

11 - 12
2008

JMO

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA FINE MECHANICS AND OPTICS



ISSN 0447-6441
Index 46 723

MĚŘICÍ TECHNIKA PRO KONTROLU JAKOSTI



Česká metrologická společnost pořádá ve dnech 18. a 19. března 2009 v Plzni (Dům kultury INWEST) mezinárodní konferenci *Měřicí technika pro kontrolu jakosti*. Konference je spojena s rozsáhlou výstavou měřicí, kontrolní a zkušební techniky z oblasti strojírenských měření (délky, ne-geometrické veličiny, přístroje pro zkoušky materiálu, NDT, přístroje pro kalibraci měřidel a systémy pro řízení a kontrolu technologických procesů. Výstava bude otevřena po celou dobu konání konference. Na konferenci navazuje fakultativní program (20. března 2009), jehož součástí bude workshop *Měření elektrických a neelektrických měření* na FEL ZČU, a konzultační den, spojený s prohlídkou kalibračních laboratoří a zkušeben.

Konference je určena pro pracovníky útvarů řízení kvality, technické kontroly a metrologie, metrologických laboratoří, zkušební techniky, technology a pro učitele vysokých a středních škol příslušného zaměření.

Bližší informace o mezinárodní konferenci *Měřicí technika pro kontrolu jakosti* poskytne sekretariát ČMS (paní Ivana Vidimová), číslo telefonu/faxu 221 082 254, e-mail: cms-zk@csvts.cz nebo přímo na adrese: Česká metrologická společnost, Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1. Úplná nabídka odborných akcí ČMS je na internetové adrese ČMS: www.csvts.cz/cms.

*Příjemné prožití svátků vánočních, hodně zdraví
a spokojenosti v novém roce*

přeje

*redakce časopisu *Jemná mechanika a optika**

PF 2009

REDAKČNÍ RADA

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

Členové: RNDr. Ing. Ján BARTL, CSc., ÚM SAV, Bratislava, prof. RNDr. Dr. Zdeněk BOUCHAL, UP, Olomouc, Ing. Igor BREZINA, Bratislava, prof. Ing. Pavol HORNÁK, 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, prof. Ing. Martin LIBRA, CSc., ČZU, PRAHA, prof. RNDr. Miroslav LIŠKA, DrSc., VUT, Brno, RNDr. Zdeněk LOŠŤÁK, Meopta-optika, s.r.o., Přerov, prof. Ing. Petr LOUDA, CSc., TU, Liberec, RNDr. František MÁČA, CSc., FZÚ AV ČR, v.v.i., Praha, 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 STUDENOVSKÝ, DrSc., ČVUT, Praha, prof. RNDr. Anton ŠTRBA, CSc., UK, Bratislava

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

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

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

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

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

Šéfredaktor: dipl. tech. Jaroslav NEVŘALA

Adresa redakce v Olomouci (předplatné, nakladatelské služby):

SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc,

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

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

tel.: 581 242 151, mobil: 776 011 925, fax: 581 242 222.

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

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

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

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

V Slovenské republice je kontaktní místo: prof. RNDr. Anton Štrba, CSc.,

katedra experimentální fyziky FMFI UK, Mlynská dolina F2/148,

SK - 842 48 Bratislava, tel.: 00421 2 65 426 706,

e-mail: Strba@fmph.uniba.sk

V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá:

prof. Ing. Ivo Čáp, CSc., Žilinská univerzita - FPV, Hurbanova 15,

SK - 010 26 Žilina, tel.: +421 415 136 350, e-mail: ivo.cap@fpv.utc.sk

Tiskne TYPOservis Holešov, Masarykova 650, 769 01 Holešov,

tel.: 573 398 746, e-mail: dtp@typoservis.cz

Inzerce: redakce, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov,

tel.: 581 242 151, mobil: 776 011 925, fax: 581 242 222.

Odborné články jsou lektorovány.

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2008

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS
ROČNÍK 53 11 - 12/2008

OBSAH

- Výuka a vědeckovýzkumná činnost v optických disciplínách na Institutu fyziky VŠB – TU Ostrava** (J. Pištora, J. Vlček, M. Lesňák)291
- Vliv použitého modelu odrazivosti na určení velikosti tloušťky tenké vrstvy** (M. Luňáčková, J. Luňáček, D. Ciprian, P. Hlubina)293
- Diagnostické meranie vibrácií pri hodnotení vplyvu opotrebenia fokusačnej trubice počas hydroabrazívneho delenia hliníka** (S. Hloch, J. Valíček)295
- Počítačová simulácia systému na bezkontaktné snímání kmitavosti rotačných a posuvných konštrukčných častí v strojoch a zariadeniach** (R. Krehel).....298
- Laserový komparátor pro kalibraci délkových snímačů** (O. Číp, M. Čížek, Z. Buchta, B. Mikel, J. Lazar, J. Kůr, R. Wíttek, P. Konečný, D. Smutný, P. Balling P. Křen)301
- Transmisní fázové holografické mřížky** (Š. Němcová, P. Václavík)303
- Mechanismus chladnutí nápojů – srozumitelný fyzikální popis** (J. Sedláček, J. Dolejší)307
- Životné jubileum RNDr. Dagmar Senderákovéj, CSc.** (V. Mesároš, A. Štrba)310
- Interferometrické metody vyhodnocování fáze vlnového pole v optice** (J. Novák, P. Novák).....311
- Šestá mezinárodní konference Photonics Prague 2008** (P. Tománek).....318
- Vybrané trendy v oblasti interferometrických metod pro kontrolu optiky** (J. Novák, P. Novák, A. Mikš).....320
- Zemřel RNDr. Vladimír Mališek, CSc.** (J. Pospíšil).....325
- Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc. – Fellow of EOS** (M. Jedlička).....326
- Z technické knihovny** (I. Brezina).....327
- Obor Optika a optometrie na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT** (B. Brůnová, J. Novák).....328

Bližší informace o poslání časopisu, pokyny pro autory, obsah časopisu apod. je uveden na internetu:

<http://www.fzu.cz/struktura/casopisy/jemnam/jemname.php>

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

Cena čísla 40 Kč včetně DPH

ADVISORY BOARD

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

Members: Ján BARTL - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Zdeněk BOUCHAL - Palacky Univ. (Czech Rep.), Igor BREZINA - Bratislava (Slovak Rep.), Pavol HORNÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav HRABOVSKÝ - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP - Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRABÍK - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch KŘESÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Bohumila LENCOVÁ - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric. Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠTÁK - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), František MÁCA, Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Monika MÍCHALOVÁ, 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 SENDERÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Petr SCHOVÁNEK - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Karel STUDENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

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

FINE MECHANICS AND OPTICS

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

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

Editor: Miroslav HRABOVSKÝ

Managing Editor: Jaroslav NEVŘALA

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

Address of the Editor's office in Přerov (Managing Editor):

Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, Czech Republic.

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

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

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

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

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

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

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2008

FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL
VOLUME 53 11 - 12/2008

CONTENTS

Education and research in optical fields at Institute of Physics, VSB-Technical University of Ostrava (J. Pištora, J. Vlček, M. Lesňák)..... 291

Effect of the reflectance model on determination of the thin-film thickness (M. Luňáčková, J. Luňáček, D. Ciprian, P. Hlubina).....293

Diagnostic measurement of vibrations in assessment of focusing tube wear during hydro-abrasive splitting of aluminium (S. Hloch, J. Valíček).....295

Computer simulation of the system for non-contact vibration scanning of rotating and sliding machine and device parts (R. Krehel).....298

Laser comparator for calibration of length sensors (O. Číp, M. Čížek, Z. Buchta, B. Mikel, J. Lazar, J. Kůr, R. Wíttek, P. Konečný, D. Smutný, P. Balling P. Křen)301

Transmission Phase Gratings on Silver-Halide Materials (Š. Němcová, P. Václavík)303

Cooling Mechanism of Drinks - an Understandable Physical Description (J. Sedláček, J. Dolejší)307

RNDr. Dagmar Senderáková, CSc.'s anniversary (V. Mesároš, A. Štrba)310

Interferometric methods for phase evaluation of wave field in optics (J. Novák, P. Novák)311

Sixth International Conference Photonics Prague 2008 (P. Tománek).....318

Selected trends in the field of interferometric methods for optical control (J. Novák, P. Novák, A. Mikš).....320

RNDr. Vladimír Malíšek, CSc. deceased (J. Pospíšil).....325

Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc. - Fellow of EOS (M. Jedlička).....326

From technical library (I. Brezina)327

Optics and Optometry - field of study at the Faculty of Biomedical Engineering, Czech Technical University in Prague (B. Brůnová, J. Novák)328

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

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

Price for single copy: 40 Kč incl. VAT

Výuka a vědeckovýzkumná činnost v optických disciplínách na Institutu fyziky VŠB – TU Ostrava

Příspěvek je věnován stručnému pohledu na výuku optických disciplín, které jsou garantovány Institutem fyziky VŠB-TU Ostrava. Druhá část specifikuje vybrané vědecko-výzkumné aktivity odborné skupiny optiky a nanostruktur.

Klíčová slova: výuka optických disciplín, výzkumné aktivity, optika, nanostruktury

PEDAGOGICKÁ OBLAST

Teoretickou a experimentální optiku lze ve vybraných předmětech studovat v bakalářském a magisterském studijním oboru Aplikovaná fyzika materiálů a v doktorském programu Aplikovaná fyzika.

V roce 2006 byl akreditován celouniverzitní studijní program Nanotechnologie (na úrovni bakalářské a magisterské) se dvěma profilujícími orientacemi: Fyzikální inženýrství nanomateriálů a Nanotechnologie v chemickém inženýrství. Studium oboru Nanotechnologie na VŠB-TU Ostrava má výrazný multidisciplinární charakter, vychází z přírodovědných (zejména fyzikálních a chemických) disciplín a inženýrských přístupů a opírá se o personální a laboratorní zázemí navrhovatelských pracovišť.

Základním cílem studia oboru Nanotechnologie je seznámit studenty s revolučními vlastnostmi nanostruktur, nanopřístrojí a možnostmi jejich uplatnění v blízké budoucnosti v rámci tří základních modulů:

1. technologie nanostrukturovaných materiálů, jejich příprava a syntéza;
2. aplikace nanostruktur v optice, magnetismu, chemii, elektronice a mechanice;
3. měřicí a analytické techniky pro nanostrukturované materiály.

Na realizaci oboru se podílí pět pracovišť VŠB-TUO: jsou to především Institut fyziky Hornicko-geologické Fakulty a Vysokolekolský ústav chemie materiálů (CNT) - garantují většinu předmětů, dále Institut dopravy a katedra mechanické technologie Fakulty strojní, katedra neželezných kovů, rafinace a recyklace Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství a katedra elektroniky a telekomunikační techniky Fakulty elektrotechniky a informatiky.

Absolventi bakalářského studijního programu naleznou uplatnění v organizacích a institucích orientovaných na výrobu, testování a prodej zařízení a prvků v elektronice a mikroelektronice, v optice, v technologických základnách nanomateriálů a nanostruktur, v jemné mechanice a strojírenství, v bioprůmyslu a v chemických provozech podniků a výzkumných institucí.

U navazujícího magisterského studijního programu se předpokládá uplatnění v organizacích orientovaných na výzkum a vývoj, výrobu, testování a prodej zařízení a prvků v elektronice a mikroelektronice, v optice, v technologických základnách nanomateriálů a nanostruktur, v jemné mechanice a strojírenství, v bioprůmyslu, biotechnologiích a farmaceutickém průmyslu, v institucích zaměřených na výzkum a vývoj nových materiálů ve farmacii, kosmetice, potravinářství a v chemickém inženýrství.

Detailnější informace o uvedeném celouniverzitním studijním programu lze najít na adrese: <http://www.vsb.cz/okruh/studium/usp>.

VĚDA A VÝZKUM

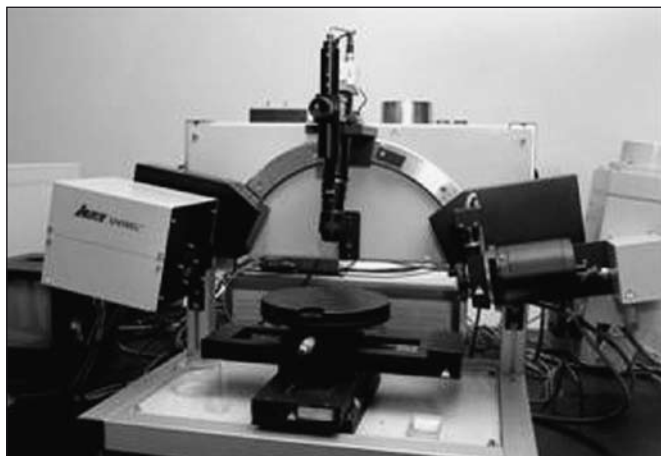
Do léta roku 2008 byly vědeckovýzkumné aktivity v oblasti optiky realizovány ve čtyřech specializovaných laboratořích Institutu fyziky VŠB-TUO. Od září 2008 naše odborná skupina získala sedm nových laboratorních objektů v rámci nově vybudovaného Centra pokročilých inovačních technologií (obr. 1).



