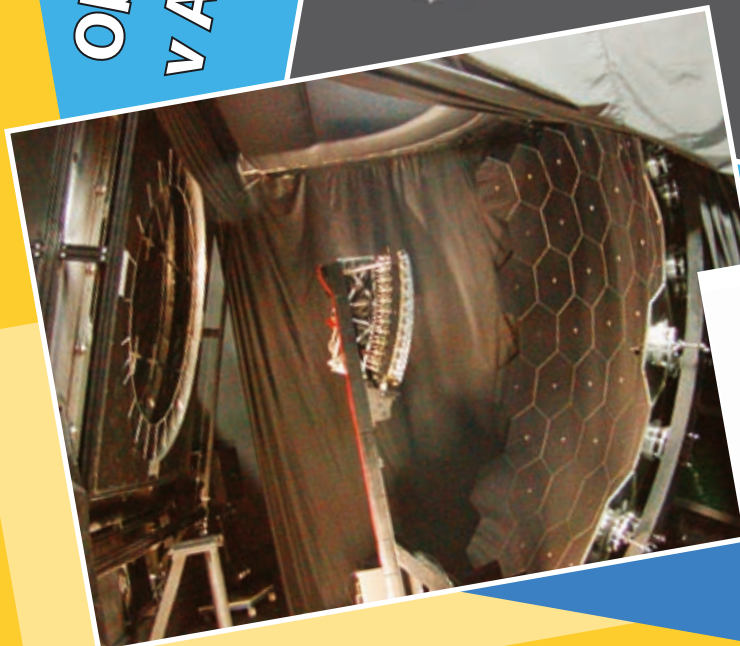
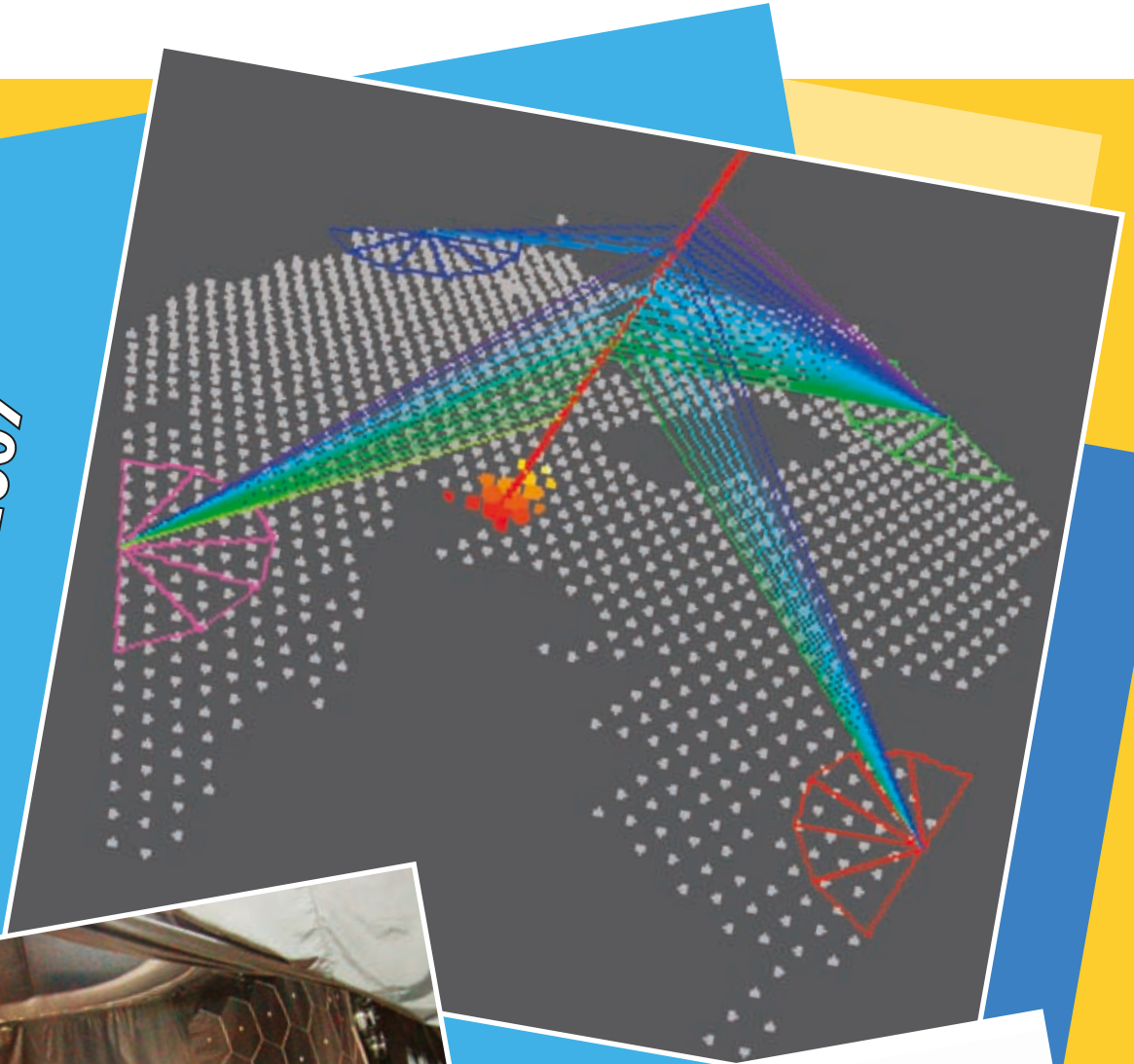


7-8
2007

JMO

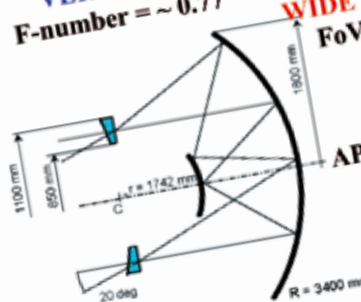
JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA FINE MECHANICS AND OPTICS

**Observatoř Pierra Augera
v Argentíně - 2007**



VERY FAST
F-number = ~ 0.77

WIDE ANGLE
FoV = 40°



VERY LARGE
APERTURE = 2200 mm

Prezident Václav Klaus v Přerově

Značku MEOPTA potkávám na svých cestách po světě

Ve dnech 13. až 15. 6. 2007 navštívil Olomoucký kraj Václav Klaus, prezident České republiky. V původním záměru pana prezidenta byla návštěva několika firem v kraji, mimo jiné i Meopty. Postupně došlo z organizačních důvodů k úpravě programu a návštěvy podniků z něj byly vyjmuty. Pan prezident při návštěvě Přerova 15. 6. 2007 pozval do hotelu Jana na pracovní oběd kromě hejtmana kraje Ivana Kosatíka i zástupce města Přerova a také zástupce naší největší optické firmy. Oběda se zúčastnil majitel firmy pan Paul Rausnitz a představitel bývalého a současného vedení, pánové Vladimír Chlup a Vítězslav Motka.

Pan prezident se omluvil za nepředvídanou změnu v programu a vzpomněl na dřívější setkání se zástupci firmy při pracovní cestě do Izraele. Oběd se nesl v duchu přátelských rozhovorů na různá témata. Pan prezident se zmínil o svém zjištění, že Meopta je značka známá skutečně v celém světě. Setkal se totiž se jménem firmy na některých svých cestách po světě, ať už ve funkci předsedy vlády nebo prezidenta republiky. Ke konci pracovního oběda předal pan Rausnitz panu prezidentovi dar, který zhotovili zaměstnanci společnosti MEOPTA - OPTIKA s. r. o. z optického skla, jako symbol preciznosti, originality a výjimečnosti této firmy.

Foto: Jiří Vojzola



Zprava: hejtman Ivan Kosatík, prezident Václav Klaus, Paul Rausnitz, Vladimír Chlup, Vítězslav Motka



Zleva: Paul Rausnitz, prezident Václav Klaus a hejtman Ivan Kosatík



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 MÁČA, CSc., Ing. Vladimír MATELA, Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Ing. Monika MÍČHALOVÁ, 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 STUĐENOVSKÝ, 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 2007

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS
ROČNÍK 52 7 - 8/2007

OBSAH

| | |
|---|-----|
| Rentgenová optika tečného dopadu (R. Hudec)..... | 203 |
| Aplikace nelineárních optimalizačních metod při vyhodnocování módových spekter planárních vlnovodů (O. Bárta, J. Pištora, J. Vlček, F. Staněk, T. Kreml) | 211 |
| Systém pre určenie okamžitého technického stavu rotujících strojov počas plynulého priebehu dynamického namáhania (R. Krehel) | 218 |
| Pružné klouby ve výpočtu i praxi (J. Maršík)..... | 220 |
| Základné fakty o veľtrhu v Nitre (P. Horňák)..... | 223 |
| Laser – začiatok novej epochy (D. Senderáková) | 224 |
| Fórum normalizátorov na Slovensku (P. Horňák) | 228 |
| Holografia – skutočne 3D obraz (D. Senderáková)..... | 229 |
| Optický tok a nová metoda jeho výpočtu pomocí EMF (J. Kokeš) | 232 |
| Observatoř Pierra Augera začala sdílet data o kosmickém záření s veřejností a studenty | 236 |
| Doplněk o české účasti v projektu Pierra Augera | 236 |
| EQUOTIP – Měření tvrdosti dynamickou metodou (Č. Nenáhlo) | 237 |
| 75. narozeniny docenta Jana Eigla (A. Mikš) | 238 |
| Metódy na meranie fotometrických veličín (P. Horňák) | 238 |
| Nové přístupy v technologickém vzdělávání – Vývoj a integrace evropských modulů v technologickém vzdělávání (K. Nevřalová) | 240 |

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 80 Kč včetně DPH

ADVISORY BOARD

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

Members: Ján BARTL - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Zdeněk BOUCHAL - Palacky Univ. (Czech Rep.), Igor BREZINA - Bratislava (Slovak Rep.), Pavol HORNÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav HRABOVSKÝ - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP - Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRABÍK - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch 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 STUĐENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

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

FINE MECHANICS AND OPTICS

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

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

Editor: Miroslav HRABOVSKÝ

Managing Editor: Jaroslav NEVŘALA

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

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

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

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

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

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

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

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

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2007

FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

VOLUME 52

7 - 8/2007

CONTENTS

| | |
|---|-----|
| Tangential X-ray imaging (R. Hudec)..... | 203 |
| Application of nonlinear optimization methods for interpretation of mode spectra in planar waveguides (O. Bárta, J. Pištora, J. Vlček, F. Staněk, T. Kreml)..... | 211 |
| System for determining actual technical condition of spinning machinery continuous process dynamic stress (R. Krehel)..... | 218 |
| Elastic hinges in design and practice (J. Maršík)..... | 220 |
| Basic facts about trade-fair in Nitra (P. Horňák)..... | 223 |
| Laser – a new era beginning (D. Senderáková)..... | 224 |
| Standardisers' panel in Slovakia (P. Horňák)..... | 228 |
| Holography – 3D picture, indeed (D. Senderáková)..... | 229 |
| Optical flow and its new calculation using EMF (J. Kokeš).... | 232 |
| Pierre Auger Observatory has already started to share cosmic radiation data with public and students | 236 |
| Complementary Czech participation in Pierre Auger project | 236 |
| EQUOTIP – Hardness measurement by dynamical method (Č. Nenáhlo)..... | 237 |
| 75th birthday of associate professor Jan Eigl (A. Mikš)..... | 238 |
| Measurement methods for photometric quantities (P. Horňák)..... | 238 |
| New Approach in Technology Education - Development and Integration of European Modules in Technology Education (K. Nevřalová)..... | 240 |

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: 80 Kč incl. VAT

Rentgenová optika tečného dopadu

1. ÚVOD

Vývoj rentgenové optiky pro kosmické dalekohledy s důrazem na replikované objektivy tečného dopadu má u nás dlouhou tradici. Návrh našich rentgenových objektivů proběhl již koncem 60. let a první z nich spatřil světlo světa v roce 1970. Naše rentgenové objektivy byly zatím použity v 8 kosmických experimentech (Hudec et al., 1999). Dnes je těžiště prací ve vývoji inovované rentgenové optiky pro budoucí kosmické projekty, zejména jde o soustavy se širokým zorným polem a o inovační ultralehkou rentgenovou optiku pro budoucí velké kosmické rentgenové teleskopy. Širokoúhlé rentgenové objektivy by měly poprvé umožnit citlivé monitorování oblohy v oblasti rentgenového záření. Taková potřeba byla silně zdůrazněna například detekcí rentgenových dosvitů zábleskových zdrojů záření gama (gamma ray bursts, GRBs).



Replikované rentgenové astronomické a laboratorní objektivy tečného dopadu vyvinuté u nás v letech 1980 až 2000

2. PROČ RENTGENOVÁ OPTIKA ANEB VĚDA S RENTGENOVOU OPTIKOU

Zobrazující rentgenové teleskopy dosahují podstatně lepšího poměru signál/šum než experimenty bez optiky. Tento fakt je podstatný při snahách o zachycení co nejslabších zdrojů, což je při současném trendu v astrofyzice velmi důležité.

Použití rentgenové optiky navíc umožňuje zobrazování, přesnou lokalizaci, fotometrii, spektroskopii, studia proměnnosti a určování fyzikálních parametrů oblastí emitujících rentgenovou emisi (teplota, elektronová hustota ap.). Kosmické experimenty s rentgenovou optikou jsou rovněž velice vhodné pro přehlídku rentgenové oblohy s cílem detekce a studia rentgenových nov, rentgenových transientů, rentgenových erupcí na hvězdách a aktivních galaktických jádrech, zdrojů v galaktickém jádře, rentgenových dvojhvězd, tzv. SGR (měkké gamma repeaters, tedy rekurentní zdroje) a rentgenové dosvity GRBs.

Rentgenová optika představuje přirozenou a klíčovou součást řady minulých, současných i budoucích kosmických projektů, jako jsou např. družicové observatoře EXOSAT, ROSAT, Einstein, Fobos, AXAF-Chandra, XMM-Newton, ABRIXAS, BeppoSAX,

ASCA, XEUS, Constellation X ap. Řadu aplikací ovšem nalézá rentgenová optika též v laboratoři, například ve fyzice plazmatu, laserového plazmatu, biologii, krystalografii ap. Většina z laboratorních aplikací ovšem vyžaduje velmi vysokou kvalitu (v některých případech dokonce submikronové prostorové rozlišení) zobrazení.

3. RENTGENOVÁ OPTIKA OBECNĚ

Pod rentgenovou optikou jsou často chápány fyzikálně i technicky odlišné systémy a prvky. Nebude proto na škodu si připomenout aspoň základní dělení typů rentgenové optiky:

- rentgenová optika difrakční (Fresnelovy čočky, dírkové kamery) - ve vesmíru nalézá jen malé uplatnění s ohledem na malé apertury
- rentgenová optika refraktivní: velmi omezená aplikace, zejména ve vesmíru
- rentgenová optika reflektivní, založena na totálním odrazu (optika tečného dopadu)
- rentgenová optika reflektivní, založena na normálním dopadu a využití multivrstev

V tomto článku se soustředíme na rentgenovou optiku nejvíce používanou v rentgenové astronomii a astrofyzice, tedy rentgenovou optiku reflektivní tečného dopadu. Alternativní typy rentgenové optiky jsou v ČR studovány jinými autory (např. Hrdý et al. 2001).

3.1. Nejčastěji používané reflektivní rentgenové objektivy

3.1.1. Wolterova optika

Wolterova optika má zejména v kosmu široké a časté použití (ROSAT, EXOSAT, Saljut 7, Fobos, XMM - Einstein, AXAF - Chandra, BeppoSAX, XEUS ...).

Tato optika je založena na dvojité reflexi na dvou površích - je to podmínka pro vysoce kvalitní zobrazení, vyplývající z Abbeho sinové podmínky. V závislosti na kombinaci a orientaci odrazových



Jeden z našich prvních rentgenových objektivů tečného dopadu pro pozorování Slunce typu Wolter 1. Apertura 50mm, rok 1970

ploch existuje několik verzí (tzv. Wolterovy systémy I, II, III), avšak nejčastěji je používána optika typu Wolter I (paraboloid + hyperboloid). Pro laboratorní aplikace se používá modifikace pro zobrazení z obrazové roviny v konečné vzdálenosti - jde o nahrazení paraboly elipsou. Této modifikaci se říká Wolterův mikroskop.

3.1.2 Kuželová aproximace Wolterovy optiky

Wolterovo uspořádání lze aproximovat na výrobu méně pracnými a tudíž levnějšími kuželovými profily. Taková zrcadla mají horší kvalitu zobrazení, avšak dosahují v řadě případů mnohem větší sběrné plochy zejména proto, že jejich vrstvy mohou být vesměs mnohem tenčí.

Kuželové systémy často představují optiku s vysokou sběrnou plochou, zejména pokud je o soustavy vytvářené ohýbáním plochých fólií (tzv. fóliové teleskopy). Příkladem je dánský teleskop SODART, již přes 15 let marně čekající na vypuštění ruského satelitu Rentgen-Spektr-Gama.



Mandrely ze skleněné keramiky pro výrobu replikační technologií složeného rentgenového objektivu o apertuře 240 mm pro rentgenový dalekohled RT-4M pro kosmickou orbitální stanici Saljut 7 (1981)

3.1.3 Kuželová, elipsoidální a paraboloidální optika

Jde o rentgenová zrcadla jen s jedním odrazem nalézající uplatnění většinou v laboratoři jako kolimační, fokusující nebo zobrazující systémy.

3.1.4 Kirkpatrick-Baezova optika

Tato konfigurace nalézá většinou uplatnění v experimentech nevyžadujících velkou sběrnou plochu (sluneční kosmické experimenty, laboratoř). V současnosti však existují návrhy na aplikaci velkých KB modulů též v kosmických stelárních experimentech.

3.1.5 Optika normálního dopadu

Tato optika vyžaduje aplikaci multivrstev na povrchu odrážejících ploch, umožňující reflexi rentgenového záření za normálních úhlů. Použití multivrstev je ovšem spojeno s úzkým pracovním spektrálním oborem. V minulosti byla používána zejména v kosmických slunečních experimentech (TEREK Fobos, TEREK KORONAS...) a v laboratorních aplikacích.

3.1.6 Optika typu račí oko

Tato optika byla navržena v 70. letech pro rentgenové zobrazení s velmi velkým zorným polem, avšak dosud nedošlo k její aplikaci v kosmickém experimentu, zejména pro velkou obtížnost a náročnost její konstrukce. Dnes již však existují první prototypy, a to jak pro Schmidtovo (Schmidt, 1995), tak i pro alternativní Angelovo (Angel, 1998) uspořádání, a kromě astronomické aplikace (Hudec et al. 2006c, Švéda et al. 2006a) se zvažuje i aplikace v laboratoři, například ve fyzice plazmatu (Švéda et al., 2006b).

3.2 Konstrukční problémy

Vývoj a konstrukce různých typů rentgenové optiky je velmi postižena technickými problémy, které činí konstrukci rentgenové optiky pracnou a tudíž nákladnou. Mezi nejdůležitější problémy patří:

- požadovaná mikrodrsnost je méně než 3 nm, ve většině případů však méně než 1 nm a pro řadu aplikací méně než 0,5 nm,
- rentgenová optika je často tvořena vnitřními dutými povrchy,
- je nutno dodržet velmi přísné požadavky na odchylky tvaru a profilu.

4. HISTORIE RENTGENOVÉ OPTIKY TEČNÉHO DOPADU V ČR

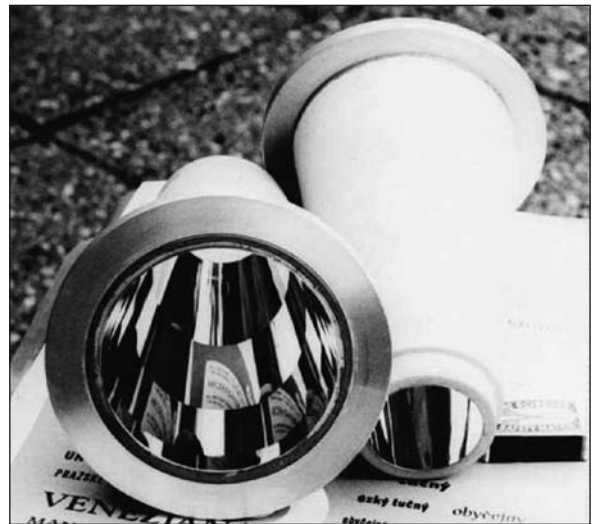
Historie rentgenové optiky tečného dopadu má u nás dlouhou tradici: v roce 2005 jsme si připomněli již třicáté páté narozeniny prvního našeho rentgenového objektivu.

4.1 První kroky

Počátky českého vývoje astronomické rentgenové optiky tečného dopadu jsou spojeny s kosmickým programem INTER-KOSMOS, provozovaným do roku 1989.

Veškeré rentgenové zobrazující teleskopy na sovětských kosmických tělesech byly vybaveny naší rentgenovou optikou (výjimkou byla zrcadla normálního dopadu ve speciálním kanálu rentgenového teleskopu TEREK na Fobosu a KORONASu). Později začaly i některé laboratorní aplikace (Pina et al., 1999).

V téměř všech případech šlo o replikované objektivy tečného dopadu různých geometrií, typů a uspořádání (Hudec et al., 1999). Replikační technologie se prokázala být naším velkým spojencem. Pokusme se stručně shrnout zásadní kroky ve vývoji naší rentgenové optiky tečného dopadu.



Dva identické velké hyperboloidy vyrobené z téže matrice replikační technologií. Rentgenový objektiv pro dalekohled RT-4M, kosmická orbitální stanice Saljut 7 (1981)

- 1969 první studie
- 1970 první český rentgenový objektiv (Wolter 1, 50 mm)
- 1971 objektiv Wolter 1, 80 mm
- 1976 objektiv Wolter 1, 115 mm
- 1979 naše rentgenová optika poprvé ve vesmíru (dva objektivy Wolter 50 mm, výšková raketa Vertikal 9)
- 1980 výšková raketa Vertikal 11 (dva objektivy Wolter 50 mm)
- 1981 první velký Wolterův objektiv (240 mm)
- 1981 orbitální stanice Saljut 7, hvězdný rentgenový teleskop RT-4M (Wolter 240 mm, dvojitý složený objektiv)
- 1985 aplikace pro plazmovou fyziku, EH (mikroskopický objektiv elipsoid-hyperboloid) 17 mm, PP (objektiv paraboloid-paraboloid) 20 mm
- 1987 první vysoce kvalitní rentgenové fólie pro fóliový rentgenový teleskop (SODART)
- Fobos 1 sonda k Marsu, rentgenový teleskop TEREK, Wolter 80 mm



Mandrel a replikovaný objektiv o apertuře 80 mm pro kosmickou sondu Fobos 1. Kombinovaná technologie galvanoplastika a epoxy/uhlíkové vlákno

- rentgenový objektiv pro KORONAS I, Wolter 80 mm
- první rentgenový mikroobjektiv (apertura pod 1 mm)
- 1993 spolupráce s SAO, USA, širokoúhlá rentgenová optika
- 1996 první zkušební modul račí oko, Schmidtova geometrie
- 1997 počátek projektu račí oko, Angelova geometrie
- první zkušební modul račí oko, Angelova geometrie
- 2003 první prototypy inovační technologie GTF (termální formování skla)
- 2004 první prototypy inovační technologie formování křemíkových desek
- 2006 zahájení spolupráce s NASA, USA, na technologiích souvisejících s kosmickými projekty NASA Constellation X a Generation X
- 2006 spolupráce s ESA, projekt XEUS.

Celkově bylo u nás navrženo, vyvinuto a vyhotoveno přes 60 rentgenových objektivů tečného dopadu, z nichž se 8 dostalo do vesmíru na palubě 4 různých kosmických těles, a velké množství testovacích technologických vzorků.

4.2 Použité technologie

České rentgenové objektivy tečného dopadu byly vyrobeny většinou různými obměnami replikačních technologií. V posledních letech se přidaly inovační technologie s těžištěm na formování skla a křemíkových desek.

V roce 1970 jsme začali používat naši první masivní replikační technologii. Byla založena na silnostěnné galvanoplastice leštěných skleněných matric, síla stěny vyráběných objektivů byla 5 až 10 mm masivního niklu. Autory této první technologie byli Dr. Ivan Šolc a Ing. Vilém Pražák, autory dalších technologií pak autor tohoto



Rentgenový dalekohled a koronograf TEREK pro kosmickou sondu Fobos 1.

článku společně s řadou spolupracovníků (Dr. L. Svátek, Dr. A. Inne-man, Doc. Ing. L. Pína a další). Vývoj prvních našich rentgenových objektivů byl inicializován Dr. B. Valníčkem nedlouho po vývoji prvních analogických objektivů v zahraničí a od samého počátku se na něm podíleli pracovníci Vývojové optické dílny v Turnově.

V roce 1978 jsme již pod vedením autora tohoto článku začali studovat odlišnou replikační technologii založenou na epoxidové replikaci skleněných matric pokrytých napařenou zlatou vrstvou.

Od roku 1980 jsme pracovali na galvanoplastické technologii kombinující vnitřní galvanoplastickou vrstvu s vnějším epoxidovým pláštěm. Od roku 1981 je tato technika dále modifikována aplikací různých forem uhlíkového vlákna. V roce 1982 byly poprvé vyvinuty velmi tenkostěnné galvanoplastické objektivy vhodné k použití v mnohanásobně složených soustavách. Od roku 1983 se zabýváme replikací rovinných matric, zejména s cílem vývoje rentgenových reflexních fólií pro fóliové rentgenové teleskopy (SODART, RENTGEN SPEKTR GAMA) a pro rentgenové optické prvky typu račí oko.

V roce 1990 byly vyvinuty první mikroobjektivy s aperturami 1 mm a méně (Pina et al., 1999). V roce 1993 byly vyrobeny první vzorky rovinných zrcadel odrazivých z obou stran pro širokoúhlé soustavy račí oko Schmidtova typu. V roce 1998 se zdařila první replikace prototypu rentgenového objektivu račí oko Angelova typu. Po roce 2000 se přidaly inovační technologie potřebné pro velké kosmické teleskopy s těžištěm na formování skla a křemíkových desek (Hudec et al., 2006b). Tyto nové technologie mají šanci nalézt uplatnění u budoucích projektů velkých kosmických rentgenových dalekohledů, jako jsou např. XEUS Evropské kosmické agentury ESA a Constellation X a Generation X amerického Národního úřadu pro letectví a vesmír NASA.



Rentgenové objektivy Wolter 1 pro družici KORONAS I, rok 1989. Poslední rentgenová optika u nás vyrobená pro program INTERKOSMOS

4.2 Replikační technologie

Myšlenkou replikační technologie je vytvoření perfektní kopie velmi přesně opracované a leštěné matrice negativního tvaru. V rentgenové optice tečného dopadu má aplikace replikační technologie dvě hlavní výhody, a to

- negativní profil je většinou mnohem snáze vyrobitelný
- vyrobené objektivy mohou mít tloušťku stěny mnohem menší než klasicky vyráběná zrcadla, což je mimořádně podstatné např. pro lehké a mnohanásobně skládané systémy pro použití ve vesmíru.

Replikační technologie je pro výrobu rentgenové optiky u nás používána již od samotného počátku, tedy od roku 1967. Postupně byla dále rozvíjena a modifikována, takže dnes existuje celá řada modifikací pro konkrétní aplikace včetně použití i v astronomii optické a infračervené (příkladem je studie pro replikaci ohniskových systémů image slicers, viz Schmall et al. 2006).

Replikace je mimořádně vhodnou technikou pro výrobu rentgenové optiky, protože vnější povrchy se mnohem lépe opracovávají než povrchy vnitřní. Umožňuje současně výrobu velmi tenkých



Rentgenové mikroskopy paraboloid-paraboloid a elipsoid-hyperboloid

objektivů pro mnohonásobně složené systémy. Matrice se používají buď skleněné, nebo ze skleněné keramiky, popřípadě kovové. Replikační technologii používá pro výrobu rentgenových zrcadel ve světě jen několik skupin v řadě modifikací.

4.2.1 Charakteristika

Základní charakteristiku galvanoplasticky replikovaných rentgenových objektivů lze shrnout následujícím způsobem.

- Reflektivní povrchy jsou tvořeny galvanoplasticky naneseným niklem, popřípadě zlatem, alternativou je vrstva vakuově napařeného či naprášeného zlata. Jsou však možné i jiné materiály, popřípadě aplikace aplikací vrstev.
- Externí plášť je tvořen buď kovem (niklem), nebo epoxidovou pryskyřicí s uhlíkovým vláknem, popřípadě sendvičovou strukturou.
- Parametry optiky: zrcadla jsou polychromatická od asi 10 keV až po viditelné světlo. Mají vysokou odrazivost, až 90 procent v závislosti na dopadovém úhlu a vlnové délce (např. 60 procent pro 0,83 nm a dopadový úhel 1 stupeň). Povrch zrcadel je hladký, téměř dokonale kopírující drsnost matrice. Homogenita tloušťky je řádu 2 procent.
- Přídavné technologie: lze například aplikovat mikrovrstvy s cílem dosažení lepšího energetického rozsahu (zejména pokud jde o velmi tvrdé rentgenové záření až do 100 keV, Joensen et al. 1994), popřípadě superleštění povrchu, resp. zlepšení povrchové kvality například lakováním.

4.2.2 Výhody replikace rentgenové optiky

Replikovaná rentgenová zrcadla mají některé výhody, které se pokusíme shrnout v následujících bodech:

- Je možná široká rozmanitost geometrií, např. Wolterovy systémy, kónické, elipsoidální, paraboloidální objektivy, rovinná zrcadla atd.
- Jsou možné lehké a tenké objektivy. To je mimořádně podstatné pro rentgenovou optiku s velkou citlivostí (mnohonásobně složené systémy) a pro kosmické aplikace obecně.
- Je možná mnohonásobná replikace identických prvků z téže matrice, což minimalizuje výslednou cenu optiky.
- Odpadá potřeba brousit a leštit malé vnitřní dutiny - opracovávají se vnější plochy.
- Téměř odpadají limity na aperturu vyráběných zrcadel, a to pokud jde jak o velmi malé (pod 1 mm), tak i o velké (nad 500 mm) průměry.
- Existuje velká řada různých aplikací.
- Odrazivé povrchy jsou rezistentní vůči vlivu kosmického nebo laboratorního prostředí - je možné jejich čištění, degradace teplem je minimalizována.
- Replikované zlaté povrchy jsou hladší (mají menší drsnost povrchu) než povrchy nanášené napařováním - právě mikrodrsnost přitom patří k hlavním a nejdůležitějším parametrům reflektivní rentgenové optiky obecně.

4.2.3 Přehled vyrobených rentgenových objektivů

V období let 1970 až 2006 bylo u nás navrženo a vyvinuto přibližně 60 rentgenových objektivů, nepočítaje v to velké množství různých technologických vzorků:

- Wolterovy objektivy typu I pro kosmické aplikace s průměry mezi 50 a 240 mm. Byly použity na palubách družic a kosmických těles jako součást slunečních i neslunečních rentgenových dalekohledů.
- Tvarované fóliové objektivy a fólie. Základem byly rentgenové odrazivé fólie replikované z matric z plochého (float) skla o rozměrech až 300 x 400 mm. Homogenita těchto fólií byla po vývoji snížena až na pouhých 2 %. Široký rozsah tloušťky od několika mikrometrů až po 1 mm. Tyto fólie byly navrženy a vyvinuty především pro rentgenové teleskopy s fóliovými objektivy (např. SODART).
- Širokoúhlá rentgenová optika typu račí oko, Schmidtovo uspořádání, rozměr desek mezi 3 x 3 mm a 300 x 300 mm.
- Širokoúhlá optika typu račí oko, Angelovo uspořádání, různé zkušební modely, poměr kanálek apertura/délka až 50.

Replikační technologie byla použita i při vývoji řady pozemních a laboratorních aplikací:

- PP paraboloid-paraboloid mikroskopy, apertura 20 mm
- EH elipsoid-hyperboloid Wolter mikroskopy, apertura 17 mm
- kónická, elipsoidální, paraboloidální zrcadla
- mikroobjektivy kónického, elipsoidálního a paraboloidálního profilu
- fólie včetně fólií pro fóliové rentgenové teleskopy
- rovinná a ohýbaná zrcadla.

5. SOUČASNÉ AKTIVITY A PLÁNY DO BUDOUCNA

5.1. Teleskopy typu račí oko (velmi širokoúhlá rentgenová optika)

5.1.1 Proč potřebujeme račí oko?

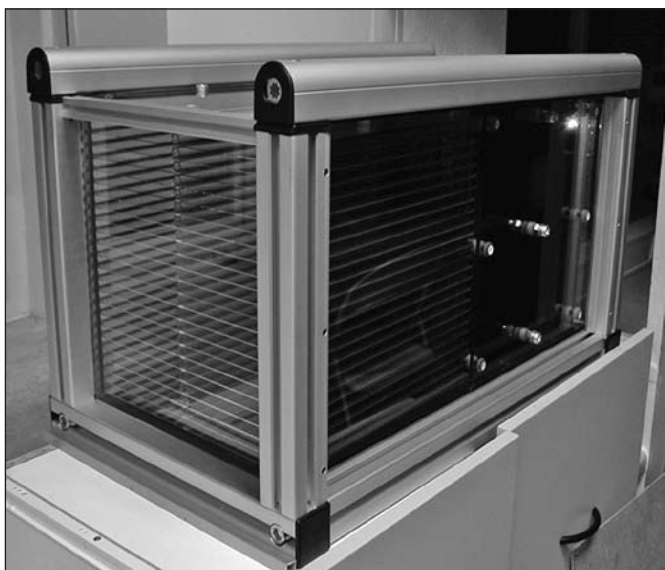
Široce v astronomických aplikacích používané Wolterovy objektivy mají velmi omezené zorné pole (řádu 1 stupně nebo i méně) a jsou tedy vhodné pro pointovaná pozorování určitých objektů, ale nehodí se pro monitorování a přehlídky oblohy.

Širokoúhlá rentgenová optika byla navržena v 70. letech nezávisle Schmidtem (ortogonální uspořádání rovinných reflektorů, Schmidt 1995) a Angelem (soubor kanálek čtvercového průřezu, Angel 1998), avšak nebyla až donedávna zkonstruována. S tímto druhem rentgenové optiky lze přitom dosáhnout unikátně velkých zorných polí, až 180 stupňů.

Výroba soustav typu račí oko je však velmi obtížná. Právě náročná výroba způsobila podstatné zpoždění mezi teoretickým



Rentgenový snímek horké laserové plazmy pořízený rentgenovým mikroskopem elipsa-hyperbola v IFPLM Varšava, Polsko



Testovací modul pro projekt XEUS sestavený z parabolicky formovaných skleněných desek rozměru 30 x 30 cm o tloušťce 0,75 mm. Desky jsou pokryty zlatem pro lepší odrazivost v rentgenovém oboru spektra

návrhem račňiho oka a jeho reálným použitím. Nicméně určité řešení je nabízeno replikačním přístupem, jinou alternativou je použití tenkých roviných skel, popřípadě kanálkových destiček (Inneman et al., 1999).

Relativně nedávno jsme úspěšně dokončili první prototypy rentgenových teleskopů typu račňiho oka (Hudec et al., 2001a). Střední prototyp Schmidty geometrie je tvořen modulem s dvěma navzájem kolmými řadami skleněných desek odrazivých z obou stran (36 a 42 desek o rozměru 100 x 80 mm). Destičky jsou jen 0,3 mm silné, pokryté zlatem. Ohnisková vzdálenost systému činí 400 mm od středové roviny. Zorné pole uvedeného modulu je 6,5 stupně (Inneman et al., 1999). Sestava tvořená větším počtem identických modulů by poskytla mnohem větší zorné pole. Řada miniprototypů založená na skleněných zlacených destičkách rozměru 23 x 23 mm, 0,1 mm silných, o rozestupu 0,3 mm, umožňuje podrobné laboratorní testy a zlepšení úhlového rozlišení až na 1 úhlovou minutu. Sestaveny byly i mikrosystémy (destičky 3 x 3 mm, tloušťka 30 mikronů) a makrosystémy (desky 300 x 300 mm, tloušťka 1,2 mm).

