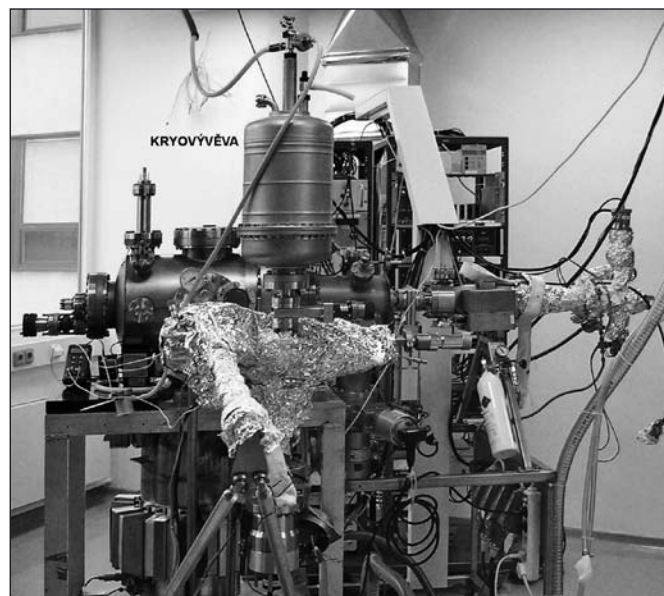
*Dosažená hodnota mezního tlaku je silně závislá na kvalitě odplynění čerpané soustavy a vývěvy samotné před jejím prochlazením. Kryovývěva je navržena tak, aby byla schopna dosáhnout tlaku v řádu 10⁻⁸ Pa.

**K sestavení druhé verze kryovývěvy bylo použito identického kryopanelu se schránkami aktivního uhlí jako v případě kryovývěvy s hrdlem DN 40 CF, proto jejich čerpací rychlosti pro He jsou stejné. Pro ostatní plyny jsou čerpací rychlosti vyšší úměrně zvětšení plochy čerpacího hrdla.

APLIKACE KRYOVÝVĚVY (DN 63 CF) NA ÚFI VUT V BRNĚ

Kryovývěva s hrdlem DN 63 CF byla používána v laboratorických Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně k čerpání vysokovakuové komory termálního zdroje atomů kyslíku (obr. 4). V komoře bylo dosaženo tlaku v řádu 10⁻⁶ Pa. Měřením čerpacích rychlostí a složení zbytkových plynů bylo ověřeno, že kryovývěva s hrdlem DN 63 CF je srovnatelná s turbomolekulární vývěvou s čerpací rychlostí 150 l/s pro N₂.

Kryovývěva byla dále použita k čerpání ultravakuových komor termální desorpční spektroskopie (TDS) a termálně programované hmotnostní spektroskopie (TPMS), kde bylo dosaženo tlaku v řádu 10⁻⁷ Pa. Díky malé citlivosti kryovývěvy na náhlé zhoršení vakua u metod TDS s výhodou doplnila používané iontové vývěvy, u kterých docházelo k zahlcení a výpadkům čerpání.

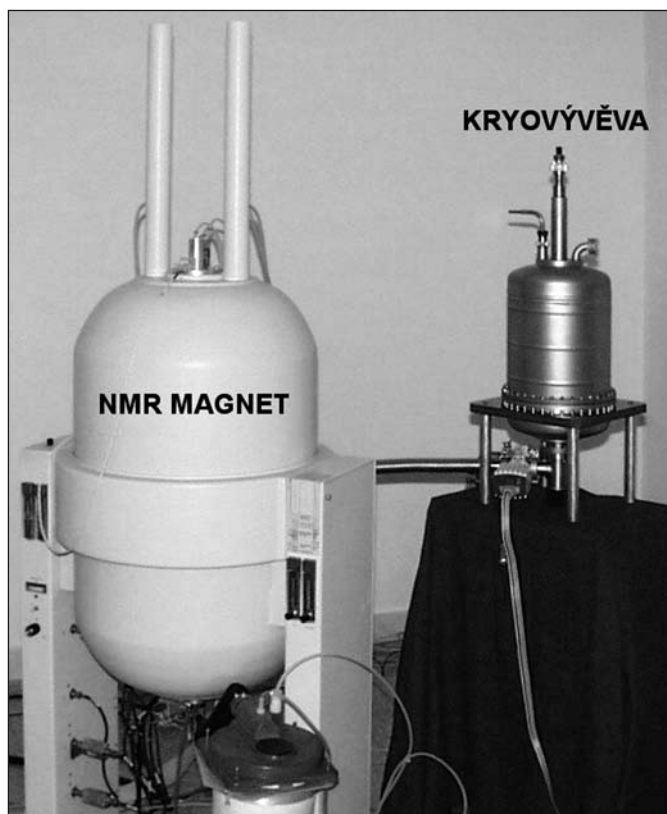


Obr. 4 Čerpání komory termálního zdroje atomů kyslíku

ODČERPÁVÁNÍ NMR MAGNETU V PROVOZNÍM STAVU

Jednou z velkých výhod kryovývěv je, že mohou bezproblémově pracovat i v silných magnetických polích. Kryovývěva s hrdlem DN 40 CF byla použita k odčerpávání kryostatů NMR magnetu VARIAN v provozním stavu (obr. 5). V lážňových kryostatech supravodivých NMR magnetů (magnetické indukce 2 až 16 tesla), které nejsou vybaveny sorbenty, dochází po určité době ke zvýšení tlaku v tepelně izolačním vakuovém prostoru především vlivem difúze He z okolní atmosféry. Zhoršení vakua způsobuje zvýšení odparu kapalného helia, ve kterém je zanořen solenoid z nízkoteplotního supravodiče.

K odčerpávání kryostatů se používá turbomolekulárních vývěv. Jejich nevýhodou je, že musí být připojeny poměrně dlouhým čerpacím potrubím, neboť v magnetickém poli dochází k zahřívání rotoru vířivými proudy. Dlouhé potrubí snižuje čerpací rychlost. Další nevýhodou je nebezpečí zavzdušnění vakuového prostoru v případě výpadku elektrické energie. Výhodou použité kryovývěvy je její relativně vysoká čerpací rychlost pro He.



Obr. 5 Odčerpávání kryostatů NMR magnetu

ZÁVĚR

Zkušenosti získané Skupinou kryogeniky a supravodivosti v ÚPT při aplikacích supravodivosti k vytváření velmi silných a homogenních magnetických polí pro NMR a MRI našly využití i při řešení další problematiky z oboru nízkých teplot. Nízké teploty nalézají své uplatnění v mnoha oblastech lidské činnosti, jak při vědecké činnosti, tak i v průmyslu. Jedná se zejména o různé aplikace supravodivosti, dosahování čistého a vysokého vakua, skladování kapalných plynů, výzkum vesmíru, medicínu a energetiku.

Činnost Skupiny kryogeniky a supravodivosti často sestává z vývoje nízkoteplotní aparatury od jejího návrhu až po její konstrukci a experimentální ověření činnosti. Výsledkem práce jsou pak speciální nízkoteplotní zařízení pro vlastní potřebu i jiné instituce nebo pro měření vlastností materiálů za nízkých teplot využívané k další činnosti skupiny. Za dlouhou dobu existence oboru nízkých teplot v ÚPT bylo vytvořeno jedinečné vědecko-technické zázemí pro vývoj a realizaci nízkoteplotních zařízení, do kterého zejména patří vlastní ověřené metody výpočtů, konstrukční zkušenosti a využití technologických možností ústavu. Dosažené výsledky již našly své uplatnění jak na vědeckých pracovištích, tak i v průmyslu. Za všechny jmenujme například MFF UK Praha, ELÚ SAV Bratislava, PBS a.s. Velká Bíteš, Ansaldo CRIS Neapol, Austrian Aerospace. Další informace o činnosti laboratoře lze najít na www.isibrno.cz/cryogenics.

Literatura

- [1] Hanzelka P., Dupák J., Studie heliové kryovývěvy pro elektronově optické přístroje, *JMO* 4/99, 108-110.
- [2] Hanzelka P., Dupák J., Musilová V., Small helium bath cryopump for electron optical devices. *Cryogenics* 42 - S. 39-44 (2002).
- [3] Hanzelka, P., Jelínek, J. Zařízení pro měření radiačních vlastností materiálů nízkoteplotních aparatur, 1986, 8. celostátní konference se zahr. účastí *Cryogenics '86*, Praha.
- [4] Jelínek J., Málek Z.: *Kryogenní technika*, SNTL, Praha 1982.
- [5] Musilová V., Dupák J., Hanzelka P., Králík T., Urban P., Economical helium bath cryopump: design and testing. *Vacuum* 74 [1] - S. 77-83 (2004).
- [6] Musilova, V., Hanzelka, P., Kralik T., Srnka, A., Low temperature radiative properties of materials used in cryogenics, 2005, *Cryogenics*, 45 (8), pp. 529-536.
- [7] Musilova, V., Kralik, T., Hanzelka, P., Srnka, A., Effect of different treatments of copper surface on its total hemispherical absorptivity bellow 77 K, 2007, *Cryogenics*, 47 (4), pp. 257-261.
- [8] Urban P., Dupák J., Hanzelka P., Králík T., Musilová V., Application of a helium calibrated leak for a cryopump performance measurement, *Proceedings of the 8th Cryogenics 2004 IIR international conference* (2004). - Praha, ICARIS. - S. 44-46.

Nukleární magnetická rezonance v ÚPT – tradice a perspektivy

Článek představuje skupinu nukleární magnetické rezonance ÚPT, její historické kořeny a vyhlídky. Studovaná problematika je ilustrována dvěma příklady. První je metodologický – je popsána úspěšná metoda pro jednovoxelovou protonovou MR in-vivo spektroskopii ve vysokých polích s extrémně krátkým echo-časem jakožto milník na cestě ke kvalitnímu spektroskopickému zobrazování. Druhý popisovaný výsledek je aplikační – analýza kompatibility dentálních slitin s magnetorezonančním vyšetřením.