Obr. 1 Areál Centra pokročilých inovačních technologií

Laboratoř vláknové optiky a interferometrie je zaměřena na zkoumání vlnovodných vlastností standardních a speciálních optických vláken, popř. měření optických vlastností transparentních materiálů interferenčními metodami.

Interferenční sestava pro měření disperzních charakteristik standardních a speciálních (např. mikrostrukturních) optických vláken využívá Michelsonova interferometru se zdrojem bílého světla. Měření je vyhodnoceno počítačem, který umožňuje okamžité snímání interferogramů.



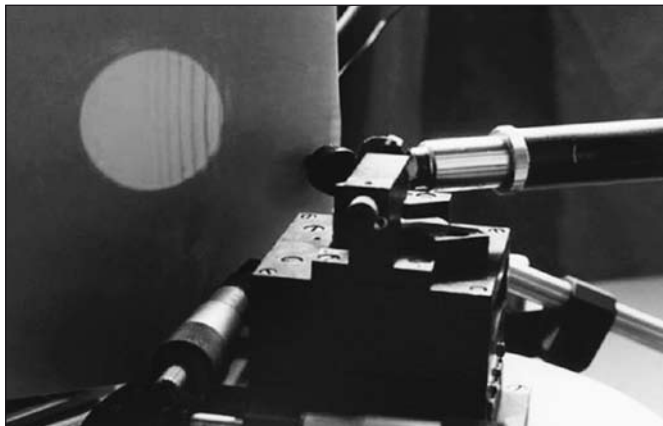
Obr. 2 Elipsometr UVISEL

Interferenční sestava pro měření disperzních charakteristik transparentních optických materiálů využívá Machova-Zehnderova interferometru.

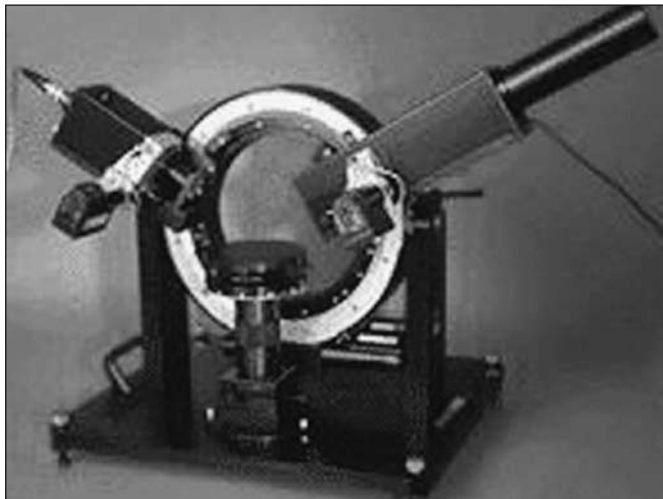
Základním prvkem *Laboratoře spektroskopické elipsometrie* je elipsometr UVISEL (Horiba- Jobin-Yvon – obr. 2). Zařízení pokrývá viditelnou, blízkou infračervenou a ultrafialovou spektrální oblast v rozsahu vlnových délek 190 nanometrů až 2100 nanometrů. Hlavní využití přístroje spočívá ve studiu ultratenkých vrstev, povrchů a nanostruktur, v určování tloušťek tenkých vrstev a také ve studiu anizotropií multivrstevných systémů.

Laboratoř magnetooptiky a vlnovodné techniky je zaměřena na zkoumání magnetických vlastností tenkovrstevných systémů nedestruktivními metodami za pomoci polarizovaného světla. Pro tento účel zde slouží tři měřicí aparatury.

Aparatura pro vidovou spektroskopii využívá vlnovodné procesy v planárních tenkovrstevných systémech. Pomocí vlnovodné techniky je možno určit tloušťky vrstev ve studovaných systémech a optické konstanty aplikovaných materiálů (obr. 3).



Obr. 3 Experimentální sestava pro tmavou vidovou spektroskopii – centrální část



Obr. 4 Experimentální sestava pro SPR měření (Optrel GbR)

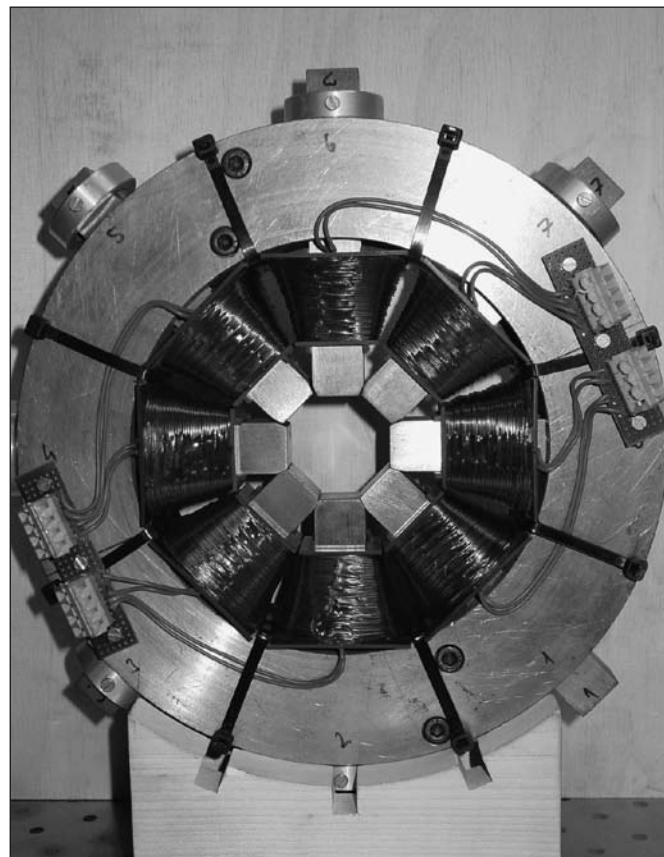
Aparatura pro magneto-optickou vektorovou magnetometrii se používá ke studiu procesů spojených s magnetizačními jevy v tenkých vrstvách. Využívá se Kerrova jevu (v transverzálním a longitudinálním uspořádání), který přináší informaci o chování vektoru magnetizace.

Aparatura pro magneto-optickou spektrální elipsometrii využívá polárního Kerrova jevu. Zde se měří magneto-optická odezva studovaného systému v saturovaném ustáleném stavu. Měření se provádí v spektrálním oboru viditelného světla. Na základě takových měření je možno určit magneto-optické konstanty zkoumaného materiálu.

Všechny tyto metody spolu poskytují možnost komplexního přístupu ke studiu vybraných parametrů látek, které vykazují magnetické uspořádání.

Laboratoř SPR je vybudována na základě systému Multiskop (Optrel – obr. 4). Realizovaná měření vycházejí z rezonanční excitace povrchových plasmonových vln. Sestava využívá vazebního hranolu a je doplněna modulárním prvkem, který rozšiřuje experimentální možnosti i do studia kapalných médií.

Kromě výše uvedených aktivit se pracovníci Institutu fyziky VŠB-TUO zabývají i modelováním a konstrukčními návrhy generátorů pro magneto-optická měření. Jeden z prototypů těchto zdrojů je zachycen na obrázku 5.



Obr. 5 Generátor magnetického pole pro magnetooptiku – typ O-ring

Prof. Ing. Jaromír Pištora, CSc., Institut fyziky, VŠB-TU, Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava Poruba, jaromir.pistora@vsb.cz, tel.: 597 323 12

Doc. RNDr. Jaroslav Vlček, CSc., katedra matematiky a deskriptivní geometrie, VŠB-TU, Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava Poruba, jaroslav.vlcek@vsb.cz, tel. 597 324 176

Doc. Dr. Ing. Michal Lesňák, Institut fyziky, VŠB-TU, Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava Poruba, michal.lesnak@vsb.cz, tel.: 597 325 206

Vliv použitého modelu odrazivosti na určení velikosti tloušťky tenké vrstvy

Práce prezentuje vliv použitých různých modelů odrazivosti systému tenká vrstva - podložka na vypočtení tloušťky tenké vrstvy. V prostředí Matlabu je vytvořen program, který pomocí obecného modelu vypočte teoretický průběh spektrální odrazivosti v závislosti na vlnové délce pro zvolenou tloušťku tenké vrstvy. Takto vypočtená odrazivost, která v další fázi studia simuluje naměřenou odrazivost, je zpracována dalším programem v Matlabu, který simulované (naměřené) reflexní spektrum fituje spektrem teoretickým, kde fitovaným parametrem je tloušťka vrstvy. Ve vstupních souborech fitovaného teoretického reflexního spektra jsou použity různé kombinace disperzních a nedisperzních optických parametrů systému tenká vrstva – podložka a je sledován jejich vliv na hodnotu vypočtené tloušťky tenké vrstvy.

Klíčová slova: Fresnelovy vztahy, spektrální odrazivost, tenká vrstva, disperze

1. ÚVOD

Základními parametry a charakteristikami tenké vrstvy jsou její tloušťka a závislost optických konstant vrstvy na vlnové délce světla [1, 2]. Existuje řada optických metod, které se používají pro měření těchto parametrů a charakteristik. Mezi nepoužívanější metody patří elipsometrie [2], reflektometrie [3] a interferometrie [4]. Elipsometrická měření jsou buď monochromatická, nebo spektrální využívající různě široký rozsah vlnových délek. Podobně lze použít i metodu spektrální interferometrie a reflektometrie. Pro měření silnějších vrstev v řádu mikrometrů se s výhodou používá infračervená Fourierova spektroskopie.

Tento článek ukazuje teoretický rozbor různých modelových aproximací vrstvy a podložky v modelu spektrální odrazivosti a jejich vliv na výpočet tloušťky tenké vrstvy. Konkrétně byl studován systém tenké vrstvy SiO₂ na křemíkové monokrystalické podložce v širokém rozsahu vlnových délek 185 – 3100 nm, který je typický např. pro komerční spektrální reflektometr Schimadzu UV-3600.

2. TEORETICKÝ ZÁKLAD

Teoretický model spektrální odrazivosti vychází z toho, že světlo dopadá na povrch tenké vrstvy, která vznikla na monokrystalické podložce (obr. 1). Za předpokladu, že na rozhraních obou prostředí dochází k vícenásobnému odrazu, můžeme pro komplexní reflexní koeficient psát rovnici [1]:

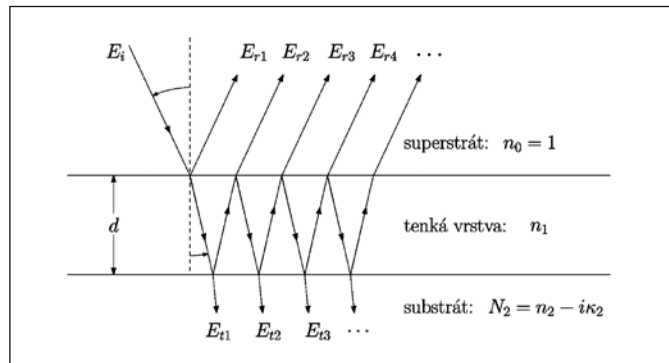
$$r(\lambda) = \frac{r_{01}(\lambda) + r_{12}(\lambda) \exp[i2\beta(\lambda)]}{1 + r_{01}(\lambda)r_{12}(\lambda) \exp[i2\beta(\lambda)]}, \quad (1)$$

kde $r_{01}(\lambda)$ a $r_{12}(\lambda)$ představují komplexní Fresnelovy reflexní koeficienty obou rozhraní a $\beta(\lambda)$ určuje fázovou změnu při průchodu světla tenkou vrstvou mezi horním a spodním rozhraním.

Jestliže dále předpokládáme, že světlo dopadá na vrstvu kolmo, superstrátem je vzduch, vrstva je neabsorbující a podložka absorbuje, pak pro koeficienty $r_{01}(\lambda)$ a $r_{02}(\lambda)$ v rovnici (1) platí následující vztahy:

$$r_{01}(\lambda) = \frac{1 - n_1(\lambda)}{1 + n_1(\lambda)}, \quad (2)$$

$$r_{12}(\lambda) = \frac{n_1(\lambda) - N_2(\lambda)}{n_1(\lambda) + N_2(\lambda)}, \quad (3)$$



Obr. 1 Model neabsorbující vrstvy na absorbující podložce při započtení vícenásobných odrazů. E_i je intenzita elektrického pole dopadajícího světla, E_{0i} a E_{1i} jsou intenzity elektrického pole odraženého, resp. prošlého světla

kde $n_1(\lambda)$ je spektrálně závislý index lomu tenké vrstvy a $N_2(\lambda) = n_2(\lambda) - ik_2(\lambda)$ je komplexní index lomu podložky, kde reálná část představuje index lomu a imaginární část extinkční koeficient. Fázová změna $\beta(\lambda)$ při kolmém dopadu světla se určí ze vztahu:

$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} n_1(\lambda) d, \quad (4)$$

kde d je tloušťka tenké vrstvy.