Pro alternativní Angelovo uspořádání (Angel, 1998) je zapotřebí sestavit systém velkého množství malých čtvercových kanálků (průřezu přibližně 1 x 1 mm nebo méně při délce několika desítek mm). To je ještě mnohem náročnější než konstrukce Schmidty systému zmíněná dříve. Výsledky naší práce však naznačují, že požadavek Angelovy rentgenové optiky může být vyřešen inovovanou a modifikovanou replikační technologií (Hudec et al. 2000).

Zatím jsme zkonstruovali několik Angelových prototypů, a to lineární modul s 47 kanálky průřezu 2,5 x 2,5 mm, 120 mm dlouhými, s ohniskem 1,3 m, dále modul tvaru L s 2 x 18 kanálky, a konečně dvojdimenzionální modul s 5 x 5 kanálky stejného rozměru. Mikrodrsnost vnějších povrchů je přitom 0,8 nm ve všech případech Angelových prototypů (Inneman et al., 2000).

Rentgenové teleskopy račňiho oka nabývají na vědeckém významu zejména po objevu rentgenových dosvitů gama záblesků (Gamma Ray Bursts, GRBs) v roce 1997. Odhadovaná četnost GRB je asi 1 denně, avšak s ohledem na předpokládané směřování rentgenové emise do většího prostorového úhlu ve srovnání s emisí gama lze očekávat četnost vyšší. Citlivost teleskopů typu račňiho oka je pro detekci rentgenových dosvitů dostačující. Rovněž dosahované úhlové rozlišení 1 úhlové minuty nebo lepší znamená podstatné zlepšení - téměř o dva řády - vůči stavu dosahovaného přístroji pro detekci gama záblesků v gama oboru. Je tedy zřejmé, že rentgenové teleskopy typu račňiho oka mohou podstatnou měrou přispět ke studiu

GRB a související statistice (Hudec et al., 2006a). Dalšími objekty pro studium těmito teleskopy jsou rentgenové záblesky (XRF), exploze supernov, vysoce energetické binární zdroje, aktivní galaktická jádra (AGN - active galactic nuclei), blazary, rentgenové novy a rentgenové transienty, kataklyzmické proměnné ap.

5.2 Laboratorní rentgenová optika

Pro replikovanou reflektivní rentgenovou optiku existuje kromě astrofyziky celá řada aplikací například ve fyzice plazmatu, jaderné syntéze, biologii, krystalografii ap., s různými geometriemi, s aperturami pod 20 mm a v některých případech dokonce pod 1 mm (rentgenové mikroobjektivy). Jako příklad lze uvést mikroobjektivy, systémy parabola-parabola, elipsa-hyperbola, Wolterovy objektivy a rentgenové mikroskopy (Pina, 2000) a nověji i systémy na bázi optiky račňiho oka (Švéda et al. 2006b).

5.3 XEUS

Projekt Evropské kosmické agentury (ESA) XEUS by se měl stát největším projektem evropské kosmické astrofyziky a současně i největším kosmickým dalekohledem v historii ESA s odhadovaným rozpočtem řádu miliardy Euro a startem po roce 2016. Půjde o gigantický kosmický rentgenový dalekohled o apertuře 4,2 metru

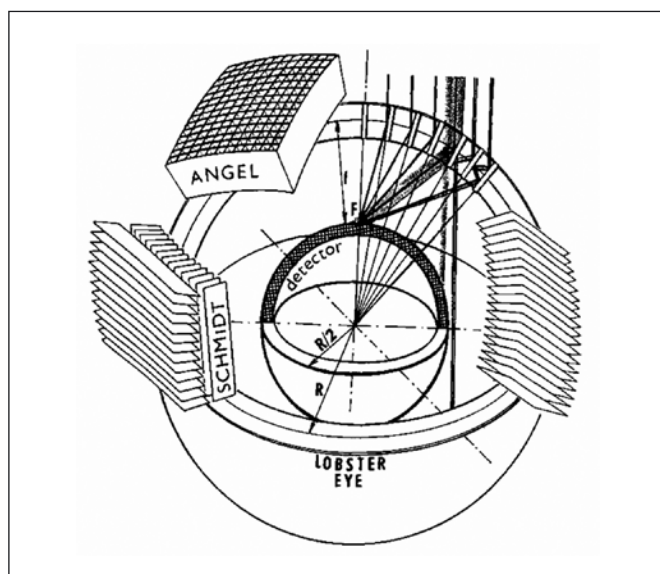


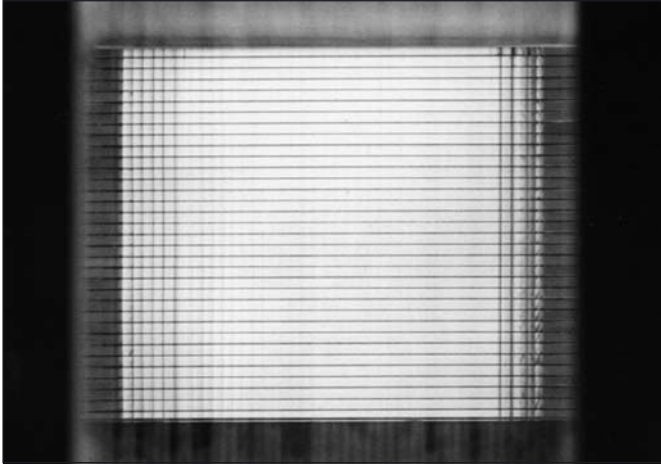
Schéma rentgenové širokoúhlé optiky typu lobster eye (račňiho oka) v Angelově a Schmidty uspořádání

(původně se dokonce hovořilo až o 10 metrech) a ohniskové vzdálenosti 35 metrů (Parmar et al., 2006). To už je příliš na to, aby takový kosmický dalekohled měl tubus, a tak budou XEUS tvořit dvě oddělené družice letící ve formaci a ve vzájemné vzdálenosti 35 metrů. První družice ponese optiku, obě rentgenové objektivy, druhá pak detektory, sluneční baterie a elektroniku.

Předpokládá se, že kosmický teleskop XEUS bude ve vesmíru pracovat mnohem déle, než je u normálních kosmických projektů obvyklé, a to po dobu 10 až 25 let, a stane se po tuto dobu klíčovým pozorovacím přístrojem nejen evropských astronomů.

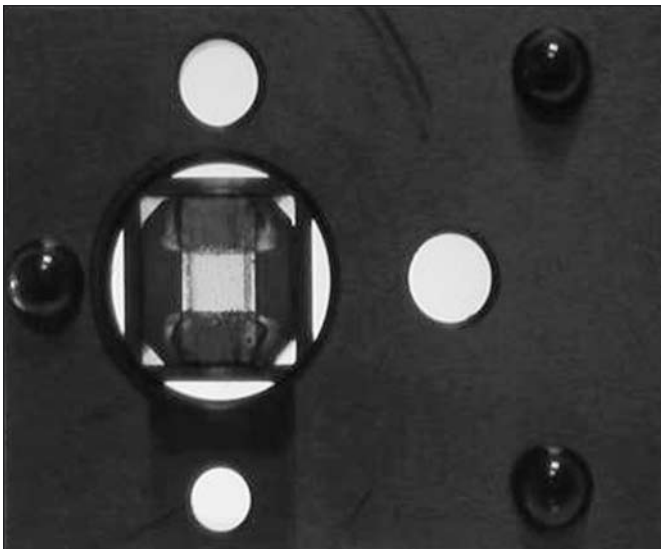
V případě XEUSu máme šanci opravdu unikátní, a to je se podílet přímo na tom nejhlavnějším, totiž optickém systému teleskopu. Jak jsme se k něčemu takovému vůbec dostali? V případě XEUSu musí být použitý materiál rentgenového objektivu extrémně lehký, jinak by měl obě zrcadlové systémy obrovskou váhu při apertuře 4,2 metru naplněné mnoha tisíci tenkými zrcadlovými sloupek. A navíc – optika musí zobrazovat s rozlišením pouhé 2 obloukové vteřiny, jinak by se vzdálené slabé objekty (dalekohled bude mít tak vysokou citlivost, že na čtverečním stupni uvidí okolo 5 000 objektů) navzájem slily!

Během let jsme u nás odzkoušeli řadu netradičních a často nových technologií, které se zdají mít velké uplatnění v budoucích projektech. Navíc jsme našli nové partnery ovládající unikátní technologie pro alternativní výrobu ultralehkých kosmických zrcadel jako je třeba formování tenkých skel (Friedrich et al., 2005), kovová skla, lehké keramické materiály či skelný uhlík (Hudec et al., 2001b, Marsch et al., 1997). První zkušební modul sestavený u nás pro projekt XEUS byl tvořen z tenkých rovinných a pozlacených skel rozměru 30 x 30 cm a silných jen 0,75 mm ohnutých do parabolického tvaru a vyvolal velkou pozornost na mezinárodním workshopu o projektu XEUS v Mnichově. Specifická hmotnost použitého materiálu je přesně čtyřikrát menší než hmotnost dosud pro tyto účely běžně používaného niklu.



Vstupní apertura rentgenového objektivu račí oko mini, Schmidtovo uspořádání, skleněné fólie 23 x 23 mm, tloušťka 0,1 mm, rozestup 0.3 mm

V poslední době se zaměřujeme na vývoj dvou inovačních technologií v současnosti pokládaných pro XEUS jako nejvíce slibné. Jde o tepelné formování tenkých skel a formování křemíkových desek do přesných optických tvarů (Hudec et al., 2006b). Výsledky českého interdisciplinárního týmu zahrnujícího odborníky z Astronomického ústavu AV ČR, FJFI ČVUT, VŠCHT, FS ČVUT a firem Reflex a ON Semiconductor Czech Republic jsou celosvětově uznávané. Současná představa ESA je, že by optický systém teleskopu XEUS mělo tvořit asi 300 000 křemíkových

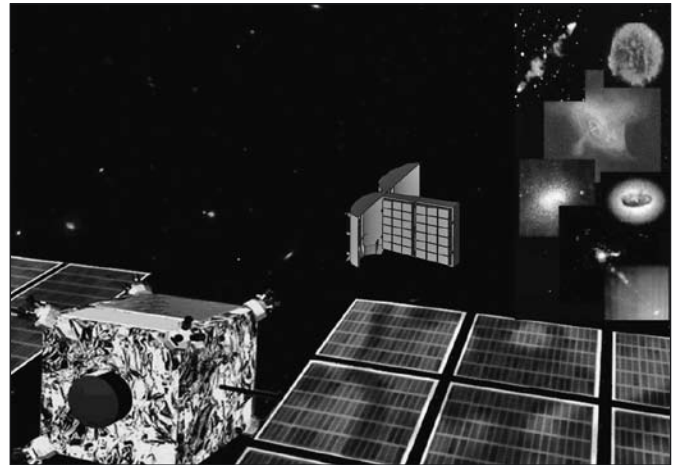


Rentgenový mikroobjektiv račí oko. Skleněné zlacené fólie 3 x 3 mm o tloušťce pouhých 30 mikrometrů při separaci 70 mikrometrů

desek zformovaných do kuželové aproximace rentgenového objektivu typu Wolter 1. Půjde o první aplikaci křemíkových desek v kosmickém dalekohledu. Jakkoli je tato cesta slibná, je třeba ještě vyřešit řadu souvisejících problémů. Křemíkové desky jsou dnes masově vyráběné pro potřeby polovodičového průmyslu a pozitivem pro jejich použití v kosmické rentgenové optice je jejich nízká specifická hmotnost při vysoce lesklém povrchu mikrodrsnosti řádu pouze 0,1 nm a vysoké homogenitě tloušťky řádu pouze 1 mikrometru (a výhledově ještě méně) při typické tloušťce okolo 0,7 mm. Jejich ohyb do požadovaných optických tvarů je však extrémně obtížný.

Přizvání k spoluúčasti na projektu ESA XEUS je významné především v širším kontextu, protože představuje účast na vývoji velmi unikátních a inovovaných technologií, z nichž celá řada jistě nalezne i další aplikace, a slibná je i možnost postupného získání přímých zakázek a kontraktů pro české ústavy i firmy.

Tým, který v České republice okolo projektu ESA XEUS a vývoje inovačních technologií pro budoucí velké kosmické rentgenové dalekohledy obecně (existuje například i spolupráce s americkými vědci na studii inovačního rentgenového KB systému) vzniká, je poměrně rozsáhlý a výjimečně interdisciplinární. Kromě Astronomického ústavu AV ČR (skupina Astrofyziky vysokých energií) se do projektu zapojují i Ústav fyziky plazmatu AV ČR (lehká keramika, plazmatický nástřík), Ústav struktury hornin AV ČR (skle-



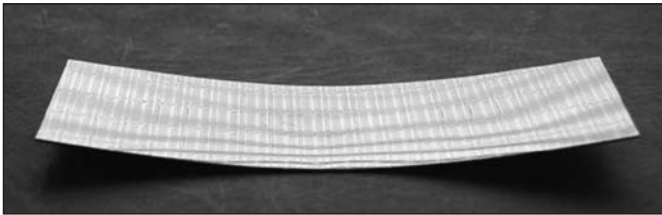
Plánovaný obří kosmický dalekohled Evropské kosmické agentury ESA XEUS

něný uhlík), Vývojová optická dílna AV ČR (sklo), Vysoká škola chemicko-technologická (sklo, lehká keramika, lithium, amorfní kovy), Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT (rentgenové technologie), Ústav experimentální fyziky SAV (amorfní kovy), Fakulta strojní ČVUT (mechanické studie), firma ON Semiconductor Czech Republic (křemíkové desky), hi-tech firma Reflex (formování skla a křemíku, systémy račí oko) a dalších subjekty.

O naše výsledky projevil zájem i odborníci laboratoře rentgenové astrofyziky Goddardova kosmického střediska Amerického národního úřadu pro letectví a vesmír NASA, kteří pracují na vývoji technologie pro americký projekt rentgenových družic Constellation X. V květnu 2007 se na toto téma v Praze na FS ČVUT uskutečnil společný česko-americký seminář. Zájem projevil i někteří členové týmu budoucího amerického projektu Generation X, který předpokládá adaptivní rentgenovou optiku s cílem dosáhnout úhlového rozlišení řádu 0,1 úhlové sekundy.

6. RENTGENOVÁ OPTIKA S MULTIVRSTVAMI

Klasická rentgenová optika tečného dopadu je multispektrální a pracuje v oblasti od viditelného světla až po energie několika, výjimečně až okolo 10 keV. Budoucí astrofyzikální aplikace ovšem v rostoucí míře vyžadují rozsah až do oblasti tvrdého rentgenového



Křemíková deska přesně formovaná teplem

záření řádu desítek keV. Rozšířit energetický rozsah lze jednak snížením dopadového úhlu, jednak (významněji) aplikací multivrstev na odrazivé plochy. Tuto technologii jsme též studovali a vyvinuli a změřili příslušné vzorky. Dokonce se nám podařilo vyvinout celosvětově unikátní technologii replikace multivrstev, díky níž lze multivrstvy nanést i dovnitř jinak nepřístupných dutin. Výzkumy potenciálně důležité pro další vylepšování kvality těchto i dalších odrazivých povrchů jsou prováděny v ČR dalšími autory (např. Holý et al., 2001, Pacherová et al., 1993).

7. ZÁVĚR

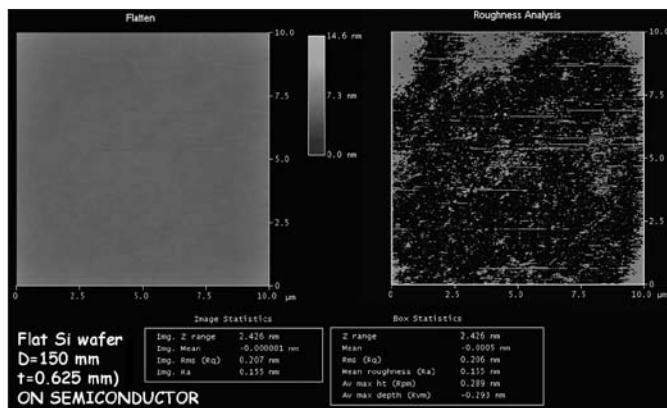
Rentgenová optika tečného dopadu je používána v kosmických experimentech z oboru rentgenové astrofyziky již téměř 40 let. Přesto však jsou některé její nové typy stále ještě ve vývojové fázi. Požadavky na budoucí experimenty jsou navíc mnohem vyšší než tomu bylo v minulosti, což vede k potřebě nových a inovovaných technologií a přístupů. Požadavky na budoucí kosmickou optiku lze shrnout následujícím způsobem:

- optika s vysokou účinností - velmi tenkými a mnohanásobně skládanými objektivy
- objektivy se širokým zorným polem $\gg 1$ deg
- lepší kvalita povrchu (mikrodrsnost $< 0,2$ nm), úhlové rozlišení řádu úhlové vteřiny nebo i lepší, nové technologie
- širší spektrální rozsah - multivrstvy, zobrazování v tvrdém rentgenovém oboru až do 100 keV.

Rovněž budoucí laboratorní aplikace vyžadují vyšší zobrazovací kvalitu a vysoké úhlové rozlišení (rentgenové mikroskopy).

Tyto potřeby vyžadují vývoj netradičních a nových technologií, zejména:

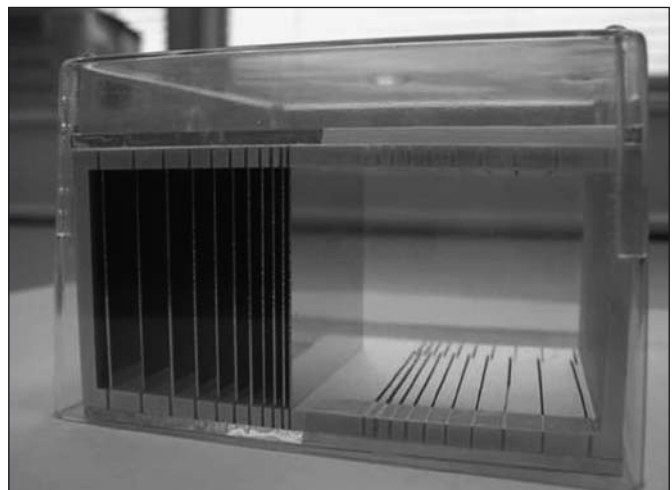
- superlešticí technologie pro dosažení vynikající povrchové kvality, vysokého úhlového rozlišení a vysoké účinnosti
- replikaci multivrstev s cílem dosažení širšího energetického rozsahu (až do 100 keV)
- vývoj velmi velkých apertur (a tedy nových lehkých přesných technologií) s cílem dosažení vysoké detekční citlivosti
- optické soustavy s velmi širokým zorným polem s cílem širokoúhlého monitorování oblohy v rentgenovém oboru spektra.



AFM měření mikrodrsnosti vzorku rentgenové optiky na bázi Si desek

Poděkování

Do vývoje rentgenové optiky tečného dopadu byla od samého počátku zapojena celá řada kolegů a vědeckých i technických spolupracovníků z řady českých pracovišť, jimž patří velké poděkování. Centrum pokročilých rentgenových technologií, Reflex Praha, bylo v minulosti podporováno grantem MPO ČR FB-C3/29/00. Vývoj tenkých formovaných skel byl v minulosti podpořen grantem MPO ČR FD-K3/052. MPO nově poskytlo grant na vývoj technologie replikace multivrstevnatých rentgenových zrcadel FT-TA3/112. GA ČR v minulosti poskytla granty 106/97/1223 a 102/99/1546. Vývoj tenké rentgenové optiky na základě formovaných křemíkových desek je podpořen od 1. 1. 2007 grantem GA AV ČR číslo IAAX 01220701, předtím byl možný jen nadšením a nezištnou prací řady kolegů a kolegů, kterým patří veliké poděkování. Spolupráce s USA (NASA a University of Boulder) je nově od roku 2007 podpořena projekty MŠMT KONTAKT-AMVIS ME918 a ME911. Spolupráce s ESA na vývoji nových technologií pro rentgenové kosmické dalekohledy je nově podpořena projektem ESA PECS 98039. GA ČR nově poskytla juniorský grant 202/07/P510.



Testovací modul rentgenového objektivu z formovaných křemíkových desek

Na vývoji a souvisejícím výzkumu se kromě Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově (v současnosti především autor tohoto článku a M. Skulinová) v posledních letech podílela FJFI ČVUT v Praze (zejména L. Pína a L. Švéda), Centrum rentgenových technologií Reflex Praha (A. Inneman, V. Semencová, H. Tichá a další), FS ČVUT (J. Zicha a studenti, zejména poskytnutím konzultací, testy a vedením studentů), ÚFP AV ČR v Praze (V. Brožek), VŠCHT v Praze (V. Brožek, V. Fleml, M. Míka, O. Gedeon, R. Kačerovský, R. Prokop), ON Semiconductor Czech Republic (J. Šik), dále pak přispěl FZÚ AV ČR (měření), TTS s.r.o. Praha (nanášení vrstev a multivrstev), Vývojová optická dílna AV ČR v Turnově a další subjekty.

V minulosti významně přispěly další instituce, zejména je třeba zmínit VÚ Gramofonové technologie v Loděnici u Beřouna a SVÚM Praha a Běchovice. První rentgenové objektivy navržené a sestavené v ČR na přelomu 60. a 70. let minulého století jsou spojené se jmény Dr. Ivan Šolc, Dr. Boris Valníček a Ing. Vilém Pražák.

O něco později velmi významně k dalšímu vývoji galvanoplastických rentgenových objektivů přispěl Dr. Lubomír Svátek. Rád bych zmínil i početný tým techniků, kteří během celé doby rovněž podstatně přispěli (Jan Urban, František Janoušek, Karel Havlíček, Jiří Ptáček, Jiří Zeman, a další).

FEL ČVUT v Praze, katedra radioelektroniky (J. Kopecký, J. Košťál, M. Klíma, M. Bernas a další) se podíleli na vývoji elektroniky pro naše rentgenové dalekohledy.



Tenké sklo zformované inovační tepelnou technologií do vysoce přesné optické parabolické plochy

Literatura

- [1] Angel, J. R. P., *ApJ*, 233, 364-373, 1979.
- [2] Friedrich, P. et al. Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy II. Edited by Citterio, Oberto; O'Dell, Stephen L. Proceedings of the SPIE, Volume **5900**, 258-265, 2005.
- [3] Holý, V.; Stangl, J.; Springholz, G.; Pinczolits, M.; Bauer, G. Journal of Physics D: Applied Physics, Volume **34**, Issue 10A, pp. A1-A5, 2001.
- [4] Hrdý, Jaromír; Artemiev, Nikolai; Freund, Andreas K.; Quintana, John P. Proc. SPIE Vol. **4501**, p. 88-98, X-Ray Mirrors, Crystals, and Multilayers, Andreas K. Freund; Tetsuya Ishikawa; Ali M. Khounsary; Eds. 2001.
- [5] Hudec, René; Inneman, Adolf; Pina, Ladislav, New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Proceedings Vol. **251**. Edited by H. Inoue and H. Kunieda. ISBN: 1-58381-091-9. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2001., 542, 2001a.
- [6] Hudec, René; Pina, Ladislav; Inneman, Adolf; Brozek, Vlastimil; Chráška, Pavel; Zentko, Anton; Zentková, Mária, New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Proceedings Vol. **251**. Edited by H. Inoue and H. Kunieda. ISBN: 1-58381-091-9. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2001b.
- [7] Hudec, René; Pina, Ladislav; Inneman, Adolf, Proc. SPIE Vol. **3766**, p. 62-71, X-Ray Optics, Instruments, and Missions II, Richard B. Hoover; Arthur B. Walker; Eds., 1999.
- [8] Hudec, R.; Pina, L.; Švéda, L.; Inneman, A., in Gamma-Ray Bursts in the Swift Era, Sixteenth Maryland Astrophysics Conference, held 29 November - 2 December, 2005 in Washington, DC. Edited by S.S. Holt, N. Gehrels, and J.A. Nousek. AIP Conference Proceedings, Vol. **836**. Melville, NY: American Institute of Physics, 712-715, 2006a.
- [9] Hudec, R.; Pina, L.; Semencova, V.; Inneman, A.; Skulinova, M.; Sveda, L.; Mika, M.; Brozek, V.; Kacerovsky, R.; Prokop, J.; Sik, J., Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray. Edited by Turner, Martin J. L.; Hasinger, Günther. Proceedings of the SPIE, Volume **6266** (2006b).
- [10] Hudec, R.; Simon, V.; Sveda, L.; Pina, L.; Inneman, A., in Populations of High Energy Sources in Galaxies Proceedings of the 230th Symposium of the International Astronomical Union, Held in Dublin, Ireland 15-19 August 2005, Edited by E. J. A. Meurs; G. Fabbiano. Cambridge: Cambridge University Press, 39-40, 2006c.
- [11] Inneman, Adolf; Hudec, René; Pina, Ladislav; Gorenstein, Paul, Proc. SPIE Vol. **3766**, p. 72-79, X-Ray Optics, Instruments, and Missions II, Richard B. Hoover; Arthur B. Walker; Eds., 1999.
- [12] Hudec, René; Pina, Ladislav; Inneman, Adolf V., Proc. SPIE Vol. **4012**, p. 422-431, X-Ray Optics, Instruments, and Missions III, Joachim E. Truemper; Bernd Aschenbach; Eds., 2000.
- [13] Inneman, Adolf V.; Hudec, René; Pina, Ladislav, Proc. SPIE Vol. **4138**, p. 94-104, X-Ray Optics, Instruments, and Missions IV, Richard B. Hoover; Arthur B. Walker; Eds., 2000.
- [14] Joensen K. et al., SPIE Vol. **2279**, 180, 1994.
- [15] Marsch H. et al., Introduction to Carbon Technologies, University of Alicante, ISBN :84-7098-317-4, 1997.
- [16] Pacherová, O.; Sourek, Z.; Kub, J., J. Phys. D: Appl. Phys., Volume **26**, A173-A176, 1993.
- [17] Parmar A. et al., X-ray Observatory, Study preparation activities status report, ESA SCI-A/2006/054/NR, 2006.
- [18] Pina, Ladislav; Inneman, Adolf; Hudec, René; Arndt, Uli W., Proc. SPIE Vol. **3766**, p. 299-307, X-Ray Optics, Instruments, and Missions II, Richard B. Hoover; Arthur B. Walker; Eds., 1999.
- [19] Pina, Ladislav; Inneman, Adolf V.; Hudec, René; Arndt, Ulrich W.; Loxley, Neil; Fraser, Graham; Taylor, Mark; Wall, John, Proc. SPIE Vol. **4144**, p. 165-173, Advances in Laboratory-based X-Ray Sources and Optics, Carolyn A. MacDonald; Ali M. Khounsary; Eds., 2000.
- [20] Schmidt, W. K. H., Nucl. Instr. Methods, 127, 285-292, 1975.
- [21] Schmoll, J.; Robertson, D. J.; Dubbeldam, C. M.; Bortoletto, F.; Pina, L.; Hudec, R.; Prieto, E.; Norrie, C.; Ramsay-Howat, S., New Astronomy Reviews, Volume **50**, Issue 4-5, 263-266, 2006.
- [22] Švéda, L.; Hudec, R.; Pina, L.; Inneman, A., Il Nuovo Cimento C, Vol. **28**, Issue 4, 829, 2006a.
- [23] Švéda, L.; Pina, L.; Inneman, A.; Semencova, V.; Marsik, J.; Hudec, R.; Bartnik, A.; Fiedorowicz, H.; Jarocki, R.; Kostecki, J.; Rakowski, R.; Szczurek, M., Physica Scripta, Volume **2006**, Issue T123, 131-134, 2006b.

Aplikace nelineárních optimalizačních metod při vyhodnocování módových spekter planárních vlnovodů

Příspěvek je zaměřen do oblasti experimentálního studia tenkovrstvých planárních vlnovodných struktur. Je zde prezentována metoda tmavé módové spektroskopie, která je založena na vybudění spektra vedených módů ve zkoumané vrstvě. V krátkosti jsou podány základní fyzikální aspekty této metody se zaměřením na teorii hranolové vazby. Detailní pozornost je věnována vlastnímu vyhodnocení naměřených módových spekter a použití matematických optimalizačních metod při určení indexu lomu a tloušťky zkoumaných vlnovodných vrstev.

1 ÚVOD

Planární tenkovrstvé systémy mají významné uplatnění v oblasti integrované optiky. Pomocí tenkých vrstev můžeme realizovat taková zařízení, jako jsou optické přepínače, rotátory a izolátory zpětných reflexí používané především v laserové technice, kdy dochází k modulaci procházejícího světelného svazku vnějším magnetickým polem [1]. Proti jiným technologiím mají tu výhodu, že jsou to pasivní zařízení s jednoduchou funkcí, robustní a necitlivé ke změnám teploty.

Při přenosu informací optickými vlákny se planární vlnovody uplatňují jako spojovací členy mezi laserovými diodami a přenosovými vláknovými moduly nebo detektory signálu. Tyto prvky mohou s výhodou fungovat také jako magnetooptické vlnovody. Vhodným materiálem pro přípravu těchto vlnovodných vrstev jsou železité granáty, které se vyznačují malými optickými ztrátami a výraznými magnetooptickými vlastnostmi [2]–[4].

Pro měření parametrů tenkých vrstev bylo vyvinuto široké spektrum měřících metod, které jsou založeny na různých fyzikálních principech. Důležitou skupinou jsou nedestruktivní metody měření a mezi nimi zejména optické měřící metody. Z této oblasti se pro studium tenkovrstvých struktur uplatňují techniky interferometrické, elipsometrické a vlnovodné. Vlnovodná technika náleží k nejpřesnějším z výše uvedených metod – hodnoty nejistot při určování indexu lomu vrstvy se pohybují v pásmu 0,1 až 0,01 %, nepřesnost určení tloušťky tenké vrstvy je okolo 1 % z měřené tloušťky [5], [6]. S ohledem na vlnovodné vlastnosti tenké vrstvy a charakter měření (lokální, prostorový) se volí příslušné experimentální uspořádání, které se může lišit např. způsobem navázání a vyvázání světla do vlnovodu, nebo způsobem měření úhlu paprsku vystupujícího z hranolu na detektor. Podle toho, zda pozorujeme a proměřujeme vyvázané vedené módy z vrstvy nebo tmavé linie v reflektovaném svazku odpovídající navázaným módům do vrstvy, rozlišujeme světlu nebo tmavou módovou spektroskopii (DMS - Dark Mode Spectroscopy) [7]. V této práci se budeme věnovat metodě tmavé módové spektroskopie a hlavní pozornost bude zaměřena na matematické zpracování a vyhodnocení změřených módových spekter.

2 TEORIE HRANOLOVÉ VAZBY

Ve vlnovodné struktuře se záření šíří prostřednictvím totálních odrazů na jednotlivých rozhraních vlnovodné vrstvy s okolním prostředím. Nutnou podmínkou pro dosažení totální reflexe na rovinném rozhraní je, aby index lomu vlnovodné vrstvy $N^{(1)}$ měl větší hodnotu než indexy lomů okolních prostředí – substrátu (S) a superstrátu (0): $N^{(1)} > n^{(j)}$, $j = 0, S$. Proces volného vedení vln v planární tenkovrstvé struktuře je možno fyzikálně popsat na základě

obecných vztahů odvozených pomocí Yehova 4×4 maticového formalismu. Pomocí prvků tzv. celkové matice systému \mathbf{M} lze specifikovat např. reflexní a transmisní charakteristiky jednotlivých rozhraní, ale navíc také můžeme odvodit i vlnovodnou podmínku vedených módů [8]

$$M_{11} M_{33} - M_{13} M_{31} = 0. \quad (1)$$

Pro jednoduchou izotropní neabsorbující vlnovodnou strukturu tvořenou funkční vlnovodnou vrstvou (index 1) tloušťky $d^{(1)}$ obklopenou substrátem (S) a superstrátem (0) je s výhodou použita transformace vlnovodné podmínky (1) do zápisu pomocí reflexních koeficientů [9]

$$1 - r_{21}^{(10)} r_{12}^{(1S)} \exp(-i2k_{z,m}^{(1)} d^{(1)}) = 0, \quad \text{TE polarizace}, \quad (2)$$

$$1 - r_{43}^{(10)} r_{34}^{(1S)} \exp(-i2k_{z,m}^{(1)} d^{(1)}) = 0, \quad \text{TM polarizace}, \quad (3)$$

kde veličina r představuje po řadě reflexní koeficienty pro jednotlivé polarizace na rozhraní vlnovodná vrstva–substrát a vlnovodná vrstva–superstrát, k_z je příčná složka vlnového vektoru, m je módový index. Při úplném odrazu se reflexní koeficient stává komplexní veličinou s jednotkovým modulem – mění se tedy pouze fáze, nikoli však výkon přenášený rovinnou vlnou. Reflexní koeficienty je pak výhodné zapsat v exponenciálním tvaru

$$r_{\psi}^{(1j)} = \exp(i\phi_{\psi}^{(1j)}), \quad (4)$$

kde $\phi^{(1j)}$ je fázový posun při odrazu na rozhraní (1- j) daný vztahem

$$\phi_{\psi}^{(1j)} = 2 \operatorname{arctg} \left[\left(\frac{N^{(1)}}{n^{(j)}} \right)^{2\nu} \left(\frac{\beta_{\psi m}^2 - k_v^2 n^{(j)2}}{k_v^2 N^{(1)2} - \beta_{\psi m}^2} \right)^{1/2} \right], \quad (5)$$

$$\nu = \begin{cases} 0 & \text{pro TE polarizaci} \\ 1 & \text{pro TM polarizaci} \end{cases}$$

kde $j = 0, S$. Parametr ψ je buď TE nebo TM a označuje typ lineární polarizace.

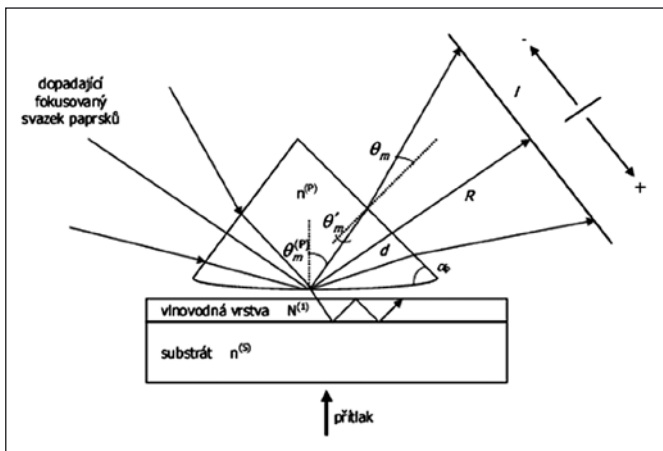
Jestliže vyjádření reflexního koeficientu (4) dosadíme do rovnic (2), (3), dostaneme tzv. podmínku příčné rezonance. Ta říká, že rovinná vlna se po dvou po sobě následujících úplných odrazech od obou rozhraní musí „zreprodukovat sama v sebe“ z hlediska fáze,

$$\phi_{\psi m}^{\text{celk}} = \phi_{\psi m}^{(10)} + \phi_{\psi m}^{(1S)} - 2d^{(1)} \sqrt{k_v^2 N^{(1)2} - \beta_{\psi m}^2} = -2\pi m, \quad (6)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots,$$

kde $\beta_{\psi m}$ je podélná konstanta šíření vlnovodného módu ve vrstvě. Vyjádřením fázových posuvů $\phi^{(1)}$ dostáváme tzv. disperzní rovnici planárního vrstevového vlnovodu, vyjadřující závislost podélné konstanty šíření na módovém indexu m a tloušťce vlnovodné vrstvy $d^{(1)}$.

Rovnice (1), (2), (3), (6) představují popis rezonančního stavu, kdy vlnění se vlnovodem přenáší pomocí totálních odrazů ve formě tzv. TE a TM vlnovodných módů s diskrétními hodnotami podélných konstant šíření. Co se však stane, přiblížíme-li k vlnovodu další prostředí o indexu lomu vyšším než je index lomu vlnovodné vrstvy? Tímto prostředím může být např. hranolový prvek podle obr. 1.