Klíčová slova: nukleární magnetická rezonance, in-vivo MR spektroskopie, spektroskopické zobrazování, dentální slitiny

ÚVOD

Nukleární magnetická rezonance (NMR) svou podstatou nepatří k tématům blízkým jemné mechanice nebo optice, neboť typicky pracuje s blízkým magnetickým polem v kmítočtovém pásmu 10 - 1000 MHz a ani princip magnetorezonančního zobrazování (MRI), tj. časově a prostorově plánovaná manipulace s Larmorovými rezonančními kmítočty, se optické mikroskopii nepodobá. Za tou zaostává i rozlišení: s ohledem na poměr signál/šum a čas lze při zobrazování vodíkových protonů reálně dosáhnout rozlišení kolem 100 μm . Význam NMR ale spočívá v jedinečnosti spektrální informace, možnosti prostorové lokalizace a variabilitě mechanismu vzniku kontrastu v závislosti na způsobu excitace a dalších parametrech měření, díky nimž NMR měření může poskytovat informace o chemické struktuře molekul, prostorovém rozložení specifických druhů molekul, jejich mikro- i makroskopických pohybech, o přítomnosti radikálů, narušení buněčných stěn, teplotě atd.

Dnešní skupina nukleární magnetické rezonance ÚPT AV ČR navazuje na dřívější obor NMR, který byl v Ústavu přístrojové techniky AV ČR založen v roce 1960, kdy tým Ing. Josefa Dadoka zkonstruoval první ústavní spektrometr. Na tento spektrometr, pracující s polem 0,7 T a s kmítočem 30 MHz, od r. 1966 navázala průmyslová výroba NMR spektrometrů v národním podniku Tesla Brno, pro niž ÚPT zajišťoval přístrojový a metodologický výzkum a vývoj prototypů, a to až do r. 1990, kdy byla výroba NMR spektrometrů v podniku Tesla Brno ukončena. V průběhu 25 let podnik vyrobil a z větší části exportoval několik stovek NMR spektrometrů různých typů. Během 90. let v ÚPT dále pokračoval vývoj elektronických modulů, vysokofrekvenčních a gradientních cívek, jehož výsledkem bylo v r. 2001 uvedení do provozu spektrometru-tomografu s pracovním kmítočem 200 MHz. Současně již ale probíhala změna orientace týmu kryogeniky, supravodivosti a magnetických polí a týmu elektroniky, které si v nové situaci hledaly samostatné uplatnění. To našly v oblasti vývoje materiálů pro kosmické aplikace a pro urychlovače a v oblasti měření a zpracování signálů v medicíně. Tématice NMR zůstala věrná skupina zabývající se měřicími metodami, která k vývoji NMR přispěla zejména návrhem složených RF pulsů pro frekvenčně selektivní manipulaci se spiny [1].

Tým NMR metodologie, v 90. letech oslabený odchodem několika členů do zahraničí, podnikatelské sféry a školství, se orientoval zejména na vývoj metod spektroskopických měření pro in-vivo biomedicínské aplikace: nejprve na jednovoxelovou lokalizovanou spektroskopii a později na spektroskopické zobrazování (SI) mozku, které začalo být proveditelné i na standardních klinických MR systémech kolem roku 2000 díky zlepšené technologii gradientních i radiofrekvenčních cívek, vyšším statickým polím i výpočetním možnostem univerzálních počítačů. Pro lékaře i biology je SI přístupnější i hodnotnější a v porovnání s jednovoxelovou spektro-

skopii opakovanou pro větší počet lokalit je i časově efektivnější. Zajištění kvality spekter je ale náročnější, protože větší měřený objem znamená i větší nehomogenitu magnetických polí (včetně té, která je vyvolána heterogenitou magnetické susceptibility měřeného vzorku), fourierovské kódování polohy vede k vzájemné kontaminaci voxelů, kódovací pulsy interferují s pulsy gradientních polí rozbíjejícími nežádoucí koherence a vymezení objemu naráží na omezení RF výkonu. Práce skupiny NMR směřovala k překonání těchto problémů. Simulačně vyvíjené návrhy metod byly implementovány v laboratořích spolupracujících institucí, vybavených MR systémy vhodnými pro měření malých živočichů – myši a potkanů (4,7 T – Déřerova nemocnice, Bratislava, 9,4 T – CMRR, University of Minnesota) nebo celotělovými humánními MR systémy (3 T – Medizinische Universität Wien, 1,5 T – Fakultní nemocnice u sv. Anny, Brno - FNUSA). Pořízení a provoz vlastního MR systému obdobné kategorie překračuje finanční možnosti skupiny i ústavu – jen pořizovací cena se podle velikosti pracovního prostoru, indukce magnetického pole a konfigurace nyní pohybuje mezi 30 a 200 mil. Kč. V současné době skupina udržuje nejtěsnější spolupráci s FNUSA a s týmy sdruženými do evropského projektu pro rychlé spektroskopické zobrazování (FAST). Cílem společného výzkumu je rychlá a spolehlivá kvantifikace biologicky významných metabolitů v prostorově dobře vymezených objemech živého organismu. Ta by měla přispět k pochopení mechanismů některých závažných onemocnění (zejména onkologických a neurodegenerativních), vývoji léčebných postupů, k jejich včasné diagnostice, monitorování léčby a případně k intraoperativní kontrole např. neuro-onkologických operací.

Modernizace ústavního NMR systému nákupem komerční elektroniky v r. 2006-7 znamenala potvrzení odklonu od vývoje základních přístrojových modulů a soustředění na vývoj metod a aplikací na bázi komerčních přístrojů, doplňovaný vlastními speciálními přístrojovými prvky. Příkladem může být vývoj aparatury pro optickou hyperpolarizaci plynného xenonu 129 a jeho kontinuální oběh pro NMR měření, např. pro studium porézních materiálů. Modernizace dále umožňuje více se věnovat vývoji technik pro měření vlastností materiálů (magnetické susceptibility, difúze) a jejich testování. Vzhledem k roli, kterou porézní materiály hrají v chemickém průmyslu, stavebnictví nebo potravinářství, je nový systém pro tyto aplikace připravován [2, 3].

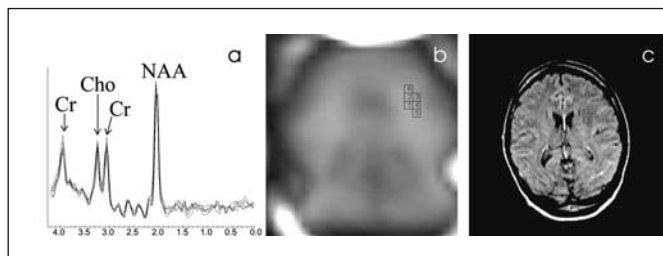
METODY PRO SELEKCI SIGNÁLŮ V MR SPEKTROSKOPII A SPEKTROSKOPICKÉM ZOBRAZOVÁNÍ

Jedním z nejobtížnějších úkolů v každém biomedicínském NMR měření je výběr žádoucích signálů a potlačení nežádoucích. Žádoucí signál je charakterizován zpravidla typem molekuly a prostorovou lokalizací spinů, které jsou jeho zdrojem, resp.

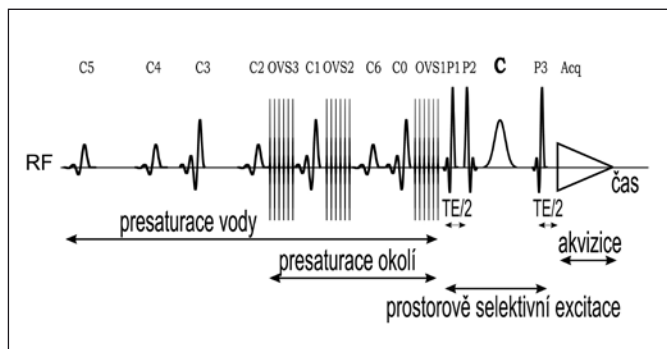
typem vývoje kvantověmechanické koherence během excitace sekvencí RF pulsů. U spektroskopických měření je typickou nutností eliminace signálu vody (s koncentrací protonů cca 80 mol/l) a tuku a signálů z okolí oblasti zájmu tak, aby signály metabolitů (s koncentracemi v jednotkách mmol/l) mohly využít dostupný dynamický rozsah a nebyly kontaminovány nedeterminovanými signály znemožňujícími kvantifikaci.

Světovým zlatým standardem pro jednovoxelovou in-vivo spektroskopii s extrémně krátkým echo-časem (TE) v silných polích je už několik let metoda VAPOR, simulačně vyvinutá v ÚPT, experimentálně ověřená v Bratislavě [4] a adaptovaná pro pole 9,4T v Minneapolis [5], kde umožnila zvýšit počet spolehlivě detekovaných nízkomolekulárních metabolitů na 17. Úspěch této metody je založen na velmi účinné presaturaci nežádoucích spinů a takové modifikaci tří lokalizačních pulsů (obr. 1, 2), která umožnila zkrátit echo-čas pod 1 ms a tím lépe detekovat metabolity s vázanými spinovými systémy. Jak při presaturaci, tak v lokalizaci byly užity vlastní numericky optimalizované asymetrické RF pulsy, které přes zkrácenou délku zajišťují kvalitní frekvenčně selektivní excitaci. Extrémní zkrácení TE bylo umožněno časovou reverzí druhého lokalizačního pulsu. Zkrácení TE samo o sobě by však vedlo k nárůstu artefaktů způsobených kontaminací z periferních oblastí a ze zbytkového signálu vody v důsledku omezené možnosti fázově rozbít nežádoucí signály pomocí pulsů gradientního pole aplikovaných během krátkého TE. Proto je zde podstatná již zmíněná presaturace nežádoucích spinů, tj. zrušení jejich makroskopické magnetizace kombinací RF excitace a destrukce prosto-

rové koherence excitované precesující magnetizace pomocí pulsů gradientního pole. Základem presaturace je sekvence frekvenčně selektivních asymetrických RF pulsů, jejichž výkony a časování jsou navrženy tak, aby minimalizovaly citlivost k nehomogenitě RF pole a variabilitě relaxačních časů vody. Do této sekvence jsou vsazeny tři bloky pro presaturaci okolí, tvořené vždy šesti adiabatickými RF pulsy. Pro spektroskopické zobrazování tato metoda ale není ideální pro svou délku, není přímo aplikovatelná v nízkém poli (1,5 T) a na některých spektrometrech naráží na implementační problémy. Další vývoj proto směřoval ke kratším a univerzálněji použitelným metodám. Taková je např. metoda WASHCODE, spočívající v optimalizaci časových a frekvenčních parametrů v sekvenci adiabatických RF pulsů [6, 7]. Pro zrychlené spektroskopické zobrazování v poli 1,5 T a vyšší skupina vyvinula a implementovala metodu s využitím prostorově-frekvenčně selektivní excitace na bázi složených pulsů, jejíž optimalizace je předmětem současného vývoje [8, 9] (obr. 3). Složené pulsy vyvinuté v ÚPT