Odrazivost $R(\lambda) = |r(\lambda)|^2$ se vypočte ze vztahů (1) až (3) a platí:

$$R(\lambda) = \frac{r_{01}^2(\lambda) + |r_{12}(\lambda)|^2 + 2r_{01}(\lambda)|r_{12}(\lambda)| \cos[2\beta(\lambda) + \phi(\lambda)]}{1 + r_{01}^2(\lambda)|r_{12}(\lambda)|^2 + 2r_{01}(\lambda)|r_{12}(\lambda)| \cos[2\beta(\lambda) + \phi(\lambda)]}, \quad (5)$$

kde $r_{01}(\lambda)$ je reálný reflexní koeficient, $r_{12}(\lambda) = |r_{12}(\lambda)| \exp(i\phi)$ je komplexní reflexní koeficient a $\phi(\lambda)$ je jeho fáze.

Spektrální index lomu $n_1(\lambda)$ neabsorbující vrstvy lze vypočítat pomocí standardní Sellmeierovy formule:

$$n_1^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - B_i}, \quad (6)$$

kde A_i a B_i jsou koeficienty závislé na druhu materiálu.

2. URČENÍ TLOUŠŤKY TENKÉ VRSTVY Z RŮZNÝCH MODELŮ ODRAZIVOSTI

V programovém prostředí Matlabu byl vytvořen program, který podle rovnic (1) až (6) vypočte a nakreslí spektrální odrazivost $R(\lambda) = f(\lambda)$ pro libovolně zvolenou tloušťku tenké vrstvy. Takto vypočtená odrazivost, která simuluje naměřenou odrazivost, byla zpracována dalším programem v Matlabu, který simulované (naměřené) reflexní spektrum fituje spektrem teoretickým, kde fitovaným parametrem je tloušťka vrstvy. Přesnost fitování je vyjádřena pomocí korelačního koeficientu R . V tomto programu lze měnit data vstupních souborů, tj. započíst, resp. nezapočíst disperzi indexů lomu vrstvy a podložky, a studovat jejich vliv na velikost fitované tloušťky. Pro porovnání byla tloušťka vrstvy vypočtena také z poloh extrémů závislosti $R = f(1/\lambda)$.

2.1. Výpočet z poloh extrémů

Při určování tloušťky vrstvy pouze z poloh extrémů v závislosti odrazivosti $R = f(1/\lambda)$ se obvykle v první aproximaci předpokládá neabsorbující podložka ($\phi = 0$) a podmínka v rovnici (5) $\cos[2\beta(\lambda)] = \pm 1$. Započteme-li ve výpočtu vliv disperze vrstvy, pak se tloušťka určí podle rovnice:

$$d = \frac{\Delta m}{2} \frac{1}{[(1/\lambda_2)n_1(\lambda_2) - (1/\lambda_1)n_1(\lambda_1)]}, \quad (7)$$

kde $n_1(\lambda_1)$ a $n_1(\lambda_2)$ jsou indexy lomu vrstvy pro vlnové délky odpovídající příslušným extrémům, $1/\lambda_2$ a $1/\lambda_1$ jsou vlnočty příslušných extrémů a Δm je celé číslo, které zohledňuje jejich vzájemnou polohu.

Zanedbáme-li vliv disperze vrstvy, platí jednodušší rovnice:

$$d = \Delta m \frac{1}{2n_1[(1/\lambda_2) - (1/\lambda_1)]}, \quad (8)$$

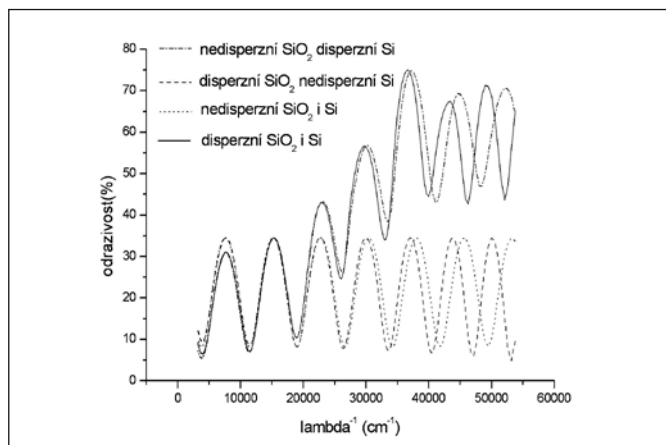
kde n_1 je index lomu vrstvy, který je na vlnové délce nezávislý.

2.2. Výpočet z modelu odrazivosti

Pro výpočet tloušťky vrstvy z modelu odrazivosti použijeme jako výchozí rovnice (1) až (6). V dalším rozboru, který provedeme pomocí programu v Matlabu, vezmeme v úvahu postupně všechny varianty vstupních dat, to znamená závislost nebo nezávislost optických parametrů vrstvy a podložky na vlnové délce, a vypočteme odpovídající tloušťky.

3. VÝSLEDKY A JEJICH DISKUSE

Vliv použitého modelu spektrální odrazivosti na určení velikosti tloušťky jsme testovali v rozsahu vlnových délek 186 – 3100 nm pomocí výše zmíněného programu na systému, který je tvořen



Obr. 2 Srovnání modelových závislostí spektrální odrazivosti $R(\lambda)$ na vlnočtu $1/\lambda$ pro tenkou vrstvu SiO_2 , tloušťky $d = 450$ nm na křemíkové podložce

monokrystalickou křemíkovou podložkou, na které je vrstva SiO_2 tloušťky 450 nm. Optické parametry Si $n_2(\lambda)$ a $k_2(\lambda)$ byly převzaty z literatury [5]. Sellmeierovy parametry A_i a B_i pro výpočet $n_1(\lambda)$ vrstvy SiO_2 podle rovnice (6) byly převzaty z [6]. Při výpočtech bez započtení disperzních vlastností jsme převzali konstantní hodnoty optických parametrů obou prostředí z práce [7]: Hodnoty komplexního indexu lomu Si $n_2 = 3,85$ a $k_2 = 0,02$ a index lomu vrstvy SiO_2 $n_1 = 1,46$. Všechny modelové závislosti odrazivosti na vlnové délce jsou znázorněny na obr. 2.

Při určení tloušťky vrstvy z poloh extrémů závislosti $R = f(1/\lambda)$ byla tloušťka vypočtena jako aritmetický průměr ze všech kombinací minim, resp. maxim, které se daly určit s dostatečnou přesností, a byla stanovena příslušná standardní nejistota. Vypočtené hodnoty tloušťky tenké vrstvy pro všechny modelové případy jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1 Vypočtené hodnoty tloušťky tenké vrstvy pro všechny modelové případy

Model	Tloušťka tenké vrstvy [nm]	Přesnost
disperzní SiO_2 & disperzní Si	450	$R = 1$
disperzní SiO_2 & nedisperzní Si	454,06	$R = 0,7301$
nedisperzní SiO_2 & nedisperzní Si	455,93	$R = 0,9860$
nedisperzní SiO_2 & disperzní Si	457,53	$R = 0,7264$
$R_{\max}(\lambda)$ & $n_1(\lambda)$	458,3	$\pm 4,3$
$R_{\min}(\lambda)$ & $n_1(\lambda)$	460,9	$\pm 1,8$
$R_{\max}(\lambda)$ & konst n_1	474,3	$\pm 7,0$
$R_{\min}(\lambda)$ & konst n_1	482,6	$\pm 3,7$

Z obr. 2, kde jsou na prvních čtyřech řádcích kombinace disperzních a nedisperzních optických parametrů systému $\text{SiO}_2 - \text{Si}$, a tabulky 1 je vidět, že použitý model má vliv nejen na modulaci funkce $R = f(1/\lambda)$, ale i na polohu extrémů. Z toho důvodu je zřejmé, že výpočet tloušťky tenké vrstvy pouze z rovnice (7) nebo (8), tj. bez započtení vlivu absorbující podložky, je méně přesný a to i tehdy, vezmeme-li v úvahu vliv disperze vrstvy. Důležitou roli při této metodě hraje nejen přesnost nalezení extrémů, ale i jejich vzájemná poloha a jejich počet. Rozptyl hodnot v závislosti na poloze extrémů dosahuje i několika desítek nanometrů. Přesnějšího výsledku dostaneme použitím modelu, který započítává vliv absorbující podložky. Z výpočtů našeho programu, který fituje reflektivitu v příslušném rozsahu vlnových délek a kdy volným-fitovaným parametrem je tloušťka vrstvy, je vidět, že velikost tenké vrstvy SiO_2 se v těchto případech příliš neliší. Vypočtená tloušťka je poněkud větší, odchylky jsou kolem jednoho procenta.

Z hlediska modelování naměřené spektrální odrazivosti je podstatné, že dominantní vliv na přesnost modelu má znalost spektrálně závislých optických parametrů absorbující podložky Si , zatímco vliv indexu lomu vrstvy v závislosti na vlnové délce je malý, jak je vidět při srovnání hodnot korelačních koeficientů v řádcích 2, 3, 4 tabulky 1.

4. ZÁVĚR

V předložené práci byl proveden teoretický rozbor vlivu různých modelů odrazivosti systému tenká vrstva SiO_2 - podložka Si na výpočet tloušťky tenké vrstvy. Z výsledků studia vyplývá, že k určení přesnější hodnoty tloušťky vrstvy je třeba započítat vliv absorbující podložky, to znamená vycházet z modelu pro komplexní reflexní koeficient, protože výpočet z poloh extrémů závislosti

$R = f(1/)$ je zatížen větší chybou a vykazuje značný rozptyl hodnot, a to především tehdy, vezmou-li se pro výpočet např. pouze dva náhodně vybrané extrémy. Při modelování odrazivosti je započtení disperze optických parametrů obou prostředí nezbytné.

Tato práce byla částečně podporována grantem MSM6198910016.

Literatura

- [1] BORN, M. - WOLF, E.: Principles of Optics. Cambridge, Cambridge University Press 1999.
- [2] AZZAM, R. A. - BASHARA, N. M.: Ellipsometry and Polarized Light. North-Holland, Amsterdam 1977.
- [3] MERKLEIN, T. M.: High resolution measurement of multi-layer structures. *Appl. Opt.*, **29**, 1990, s. 505.
- [4] HLUBINA, P., CIPRIAN, D., LUŇÁČEK, J., LESŇÁK, M.: Dispersive white-light spectral interferometry with absolute phase retrieval to measure thin film. *Opt. Express*, **14**, 2006, s. 7678.
- [5] PALIK, E. D.: Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, Orlando 1995.
- [6] CVI, Optical Components and Assemblies, www.cvilaser.com.
- [7] SCHNELL, U., DÄNDLIKER, R.: GRAY, S.: Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target. *Opt. Lett.*, **21**, 1996, s. 528.

Mgr. Milena Luňáčková, katedra matematiky a deskriptivní geometrie, VŠB – TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 59 732 4183, e-mail: milena.lunackova@vsb.cz

Doc. Dr. RNDr. Jiří Luňáček, Institut fyziky, VŠB – TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 59 732 4111, e-mail: jiri.lunacek@vsb.cz

RNDr. Dalibor Ciprian, Ph.D., VŠB – TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 59 732 3398, e-mail: dalibor.ciprian@vsb.cz
Doc. RNDr. Petr Hlubina, CSc., VŠB – TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 59 732 3134, e-mail: petr.hlubina@vsb.cz

Sergej HLOCH, Katedra prevádzky technologických systémov, Fakulta výrobných technológií, TU v Košiciach so sídlom v Prešove
Jan VALÍČEK, Institut fyziky, Hornicko geologická fakulta, VŠB - Technická Univerzita, Ostrava

Diagnostické meranie vibrácií pri hodnotení vplyvu opotrebenia fokusačnej trubice počas hydroabrazívneho delenia hliníka

Monitorovanie hydroabrazívneho delenia materiálov hydroabrazívnym prúdom sa v posledných rokoch stalo dôležitou oblasťou výskumu. Článok sa zaoberá možnosťou aplikácie vibrodiagnostiky technologického procesu delenia materiálu. Za účelom zistenia vibrácií pri hydroabrazívnom delení, boli vykonané experimenty zamerané na meranie vibrácií a ultrazvukovej emisie s cieľom zistenia súvislosti meraných parametrov vibrácií s technologickými podmienkami delenia hliníka. Hlavnou úlohou je zistenie existencie súvislosti medzi opotrebovaním fokusačnej trubice a vibráciami.