Obr. 1 Geometrie hranolové vazby pro tmavou módovou spektroskopii

Z experimentálního pozorování bychom zjistili, že záření šířené vlnovodnou vrstvou postupně ztrácí pod hranolem část svého výkonu. Na rozhraních vlnovodné vrstvy dochází pro směry šíření větší než tzv. kritický úhel k totálnímu odrazu, avšak z elektromagnetické teorie vyplývá, že tento totální odraz je také doprovázen „penetrací“ části záření do okolního prostředí ve formě tzv. evanescentních vln. V případě struktury s hranolem dochází k situaci, kdy je hranol vzhledem k vlnovodné vrstvě umístěn dostatečně blízko (řádově desítky vlnové délky), a záření prostřednictvím „tunelového efektu“ přechází do hranolu. Opačným způsobem může být záření do vlnovodu navázáno.

Hranolový prvek tak představuje jeden ze způsobů, jak navázat/vyvázat světlo do/z vlnovodné struktury. Účinnost vazby pomocí hranolu je poměrně velká. Teoretická mez pro Gaussův svazek a planoparalelní vzduchovou mezeru je přibližně 80% [10].

U jednohranolové měřicí soustavy podle obr. 1 dochází k tomu, že hranol slouží pouze k navázání optického svazku do vlnovodu a ten se v něm dále šíří. Proto můžeme ve světle odraženém od základny hranolu pozorovat na stínítku tmavou čáru nebo soustavu tmavých čar (podle toho, kolik vlnovodných módů jsme schopni do vlnovodné struktury navázat). Můžeme tedy říci, že vedený mód v tenké vrstvě je reprezentován tmavou linií (odtud název metody tmavá módová spektroskopie). Na základě geometrie uspořádání hranolové vazby (viz obr. 1) lze odvodit vztah pro podélnou konstantu šíření

$$\beta_m^P = k_v n^{(P)} \sin \left(\alpha_p + \arcsin \left(\frac{\sin \theta_m}{n^{(P)}} \right) \right). \quad (7)$$

Podélná konstanta šíření β^P , kterou určíme z naměřených synchronních úhlů podle relace (7), není podélnou konstantou pro případ samotného vlnovodu, ale při působení vlivu hranolu. Vzhle-

dem k tomu, že přítomnost hranolu způsobuje změnu reflexního koeficientu při odrazu od horního rozhraní $r^{(10)} \rightarrow r^{(10P)}$, musíme vlnovodnou podmínku (6) modifikovat do tvaru

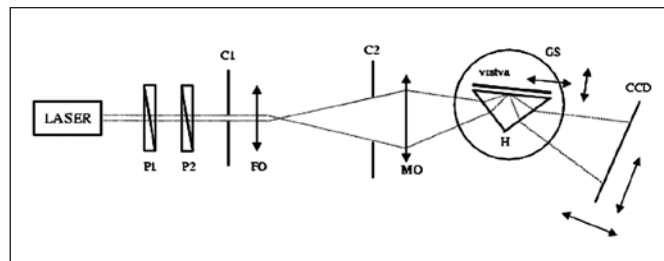
$$\phi_{\psi m}^{\text{celk}} = \phi_{\psi m}^{(10P)} + \phi_{\psi m}^{(1S)} - 2d^{(1)} \sqrt{k_v^2 N^{(1)2} - \beta_{\psi m}^{P2}} = -2\pi m, \quad (8)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

Na základě změřeného spektra synchronních úhlů θ_m a relací (7), (8) pak můžeme jejich řešením získat parametry tenké vlnovodné vrstvy – index lomu a tloušťku vrstvy.

3 EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Aparatura DMS pro měření módových vlastností tenkých vlnovodných vrstev je ve své nejjednodušší formě ukázána na následujícím obrázku. Celá sestava je postavena na nemagnetické desce optického stolu, který je neustále pneumaticky vyvažován s korekcí případných rušivých vibrací. Optické prvky jsou uchyceny ve stojanech, které jsou umístěny na dvou optických lavicích. Prakticky všechny stojany umožňují vertikální posuv a prvky důležité pro seřízení aparatury je možné též posouvat horizontálně v rovině stolu.

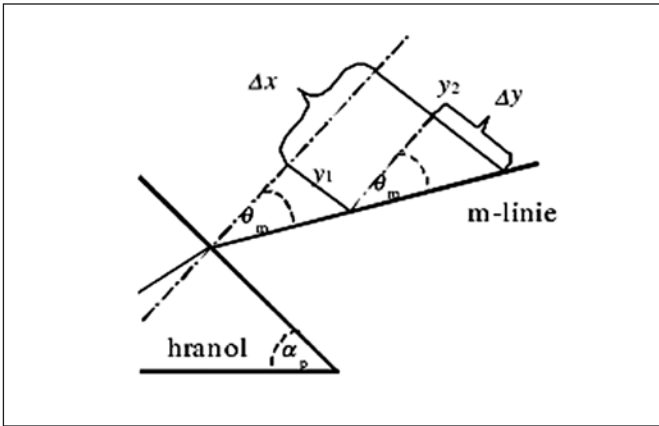


Obr. 2 Základní experimentální sestava tmavé módové spektroskopie

Zdrojem záření je He-Ne laser (firma COHERENT), který poskytuje výkon 3 mW na vlnové délce $\lambda_v = 632,8$ nm. Polarizátor P1 redukuje intenzitu svazku, aby nedošlo k přebuzení CCD detektoru. Polarizátor P2 slouží k nastavení TE nebo TM polarizace. Irisová clona C1 omezuje svazek na kruhový průřez a také eliminuje zpětné odrazy od fotografického objektivu FO (Carl Zeiss Jena Tevidon, 1,4/25). Ten slouží jako expandér svazku. Rozšířený svazek je poté znovu fokusován mikroskopovým objektivem MO (NA = 0,24, zvětšení 10x) tak, že ohnisko leží přibližně v rovině základny vazebního hranolu H, kde je vzorek přitlačován k hranolu hrotem. Hranol byl vyroben z Bi-Ge materiálu, který při použité vlnové délce $\lambda_v = 632,8$ nm vykazuje index lomu $n^{(P)} = 2,5435$ a lámavý úhel $\alpha_p = 60,403^\circ \pm 0,016^\circ$. Svazek odražený od základny hranolu pak vystupuje stěnou hranolu a dopadá na čip CCD kamery, která je koaxiálním kabelem propojena s počítačem. Na monitoru pak můžeme sledovat výsledný obraz tmavých linií. Ke sledování a záznamu tmavých linií byla použita analogová černobílá CCD kamera MINTRON s geometrií 256 x 256 pixelů. Pro přenos z kamery do grafické karty počítače přes koaxiální kabel bylo využito soustavy PAL. V grafické kartě počítače je signál znovu navzorkován a zobrazen prostřednictvím softwaru Video Capture. Zachycený obraz kamery je pak následně vyhodnocen algoritmy digitálního zpracování obrazu (popsáno dále).

4 ANALÝZA SPEKTRA SYNCHRONNÍCH ÚHLŮ

Jak bylo řečeno v kapitole 2, k výpočtu optických parametrů a tloušťky tenké vlnovodné vrstvy potřebujeme experimentálně určit synchronní úhly vedených módů. Synchronní úhly θ_m příslušné jednotlivým vedeným módům lze jednoduše určit, pokud dovedeme změřit vzdálenosti Δx a Δy (viz obrázek 3). Hodnota Δx odpovídá posuvu CCD kamery ve směru normály k výstupní stěně hranolu (posuv je automaticky řízen krokovým motorkem přes počítač s pevně nastavenou délkou kroku).



Obr. 3 Určení synchronního úhlu diferencí metodou

Veličina Δy je rozdíl poloh promítnuté tmavé čáry na CCD detektor při 1. a 2. podélném posuvu detektoru (obr. 3). Synchronní úhel θ_m lze pak vypočítat podle vztahu

$$\theta_m = \arctg\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right). \quad (9)$$

Nemusíme ho však určovat pouze z jednoho měření (jednoho podélného posuvu CCD detektoru), nýbrž můžeme využít skutečnosti, že pokud předpokládáme dokonalé nastavení rovnoběžnosti rovin čipu CCD kamery a výstupní stěny hranolu a podélný posuv kamery ve směru kolmém na výstupní stěnu hranolu, pak pevnému kroku Δx musí odpovídat jistá hodnota Δy v každé podélné pozici detekční roviny a tato závislost by měla být lineární:

$$\Delta y = k\Delta x + q. \quad (10)$$

Je zřejmé, že synchronní úhel souvisí se směrnicí této přímky relací

$$\theta_m = \arctg k = \arctg\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right). \quad (11)$$

4.1 Metoda lineární regrese při procesu určení efektivního indexu lomu

Jelikož čip kamery nemohl být umístěn dostatečně blízko hranolu kvůli konstrukci rotačního stolku, nemohly být zaznamenány všechny tmavé linie současně. Proto byla kamera nastavena na tmavé linie nejnižších řádů a podélným posuvem s konstantním krokem je získána první sada snímků. Poté byly nastaveny další tmavé linie, a takto se pokračovalo, dokud nebyly všechny linie proměřeny. Z každé sady snímků byly získány pozice příslušející jednotlivým tmavým liniím. Ty byly ze známé velikosti jednoho bodu obrazu převedeny na délkovou vzdálenost. Z rozdílů mezi sousedními pozicemi a ze znalosti posuvu kamery mezi snímky je možno specifikovat jednotlivé úhly. Jejich aritmetický průměr určuje výslednou hodnotu.

Jak však již bylo naznačeno, existuje jiná metoda, méně citlivá na náhodné odchylky. Při způsobu měření synchronního úhlu předpokládáme, že podélný posuv Δx CCD detektoru je libovolně nastavitelná veličina (nezávisle proměnná) a náhodnou veličinou je zde příčný posuv tmavých čar Δy na ploše detektoru. Náhodnými jevy, které působí fluktuaci hodnot veličiny Δy , mohou být např. vibrace detekčního prvku, šumy detekčních obvodů, vibrace jednotlivých optických elementů měřicí soustavy, statistický charakter vlastního zdroje záření, depolarizační efekty, atd. Předpoklad nenáhodnosti podélného posuvu Δx detektoru je založen na skutečnosti, že krokové motorky zaručují vysokou přesnost nastavení. To znamená, že v prvním přiblížení lze toto měření aproximovat lineárním regresním modelem odpovídajícím funkci (10). Dále předpokládáme splnění všech matematických požadavků kladených na optimální řešení lineárního problému, a tudíž výraz, který minimalizujeme (též návrhová nebo také cenová funkce, cenový funkcionál), je ve tvaru

$$G(\mathbf{b}) = D^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - y_{pi})^2. \quad (12)$$

Vektor optimalizovaných parametrů \mathbf{b} (v našem případě např. index lomu a tloušťka vrstvy) pak minimalizuje výraz (12). Vektor y_p představuje vektor predikcí, tzn. teoretických funkčních hodnot modelové funkce (regresní funkce (10)), vektor y reprezentuje výsledky experimentálních měření. Jedná se tedy o lineární regresi metodou nejmenších čtverců.

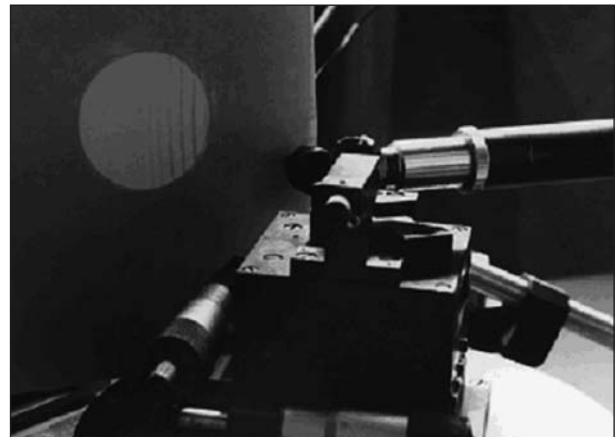
Počet měření pro jednotlivý synchronní úhel byl limitován rozsahem podélného posuvu detektoru a minimální délkou kroku podélného posuvu Δx , pro který byl CCD detektor ještě schopen rozlišit příčný posuv tmavé čáry. Z důvodu pozdějšího statistického vyhodnocení získaných odhadů jsme se však snažili, aby počet realizovaných měření měl statistický charakter – v praxi tento počet neklesl pod hodnotu $N = 20$.

Podélné konstanty šíření vedených módů pak jsou ze znalosti synchronních úhlů dány vztahem (7) a nejistota jejich určení je superpozicí jak vlivu hranolu, tak synchronního úhlu:

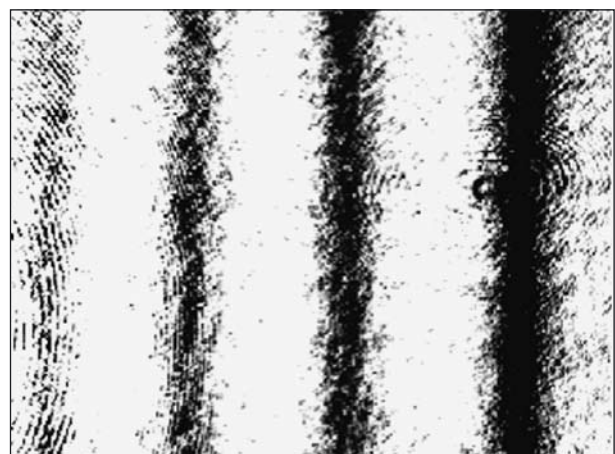
$$u(\beta_m^p) = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta_m^p}{\partial \theta_m} u(\theta_m)\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta_m^p}{\partial n^{(p)}} u(n^{(p)})\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta_m^p}{\partial \alpha_p} u(\alpha_p)\right)^2}. \quad (13)$$

Musíme ještě dodat, že takto určená podélná konstanta šíření je ovlivněna hranolem a je nutná její korekce na volné vedení. Tato korekce na volné vedení však bude provedena využitím optimalizačních metod, jak bude dále ukázáno.

4.2 Matematické zpracování obrazu tmavých linií



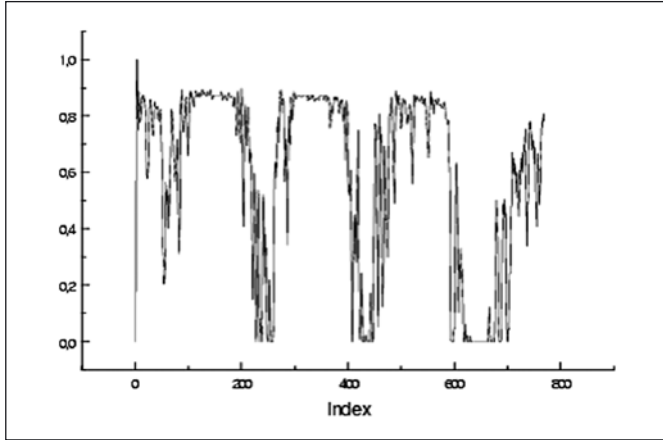
Obr. 4 Projekce tmavých linií na stínítku



Obr. 5 CCD záznam tmavých linií

CCD kamerou umístěnou v rovině kolmé na výstupní svazek z hranolu jsme schopni zaznamenávat obraz světelného disku s tmavými liniemi (obr. 4, 5). Jednotlivé snímky pro daný počet podélných posuvů kamery byly ukládány ve formátu BMP (bitmapa s rozlišením 24 bit).

Pomocí softwaru MATLAB byl obrázek transformován na datovou matici, kde každé pozici odpovídal jeden bod snímku. Jelikož byl snímek značně zatížen šumem, nebylo možné minima určit z jednoho řádku datové matice (obr. 6).



Obr. 6 Intenzitní průběh jednoho řádku datové matice

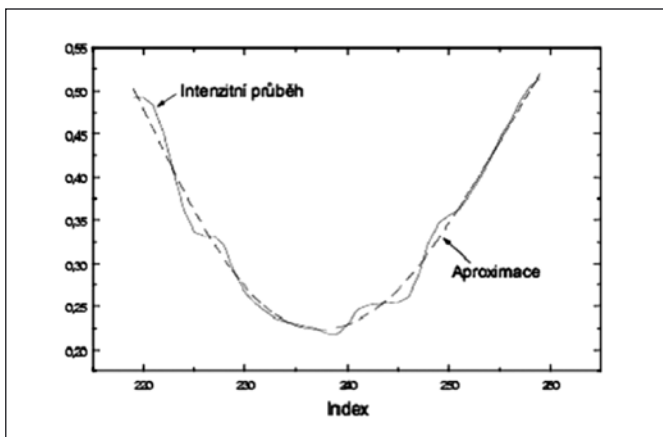
Proto byla data v jednotlivých sloupcích dále zprůměrována a vytvořila tak řádkový vektor. I na tomto intenzitním průběhu ještě byl patrný značný šum. Pro odstranění hrubých nenáhodných hodnot, které by mohly nepříznivě ovlivnit výsledky měření, bylo proto použito nelineárního, robustního vyhlazovacího filtru, založeného na pohyblivých mediánech. Medián $S(v, i)$ lichého stupně je definován vztahem

$$S(v, i) = \text{med}(y_{i-u}, \dots, y_i, \dots, y_{i+u}). \quad (14)$$

kde $u = (v-1)/2$ a symbol „med(.)“ označuje střed podle velikosti seřazených hodnot y . Byl využit filtr 53H s mediány pátého stupně kombinovanými s pohyblivými aritmetickými průměry. Jednoduchý filtr 53H je dán výrazem

$$Z_i = \frac{S(5, i-2)}{4} + \frac{S(5, i-1)}{2} + \frac{S(5, i)}{4}. \quad (15)$$

Dalším krokem bylo určení indexů minim v datovém vektoru. Pro přibližné stanovení minim byl intenzitní průběh vyhlazen kubickými splajny, takže vznikla hladká křivka, která poměrně přesně



Obr. 7 Intenzitní průběh jednoho řádku datového vektoru

kopírovala původní závislost. Minima aproximujícího polynomu byla nalezena ze změny znaménka derivace. Tato minima přibližně odpovídají minimům v intenzitním průběhu. Pro přesné určení pozice extrému byly v okolí těchto odhadů vybrány body tvořící vrchol, a ty byly znovu aproximovány polynomem (obr. 7). Šířka vrcholu je pro jednotlivé módy různá, proto se také měnil počet bodů, které byly aproximovány.

4.3 Výsledky analýzy módového spektra

Pro konkrétní experimentální měření byly vybrány jednovrstvé vlnovodné struktury vyrobené metodou epitaxe z kapalné fáze. Vlnovodná magnetooptická vrstva obsahující kovy vzácných zemin (RE-TM; rare earth-transition metal) [(Sm, Lu) Ca Y]3 [Fe, Ge]5 O12 je vytvořena na granátové podložce z GGG – galium gadolinový granát. Při výrobě vzorků byla měněna doba epitaxního růstu (růst tloušťky) a složení taveniny (změna indexu lomu).

Podle postupu popsaného výše (viz teorie vazebního hranolu) byly získány hodnoty synchronních úhlů odpovídající jednotlivým vlnovodným módům. V následujících tabulkách jsou přehledně seřazeny výsledky určení synchronních úhlů metodou lineární regrese. Nejdříve byla proměřena série vzorků 31CG1–31CG3. U těchto vzorků byly přibližně známy parametry, a proto na nich byl testován vliv konečné velikosti detekčního bodu kamery a vliv rozostření čáry při vzdalování čipu od hranolu na přesnost určení synchronních úhlů.

| vzorek | polarizace | m | $m+1$ | ... | synchronní úhly θ_m (°) | ... | $m+N$ |
|--------|------------|---------|---------|---------|--------------------------------|----------|----------|
| 31CG1 | TE | -2,8832 | -4,7669 | -7,1470 | -9,5812 | -12,5449 | |
| | TM | -2,8567 | -4,8490 | -7,1450 | -9,9120 | -12,7640 | |
| 31CG2 | TE | -4,7856 | -6,3522 | -7,9136 | -10,2106 | -12,1876 | -14,4160 |
| | TM | | -6,1398 | -8,0689 | -9,8068 | -11,9111 | -13,9851 |
| 31CG3 | TE | -5,9074 | -7,4432 | -9,1031 | -11,0703 | -12,8582 | -14,6210 |
| | TM | -5,6953 | -7,4184 | -9,1448 | -10,7896 | -12,7034 | -14,8588 |

Tab. 1 Hodnoty synchronních úhlů pro vzorky série 31CG1

| vzorek | polarizace | m | $m+1$ | ... | efektivní indexy lomu | ... | $m+N$ |
|--------|------------|--------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|
| 31CG1 | TE | 2,1864 | 2,1694 | 2,1475 | 2,1247 | 2,0963 | |
| | TM | 2,1865 | 2,1685 | 2,1474 | 2,1214 | 2,0940 | |
| 31CG2 | TE | 2,1692 | 2,1548 | 2,1403 | 2,1186 | 2,0997 | 2,0780 |
| | TM | | 2,1567 | 2,1388 | 2,1224 | 2,1023 | 2,0821 |
| 31CG3 | TE | 2,1589 | 2,1447 | 2,1291 | 2,1104 | 2,0931 | 2,0759 |
| | TM | 2,1608 | 2,1449 | 2,1287 | 2,1130 | 2,0946 | 2,0736 |

Tab. 2 Hodnoty efektivních indexů lomu pro vzorky série 31CG1

U vzorku 31CG1 byl krok posuvu 1 mm a celkový posuv kamery vzhledem k první pozici 25 mm, u 31CG2 byl krok posuvu 0,5 mm a celkový posuv 15 mm, a konečně u 31CG3 byl krok posuvu 0,2 mm a celkový posuv 6 mm. Ukázalo se, že optimální je využít co největšího posuvu 25 mm a nasbírat tak co nejvíce experimentálních dat pro pozdější lineární optimalizaci, a proto byly následující vzorky měřeny tímto postupem. Je také vidět, že takto získané efektivní indexy lomu jednotlivých vedených módů, dle vztahu $N_{ef} = \beta/k_v$, nejsou vždy pro TM polarizaci menší, než odpovídající efektivní indexy lomu u TE polarizace. To je dáno jednak možnou nepřesností měření, ale zejména pak tím, že v této fázi ještě nejsme schopni přiřadit jednotlivým tmavým liniím, a tedy i efektivním indexům lomu, určitý módový řád. Ten určíme až při specifikaci indexu lomu a tloušťky vlnovodné vrstvy.

Numerická analýza nejistot měření ukázala, že maximální hodnota nejistoty měření synchronního úhlu nepřesáhla hranici 0,02° a bylo možno pozorovat, že s rostoucím módovým řádem se zvětšovala, což souvisí s rostoucí silou vazby pro daný mód.

| vzorek | | m | ... | synchronní úhly a efektivní indexy lomu | | | | | ... | $m+N$ |
|--------|------------|---------|---------|---|----------|----------|----------|----------|-----|-------|
| 22CG5 | θ_m | 0,2520 | -1,6448 | -4,4026 | -7,5250 | -11,2492 | | | | |
| | N_{ef} | 2,2137 | 2,1972 | 2,1726 | 2,1439 | 2,1086 | | | | |
| 28CG3 | θ_m | -0,0525 | -1,0670 | -2,7813 | -4,6791 | -6,8243 | | | | |
| | N_{ef} | 2,2112 | 2,2024 | 2,1873 | 2,1702 | 2,1503 | | | | |
| 28CG4 | θ_m | -3,9599 | -5,7892 | -8,0425 | -10,5721 | -13,0632 | | | | |
| | N_{ef} | 2,1766 | 2,1599 | 2,1391 | 2,1151 | 2,0911 | | | | |
| 29CG2 | θ_m | -0,2095 | -2,0662 | -4,3752 | -7,3839 | -11,0080 | | | | |
| | N_{ef} | 2,2116 | 2,1937 | 2,1730 | 2,1453 | 2,1113 | | | | |
| 29CG4 | θ_m | -7,7844 | -8,6204 | -9,6860 | -10,9328 | -12,9930 | -14,9751 | -16,9532 | | |
| | N_{ef} | 2,1415 | 2,1336 | 2,1236 | 2,1117 | 2,0918 | 2,0724 | 2,0529 | | |
| 30CG3 | θ_m | -0,9870 | -2,9055 | -5,4018 | -8,1825 | -11,5340 | | | | |
| | N_{ef} | 2,2030 | 2,1860 | 2,1635 | 2,1377 | 2,1059 | | | | |
| 30CG4 | θ_m | -3,1692 | -4,6437 | -6,6036 | -9,5812 | -10,5128 | -13,0408 | | | |
| | N_{ef} | 2,1837 | 2,1705 | 2,1526 | 2,1355 | 2,1158 | 2,0914 | | | |

Tab. 3 Hodnoty synchronních úhlů a efektivních indexů lomů pro vzorky série 22CG–30CG. TE polarizace

Z tohoto důvodu se také profil tmavé linie rozšiřuje a její pozice posouvá. To je také velmi dobře patrné na obrázku 5, kde módový index roste směrem zleva doprava.

5 STANOVENÍ TLOUŠŤKY A INDEXU LOMU VLNOVODNÉ VRSTVY

Z takto získaného a vyhodnoceného módového spektra efektivních indexů lomů se nyní pokusíme zjistit parametry tenké vlnovodné vrstvy. Absorpce aplikovaných granátových vlnovodných vrstev pro danou vlnovou délku je zanedbatelná vzhledem k běžně dosahovaným nejistotám měření metodou tmavé módové spektroskopie. Předpokládáme tedy, že tato jednoduchá vlnovodná struktura se bude chovat jako bezztrátový izotropní systém, který může být popsán vlnovodnými rovcemi pro TE a TM polarizaci v analytickém vyjádření dle kapitoly 2 ve formě

$$k_v d^{(1)} \sqrt{N^{(1)2} - N_{efm,\psi}^2} = \arctg \left[\left(\frac{N^{(1)}}{n^{(0)}} \right)^{2v} \left(\frac{N_{efm,\psi}^2 - n^{(0)2}}{N^{(1)2} - N_{efm,\psi}^2} \right)^{1/2} \right] +$$

$$+ \arctg \left[\left(\frac{N^{(1)}}{n^{(s)}} \right)^{2v} \left(\frac{N_{efm,\psi}^2 - n^{(s)2}}{N^{(1)2} - N_{efm,\psi}^2} \right)^{1/2} \right] + m\pi,$$

$$v = \begin{cases} 0 & \text{pro TE polarizaci} \\ 1 & \text{pro TM polarizaci} \end{cases} \quad (16)$$

Efektivní index lomu vedeného módu $N_{efm} = \beta / k_v$, vystupující v této vlnovodné rovnici, odpovídá hodnotě pro volné vedení. Korekce měřením získaného efektivního indexu lomu, který v sobě má zanesenu nepřesnost vyplývající z přítomnosti hranolu, bude provedena metodou nelineární optimalizace.

Abychom mohli vypočítat parametry tenké vlnovodné vrstvy (index lomu a tloušťku), musíme znát také módový řád, příslušející měřeným tmavým liniím. Určení módového řádu z přímého pozorování, kdy bychom otáčeli goniometrickým stolek, abychom vybudili módy nižších řádů, není spolehlivé, protože při konstantní vazební síle nemusí být tyto nižší řády vybudeny. I když tedy nejsme schopni přiřadit tmavým liniím přímo konkrétní módové indexy, víme, že tento index roste, s ohledem na experimentální uspořádání, směrem k záporným hodnotám synchronních úhlů θ_m .

5.1 Aplikace metody nelineární optimalizace

V praxi se pomocí nelineárních regresních modelů řeší řada inverzních úloh. Vlastní problém se formuluje s ohledem na regresní triplet:

1. zadaná data,
2. navržený model,
3. kritérium regrese.

Jde vlastně o hledání modelu $f(x, \mathbf{B})$ na základě dat $\{y_i, x_i\}$, $i = 1, \dots, N$ a zvoleného kritéria regrese. V řadě případů je model $f(x, \mathbf{B})$ znám a regresní úloha je zjednodušena na konstrukci odhadů \mathbf{b} parametrů \mathbf{B} . Na rozdíl od lineárních regresních modelů mají parametry \mathbf{B} v nelineárních regresních modelech většinou rozhodující roli. Zatímco u lineárních regresních modelů nemívají regresní parametry fyzikální smysl a jsou pouhými numerickými koeficienty, mají parametry v nelineárních regresních modelech často přesný fyzikální význam. Jejich číselné hodnoty jsou hlavním cílem regresní analýzy.

Pojmem lineární regresní model se označuje model, který je lineární kombinací modelových parametrů (to znamená, že i lineární regresní model může být z hlediska průběhu modelové funkce nelineární). Pro lineární regresní modely platí podmínka

$$g_j = \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{B})}{\partial B_j} = \text{konst.}, \quad j = 1, \dots, M. \quad (17)$$

Pokud je alespoň pro jeden parametr B_j parciální derivace g_j funkcí tohoto parametru, jedná se o nelineární regresní model.

Při použití odhadů \mathbf{b} je třeba mít na paměti, že se jedná o bodové odhady parametrů \mathbf{B} , a že to jsou také náhodné veličiny. Proto je třeba vhodným způsobem specifikovat, za jakých předpokladů budou mít tyto náhodné veličiny konkrétní hodnotu. Toto nám umožňují tzv. konfidenční oblasti, nazývané také oblasti nebo intervaly spolehlivosti, ve kterých leží teoretická hodnota \mathbf{B} se zvolenou pravděpodobností $(1-\alpha)$. Hladina významnosti α se volí obvykle 0,05 nebo 0,01. Těto volbě odpovídají 95% nebo 99% intervaly spolehlivosti. Pro posouzení statistických vlastností nelineárního regresního modelu a stanovení oblastí spolehlivosti parametrů \mathbf{B} se používají tři základní přístupy [11]:

1. Metoda linearizace je metoda, která vychází z asymptotické normality vektoru $\sqrt{N}(\mathbf{b} - \mathbf{B})$ a odhadu rozptylu $D(\mathbf{b}) = \sigma^2(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1}$. Veličina σ^2 představuje rozptyl, \mathbf{J} je tzv. Jacobiho matice rozměru $N \times M$, jejíž prvky jsou derivacemi regresního modelu dle jednotlivých parametrů v jednotlivých bodech:

$$J_{ij} = \frac{\partial f(x_i, \mathbf{B})}{\partial B_j}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M. \quad (18)$$

2. Metoda Lagrangeových multiplikátorů.

3. Metoda věrohodnostního poměru.

Metody Lagrangeových multiplikátorů a věrohodnostního poměru vyžadují numerické hledání kořenů nelineárních funkcí. Metoda linearizace se proto v praxi užívá nejčastěji, nevyžaduje totiž žádné další výpočty. Navíc využívá analogické vztahy jako statistika lineární regrese. Za předpokladu aditivního modelu měření, platnosti normálního rozdělení $N(0, \sigma^2)$ pro měřené veličiny a při zanedbání korelace mezi odhady parametrů lze odvodit intervaly spolehlivosti pro parametr b_j ve tvaru

$$b_j - t_{1-\alpha/2}(N-M)\hat{\sigma}\sqrt{V_{jj}} \leq B_j \leq b_j + t_{1-\alpha/2}(N-M)\hat{\sigma}\sqrt{V_{jj}} \quad (19)$$

kde V_{jj} je j -tý diagonální prvek matice $(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1}$ a $t_{1-\alpha/2}(N-M)$ je kvantil Studentova rozdělení s $(N-M)$ stupni volnosti. Veličina σ představuje směrodatnou odchylku nejistoty měření a symbol $\hat{\sigma}$ pak její tzv. nevychýlený odhad, tzv. reziduální směrodatnou odchylku definovanou vztahem

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{pi})^2}{N - M}}. \quad (20)$$

Při určování indexu lomu a tloušťky tenké vlnovodné vrstvy vycházíme z fyzikálního modelu popsaného rovnicí (16). Tento budeme transformovat do tvaru nelineárního regresního modelu následujícím způsobem, přičemž podrobně rozebereme jednotlivé kroky optimalizačního procesu:

1. Nejprve vyjádříme efektivní index lomu jako funkci zbývajících parametrů ($v = 0, 1$ odpovídá po řadě TE nebo TM polarizaci)

$$N_{efm}^{teor} = N^{(1)2} - \frac{\left(\arctg \left[\left(\frac{N^{(1)}}{n^{(0)}} \right)^{2v} \left(\frac{N_{efm}^{\psi 2} - n^{(0)2}}{N^{(1)2} - N_{efm}^{\psi 2}} \right)^{1/2} \right] + \arctg \left[\left(\frac{N^{(1)}}{n^{(s)}} \right)^{2v} \left(\frac{N_{efm}^{\psi 2} - n^{(s)2}}{N^{(1)2} - N_{efm}^{\psi 2}} \right)^{1/2} \right] + m\pi \right)^2}{k_v d^{(1)}}. \quad (21)$$

Vzhledem k regresnímu modelu $y = f(\mathbf{x}, \mathbf{B}) + \delta$ (δ je náhodná neurčitost měření) si veličiny odpovídají následovně:

- a) nezávislá proměnná (vysvětlující) má pouze jeden prvek $\mathbf{x} \rightarrow m$,
- b) regresní model $y_p = f(\mathbf{x}, \mathbf{B}) \rightarrow N_{efm}^{teor}$,
- c) vektor hledaných parametrů má dva prvky $\mathbf{B} \rightarrow (N^{(1)}, d^{(1)})$,
- d) závislá proměnná, neboli experimentální odezva $y \rightarrow N_{efm}^{exper}$ - je určena pomocí vztahu (7).

2. Problém, který plyne z nemožnosti úplné separace veličiny N_{efm} v rovnici (16), byl vyřešen tak, že neseparovatelné členy byly označeny jako ${}^n N_{efm}$ a byla jim přiřazena počáteční hodnota, která odpovídá experimentálně určeným hodnotám podle vztahu (7). Tato hodnota se v každém iteračním kroku opravuje aktuální hodnotou predikce y_p .

3. Jako regresní kritérium (také účelová, návrhová, cenová funkce) byla zvolena metoda nejmenších čtverců ve vyjádření

$$G(N^{(1)}, d^{(1)}) = \sum_{i=1}^N (N_{efi}^{exper} - N_{efi}^{teor})^2. \quad (22)$$

4. Jedná se tedy o nelineární regresní analýzu metodou nejmenších čtverců v dvoudimenzionálním prostoru. Jako optimalizační algoritmus, který provádí minimalizaci účelové funkce $G(N^{(1)}, d^{(1)})$ byla vybrána kombinace nederivačních a derivačních algoritmů [12], [13]. Při použití pouze nederivační optimalizační metody bychom nemohli provádět statistickou analýzu získaných odhadů, neboť k tomu je nutné znát prvky Jacobiho matice. Tu však algoritmy nevyužívající derivace regresní funkce neposkytují. Proto struktura optimalizačního procesu vypadá následovně:

- (a) Stanovení počátečních odhadů regresních parametrů $N_0^{(1)}, d_0^{(1)}$ bylo provedeno metodou využívající náhodných čísel – algoritmus *Controlled Random Search*. Pro tyto počáteční odhady byla nastavena nižší přesnost pro ukončení hledání.

- (b) Jako druhý stupeň byla nasazena nederivační metoda simplexů pro zpřesnění těchto počátečních odhadů.
- (c) Pro určení Jacobiho matice a konečného určení regresních parametrů je použita derivační metoda, která využívá kombinaci Levenberg-Marquardtova algoritmu společně s metodou přímého hledání. Tato metoda byla vybrána zejména z důvodů své robustnosti vzhledem k počátečním odhadům a kvalitě regresního modelu.

5. Přiřazení módoých indexů tmavým liniím probíhá následujícím způsobem: postupnou změnou posloupností módoých indexů, kdy první měřené tmavé linii postupně odpovídal módový řád 0 až 20, byla vypočtena sada regresních parametrů. Správná volba se projeví rychlou konvergencí a malou hodnotou účelové funkce $G(N^{(1)}, d^{(1)})$. Za správné hodnoty byly zvoleny regresní parametry příslušející nejmenší hodnotě $G(N^{(1)}, d^{(1)})$. Pro výpočet tímto způsobem je nutné znát synchronní úhly alespoň tří vedených módů. Tyto synchronní úhly musí být změřeny s velkou přesností, protože jinak může řešení konvergovat k nesprávným hodnotám regresních parametrů. Větší počet změřených tmavých linií zvyšuje přesnost výpočtu a omezuje možnost určení nesprávných hodnot.