Obr. 3 Protonové spektroskopické zobrazování lidského mozku v poli 1,5 T doplňuje anatomický obraz (c) informací zejména o třech metabolitech: N-acetyl aspartátu (b), kreatinu a cholinu. K vybraným voxelům lze zobrazit a kvantifikovat příslušná spektra (a). Měření s nominální velikostí voxelu $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ nově vyvinutou zrychlenou metodou bylo získáno během 9,5 min na MR systému Fakultní nemocnice u sv. Anny v Brně.

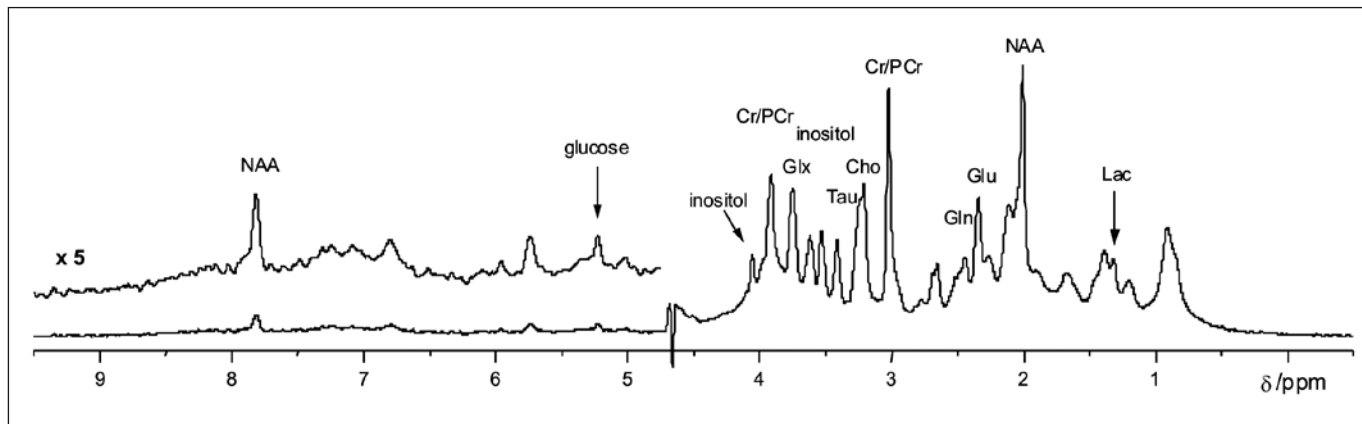


Obr. 1 Schéma excitace pro jednovoxelovou in-vivo spektroskopii s vymezením objemu stimulovaným echem (STEAM) s krátkým echo-časem (RF pulsy P1-3 spolu s pulsy gradientního pole v ortogonálních směrech), s presaturací vody metodou VAPOR (RF pulsy C1-6), s presaturací okolí (OVS1-3) a s volitelným doplňkovým potlačením vody (RF puls C). Gradientní pulsy pro rozfázování a vymezení řezů nejsou zobrazeny. Signál (Acq) pochází z metabolitů nacházejících se v průsečíku řezů vymezených pulsy P1-3. (Není v reálném měřítku.) [4, 5]

se staly základem pro třídu rychlých zobrazovacích technik založených na dynamické rovnováze (SSFP) [10]. Pro další pokrok je podstatný vývoj simulačního prostředí pro kvantifikaci spekter, pro vývoj pulsních sekvencí i pro vývoj softwaru pro spektrální kvantifikaci (jMRUI), který probíhá v rámci evropského projektu FAST. S tímto směrem souvisí i analýza spolehlivosti kvantifikace NMR dat a obecnější projekt informační fyziky.

DENTÁLNÍ SLITINY A JEJICH KOMPATIBILITA S VYŠETŘENÍM METODOU MAGNETICKÉ REZONANCE

S rozšířením MRI v lékařství roste i počet pacientů s různými kovovými dentálními aparáty, kteří by měli být touto technikou vyšetřeni. S ohledem na možné interakce s magnetickými poli přístroje



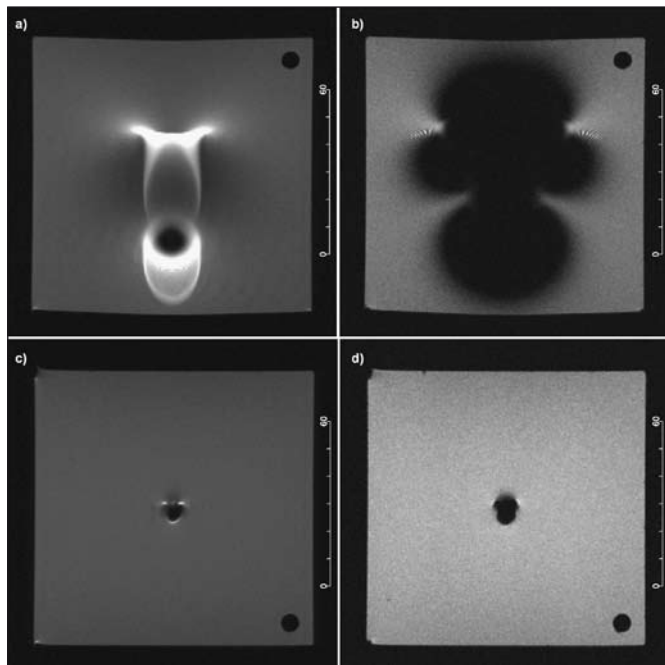
Obr. 2 Protonové spektrum z mozku potkana měřené metodou ilustrovanou na obr. 1 (STEAM: TE = 1 ms, TM = 5 ms, TR = 4 s, 640 skenů, VOI = 64 μl) v poli 9,4 T

(síla, torze, radiofrekvenční ohřev) vyvstává otázka bezpečnosti pacienta a diagnostických rizik následkem obrazových artefaktů. Odstranění všech aparátů (korunek, můstků, dlah, ortodontických aparátů apod.) není prakticky myslitelné. Cílem provedené studie bylo vyhodnotit jednotlivé používané materiály a některé standardní prvky (šrouby, dlahy, zámečky) z hlediska jejich kompatibility s MR vyšetřením.

Velikost a tvar artefaktů je určen rozdílly mezi magnetickou susceptibilitou předmětu a jeho okolí, elektrickou vodivostí předmětu, jeho tvarem a orientací a dále parametry MR měření, jako jsou velikost základního magnetického pole, amplituda gradientních pulsů, druh vysokofrekvenční cívky a použítá pulsni sekvence.

U vybrané skupiny 56 dentálních slitin (ušlechtilých kovů, dentálních amalgámů a slitin obecných kovů) byla pomocí MR měření [11, 12] stanovena magnetická susceptibilita a elektrotechnickým měřením elektrická vodivost standardizovaných válečků [13]. Měření ukázala zejména značné rozdíly v susceptibilitě užívaných materiálů – vedle materiálů diamagnetických ($\chi \approx -10 \cdot 10^{-6}$) byly nalezeny i materiály silně paramagnetické ($\chi \approx 1400 \cdot 10^{-6}$) i feromagnetické.

Artefakty byly vyhodnoceny pro klinické sekvence s gradientním a spinovým echem (obr. 4). Byla prokázána závislost rozsahu artefaktů na magnetické susceptibilitě, zatímco vliv elektrické vodivosti byl pozorován pouze v 4,7 T experimentálním zařízení pro materiály s velmi nízkou susceptibilitou a vysokou vodivostí a byl z klinického hlediska zanedbatelný. Na základě měření v praxi používaných dentálních předmětů [14] a běžně používaných měřicích protokolů bylo ukázáno, že přestože nelze jednoznačně stanovit kompatibilitu dentálních slitin jen na základě znalosti jejich materiálového složení, lze volbou vhodného materiálu (na základě znalosti jeho magnetické susceptibilitu) klinicky významně ovlivnit velikost artefaktu [13]. Tu lze dále ovlivnit volbou měřicího protokolu.



Obr. 4 Artefakty způsobené přítomností ortodontických zámečků různých slitin velikosti $3,3 \times 3,5 \times 2,6 \text{ mm}^3$ při MR měření spinového (a, c) a gradientního (b, d) echa. Měřeno ve vodě, se zámečkem upevněným ve středu krychlové nádoby, v rovině vzdálené 12 mm od středu ocelového (a, b) zámečku a v rovině procházející středem titanového (c, d) zámečku (u nějž už ve vzdálenosti 4 mm žádné artefakty nebyly pozorovány). Pozorované artefakty vznikají ztrátou koherence nehomoginitou statického pole (b, d) a distorzí řezu a jeho obrazu (a-d). Statické pole 4,7 T a gradient čtecího gradientního pole jsou v obrázcích orientovány vertikálně

Naproti tomu biologická rizika byla u většiny testovaných slitin pro stomatologické indikace vyhodnocena jako klinicky nevýznamná. Fixační pevnost u pevných zubních náhrad i ortodontických aparátů výrazně převyšuje síly způsobené magnetickým polem a ohřev fixních aparátů byl zcela zanedbatelný.