Kľúčové slová: hydroabrazívne delenie, vibračná analýza, opotrebenie, fokusačná trubica

ÚVOD

V súčasnosti je už technológia hydroabrazívneho delenia zavedená do praxe. Pre on-line automatizáciu tejto technológie je potrebné okrem účinného spôsobu merania kvality povrchu aj nájdenie vhodnej spätnej väzby [8]. Snahou je vytvorenie kontinuálneho merania a kontroly okamžitého stavu povrchu v procese hydroabrazívneho delenia materiálov so zaistením spätnej väzby [7]. Preto sme štúdium procesu hydroabrazívneho delenia začali skúmať pomocou detekcie vibrácií. Hydroabrazívny prúd pri delení materiálov vybudzuje mechanické kmity a vibrácie. Okrem nepriaznivých účinkov vibrácií pri delení materiálov sú nositeľmi dôležitých informácií, ktoré študujeme z hľadiska mechanizmu delenia a ktoré sú tiež nositeľmi informácií pre monitorovanie okamžitého stavu technologického procesu. Vzhľadom na to, že materiál podlieha eróznemu pôsobeniu vysokorýchlostného hydroabrazívneho prúdu, využitie vibračnej analýzy pre aplikáciu a monitorovanie hydroabrazívneho procesu je ideálne. Je potrebné poznamenať, že vibrácie zaznamenávajú vlny, ktoré sú

generované lokálnou deformáciou v namáhanom materiály [5], [7]. Niekoľko snáh aplikácie vibračnej analýzy alebo akustickej emisie boli spracované v príspevkoch [2], [3] za účelom on-line riadenia a monitorovania okamžitého stavu vytvorenej reznej škáry a jej morfológie v prácach [1], [4], [6].

EXPERIMENTÁLNE PODMIENKY

Experiment sa uskutočnil v rámci akademickej spolupráce medzi Katedrou manažmentu výroby, Fakulty výrobných technológií TU v Košiciach so sídlom v Prešove a Inštitútom fyziky, HGF, VŠB – TU Ostrava v kooperácii so slovenskými firmami DRC., s.r.o., Prešov (p. Mikita) a firmou Technická diagnostika, s.r.o., Prešov (Ing. Adamčík, Ing. Bartoš) za podpory Vedeckej grantovej agentúry v rámci projektu VEGA 1/4157/07, kde naším cieľom je vývoj on-line riadenia technológie delenia materiálov hydroabrazívnym prúdom. K diagnostickému meraniu vibrácií pri hodnotení vplyvu opotrebenia fokusačnej trubice počas hydroabrazívneho

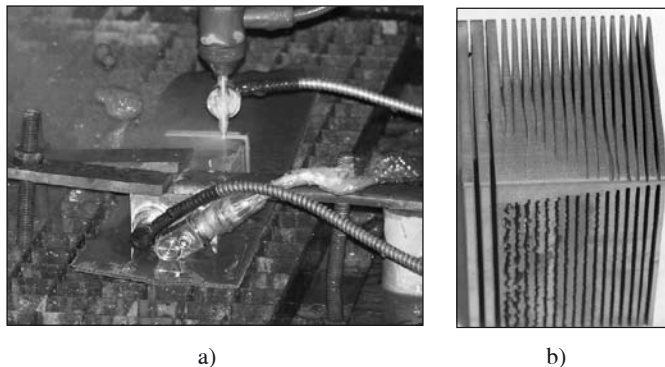
delenia hliníka bol použitý presný dvojpolohovací stôl od firmy PTV, určený pre rovinné aplikácie delenia technológiou AWJ. Tlak vody bol vytváraný čerpadlom FLOW 9xD55 s $V = 4,7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ s výkonom $p = 60 \text{ HP}$. Ako technologická hlavica bola použitá hlavica firmy Ingersoll Rand AUTOLINE™. Všetky vzorky boli vyrobené s konštantným nastavením vstupných faktorov (tab. 1).

Tabuľka 1 Podmienky experimentu (konštantné faktory)

Faktory	Jednotka a rozmer	Hodnota
Tlak	p [MPa]	350
Priemer vodnej dýzy	d_0 [mm]	0,14 (inch)
Priemer zaostrovacej trubice (Roctec)	d_f [mm]	0,8
Zdvih	z [mm]	2
Abrazivo (Barton Garnet)	MESH	80
Hrúbka materiálu (hliník)	b [mm]	40
Hmotnostný tok abraziva	m_a [$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$]	400
Rýchlosť posuvu	v [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200

Merania vibrácií (zber dát) prebiehali počas hydroabrazívneho delenia hliníka. Snímače vibrácií boli upevnené na obrobku a priamo na fokusačnej trubici (obr. 1). Na merané miesto boli snímače uchytené pomocou lepeného adaptéru so závitom a skrutkou M6. Snímané boli absolútne vibrácie – kmitanie povrchu v mieste nainštalovaných snímačov. Analýza bola prevedená z časových (TIME) záznamov a FFT spektier. Opakovane boli zaznamenávané vibrácie počas delenia hliníka. Porovnávali sme vibrácie pri hydroabrazívnom delení s novou fokusačnou trubicou (Roctec) a opotrebovanou fokusačnou trubicou, ktorá bola predtým používaná 60 hodín (Roctec 100).

Zber dát bol realizovaný meracím systémom NI PXI (typ meracej karty PXI 4472B, 8kanálový simultánny zber, 24 bit A/D prevodník, vzorkovacia frekvencia do 102 kHz, dynamický rozsah 110 dB) a frekvenčným analyzátorom Microlog GX-S. Analýza údajov bola prevedená pomocou Lab View Professional Development System, vrátane Sound and Vibration Toolset a Order Analysis Toolset a Aptitude Analyst SKF Condition Monitoring.

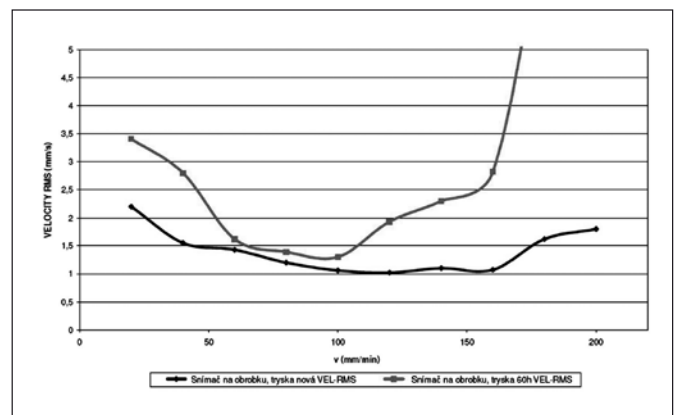


Obr. 1 a) Diagnostické meranie vibrácií pri hodnotení vplyvu opotrebenia fokusačnej trubice počas hydroabrazívneho delenia hliníka, b) vzorky z hliníka

Ako snímače boli použité akcelerometre PCB IMI typu 607A11 s integrovaným káblom (citlivosť 100 mV/g , frekvenčný rozsah do 10 kHz). Kontrolné – kalibračné – merania boli prevedené pomocou frekvenčného analyzátoru (data kolektoru) SKF Microlog GX-S, analýza nameraných údajov bola prevedená pomocou programového vybavenia SKF Aptitude Analyst.

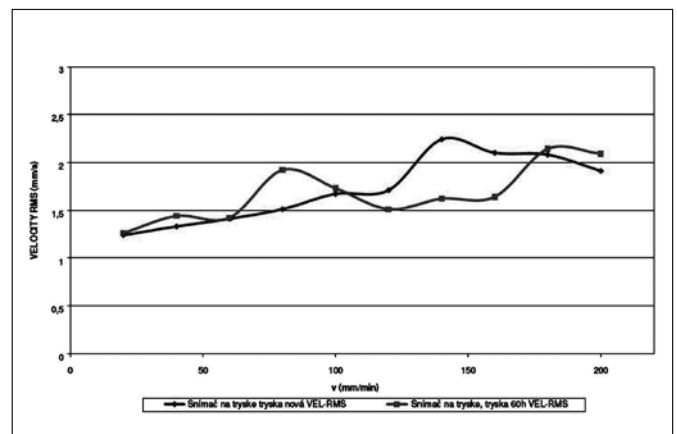
VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na nasledujúcich obr. 2 a 3 sú graficky interpretované celkové hodnoty vibrácií merané pre jednotlivé technologické podmienky delenia materiálu tab.1 a zvolené meracie metódy, kde sa skúmala závislosť vibrácií a rýchlostí posuvu pri použití novej fokusačnej trubice (obr. 2) a opotrebovanej fokusačnej trubice (obr. 3) na rýchlosť chvenia [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$] (velocity) zisťovanej v frekvenčnej oblasti od 0,5 Hz do 500 Hz s využitím rýchlej Fourierovej transformácie (FFT Fast Fourier Transform) a Time analýzy. Obr. 2 graficky znázorňuje porovnanie rýchlosti chvenia s použitím novej a použitej fokusačnej trubice pri zmene rýchlosti posuvu, kde signál bol získavaný zo snímača umiestneného na obrobku.



Obr. 2 Porovnanie VELOCITY RMS s použitím novej a opotrebovanej fokusačnej trubice pri zmene rýchlosti posuvu deliacej hlavice pri delení hliníka $b = 40 \text{ mm}$ (snímač na obrobku)

Z grafického priebehu hodnôt RMS na obr. 2 vidieť, že hodnoty RMS dosahujú nízke hodnoty pri použití opotrebovanej fokusačnej trubice v intervale rýchlosti posuvu 50 - 100 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Ďalej na obr. 2 vidieť existenciu závislosti medzi vibráciami a rýchlosťou posuvu, kde pri rýchlosti posuvu nad 100 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ s použitím opotrebovanej fokusačnej trubice (Roctec 100) sa hodnoty RMS, zisťované pomocou snímača PCB IMI typu 607A11 umiestneného



Obr. 3 Porovnanie VELOCITY RMS s použitím novej a opotrebovanej fokusačnej trubice pri zmene rýchlosti posuvu deliacej hlavice pri delení hliníka $b = 40 \text{ mm}$ (snímač na fokusačnej trubici)

na obrobku, zvyšujú. S použitím novej fokusačnej trubice (Roctec 100) boli zistené celkovo nižšie hodnoty RMS. Zvýšené hodnoty RMS boli namerané pri rýchlosti posuvu deliacej hlavice 20 mm.min⁻¹ a pri rýchlosti posuvu 180 a 200 mm.min⁻¹.

Obr. 3 graficky znázorňuje porovnanie rýchlosti chvenia s použitím novej a použitej fokusačnej trubice pri zmene rýchlosti posuvu, kde signál bol získavaný zo snímača na fokusačnej trubici. Z experimentálne zistených dát vidieť, že hodnoty rýchlosti chvenia sa zvyšujú so zvyšovaním rýchlosti posuvu pri použití novej a opotrebovanej fokusačnej trubice.

Na základe experimentálne zistených poznatkov sa budú ďalej realizovať experimenty za účelom zistenia súvislosti medzi vibráciami a kvalitou vytvorenej plochy a pokračovať v meraniach a hľadaní vzájomnej súvislosti medzi vibráciami a technologickými podmienkami delenia materiálov ako zohľadniť aj samotné vlastnosti materiálu.

ZÁVER

On – line riadenie technológie delenia hydroabrazívnym prúdom predstavuje dnes jednu z možností ako túto technológiu optimalizovať, čo sa týka zvýšenia produktivity práce a riadenia kvality výroby. On – line riadenie však vyžaduje okrem účinného spôsobu merania kvality povrchu aj nájdenie vhodnej spätnej väzby. Keďže pri hydroabrazívnom delení materiálov hydroabrazívny prúd vybudzuje mechanické kmity a vibrácie, ktoré môžu byť nositeľmi dôležitých informácií pre monitorovanie okamžitého stavu technologického procesu, začali sme zisťovať možnosť existencie súvislosti medzi opotrebovaním fokusačnej trubice a vibráciami. Na základe experimentálne vykonaných meraní vibrácií pri delení 40 mm hrubého hliníka je možné konštatovať nasledovné závery:

- Je potrebné zdôrazniť, že nameraný vibračný signál nemá výrazne periodický charakter. Úroveň signálu sa mení počas samotného rezu. Túto skutočnosť je potrebné zohľadniť pri ďalších meraniach a analýzach.
- Bola zistená závislosť medzi vibráciami a opotrebením fokusačnej trubice, kde pri delení s novou fokusačnou trubicou boli pri daných experimentálnych podmienkach zistené menšie vibrácie.
- Potvrdila sa existencia závislosti medzi vibráciami a rýchlosťou posuvu, kde pri rýchlosti posuvu nad 100 mm.min⁻¹ s použitím fokusačnej trubice sa hodnoty RMS, zisťované pomocou snímača PCB IMI typu 607A11 umiestneného na obrobku, zvyšovali. S použitím novej fokusačnej trubice (Roctec 100) boli zistené celkovo nižšie hodnoty RMS.

- Na základe hore uvedených záverov budú v blízkej budúcnosti vykonané experimenty za účelom zistenia súvislosti medzi vibráciami a kvalitou vytvorenej plochy a budeme pokračovať v meraniach a hľadaní vzájomnej súvislosti medzi vibráciami a technologickými podmienkami delenia materiálov ako zohľadniť aj samotné vlastnosti materiálu.