6. Korigovaná hodnota efektivního indexu lomu na volné vedení pak odpovídá optimálním parametrům $N^{(1)}, d^{(1)}$.

5.2 Výsledky měření parametrů tenkých vrstev

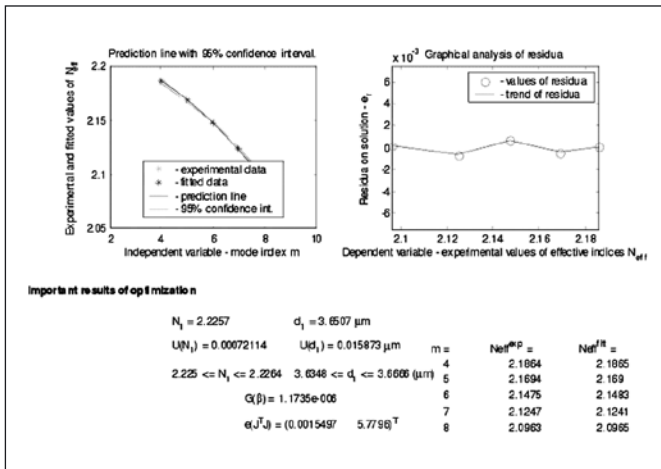
Výsledky optimalizačního procesu, vypočtené parametry tenké vrstvy $N^{(1)}, d^{(1)}$, jsou seřazeny v následující tabulce:

| vzorek | vidový řád | index lomu | tloušťka (μm) |
|--------|------------|------------|----------------------------|
| 22CG5 | 2 | 2,2377 | 2,8044 |
| 28CG3 | 2 | 2,2257 | 3,7016 |
| 28CG4 | 5 | 2,2241 | 4,0067 |
| 29CG2 | 2 | 2,2336 | 2,8895 |
| 29CG4 | 12 | 2,2239 | 6,9281 |
| 30CG3 | 2 | 2,2240 | 2,9364 |
| 30CG4 | 5 | 2,2217 | 4,4907 |

Tab. 4 Hodnoty indexu lomu a tloušťky vrstvy pro vzorky série 22CG–30CG. TE polarizace (vidový řád představuje hodnotu nalezenou optimalizačním procesem pro první tmavou linii)

Na grafických výstupech jsou ukázány praktické výsledky použití metody nelineární regrese při určování indexu lomu a tloušťky tenké vlnovodné vrstvy – viz obr. 8. Z grafických závislostí a z numerických hodnot spolehlivostních intervalů je patrné, že experimentální měření indexu lomu a tloušťky tenké vlnovodné vrstvy metodou tmavé vidové spektroskopie bylo provedeno s požadovanou přesností 10–3–10–4 pro index lomu a pro tloušťku 1 % z celkové tloušťky vlnovodné vrstvy. Také z předpokládaných hodnot indexu lomu a tloušťky, které byly získány při výrobním procesu (s rostoucím pořadovým číslem by měla růst tloušťka, ale index lomu by se měl měnit velmi málo) se ukazuje, že vypočtená data jsou ve shodě s realitou.

Je nutné poznamenat, že vypočtená tloušťka a index lomu vrstvy charakterizuje pouze blízké okolí vazební oblasti (tmavá módová spektroskopie je úzce lokalizovaná metoda). Tloušťka je největší ve středu vzorku a směrem ke krajům destičky klesá (je to dáno způsobem výroby vzorku). Také index lomu nemusí být po celé ploše vzorku konstantní.



Obr. 8 Ukázka výstupu nelineární regresní optimalizace. Vzorek 31CG1, TE polarizace

7 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na prezentaci matematických metod při zpracování naměřených dat metodou tmavé módové spektroskopie a využití získaných výsledků k charakterizaci zkoumaných vlnovodných vrstev.

Bylo úspěšně aplikováno použití filtrovacích a hladicích algoritmů v matematickém prostředí MATLAB pro co nejlepší detekci polohy tmavých linií, které odpovídají tzv. synchronním úhlům. Měření synchronních úhlů bylo provedeno s velmi dobrou přesností, absolutní nejistota stanovení synchronního úhlu byla v řádech 10^{-2} stupně. Tomu odpovídající nejistoty ve stanovení efektivního indexu lomu se pohybovaly v intervalu 10^{-3} až 10^{-4} .

Stanovení parametrů tenkých vlnovodných vrstev bylo provedeno s očekávanou přesností, nejistota indexu lomu se u jednotlivých měřených vzorků pohybuje v řádech 10^{-3} až 10^{-4} a tloušťka byla stanovena s nepřesností pohybující se kolem 1 % z měřené tloušťky. Specifikace indexu lomu a tloušťky vrstvy měřených vlnovodných vzorků byla provedena na základě změřeného módového spektra synchronních úhlů metodou nelineární regrese, která zajišťuje při použití derivačních optimalizačních algoritmů exaktní stanovení intervalů spolehlivosti měřených parametrů.

Literatura

- [1] Izuka, K.: Engineering Optics. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1987.
- [2] Tien, P. K., Schinke, D. P., Blank, S. L.: Magneto-optics and motion of the magnetization in a film waveguide optical switch. J. Appl. Phys., 1974, Vol. 45, No. 7, pp. 3059–3068.

- [3] Okamura, Y. and Yamamoto, S.: Measurement of Faraday effect in iron garnet optical waveguide at near infrared wavelengths. J. Appl. Phys., 1974, Vol. 69, No. 8, pp. 4583–4585.
- [4] Zvezdin, A. K., Kotov, V. A.: Modern Magneto-optics and magneto-optical material. London, IOP Publishing, 1997.
- [5] Kersten, R. Th.: The prism-film coupler as a precision instrument – Part I: Accuracy and capabilities of prism coupler as instruments. Optica Acta, 1975, Vol. 22, No. 6, pp. 503–513.
- [6] Hurtado-Ramos, J., Wang, H.: Analysis of accuracy in prism coupling methods and a proposal of two simple ways for coupling to guided waves and/or for exciting surface plasmon resonance. Optical Materials, 1997, Vol. 7, pp. 153–164.
- [7] Pištora, J.: Výzkum tenkých magnetických granátových vrstev metodou vidové spektroskopie. Kandidátská disertační práce. Universita Karlova, Praha, 1983.
- [8] Yeh, Y.: Optics of anisotropic layered media: a new 4×4 matrix algebra. Surf. Sci., 1980, vol. 96, pp. 41–53.
- [9] Ciprian, D., Pištora, J., Postava, K., Kantor, R.: Light Propagation in Multilayered Waveguide. Proc. ISAP, 1996, Vol. 3, pp. 633–636.
- [10] Tien, P. K., Ulrich, R.: Theory of Prism – Film Coupler and Thin Films Light Guides. J. Opt. Soc. Am., 1970, Vol. 60, No. 10, pp. 1325–1337.
- [11] Meloun, M., Militký, J.: Statistické zpracování experimentálních dat. East Publishing, Praha, 1998.
- [12] Fletcher, R.: Practical Methods of Optimization., Vol. 1, Unconstrained optimization, and Vol. 2, Constrained optimization. John Wiley and Sons., 1980.
- [13] Powel, M. J., D.: Variable Metric Methods for Constrained Optimization in Mathematical Programming: The State of the Art. Edited by A. Bachem, M. Grottschel and B. Kort, Springer Verlag, Berlin, 1983.

Poděkování

Tato práce byla částečně financována z prostředků grantové agentury CR (č. 202/06/0531) a projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy (MSM 619 891 0016).

Ing. Ondřej Bárta, ELTG – oddělení výzkumu a vývoje, Visteon-Autopal s.r.o., Lužická 14, 741 01 Nový Jičín; tel.: 556 780 226, e-mail: obarta@visteon.com

Prof. Ing. Jaromír Pištora, CSc., Institut fyziky, Hornicko-geologická fakulta, VŠB-TU Ostrava, Tř. 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba; tel.: 596 993 129, e-mail: jaromir.pistora@vsb.cz

Doc. RNDr. Jaroslav Vlček, CSc., katedra matematiky a deskriptivní geometrie, Hornicko-geologická fakulta, VŠB-TU Ostrava, Tř. 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba; tel.: 596 994 176, e-mail: jaroslav.vlcek@vsb.cz

RNDr. František Staněk, Institut fyziky, Hornicko-geologická fakulta, VŠB-TU Ostrava, Tř. 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba; tel.: 596 993 101, e-mail: f.stanek@vsb.cz

Ing. Tomáš Kreml, ELTG – oddělení výzkumu a vývoje, Visteon-Autopal s.r.o., Lužická 14, 741 01 Nový Jičín; tel.: 556 780 361, e-mail: tkreml@visteon.com

Systém pre určenie okamžitého technického stavu rotujúcich strojov počas plynulého priebehu dynamického namáhania

Vibračná diagnostika využíva ako diagnostický parameter vibrácie, ktoré sú zapríčinené dynamickým namáhaním stroja, a práve tento diagnostický parameter dáva informáciu k určeniu objektívneho technického stavu rotujúcich strojov. Základným cieľom monitorovania vibrácií rotujúcich strojov je poskytnutie informácie o prevádzkovom a technickom stave zariadenia za účelom zabezpečenia strategického plánovania a riadenia údržby.

Kľúčové slová: monitorovanie, vibrácie, vibrodiagnostika, OKTALON, senzor

ÚVOD

Vibračná diagnostika, alebo vibrodiagnostika je jednou z metód bez montážnej, alebo nedeštruktívnej diagnostiky rotačných strojových zariadení. Využíva vibrácie, ktoré generujú zariadenie v chode, ako zdroj informácií o spôsobe jeho prevádzky. Vibrodiagnostika je tiež významným nástrojom moderných produktívnych a proaktívnych metód údržby strojových zariadení. Pomocou vibrodiagnostiky sa údržba strojových zariadení plánuje podľa skutočného stavu, odpadá mnoho zbytočnej preventívnej opravy, čo vedie k nemalým úsporám náhradných dielov a času potrebného na opravy strojových zariadení. Na pravidelne monitorovaných zariadeniach sa rovnako predlžuje perióda odstávok, ktoré je možné plánovať s dostatočným predstihom s tým, že je z výsledkov merania zrejme, aký uzol bude predmetom opravy [4].

MOŽNOSTI VIBRODIAGNOSTIKY

Základným meraním je zisťovanie celkových vibrácií zariadení. Zisťované sú hlavne mechanické stavy, ako nevyváženosť, nesúosovosť, mechanické uvoľnenie, ohnutý hriadeľ, rezonancia, problémy remeňových prevodov, atď. Toto meranie je definované v normách, ktoré sa zabývajú dovolenými mohutnosťami kmitania na daných zariadeniach (EN – 122 011 – Ventilátory, EN – 105 041 – Kompresory, EN ISO 10816 – obecná norma pre väčšinu strojových zariadení) Predmetom merania je rýchlosť vibrácií mm/sec v pásme 10 – 1000 Hz v detekcii RMS. Výnimku tvorí posudzovanie mohutnosti vibrácií na obrábacích strojoch, kde sú nutne prísnejšie kritéria a kde dlhodobým sledovaním boli zistené doporučené hodnoty mohutnosti vibrácií.

Pre zisťovanie stavu mazania v klzných a mazacích ložiskách, detekovania elektrických problémov na elektrometroch, overovania stavu ozubenia a mazania v prevodovkách sa úspešne aplikuje meranie zrýchlenia vibrácií vo vhodne zvolených frekvenčných rozsahoch.

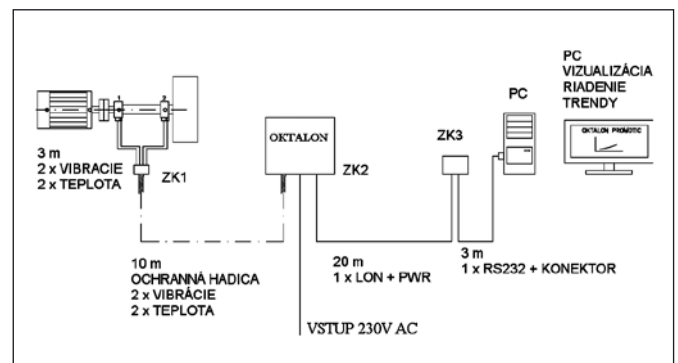
Pre zisťovanie presného stavu ložísk sú vyvinuté špeciálne tzv. obáľkové technológie zrýchlenia vibrácií. Dôvod používania obáľkových technológií vychádza z poznatku, že odvalovaním poškodeného prvku ložiska dochádza k nárazom, ktoré vyvolávajú zvýšené vybratie na frekvenciu nárazu, ale potom hlavne na rezonančných frekvenciách. Cieľom obáľkových technológií je odfiltrovať a zvýrazniť tieto signály od poškodenia v ložisku vo vysokofrekvenčnej oblasti. Vyhodnocovací software následne dokáže rozlíšiť, ktorá časť ložiska vykazuje poškodenie [5].

Pri meraniach strojových zariadení sa používa tzv. multiparametrické monitorovanie, kedy sa snímajú všetky uvedené veličiny v rôznych rozsahoch a pásmach a môžu byť doplnené i o meranie výchyľky eventuálnej amplitúdovo – fázovej premeny pre upresne-

nie výsledkov merania. S číselnou hodnotou je ukladané hlavne spektrum vibrácií, v ktorom sa podrobne rozlišujú jednotlivé známky poškodenia, alebo opotrebenia uvedeného vyššie.

POPIS MERACIEHO ZARIADENIA

Meranie pomocou vibrodiagnostického zariadenia OKTALON bolo zamerané na analýzu vibrácií generovaných vibrodiagnostickým modelom. Vibrodiagnostický model obsahoval motor, pružnú spojku, dve ložiská a záťažový hriadeľ (obr. 1). Meracie body boli na ložiskách a meranie vibrácií pomocou akcelerometrov prebiehalo pri rôznych otáčkach motora (obr. 3). Meranie v danom rozsahu otáčok bolo uskutočnené pri troch rôznych nesymetriách záťažového hriadeľa. Merací reťazec použitý na meranie, spracovanie a analýzu vibrácií bol navrhnutý tak, ako to ukazuje obr. 1.



Obr. 1 Principiálna schéma meracieho vibrodiagnostického pracoviska

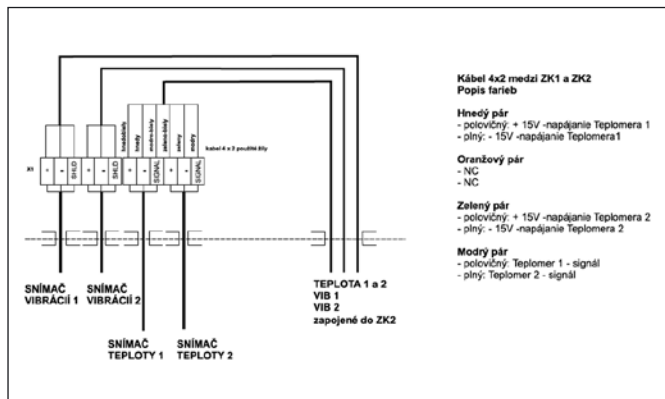
Konkrétne konštrukčné elektrické prepojenie vibrodiagnostického systému OKTALON a snímačov upevnených na meracom modeli je zobrazené na obr. 2. Kvôli rozšíreniu meracích možností boli použité aj dva teplotné snímače.

MERACÍ SYSTÉM OKTALON

OKTALON je modulárny - multiparametrický merací systém určený pre trvalé sledovanie mechanických vibrácií a posudzovanie stavu valivých ložísk. Je zostrojený na princípe neurónových sietí typu LonWorks s otvorenou architektúrou.

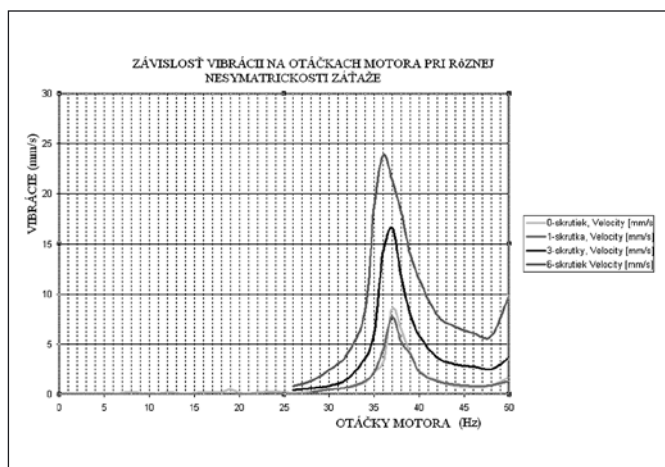
Meranie, vyhodnocovanie a ukladanie nameraných hodnôt do pamäte je vykonávané v automatickom režime. Tieto hodnoty sa porovnávajú s nastavenou úrovňou poplachov - alarmov.

Komunikácia a prenos údajov do PC a vizualizačného programu je možná pomocou dvojlinky protokolom LonTalk (do 2500 m), rozhraním RS 232 alebo modemom (v pevnej telekomunikačnej sieti, alebo mobilnej GSM sieti). Merací systém OKTALON je vyrobený zo štandardných „inteligentných“ modulov typu LonWorks na báze procesorov Echelon. Všetky použité komponenty sú vyvinuté pre prácu v ťažkom priemyselnom prostredí. Vyznačujú sa vysokou spoľahlivosťou prevádzky, odolnosťou proti rušeniu a mimoriadne priaznivým pomerom výkon - cena.



Obr. 2 Bloková schéma elektrického prepojenia meracieho systému OKTALON s meracím modelom

Výsledkom merania je grafická závislosť (obr. 3) mechanických vibrácií na otáčkach motora pri zmene nesymetrickosti záťaže. Meranie prebiehalo tak, že sa na začiatku nastavil záťažový kotúč do nevyváhy pomocou nesymetrického rozloženia skrutiek na jeho



Obr. 3 Grafická závislosť vibrácií ložísk na nesymetrickosti záťažového kotúča meraných v určitom rozsahu otáčok motora

obvode. Táto nesymetrickosť bola zmenená trikrát, a to od menšej nesymetrickosti po väčšiu nesymetrickosť. Pri každej nastavenej nesymetrickosti boli postupne zvyšované otáčky motora v rozsahu od 0 Hz po 50 Hz a merané vibrácie. Otáčky motora boli zvyšované s krokom 1 Hz. V grafe na obr. 3 je vidieť postupný prudký nárast vibrácií, čo je spôsobené zhodou rezonančnej frekvencie meranej sústavy s frekvenciou otáčok motora. Tento prudký nárast hodnôt vibrácií je tým väčší, čím je väčšia nesymetrickosť záťažového kotúča. Týmto meraním sa zistila závislosť vibrácií meranej sústavy na nesymetrii rozloženej váhy záťažového kotúča pri prechode otáčok motora rezonančnou frekvenciou tejto sústavy.

ZÁVER

Toto meranie bolo zamerané na návrh optimálneho riešenia pre monitorovanie, reguláciu a diagnostiku prevádzkových stavov strojov a výrobných systémov. Návrh obsahoval tri alternatívy riešenia zariadení na diagnostiku strojov. Z uvedených troch alternatív bola vybraná jedna, ktorá sa najviac osvedčila pri praktickom meraní a vyhovovala aj z ekonomického hľadiska. Na vybranej alternatíve bolo možné najefektívnejšie poukázať na nízkofrekvenčné vibrácie generované vplyvom nesymetrickosti, nesúosovosti hriadeľa, ale aj vysokofrekvenčné vibrácie generované ložiskami. Bol vybraný merací systém Oktalon a to pre jeho viacúčelové využitie a možnosť zobrazovania výsledkov na počítači. Taktiež obsahuje zabudovaný alarm so signalizáciou v prípade prekročenia povolených hodnôt vibrácií. Z technického hľadiska je možné použiť frekvenčnú analýzu na diagnostikovanie technického stavu meraného zariadenia.

Literatúra

- [1] ĎAĎO S., KREIDL M.: Sensory a mēricí obvody 1996
- [2] FABIAN, S.: ČSN 010641, ST SEV 3944-82 Spoľahlivosť v technike Plánovanie pozorovaní, UNM Praha, 1986
- [3] FABIAN, S.: Spoľahlivosť zložitých výrobných systémov. Elfa s.r.o. Košice 1997. ISBN 80-7099-301-4
- [4] HRAŠKO, P., PUZJAK, I.: Elektrotechnika 2. vydanie, Praha, ALFA, 1987, 320 s., ISBN 063-579-87
- [5] LÍŠKA, O., FEJERČÁK, V.: Snímače fyzikálních veličín, Košice, Edičné stredisko VŠT, 1986, 240 s.
- [6] MARTINEK, R.: *Sensory v priemyselnej praxi*, Praha: BEN, 2004, 192 s., ISBN 80-7300-114-4.
- [7] SICK spol. s.r.o. Sensory pro automatizační techniku 2002.

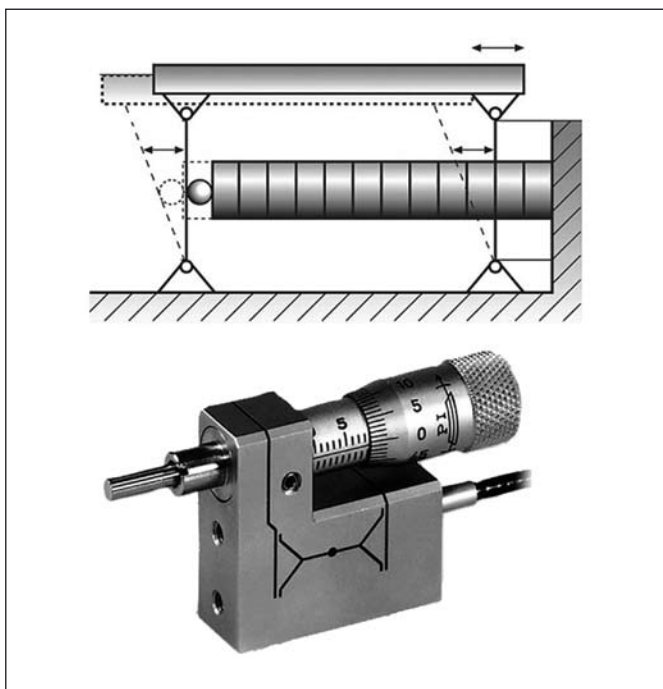
Tento článok bol písaný v rámci projektu Vývoj metód a technických systémov pre zvyšovanie spoľahlivosti a bezpečnosti prevádzky výrobných systémov. č. 1/2209/05 na FVT.

Pružné klouby ve výpočtu i praxi

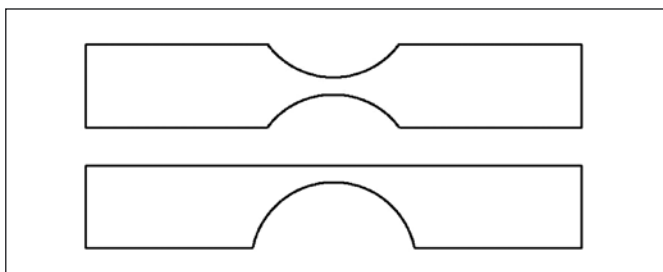
Každý den stojí konstruktéři po celém světě před otázkou, jak dosáhnout vzájemného pohybu dvou dílů v mechanismu. Tradiční řešení využívá valení nebo tření. V případě rotačního pohybu to znamená otáčení okolo pevného čepu nebo použití valivého ložiska. Výsledná konstrukce proto obsahuje celou řadu součástek, což může zvyšovat cenu a rozměry výrobku. Takovéto mechanismy navíc často pracují s vůlí a do mechanismu vnášejí hysterzezi, která je zvláště v přesné mechanice nežádoucí. Pokud však vystačíme s malým rozsahem pohybu, lze tření či valení nahradit promyšlenou elastickou deformací. Vzniká tak mechanismus s pružnými klouby.

Klíčová slova: pružné klouby, výpočty metodou konečných prvků MKP

Zlaté období pružných kloubů nastalo až s rozšířením technologie elektroerozivního drátového obrábění, které umožnilo vyrábět pružné klouby často velice roztodivných tvarů při použití těžko obrobitelných materiálů s vysokou mezí pružnosti. Nádherný příklad nahrazení otočných čepů pružnými klouby v mechanismu paralelogramu je ukázán na obr. 1. Pružné klouby jsou však kolem nás již řadu desetiletí, aniž si to často uvědomujeme. Nejstarší a nejnámější představitelé z nich vidíme na obr. 2.

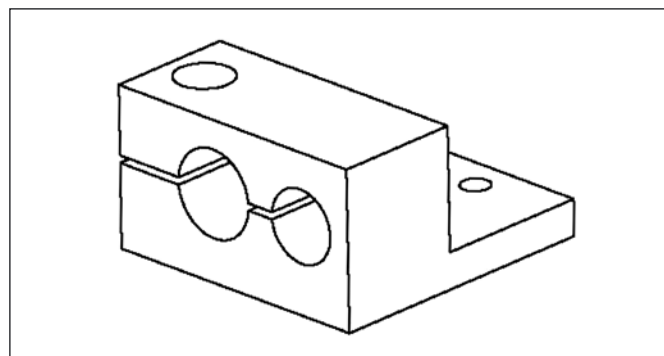


Obr. 1



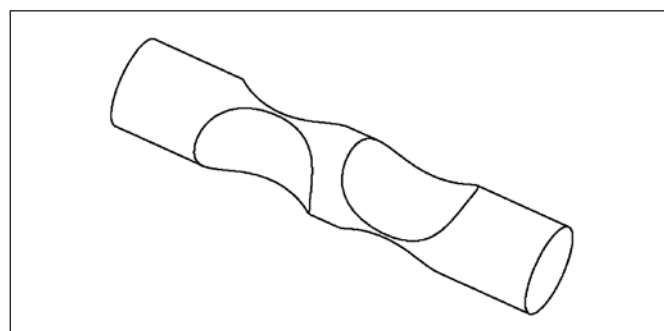
Obr. 2

Tyto dva typy vynikají tím, že je lze při troše dobré vůle vyrobít konvenčním obráběním, tedy kombinací vrtání a frézování. Přestože by řada konstruktérů přísahala, že pružný kloub v životě nepoužili, příklad součástky z obr. 3 je nejspíš usvědčující z omylu. Jedná se o jednoduchou svěrnou objímku mikrometru, která dokonce obsahuje hned dva pružné klouby najednou.



Obr. 3

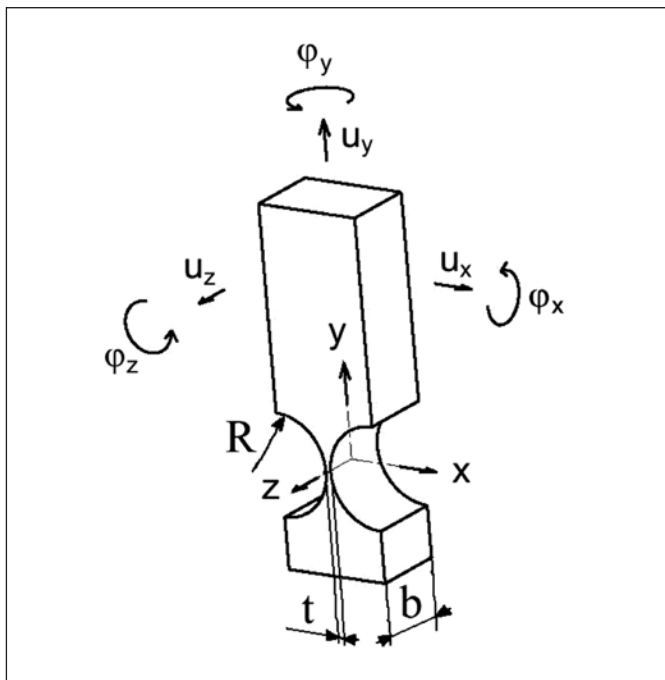
V přesné mechanice se pružných kloubů používá především ke konstrukci vodicích zařízení s malými rozsahy. Nejjednodušším vedením je jeden kloub, který umožňuje rotaci. Kombinací dvou kloubů (obr. 4) dostáváme mechanismus se dvěma stupni volnosti, který již umožňuje obsáhnout plochu. Polohovaný předmět však nebude vykonávat pouze posuvný pohyb, ale i drobný pohyb rotační, což velmi často nevádí. Takovýto mechanismus se s výhodou používá například k nastavení polohy žárovek nebo optických vláken. Pokud je rotace polohovaného předmětu nepřijatelná, přichází řešení v podobě paralelogramu.



Obr. 4

Pružné klouby se tedy používají, přestože konstruktéři často nevědí, co od nich čekat. Jaká je jejich tuhost, maximální rozsah? Snahou tohoto článku je představit nejdůležitější vlastnosti jednoduchého pružného kloubu a poskytnout návod k jeho použití.

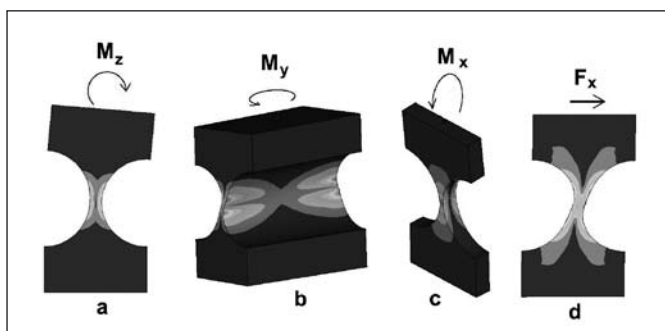
Co by tedy měl konstruktér o pružném kloubu vědět, dříve než se posadí za rýsovací prkno? Podívejme se na jednoduchý pružný kloub (obr. 5) podrobněji. Přestože využíváme pouze jeden užitečný stupeň volnosti – rotaci okolo osy z , najdeme v kloubu samozřejmě i ostatních pět stupňů volnosti, které jsou z konstrukčního hlediska víceméně škodlivé. Jsou to zbylé dvě rotace okolo os x a y a tři posuvy ve směru os x , y a z .



Obr. 5

Nejvíce nás samozřejmě zajímá, o jaký úhel se kloub dokáže natočit okolo osy z , aniž by nastala plastická deformace materiálu. Definujeme proto pro kloub poměrný úhel natočení a_{φ_z} [rad/Pa] jako poměr úhlu natočení φ_z a v kloubu vzniklého maximálního redukovaného napětí σ_{red} .

Druhou neméně důležitou hodnotou je tuhost kloubu při natáčení, neboť ta ovlivňuje nejen přítláčivé síly aktuátorů, ale i přítláčivé síly případných vratných pružin. Pro úplný popis kloubu dále potřebujeme znát i tuhosti v ostatních pěti stupních volnosti, tedy celkem šest hodnot. Tři z nich, k_{φ_x} , k_{φ_y} , k_{φ_z} [N.m/rad] definujeme jako podíl zatěžujícího momentu M_x , M_y , M_z působícího na kloub a příslušného úhlu natočení kloubu φ_x , φ_y , φ_z . Tyto tuhosti tedy popisují případy ohybu kloubu okolo os z (obr. 6a) a x (obr. 6c) nebo při kroucení okolo osy y (obr. 6b). Druhá trojice tuhostí se



Obr. 6

vztahuje k situaci, kdy se horní i dolní části kloubu nemohou natáčet, mohou však konat posuvný pohyb. Tyto tuhosti k_{u_x} , k_{u_y} , k_{u_z} [N/m] proto definujeme jako poměr síly F_x , F_y , F_z a příslušného posuvu u_x , u_y , u_z . Je zřejmé, že prodloužení kloubu ve směru osy y a stříh ve směru osy z jsou ve srovnání s ostatními stupni volnostmi kloubu zanedbatelné, a proto se z této skupiny budeme zabývat pouze stříhem ve směru osy x (obr. 6d).

V předchozích odstavcích jsme vyjmenovali důležité vlastnosti kloubu, které konstruktér ovlivňuje správným návrhem rozměrů kloubu a samozřejmě volbou materiálu. Kloub je geometricky popsán tloušťkou krčku t , poloměrem zaoblení R a svou šířkou b (obr. 5). Jak se ukáže v následujícím textu, je vhodnější pracovat místo s rozměry R a b s relativními poměry R/t a b/t . Z materiálového hlediska nás nejvíce zajímá modul pružnosti E . Máme tedy před sebou obecně čtyřparametrickou úlohu. Naštěstí pro nás se ale v řadě případů problém velice zjednoduší.

Nyní se podívejme, jak pro zadaný kloub vypočítat jeho vlastnosti. Jednoduché analytické řešení bohužel neexistuje. Pro praxi ale přeci nepotřebujeme naprosto exaktní výpočetní nástroj, ale bohatě postačí jednoduchá pomůcka ve formě tabulky, grafu či přibližného empirického vztahu, tedy nástroje, které využívaly generace konstruktérů před námi. K sestavení takovýchto pomůcek dnes máme k dispozici mocnou zbraň v podobě výpočetních programů k řešení úloh pružnosti a pevnosti, z nichž asi nejpopulárnější je metoda konečných prvků MKP.

Z konstrukčního pohledu je nejdůležitější rotace kloubu okolo osy z . Z hlediska pružnosti a pevnosti se jedná o rovinnou úlohu, takže tloušťka kloubu b ve všech dalších úvahách vystupuje pouze jako lineární konstanta. Hookův zákon nám dále říká, že tuhosti kloubu budou na modulu pružnosti záviset lineárně, proto se i tento parametr stává jednoduchou konstantou. Ve zjednodušování však můžeme ještě dál. Je zřejmé, že všechny klouby se stejným poměrem R/t jsou až na měřítko geometricky stejné a bude u nich tedy i podobné rozložení pole napjatosti. Zvolme si proto řadu referenčních kloubů s tloušťkou krčku například $t_0 = 1$ mm, šířkou $b_0 = 1$ mm a poměrem R_0/t_0 v rozsahu $1 \div 100$, která pokrývá v podstatě všechny reálné konstrukční aplikace. Pro tyto referenční klouby pak lze vypočítat například metodou MKP tuhosti k_{φ_z0} a poměrné úhly natočení a_{φ_z0} . Výsledky jsou znázorněny v obr. 7 a v obr. 8.