Odstraňovat je proto nezbytné jen feromagnetické prvky (zejm. zubní zámečky) a dráty a oblouky ortodontických fixních aparátů.

SOUČASNOST A VYHLÍDKY DO BLÍZKÉ BUDOUCNOSTI

Současná práce skupiny se soustřeďují na maximální využití možností nového 4,7 T NMR systému pro biomedicínské zobrazování a spektroskopické zobrazování, měření difúze kapalin a plynů v poréznych materiálech, včetně měření hyperpolarizovaného xenonu 129. K tomu bude využita nedávno sestavená víceúčelová plynová aparatura a aparatura pro polarizaci xenonu spinovou výměnou s laserem čerpanými parami rubidia. Cílem je vytvořit atraktivní experimentální prostředí pro výzkumné programy vlastní i spolupracujících institucí z oblasti lékařského, biologického a materiálového výzkumu. Vývoj spektroskopického zobrazování, simulace a zpracování dat bude orientován nejen na ústavní 4,7 T systém a 1,5 T klinický systém FNuS, ale i na vysoké pole obecně, neboť světovým výzkumným standardem MRI se již stalo pole 3 T, mnozí se systémy s polem 7 T a vyšším a vyšší pole je pro spektroskopii nespornou výhodou. Na základě průběhu příprav brněnské vědecké obce na rozsáhlou vědeckou spolupráci lze věřit, že vyvinuté techniky bude v dohledné době možné i v Brně uplatnit na vhodném MR systému. Plánovaná těsná multidisciplinární a multiinstitucionální spolupráce předcházející nákladné investici je jedinou cestou, jak zajistit její okamžité plné využití zapojením potenciálu řady specializovaných výzkumných skupin.

Poděkování

K finančnímu zajištění přispěly v posledních letech zejména granty IGA MZ 8110-3/2004, EC MRTN-CT-2006-03580, GAAV ČR IAA1065303, GAAV ČR IAA400400501, AV0 Z20650511 a spolupráce doc. Petra Krupy z Kliniky zobrazovacích metod Fakultní nemocnice u sv. Anny v Brně.

Literatura

- [1] Z. Starčuk, V. Sklenář: New hard pulse sequences for the solvent signal suppression in Fourier transform NMR II. *J Magn Reson* 66, 391–7 (1986).
- [2] K. Bartušek, Z. Dokoupil, J. Rychnovský: An Interesting Diffusion Measurement Method for Heterogeneous Systems. In 6th International Conference on Measurement, MEASUREMENT 2007, Slovensko, Institute of Measurement Science, 2007, p. 300-303. ISBN 978-80-969672-0-9.
- [3] K. Bartušek, E. Gescheidtová: Testing the quality of magnetic gradient fields for studying self-diffusion processes by magnetic resonance methods. *Meas Sci Technol* 17 (8), 2256-2262 (2006).
- [4] Z. Starčuk jr., I. Tkáč, Z. Starčuk: Localised proton MR spectroscopy: Short Echo time STEAM. *Proceedings of the ISMRM 5th annual meeting, Vancouver, 1997*, p. 1459.
- [5] I. Tkáč, Z. Starčuk, I.Y. Choi, R. Gruetter: In vivo H-1 NMR spectroscopy of rat brain at 1 ms echo time. *Magn Reson Med* 41, 649-656 (1999).
- [6] V. Mlynárik, S. Gruber, Z. Starčuk, Z. Starčuk jr., E. Moser: Very Short Echo Time Proton MR Spectroscopy of Human Brain with Standard Transmit/Receive Surface Coil. *Magn Reson Med* 44, 964–967 (2000).
- [7] Z. Starčuk jr., Z. Starčuk, V. Mlynárik, M. Roden, J. Horký, E. Moser: Low Power Water Suppression by Hyperbolic Secant Pulses with Controlled Offsets and Delays (WASHCODE). *J Magn Reson* 152, 168–178 (2001).

- [8] Z. Starčuk jr., Z. Starčuk, J. Starčuková, J. Horký: Optimized antisymmetric composite pulses for fast proton spectroscopic imaging. Proceedings of the 13th annual meeting of the ISMRM, Miami, 2005, p 2520.
- [9] Z. Starčuk jr., Z. Starčuk, J. Starčuková, P. Krupa: Implementation of a New Composite Pulse for Excitation in Fast Proton Spectroscopic Imaging at 1.5 T. Proceedings of the ISMRM 14th annual meeting, Seattle, 2006, p. 3070.
- [10] M. Althaus, W. Dreher, C. Geppert, D. Leibfritz: Fast 3D echo planar SSFP-based 1H spectroscopic imaging: demonstration on the rat brain in vivo. Magn Reson Imaging 24, 549–555 (2006).
- [11] Z. Starčuk jr., K. Bartušek, H. Hubálková, T. Bachorec, J. Starčuková, P. Krupa: Evaluation of MRI artifacts caused by metallic dental implants and classification of the dental materials in use. Measurement Science Review, ISSN 1335-8871, 6 (2), 24–27 (2006).
- [12] K. Bartušek, Z. Dokoupil, E. Gescheidtová: Magnetic field mapping around metal implants using an asymmetric spin-echo MRI sequence. Meas Sci Technol 17, 3293–3300 (2006).
- [13] J. Starčuková, Z. Starčuk jr., H. Hubálková, I. Linetskiy: Magnetic susceptibility and electrical conductivity of metallic dental materials and their impact on MR imaging artifacts. Dental Materials, doi:10.1016/j.dental.2007.07.002. V tisku.
- [14] H. Hubálková, Z. Starčuk jr., I. Linetskiy, J. Starčuková, H. Tycová, K. Bartušek, P. Krupa, J. Mazánek: Magnetická rezonance a fixní ortodontický aparát. Progresdent, ISSN 1211-3859, 13 (3), 43-47 (2007).

Ing. Zenon Starčuk jr., CSc., Ing. Jana Starčuková, Dr., Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i, Královopolská 147, 612 64 Brno
e-mail: starcuk@isibrno.cz, jana@isibrno.cz, tel. +420 541 514 247, fax +420 541 514 402

Ivan VLČEK, Martin ZOBAČ, Libor DUPÁK, Jan DUPÁK, Petr KAPOUNEK, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Brno

Prototyp stolní elektronové svářečky MEBW-60/2

Článek popisuje prototyp nové elektronové svářečky MEBW-60/2. Zařízení je zdokonalenou verzí svářečky vyvinuté v Ústavu přístrojové techniky AV ČR v průběhu minulých dvaceti let. Disponuje pracovní komorou o objemu 7 litrů, elektronovou tryskou s urychlovacím napětím do 60 kV a výkonem svazku plynule regulovatelným do 2 kW. Pro pohyb svařence je využit dvouosý motorický manipulátor. Řízení svářečky je plně digitální, všechny funkce jsou uživateli dostupné pomocí přenosného ovládacího pultu. Součástí zařízení je pracovní stůl s pracovní plochou dostatečně velkou pro provedení potřebných přípravných prací. Prostorové uspořádání zařízení je variabilní, což umožňuje jeho přizpůsobení v místě instalace.

Klíčová slova: elektronová svářečka, svařování elektronovým svazkem

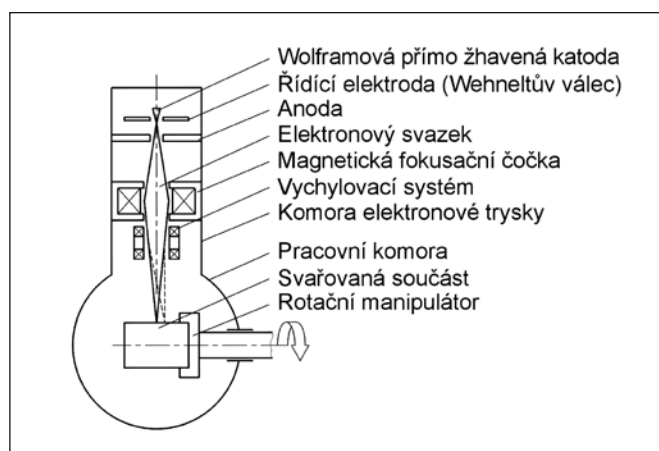
1. ÚVOD

Svařování elektronovým svazkem je jedním z mnoha tavných způsobů svařování. Elektrony jsou pro svařování získávány zpravidla termoeemísi z přímo žhavené wolframové katody, urychleny elektrickým polem (rozdílem napětí 30 až 200 kV) a pomocí elektronové optiky zaostřeny na malou plošku v místě svaru. Při dopadu se jejich kinetická energie přemění v teplo, které je využito k ohřevu svařovaných součástí. Celý proces z principu probíhá ve vakuu, což je výhodné z více hledisek (zabránění oxidace svaru, vakuové přetavení kovu a další). Obecné schéma elektronové svářečky je na obr. 1 (převzato z [1]).

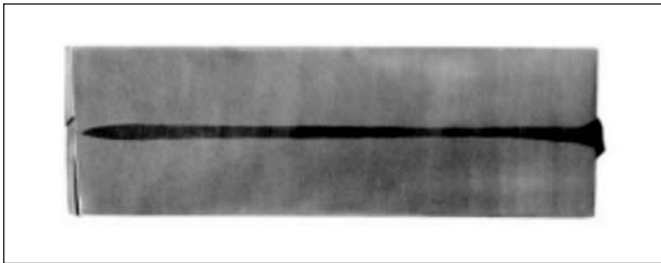
Přestože je hloubka vniku elektronů do většiny kovových materiálů velmi malá (řádově desetin milimetru), je možné elektronovým svazkem provařit značné tloušťky díky tzv. hloubkovému efektu [2]. Jako příklad může posloužit obrázek průřezu svaru v hliníku, viz. obr. 2.