Literatúra

- [1] ANNONI, M.; CRISTALDI, L.; LAZZARONI, M., „Measurement and Analysis of the Signals of a High Pressure Waterjet Pump, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE.
- [2] BEŇO, J., MAŇKOVÁ, I. Technologické a materiálové činitele obrábania, 2004 Viena Košice, s. 418
- [3] FOLDYNAJ., SITEK L., HABÁN V. Acoustic wave propagation in high-pressure system, Ultrasonics Volume 44, Supplement 1, 22 December 2006, Pages e1457-e1460, available through science direct <http://www.lsbu.ac.uk/water/strange.html>
- [4] HLOCH, S., et al. : Vibračná analýza delenia hliníka. In: Strojárstvo: Strojárstvo extra. roč. 12, č. 6 (2008), s. 94/8-95/9.
- [5] HRABĚ, P., MÜLLER, M. Overlay materials and their tribological behaviour. 3rd International conference TAE 2007. Praha, ČZU v Praze, s. 156 – 160.
- [6] KOVACEVIC, R., MOHAN, R., ZHANG, Y. M. Cutting Force Dynamics as a Tool for Surface Profile Monitoring. In: AWJ. ASME J. of Engineering for Industry, 1995, vol. 117, p. 340-350
- [7] LEBAR, A., JUNKAR, M. Simulation of abrasive waterjet machining based on unit event features. Journal of Engineering Manufacture (Part B) 217, 2003, s. 699-703.
- [8] OHLÍDAL, M., PÁLENÍKOVÁ, K. Možnosti optického profilometru MicroProf FRT při 3D hodnocení kvality povrchu. Jemná mechanika a optika, 2004, roč. 49, č. 9, s. 251-259. ISSN 0447-6441.
- [9] VALÍČEK, J., HLOCH, S. Dělení materiálu vodním paprskem (1): Nové možnosti riadenia technológie delenia vysokorychlostným hydroabrazívnym prúdom v reálnom čase. In: Svařování, dělení, spojování materiálů. vol. 5 (9), no. 2 (2007), p. 41-43. ISSN 1212-4044.

Podakovanie:

Článok vznikol za podpory projektu VEGA 1/4157/07 „Nelineárne matematické modelovanie a vibrodiagnostika progresívnych technologických procesov pri delení ťažkoobrábateľných materiálov pomocou DoE a Taguchiho dizajnu“ (60 %), a interných grantov IG HGF VŠB-TUO 2008 (20 %) a projektu MŠMT No. MSM6198910016 (20 %).

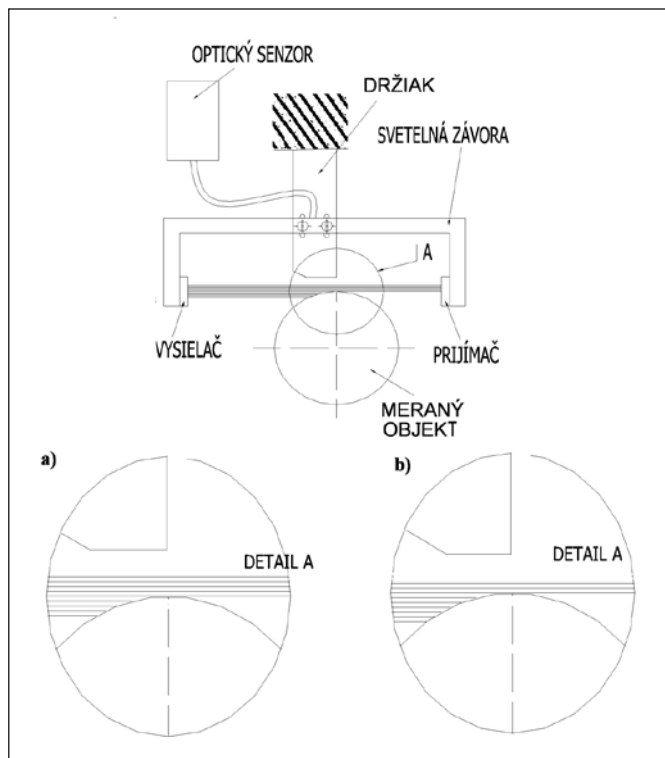
Počítačová simulácia systému na bezkontaktné snímanie kmitavosti rotačných a posuvných konštrukčných častí v strojoch a zariadeniach

1. ÚVOD

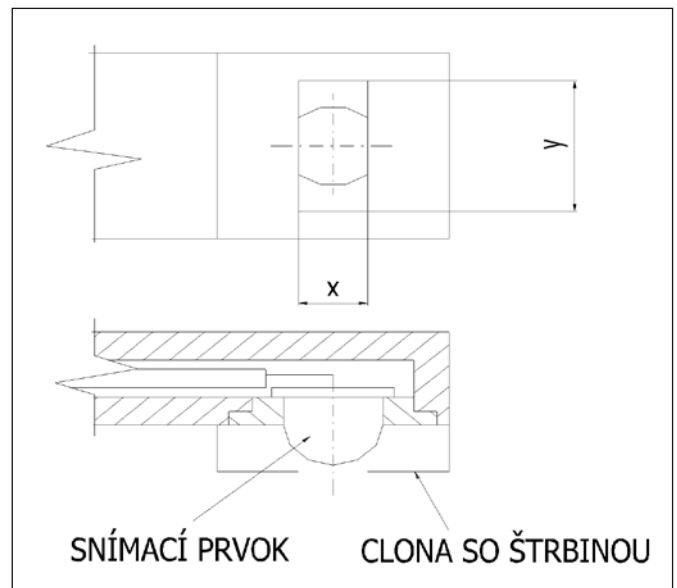
Prevažná väčšina poruchových faktorov v prevádzke spôsobuje poruchu, ktorá sa prejaví zmenou trajektórie bodov na povrchu uvažovaného elementu. Sú to najčastejšie poruchy vyvolané opotrebením kontaktných častí, uvoľnením alebo nalomením upnutých častí, deformáciou, teplotnou rozťažnosťou a podobne. Ak sa zameriame na určitú skupinu týchto bodov, tak na základe snímania ich pohybu dokážeme stanoviť poruchový stav ešte skôr ako by mohlo dôjsť k havarijnému stavu. To je možné uplatniť v širokej škále rôznych druhov strojov a zariadení, kde je havarijný stav obzvlášť nežiadúci. Uvažované snímanie trajektórie je možné veľmi výhodne a efektívne realizovať optickou metódou a prekročenie tolerančných odchýlok poruchovej veličiny zabezpečiť vhodnou signalizáciou, alebo okamžitým ukončením prevádzky stroja [2].

2. ZÁKLADNÝ POPIS OPTICKÉHO SENZORA NA MONITOROVANIE KMITAVOSTI KONŠTRUKČNÝCH ČASTÍ

Princíp zariadenia je založený na postupnom prekryvaní svetelného lúča vysielaného z vysieláča do prijímača svetelnej závery. Optický senzor zaznamenáva veľkosť prepusteného svetelného lúča cez snímaný komponent pri meraní. Je nastavený tak, aby cez snímaný komponent prechádzala určitá veľkosť svetelného toku (obr. 1a). Ak sa pri meraní zmení veľkosť prierezu svetelného lúča od pôvodnej hodnoty, prichádzajúceho od prijímača (meraný



Obr. 1 Znáznornenie princípu činnosti snímania zmeny trajektórie snímaného komponentu (detail vľavo (a) - technický stav je v poriadku, detail vpravo (b) - technický stav je s poruchou)



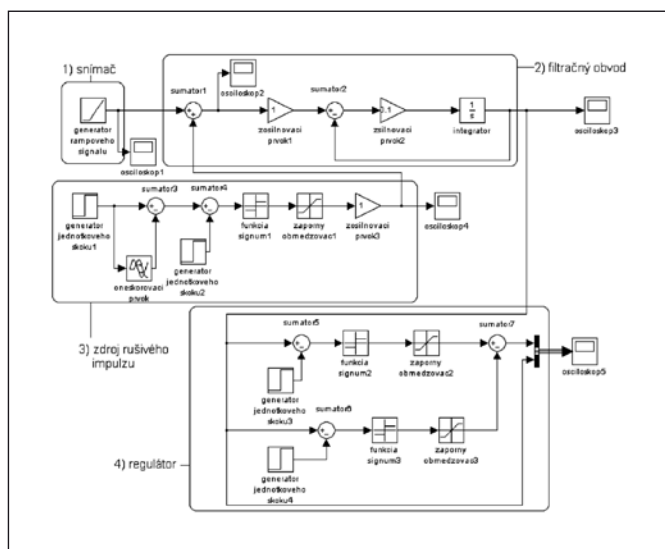
Obr. 2 Prijímač svetelného lúča s clonkou so štrbinou

komponent zmení svoju trajektóriu v rámci požadovanej tolerancie) (obr. 1b), optický senzor vyhodnotí túto situáciu ako vznik poruchového stavu a vyšle varovný signál. Zväčšovaním zmeny trajektórie vplyvom zvyšovania stupňa poruchy dochádza k zmene tienenia prechádzajúceho lúča a tým aj k zmene obmedzenia prechodu optického výkonu z vysielacej do prijímacej časti senzora. Na aby bola dosiahnutá požadovaná citlivosť zariadenia, sa predradujú pred snímacie prvky (šošovky) clony s otvormi, ktoré zredukovujú veľkosť efektívneho lúča. Zmenšovaním parametra x na clonke snímacieho prvku sa zväčšuje jeho citlivosť (obr. 2). Celé zariadenie je chránené proti chveniu sústavy a nepriaznivým vplyvom (prelietaniu pevných častíc cez svetelný lúč) oneskorovacím obvodom, ktorý spomaľuje narastajúcu amplitúdu chvenia sústavy a prijíma len stredný priemer tejto spomalenej amplitúdy.

3. SIMULÁCIA V PROGRAME MATLAB

Matlab je vysoko výkonný integrovaný prostriedok pre technické výpočty. Je charakterizovaný integráciou výpočtov, vizualizáciou a programovaním v jednoduchom užívateľskom prostredí, kde sú problémy a riešenia vyjadrené bežnými matematickými zápismi. Zahŕňa oblasti matematických výpočtov, vývojových prostriedkov pre tvorbu algoritmov, modelovania, simulácie, vizualizácie a analýzy dát, vysoko výkonnej 2D a 3D grafiky a oblasti aplikačných prostriedkov pre vytváranie grafického užívateľského prostredia. Matlab je interaktívny systém, ktorého základné dátové prvky nemusia mať vopred definované veľkosti. Integrácia potrebných vlastností umožňuje riešenie širokého spektra problémov. Dovoľuje tiež vytvárať program v interaktívnych programovacích jazykoch C alebo Fortran. Rozšírením programu Matlab je nadstavba Simulink. Je určená predovšetkým na časové riešenie a simuláciu chovania

spojitých aj nespojitých dynamických systémov za predpokladu znalostí daného matematického popisu. S pomocou Simulinku je možné určiť časové priebehy výstupných veličín, ale aj ostatných veličín v danom systéme v závislosti na časovom priebehu vstupných parametrov a počiatočnom stave. Popis sústavy môže byť zložitý. Môže obsahovať aj algebraické rovnice a vzorkované diskrétné výpočty. Simulink ponúka pomerne jednoduchý prístup k prepracovaným metódam Matlabu vo vzťahu k časovým riešeniam sústav nelineárnych diferenciálnych rovníc, prostriedkom pre relatívny zápis problému teda vytvorenie modelu a následnej vizualizácii výsledkov a samozrejme automatizované riešenie mnohých problémov, ktoré pri simulácii vznikajú.



Obr. 3 Schéma zapojenia optického snímača v simulacnom programe Matlab

Na základe praktického návrhu elektronického obvodu optického snímača zmeny trajektórie snímaného komponentu bola v simulacnom programe MATLAB Simulink navrhnutá zodpovedajúca schéma pracujúca s ideálnymi prvkami. Princíp simulacného obvodu zodpovedá postupnému zatieneniu clonky snímača, pričom pri určitom optickom výkone dopadajúcom na fotocitlivý prvok snímača dôjde k vyslaniu spúšťacieho impulzu do korekčného mechanizmu, s cieľom uskutočnenia korekcie alebo okamžitého odstavenia prevádzky daného systému. Každý prvok predstavuje určitý simulacný proces, ktorý nahrádza správne sa reálne súčiastky, alebo skupiny súčiastok pracujúcich v reálnom prostredí. Simuláciou očakávame výsledky vhodné k zisteniu správania sa navrhnutého obvodu na základe, ktorých môžeme vhodne zvoliť hodnoty parametrov súčiastok pracujúcich v reálnom obvode. Navrhnutá simulacná schéma je zložená zo štyroch základných blokov:

- 1) snímač,
- 2) filtračný obvod (oneskorovací, dolno priepustný filter),
- 3) zdroj rušivého impulzu,
- 4) regulátor.

1) Snímač predstavuje simulacný prvok, na ktorého výstupe získame signál, ktorý svojou úrovňou zodpovedá priebehu zmeny trajektórie snímaného komponentu. Uvažovaná zmena je v optickom snímači prevádzaná na zmenu výkonu svetelného lúča dopadajúceho na fotocitlivý prvok. Táto zmena vyvoláva zmenu veľkosti elektrického prúdu tečúceho aktívnym prvkom snímača.