Přepočet tuhosti z referenčního kloubu (R_0 , b_0 , t_0 , E_0) na jakýkoliv jiný kloub s rozměry b , t a R a modulem pružnosti E pak provedeme velice jednoduše. Z grafu odečteme hodnotu k_{φ_z0} referenčního kloubu s poměrem $R_0/t_0 = R/t$ a dosadíme do vztahu (1.). Vidíme, že tuhost k_{φ_z} roste přímo úměrně s šířkou kloubu a s druhou mocninou tloušťky krčku. S poměrným úhlem natočení a_{φ_z} je to ještě jednodušší, neboť ten nezáleží ani na šířce b , ani na poměru R/t (2.):

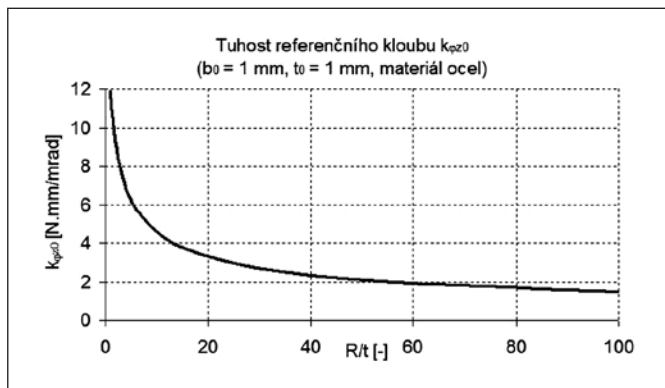
$$k_{\varphi_z} = \frac{E}{E_0} \cdot \frac{b}{b_0} \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 \cdot k_{\varphi_z0}, \quad (1.)$$

$$a_{\varphi_z} = \frac{E_0}{E} \cdot a_{\varphi_z0}. \quad (2.)$$

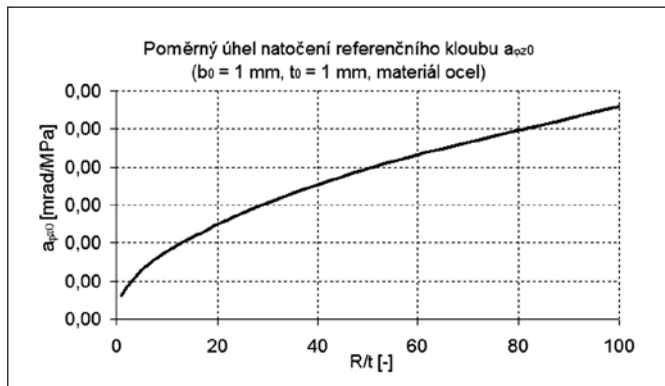
Pro orientační výpočet si lze práci ještě více zjednodušit. Závislosti v obr. 7 a v obr. 8 lze totiž velice dobře aproximovat mocninnými funkcemi. Dostáváme tak sice přibližné, ale velice názorné vztahy pro výpočet tuhosti kloubu k_{φ_z0} (3.) a měrného úhlu natočení a_{φ_z0} (4.):

$$k_{\varphi_z0} = 0,069 \cdot \frac{E \cdot b \cdot t^2}{\sqrt{\frac{R}{t}}}, \quad (3.)$$

$$a_{\varphi_z0} = 23,6 \cdot \frac{\sqrt{\frac{R}{t}}}{E}. \quad (4.)$$



Obr. 7



Obr. 8

Nyní již umíme vypočítat vlastnosti kloubu v případě užitečné rotace okolo osy z . Původně čtyřparametrickou úlohu jsme dokázali zjednodušit na problém jediného parametru R/t . Podívejme se nyní na zbylé tři stupně volnosti, tedy na odolnost kloubu proti kroucení, ohybu a stříhu. Tyto stupně volnosti jsou v konstrukci velice nežádoucí, nikdy se jim však nelze zcela vyhnout. Lze je však potlačit pod přípustnou hranici.

Stříhové namáhání kloubu ve směru osy z je obzvlášť nebezpečné pro klouby s dlouhým tenkým krčkem. Jedná se, podobně jako v případě ohybu okolo osy z , o rovinnou úlohu, takže ji lze zjednodušit na otázku jediného parametru R/t . V případě kroucení kloubu okolo osy y se již ale jedná o úlohu prostorovou, takže se s šířkou kloubu b tak snadno nevypořádáme. I v tomto případě však platí, že klouby, které mají stejný poměr R/t a zároveň stejný poměr b/t jsou si geometricky podobné. Nabízí se tedy možnost zavést sít referenčních kloubů, propočítat jejich vlastnosti metodou MKP a ze získaných výsledků odhadnout vlastnosti kloubů libovolných. Takový odhad může mít například tvar přibližných vztahů (5.) – (7.). Uvedené vztahy dosahují nejvyšší přesnosti pro kloub s poměrem $R/t = 10$ a současně $b/t = 10$, jehož vlastnosti pro tloušťku krčku $t = 10$ mm jsou shrnuty v *tab.1*.

$$k_{\varphi y} = 0,034 \cdot \frac{E \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^{2,4} \cdot t^3}{\frac{R}{t}}, \quad (5.)$$

$$k_{\varphi x} = 0,030 \cdot \frac{E \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^3 \cdot t^3}{\sqrt{\frac{R}{t}}}, \quad (6.)$$

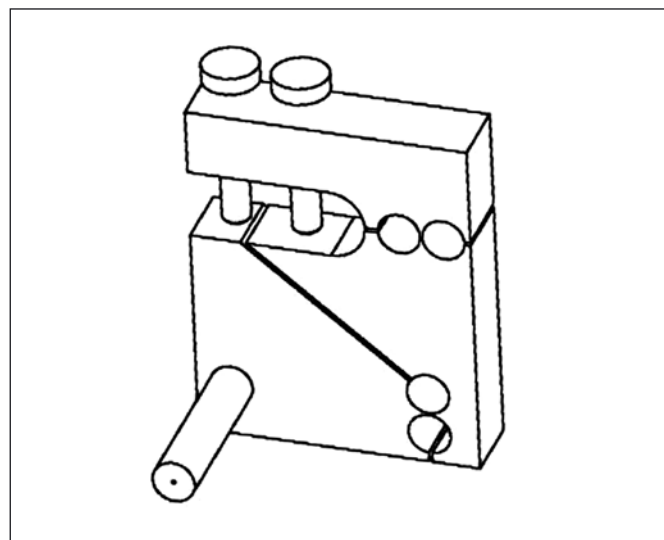
$$k_{uz} = 0,11 \cdot \frac{E \cdot b}{\left(\frac{R}{t}\right)^{1,3}}. \quad (7.)$$

Tabulka 1

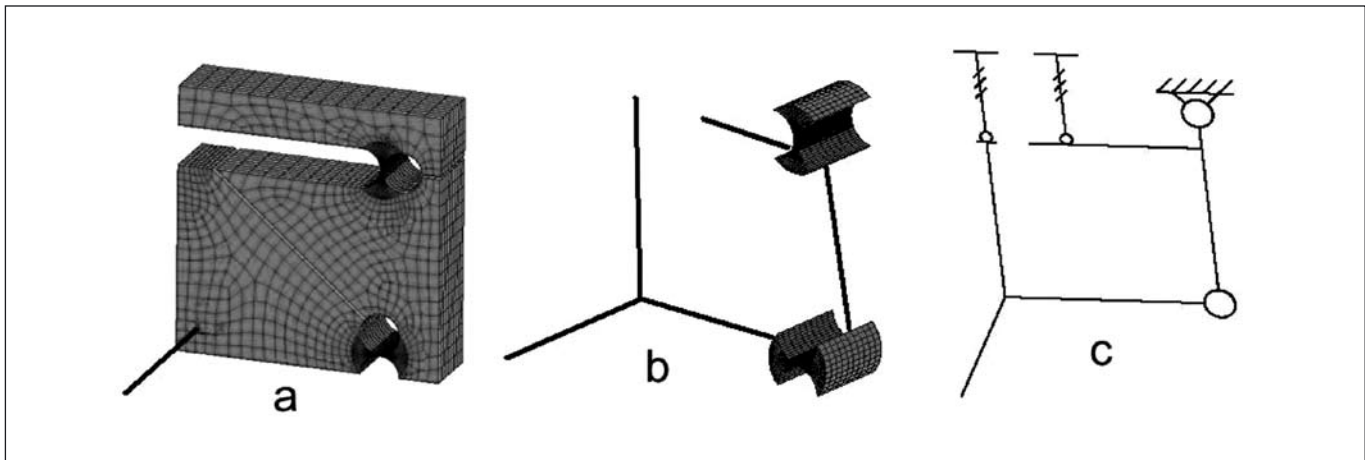
| | |
|----------------------------|---------------------|
| $k_{\varphi x}$ [N.m/rad] | $2,0 \cdot 10^3$ |
| $k_{\varphi y}$ [N.m/rad] | $1,8 \cdot 10^2$ |
| $k_{\varphi z}$ [N.m/mrad] | $4,6 \cdot 10^1$ |
| $a_{\varphi z}$ [mrad/MPa] | $3,5 \cdot 10^{-2}$ |
| $k_{\varphi z}$ [N/mm] | $1,2 \cdot 10^4$ |

Grafy a empirické vztahy nám umožní rychle nalézt vlastnosti známého pružného kloubu. Konstruktor však stojí před opačným problémem. Zná vlastnosti kloubu, ale neví, jak bude konkrétně vypadat. Jak by měla probíhat nejsnazší cesta k cíli? Prvním krokem je ujasnit si v zadání, jaký rozsah natáčení musí kloub umožnit. Dále musíme zvolit materiál s ohledem na konstrukční požadavky a výrobní možnosti. Z těchto údajů již můžeme vypočítat poměrný úhel natočení $a_{\varphi z}$ a z grafu na obr. 8 určit štíhlost kloubu R/t . Tím jsme získali první ze tří potřebných parametrů. Druhou částí zadání je otázka, jakou maximální sílu si můžeme pro vyvození natočení dovolit. Přesné aktuátory totiž většinou nedovolují více, než několik desítek N. Tato úvaha nás vede k návrhu maximální tuhosti kloubu. Pro její dosažení, tj. ke splnění vztahu (1.) nebo (3.), máme k dispozici ještě dva zbývající parametry. Je tedy otázkou, zda navrhnout kloub spíše široký s úzkým krčkem, nebo naopak kloub užší s širším krčkem. Klíč k rozluštění tohoto dilematu nám nabízejí vztahy (5.) – (7.). Z nich zcela jasně vyplývá, že při daném poměru R/t se jednoznačně vyplatí navrhnout i za cenu tenkého krčku kloub co nejširší, neboť tak výrazně zvýšíme tuhost ve škodlivých stupních volnosti. Nesmíme však nikdy zapomenout na omezení daná technologickými možnostmi výroby.

Znalost tuhostí kloubu ve všech stupních volnosti lze použít i jinak. Představme si jednoduchý mechanismus tvořený dvěma pružnými klouby (*obr. 9*), který může sloužit například jako XY stolek k polohování clony. Zajímá nás, jak se bude chovat trubice, na jejímž konci je clonka umístěna, v případě mechanického zatížení například nárazem. Jedním možným řešením je modelovat celý mechanismus jako celek v MKP (*obr. 10a*). Protože vše podstatné se odehrává v okolí krčků kloubů, lze z modelu vyjmout pouze zajímavé podoblasti propojené dokonale tuhými spojkami (*obr. 10b*). Tím ušetříme počítači spoustu práce. Nešlo by to celé jen s papírem a tužkou? Odpověď zní ano a řešení je naznačeno na *obr. 10c*. Celý mechanismus lze rozložit na tuhé nosníky propojené klouby, jejichž tuhosti v různých směrech můžeme přibližně určit ze vztahů uvedených v tomto textu.



Obr. 9



Obr. 10

Pružné klouby jsou nesmírně užitečným konstrukčním prvkem. Jejich použití sahá od jednoduchého svěrného spojení v běžném strojírenství až po nejpřesnější přibližná vedení v přesné mechanice. Při

správném použití jsou velice spolehlivé, nepotřebují žádnou údržbu, vystačí s minimem montážních prací a jak se snažil ukázat tento článek, je jejich zjednodušený návrh a výpočet v silách každého z nás.

Ing. Jiří Maršík, ČVUT, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, tel.: 731 502 540, email: jiri.marsik@centrum.cz

Základné fakty o veľtrhu v Nitre

V dňoch 22. – 25. 5. 2007 sa konal na nitrianskom výstavisku už po štrnásťkrát Medzinárodný strojársky veľtrh. Ide o podujatie, ktorého vysokú odbornú úroveň a kvalitu potvrdzuje dlhodobý aktívny záujem domácej a zahraničnej výroby, obchodnej i odbornej sféry v oblasti strojárstva a technologicky úzko previazaných odvetví, zvarovania, zlievania, metalurgie, plastov pre strojárstvo, elektrotechniky, merania a automatizácie. Veľtrh mal výrazne internacionálny charakter, čo splnilo požiadavky pre účinnú prezentáciu výrobkov, vzájomne porovnávanie sa výrobcov s konkurenciou, získavanie kontaktov so zákazníkmi a následné upevňovanie vzťahov medzi výrobou a užívateľom. Dôležitým momentom veľtrhu bolo poukázanie na smerovanie inovačných prvkov v danom odvetví.

Na 14. ročníku veľtrhu bolo 880 vystavovateľov a spoluvystavovateľov, ktorí zastupovali ďalších cca 250 firiem z 25 štátov. Najväčšie priame zastúpenie zo zahraničných vystavovateľov mala tradične Česká republika (cca 200 vystavovateľov), ďalej Spolková republika Nemecko a Rakúsko. Okrem toho sa na veľtrhu priamo alebo v zastúpení zúčastnili firmy z Japonska, Maďarska, Švajčiarska, Veľkej Británie, Francúzska, Dánska, USA, Švédska, Fínska, Izraela, Holandska, Talianska, Číny a iných krajín. Celková výstavná plocha na tohtoročnom veľtrhu predstavovala takmer 29 700 m². Z toho krytú plochu tvorilo cca 21 500 m² a vonkajšiu 8 200 m². V porovnaní s minuloročným veľtrhom bol mierny nárast najmä v krytých plochách.

Veľtrh bol tradične rozčlenený do 23 základných produktových (komoditných) skupín. Z nich 4 boli samostatnými odbornými subvýstavami: EUROWELDING (13. ročník medzinárodnej výstavy zvarovania a technológií pre zvarovanie); CAST-EX (13. ročník medzinárodnej výstavy zlievania, hutníctva a metalurgie); CHEMPLAST (11. ročník medzinárodnej výstavy plastov pre strojárstvo); EMA (7. ročník medzinárodnej výstavy elektrotechniky, merania a automatizácie). V tomto roku sa na výstave EUROWELDING zúčastnilo viac ako 57 vystavovateľov a spoluvystavovateľov, ktorí zastupovali ďalších 30 firiem; na výstave CAST-EX viac ako 80 vystavovateľov a spoluvystavovateľov zastupujúcich ďalších 45 firiem; na výstave CHEMPLAST 60 vystavovateľov a zastúpenia ďalších 34 firiem a na výstave EMA takmer 150 vystavovateľov a spoluvystavovateľov, zastupujúcich cca 70 subjektov.

Je potrebné spomenúť, že organizátori sa každoročne usilujú o zlepšovanie kvality infraštruktúry, služieb a vytvárajú vhodné predpoklady pre splnenie rôznorodých cieľov vystavovateľov a návštevníkov. Termín nasledujúceho 15. ročníka veľtrhu je 20. – 23. mája 2008. Viac informácií môžete získať na internetovej adrese www.agrokomplex.sk (viď. SPRAVODAJKA č. 1 až č. 4).

Prof. Ing. Pavol Horňák, DrSc.

Laser – začiatok novej epochy

Fyzikálny výskum, ktorý umožnil v roku 1960 konštrukciu prvého lasera a generáciu prvého laserového zväzku, vložil ľuďom do rúk svetlo dovtedy nevidaných vlastností, koherentné svetlo, ktoré otvorilo vo výskume, ale aj každodennom živote úplne nové možnosti využitia, predtým vôbec nemysliteľné. Cieľom príspevku je vysvetliť jednoduchou formou, v čom spočíva unikátnosť laserového svetla a ako sa dosahuje. Okrem toho je tu uvedený prehľad niektorých možností praktického využitia laserov v súčasnosti. Rozmanitosť využitia je taká široká, že mnohí hovoria o 21. storočí ako storočí fotónu, podobne, ako 20. storočie sa niekedy nazýva storočím elektrónu.

Kľúčové slová: laser, emisia svetla, absorbcia svetla, koherencia, optické technológie

1. ÚVOD

Začnime citátom charakterizujúcim prelom dvoch tisícročí, ktorý sme prežili: „Žijeme vo svete, ktorý sa kúpe vo svetle. Vidíme vďaka svetlu, rastliny berú životodarnú energiu zo svetla, svetlo je neodmysliteľným základom technológií od počítačov ku chirurgickému skalpelu. Je to optika, ktorá sa sústreďuje na štúdium podstaty svetla a všetko, čo súvisí s jeho využitím v prospech človeka.

Svetlo ovplyvňuje dnes náš život ako nikdy predtým, úplne iným spôsobom, ktorý sme si ešte nedávno nevedeli ani predstaviť, a jeho úloha bude ešte dôležitejšia.“ [1].

Na prelome 19. a 20. storočia, keď sa zdalo, že elektromagnetická teória J. C. Maxwella obsiahla aj optiku, podarilo sa M. Planckovi dosiahnuť zhodu teórie a experimentu v oblasti spektrálneho zloženia žiarenia čierneho telesa len tak, že si v jazyku matematiky vyjadril svetlo vo forme kvánt energie. Tejto svojej predstave neprisudzoval žiadny fyzikálny význam. Albertovi Einsteinovi sa predstava kvánt zapáčila a použil ju na vysvetlenie fotoelektrického javu, za čo dostal Nobelovu cenu.¹ V roku 1917 využil túto predstavu aj na vysvetlenie vyžarovania svetla náhodne (spontánne) a vynútené (stimulované). Albert Einstein položil tak svojou prácou teoretické základy zrodu tzv. optických technológií – toho, s čím sa stretávame už dnes a v blízkej budúcnosti sa budeme stretávať doslova na každom kroku.

O 42 rokov neskôr použil prvýkrát Gordon Gould² pojem „LASER“, ako akronym pre navrhnutý model nového spôsobu generácie svetla - „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. Prišiel rok 1960 a T. Maiman uvoľnil z rubínu, opticky čerpaného výbojkou, prvý laserový zväzok. Práve tento okamih sa stal „čarovným prúťkom“, ktorý zo dňa na deň začal rozvoj úplne nového obdobia – epochy optických technológií.

Hoci od prvého vygenerovaného laserového zväzku neuplynulo ani 50 rokov, laser sa stal samozrejmosťou. Už v roku 1999 tvoril na svete podiel laserov zakúpených pre účely výskumu a metrológie len okolo 8 %, zatiaľ čo telekomunikácie zabrali ~34 %, opracovanie materiálov ~31 %, medicína ~13 % a informačné technológie spolu s konzumnou elektronikou ~14 %.

2. JEDINEČNOSŤ SVETLA Z LASERA

Prečo? Čo je také vzácne a unikátne na svetle z lasera v porovnaní so zdrojmi svetla, známymi a využívanými dlhé roky predtým?

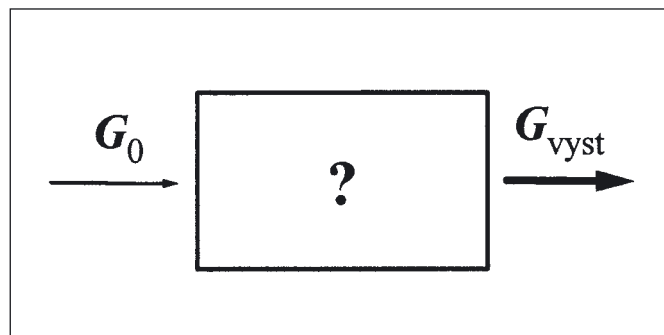
Aby sme našli odpoveď na túto otázku, stačí porozumieť princípu činnosti takého svetelného zdroja. Ten je ukrytý v už vyššie spomínanom akronyme Gordona Goulda – „Zosilnenie svetla pomocou stimulovanej emisie žiarenia“. Potrebujeme len skutočne rozumieť každému slovíčku vo vyjadrení, z ktorého slovo LASER pochádza.

Light

Svetlo. Z histórie vieme o mnohých modeloch svetla. Musíme si uvedomiť, že svetlo je vždy svetlo. Tieto modely len pomáhajú človeku vysvetliť si a modelovať svetelné javy okolo seba a najmä, vyjadriť ich v jazyku matematiky. Pri zobrazovaní vystačíme s predstavou lúča, inokedy sa hodí vlnová predstava, atď. Aj my si tu potrebujeme vybrať jeden z modelov, ktoré poznáme. Výhodnou je predstava svetla ako fotónov – kvánt energie $h\nu$ (h – Planckova konštanta, ν – frekvencia elektromagnetickej vlny vo vlnovom modeli svetla). Tento model svetelných kvánt pomôže vyložiť problematiku jednoduchým a zrozumiteľným spôsobom.

Amplification

Zosilnenie. Je to vo všeobecnosti dej, pri ktorom z určitej vstupnej veličiny G_0 dostaneme tú istú veličinu výstupnú G_{vyst} , ale s väčšou hodnotou, t.j. $G_{\text{vyst}}/G_0 > 1$ (obr. 1). V našom prípade sa bude zosilňovať svetlo. Jednoducho povedané – vložím málo svetla a dostanem veľa svetla. Otázkou je kto, resp. čo bude svetlo zosilňovať?



Obr. 1 Zosilnenie

¹ Známý pojem fotón navrhol používať až v roku 1926 fyzikálny chemik G. N. Lewis [4].

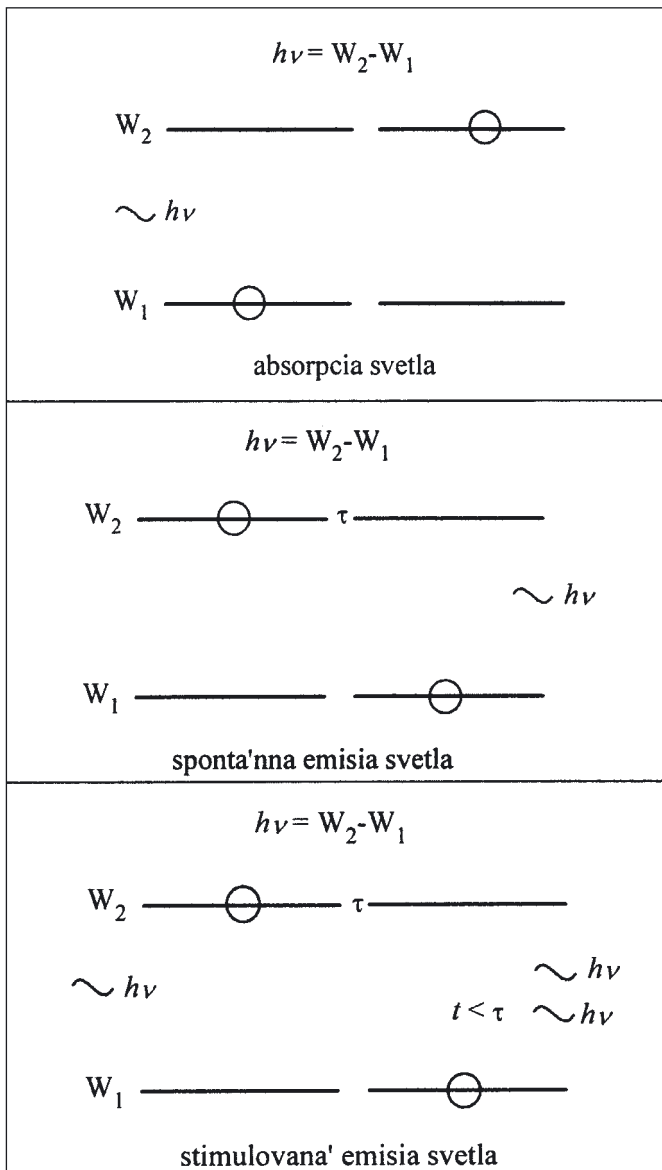
² Bol doktorandom CH. Townesa, keď ho napadla myšlienka akronymu LASER (1957). Dokonca opustil doktorandské štúdium, aby sa naplno mohol venovať výrobe prototypu lasera a potom zaregistrovať prvý patent na laser. Nevedel, že sa to dá aj bez dokončeného prototypu a tak patent na prvý laser dostali iní. Muselo ubehnúť takmer 30 rokov právnych sporov, aby sa dožil v roku 1987 potvrdenia vlastníctva prvého patentu na laser [5, 6].

V súvislosti so slovíčkom *laser* obvykle počujeme aj prívlastok, ako napr. hélium-neónový, farbivový, rubínový, excimérový, polovodičový, laser. Tento prívlastok charakterizuje látku, ktorá je *aktívnym prostredím lasera*. Môže to byť látka ľubovoľného skupenstva, ale musí mať určité vlastnosti – také, aby sa v nej svetlo mohlo zosilňovať. Ako vidieť, zišiel by sa nám aj model aktívneho prostredia a najmä predstava o tom, ako môže svetlo s týmto aktívnym prostredím „komunikovať“. Oboznámime sa s ďalším novým pojmom, *emisiou svetla*, dokonca *stimulovanou emisiou svetla*.

Stimulated Emission

Stimulovaná emisia. Obr. 2 ilustruje, čo sa deje pri „komunikovaní“ (interakcii) svetla s hmotou. Zvolíme si model aktívneho prostredia lasera. Zo všetkých stavebných častíc hmoty si vyberieme len elektróny, ktoré majú malú hmotnosť a využívajú sa aj pri modelovaní prechodu svetla ako elektromagnetickej vlny s vysokou frekvenciou prostredím. Modelom pracovného prostredia bude pre nás *súbor elektrónov*, ktoré sa môžu nachádzať len v určitých energetických stavoch. Znamená to, že pre ne existujú len určité dovolené hodnoty energie W_1 .

Ak vstúpi do prostredia s dovolenými energetickými hladinami W_1 a W_2 fotón s energiou rovnou práve rozdielu týchto energetických hladín, $h\nu = W_2 - W_1$, jeho energia sa spotrebuje na zvýšenie



Obr. 2 Absorpcia a emisia svetla

energie elektrónu, ktorý je v základnej energetickej hladine W_1 . Elektrón prejde do ďalšieho dovoleného energetického stavu s vyššou energiou $W_1 + h\nu = W_2$, *vzбудeného stavu*, kde zotrvá počas určitej *doby života* τ . Vstupujúci fotón prostredím neprešiel, „stratil sa“, hovoríme, že nastala *absorpcia svetla*.

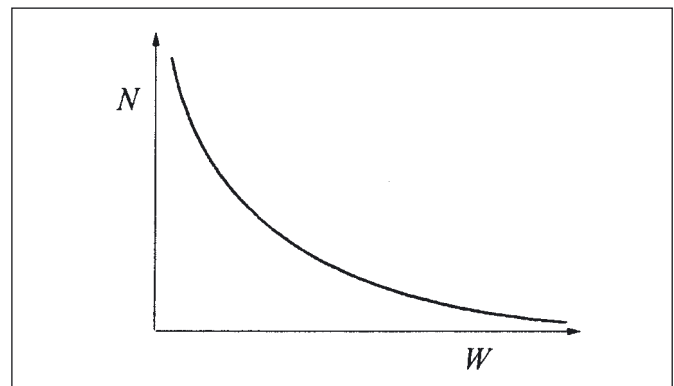
Po uplynutí doby života τ sa elektrón vracia do základného stavu s energiou W_1 , uvoľní sa energia $W_2 - W_1 = h\nu$, fotón vystúpi z prostredia, nastala *emisia svetla*. Pretože emisia svetla nastala až po uplynutí doby života elektrónu vo *vzбудenom stave*, nazývame ju *spontánnou emisiou*.

Emisia svetla môže nastať aj skôr, než uplynie doba života fotónu vo vzбудenom stave. Emisiu môže *vyvútiť* ďalší fotón, ktorý príde s vhodnou energiou (v našom prípade $h\nu = W_2 - W_1$) do prostredia s elektrónom vo vzбудenom stave (W_2) a dovolenými energiami W_1 a W_2 . Tejto emisii hovoríme *vyvútená (stimulovaná) emisia svetla*.

Teraz sa môžeme vrátiť späť k možnosti zosilnenia svetla v pracovnej látke.

Pri vstupe fotónu s energiou $h\nu = W_2 - W_1$ do prostredia, v ktorom sa nachádzajú elektróny v základnom aj vzбудenom stave, môže nastať ako absorpcia, tak aj vyvútená emisia svetla. Pravdepodobnosť toho, či vznikne jeden, alebo druhý jav, je rovnaká. Znamená to, že zosilnenie svetla nastane len vtedy, ak bude v prostredí väčší počet elektrónov vo vzбудenom stave, ako v základnom stave, t. j. obsadenosť N_2 vzbudenej energetickej hladiny bude väčšia, ako obsadenosť N_1 základnej energetickej hladiny, $N_2 > N_1$.

Podľa Boltzmanovho zákona je za normálnych okolností (v stave termodynamickej rovnováhy), menej takých elektrónov, ktoré majú vyššiu energiu, t. j. hovoríme, že obsadenosť energetických hladín s rastom ich energie klesá (obr. 3). Stav, pri ktorom bude $N_2 > N_1$ musíme vyvolať umelo a hovoríme mu stav *inverzie obsadenia hladín*.

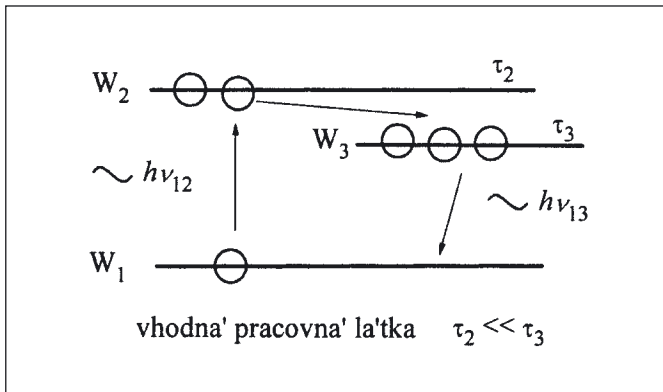


Obr. 3 Obsadenosť energetických hladín

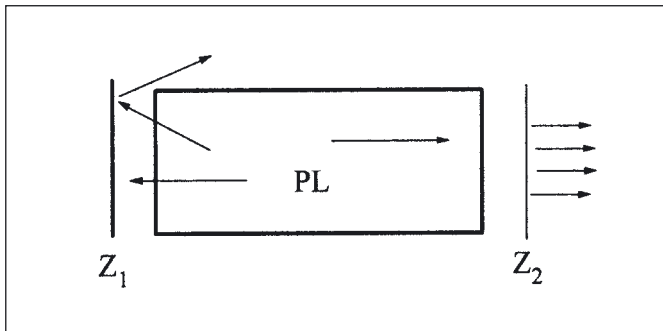
Na jeho dosiahnutie potrebujeme pracovnú látku, ktorá má k dispozícii aspoň tri vhodné energetické hladiny, čo ilustruje (obr. 4). Vhodnosť energetických hladín je daná tým, že elektrón sa na hladine W_2 zdrží veľmi krátko a pri uvoľňovaní energie pôjde prednostne na hladinu W_3 .

Rečou fyziky by sme to vyjadrili tak, že pravdepodobnosť prechodu z hladiny W_2 na hladinu W_3 je väčšia, než pravdepodobnosť prechodu z hladiny W_2 na hladinu W_1 a pre doby života vo vzбудených stavoch platí $\tau_2 \ll \tau_3$. Na dobu $\sim \tau_3$ by sa tak vytvoril po načerpaní aktívneho prostredia fotónmi o energii $h\nu_{12}$ stav, v ktorom bude $N_3 > N_1$, čo by umožnilo zosilnenie svetla fotónov o energii $h\nu_{13}$.

Dodanie fotónov o presne určenej energii $h\nu_{13}$ zvonku by bolo dosť zložitú. Stačí však využiť aktívne prostredie, kde sú elektróny vo vzбудenom stave W_3 a po návrate do základného stavu W_1 sú schopné uvoľniť fotón s presne požadovanými vlastnosťami. Prvý taký fotón, vyžiarený spontánne, môže vyvolať stimulovanú emisiu svetla, t. j. ďalší fotón s rovnakými vlastnosťami, ten ďalší, atď. Aby taký dej mohol nastať, vložíme aktívne prostredie do *rezonátora* – obr. 5.



Obr. 4 Trojhľadínový systém



Obr. 5 Aktívne prostredie PL v rezonátore

Rezonátor môžu tvoriť dve rovinné, navzájom rovnobežné zrkadlá (Z_1, Z_2). Jedno je obyčajne nepriepustné a druhé, na strane výstupu z lasera, čiastočne priepustné. Tieto zrkadlá zabezpečia mnohonásobný prechod fotónov cez aktívne prostredie. Takmer celá načerpaná energia sa tak vyžiarí vo forme fotónov o energii $h\nu_{13}$. Získali sme LASER.

Zhrňme na záver základné podmienky pre získanie lasera:

- potrebujeme vhodné aktívne prostredie vložené do rezonátora
- dodaním vhodnej energie (čerpáním) odčerpáme základnú hladinu a naplníme vzbudenú, čím dosiahneme inverziu obsadenia energetických hladín
- keď stimulovaná emisia prevládne nad stratami rezonátora, o ktorých sme síce nehovorili, ale ku ktorým nevyhnutne dochádza, nastane generácia svetla.

Jedinečnosť takto získaného svetla spočíva v tom, že vzniká procesom stimulovanej emisie, v dôsledku čoho je koherentné. Povedané ináč – každý takto získaný fotón má úplne rovnaké vlastnosti, také, ako mal fotón, ktorý stimulovanú emisiu začal.

V prvom rade to znamená, že v porovnaní s klasickými zdrojmi môžeme považovať svetlo laserov približne za svetlo s jednou vlnovou dĺžkou. Táto vlastnosť je dôležitá napr. pri fokusovaní svetla na malú plošku (ohnisková vzdialenosť šošovky sa mení s farbou svetla), pri využívaní „vlnových“ vlastností svetla, s ktorými sa stretáme pri interferencii a ohybe svetla.

Okrem koherentnosti je v niektorých prípadoch zaujímavá aj možnosť dosiahnuť veľmi intenzívne svetlo. Pojomom „veľmi intenzívne“ rozumieme skutočnosť, že elektrické pole svetelnej vlny dosahuje hodnoty porovnateľné s elektrickým poľom vnútri atómov. Laserovým lúčom teda môžeme ovplyvňovať vlastnosti hmoty na napr. rezať, vrtať, zvärať, kalíť,). Táto možnosť viedla aj k vytvoreniu úplne novej vednej oblasti modernej optiky, známej ako nelineárna optika, ktorá posunula poznanie človeka o hodný kus vpred.

Podľa aktívneho prostredia sa lasery delia na tuhohlátkové, plynové, kvapalinové a polovodičové.

Dnes sa už využíva obrovské množstvo aktívnych prostredí [3]. Aktívnym prostredím môžu byť napr. aj urýchlené elektróny s energiou desiatok až tisícov miliónov eV. Elektróny v tomto laseri na voľných elektrónoch sa pohybujú v periodickom magnetickom poli. Zaujímavosťou je, že taký „laser“ umožňuje generovať koherentné žiarenie o vlnovej dĺžke od submilimetrovej oblasti až takmer po γ -žiarenie, čo je vlnová dĺžka menšia, ako desiatiny nanometra (preto „laser“).

V súčasnosti sú stredobodom záujmu najmä polovodičové lasery, ktoré môžu svojimi vlastnosťami a perspektívami z hľadiska miniaturizácie optických zariadení ponúkať široké možnosti uplatnenia.

Spomeňme ešte aspoň niekoľko typických vlastností žiarenia, generovaného laserom. Plynové lasery generujú obyčajne svetlo s užšou spektrálnou šírkou (monochromatickejšie), ako tuhohlátkové lasery. Vlastnosťou kvapalinových laserov je naopak možnosť generovať svetlo z väčšieho intervalu vlnových dĺžok a vhodným zásahom do rezonátora môžeme vybrať, o ktorú vlnovú dĺžku máme záujem. Hovoríme, že laser je preladiteľný.

Niektoré lasery vyžarujú nepretržite, pracujú v spojitom režime. Opačným prípadom je impulzný režim generácie, dosahovaný pri impulznom čerpaní (napr. výbojka). Opäť, veľmi približne povedané – vhodným zásahom do rezonátora lasera môžeme laserové impulzy skracovať. Dnes už človek siahá na attosekundy ($\sim 10^{-18}$ s), čo znamená dĺžky impulzov oveľa menšie, ako milióntina z milióntiny sekundy.

3. KDE VŠADE NÁJDEME LASER

Praktické využitie laserov nachádza miesto v mnohých oblastiach, zdá sa, že skutočne takmer pri každom kroku človeka. Autori prehľadových správ ich obyčajne zadeľujú do týchto základných okruhov [1], [2]:

- informačné technológie a telekomunikácie
- starostlivosť o zdravie, okolie
- národná obrana
- detekcia, osvetlenie, zobrazovanie
- lasery a optika v priemysle

Pozrime sa krátko aspoň na niektoré z nich [7].

Informačné technológie a telekomunikácie

V oblasti prenosu informácií a dát sme za posledné desaťročie zažili obrovské zmeny práve vďaka laserom a optike. Obrovskou rýchlosťou napreduje zavádzanie rôznych optických prvkov včítane optických káblov do komunikácií. Je to jedna z oblastí, v ktorej sa s výhodou využívajú unikátne vlastnosti, ktoré môže poskytnúť len laserový svetelný zdroj (prenos informácií svetlom, rýchle spracovanie).