Pro svoje charakteristické a unikátní vlastnosti si elektronové svařování vydobylo pevné postavení v mnoha významných průmyslových odvětvích, jako např. v automobilovém, jaderném či leteckém průmyslu. K těmto vlastnostem patří vysoký poměr hloubka:šířka svaru, hluboké průvary, minimální tepelné ovlivnění okolí svaru, malá deformace součástí po vychladnutí, minimální převýšení svařového kovu (ušetření opracování povrchu svaru), pevnost svaru blízká pevnosti základního materiálu, velká přesnost a reprodukovatelnost, možnost svařování obtížně svařitelných kovů, svařování kombinací

různorodých kovů a stálá vysoká kvalita svárů. Informace o svařování elektronovým svazkem lze čerpat např. z monografií [2, 3] nebo z webových stránek výrobců [4, 5, 6, 7, 8].



Obr. 1 Schéma elektronové svářečky, převzato z [1]



Obr. 2 Průvar v hliníku s hloubkou 150 mm, převzato z [4]

V současnosti se technologie elektronového svařování dožívá padesátých narozenin. Její počátky jsou spojovány se jmény J. A. Stohr a K. H. Steigerwald [2]. Podobně jako v elektronové mikroskopii [9], jsme ani v technologickém využití elektronového svazku nezůstali za světem pozadu. Již v polovině šedesátých let byla v ÚPT pod vedením Ing. Ladislava Zobače vyvinuta a používána víceúčelová vakuová pec s indukčním, elektronovým a IR ohřevem [10]. Ta se stala základem pro první českou elektronovou svářečku ES-2 vyrobenou v počtu sedmi kusů. Její modernizovaná verze je využívána v ÚPT dodnes.

V druhé polovině devadesátých let byla zkonstruována stolní elektronová svářečka SES-1 [11, 12]. Byla určena pro svařování malých součástí v přístrojové a kryogenní technice [13]. Tato svářečka se stala vzorem pro níže popsaný prototyp.

2. ELEKTRONOVÁ SVÁŘEČKA MEBW-60/2

V roce 2005 projevíli zástupci německé firmy zájem o začlenění elektronové svářečky SES-1 do svého výrobního programu. Na začátku následujícího roku se rozběhla výroba prototypu. Ačkoli se původně předpokládalo, že dodané zařízení se bude od svého vzoru lišit jen v detailech, ukázalo se, že bez řady zásadních změn není předání do výroby možné. Hlavními důvody inovací byla nedostatečná dokumentace, zastaralá elektronika, požadavky investora na použití moderních a dostupných prvků a harmonizace zařízení s platnými normami EU. Inovovaná svářečka, výsledek 18 měsíční práce, je na obr. 3.

Stojan a pracovní stůl svářečky mají jednotnou výšku kancelářského stolu. Nábytek je modulární, což usnadňuje jeho transport a umožňuje sestavit různé konfigurace (uspořádání do pravého úhlu – viz. obr. 3, přímé a další).



Obr. 3 Stolní elektronová svářečka MEBW-60/2

Elektronové dělo

Elektronové dělo se od děla popsaného v [11] liší jen minimálně. Zdrojem elektronů je přímo žhavená katoda tvořená wolframovým drátem o průměru 0,15 mm ohnutého do tvaru písmene „V“. Použité urychlovací napětí je do 60 kV. Nejvyšší výkon elektronového svazku je 2 kW. K zaostření svazku na povrch svařovaného materiálu slouží magnetická čočka, k jeho vychylování magnetický vychylovací systém. Ten je využit také k rastrování svazem při zobrazování svarů na principu snímání odražených elektronů [14] podobně jako v rastrovacím elektronovém mikroskopu. Nově je elektronové dělo vybaveno

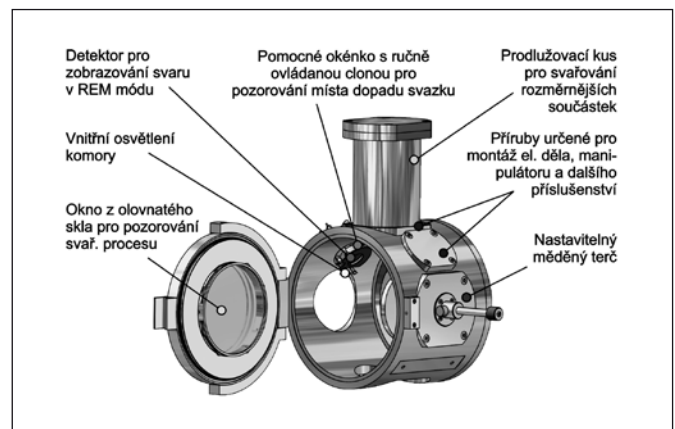
bezpečnostním prvkem, který odvádí zbytkový elektrický náboj, pokud není v prostoru trysky vakuum. Tím je zvýšena bezpečnost obsluhy před úrazem elektrickým proudem, např. během výměny katody.

Pracovní komora a vakuový systém

Vakuová komora (viz. obr. 4) je válcová o objemu 7 litrů. Komora má přední dveře otevírané do boku umožňující vkládání svařovaných součástek. Dveře jsou opatřeny okénkem pro pozorování svařovacího procesu. V zadní části je komora uzavřena víkem, na které navazuje vakuový systém. Vnitřní využitelný prostor komory má průměr 235 mm a délku 155 mm. Na válcové stěně komory jsou umístěny čtyři větší a dvě menší příruby. Na ně lze montovat elektronové dělo, manipulátor a další přípravky v různých konfiguracích. Díky tomu je možné i při poměrně malé velikosti komory svařovat širokou škálu součástí (např. i trubky s délkou několika metrů).

Jednoduchý vakuový systém, který se skládá z rotační a dvou turbomolekulárních vývěv, umožňuje rychlé vyčerpání komory (během 3 min) i její zavzdušnění (méně než 30 s). Pro provoz svářečky není třeba vodní chlazení (ani pro vývěvy ani pro čočky). Napájení svářečky je jednofázové ze sítě 230 V/50 Hz s maximálním odběrem proudu 16 A.

Při konstrukci zařízení, které pracuje s vysoce urychlenými nabitými částicemi, se musí brát ohled na radiační bezpečnost. Při práci s elektronovým svazkem o energii 60 keV vzniká poměrně tvrdé rentgenovo záření, které musí být dostatečně odstíněno, aby nebyla obsluha vystavena zdravotním rizikům. Navržené zařízení splňuje zákonné limity a obdrželo atesty od příslušných úřadů v České republice a Německu.



Obr. 4 Pracovní vakuová komora svářečky MEBW-60/2

Manipulátor

Svářečka je vybavena dvouosým manipulátorem pro svařování rotačních svarů umožňujícím rotační a lineární pohyb svařovaných součástí. Lineární pohyb ve směru osy rotace je používán pro hrubé nastavení svazku do místa svaru. Manipulátor je poháněn dvěma stejnosměrnými motory a je vybaven odměřovacím zařízením pro přesné a reprodukovatelné nastavení polohy svařovaných součástek.

Elektronika a ovládání

Elektronika svářečky je tvořena šesti jednotkami:

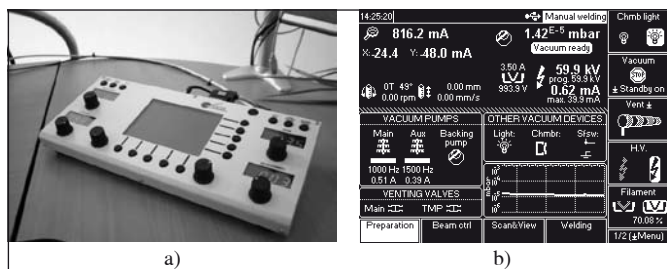
- vysokonapěťovým zdrojem,
- zdroji pro elektronovou optiku,
- zobrazovací a rastrovací jednotkou,
- řízením vakua,
- zdroji pro manipulátor a
- ovládacím panelem.

Jednotky jsou uloženy ve dvou skříních pod deskou pracovního stolu svářečky. Společným rysem elektroniky je využití mikroprocesorového řízení, které přineslo větší uživatelský komfort, automatizaci řady funkcí, plnou digitalizaci, auto-diagnostiku, možnost dálkového řízení a řadu dalších funkcí. Vzájemnou komunikaci mezi prvky systému zajišťuje sériová komunikační linka standardu CAN 2.0.

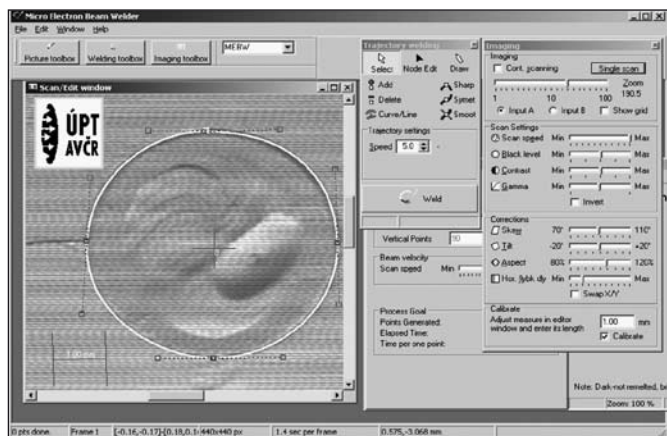
Všechny ovládací prvky svářečky jsou umístěny na lehkém, přenosném pultu vybaveného grafickým displejem (viz. obr. 5). Pomocí tohoto pultu je možné svářečku řídit v manuálním či automatickém režimu. Pro pokročilejší metody, např. svařování po zadané křivce nebo pro transfer grafiky na povrch svařence [15], je možné použít počítač s příslušným programovým vybavením (viz. obr. 6.). Propojení počítače s elektronikou svářečky je prostřednictvím rozhraní USB 2.0.