2) Filtračný obvod v simulacnej schéme je realizovaný pomocou výpočtu diferenciálnej rovnice prvého rádu tvaru:

$$a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_0 y$$

kde $T_1 = \frac{a_1}{a_0}$ a úpravou získame

$$T_1 \frac{dx}{dt} + x = k y, \quad k = \frac{b_0}{a_0},$$

kde a_0, a_1, a_0 , sú koeficienty tejto diferenciálnej rovnice, T_1 je časová konštanta obvodu, k je koeficient zosilnenia signálu.

Vstupný signál vchádzajúci do filtračného obvodu je zosilnený vstupným zosilňovacím prvkom, z ktorého je ďalej signál vedený do sumátora, v ktorom sa od neho odpočíta výstupný signál prichádzajúci spätnou väzbou. Ďalej je signál po ďalšom zosilnení zosilňovačom zintegrován v integračnom člene.

3) Zdroj rušivého impulzu je časť simulacného obvodu, ktorá slúži na vyrobienie chyby počas simulácie. Nahrádza nepriaznivé vplyvy, ktoré vznikajú pri meraní, napr. preletenie pevných častíc cez svetelný lúč medzi vysielacom a prijímačom.

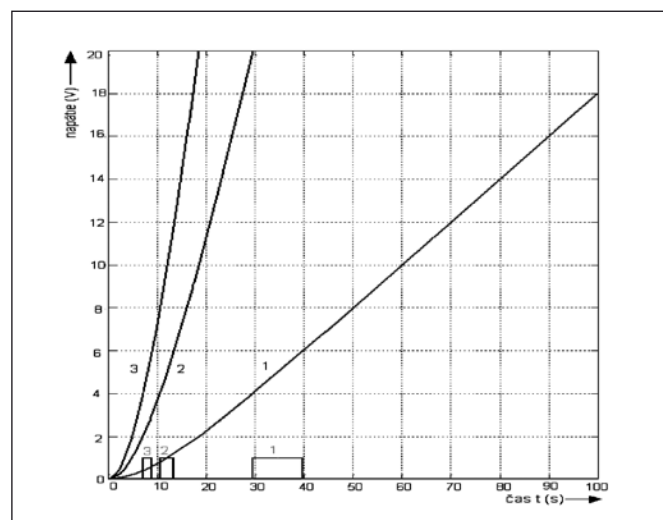
4) Regulátor je tvorený dvomi komparátormi (porovnávacími obvodmi). Prvý komparátor slúži k spusteniu korekčného posuvu pri určitej presne stanovenej úrovni signálu prichádzajúceho z filtračného obvodu. Druhý komparátor slúži k zamedzeniu spustenia korekčného posuvu v prípade prudkého nárastu prichádzajúceho signálu z filtračného obvodu v dôsledku poruchového stavu.

Postup simulácie

Zadávacie okno programu Matlab nám umožní návrh simulacnej schémy výberom požadovaných prvkov z výberového okna. Tieto prvky navzájom prepájame spojovacími čiarami predstavujúcimi komunikačný kanál medzi týmito jednotlivými prvkami. Program umožňuje zadať hodnoty jednotlivých parametrov týchto prvkov podľa potreby a súčasne umožňuje ich zmenu počas analýzy. Po zadaní týchto parametrov a vhodne nastavených parametrov simulácie (systémový čas) je možné spustenie simulácie vhodným ovládacím prvkom. Výhodou programu je taktiež možnosť generovania potrebných grafických priebehov z ktorýchkoľvek obvodových prvkov.

Priebeh simulácie

Výstupný signál svetelnej závery, ktorý svojou úrovňou zodpovedá priebehu zmeny trajektórie snímaného komponentu privádzaný na vstup optického snímača, je v simulacnej schéme nahradený generátorom rampového signálu. Pri zmene hodnoty



Obr. 4 Graf znázorňuje rôzne priebehy strmosti tlmeného rampového signálu, zmenou hodnoty parametra na generátore rampového signálu čo má za dôsledok časovú zmenu aktívnej oblasti, v ktorej prebieha korekcia alebo odstávka

na tomto prvku dochádza k zmene prudkosti tlmeného rampového priebehu z filtračného obvodu, čo má za následok časovú zmenu aktívnej oblasti, v ktorej dochádza k spusteniu korekcie alebo odstaveniu systému, ako je vidieť na obr. 1. V praxi to znamená, čím rýchlejšia je zmena trajektórie snímaného komponentu, tým skôr sa spustí korekcia alebo odstávka.

Ako je vidieť na grafe, väčšou strmostou priebehu tlmeného rampového signálu sa skraca časový impulz aktívnej oblasti.

1,2,3 – priebeh tlmeného rampového signálu z filtračného obvodu,

1,2,3 – aktívna oblasť v ktorej prebieha korekčný posuv alebo odstávka.

Táto simulácia, pri ktorej sa menila strmosť tlmeného rampového signálu, sa vykonávala bez zapojenia obvodu 3 čiže zdroja rušivého impulzu.

- 1) Priebeh tejto krivky zodpovedá nastaveniu jednotlivých parametrov na začiatku simulácie, a preto ju môžeme nazvať aj ako východzia krivka. Pri simulácii boli nastavené na jednotlivých prvkoch v simulovanom obvode tieto parametre: na generátore rampového priebehu 0,2 V, na zosilňovacom prvku 2 vo filtračnom obvode hodnota 0,1 V a pri navolení skokového signálu v prvom komparátore hodnota impulzu 4 V a v druhom komparátore hodnota impulzu 6 V. Pri navolení parametrov regulácie procesu obrábania z grafu vidíme, že dolná hranica aktívnej oblasti k spusteniu korekcie je 29 s a horná hranica 40 s. Časový interval je 11 s.
- 2) Zmenou parametra na generátore rampového signálu z hodnoty 0,2 V na hodnotu 1 V došlo k zmene strmosti tlmeného rampového signálu a tým sa zmenil aj časový priebeh aktívnej oblasti. Ostatné parametre jednotlivých prvkov simulačnej schémy majú rovnakú hodnotu ako pri krivke 1. Z grafu vidíme, že pri takejto strmosti tlmeného rampového signálu sa dolná hranica aktívnej oblasti posunula z 29 s na 11 s a horná hranica sa posunula z 40 s na 14 s. Časový interval sa skrátil z 11 s na 3 s.
- 3) Pri ďalšej zmene parametra na generátore rampového signálu z hodnoty 1 V na hodnotu 2 V došlo k ďalšiemu posunutiu tlmeného rampového signálu, tým došlo aj k časovej zmene aktívnej oblasti. Ostatné parametre jednotlivých prvkov simulačnej schémy zostali nepozmenené. Z grafu vidíme, že pri takejto strmosti tlmeného rampového signálu sa dolná hranica aktívnej oblasti posunula z 11 s na 7 s a horná hranica sa posunula z 14 s na 9 s. Časový interval sa skrátil z 3 s na 2 s.

ZÁVER

Cieľom generovania grafov bolo zistiť priebeh simulácie (ideálne prostredie použitím ideálnych prvkov) vopred navrhutej a prispôbenej schéme, ktorú sme navrhli na základe teoretic-

kých poznatkov správanie sa obvodových prvkov ponúknutých v komunikačnom okne. Každý prvok predstavuje určitý simulačný proces, ktorý nahrádza správanie sa reálnej súčiastky, alebo skupiny súčiastok pracujúcich v reálnom prostredí. Simuláciou sme principiálne overovali (zmenou hodnôt parametrov na jednotlivých prvkoch) funkčnosť navrhnutého obvodu. Sumárne výsledky adekvátne prispeli k zisteniu správania sa navrhnutého obvodu a na základe nich môžeme vhodne zvoliť hodnoty parametrov súčiastok pracujúcich v reálnom obvode.

Tento článok bol písaný v rámci projektu Vývoj, realizácia a overenie technického systému pre bezkontaktnú optickú identifikáciu a nadväznú korekciu rozmerového opotrebenia výrobného nástroja počas plynulého priebehu výrobných operácií č. 1/0562/08 | 5 | na FVT.

Literatúra

- [1] BARCÍK, Š.: Stroje a zariadenia, I., II., III. Zvolen: TU Zvolen, 2001.
- [2] BIGOŠ, P. - PIDANYJ.: *Prevádzková spoľahlivosť*. Alfa, Bratislava, 1987.
- [3] Časopis asociácie technických diagnostiků - Zlín. Technická diagnostika. 1 - 2, ročník 7 1997.
- [4] ČEKOVSÝ, J. – HLAVENKA, L. – ŽIARAN, S. – JAŠŠO, P.: Analýza konštrukčného uloženia hriadeľov rozvláknovacích strojov. Výskumná správa. Bratislava 1995.
- [5] ĎAĎO, S. - KREIDL, M.: *Senzory a měřicí obvody*. ČVUT, Praha 1996.
- [6] HAMATA, V.: *Hluk elektrických strojů*. Praha 1987.
- [7] MARTINEK, R.: *Senzory v průmyselnej praxi*. BEN, Praha 2004, 192 s, ISBN 80-7300-114-4.
- [8] MILO, P.: *Technologické projektovanie v praxi*. Alfa, Bratislava 1983, 395s.
- [9] ŠTURCEL, J., MIŠEJE, M., KAMENSKY, M.: Spracovanie údajov v senzorových systémoch. *AT&P JOURNAL*, 2002, č. 8, str. 52.
- [10] VASILKO, K., BOKUČAVA, G.: *Technológia zmeny rozmerov - štvorjazyčne*. FVT TU v Košiciach, 2005, 86 s., ISBN 80-8073-300-7.

Laserkomparator für die Kalibrierung von Längentastern

Eine der Voraussetzungen, um eine hohe Präzision der Längenmessung zu gewährleisten, ist eine präzise Kalibrierung der Längenmessgeräte und deren Taster mit Hilfe von Laser-Längenkomparatoren. Firma MESING, die ein spezialisierter Hersteller von Längenmessgeräten für den Maschinenbau ist, reagierte auf dieses Problem schon vor einigen Jahren, als sie eine Partnerschaft mit wissenschaftlichen Teams des Institutes für Gerätetechnik der Akademie der Wissenschaften und des Tschechischen Metrologischen Institutes geschlossen hat. Ziel war dabei, einen kompakten Laserkomparator für präzise Kalibrierung zu konstruieren. Dieses Gerät sollte in erster Linie für die Hersteller von Tastern und Längenmessgeräten, der Feingerätetechnik zur Ausstattung ihrer Metrologie-Zentren dienen und über eine genügende Robustheit verfügen um dort in etwas raueren Bedingungen eine ähnlich präzise Längenmessung wie mit einem klassischen Laserinterferometer zu ermöglichen. Es entstand so ein einzigartiges Gerät zur Kontrolle der Abmessungen, dessen erste Version nun zur Verfügung steht. System ermöglicht die Kalibrierung von Tastern mit einem Messumfang bis 100 mm mit einer Positions- Reproduzierbarkeit auf 1 nm Genauigkeit.

Schlüsselwörter: Laserkomparator, Taster, Kalibrierung, Laserinterferometer, nm

Die globalen Weltmärkte stellen immer grössere Anforderungen an die Qualität der Maschinenbauprodukte an deren geometrische Präzision. Gleichzeitig steigen die Ansprüche an die Präzision der Mess- und Kontrolltechnik. Die geforderte Präzision verschiebt sich schrittweise von Hunderten von Nanometern in die Größenordnung von zehner, oder einzelner Nanometer. Dieser Trend erhöht dramatisch die Ansprüche an die Präzision der zur Längenmessung benutzten Längentaster, die in den Produktion- und Kontrollabteilungen der Unternehmen eingesetzt werden. Eine der Voraussetzungen, um eine hohe Präzision der Längenmessung zu gewährleisten, ist eine präzise Kalibrierung der Längenmessgeräte und deren Taster mit Hilfe von Laser-Längenkomparatoren.

Problemstellung

Die gegenwärtige Längenmetrologie benützt SI-Definition, wobei 1 Meter eine durch Licht im Vakuum zurückgelegte Entfernung innerhalb $1/299\,792\,458$ sec. ist, entsprechend der internationalen Konvention. Diese Definition wird in nationalen metrologischen Instituten im Normalfall mit Hilfe von Eichmeister-lasern realisiert, die eine kohärente Strahlung mit hochpräziser Wellenlänge abstrahlen. Wenn dieses Licht für optische Längenmeßgeräte, Laserinterferometer, benützt wird, wird meist ein Gerät verwendet, das mit direktem Bezug zu dieser Definition arbeitet. Hierbei wird ausschließlich mit Weißlicht (meist 633 nm) gearbeitet. Die erreichbare Auflösung und Messunsicherheit bewegt sich in Größenordnung Nanometer. Nachteil dieser Geräte ist, daß sie aufgrund ihrer technischen Ausführung und Empfindlichkeit hinsichtlich Umweltbedingungen und auch nicht zuletzt wegen ihres Preises meist nur in den Laboratorien der nationalen metrologischen Institute anzutreffen sind und nicht vor Ort bei einer auf diesem Gebiet tätigen Herstellerfirma.