Polovodičový laser – ako základný pilier optického vysielača, je kľúčovou súčasťou optického prenosového systému na báze optického vlákna. Umožňuje vytvoriť optické siete pre moderné telekomunikačné siete, ktoré poskytujú človeku služby informačného veku ako sú multimédia a Internet. Pri prenose na veľké vzdialenosti nemajú v súčasnosti optické technológie konkurenciu.

Ich obrovskou výhodou je veľká prenosová kapacita, imunita voči elektromagnetickým poruchám a odposluchu. Širokopásmové mnohovlnové optické telekomunikačné systémy sú dnes digitálne a umožňujú paralelný prenos obrovského množstva hovorov a dát (až niekoľko terabitov za sekundu v jedinom optickom vlákne).

Optické vlákno dokáže svojou kapacitou zahltiť dátami aj ten najrýchlejší elektronický prepínač. Preto je otázka super rýchleho spracovania dát prostredníctvom optiky kľúčovou úlohou do budúcnosti. Tu podáva pomocnú ruku nelineárna optika, v ktorej možno meniť vlastnosti materiálov intenzívnym svetlom veľmi rýchlo a vyrábať tak prepínače, deliče, ...

Ďalší smer, ktorému k praktickému využitiu nesmierne pomohol laser, je holografia. Tá so sebou priniesla okrem iného technológiu získania optickej asociatívnej pamäte a zosúhlasených filtrov.

Spojenie s javom *optickej bistability* (odlišné vlastnosti materiálu pri určitej intenzite svetla podľa toho, či sa hodnota dosiahla pri raste, alebo poklese intenzity svetla) vedie ku vzniku optických bistabilných zariadení (optické tranzistory), čo vyvolalo aj výskum v oblasti digitálnej optickej výpočtovej techniky. Budúcnosť využitia optických počítačov sa zatiaľ predpokladá len v špeciálnych prípadoch, kde je dôležité najmä paralelné spracovanie informácií, v oblastiach, ktoré sú pre plne elektronické spracovanie veľmi náročné, alebo nedostupné. Patrí tu napríklad otázka identifikovania odtlačkov prstov, alebo rozpoznanie tváre teroristu v dave ľudí.

Prax kladie v súčasnosti požiadavku na vývoj rýchlych veľkocapacitných pamätí, čo sa dnes stalo dôležitou oblasťou. Vývoj komerčných optických pamätí je síce len v začiatkoch, ale veľmi rýchlo prenikol do reálneho sveta uvedením lacných optických CD médií, ktoré sú schopné zaznamenať kvalitne hudbu v digitálnom tvare, či v úlohe CD-ROM na ukladanie dát. CD technológia takto ponúka prepisovateľný záznam s kvalitou, ktorá sa nemení v čase. Ako pri zázname, tak aj pri čítaní je laser. Ďalšou výhodou je, že laserový čítajúci lúč samotný záznam nepoškodzuje tak ako to môže urobiť ihla gramofónu. Kapacita záznamu na CD postupne rastie, súčasne však na trh preniká nové médium - DVD, s kapacitou až 17 GB.

Je otázkou, do akej miery môže rásť hustota takéhoto záznamu. Určuje to fyzikálny jav, ktorý sa využíva (vypaľovanie stopy sfokusovaného laserového zväzku). Rast hustoty záznamu sa dosiahne zmenšením vypaľovaných stôp, alebo trojrozmerným záznamom do objemu média.

Minimálny rozmer zaznamenananej stopy je však predurčený ohybom svetla, prostredníctvom vlnovej dĺžky použitého laserového svetla pri zázname. Preto sa vývoj posúva v smere získania lacnej miniatúrnej laserovej diódy vyžarujúcej stále na menšej vlnovej dĺžke, v súčasnosti – v modrej oblasti spektra.

Zvlášť zaujímavým je pre vývoj pamätí holografický záznam. Informácia sa tu nezapisuje v tvare diskretných bitov ako u CD disku. Informáciou je *interferenčná štruktúra* v celom objeme záznamového materiálu. Dá sa tak dosiahnuť vysoká hustota záznamu, ktorá dosahuje až $\sim \lambda^{-3} \sim 10^{12}$ bit/cm³ a rýchlosť 1 GB/s. Cieľom je dosiahnuť teoretickú limitu, čo je hustota zápisu > 1 TB a rýchlosť záznamu a obnovenia > 1 Gb/s. Praktické využitie holografie umožnil práve laser. Záznam hologramu vyžaduje interferenciu svetla a na to potrebujeme svetlo koherentné.

Laser a starostlivosť o zdravie, okolie

V medicíne umožňuje laser nové terapie, nové zákroky, nedeštruktívne metódy vyšetrenia a monitorovanie zdravotného stavu, či bezbolestné vŕtanie zubov. Vplyv aplikácií je v tejto oblasti taký výrazný, že vyžaduje spätnú reakciu a prispôbenie sa medicíny novým metódam liečenia. Súčasne vznikajú nové prístupy k riešeniu problémov biologického výskumu, nové diagnostické metódy a liečebné postupy.

Úspech laserovej technológie v medicíne spôsobil najmä vznik zariadenia, ktoré je schopné priviesť svetlo kdekoľvek do tela človeka či už za účelom zviditeľnenia stavu, alebo liečivého pôsobenia laserom pomocou svetlovodu, resp. obrazovodu.

Príkladom je endoskop z r. 1959 na báze optického vlákna. Endoskopy s optickými vláknami umožňujú diagnostikovať stav vnútorných orgánov ich zobrazením.

Dopplerov jav (zmena frekvencie svetla pohybujúceho sa zdroja) sa využíva pri zisťovaní prietoku krvi. Spektroskopické a zobrazovacie metódy sú pomocníkmi pri odhaľovaní nádorov. Koherentná optická tomografia s využitím interferometrie poskytuje dvojrozmerný obraz jemnej štruktúry tkaniva s hĺbkovým rozlíšením pár mikrometrov. Rozlíšenie konvenčnej ultrazvukovej metódy je na úrovni 100 μ m.

Objav laserov otvoril novú oblasť výskumu, týkajúcu sa interakcie laserového žiarenia s biologickými tkanivami. Takmer okamžite sa našlo ich využitie v oftalmológii, kde možná úprava niektorých očných väd laserom oslobodzuje pacienta od nosenia okuliarov.

Ukázalo sa, že kontinuálne žiarenie lasera na báze CO₂ a Nd:YAG, absorbované vodou, je schopné rezať tkanivo a súčasne nastáva koagulácia hrán rezu. Výsledkom je laserový skalpel.

Lasery nachádzajú využitie v dermatológii. Absorpcia v biologickom materiáli môže viesť k fotomechanickému javu a prispieť k drveniu kameňov, ktoré sa odstraňovali operatívne. Laserom možno lokálne a selektívne aktivovať lieky zavedené do nádoru a tak ho zničiť, alebo napr. odstrániť teraz už nežiadúce tetovanie nadobudnuté v mladosti.

Popri terapeutických aplikáciách majú veľký význam aj diagnostické aplikácie laserov, kde si pacient sám rutinne a jednoducho môže merať hladinu cukru, či cholesterolu v krvi.

Optické prístrojové vybavenie a metódy prispeli výraznou mierou k pokroku v základnom biologickom výskume. Moderné optické metódy využívajúce lasery presahujú možnosti tradičných prístupov, umožňujú nový pohľad na problematiku a prispievajú k objavovaniu neznámych biologických pochodov v telách buniek a vývoju nových liekov. Treba pripomenúť, že tento pokrok je tiež úzko spätý s pokrokom v rozvoji optických technológií.

Jednou z významných meracích techník je prietoková cytometria. Umožňuje rýchlu (na úrovni desiatok miliónin sekundy) analýzu jednotlivých častíc rozmerov od mm po jednotlivé molekuly. Metóda sa používa predovšetkým na identifikovanie bielych krviniek, čo má význam o. i. aj pri monitorovaní postupu AIDS a na určovanie obsahu DNA napr. pri stanovení prognózy u chorého na rakovinu.

Svetelný tlak vyvolaný sfokusovaným intenzívnym laserovým zväzkom môže slúžiť ako optická pinzeta pri manipulovaní častíc s rozmermi od pár nanometrov po desiatky mikrometrov s použitím v dnes tak ostro sledovanej oblasti – biotechnológii. Tá zahŕňa meranie, manipuláciu a výrobu veľkých, pre biológiu potrebných molekúl, ako sú proteíny DNA.

Každá z uvedených aplikácií vyžaduje koherentné, niekedy aj veľmi intenzívne svetlo, ktorého zdrojom je laser.

Národná obrana

Tu je rozsah vplyvu optických technológií veľmi široký, od lacných jednoduchých pomôcok na monitorovanie biohazardov, po nákladné, veľmi zložité a náročné satelitné pozorovacie systémy. Lasery nachádzajú využitie všade, od lokalizácie cieľov, ich zamerania až po ich zničenie samotným laserom, alebo laserom navádzanou muníciou.

Detekcia, osvetlenie, zobrazovanie

Pokrok v optických zdrojoch svetla je životnou nevyhnutnosťou. Osvetľovacie systémy predstavujú jednu z najstarších a najznámejších aplikácií klasickej optiky. Na elektrické osvetlenie sa spotrebuje denne 10–15 % svetovej produkcie energie. Požiadavka energetických úspor ukladá vyvinúť čo možno najefektívnejšie zdroje svetla. Napr. LED ako svetelný zdroj sa už bežne používajú v konzumnej elektronike, ale aj priamo ako náhrada žiarovky. Nájde ich rovnako v semaforoch ako aj signalizačných svetlách automobilov.

Človek prijíma väčšinu informácií zrakom. Súčasné senzory umožňujú človeku vidieť dosiaľ nevidené. Podnetom pre ich vývin boli lasery využívané ak pri lokalizácii, tak aj v iných aplikáciách.

Digitálne kamery s vysokým rozlíšením nahrádzajú klasickú fotografiu, satelitné záznamy pre predpovede počasia, infračervená optika pre nočné videnie a bezpečnostné čidlá, v kozme inštalované zariadenia pre získavanie informácie sú dnes schopné prečítať poznávaciu značku automobilov, získať informáciu o povrchu a teplote iných planét, či monitorovať ozónovú dieru v atmosfére.

Optické metódy s využitím absorpcie a fluorescencie v UV a IR oblasti sú užitočné pri detekovaní chemikálií a nečistôt v plynch a pri meraní teploty a zloženia vzdialených objektov. Využíva sa to, že každá chemikália, každý prvok, absorbujú len pre ne charakteristické vlnové dĺžky svetla (absorpčné spektrum). Výhodou je, že táto analýza sa dá robiť bezkontaktné „na diaľku“. Známym zariadením, ktoré sa na tento účel využíva už niekoľko desaťročí,

je LIDAR, čo je skratka pre laserový radar. Laserový impulz sa vyšle na vzdialený skúmaný objekt (vrstvy aerosolu, oblaky plynu) a detekuje sa späť rozptýlené žiarenie. Z jeho spektra (aké vlnové dĺžky sa vrátia), intenzity a časového priebehu sa dá získať trojrozmerná informácia o obsahu skúmanej oblasti.

Pri štúdiu objektov kozmického priestoru sú nepostrádateľné optické teleskopy. Dnes je snáď najznámejší Hubblov teleskop. S jeho pomocou môže človek nazrieť aj do tých najvzdialenejších kútov vesmíru, čo mu umožňuje skúmať jeho dávnu minulosť. Dnešné optické teleskopy používajú, popri zložitých sústavách citlivých detektorov adaptívnu optiku na korigovanie porúch, ktoré sú spôsobené turbulenciou vzduchu v zemskej atmosfére, metódy koherentnej optiky na zvýšenie rozlišovacej schopnosti a počítačové spracovanie obrazu.

Lasery a optika v priemysle

Výrazný ekonomický vplyv sa pozoruje najmä s nástupom využitia vláknovej optiky, a dostupných polovodičových laserov spolu so zobrazovacími systémami.

Optické technológie sú nepostrádateľné vo výrobe polovodičových prvkov, v strojárstve, stavebníctve, chémii a farmácii. Nájdeme ich v automobilovom a leteckom priemysle. Umožňujú bezkontaktné opracovanie (kalenie, rezanie, zvráňanie) ťažko dostupných, resp. klasicky vôbec nedostupných miest. Navyše umožňujú priebežnú bezkontaktnú kontrolu kvality.

Laser môže indukovať fotochemické deje, čo sa uplatňuje vo fotolitografii, alebo pri vytvrdzovaní polymérov. Súčasné využitie obrazovej a výpočtovej techniky dovoľuje presné riadenie výrobných procesov.

V letectve sa využíva laserový gyroskop na presné určenie polohy a navigáciu lietadiel v režime riadenia automatickým pilotom. Dopplerovský laserový radar sa využíva na zistenie informácie o vetre a turbulencii pred pristávaním.

Lasery spolu s vlákňovou optikou našli svoje miesto vo vybavení dnešných automobilov, ale aj v stavebníctve pri kontrole statiky mostov a rozličných stavieb prostredníctvom zabudovaných vlákňových čidiel, či vytyčovania smeru pri budovaní tunelov.

Aplikácia výkonných optických laserových systémov nachádza svoje uplatnenie pri výskume v oblasti jadrovej energetiky, výskume termofúzie a laserovej separácii izotopov pri výrobe obohateného uránu.

Veľmi perspektívnou oblasťou sa javí aj možnosť využitia ultrakrátkych laserových impulzov pri spracovaní, úprave a obrábaní rozličných materiálov.

4. ZÁVER

Z uvedeného prehľadu vidieť, že lasery, ktoré zrodili optické technológie, prenikli hlboko už aj do života dnešného človeka. Človek blízkej budúcnosti sa nevyhne oveľa sofistikovanejšiemu použitiu laserov a s nimi súvisiacich prvkov a technológií, čo môže súvisieť priamo s jeho životom, či to chceme pripustiť alebo nie. Vzdelanosť v tomto smere napomôže nielen uplatneniu v budúcej high-tech spoločnosti, ale aj v rozhodovaní o samom sebe pri využívaní výdobytkov tejto spoločnosti.

Literatúra

- [1] *Harnessing Light – Optical Science and Engineering for the 21st Century*, National Research Council, NAP Washington, D. C. (1998), pp. 1-339, ISBN 0-309-05991-7
- [2] *Towards a Bright Future for Europe – Strategic Research Agenda in Photonics*, Published by European Technology Platform Photonics21, Düsseldorf (2006), pp.10-143, ISBN 3-00-018615-8
- [3] VRBOVÁ, M. a kolektív: *Lasery a moderní optika (oborová encyklopedie)*, Prometheus, Praha (1994), 192–219, ISBN 80–85849–56–9
- [4] <http://www.nobeliefs.com/photon.htm>
- [5] <http://www.elecdesign.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=13683>
- [6] http://lala.essortment.com/historylaserin_rnxv.htm
- [7] SENDERÁKOVÁ, D.: *21. storočie – storočie fotónu*, 13. konferencia slovenských fyzikov. Zborník príspevkov. Editor M. Reiffers. SFS, Košice (2004), 10–15, ISBN 80–969071–8–2

RNDr. Dagmar Senderáková, Ph.D., Katedra experimentálnej fyziky FMFI UK, Oddelenie optiky, Mlynská dolina F2, 842 48 Bratislava, Slovenská republika, tel.: +421 260 295 391, email: senderakova@fmph.uniba.sk

Fórum normalizátorov na Slovensku

Už po šestnástykrát SLOVENSKÁ SPOLOČNOSŤ PRE TECHNICKÚ NORMALIZÁCIU člen ZSVTS, SLOVENSKÝ ÚSTAV TECHNICKEJ NORMALIZÁCIE (SÚTN) a ÚRAD PRE NORMALIZÁCIU, METROLÓGIU A SKÚŠOBNÍCTVO SR (ÚNMS SR) organizovali seminár pod názvom FÓRUM NORMALIZÁTOROV NA SLOVENSKU. Snahou organizátorov bolo poskytnúť podnikateľom a firmám – od živnostníkov až po najväčšie spoločnosti, informácie o aktuálnych otázkach technickej normalizácie, ochrany spotrebiteľa, systémoch pasívnej požiarnej ochrany, nových normách z oblastí softvérového inžinierstva, certifikácie a akreditácie. V úlohe prednášateľov sa predstavili: Ing. A. Gonda, predseda ÚNMS SR; Ing. B. Tušová, generálna riaditeľka SÚTN; JUDr. M. Servanský, odbor ochrany spotrebiteľa MH SR; Ing. F. Gillian, prezident Asociácie pasívnej požiarnej ochrany SR; Ing. M. Hrnčiar, PhD., Katedra softvérovej techniky ŽU; Ing. M. Miklánek, TSÚ – CERTITECH Piešťany; Ing. A. Svatík, vedúci oddelenia elektrotechniky SÚTN a Ing. I. Hladík, riaditeľ úseku informatiky SÚTN.

Ako každý rok Ing. B. Tušová informovala prítomných o *Dosiahnutých výsledkoch SÚTN v roku 2006*. Ďalšími témami prednášok boli: *Právny rámec ochrany spotrebiteľa* (JUDr. M

Servanský); *Aby systémy pasívnej požiarnej ochrany fungovali* (Ing. F. Gillian); *Informačná bezpečnosť a STN ISO/IEC 90003:2007* (Ing. M. Hrnčiar, PhD.) a *STN EN ISO/IEC 17021:2007 a požiadavky na certifikačné organizácie* (Ing. M. Miklánek). Prítomní mali možnosť zoznámiť sa aj s *Zhodnotením dosiahnutých výsledkov z noviniek zavedených do procesov tvorby a implementácie európskych noriem na národnej úrovni* (Ing. A. Svatík) a *Produktmi a službami poskytovanými SÚTN* (Ing. I. Hladík). Seminár podporil príhovorom predseda ÚNMS SR Ing. A. Gonda, ktorý poskytol námety na výmenu skúseností medzi odborníkmi z hospodárskej a podnikateľskej sféry. Jednotlivé príspevky prezentovali prednášatelia v PowerPointe. Niektoré z týchto príspevkov nájdú záujemcovia v odbornom časopise *Normalizácia*.

Pozn.: Časopis *Normalizácia* vychádza 4x za rok; obsahuje odborné a informatívne články z tejto oblasti; informácie o súvisiacej legislatíve; technických požiadavkách na výrobky a iné. Príloha obsahuje zoznam vydaných noriem STN, ako aj zoznamy navrhovaných a schválených európskych a medzinárodných noriem, resp. ostatných dokumentov CEN, CENELEC a ISO.

Prof. Ing. Pavol Horňák, DrSc.

Holografia – skutočne 3D obraz

Objav laseru priniesol úplne nový druh svetla, ktorý dovtedy človek získaval veľmi pracne a o veľmi nízkej intenzite. Je to svetlo koherentné. Jeho prítomnosť je nevyhnutná pre pozorovanie interferencie a ohybu svetla, ktoré mali praktické využitie už aj pred príchodom laserov. Laser tak veľmi uľahčil praktické využitie týchto javov. Súčasne však umožnil praktickú realizáciu úplne nového typu optického záznamu – holografie. Cieľom príspevku je vysvetliť jednoduchým spôsobom záznam a rekonštrukciu hologramov a poukázať na ich vlastnosti.

Kľúčové slová: hologram, záznam hologramu, rekonštrukcia hologramu, interferencia, fáza

1. ÚVOD

Holografia je optickou metódou záznamu informácií. Na rozdiel od dávno známej optickej metódy, klasickej fotografie, umožňuje robiť záznam trojrozmernosti objektu. Zdá sa, že aj na fotografii vidí pozorovateľ priestorovosť objektu (obr. 1). Áno, ale je to len preto, že pozná perspektívu. Hologram mu na rozdiel od fotografie poskytne skutočne trojrozmerný obraz objektu. Pri fotografovaní zrekonštruovanej scény by ste skutočne mohli zaostrovať na jej jednotlivé objekty.

Pojem *holografia* pochádza z dvoch gréckych slov: *holos* (úplný) a *graphos* (záznam). Naznačuje to, že holografický záznam pomocou svetla je, na rozdiel od fotografie, záznamom úplným. V čom však môže byť záznam pomocou svetla teraz úplný a pri fotografii neúplný? Stále predsa používame svetlo, stále používame záznamový materiál rovnakého druhu.

Ako vidieť, opäť sa budeme zaoberať svetlom a potrebujeme si zvoliť nejaký model. V tomto prípade je výhodné obrátiť sa na vlnový model, ktorý uvažuje o svetle ako o *elektromagnetickej*

vlně – obr. 2. Vo vlnovom modeli je tak svetlo reprezentované *amplitúdou* A , ktorá sa mení v čase t a priestore x . Charakterizuje ju maximálna hodnota amplitúdy A_0 a fáza Φ . Fáza je veličina, ktorá určuje amplitúdu A v konkrétnom mieste x a okamihu t .

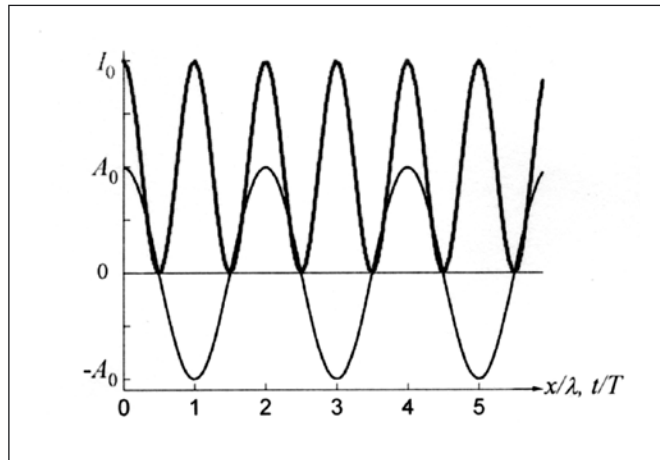
$$A = A_0 \cos(\Phi) = A_0 \cos(\omega t - kx).$$

Vo vyjadrení amplitúdy svetelnej vlny nájdeme symbol $k = 2\pi/\lambda$ nazývaný vlnovým číslom, λ je vlnová dĺžka svetla.

Frekvencia ω svetelnej vlny je príliš vysoká na to, aby na jej meniacu sa amplitúdu dokázalo zareagovať, t. j. urobiť v sebe záznam, nejaké záznamové médium, alebo detektor. Okamžitú amplitúdu A svetelnej vlny nie sme schopní zaznamenať žiadnym spôsobom.



Obr. 1 3D scéna na fotografii



Obr. 2 Svetlo ako vlna

Znamená to, že nevieme získať priamo informáciu ani o okamžitej fáze Φ svetelnej vlny a práve tam je uložené, ako ďaleko (x) od záznamového materiálu sa nachádzajú jednotlivé miesta objektu. Tam je uložená informácia o priestorových vlastnostiach objektu.

Každý detektor, každý záznamový materiál reaguje len na celkovú energiu svetla, ktorá naň dopadne počas určitej doby (*doba expozície*). Táto energia je úmerná tomu, čo v optike poznáme ako *intenzitu svetla* I

$$I \approx (A)^2 = I_0 \cos^2(\omega t - kx).$$

Ak si zvolíme vo vyjadrení intenzity I určitú hodnotu x , na záznamovom materiáli sa bude jej hodnota v každom okamihu meniť. Záznamové médium zareaguje len na celkovú energiu, ktorá

tam dopadla. Rovnako tomu bude aj pre inú hodnotu x . Hovoríme, že detekcia svetla je kvadratická. Intenzita je totiž určená druhou mocninou amplitúdy. Dôsledkom však je, že sa pri tomto zázname stratila informácia o fáze Φ svetelnej vlny.

Na tejto detekcii je založený aj fotografický záznam. Film osvetlíme obrazom objektu, ktorý vytvorí šošovka. Po vyvolaní filmu sú miesta tým černejšie, čím viac svetla na ne dopadlo. Informácia o fáze svetelnej vlny, kde je uložená informácia o priestorových vlastnostiach objektu, chýba. Práve v nej je uložené, v akej vzdialenosti (x) od filmu sa nachádzalo každé miesto objektu.

Úplnosť záznamu u holografie znamená, že je to metóda, ktorá poskytuje spôsob, ako aj napriek kvadratickej detekcii zaznamenať informácie o fáze svetelnej vlny.

Teoretické základy tejto metódy položil anglický vedec maďarského pôvodu Dennis Gabor v roku 1948, čo bolo ocenené Nobelovou cenou v roku 1971. Široké praktické využitie holografického záznamu mohlo nastať až po vynájdení a uvedení do praxe nového typu svetelného zdroja, zdroja koherentného svetla – lasera (1960).

Tieto úvodné poznámky o svetle sú dôležité pre porozumenie holografického záznamu a jeho vlastností.

2. ZÁZNAM HOLOGRAMU

V čom spočíva nápad D. Gábora, ktorý nám umožní zaznamenať aj informáciu o fáze svetelnej vlny? Nevystačíme pri ňom len s jednou vlnou. Potrebujeme aspoň dve, ktoré by interferovali. Znamená to, že musia byť koherentné. Zdrojom takého svetla je laser, preto až jeho objav umožnil praktické využitie myšlienky, ktorá sa zrodila viac ako 10 rokov pred ním.

Základom myšlienky je *interferencia svetla*, t. j. skladanie *koherentných* svetelných vln. Teraz sa nám aj napriek tomu, že môžeme zaznamenávať (kvadraticky) len energiu svetla, čo je úmerné intenzite svetla, podarí získať aj informáciu o fáze svetelnej vlny. Predstavme si dve koherentné svetelné vlny s amplitúdami A_1 a A_2

$$A_1 = A_{01} \cos(\Phi_1), \quad A_2 = A_{02} \cos(\Phi_2).$$

Ich zložením dostaneme amplitúdu A

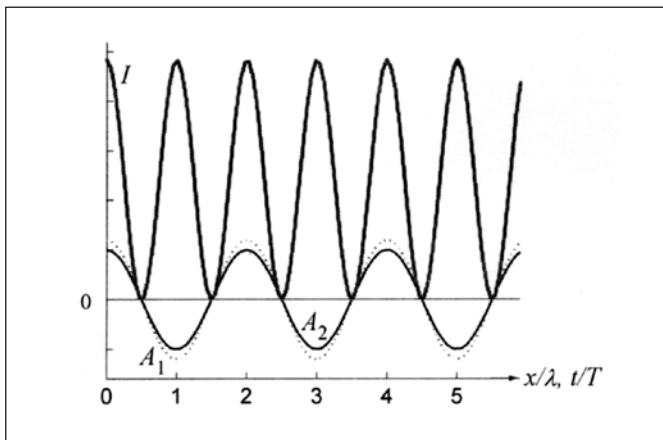
$$A = A_1 + A_2 = A_{01} \cos(\Phi_1) + A_{02} \cos(\Phi_2).$$

Zaznamenávame intenzitu svetla I

$$I \approx (A)^2$$

$$I \approx (A_1)^2 + (A_2)^2 + 2A_{01}A_{02} \cos(\Phi_2 - \Phi_1).$$

Jazyk matematiky demonštruje *obr. 3*. Spomínaná požiadavka *koherentnosti* vln A_1 a A_2 znamená, že vzájomná poloha amplitúd sa v čase nemení. Len vtedy sa v žiadnom mieste nebude počas záznamu meniť fázový rozdiel medzi amplitúdami a rozloženie intenzity I bude „stáť na mieste“ a bude sa dať zaznamenať.

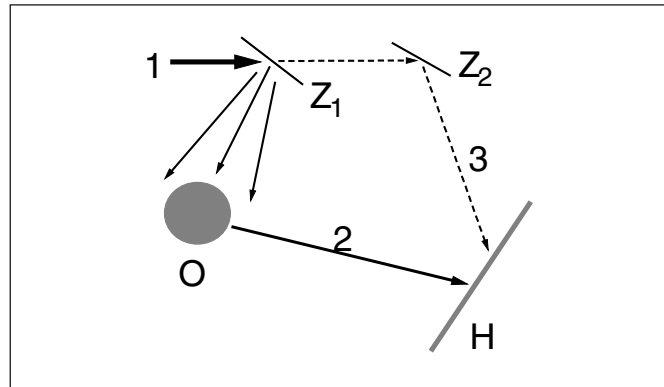


Obr. 3 Interferencia dvoch vln vo fáze

Kde ale nájdeme hľadanú informáciu o fáze svetelnej vlny? Z vyjadrenia pre rozloženie intenzity svetla, ktoré sa nazýva *interferenčný obraz*, vidieť, že rozloženie závisí od fázového rozdielu $\Phi_2 - \Phi_1$ medzi interferujúcimi vlnami. Ak by sme fázu jednej vlny poznali, rozdiel vlastne nesie informáciu o fáze druhej vlny.

Ako to vyzerá prakticky? Princíp experimentálneho usporiadania je na *obr. 4*. Svetelná vlna 1 z lasera sa delí čiastočne priepustným prvkom Z_1 na dve časti. Jedna postupuje po nasmerovaní prvkom Z_2 ako vlna 3 priamo na záznamový materiál H. Je to vlna *porovnávacia*. Druhá časť osvetľuje objekt O a od neho sa dostáva ako vlna 2 tiež na záznamový materiál. Nazývame ju vlna *objektová*.

Nakoľko sú svetelné vlny 2 a 3 koherentné, interferujú a na záznamový materiál sa zaznamená rozloženie intenzity svetla v interferenčnom obraze.



Obr. 4 Záznam hologramu

Záznamový materiál spracujeme podľa jeho druhu. Ak je to fotografický materiál, ktorý je zatiaľ najviac rozšírený, základný postup spočíva v známych krokoch, čo sú: vyvolanie, ustálenie, pranie (prípadne aj bielenie) a sušenie.

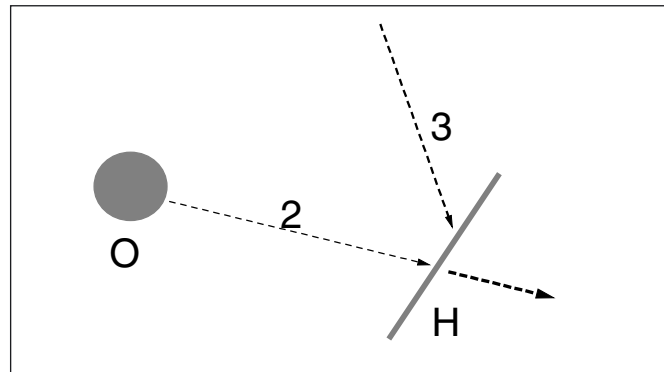
Získame tak negatív interferenčného obrazu, nie obraz objektu, na ktorý sme zvyknutí pri fotografii. Interferenčný obraz, čo je veľmi hustá štruktúra svetlých a tmavých miest by sme mohli vidieť len pod mikroskopom. Dosahuje totiž hodnotu až okolo 1000 čiar/mm.

3. REKONŠTRUKCIA HOLOGRAMU

Tento názov napovedá, že chceme vedieť, čo je na holograme. Prečo taký termín, vyplynie z ďalšieho. *Obr. 5* ukazuje, ako to urobiť prakticky.

Hologram osvetlíme porovnávacou vlnou 3, ktorá bude dopadať na hologram presne rovnako, ako pri zázname. Keď sa pozrieme cez hologram v smere, kde bol pri zázname objekt uvidíme ho. Ako je to možné?

Ak sa chceme v rámci jednoduchosti vyhnúť matematickému opisu záznamu a rekonštrukcie hologramu, odpoveď nám čiastočne naznačí známy *Huygensov princíp*. Hovorí o tom, ako sa šíri vlna prostredím.



Obr. 5 Rekonštrukcia hologramu

Najprv si však zavedme ďalší nový pojem, *vlnoplocha*. Všetky miesta v prostredí, v ktorých má fáza vlny Φ rovnakú hodnotu, tvoria plochu, ktorú nazývame *vlnoplocha*. Na šírenie vlny prostredím môžeme nazerať ako na postup vlnoplochy prostredím.

Na každej vlnoploche si môžeme predstaviť veľké množstvo sekundárnych bodových zdrojov svetla. Od každého bodového zdroja postupuje jeho vlastná vlnoplocha, ktorá má v homogénnom prostredí guľový tvar. Vlnoplocha našej vlny dostaneme v každom okamihu a mieste ako obálku týchto sekundárnych vlnoploch.

Vráťme sa teraz ku hologramu. Pri jeho zápise sa v určitom priestore prekrývajú dve vlny – objektová a porovnávací, ktoré mohli interferovať. Ich interferenčný obraz sme zaznamenali v rovine záznamového materiálu. Ak tento záznam osvetlíme jednou z týchto dvoch vln, zrekonštruujeme vlastne túto interferenčnú štruktúru, takže z nej sa musia šíriť opäť rovnaké vlny, ako pri zázname. Sú to vlny, ktoré ju pôvodne vytvorili, vlna objektová a vlna porovnávací. Takto zrekonštruujeme vlnu, ktorá sa šírila pri zázname od objektu. Dôsledkom bude, že objekt opäť uvidíme.

4. VLASTNOSTI HOLOGRAMU

Holografickým záznamom, podobne ako fotografickým, získame obraz objektu. Je medzi nimi rozdiel? Porovnajme niektoré z vlastností hologramu s vlastnosťami fotografie.

Holografickou metódou získame obraz objektu bez použitia zobrazujúcich optických prvkov – šošoviek. Rovnako, ako pri zobrazovaní šošovkami, aj tu môžeme získať obidva obrazy, *skutočný a neskutočný*.

Na fotografii je zaznamenaný jeden uhol pohľadu na objekt. Hologram ich obsahuje viac. Zrekonštruovaný objekt vidíme v rozsahu uhlov, ktorý nám umožní „okienko hologramu“.

Veľkosť obrazu zrekonštruovaného objektu sa môže meniť. Pri rekonštrukcii s laserom o menšej vlnovej dĺžke, ako bola pri zázname, bude obraz menší a naopak. Rozmer obrazu sa dá meniť aj zmenou vzdialenosti zdroja rekonštrukčnej vlny od hologramu.

Keď fotografiu roztrháte na kúsky, informácia je zničená. Každý kúsok fotografie má na sebe informáciu len o malom kúsku objektu. Z hologramu stačí väčšinou malý kúsok a napriek tomu zrekonštruujeme celý objekt. Smer pohľadu na objekt je určený miestom na holograme, kde sa vybraný malý kúsok nachádzal. Zmenšovanie rozmeru vybraného kúska hologramu spôsobí len stratu drobných detailov objektu.

Ak použijeme na rekonštrukciu hologramu laser, vždy ho zrekonštruujeme. Sú však aj hologramy, ktoré sa dajú rekonštruovať bielym svetlom. Je to *obrazový hologram* známy z preukazov, ochranných značiek, obalov kníh. Experimentálne usporiadanie je na obr. 6. Kolimátorom 1 rozšírený laserový zväzok sa delí deličom 2 na dve časti. Jedna je nasmerovaná zrkadlom 3 tak, aby prechádzala

objektom 4, ktorý sa zobrazuje šošovkou 5 do roviny záznamového materiálu 6. Druhá časť laserového zväzku je nasmerovaná zrkadlom 7 priamo na záznamový materiál. Rekonštrukciu hologramu pozorujeme v dúhových farbách. Odtiaľ pochádza aj anglický názov takého hologramu – *rainbow hologram*.

Druhým takým hologramom je *objemový hologram*. Zaznamenáme ho do hrubšieho záznamového média, takže záznam štruktúry interferenčného obrazu nie je len na ploche média, ale aj v jeho hrúbke. Pri rekonštrukcii bielym svetlom si objemová štruktúra hologramu sama z neho vyberie jednu z farieb, ktorá sa mení s uhlom dopadu.

Takto sa robia aj hologramy, u ktorých môžeme rekonštruovať objekt v pôvodných farbách. V takom prípade sa robí holografický záznam s tromi vlnovými dĺžkami (červená z He–Ne lasera a zelená a modrá z argónového lasera). Z bieleho svetla sa pri rekonštrukcii zrekonštruuje na každej štruktúre jedna z farieb. Zmiešanie týchto farieb vytvorí farebnú rekonštrukciu objektu.