Aplikace

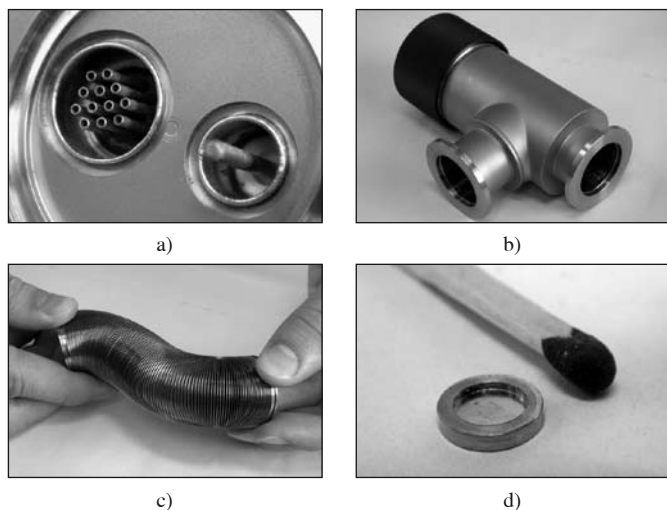
Oblasti použití svařování elektronovým byly již naznačeny v úvodu. Několik konkrétních aplikací je možno vidět na obr. 7. Na obr. 7a) je ultravakuové příruba s dvojicí kovových průchodek,



Obr. 5 a) Ovládací pult svářečky MEBW-2/60, b) příklad informací zobrazovaných na displeji ovládacího pultu



Obr. 6 Program pro řízení svářečky MEBW-2/60 z osobního počítače



Obr. 7 Příklad součástek svařovaných elektronovým svazkem
a) ultra-vakuové elektrické průchodky, b) vakuový ventil,
c) membránový vlnovec, d) membránka o průměru 6 mm

kteřé byly přivařeny pomocí elektronového svazku (pro svary tohoto typu – excentrické nebo složité tvarované – je vhodné využít zmíněného počítačem řízeného svařování po zadané křivce). Na obr. 7c) je výrobně velice pracný membránový vlnovec. Je svařen z desítek nerezových membrán o tloušťce 50 μm . Donedávna nebylo možno podobnou součástku vyrobit jinak než s pomocí elektronového svazku, dnes mu konkuruje svařování mikroplozmasou.

Velice slibná oblast použití popsaného zařízení je svařování kombinací kovových materiálů, které lze jiným způsobem spojit jen velmi obtížně nebo vůbec. Příkladem mohou být dvojice nerez-hliník, titan-hliník a mnoho dalších. Podobné atypické kombinace přináší mnohé výhody v řadě moderních pokročilých technologií [13].

3. ZÁVĚR

V průběhu posledních dvou let byl navržen a vyroben prototyp nové elektronové svářečky určené pro aplikace v oblasti přístrojové, vakuové a kryogenní techniky. Za vzor mu bylo zařízení již dříve vyvinuté v Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Svářečku zařadila do svého výrobního programu zahraniční firma, která v současnosti zahajuje produkci v rámci licenční smlouvy s ÚPT Brno. Svářečka MEBW-60/2 byla představena odborné veřejnosti na výstavě pořádané v rámci konference ASTK'07 (10. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium) v Cáchách, Německo, kterou pořádal tamní institut ISF (Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik) při univerzitě RWTH, Cáchy ve dnech 23. a 24. října 2007. Další informace o svářečce je možné nalézt na webu výrobce [16].

Tento projekt je podporován výzkumným záměrem AV0 Z20650511.

Literatura

- [1] Vlček, I., Zobač, M.: Křížový stůl do stolní elektronové svářečky. *Jemná mechanika a optika* 51 [11-12] - S. 214-216 (2006).
- [2] Meleka, A., H.: *Electron-beam Welding : Principles and Practice*. Published by McGRAW-HILL Publishing Company Limited for The Welding Institute. London 1971.
- [3] Schultz, H.: *Electron beam welding*. Cambridge, England: Woodhead Publishing/The Welding Institute, (1993).
- [4] Pro-beam.de [online]. [cit. 12.12. 2007] Dostupné z: <<http://www.pro-beam.de/>>.
- [5] CVE - Cambridge Vacuum Engineering [online]. [cit. 12.12. 2007]. Dostupné z: <<http://www.camvaceng.com/>>.
- [6] EBFFF - Electron Beam Free Form Fabrication | Electron Beam Welding [online]. [cit. 12.12. 2007]. Dostupné z: <<http://www.sciacy.com/>>.
- [7] EBTEC Corporation - Electron Beam Welding, Laser Welding, Laser Drilling, Laser Cutting... [online]. [cit. 12.12. 2007]. Dostupné z: <<http://www.ebteccorp.com/>>.
- [8] Steigerwald Strahltechnik SST [online]. [cit. 12.12. 2007]. Dostupné z: <<http://www.steigerwald-cb.de/en/>>.
- [9] Delong, A.: On the development of electron microscopes in Brno, in Proc. 12th EUREM, vol. III (2000) 11.
- [10] Zobač, L., Dupák, J., Kachlík, J., Krejčí, Z., Ustohal, V.: Víceúčelová vakuová pec s indukčním, elektronovým a odporovým ohřevem, *Slaboproudý obzor* 28 - S. 146-152 (1967).
- [11] Dupák, J., Vlček, I.: Elektronové dělo pro svařování v přístrojové technice. *Jemná mechanika a optika* 44 [7-8] - S. 239-241 (1999).
- [12] Dupák, J., Vlček, I., Zobač, M.: Electron Gun for Computer-controlled Welding of Small Components. *Vacuum* 62 [2-3] - S. 159-164 (2001).
- [13] Dupák, J., Kapounek, P., Horáček, M.: Použití nové technologie svařování elektronovým svazkem v kryogenní a vakuové technice. *Jemná mechanika a optika* 40 [10-11] - S. 342-343 (1995).
- [14] Zobač, M.: *Zobrazení svárů v elektronové svářečce*. Diplomová práce, Brno 1998.
- [15] Zobač, M.: Marking of welded pieces using continuous or pulse electron beam. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Electron Beam Technologies*, Institute of Electronics BAS, Varna, Bulgaria - S. 191-197 (2003).
- [16] Focus [online]. [cit. 12.12. 2007]. Dostupné z: <<http://www.focus-e-welding.de/>>.

Ing. Ivan Vlček, Ph.D., Ing. Martin Zobač, Ing. Libor Dupák, Ing. Jan Dupák, CSc., Petr Kapounek, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Královopolská 147, 612 64, Brno, e-mail: iv@isibrno.cz, zobac@isibrno.cz, <http://www.isibrno.cz>, tel.: 541514297, fax: 541 514 402

Za Ing. Františkem Petrů, DrSc.



Odešel náš kolega, dlouholetý vedoucí skupiny a oddělení a bez nadsázky „otec zakladatel“ oboru laserů a interferometrie nejen na Ústavu přístrojové techniky, ale i v bývalém Československu. Odešel uprostřed nedokončené práce, na své vědecké problémy myslel až do svých posledních chvil a byla to jeho práce, která mu dávala sílu a naději v těžkých posledních dnech života. Měl vzácný dar technického citu pro to, aby věci v jeho rukou fungovaly

tak, jak si přál a přitom měl vhléd do fyzikální podstaty problémů, na kterých pracoval. Jeho vytrvalost a trpělivost při práci v laboratoři byla neuvěřitelná. V tomto sotva někdo z nás, jeho následovníků bude schopen se mu přiblížit. Ještě za jeho života jsme si navzájem říkali, když se něco v laboratoři nedařilo: „Vezmi si příklad z Dr. Petrů, ten by to nevzdal po pár pokusech“. Nyní vstoupí jeho houževnatost v našem kolektivu do legend. Nebyl člověkem, který by miloval publicitu, veřejná vystoupení, zasedání v komisích, radách a výborech, tedy vše to, v co někdy degeneruje pracovní náplň starších vědeckých pracovníků. Svě místo vždy viděl v laboratoři, tam měl svůj druhý domov a cítil se tam šťastný.

Ing. František Petrů, DrSc. se narodil roku 1927 ve Veselích u Počátek. Vysokoškolské vzdělání získal na Vysoké škole technické v Brně, kde pracoval po absolutoriu na Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky. Jeho výzkumná skupina byla postupně přefazena do n. p. Tesla Brno, pak do nově zřízených vývojových dílen ČSAV a z nich byl následně vytvořen Ústav přístrojové techniky ČSAV, nyní AV ČR, v.v.i. Zde prožil většinu svého profesního života. V roce 1963 obhájil kandidaturu technických věd a v roce 1989 doktorát věd. Byl autorem či spoluautorem více než stovky vědeckých publikací a řady patentů a autorských osvědčení.