Firma MESING, die ein spezialisierter Hersteller von Längenmessgeräten für den Maschinenbau ist, reagierte auf dieses Problem schon vor einigen Jahren, als sie eine Partnerschaft mit wissenschaftlichen Teams des Institutes für Gerätetechnik der Akademie der

Wissenschaften und des Tschechischen Metrologischen Institutes geschlossen hat. Ziel war dabei, einen kompakten Laserkomparator für präzise Kalibrierung zu konstruieren. Dieses Gerät sollte in erster Linie für die Hersteller von Tastern und Längenmessgeräten, der Feingerätetechnik zur Ausstattung ihrer Metrologie-Zentren dienen und über eine genügende Robustheit verfügen um dort in etwas raueren Bedingungen eine ähnlich präzise Längenmessung wie mit einem klassischen Laserinterferometer zu ermöglichen. Es entstand so ein einzigartiges Gerät zur Kontrolle der Abmessungen, dessen erste Version nun zur Verfügung steht.

Technische Ausführung des Komparators

Der Kompakt – Laserkomparator (*Bild 1*) ist als automatisches System für die Kontrolle der Abmessungen ausgeführt, wobei die Kalibrierungssonde einen ebenflächigen Spiegel bildet. In der Mitte des Messspiegels wird der Messeinsatz des zu testenden Längentasters (Induktivtaster, optoelektronisches Inkrementallineal, Kapazitivtaster, Messuhr usw.) angebracht. Der Positionierungsweg des Spiegels wird mit System von Präzisions-Linearführungen definiert und die Position des Spiegels wird durch eine Kombination des Schrittmotors (grobe Verschiebung 100 mm, Auflösung 50 nm) und drei piezoelektrischer Umformer (feine Verschiebung 5 μ m, Auflösung 0,04 nm) gesteuert. Auf der entgegengesetzten Seite des Meßspiegels wird das optische System des Laserinterferometers aufgebracht. Der Interferometer dient als der hauptsächlich Abmesungstaster für die Positionseinstellung des Meßspiegels und somit das Herz des gesamten Komparators.

Als Quelle für die Laserstrahlung des Interferometers wird ein Gas- He-Ne-Laser benützt, der auf einer Vakuum-Wellenlänge von 633 nm arbeitet. Die Stabilisierung der Wellenlänge wird mit einer Genauigkeit in Größenordnung 10 gewährleistet. Das Lasersignal wird mit einem optischen Leiter an den Eingang des Interferometers geführt, wo es mittels Lichtverteiler an den Referenzweig und den Messzweig verteilt wird. Eine der Besonderheiten dieses optischen

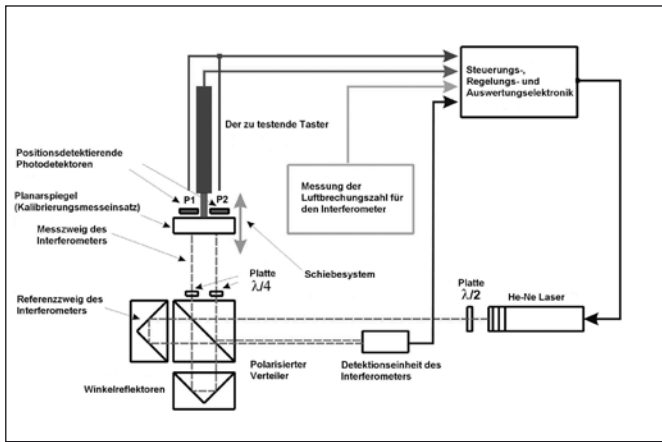


Bild 1. Schema des optischen Systems des Laserinterferometers mit ebenflächigem Meßspiegel

Systems ist die spezielle Anordnung des Messzweiges. Dieser ist als Zweidurchgangszweig in der Messachse realisiert, wodurch eine grundlegende Auflösung von einem Viertel der Lichtwellenlänge (d.h. 158 nm) erreicht wird! Beide Einfallspunkte des gebündelten Meßsignals treffen an den Spiegel symmetrisch zu der Kontaktstelle des zu testenden Tasters auf. Sollte es zu einer kleinen Ablenkung des Spiegels von der Senkrechten zur Messachse des zu testenden Tasters (s.g. „pitch“ und „yaw“ Fehler) kommen, wird die Verkürzung des einen Teils des Messzweiges durch die Verlängerung des anderen Teils kompensiert. Durch diese symmetrische Anordnung hat die Meßmitte (also der Ort des zu messenden Tasters) stets eine konstante Position. Interferometer misst richtig die Position der Symmetriemitte.

Auch wenn die Winkelabweichungen der Spiegelpositionierung dank der verwendeten Linearführung sehr klein (typisch $\leq 100 \mu\text{rad}$) sind, werden auch diese möglichen Fehlerquellen mit der Methode der Aktivstabilisierung der Bündelposition im Interferometer kompensiert. Diese Methode wurde eben für diesen kompakten Komparator entwickelt, um die Auswirkung des allmählichen Verschleisses der verwendeten Linearführung aktiv zu eliminieren. Die Methode verwendet drei piezoelektrische Umformer, die den Meßspiegel fein positionieren, auch hinsichtlich des Stellwinkels. Die Umformer (Motoren) sind am Umfang des Spiegels in drei Punkten mit Winkelteilung ca 120 grad angebracht. Dieses ermöglicht einerseits die feine Verschiebung des Meßspiegels in der Messachse, andererseits aber auch die Möglichkeit den Spiegel senkrecht oder waagrecht leicht zu verkippen je nach Verlängerung der Umformer.

Die aktive Stabilisierung des Spiegels wird mittels Verfolgung der Einfallspunktposition des zweiten Messbündels mit einem speziellen Photodetektor P2 gesteuert. Die Regelungsschleife, die durch die digitalen Signalprozessoren realisiert wird, kompensiert so während der ganzen Zeit der Kalibrierung des Tasters eventuelle unerwünschte Neigungen.

Nach Durchlaufen des Laserbündels durch den Messzweig erscheint am Ausgang des Interferometers das Interferenzsignal. Das Signal wird anschließend mit einer speziell dafür entwickelten Elektronik ausgewertet.

Der kompakte Laserkomparator selbst ist im Gusseisenrahmen eingebettet, der durch seine hohe Starrheit den Referenzpunkt des Interferometers und des kalibrierten Tasters in einer zuvor definierten Position hält. Eine Selbstverständlichkeit ist auch die Temperaturkompensation des gesamten Gerätes mit Hilfe einer Reihe von Fühlern. Die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und -Druck der den Messzweig umschließenden Luft werden fortlaufend beobachtet um die bei der Messung zu kompensieren.

Durchlauf der Kalibrierung wird mit einem PC gesteuert, der mit einer spezialisierten Software für die Kalibrierung ausgestattet ist. Diese Software ermöglicht eine grafische Darstellung des Durchlaufs des Kalibrierungsprozesses, beinhaltet die Ausgabe der Kalibrierungskurven und ebenfalls die Berechnungen der Korrekturparameter für die zu testenden Taster.

Erworbene Resultate

Zur Zeit laufen – oder werden vorbereitet – Kalibrierungstests einer ganzen Reihe von Längentastern, namentlich Induktiv- und Inkrementaltaster. Im Bild 2 ist ein Beispiel für die Linearitätsmessung der Skala des hochpräzisen Inkrementaltasters der Firma Heidenhain, Typ CT2501 dargestellt.

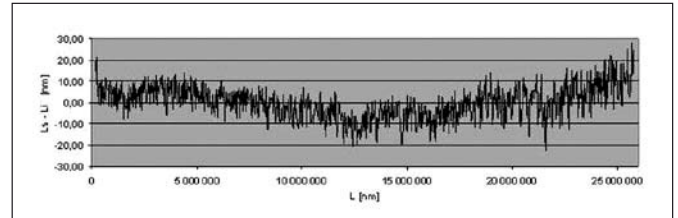


Bild 2. Aufzeichnung des Linearitätsverlaufs der Skala des Tasters Heidenhain CT2501. L = die mit dem Laserkomparator eingestellte Länge. $L_s - L_i$ ist die Differenz zwischen der Längenangabe des Tasters und der gemessenen Längenangabe des Laserinterferometers



Bild 3. Resultierende Anordnung des Laserkomparators für Kalibrierung der Längentaster. Links ist das System selbst in Schutz-Abdeckbox, rechts Monitor des Steuerrechners, für die Darstellung des Messverlaufs

Der Laserkomparator samt Abdeckbox ist im Bild 3 abgebildet. System ermöglicht die Kalibrierung von Tastern mit einem Messumfang bis 100 mm mit einer Positions- Reproduzierbarkeit bis 1 nm. Gesamtungewissheit – Kalibrierung – Messfähigkeit wird z.Z. sorgfältig ausgewertet. Wir erwarten das Erwerten der garantieren Werte $U_c = Q[5; 0,2 \times L]$ nm, wo L zu messende Länge (Messhub des kalibrierenden Taster) in mm ist. Das System wurde zum erstenmal am Stand der Fa.MESING bei der Internationalen Maschinenbaumesse in Brno im Jahre 2008 öffentlich präsentiert und erwarb eine bedeutende Auszeichnung von zwei Fachzeitschriften – Technische Wochenschau und Automatisierung, die Media-partner der Messe in Brno sind. Die Anlage entstand u.a. auch dank Unterstützung des Ministeriums für Industrie und Handel der Tschechischen Republik (Projekt FT-TA3/133).

Transmisní fázové holografické mřížky

Práce se zabývá vlivem chemického zpracování a osvitů na difrakční účinnost a poměr šumu k signálu u difrakčních mřížek zhotovených do halogeno-stříbrných emulzí Agfa Gevaert. Jsou zde zpracovány výsledky měření na mřížkách zpracovaných 14 různými chemickými procesy.

1. ÚVOD

V řadě optických a opticko-mechanických přístrojů se používají (kromě jiných optických prvků) difrakční mřížky. Tyto mřížky nalézáme např. v délkových odměřovacích strojích, ve spektrálních přístrojích a speciálně velmi složité mřížkové struktury se objevují na obrazových hologramech.

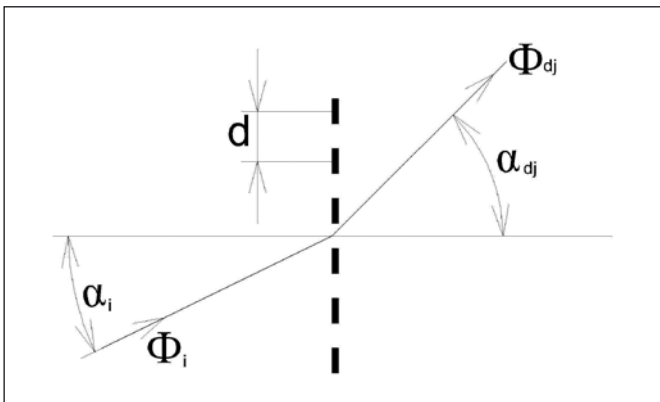
Amplitudová rovinná difrakční mřížka v nejjednodušším případě sestává ze soustavy ekvidistantních a rovnoběžných tmavých a světlých čar. Rozteč např. tmavých čar označujeme jako mřížkovou konstantu d . Dopadá-li na takovou mřížku rovinná monochromatická světelná vlna vlnové délky λ pod úhlem dopadu α_i (obr. 1), pak se tato vlna na mřížce ohýbá pod úhlem difrakce α_{dj} , pro který platí z mřížkové rovnice [1]

$$\sin \alpha_{dj} = \sin \alpha_i + \frac{j\lambda}{d}, \quad (1)$$

kde $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ je tzv. řád interference (resp. spektra). Obecně se do každého difrakčního řádu šíří jiný zářivý tok Φ_{dj} , který je částí η_j zářivého toku Φ_i sdruženého s dopadající vlnou. Veličina

$$\eta_j = \frac{\Phi_{dj}}{\Phi_i} \quad j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

se nazývá difrakční účinností mřížky. Amplitudové mřížky mají všeobecně malou difrakční účinnost (max. 6% až 11%, viz [2]). Zvýšení difrakční účinnosti lze dosáhnout náhradou tmavých čar určité tloušťky průhledným prostředím s vyšším indexem lomu (např. bromidem stříbrným s indexem lomu cca 2,25). Tím mřížka ovlivňuje též fázi jí procházející vlny a mřížka se nazývá fázovou (a transmisní – na průchod světla). Teoretická maximální difrakční účinnost takové mřížky je 100% (viz [2]). Na struktuře mřížky (krystalcích AgBr) však dochází k rozptylu světla, takže část zářivého toku Φ_{djN} (šum) se šíří v jiných úhlech než je úhel difrakce α_{dj} plynoucí z rovnice (1). Prakticky použitelný je jen signální zářivý tok Φ_{djS} v j -tém řádu (obr. 2)