5. EXPERIMENTÁLNE PODMIENKY PRE ZÁZNAM HOLOGRAMU

Záznam hologramu je záznamom interferencie objektovej a porovnávacíj vlny. Podmienkou interferencie je koherentnosť obidvoch interferujúcich vln, ktorú zabezpečí laser. Šírkou spektrálnej čiary, ktorú laser generuje, je určená tzv. koherenčná dĺžka lasera. Je to dráhový rozdiel medzi skladanými vlnami, ktorého prekročenie spôsobí, že už nebudú koherentné, napriek tomu, že pochádzajú z lasera. Bez zachádzania do teórie je z praktického hľadiska vhodné dodržať rovnakú dĺžku dráh porovnávacíj a objektovej vlny od miesta ich rozdelenia po záznamový materiál.

Interferenčná štruktúra, ktorú zaznamenávame, je veľmi hustá. Určuje ju v podstate vlnová dĺžka použitého svetla λ a uhol α medzi porovnávacíou a objektovou vlnou. Hustotu interferenčnej štruktúry môžeme odhadnúť približne zo vzťahu

$$h [\text{mm}^{-1}] = \frac{2 \sin(\alpha/2)}{\lambda [\text{mm}]}$$

Znamená to, že pri uhle $\alpha \sim 20^\circ - 30^\circ$ nemôžeme použiť ako záznamový materiál film, ktorý je určený na fotografovanie. Ten dokáže zaznamenať len ~ 50 čiar/mm. Presná hodnota je určená rozmerom zrna emulzie. Čím je film menej citlivý, tým je jemnozrnnejší. Na pohodlný holografický záznam si musíme zadovážiť špeciálny záznamový materiál určený pre holografiiu. V opačnom prípade musíme upraviť experimentálne usporiadanie tak, aby mala interferenčná štruktúra hustotu vhodnú pre náš záznamový materiál.

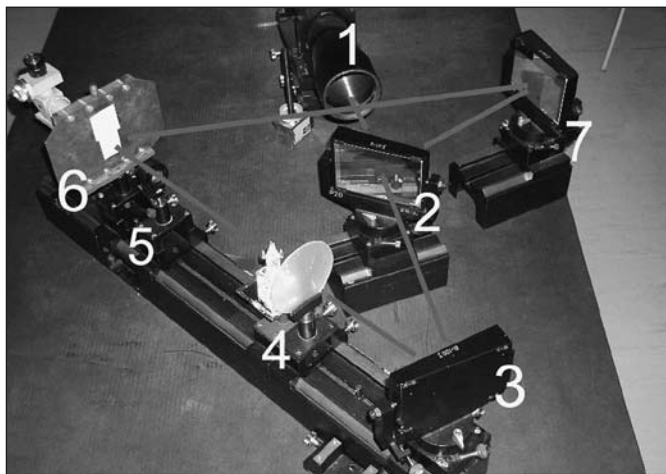
Záznam hologramu vyžaduje určitú expozičnú dobu, ktorá závisí od intenzity interferujúcich vln a citlivosti záznamového materiálu. Nakoľko je to záznam interferenčnej štruktúry, musí byť experimentálne usporiadanie stabilné. Je vhodné pozrieť pred exponovaním interferenčnú štruktúru mikroskopom, či sa nepohybuje.

ZÁVER

Tento príspevok bol spracovaný na základe skúseností v pedagogickej aj vedecko-výskumnej práci na oddelení optiky KEF FMFI UK, ktorá už dlhé roky poskytuje magisterské štúdium v odbore „Optika a lasery“ (predtým Optika a optoelektronika). Ako základný zdroj informácie môžu slúžiť napr. práce [1, 2]. Mnoho užitočných informácií nájde čitateľ na internete. Pozornosť určite vzbudí téma súčasnosti – holografický pamäťový disk [3].

Literatúra

- [1] Miler, M.: *Holografie*, SNTL, Praha 1974
- [2] Vrbová, M. a kol.: *Lasery a moderní optika – oborová encyklopedie*, PROMETHEUS, Praha 1994, ISBN 80–85849–56–9
- [3] www.aprilisinc.com



Obr. 6 Záznam obrazového hologramu

RNDr. Dagmar Senderáková, Ph.D., Katedra experimentálnej fyziky FMFI UK, Oddelenie optiky, Mlynská dolina F2, 842 48 Bratislava, Slovenská republika, tel.: +421 260 295 391, email: senderakova@fmph.uniba.sk

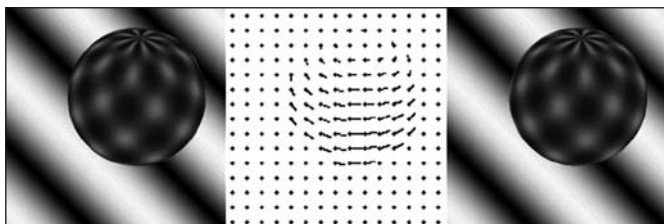
Optický tok a nová metoda jeho výpočtu pomocí EMF

Článek popisuje novou metodu výpočtu optického toku založenou na aplikaci empirických modálních funkcí podle metodiky HHT. Výhodou nového postupu je podstatně nižší výpočetní náročnost ve srovnání s klasickým Lucas-Kanade algoritmem a současně také menší citlivost na šum a zkreslení. Ve srovnání s obdobnou metodou, založenou na krátkodobé Fourierově transformaci, dává lepší prostorové rozlišení.

Klíčová slova: optický tok, Hilbert-Huangova transformace, empirická modální funkce, algoritmus Lucas-Kanade, Fourierova transformace, robotika, počítačové vidění.

1. OPTICKÝ TOK A ALGORITMUS LUCAS-KANADE

Optický tok je v robotice a v počítačovém vidění základním pojmem, pomocí kterého se dají spočítat jak pohyb kamery (robota) vůči scéně, tak i pohyb jednotlivých předmětů na scéně. Optický tok se obvykle stanovuje porovnáním série dvou nebo více snímků, které zobrazují tutéž scénu buď z různých stanovišť (stereoskopie) v daném čase, nebo z jednoho stanoviště, ale v různých časových okamžicích. Například na obrázku 1 jsou vygenerovány dva snímky otáčející se koule [8]. Uprostřed mezi nimi je znázorněn optický tok jako pole vektorů. Velikost a směr šipek odpovídá optickému toku v daném místě.



Obr. 1 Příklad optického toku vypočteného z dvojice snímků

Aby byl výpočet vůbec možný, musíme přijmout některé zjednodušující předpoklady. Především budeme předpokládat konstantní jas scény; to znamená, že intenzita jasu jednotlivých bodů a malých oblastí scény se mezi snímky nemění

$$I(\mathbf{p}_i, t) = I(\mathbf{p}_i + \mathbf{v}_i, t + 1), \quad (1)$$

ačkoliv jejich poloha se snímek od snímku měnit může. Dále budeme předpokládat, že blízké body scény často patří stejnému objektu, resp. povrchu, a proto jejich pohyb bude podobný. Protože se promítají do bodů, které si na snímcích jsou blízké, budeme u optického toku očekávat určitou prostorovou koherenci.

Klasický algoritmus pro výpočet optického toku zformulovali Lucas a Kanade [1], [2]. Jestliže podmínku konstantního jasu scény rozepíšeme po složkách jako

$$I(x, y, z, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, t + \delta t), \quad (2)$$

tak za předpokladu malých změn δ můžeme pravou stranu rovnice (2) napsat pomocí Taylorova rozvoje, ve kterém členy vyšších řádů zanedbáme

$$\begin{aligned} & I(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, t + \delta t) = \\ & = I(x, y, z, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial z} \delta z + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

a okamžitě dostáváme

$$\frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial z} \delta z + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t = 0, \quad (4)$$

neboli

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\delta x}{\delta t} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\delta y}{\delta t} + \frac{\partial I}{\partial z} \frac{\delta z}{\delta t} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

což, pokud zavedeme V_x , V_y a V_z jako složky rychlosti v jednotlivých souřadnicích, lze zapsat také jako

$$\frac{\partial I}{\partial x} V_x + \frac{\partial I}{\partial y} V_y + \frac{\partial I}{\partial z} V_z + \frac{\partial I}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

Jestliže dále pomocí symbolu $I_{\text{složka}}$ označíme jednotlivé složky intenzity, dostáváme konečně

$$I_x V_x + I_y V_y + I_z V_z = -I_t, \quad (7)$$

což ještě můžeme vyjádřit vektorově pomocí **optického toku** \mathbf{V} vztahem

$$\mathbf{VI} \cdot \mathbf{V} = -I_t. \quad (8)$$

To je soustava rovnic ve třech neznámých, která bez dodatečných podmínek nemá jednoznačné řešení (tzv. aperturový problém). Pomůžeme si tak, že budeme předpokládat, že kolem bodu (x, y, z) opíšeme malou krychličku a budeme předpokládat, že v ní je optický tok \mathbf{V} konstantní. Označíme-li body krychličky pomocí indexů $1 \dots n$, můžeme psát

$$\begin{aligned} I_{x1} V_x + I_{y1} V_y + I_{z1} V_z &= -I_{t1}, \\ I_{x2} V_x + I_{y2} V_y + I_{z2} V_z &= -I_{t2}, \\ &\dots \\ I_{xn} V_x + I_{yn} V_y + I_{zn} V_z &= -I_{tn}, \end{aligned} \quad (9)$$

čili maticově

$$\begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} & I_{z1} \\ I_{x2} & I_{y2} & I_{z2} \\ \dots & \dots & \dots \\ I_{xn} & I_{yn} & I_{zn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{t1} \\ -I_{t2} \\ \dots \\ -I_{tn} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

neboli

$$\mathbf{Av} = -\mathbf{b} \quad (11)$$

Rovnice (11) ovšem je přeurčená, proto její řešení hledáme metodou nejmenších čtverců a dostáváme postupně

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \mathbf{V} = \mathbf{A}^T (-\mathbf{b}). \quad (12)$$

$$\mathbf{V} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (-\mathbf{b}) \quad (13)$$

a odtud konečně

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n I_{xi}^2 & \sum_{i=1}^n I_{xi}I_{yi} & \sum_{i=1}^n I_{xi}I_{zi} \\ \sum_{i=1}^n I_{xi}I_{yi} & \sum_{i=1}^n I_{yi}^2 & \sum_{i=1}^n I_{yi}I_{zi} \\ \sum_{i=1}^n I_{xi}I_{zi} & \sum_{i=1}^n I_{yi}I_{zi} & \sum_{i=1}^n I_{zi}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n I_{xi}I_{ti} \\ -\sum_{i=1}^n I_{yi}I_{ti} \\ -\sum_{i=1}^n I_{zi}I_{ti} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

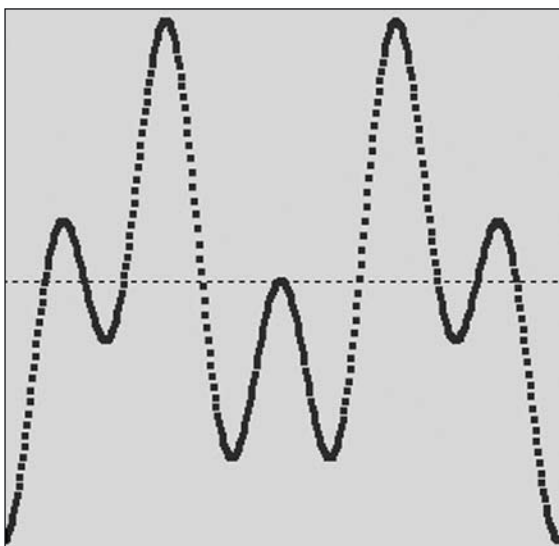
Výsledek (14) dává návod, jak se optický tok dá spočítat z partiálních derivací intenzity jasu podle všech čtyř dimenzí. V praxi je výpočet ještě poněkud komplikovanější, protože se obvykle aplikuje váhová funkce $W(i,j,k)$, která dává bodu (x,y,z) největší váhu a pro vzdálenější body postupně váhy zmenšuje.

Bohužel, k výpočtům v reálném čase je tento postup prakticky nepoužitelný, zejména pro rozsáhlé scény. Je-li soustava (9) až (14) řádu p , pak složitost výpočtu je $O(n^p)$. Pro složitější scény tak doba výpočtu snadno přesáhne možnosti i těch nejvýkonnějších počítačů.

2. ALTERNATIVNÍ METODY VÝPOČTU OPTICKÉHO TOKU

Existuje řada pokusů, jak výsledek (14) získat rychleji. Jednou z cest je počítat optický tok nejdříve s velmi hrubým rozlišením, načež postupně rozlišení zjemňovat. Jinou často diskutovanou možností je počítat optický tok hrubou silou, za použití masivně paralelních multiprocessorových systémů. Zajímavé jsou i pokusy o urychlení výpočtu pomocí genetických algoritmů [3].

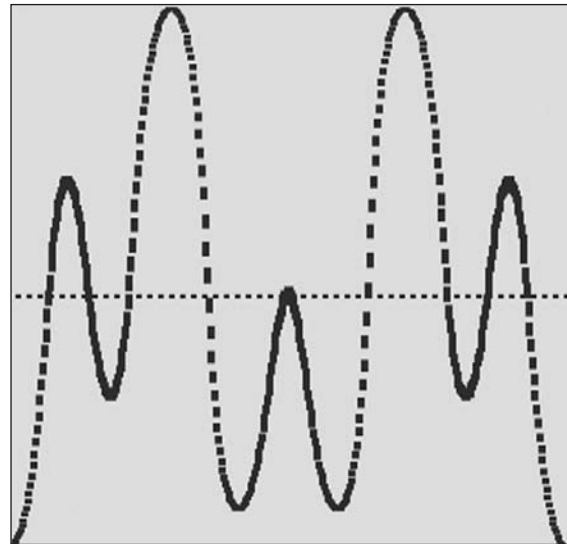
Jako velmi elegantní se ukazuje nová metoda, kterou jsem založil na modifikaci starší Wengovy práce [4]. Weng vyšel z toho, že není třeba hledat optický tok po celé ploše snímků. Jako mnohem efektivnější se jeví nalézt jej v klíčových bodech objektů, například v rozích, hranách a podobně. To je ostatně myšlenka, na které je postavena celá řada výpočetních metod. Problém ovšem je, jak



Obr. 2 Intenzita jako funkce polohy x – levý snímek

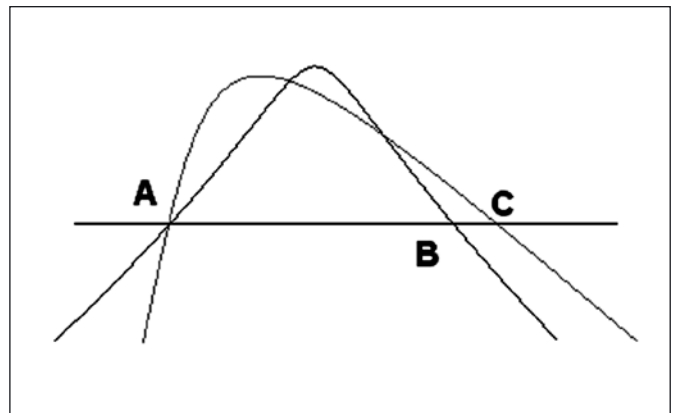
určit, které body scény jsou ty klíčové. Weng tento problém vtipně obešel pomocí krátkodobé Fourierovy transformace (STFT), někdy též nazývané *windowed Fourier transform*.

Jeho postup si vysvětlíme na jednoduchém jednorozměrném příkladu. Představme si, že máme dvojici obrázků, které spolu tvoří stereoskopickou dvojici. Průběh jasu v nějakém horizontálním řezu nechť je dán funkcemi $I_1(x), I_2(x)$, které jsme schopni změřit. Například to může být průběh¹ znázorněný na *obrázcích 2 a 3*.



Obr. 3 Intenzita jako funkce polohy x – pravý snímek

Vidíme, že oba snímky se jen málo odlišují, ale bez znalosti toho, co představují (tedy bez znalosti sémantiky scény) nejsme schopni určit, které body jsou pro optický tok významné. Můžeme ovšem použít libovolné body, u kterých dokážeme zaručit, že spolu na obou snímcích vzájemně korespondují. Například bychom mohli použít body, ve kterých funkce $I_1(x), I_2(x)$ procházejí nulou. Protože body průchodu nulou jsou u obou snímků vzájemně posunuté, můžeme z velikosti a směru posunu vypočítat optický tok. Velikost posunutí je úměrná velikosti optického toku, zatímco směr posunutí určuje smysl optického toku. Názorně to ukazuje *obrázek 4*, na kterém na levé straně obě funkce procházejí nulou v tomtéž bodě A, a tudíž optický tok tam je nulový. Naproti tomu na pravé straně funkce procházejí nulou v bodech $B \neq C$, a proto velikost i směr optického toku jsou dány úsečkou \overline{BC} .



Obr. 4 Stanovení optického toku porovnáním poloh bodů, ve kterých dochází k průchodu nulou

¹) pro názornost jsem použil jednoduchou funkci, tvořenou superpozicí dvou sinusovek

Průchod funkcí $I_1(x)$, $I_2(x)$ nulou ale není dobrá volba, protože už před Wengem bylo dokázáno, že průchody jasu konstantní hladinou nenesou dostatek informace a navíc jsou závislé na absolutní velikosti osvětlení. Naproti tomu Oppenheim a Lim už v roce 1981 ukázali, že velké množství informace je obsaženo ve Fourierově transformaci, a to zejména ve fázové složce. Dokázali to experimentem, ve kterém podrobili signál Fourierově transformaci, ale následně amplitudu této transformace položili rovnu jedné (fáze zůstala zachována). Po zpětné Fourierově transformaci se podařilo signál do značné míry zrekonstruovat.

Weng se tedy rozhodl podrobit funkce $I_1(x)$, $I_2(x)$ jednorozměrné prostorové Fourierově transformaci podle osy x , z výsledku transformace vzít jen fázovou složku a jako vztažné body použít ty body, ve kterých fáze prochází nulou. Problém je, že to nelze udělat běžným postupem, například algoritmem rychlé Fourierovy transformace (FFT). Podstata je v tom, že Fourierova transformace, vedle vcelku samozřejmých obecných předpokladů, vyžaduje, aby (a) systém byl lineární a (b) data byla stacionární. Stacionaritou zde míníme požadavek, aby kovarianční funkce byla invariantní vůči posunu v ose x (jde o tzv. stacionaritu 2. řádu). Žádný z těchto požadavků neumíme beze zbytku splnit. Zatímco s nelinearitou systému se umíme do jisté míry vyrovnat pomocí linearizace, požadavek stacionarity je v praxi nesplnitelný. To se v roce 1946 pokusil vyřešit Gabor tím, že ze signálu uvažoval vždy jen krátké časové okno, ve kterém předpokládal, že je průběh dostatečně stacionární. Podle potřeby pak toto okno posouval po naměřeném průběhu. To je princip krátkodobé Fourierovy transformace, STFT (*Short Time Fourier Transform*), někdy označované též jako *Windowed Fourier Transform*. Původně byla určena pro Fourierovu transformaci v čase, ale samozřejmě ji lze použít zcela obdobně i pro prostorové souřadnice. Jestliže pro časově spojité signály je běžná Fourierova transformace definována vztahem

$$F\{x(t), \omega\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (15)$$

pak krátkodobá Fourierova transformace STFT v čase t_0 je dána podobným vztahem

$$F\{x(t), \omega, t_0\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) h(t_0 - \tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (16)$$

ve kterém $h(\tau)$ je reálná, symetrická funkce realizující časové okno, pro kterou z důvodu normalizace platí $\|h(\tau)\| = 1$. V principu by $h(\tau)$ mohla být i obdélníková funkce, ale z praktických důvodů se dává přednost oknům, která ve spektru produkují menší rušivé efekty. K nejpoužívanějším patří „kosinusový zvon“ a z něj odvozené Hammingovo okno

$$h_{\text{Hamming}}(\tau) = 0,54 - 0,46 \cos(2\pi\tau) \quad (17)$$

nebo Blackmanovo okno

$$h_{\text{Blackman}}(\tau) = 0,4 - 0,5 \cos(2\pi\tau) + 0,08 \cos(4\pi\tau). \quad (18)$$

Okénko se postupně posouvá přes celý zkoumaný signál. Pro každý čas odpovídající středu okna tak dostaneme dílčí spektrum, které odpovídá okamžité poloze okna. Bývá zvykem, že se tato dílčí spektra vynášejí pod časovým průběhem, kde vytvářejí spektrogram.

Zcela obdobně, ale pro souřadnici x , Weng získal spektrogram prostorových frekvencí a prostorových fází v blízkém okolí zkoumané souřadnice x .

V našem příkladu je zřejmé, že funkce $I_1(x)$, $I_2(x)$ jsou v x značně nestacionární. U signálů, které jsou sice nestacionární, ale mění se pomalu, je změna uvnitř okna malá a výsledky získané pomocí STFT jsou použitelné. Ale u rychle se měnících průběhů, jako jsou funkce v našem příkladu, narazíme na problém: pokud zvolíme

široké okno, průběh uvnitř okna nebude ani přibližně stacionární a dostaneme zkreslené výsledky. Naproti tomu, pokusíme-li se okno zúžit, v oblasti prostorové frekvence úměrně klesne rozlišovací schopnost, protože ta je nepřímo úměrná šířce okna. Najít optimální šířku okna, pro kterou je rozlišení dostatečné a chyba z nestacionarity zanedbatelná, není vždy možné. Možná i proto se na Wengovu metodu na dlouho zapomnělo.

3. EMPIRICKÉ MODÁLNÍ FUNKCE

Nový přístup byl inspirován Hilbert-Huangovou transformací, která širokopásmové signály (jako jsou funkce $I_1(x)$, $I_2(x)$) dokáže rozložit na součet úzkopásmových funkcí, nazývaných IMF nebo EMF (*Empiric Modal Functions*). Hilbert-Huangova transformace byla nalezena pro analýzu signálů v čase, avšak stejně dobře ji lze použít pro práci s prostorovými souřadnicemi. Jak již z názvu plyne, **empirické modální funkce EMF** se získávají empiricky, aplikací počítačového algoritmu, který je podrobněji popsán v [5] a [7]. Podstatou je iterativní proces tzv. prosívání (*sifting*).

Prvním krokem je zjištění řídicí vlny a symetrizace vlnového profilu. Nejprve nalezneme všechny lokální extrémy funkce $I(x)$. Přes všechna lokální maxima vytvoříme obálku maxim. Vytvoříme ji tak, že jednotlivými lokálními maximy $e_{\max}(x)$ proložíme kubický splajn. Podobně vytvoříme obálku minim tak, že kubický splajn proložíme lokálními minimy. Nyní provedeme „narovnání“. Cílem je, dosáhnout takového stavu, aby v každém bodě byla střední hodnota mezi oběma obábkami co nejbližší nule. Dosáhneme toho tak, že vypočteme střední hodnotu mezi oběma extrémy

$$m(x) = \frac{e_{\max}(x) + e_{\min}(x)}{2} \quad (19)$$

a o tuto střední hodnotu zmenšíme $I(x)$:

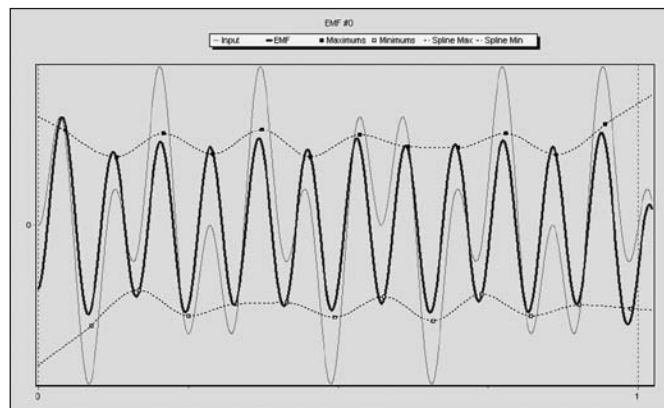
$$d(x) = I(x) - m(x) \quad (20)$$

Tím jsme dostali první přiblížení k vlastní modální funkci prvního řádu, kterou označíme EMF0.

Prosívání je iterativní proces, proto celý postup (počínaje nalezením lokálních extrémů) budeme opakovat, dokud není splněno prosívací kritérium. Tímto kritériem je standardní odchylka mezi dvěma po sobě jdoucími iteracemi:

$$SD = \sum_{i=0}^N \left[\frac{\left| \left(h_{1(k-1)}(x) - h_{1(k)}(x) \right) \right|^2}{h_{1(k-1)}^2} \right]. \quad (21)$$

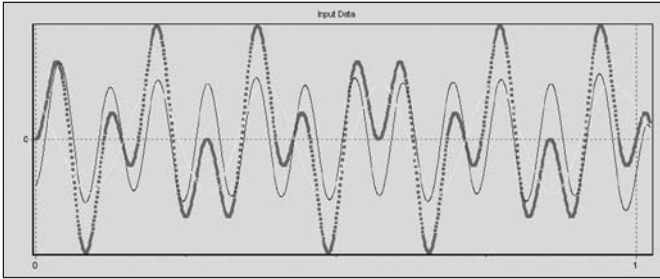
Praktická aplikace tohoto algoritmu naráží na drobné těžkosti zejména na okrajích datového intervalu, kde kubické splajny jde těžko nastavit, protože mají tendenci divergovat mimo očekávanou oblast signálu.



Obr. 5 Vypočtená první EMF

Na obrázku 5 vidíme první EMF0, kterou jsme z $I(x)$ dostali popsáním algoritmem HHT. Slabou čarou na něm je vyznačen původní průběh funkce $I(x)$. Čárkovaně jsou vyznačeny splajny maxim a minim, lokální maxima mají podobu plných a lokální minima prázdných čtverečků. Nalezená první EMF0 je vyznačena silnou čarou. Vidíme, že (až na začátek a konec) má podobu sinusovky. To dobře odpovídá skutečnosti, protože $I(x)$ byla uměle vygenerována jako superpozice dvou sinusovek.

Je zřejmé, že analogicky lze celý proces opakovat pro další EMF. Podstatné je, že všechny EMF jsou dobře periodické a stacionární, proto je můžeme – pokud to je potřeba – bez potíží identifikovat. Zajímavostí je, že je případně lze použít i k predikci $I(x)$. Na obrázku 6 je tučnými čtverečky vyznačena původní $I(x)$, tenčími čarami pak první dvě EMF (více jich v dané funkci obsaženo není).



Obr. 6 Intenzita (tečkovaně) a výsledné EMF

Z hlediska výpočtu optického toku máme nyní dvě možnosti. Vybereme si některou EMF a jako významné body budeme identifikovat buď průchody této EMF nějakou hladinou (například nulou), nebo obdobně jako u Wengovy metody nejprve nalezneme prostorovou fázi EMF a teprve její průchody nulou identifikujeme. V obecném případě je druhá možnost samozřejmě lepší, ale v daném konkrétním případě jsou obě EMF blízké sinusovkám, a proto zde je to jedno.

Zbývá ještě ukázat, jak bychom stanovili okamžitou prostorovou frekvenci a fázi EMF, tedy frekvenci a fázi v závislosti na souřadnici x . Protože získané EMF jsou úzkopásmové, tzn. obsahují jen frekvence blízké nějaké střední frekvenci, mnohem lepší než STFT bude použít Hilbertovu transformaci [5]. Výstupem Hilbertovy transformace je komplexní funkce jedné proměnné, v našem případě prostorové souřadnice x , která popisuje frekvenční vlastnosti vstupního průběhu. Hilbertova transformace je definována jako konvoluční integrál funkce $I(x)$ a výrazu $\frac{1}{\pi x}$, daný vztahem

$$H\{I(x), x\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I(\xi)}{x - \xi} d\xi. \quad (22)$$

Pro lepší porozumění, co vlastně transformace dělá, lze tento vztah přepsat pomocí operátoru konvoluce na

$$H\{I(x), x\} = \frac{1}{\pi} I(x) * \frac{1}{x} \quad (23)$$

a po Fourierově transformaci obou stran dostaneme

$$\begin{aligned} F\{H\{I(x), x\}\} &= \frac{1}{\pi} \cdot F\{I(x)\} \cdot F\left\{\frac{1}{x}\right\} = \\ &= \frac{1}{\pi} \cdot X(jf) \cdot j\pi(-\text{signum}(f)). \end{aligned} \quad (24)$$

což lze interpretovat takto: Hilbertova transformace ve frekvenční oblasti pracuje tak, že složkám se zápornou frekvencí posouvá fázi o $+\frac{\pi}{2}$ a složkám s kladnou frekvencí o $-\frac{\pi}{2}$, přičemž v obou případech zachovává jejich amplitudu. Vezměme nyní naměřená data, což je reálná funkce souřadnice $I(x)$. Nejprve vypočítáme Hilbertovu transformaci $I(x)$

$$y(x) = H\{I(x), x\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I(\xi)}{x - \xi} d\xi. \quad (25)$$

Nyní vytvoříme zvláštní komplexní signál $z(t)$ tak, že jako jeho reálnou složku vezmeme $I(x)$ a jako jeho imaginární složku vezmeme $y(t)$, neboli Hilbertovu transformaci původního $I(x)$. Tento signál nazveme **analytickým signálem** a vyjádříme ho pomocí amplitudy a fáze:

$$z(x) = I(x) + jy(x) = A(x) + e^{j\theta(x)}, \quad (26)$$

kde prostorovou amplitudu i fázi můžeme vyjádřit pomocí $I(x)$ a $y(x)$

$$A(x) = \sqrt{I^2(x) + y^2(x)}, \quad (27)$$

$$\theta(x) = \arctan\left(\frac{y(x)}{I(x)}\right). \quad (28)$$

Případně můžeme vypočítat okamžitou prostorovou frekvenci (anglicky *instantaneous spatial frequency*) jako derivaci fáze podle souřadnice:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{d\theta(x)}{dx}. \quad (29)$$

Pro stanovení optického toku bychom vzali průběh fáze podél osy x tak, jak ji určuje rovnice (28). Nalezli bychom body, ve kterých fáze prochází nulou, a to u obou snímků, načež bychom porovnali polohy vzájemně si odpovídajících bodů podobně, jako jsme to udělali v předcházející kapitole a na obrázku 4. Vzdálenost, o které se odpovídající si body posunou při přechodu od jednoho snímku ke druhému, je rovna optickému toku v daném bodě.

4. ZÁVĚR

Tento článek vysvětluje pojem „optický tok“ a ukazuje některé způsoby, jak jej lze vypočítat. V závěru představuje novou a výpočetně velmi rychlou metodu, jak lze optický tok spočítat na základě modifikované Hilbert-Huangovy transformace.

Literatura

- [1] Lucas B. D., Kanade T.: An iterative image registration technique with an application to stereo vision. IEEE Proceedings of Imaging understanding workshop 1981, pp. 121-130.
- [2] Lucas B. D.: Generalized Image Matching by the Method of Differences. Doktorská dizertační práce 1984, volně ke stažení na http://www.ri.cmu.edu/pubs/pub_5610.html
- [3] Tagliasacchi, M.: A genetic algorithm for optical flow estimation. Image and Vision Computing, Politecnico di Milano, Vol. 25, Issue 2 (February 2007), pp. 141-147, ISSN: 0262-8856.
- [4] Weng, J.: Image Matching Using the Windowed Fourier Transform. Intl Journal of Computer Vision, Vol. 1, Issue 3 (1993), pp. 211-236.
- [5] Kokeš, J.: Okamžitá frekvence a Hilbert-Huangova transformace. Sborník konference Inteligentní systémy pro praxi, Lázně Bohdaneč 2006, 80-239-6535-2.
- [6] Kruger, CJC: Constrained Cubic Spline Interpolation for Chemical Engineering Applications, volně ke stažení na www.korf.co.uk/spline.pdf.
- [7] Verner, M.: EMD – základ pro HHT. Sborník konference Inteligentní systémy pro praxi, Lázně Bohdaneč 2007, ISBN 978-80-239-8245-9.
- [8] McCane, B.: Optical Flow Algorithm Evaluation. <http://of-eval.sourceforge.net/>

Observatoř Pierra Augera začala sdílet data o kosmickém záření s veřejností a studenty

MALARGÜE, Argentina. Vědci, kteří se podílejí na mezinárodní spolupráci v projektu Pierra Augera, začali 3. července 2007 s uvolňováním údajů o 1 % záznamů kosmických paprsků, zachycovaných Observatoř Pierra Augera v Argentině. Nové údaje o dopadech kosmických paprsků - v průměru asi 70 událostí za den - budou jednou denně přidávány do veřejné databáze. Samotná data i jejich grafické zobrazení budou zveřejňována na adresách: www.auger.org a www.auger.org.ar

Mezinárodní spolupráce v projektu Pierra Augera zahrnuje vědce ze 17 zemí, kteří se zabývají hledáním původu velmi vzácných částic kosmického záření o extrémně vysokých energiích. Jde o částice, které přicházejí z vesmíru a střetávají se se Zemí, přičemž některé z částic mají energie až stamilionkrát vyšší než ty, které lze uměle dosáhnout v nejvýkonnějším současném urychlovači částic Tevatron ve Fermilabu v USA. Jde o vůbec nejvyšší energie částic, které byly kdy v přírodě pozorovány. Pokud taková částice narazí na vnější vrstvy zemského ovzduší, vyvolá atmosférickou spršku druhotných částic, které se při povrchu Země rozmnoží až na nějakých 200 miliard částic o nižších energiích.

Jednoprocentní uvolnění údajů o těchto energetických částicích je součástí světového programu vzdělávání a popularizace projektu Pierra Augera. Naskýtá se tak příležitost pro učitele ukázat studentům, jak vypadají reálné vědecké údaje, čímž se poučí o úžasných procesech, jež se odehrávají ve vesmíru a jež chrlí energetické částice také směrem k Zemi. Na zmíněných webových adresách

budou uveřejněny údaje jak v grafickém tvaru, tak i ve formě tabulek. Pro každou spršku kosmického záření se na webu zobrazí údaje o energii a směru příletu přicházejících kosmických paprsků. Veřejně přístupné údaje poskytnou informace o kosmických paprscích s extrémně vysokou energií až do hodnoty 50 trilionů (5.1019) elektronvoltů.

Když bude koncem roku výstavba celé observatoře dokončena, zabere Observatoř Pierra Augera plochu přes tři tisíce čtverečních kilometrů v provincii Mendoza v Argentině, východně od And. Dokončenou observatoř bude tvořit 1 600 detektorů, které zachycují příchod atmosférických spršek na zemský povrch. Údaje, zaznamenané pozemními detektory, se přenášejí do centrálního registru pomocí techniky vyvinuté pro mobilní telefony díky elektrické ze slunečních panelů na každém detektoru. Pole detektorů je na svém obvodu obklopeno sestavou 24 obřích světelných kamer, mířících ke středu soustavy pozemních detektorů. Tyto světelné dalekohledy mohou za jasných bezměsíčných nocí zaznamenat ultrafialové fluorescenční záření, které vzniká průletem částic atmosférické spršky zemskou atmosférou.

Spolupráce v projektu Pierra Augera zahrnuje více než 370 vědců a techniků ze 60 vědeckých ústavů v 17 státech světa, které se podělily o náklady na vybudování observatoře v ceně přibližně 50 milionů dolarů.

Ilustrační foto: 1. strana obálky.

Účastnické státy: Argentina, Austrálie, Bolívie, Brazílie, Česká republika, Francie, Itálie, Mexiko, Německo, Nizozemí, Polsko, Portugalsko, Slovinsko, Španělsko, Velká Británie, USA, Vietnam.

Doplňek o české účasti v projektu Pierra Augera

Česká republika se na projektu podílí od samého počátku prostřednictvím Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR a Společné laboratoře optiky Fyzikálního ústavu AV ČR a Univerzity Palackého v Olomouci. Později se do projektu aktivně zapojila i Matematicko-fyzikální fakulta UK v Praze. Projekt byl zpočátku financován Grantovou agenturou AV ČR, později programem INGO MŠMT ČR a rovněž z grantu Centra částicové fyziky Fyzikálního ústavu a MFF UK.