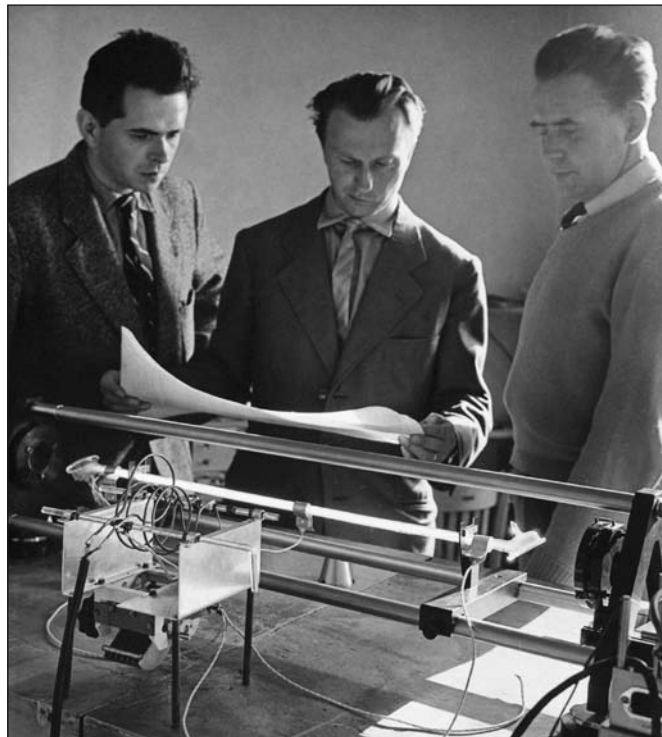
Odborné zaměření v prvopočátcích jeho kariéry směřovalo do vysokofrekvenční elektroniky, ale velmi brzy se zájmu přesunulo více k optice. Se svou skupinou na ÚPT pracoval na vývoji infračerveného spektrofotometru pro kvantitativní analýzu. Poté, co byly publikovány první informace o laserech, přeorientoval se zcela tímto směrem a v roce 1963 se svými spolupracovníky uvedl do provozu první plynový laser v tehdejší Československu. Tak, jak bylo tehdy požadováno, na ÚPT prováděl nejen základní výzkum, ale i vývoj přístrojů, které měly nalézt uplatnění v průmyslu. Nejprve k. p. Meopta Přešov, později n. p. Metra Blansko zahájily výrobu helium-neonových laserů navržených v jeho skupině. Postupně zaměřil svoji pozornost na lasery pro nejnáročnější aplikace, alespoň z hlediska přesnosti, stability a spektrálních vlastností – na lasery pro metrologii a interferometrii. Stabilizované He-Ne lasery a laserové interferometry, které byly výsledkem tvůrčího úsilí jeho a jeho kolegů se opět dočkaly sériové výroby. Ve své práci vždy myslel na potenciální využití

svých výsledků a neváhal věnovat mnoho času na dořešení všech technických detailů. V posledních letech své kariéry pracoval na vývoji speciálních interferometrů pro měření malých vzdáleností, interferometrů s velkým rozlišením, linearitou a přesností. Dnes bychom s použitím módních termínů řekli, že přispěl svým dílem k rozvoji nanotechnologií a nanometrologie. Hodně úsilí věnoval též refraktometrii, měření indexu lomu atmosféry, který zásadně limituje přesnost interferometrických měření. Jeho poslední prací v oblasti stabilních He-Ne laserů byla zcela unikátní laserová trubice s prodlouženou životností a rychlým teplotním ustálením, která je nyní použita v několika exemplářích primárního etalonu vlnové délky 633 nm v ČR. A v neposlední řadě patří mezi jeho práce také světově proslulá technologie výroby kyvet plněných ultračistými plyny, které se využívají k laserové spektroskopii a především k frekvenční stabilizaci laserů.

Ing. František Petrů, DrSc. měl být v prosinci 2007 jmenován emeritním vědeckým pracovníkem ÚPT. Bohužel se toho již nedožil.

Vzpomínáme.

*Ing. Josef Lazar, Dr.
a spolupracovníci oddělení Koherentní optiky
ÚPT AV ČR, v.v.i.*



Ing. František Petrů, DrSc. (uprostřed) u prvního He-Ne laseru v roce 1963



OPTA 2008 zaostří na dětské brýle

Poslední únorový víkend letošního roku proběhne na brněnském výstavišti opět ve znamení oční optiky. Do 14. ročníku vstoupí nejvýznamnější oborová prezentace v zemích střední a východní Evropy - Mezinárodní veletrh oční optiky, optometrie a oftalmologie OPTA.

OHLÉDNUTÍ ZA REKORDNÍ OPTOU 2007

Minulý ročník tomu nadcházejícímu nastavil mimořádně vysokou laťku. K meziročnímu nárůstu došlo ve všech sledovaných parametrech. Představilo se 242 vystavujících firem (o 20 více než na Optě 2006) z 24 zemí (předtím z 18). Pronajatá výstavní plocha 4 860 m² znamenala meziroční nárůst o 500 m². Výrazně přibýlo také návštěvníků, kterých se zaregistrovalo 6584 ze 32 zemí oproti 5728 z 26 zemí na předchozím ročníku. Na růstu se podepsal především vysoký zájem zahraničí, odkud přijelo 1218 návštěvníků, tj. 18,5 %. Jde o nejvyšší podíl zahraničních návštěvníků mezi všemi veletrhy, které se na brněnském výstavišti během roku konají! O rok dříve přijelo zahraničních návštěvníků 732 (12,8 % z celkového počtu).

Zajímavé údaje poskytl také marketingový průzkum. Podíl odborníků mezi ekonomicky aktivními návštěvníky dosáhl 63,2 % a téměř jedna pětina návštěvníků (více než 1200 osob) na veletrh jezdí i s cílem uzavřít obchody.

Připomeňme si, že první veletrh OPTA v Brně proběhl v roce 1995 na ploše 1150 m², zúčastnilo se 90 vystavujících firem a 2012 návštěvníků. V průběhu dalších let plynule rostl a zvyšující se zájem firem si postupně vyžádal dvoje stěhování, nejprve z pavilonu E do pavilonu B a poslední dva ročníky se konaly v pavilonu V. Jedna z největších a nejmodernějších výstavních hal nejen v Brně, ale i ve střední Evropě, bude hostit také Optu 2008.

S NOVÝM PARTNEREM V ZÁDECH

OPTA vždy byla československým veletrhem, přitažlivým pro slovenské vystavovatele i návštěvníky. Nyní je československým veletrhem už i oficiálně. Novým partnerem veletrhu se na počátku roku 2007 stala Optická unie Slovenska, která se tak připojila k tradičním spolupořadatelům – akciové společnosti Veletrhy Brno a Společenstvu českých optiků a optometristů. Ze strany Optické unie Slovenska má veletrh OPTA výhradní podporu jako jediná oficiální výstavní akce pro slovenské optiky.

Nová spolupráce se pozitivně odrazila již na Optě 2007, kde slovenské vystavovatele obsadili o 110% více výstavní plochy než v předcházejícím roce. Počet odborných návštěvníků ze Slovenska se meziročně zvýšil o 55 %. V plném rozsahu by se výsledky smlouvy s Optickou unií Slovenska měly projevit až na Optě 2008, kdy se pořadatelé chtějí zaměřit na nábor ze středního a východního Slovenska.

Zároveň by měla zesílit také účast z dalších zemí. Díky úzké spolupráci společnosti Veletrhy Brno s agenturou CzechTrade se do akvizice odborníků zapojují zahraniční kanceláře CzechTrade v Polsku, Rakousku, Maďarsku, Slovinsku, Bulharsku, Rumunsku a Ukrajině. Ze všech těchto zemí budou organizovány mise obchodníků s optickým zbožím a dalších odborných návštěvníků.

ZVÝRAZNĚNÉ TÉMA: DĚTSKÉ BRÝLE

Ve spolupráci s odbornými partnery bylo pro nadcházející ročník zvoleno nosné téma „Děti a jejich vidění“. „Odborná péče

o dětský zrak a jeho vhodná i estetická korekce je zcela podstatná pro štěstí, pohodu a zdravý vývoj našich dětí, a navíc, dobré vidění jim umožňuje dosáhnout i dobré úrovně vědění. Péče o dětský zrak proto má být prioritou jak oftalmologů, tak i komerčněji orientovaných optometristů a optiků,“ vysvětluje volbu zvládnutého tématu Beno Blachut, prezident Společenstva českých optiků a optometristů (SČOO).

Zrak se vyvíjí nejdéle ze všech smyslů a jeho složitější funkce, které vyžadují spolupráci obou očí, nám nejsou vrozeny, ale musíme se je naučit. Péče o dětský zrak je náročná i vzhledem k měnící se anatomii hlavy, u malých klientů je navíc třeba počítat s větší pohyblivostí a méně kvalitním zacházením s korekční pomůckou. Brýle musí dobře sedět a obruba by měla být lehká, stabilní a elastická. Na veletrhu Opta 2008 budou dětské zrakové korekční pomůcky prezentovány nejen ve speciálních vitrínách na stáncích jednotlivých firem, ale také v centrální tematické sekci s dětským programem. Vybrané modely si návštěvníci prohlédnou přímo v akci - v rámci dětských přehlídek brýlí.

Zvýrazněné téma zohlední i soutěž o nejlepší exponáty veletrhu TOP OPTA 2008, která zavádí novou kategorii „dětské brýle“. Přihlášené exponáty bude hodnotit jak odborná porota, tak laická porota dětí z mateřských škol. Připomínáme, že dalšími čtyřmi kategoriemi soutěže TOPOPTA 2008 jsou brýlové čočky, kontaktní čočky, obruby včetně slunečních brýlí a přístroje a technologie pro optiku a oftalmologii. V minulém ročníku se do soutěže zapojilo 14 vystavovatelů s 28 exponáty. Uzávěrka přihlášek do soutěže TOP OPTA 2008 je k datu 30. ledna, výsledky budou vyhlášeny na oficiálním zahájení veletrhu a úspěšné exponáty vystaveny v pavilonu V.

ZASEDÁNÍ CELOEVROPSKÉHO OPTOMETRICKÉHO VZDĚLÁVÁNÍ

V průběhu veletrhu OPTA 2008 se uskuteční třídní Zasedání celoevropského optometrického vzdělávání. V pátek 22. února se uskuteční již tradiční Kongres pro učitele optometrie ze střední a východní Evropy; v sobotu 23. a v neděli 24. února 2008 pak proběhne premiérový Celoevropský kongres o spolupráci optometrických univerzit.

Zasedání, které je historicky první celoevropskou akcí svého druhu, pořádá Společenstvo českých optiků a optometristů (SČOO) a Evropská rada optometrie a optiky (ECO) v partnerství se společnostmi BVV Veletrhy Brno., CIBA Vision a Essilor.

Kromě zástupců vedení předních vzdělávacích institucí z celé Evropy se Zasedání zúčastní také prezidenti evropské a světové profesní rady a mnozí další nejvýznamnější mezinárodní činitelé v oboru.

Smyslem Zasedání je napomoci sjednocení optometrického vzdělávání v celé EU, podnítit aktivní mezinárodní spolupráci všech zúčastněných univerzit a poskytnout pro její další fungování ideální platformu. Na programu je tedy mnoho odborných jednání, v průběhu večerů zúčastněné sblížíme i společensky, a to v Business Clubu BVV a v prostorách divadla Reduta.