Hlavním českým přínosem pro projekt bylo zhotovení skládaných zrcadel pro 12 obřích širokouhlých světelných komor s průměrem složeného zrcadla 3,5 m, výpočet optických soustav a jejich instalace v pampě. Naši odborníci se však významně zapojili také do vývoje metod kalibrace a zpracování dat. Pro kalibraci atmosférických spršek byl v pampě instalován v r. 2005 robotický teleskop FRAM vlastní konstrukce, který neinvazivně měří vlastnosti zemské atmosféry v průběhu měření a jako doplňkový

program nalezl dva optické protějšky zábleskových zdrojů záření gama, vzdálené od Země 9 miliard světelných let.

O významu českého podílu na výstavbě a provozu observatoře svědčí též okolnost, že počátkem r. 2006 byl šéf českého týmu Dr. Jan Řídký zvolen vedoucím skupiny fluorescenčních detektorů Observatoře Pierra Augera a dále, že duchovní otec celého projektu nositel Nobelovy ceny za fyziku, prof. Jim Cronin z Univerzity v Chicagu (čestný člen Učené společnosti ČR od r. 2006), navštíví letos v srpnu již potřetí česká pracoviště projektu, proslaví zde přednášky a bude projednávat další vědecké otázky spojené se zpracováním jedinečných údajů z tohoto ambiciózního projektu.

Zájemci z řad učitelů a studentů, kteří by chtěli využít zmíněná uvolněná data, se mohou obrátit na pracovníky české části Observatoře Pierra Augera v Praze nebo Olomouci (www-hep2.fzu.cz/Auger/cz/), nejlépe na Dr. Petra Trávníčka: travnick@fzu.cz

Kontakt: Mgr. Petr Trávníček, Ph.D., e-mail: travnick@fzu.cz

EQUOTIP – Měření tvrdosti dynamickou metodou

Měřicí metoda realizovaná přístroji EQUOTIP je jednoduchá dynamická zkouška tvrdosti. Nárazové tělíčko je vrženo silou vyvozenou pružinou proti kontrolované ploše. Dopad tělíčka vyvolá deformaci kontrolované plochy, což vede ke snížení kinetické energie. Pro určení tvrdosti se měří rychlost padajícího a odraženého nárazového tělíčka v určité definované vzdálenosti od kontrolované plochy. Poměr obou rychlostí, násobený tisícem, slouží ke stanovení hodnoty HL (tvrdost Leeb, nazváno podle autora této metody).



Přístroj pro měření tvrdosti equotip3C PROCEQ, Švýcarsko

Přístroje EQUOTIP (výrobce PROCEQ SA, Švýcarsko) nejsou českým technikům neznámé, používají se v řadě našich průmyslových organizací více než 30 let jako přenosné tvrdoměry na kovy. Na veletrhu CONTROL v Sinsheimu (květen 2007) byl vystaven nejnovější typ, EQUOTIP 3. Přístroj se skládá z vlastní měřicí sondy, resp. rázového přístroje, spojeného 1,5 m dlouhým kabelem s indikačním zařízením (vyhodnocovací jednotkou). Měřicí sondy (celkem 7 různých druhů) jsou vyměnitelné. Sonda D je z nich nejuniverzálnější a vyhovuje většině požadavků kladených na zkoušku tvrdosti. Ostatní sondy jsou speciální a používají se k různým účelům, zejména pro měření na velmi malých plochách, např. ve dnu drážky, pro měření extrémně tvrdých ploch (přes 50 HRC/650 HV), u nástrojářských ocelí s vysokým obsahem karbidu, na povrchově kalených plochách, na tenkostěnných dílech (měření s minimálním vtiskem). Na indikačním přístroji je velký displej s nastavitelným kontrastem a podsvícením. Naměřené hodnoty (HL) se mohou zobrazit ve všech běžných stupnicích statické tvrdosti (např. HV, HRC, HRB, HB, HC apod.). Přístroj je vybaven rozsáhlou pamětí, do které lze uložit až 100 tisíc měřených hodnot. Zároveň s tím se ukládají do paměti další důležité informace, vztažené k příslušnému



Equotip piccolo

měření, resp. zkoušce, např. statistické údaje, datum, čas a číslo měření, převod použitý pro přepočítání hodnot HL na jinou hodnotu tvrdosti a toleranční meze. Přístroj je opatřen rozhraním RS 232, USB a Ethernet pro dálkové ovládání a pro přímý tisk na většině tiskáren. Software EQUOLINK podporuje přenos dat, analýzu a další zpracování na PC. Přístroj může být napájen ze sítě, integrovanou nabíjecí baterií nebo třemi standardními bateriemi.

Hlavní oblastí použití přístroje EQUOTIP 3 je měření na těžkých a velkých součástech, zejména součástech již zabudovaných do strojních celků a skupin. Kromě měření na rovinném povrchu lze měřit i na zakřivených plochách (rádius zakřivení $R > 10$ mm). Protože se předpokládá, že přístroj bude využíván i v drsných dílenských podmínkách, může pracovat v rozsahu teplot (0 až 50) °C a při relativní vlhkosti max. 90 %. Přístroj je také chráněn proti stříkající vodě a prachu (ochranné krytí IP54).

Výsledek zkoušky může být ovlivněn polohou sondy vůči kontrolované ploše. Ne ve všech případech je poloha sondy svislá. Skloněná poloha, resp. skloněný směr úderu může způsobit chyby měření a proto se poloha automaticky identifikuje a následně koriguje. Tím je dosaženo, že chyba měření na přístroji EQUOTIP 3 nepřekročí ± 4 HL (0,5 % při 800 HL). K dosažení požadované přesnosti slouží kontrolní desky, které jsou kalibrovány v laboratoři PROCEQ (pro dynamické hodnoty HL) a v nezávislé laboratoři (statické hodnoty HRC a HB). Přístroj, resp. jeho měřicí metoda jsou uvedeny v normě ASTM A956, připravuje se vydání německé normy DIN 50156.



Equopen

Z dalších přístrojů firmy PROCEQ, založených na obdobné metodě, připomínáme ruční přístroje EQUOTIP PICCOLO, EQUOPEN, EQUOSTAT a EQUOMATIC. U přístroje EQUOTIP PICCOLO je měřicí sonda součástí vyhodnocovací jednotky. Do vnitřní paměti přístroje lze uložit až 2000 hodnot. Přístroj EQUOPEN je ještě menší: připomíná svým tvarem a rozměry propisku (průměr 12 mm, délka 140 mm, hmotnost 36 g.) Měřicí rozsah je (20 až 70) HRC, největší dovolená chyba měření ± 1 HRC. Minimální rádius zakřivené kontrolované plochy je $R = 30$ mm. EQUOSTAT vyhodnocuje statickou tvrdost podle Rockwella při malém zatížení. Hloubka vtisku je minimální, takže přístroj je předurčen pro měření na leštěných plochách a tenkostěnných součástech (profily a trubky s tloušťkou stěny 2 mm). EQUOMATIC je v podstatě automatický kontrolní systém (až 3 měření tvrdosti během 7 sekund).

Čeněk Nenáhlo

Kontakt: Čeněk Nenáhlo, Česká metrologická společnost, Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1, tel.: 221 082 254

75. narodeniny docenta Jana Eigla

7. července 2007 se dožívá 75 let význačný pracovník v oblasti optiky a obrazové techniky pan doc. Ing. Jan EIGL, CSc. Svou profesní kariéru začal po maturitě v r. 1952 jako výpočtář v optickém výzkumu tehdejšího n. p. Meopta Košiče. O dva roky později nastoupil do Výzkumného ústavu zvukové, obrazové a reprodukční techniky a setrval tam 37 let. Mezitím dokončil na Elektrotechnické fakultě ČVUT studium specializace rozhlas-film-televíze a táž fakulta mu udělila v sedmdesátých letech titul kandidáta technických věd. Ve VÚZORTu pracoval v optickém oddělení, od r. 1977 jako jeho vedoucí, později se stal vedoucím fyzikálního pracoviště a členem vědecké rady ústavu. V r. 1989 dostal od AV ČR hodnost vedoucího vědeckého pracovníka. Ve shodě se zaměřením ústavu se zabýval optickými aplikacemi ve filmové a televizní technice, např. návrhy optických systémů kinematografických kopírovacích strojů, senzimetrickými měřicími metodami a přístroji, problematikou barevného televizního snímání aj. Při řešení konkrétních úloh spolupracoval s řadou podniků jako je Filmový průmysl, Filmové laboratoře, Meopta Přerov, Carl Zeiss Jena. V osmdesátých letech zastupoval Ing. Eigl VÚZORT v mezinárodní nevládní organizaci UNIATEC se sídlem v Paříži a přednášel na jejích kongresech. V letech 1992 až 2003 působil v technických a manažerských funkcích několika zahraničních společností v ČR, v posledním období byl ředitelem a poté poradcem firmy SCHWAIGER.



Ing. Eigl přispěl v letech 1957-88 rovněž svými návrhy a realizacemi optických zařízení k tvorbě audiovizuálních prezentací, uváděných na světových výstavách v Bruselu, Montrealu a Ósace a v divadlech, galeriích a na výstavách v Praze, Moskvě, Teheránu, Dillí, Káhiře, Vancouveru aj., převážně v produkci podniku ART CENTRUM. Spolupracoval také s Laternou Magikou a byl v devadesátých letech členem její umělecké rady. Eiglůva pedagogická činnost začala v letech 1965-70 výukou optiky a filmové techniky na střední filmové škole v Čimelicích a pokračuje od r. 1973 dodnes přednáškami optiky na katedře kamery (a určitou dobu také na katedře fotografie) Filmové a televizní fakulty AMU. V r. 1986 byl Ing. Eigl jmenován docentem pro obor obrazová technika a byl také po několik období členem umělecké rady fakulty. Je autorem dlouhé řady výzkumných zpráv, publikací, skript, patentů, přednášek, recenzí a oponentních posudků. Jak je z výše uvedeného patrné, zasloužil se doc. Eigl významným způsobem o rozvoj aplikované optiky a obrazové techniky nejen v našich zemích, ale též na mezinárodní úrovni a dodnes se aktivně věnuje výchově studentů v těchto oblastech. Působí též jako člen řady komisí pro doktorské studium na našich vysokých školách. Přeji jubilantovi hodně zdraví a životního elánu do dalších let.

Antonín Mikš

Prof. RNDr. Antonín Mikš, CSc., katedra fyziky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, tel.: 224 354 948, fax: 233 333 226, e-mail: miks@fsv.cvut.cz

Pavol HORŇÁK, FEI STU, Bratislava, Slovenská republika

Metódy na meranie fotometrických veličín

Veličiny vzťahujúce sa na žiarenie, vyhodnocované podľa danej funkcie spektrálnej svetelnej účinnosti, môžeme merať. Tieto veličiny nazývame fotometrické. Snímačmi žiarenia sú všetky látkové telesá živej a neživej prírody. Ako príklad možno uviesť ľudské oko alebo fotoelektrické snímače. V prípade fotoelektrickej premeny rozlišujeme vonkajší fotoelektrický jav (emisná fotónka), fotoelektrickú vodivosť (odporová fotónka) alebo fotovoltický jav (hradlová fotónka). Možnosť použitia fotoelektrickej premeny je základom viacerých spôsobov, ktorými príslušnú veličinu meriame. Navyše si treba uvedomiť, že na jedinom fotovoltickom jave je založených viac metód zistenia hľadanej hodnoty meranej veličiny. Napríklad svetelný tok svietidiel možno určiť pomocou Ulbrichtovej gule alebo špirálového goniofotometra. Pri meraní takisto uvažujeme o meracom postupe, pod ktorým rozumieme sled úkonov, potrebných na uskutočnenie merania podľa určitej meracej metódy. Napríklad normou je predpísaný postup merania svetelného toku svietidiel pomocou Ulbrichtovej gule. Pre jednotnosť meraní majú byť preto predpísané nielen meracie metódy, ale aj meracie postupy. V ďalšom texte sa sústreďíme na meracie metódy.

Meracie metódy vychádzajú z rôznych hľadísk, pričom sa môžu pri meraní konkrétnej fotometrickej veličiny dopĺňovať alebo prekrývať. Na základe Medzinárodnej sústavy jednotiek SI poznáme *definičné (absolútne) meracie metódy* a *odvozené (relatívne) meracie metódy*. Definičnou meracou metódou nazývame metódu pre základnú fotometrickú veličinu, ktorá je založená na jej definícii. Pretože definičné metódy vedú buď bezprostredne alebo cez ďalšie väzby k meraniu základných veličín, môžeme ich nazvať základnými metódami. Príkladom absolútnej metódy je napríklad meranie národného etalónu svietivosti. Odvozené meracie metódy vyžadujú okrem meraného objektu ešte iný objekt, u ktorého poznáme číselné hodnoty veličiny toho istého druhu, ako je meraná veličina. Tieto meracie metódy nazývame relatívne (pomerné) metódy, pretože s ich pomocou získavame pomer meranej veličiny a známej veličiny toho istého druhu. Pretože u relatívnych metód ide o porovnanie meranej veličiny so stanovenou mierou, patria k širšej skupine porovnávacích metód. Prakticky každé meranie je do určitej miery porovnávacie, pretože merať znamená určiť hodnotu meranej veličiny ako násobok meracej jednotky. Relatívne metódy zisťujú však nielen vzťah mera-

nej veličiny k príslušnej meracej jednotke, ale tiež vzťah k nejakej inej veličine toho istého druhu, ktorej hodnotu poznáme. Príkladom relatívnej metódy je určovanie svietivosti.

Z hľadiska indikácie meranej veličiny možno metódy merania rozdeliť na *priame* a *nepriame*. Priame merania sú tie, pri ktorých výsledkom merania je priamo hodnota meranej veličiny. Napríklad meranie osvetlenosti alebo jasú. Za priame metódy môžeme pokladať aj metódy využívajúce automatizované meracie zariadenia. Tieto zariadenia samočinne prevádzajú meranie hodnôt rôznych veličín viazaných známymi funkčnými vzťahmi na meranú veličinu. Pretože prídavné zariadenia dávajú priamu indikáciu meranej veličiny, môžeme príslušnú meraciu metódu považovať za priamu. Ako príklad možno uviesť automatické goniofotometre. Hlavnou charakteristikou priamych metód je, že nevyžadujú ďalšie výpočty s výnimkou tých, ktoré slúžia na určenie korekcie (opravu) meraní. Nepriamou metódou nazývame metódu, pri ktorej je hodnota určitej veličiny určovaná na základe výsledku merania priamymi metódami pomocných veličín, ktoré sú s vlastnou (nepriamo) meranou veličinou viazané známym vzťahom. Medzi nepriame metódy možno rátať napríklad meranie svietivosti Lummer – Brodhunovou hlavnicou na fotometrickej lavici.

Na podstate merania, ktoré môžeme podľa definície chápať ako číselné porovnanie meranej veličiny so stanovenou mierou (jednotkou), je založená *porovnávací (komparačná) metóda*. Metrologická kontrola meradiel svetelnotechnických veličín pomocou etalónov príslušných jednotiek predstavuje vždy porovnávanie. Porovnávací metóda má niekoľko variant, z ktorých používame *nahradzovacie (substitučné) metódy* a *vyrovnávacie (kompenzačné) metódy*. Pri substitučnej metóde sa postupne porovnáva vplyv dvoch veličín jedného druhu na údaj meracieho prístroja, prípadne sa jedna veličina reguluje tak, aby v oboch prípadoch bola výchylka meracieho zariadenia rovnaká. Napríklad pri vizuálnej fotometrii sa svietivosť môže merať na fotometrickej lavici substitučnou metódou s použitím porovnávacího svetelného zdroja. Pri fyzikálnej fotometrii sa svietivosť meria prevažne substitučnou metódou. Substitučnú metódu možno použiť s uspokojivým výsledkom, ak je postupnosť známych hodnôt porovnávací veličiny dostatočne hustá. Vyrovnávacia (kompenzačná) metóda sa používa ako časť postupu meranej veličiny. Meranú veličinu vyrovnávame (kompenzujeme) inou veličinou toho istého druhu, ktorej hodnotu buď poznáme alebo v niektorých prípadoch ani poznať nemusíme. U vyrovnávacích metód sa spravidla predpokladá súčasné pôsobenie meranej a vyrovnávacej veličiny. Ak je vyrovnanie dokonalé, potom výchylka indikačného orgánu meradla pri pripojení meranej a vyrovnávacej veličiny príde do nulovej polohy. Táto vyrovnávacia (kompenzačná) metóda sa označuje ako *nulová metóda*. Kompenzačné metódy môžu byť *optické (kompenzácia pred snímačom)* alebo *elektrické (kompenzácia za snímačom)*. Optická kompenzácia prebieha s využitím niektorej metódy zoslabovania svetla. Elektrická kompenzácia sa uskutočňuje s kompenzátormi (napríklad mostíkové metódy).

Prevažná väčšina svetelnotechnických meraní sú svojou povahou *indikačné (ukazovacie)*. Indikačné zariadenie môže pritom pracovať buď *analogovo* (údaj ukazuje ručička ukazovateľa na stupnici) alebo *digitálne* (údaj tvorí postupnosť číslic).

Meráme veličiny buď časovo stále alebo časovo premenné (*metódy konštantného a premenného svetla*). Pri vizuálnej fotometrii je stabilita svetla predpokladom porovnávania dvoch zdrojov s rovnakou farbou svetla. Vo fyzikálnej fotometrii sa metóda konštantného svetla používa pri dostatočnej intenzite osvetlenia a pri zotrvačnosti snímačov. O metóde premenného svetla hovoríme pri meraní prerušovaného svetla. Na prerušovanie svetla možno použiť napríklad rotačné clony s nastaviteľnými segmentmi. Metóda premenného svetla sa používa pri meraní malých fotoelektrických prúdov, na priame porovnávanie farebne rôznych zdrojov, ako aj pre neselektívne zoslabovanie svetla.

Špeciálne zameranie majú *jednolúčové* a *dvojlúčové metódy*. Pri jednolúčovej metóde dopadá na snímač svetlo len z jedného smeru. Pri tejto metóde sa postupne porovnáva vplyv etalónu a meraného zdroja na údaj meradla. Kvôli dosiahnutiu presných výsledkov merania pri jednolúčovej metóde treba v priebehu merania dbať na dodržanie stability všetkých prvkov meradla. Vplyv nestability svetelného toku vylučuje dvojlúčová metóda. Pri tejto metóde sa súčasne porovnáva etalón a meraný zdroj. Na porovnávanie zdrojov možno použiť jeden alebo dva snímače. Základným predpokladom pre použitie dvoch snímačov je zhodnosť ich vlastností. Pravda, v obvyklých prípadoch sa táto požiadavka len ťažko môže dosiahnuť. Preto sa uprednostňuje porovnávanie zdrojov pomocou jedného snímača. Pri vizuálnej fotometrii môžeme porovnať dva zdroje výlučne pomocou jedného snímača – oka. Pri fyzikálnej fotometrii sa jeden snímač používa len pri metóde premenného svetla. Rozdiel medzi nameranou a konvenčne pravou hodnotou meranej veličiny pri dvojlúčovej metóde je spôsobený nesymetriou meradla (napríklad nesymetriou fotometrickej doštičky vizuálneho fotometra). Vplyv nesymetrie meradla možno korigovať vhodným porovnávacím zdrojom.

Meracie metódy, pri ktorých sa meranie uskutočňuje samočinne, nazývame *automatickými meracími metódami*. Napríklad pozorovateľ pri meraní kriviek svietivosti je nahradený úplne. Samozrejme automatizáciou meracích procesov možno znížiť počet meračov, nemožno sa však bez nich obísť, pretože goniofotometre treba nastavovať a kontrolovať, čo vyžaduje spravidla vyššiu kvalifikáciu a skúsenosti.

Pod *komplexnými meracími metódami* rozumieme metódy, ktorými môžeme zistiť niekoľko hodnôt tej istej veličiny na rôznych miestach meraného objektu. S využitím metód číslicového spracovania obrazovej informácie CCD kamery s vysokým rozlíšením môžeme uskutočniť meranie viacerých veličín na jednom alebo rôznych miestach objektu.

Literatúra

- [1] Tichodejev, P. M.: Svetovye izmerenia v svetotechnike. Moskva-Leningrad 1962
- [2] Keitz, H. A. E.: Lichtberechnungen und Lichtmessungen. Eindhoven 1968
- [3] Horňák, P.: Meranie svetla a farieb. Bratislava 1971
- [4] Helbig, E.: Grundlagen der Lichtmesstechnik. Lipsko 1971
- [5] Horňák, P. – Trembač, V. V. – Ajzenberg, J. B.: Svietidlá a svetelné zdroje. Bratislava–Praha 1983
- [6] Šidenlár, V. a kol.: Základy obecné metrológie. Praha 1984
- [7] Horňák, P.: Svetelná technika. Bratislava–Praha 1989
- [8] Horňák, P.: Svetelné normály. Jemná mechanika a optika, 2004/ 6
- [9] Horňák, P.: Fotometrické integrátory. Jemná mechanika a optika, 2004/ 6
- [10] Horňák, P.: Meranie rovinatej osvetlenosti pri rôznych experimentoch. Jemná mechanika a optika, 2004/ 7-8
- [11] Horňák, P.: Orientačné porovnanie rôznych goniofotometrov. Elektrotechnika v praxi, 2004/ červenec - srpen
- [12] Horňák, P.: Ako objektívne zisťovať skutkový stav? EE - časopis pre elektrotechniku a energetiku. (Mimoriadne číslo – vydanie ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika a informatika 2004), 2004/ október
- [13] Horňák, P.: Meranie kriviek svietivosti. Jemná mechanika a optika, 2005/3
- [14] Horňák, P.: Základné spôsoby merania jasú. Jemná mechanika a optika, 2005/5
- [15] Horňák, P.: Určenie svetelného toku zdrojov. Jemná mechanika a optika, 2005/9
- [16] Horňák, P.: Určovanie svetelného toku jednopäťcových žiaroviek. SVĚTLO, 2005/6
- [17] Katalógové listy meracích prístrojov (www.lmt.de, www.pre-krochmann.de, www.technoteam.de).

| | |
|--|-----|
| Tangential X-ray imaging (R. Hudec)..... | 203 |
| Application of nonlinear optimization methods for interpretation of mode spectra in planar waveguides (O. Bárta, J. Pištora, J. Vlček, F. Staněk, T. Kreml) | 211 |
| The paper is focused into the area of experimental research of planar waveguide structures. Dark mode spectroscopy technique, which is based on excitation of guided modes, is presented here in detail. The physical aspects of the method are shortly described with a special focus on coupling prism theory. The main attention of our contribution is devoted to the application of new mathematical optimization methods related to guided modes and the determination of refractive indices and thicknesses of thin films. Keywords: planar waveguide structure, prism coupling, dark mode spectroscopy, non-linear optimization | |
| System for determining actual technical condition of spinning machinery continuous process dynamic stress (R. Krehel) | 218 |
| Integral part of this process is mainly evaluation of vibrations degree and behavior during actual service. Vibrodiagnostics use vibrations as a diagnostic parameter which are caused by dynamic stress to machine. This very diagnostic parameter gives information for determining actual technical condition of spinning machinery. Primary objective of machinery vibration monitoring is to supply information about machinery operating and technical condition in order to ensure strategic maintenance planning and managing. | |
| Elastic hinges in design and practice (J. Maršík) | 220 |
| Designers have to solve every day simple problem, how to achieve relative motion of two components. Standard solution is based upon application of friction or rolling. Final mechanism contains many components, needs maintenance and brings risk of hysteresis, which is critical especially in precision mechanics applications. Many of these obstacles can be overcome if using elastics deformation. Such application is called elastic hinge. This article shows simple ways how to calculate elastic hinges and gives few hints in their design process. | |
| Basic facts about trade-fair in Nitra (P. Horňák) | 223 |
| Laser – a new era beginning (D. Senderáková) | 224 |
| Physical research, which in 1960 enabled the first laser to be constructed and to generate the first laser beam, put light possessing unique feature into the human hands. It was coherent light, which opened entirely new possibilities, even never contemplated before for both, the research and | |
| everyday life. The paper is to explain in a simply way what is the unique of laser light based on and how it can be obtained. Besides, a short overview of practical usage of lasers today is mentioned. There is such a variability of laser utilization that the 21st century is sometimes said to be the photon century, like the the 20th one used to be called the electron century. Key words: laser, light emission, light absorption, coherence, optical technologies | |
| Standardisers' panel in Slovakia (P. Horňák)..... | 228 |
| Holography – 3D picture, indeed (D. Senderáková)..... | 229 |
| Invention of a laser brought entirely new kind of light. People could have obtained such a light of very low intensity before in a very labour some way. It is coherent light. People need it to perform interference and diffraction of light, which had already been of practical use before laser was at hand. Laser made practical usage of these phenomena much more easy. Simultaneously, a brand-new kind of optical recording was born – holography. It is to explain recording and reconstruction of holograms in a simply way and show the most important properties of them. | |
| Optical flow and its new calculation using EMF (J. Kokeš) | 232 |
| Paper describes a new method of optical flow computation. This method is based on empiric modal functions developed in HHT. Main advantage of new approach is a substantially lower computational complexity compared to classic Lucas-Kanade algorithm, as well as lower sensitivity to noise and to distortion. Compared to similar older approach based on windowed Fourier transform, presented method gains better spatial resolution. | |
| Pierre Auger Observatory has already started to share cosmic radiation data with public and students | 236 |
| Complementary Czech participation in Pierre Auger project | 236 |
| EQUOTIP – Hardness measurement by dynamical method (Č. Nenáhlo)..... | 237 |
| 75th birthday of associate professor Jan Eigl (A. Mikš) | 238 |
| Measurement methods for photometric quantities (P. Horňák) | 238 |
| New Approach in Technology Education - Development and Integration of European Modules in Technology Education (K. Nevřalová) | 240 |

Nové přístupy v technologickém vzdělávání – Vývoj a integrace evropských modulů v technologickém vzdělávání

TR 05 B F PP 178 009

Hlavním cílem projektu Leonardo da Vinci je vývoj a uplatnění inovativních přístupů v technologickém vzdělávání, v systému zajištění jeho kvality a adaptace na nové kvalifikační požadavky trhu práce v rámci flexibilních osnov vytvořených prostřednictvím mezinárodní spolupráce vzdělávacích a profesionálních center.

Současný stav projektu:

- Byly dokončeny analytické fáze ve všech zúčastněných zemích a výstupy analýz jsou dostupné na internetové stránce projektu www.modularte.gazi.edu.tr
- Byl navržen nový systém technologického vzdělávání ve formě hlavních modulů a pod-modulů. Byly vytvořeny a zkompletovány vzdělávací materiály a nástroje.
- Dostupné produkty jsou nyní překládány do jednotlivých jazyků a od září letošního roku budou nabízeny zainteresované veřejnosti.

- V listopadu 2007 se bude konat závěrečná konference v turecké Ankaře, kde budou oficiálně všechny výstupy projektu představeny.

Hlavní systém modulů tvoří: Základy, Systémy a procesy, Informace/komunikace, Socio-technologie a Didaktika technologie.

Český zástupce v projektu, společnost Euroface Consulting s.r.o., vytvořil mimo jiné webovou vizualizaci počítačové sítě a komponentů v ní obsažených. Produkt je dostupný na www.euro-face.cz/modularte.

Projektové partnerství tvoří:

- Gazi University, Turecko
- Euroface Consulting s.r.o., Česká republika
- Universität Duisburg – Essen, Německo
- C.V.T. Georgiki Anaptixi, Řecko
- STEP Training, Španělsko
- ARIES Formazione, Itálie
- Todor Kableshkov VTU, Bulharsko
- Tichý partner: WOCATE (Europäische Gesellschaft für Technische Bildung)

Kontakt: Ing. Kateřina Nevřalová, tel.: 777 011 717, management@euro-face.cz

Česko-americký seminář o astronomické rentgenové optice

Návštěva z americké NASA v ČR

Praha a Rožnov pod Radhoštěm, 14. - 19. 5. 2007

V rámci spolupráce se skupinou Astrofyziky vysokých energií na ASÚ AV ČR v Ondřejkově a spolupracujícími pracovišti navštívila Českou republiku šestičlenná skupina předních odborníků na astronomické rentgenové teleskopy z USA. Jejich návštěva se týkala spolupráce v oblasti astronomické rentgenové optiky a to především s výhledem pro dva významné kosmické projekty NASA – Constellation X a Generation X. Většina z hostů se již podílela na přípravě družice Chandra.

Dva odborníci z Goddard Space Flight Center (GSFC) NASA Dr. Rob Petre a Dr. William Zhang a čtyři z Harvard – Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) v Cambridge Prof. Paul Reid, Dr. Dan Schwarz, Prof. Martin Elvis a Dr. Michael Juda strávili v České republice pět nabitých dní věnovaných jak semináři, tak návštěvám pracovišť a jednáním, jejichž účelem bylo představit americkým vědcům naše znalosti, zkušenosti a technologie ve zmiňovaném oboru, které by mohly být aplikovány v amerických kosmických projektech Constellation X a Generation X.

Hlavní část semináře se konala na Fakultě strojní ČVUT v Praze, kde došlo i k setkáním s představiteli ČVUT a FS ČVUT. Mezi další navštívená pracoviště patřil ASÚ AV ČR, VŠCHT, ON Semiconductor Czech Republic a Centrum špičkových rentgenových technologií Reflex Praha. Další části semináře se uskutečnily v ON Semiconductor a na VŠCHT.

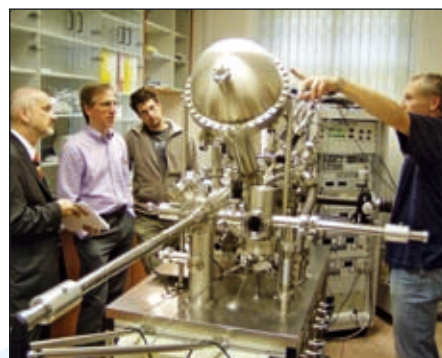
Pro příští rok je v Praze plánován větší mezinárodní workshop na téma vývoje nových technologií pro budoucí kosmické rentgenové dalekohledy.



Setkání pracovníků NASA a CfA s předsedou Akademie věd ČR v Praze prof. Václavem Pačesem.



Dr. Rob Petre, vedoucí laboratoře rentgenové astrofyziky na NASA GSFC, v hovoru s děkanem Fakulty strojní ČVUT prof. Františkem Hrdličkou.



Prof. Martin Elvis a Dr. Michael Juda při návštěvě laboratoří VŠCHT.



Setkání s rektorem a prorektory VŠCHT Praha prof. Vlastimilem Růžičkou, prof. Jitkou Moravcovou a prof. Bohumilem Bernauerem.

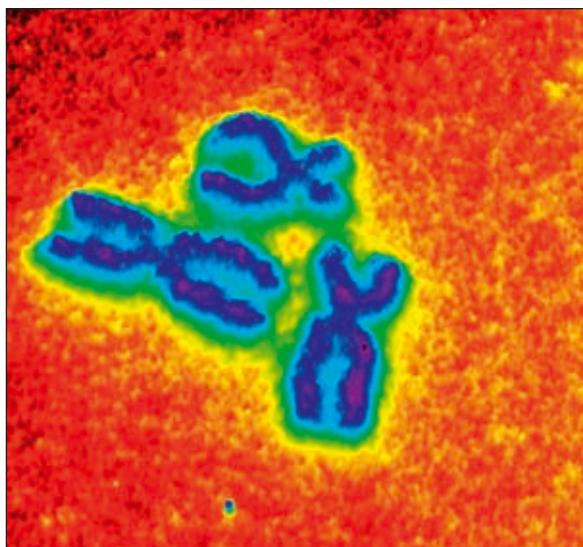
Rastrovací hrotové mikroskopy Agilent Technologies

Společnost H TEST a.s. rozšířila svoji nabídku testovacích systémů i o produkty divize Agilent Materials Sciences Solutions tj. AFM (Atomic Force Microscopy)/SPM (Scanning Probe Microscopy) rastrovací mikroskopy.

Zásadní výhodou technologie AFM oproti elektronovým mikroskopům je, že měřené vzorky nemusí být vodivé! S technologií AFM lze dosáhnout rozlišení až v řádu jednotek nanometrů.

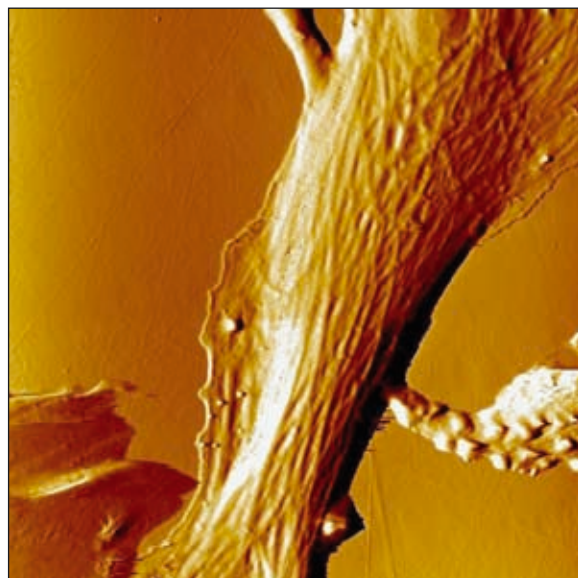
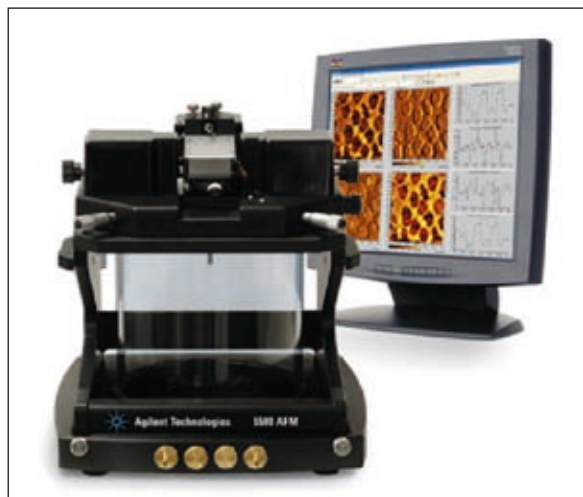
Systémy Agilent se uplatní v:

- elektrochemii
- nanolitografii
- aplikacích s polymery
- biotechnologiích
- medicíně



Série 5500 AFM/SPM

AFM mikroskop Agilent 5500 je vrcholný víceúčelový výzkumný mikroskopický systém pro AFM a SPM. Modulární koncepce této série dovoluje jednoduchou integraci stojanu pro velké vzorky až 150 x 200 mm (LS), invertovaného mikroskopu (ILM), scannerů pro malé i velké zobrazované plochy, adaptérů pro uchycení vzorků, soupravy pro elektrochemii nebo video mikroskopu.



Série 5100 AFM/SPM

AFM mikroskop Agilent 5100 je vhodný pro uživatele, kteří nepotřebují plnou funkčnost vrcholného modelu Agilent 5500, a přesto vyžadují možnost plné kontroly prostředí, ve kterém se nachází měřený vzorek. Pro plnou kontrolu prostředí, ve kterém se nachází měřený vzorek, je k dispozici volitelná hermeticky uzavřená komora a teplotně regulovaný adaptér pro uchycení vzorků.

- Velikost vzorku 20 mm x 20 mm
- Kontrola teploty a prostředí

Série 5400 AFM/SPM

Nový AFM mikroskop Agilent 5400 AFM/SPM je velmi přesný univerzální přístroj za dostupnou cenu, určený zejména pro oblast vzdělávání a výzkumu, a představuje tak ideální možnost zpřístupnění AFM technologie širokému spektru potenciálních uživatelů. Mikroskop je dodáván s podklady pro výuku AFM včetně vzorků pro experimenty.

- Velikost vzorku 20 mm x 20 mm
- Kontrola teploty

Kontaktní informace:

H TEST a.s.

Na okraji 44B
162 00 Praha 6
Tel.: 235 365 207, 204
Fax: 235 363 893
E-mail: info@htest.cz



www.htest.cz
www.agilent.com/find/nanotech



Agilent Technologies

Authorized Distributor