NOVINKY V ORGANIZACI

Pořadatelé pro účastníky připravili několik novinek. Nomenklatura se rozšiřuje o další skupiny výrobků, mj. o dětské brýle, ochranné brýle, součástky brýlí, naslouchací přístroje, aranžérské pomůcky a dekorace nebo techniky broušení a brusky. Nábor odborných návštěvníků se současně zaměří na nové cílové skupiny z módní branže - velkoobchodníky i maloobchodníky s módním zbožím, návrháře aj.

Mění se také otevírací doba veletrhu. Na žádost vystavovatelů se v sobotu prodlouží až do 19.00 hodin, a pokud bude zájem,

může se stejným způsobem prodloužit i v pátek. Návštěvníci budou podléhat 100% registraci, přičemž cenově nejvýhodnější pro ně bude předregistrace na internetu na www.opta.cz. Předregistrovat je možné do **15. února 2008**.

A inovace se dočká také tradiční společenský program sobotního večera... Nechte se překvapit!

Martin Střítecký

CONTENTS

Fifty years of the Institute of Scientific Instruments

(L. Frank) 3

Laboratory of optical micro-manipulation techniques – new directions of research

(P. Zemánek, A. Jonáš, J. Ježek, P. Jákl, M. Šerý, T. Čižmár, V. Karásek, M. Šiler, O. Brzobohatý, J. Trojek) 6

The paper presents brief overview of the history and modern trends of optical micromanipulations techniques and their applications in the group of Optical micromanipulation techniques at the Institute of Scientific Instruments of the ASCR, v.v.i. The presented results deal especially with integration of optical micromanipulations and microanalytical systems „lab-on-a-chip” (delivery and separation of microobjects and nanoobjects suspended in the fluid, usage of photopolymerization to manufacture some parts of the above mentioned systems, combination of optical manipulations with optical spectroscopy) and with the study of interaction between light and mass demonstrated by the phenomenon of optical binding of objects.

Writing System with Shaped Electron Beam (V. Kolařík, F. Matějka, B. Lencová, S. Kokrhel, M. Horáček, T. Radlička, M. Urbánek, L. Daněk) 11

The paper describes an improvement of electron-beam lithograph BS 600 working with a fixed accelerating voltage of 15 kV and a rectangular-shape variable-size electron beam. The system has undertaken an important upgrade during last few years. Main goal was to increase the resolution and the writing speed. Achieved parameters and characteristics of the system are described as well as few examples of prepared structures.

Key-words: E-beam lithograph, shaped electron beam, electron-optics column, electron scattering, writing speed.

Laboratory of interferometry and high coherence lasers

(J. Lazar, O. Číp, P. Jedlička, B. Mikel, B. Růžička, Z. Buchta, J. Hrabina, R. Šmíd, M. Čížek) 16

We present an overview of the new results of the group of Coherent lasers and interferometry of the Institute of Scientific Instruments AS CR, v.v.i. The new results deal with stabilized semiconductor lasers for hyperpolarization of noble gases, design of new laser systems for metrology of optical frequencies based on molecular

iodine, the application of optical comb synthesizer in the metrology of lengths and interferometric measurements with high resolution. The article also reports about the main topics of investigation of the group at present and in near future.

Some results of the Group of cryogenics and superconductivity at the Institute of Scientific Instruments

(P. Urban, P. Hanzelka, J. Jelínek, T. Králík, V. Musilová, Aleš Srnka) 20

The paper shows some results of the group of cryogenics and superconductivity, where low temperature devices are developed and realized. The group has built several cryostats and superconductivity magnets for NMR and other experimental systems. Nowadays radiative heat transfer at low temperatures is studied and the results are applied in cryogenics. Another subject of the present study is the cryopumping for ultra-high vacuum applications.

Nuclear magnetic resonance in the Institute of Scientific Instruments – tradition and prospects

(Z. Starčuk jr., J. Starčuková) 24

The paper introduces the group of nuclear magnetic resonance, its historic roots and prospects. The topics studied are represented by two examples. One is methodological – a successful method for single-voxel proton MR spectroscopy at high field with extremely short echo-time is described, as a milestone on the way to high-quality spectroscopic imaging. The other example demonstrates an application – the analysis of MR compatibility of dental alloys.

Desktop electron beam welder EBWM-60/2

(I. Vlček, M. Zobač, L. Dupák, J. Dupák, P. Kapounek) 27

A new prototype of micro electron beam welder MEBW-60/2 was designed and manufactured. The device is improved version of former welder developed in ISI Brno during last 20 years. A vacuum chamber volume is 7 liters. An electron gun power is up to 2 kV and beam energy is up to 60 keV. A two axis motor-driven manipulator is embedded. The welder is completely numerical controlled. All user functions are accessible by a hand-panel. The device is equipped with large workbench necessary for work-piece preparation. Arrangement of the workbench is variable and can fit to customer demands.

Ing. František Petrů, DrSc. deceased (J. Lazar) 30

Opta 2008 stimulates its focus on glasses for children

(M. Střítecký) 31

PHOTONICS PRAGUE 2008

The 6th international Conference on Photonics, Devices and Systems
August 27 – 29, 2008, Olympik Hotel, Prague, Czech Republic



Organized by Czech and Slovak Society for Photonics

PHOTONICS PRAGUE 2008 is the sixth conference in a series organised by the Czech and Slovak Society for Photonics (CSSF). It follows the national meeting in Olomouc (1992) and four International conferences in Prague (1995, 1999, 2002, 2005).

PROGRAM COMMITTEE

Pavel Tománek (Czech Republic) – Chair, ph2008@photon-czsk.org

Peter Andersen (Denmark)

Oleg V. Angelsky (Ukraine)

Jose Luis Arce-Diego (Spain)

Mario Bertolotti (Italy)

Joseph Braat (The Netherlands)

Hyungsek Cho (Korea)

Jiří Čtyroký (Czech Republic)

Brian Culshaw (United Kingdom)

Chris Dainty (Ireland)

Ivan Glesk (USA)

Jiří Homola (Czech Republic)

Jean-Pierre Huignard (France)

Helena Jelínková (Czech Republic)

Satoshi Kawata (Japan)

Vladimir V. Kocharovskiy (Russia)

Jaroslav Kováč (Slovakia)

Malgorzata Kujawinska (Poland)

Roberto Morandotti (Canada)

Juergen Popp (Germany)

Reinhart Poprawe (Germany)

Wolfgang Schleich (Germany)

Dagmar Senderáková (Slovakia)

Irina Sorokina (Norway)

Pavel Tománek (Czech Republic)

Theo Tschudi (Germany)

Hugo Thienpont (Belgium)

Pavel Zemánek (Czech Republic)

Xing Zhu (China)

CONFERENCE TOPICS

1. Lasers and Photodetectors in Industry, Imaging and Sensors
2. Lasers for Medical Applications
3. Photonic Biosensors
4. Design, Simulation and of Photonic Devices
5. Photonic Crystals and Photonic Bandgap Structures
6. Diffractive Photonic Devices
7. Guided Wave Photonics
8. Organic Photonic Materials and Devices
9. Non-linear Materials, Devices and Applications
10. Photonics in Multimedia
11. Nanophotonic and Nanooptics
12. Solid State Lighting + LED, LD, OLED
13. Education in Photonics

CONFERENCE DATE

Photonics Prague 2008 August 27 – 29, 2008

CONFERENCE SITE

Hotel Olympik, Sokolovská 138, Prague 8, Czech Republic, <http://www.olympik.cz>

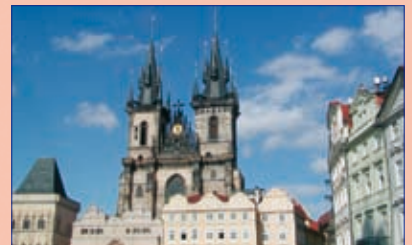
Organizers are pleased to welcome everybody interested in photonics research to the Czech capital, Prague, „city of a hundred spires“.

ABSTRACT SUBMISSIONS

Abstract submissions must normally be made online via the Abstract submission system. An abstract should not exceed 200 words and to facilitate the reviewing process should contain: title of the abstract, full names of author(s), appropriate affiliations, address, and e-mail address of principal (contact) author, number of selected topic, preferred type of presentation (oral/poster), 3 keywords. Abstracts will be subject to review by members of the Program Committee and will appear in the Book of Abstracts issued in a volume with ISBN code.

PAPER SUBMISSION

Authors will be notified of acceptance not later than May 5, 2008, together with guidelines for preparation of camera-ready manuscripts. The camera-ready papers should be submitted before June 2, 2008 for refereeing. Selected papers will be issued. The length of your paper will be 6 pages.



zaostřeno na optiku



OPTA

14. mezinárodní veletrh oční optiky, optometrie a oftalmologie

- Prominentní B2B veletrh oční optiky, optometrie a oftalmologie v zemích střeoevropského regionu
- Veletrh č. 1 pro spádovou oblast střední Evropy s výrazným dopadem na území Slovenské republiky
- Zvýrazněné téma OPTA 2008 - „**Dětské brýle**“
- 3. ročník soutěže **TOP OPTA** o nejlepší exponáty veletrhu
- Zasedání celoevropského optometrického vzdělávání
- Odborné přednášky a semináře
- Firemní prezentace - Lectures Point
- Valná hromada Společenstva českých optiků a optometristů
- Pracovní setkání Optické unie Slovenska

Veletrh OPTA je jedinou možností v České republice a na Slovensku, jak na světové úrovni prezentovat a zhlédnout novinky oborů oční optiky, optometrie a oftalmologie!

Brno, Výstaviště

22. 2. – 24. 2.
2008

www.opta.cz

registrace návštěvníků na www.opta.cz

Central European
Exhibition Centre



BVV



Veletrhy
Brno

Veletrhy Brno, a.s.
Výstaviště 1
647 00 Brno
Tel.: +420 541 152 818
Fax: +420 541 153 063
E-mail: opta@bvz.cz
www.opta.cz