Obr. 1 K mřížkové rovnici

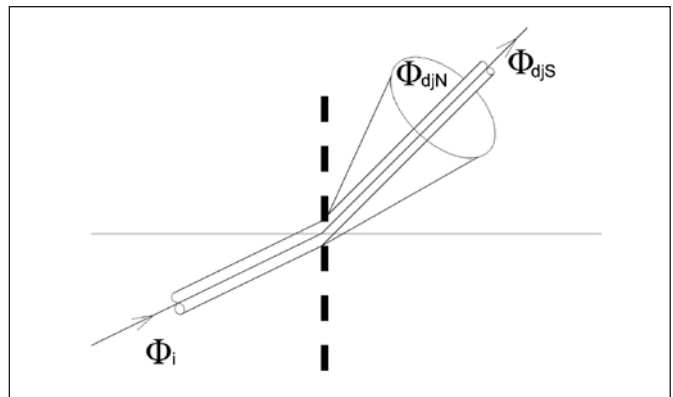
$$\Phi_{djS} = \Phi_{dj} - \Phi_{djN} \quad (3)$$

Difrakční účinnost mřížky pak raději definujeme výrazem

$$\eta_j = \frac{\Phi_{djS}}{\Phi_i} \cdot 100\% \quad (4)$$

a pro posouzení kvality mřížky zavádíme ještě podíl šumu (zářivý tok Φ_{djN}) k signálu (zářivý tok Φ_{djS}):

$$(N/S)_j = \frac{\Phi_{djN}}{\Phi_{djS}} \cdot 100\% \quad (5)$$



Obr. 2 K difrakční účinnosti mřížky

2. TECHNOLOGIE VÝROBY MŘÍŽEK

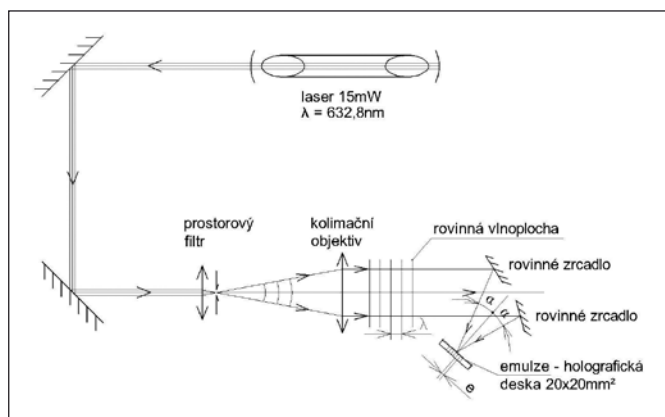
Difrakční mřížky lze vyrábět např. mechanicky rytím diamantem do speciální vrstvy nanesené na substrát a replikací takto zhotovené matriční mřížky. Kolem roku 1920 navrhl Albert Abraham Michelson [3] interferenční metodu spočívající v záznamu interferenčního pole dvou rovinných monochromatických vln téže vlnové délky a intenzity do halogeno-stříbrné emulze (fotografické emulze). Tato metoda se však rozšířila až po objevu vysokointenzivního zdroje koherentního záření – laseru.

Na obr. 3 je schéma záznamu takové interferenční mřížky, která se pro podobnost se záznamem hologramu někdy též nazývá holografická. Rozteč interferenčních ploch, resp. interferenčních proužků je dána vzorcem (viz [1])

$$e = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}, \quad (6)$$

kde α je úhel dopadu vln na fotografickou emulzi.

Citlivá vrstva sestává z želatiny [4], ve které jsou rozptýleny jemné krystalky halogenidu stříbra, zpravidla AgBr. Osvětlením těchto krystalků se z nich fotochemicky redukují neutrální atomy



Obr. 3 Schéma záznamu holografické mřížky

stříbra, které jsou pak katalyzátory chemické redukce stříbra ze světlem zasažených krystalků. Děje se tak pomocí některé vyvolávací látky, např. katecholu.

Pokud po vyvolání citlivé vrstvy následuje ustálení, tedy proces, který spolu s praním ve vodě odstraní neosvitnuté krystalky AgBr, získáme mřížku amplitudovou – tj. průhledné čáry tvořené želatinou a tmavé čáry tvořené želatinou s rozptýlenými zrnky stříbra. K získání fázové mřížky je potřeba provést bělení, to jest zrna stříbra chemicky převést na opticky průhlednou sloučeninu, tj. např. opět na halogenid stříbra. Děje se tak v bělicí lázni (tento proces se nazývá conventional rehalogenating bleaching, CRB). Je však možné vynechat proces ustalování a bělení provést přímo po vy-

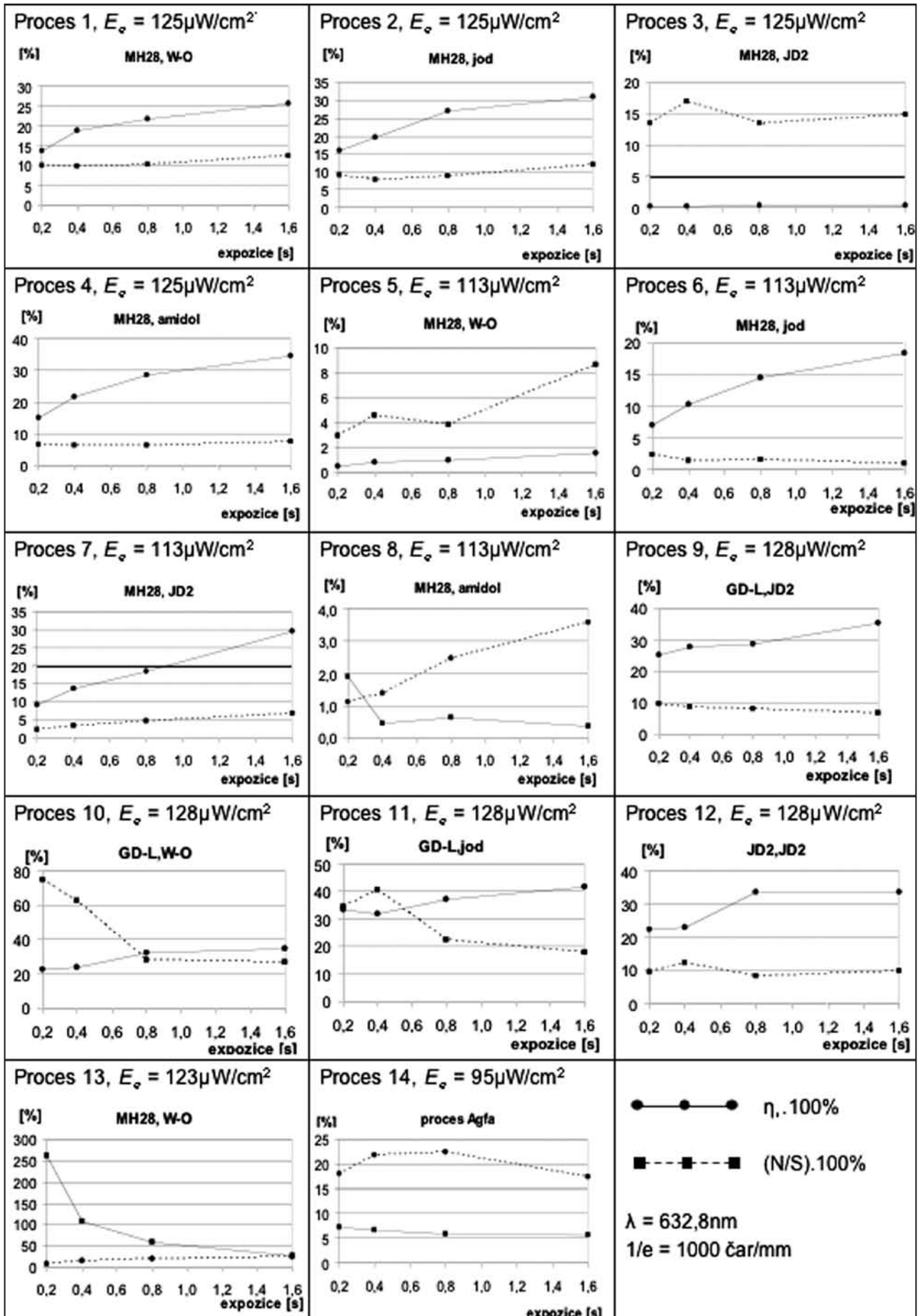
volání a vyprání emulze (fixation-free rehalogenating bleaching, FFRB). Konečně lze také postupovat tak, že po vyvolání a vyprání emulze z ní bělením a praním odstraníme veškeré kovové stříbro a ponecháme v emulzi jen neosvitnuté krystalky AgBr (reversal bleaching, RB), [4],[5].

3. VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

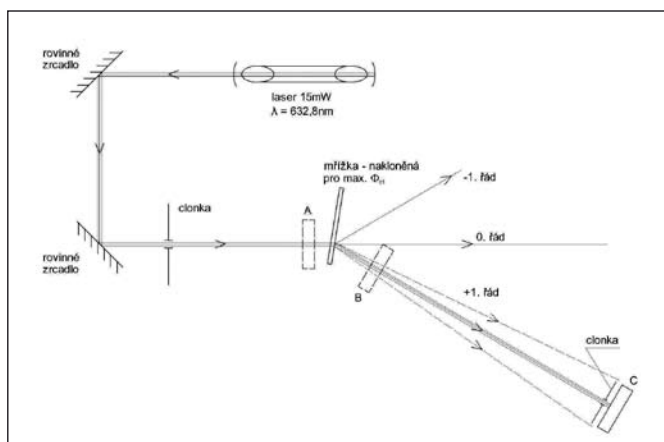
Pracovali jsme s holografickým materiálem Agfa Gevaert, speciálně s deskami 8E70, 8E75 a 10E70, které jsme podrobili různému chemickému zpracování. K výrobě mřížek bylo použito zařízení dle obr. 3, úhel dopadu byl nastaven pro lineární hustotu čar $1/e = 1000$ č/mm a ke každému chemickému procesu byly vyrobeny 4 mřížky s různou dobou osvitů (0,2 s, 0,4 s, 0,8 s a 1,6 s). Přitom jsme též měřili střední hodnotu ozáření E_c [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] citlivé emulze, použili jsme křemíkový detektor S120B Thorlabs. Na zhotovených mřížkách byla vždy změřena difrakční účinnost (v 1. difrakčním řádu a při natočení mřížky pro splnění Braggovy podmínky) a podíl šumu k signálu. Schéma pro měření je na obr. 4. Dopadající zářivý tok Φ_i byl měřen těsně před mřížkou (pozice detektoru A). Ve vzdálenosti 20 mm za mřížkou jsme měřili celkový zářivý tok v 1. řádu Φ_{d1} (signál + šum, pozice detektoru B) a ve vzdálenosti 400 mm za mřížkou pak signální tok Φ_{d1S} (s nasazenou kruhovou clonou na detektoru pro odstínění šumového toku, pozice detektoru C). Výsledky měření jsou zpracovány v grafech, obr. 5. Jednotlivé chemické procesy 1 až 14 jsou uvedeny v tab. 1, kde jsou též odkazy na literaturu zahrnující přesná složení jednotlivých lázní – vývojek a bělicích lázní. Vývojky GD-L Foma a MH28 jsou komerčně dostupné na českém trhu a jejich složení nám není známo. Pro eventuální ustalování byl používán rychlostalovač Foma Fomafix s thiosíranem amonným. Hypersensibilizaci ani latensifikaci materiálů jsme neprováděli.

Tab. 1 Použité chemické procesy

proc./mat.	vývojka	praní	ustalovač	praní	bělicí lázeň	praní
1 8E70	MH28, 1:4 60 sec.	voda 30 sec.	Fomafix, 1:5 60 sec.	voda 5 min.	W-O [6], p. 193, 1 min.	voda 5 min.
2 8E70	MH28, 1:4 60 sec.	voda 30 sec.	Fomafix, 1:5 60 sec.	voda 5 min.	jodová, [4], p. 371, 5 min.	90% ethanol, 10% voda, 2 min.
3 8E70	MH28, 1:4 60 sec.	voda 30 sec.	Fomafix, 1:5 60 sec.	voda 5 min.	JD2 [7] 60 sec.	voda 5 min.
4 8E70	MH28, 1:4 60 sec.	voda 30 sec.	Fomafix, 1:5 60 sec.	voda 5 min.	PBU amidol,[4], p. 371, 1 min.	voda 5 min.
5 8E70	MH28, 1:4 60 sec.	-	-	voda 5 min.	W-O [6], p. 193, 1 min.	voda 5 min.
6 8E70	MH28, 1:4 60 sec.	-	-	voda 5 min.	jodová, [4], p. 371, 5 min.	90% ethanol, 10% voda, 2 min.
7 8E70	MH28, 1:4 60 sec.	-	-	voda 5 min.	JD2 [7] 60 sec.	voda 5 min.
8 8E70	MH28, 1:4 60 sec.	-	-	voda 5 min.	PBU amidol,[4], p. 371, 1 min.	voda 5 min.
9 8E75	GD-L, 1:2 2 min.	-	-	voda 3 min.	JD2 [7] 60 sec.	voda 5 min.
10 8E75	GD-L, 1:2 2 min.	-	-	voda 3 min.	W-O [6], p. 193, 1 min.	voda 5 min.
11 8E75	GD-L, 1:2 2 min.	-	-	voda 3 min.	jodová, [4], p. 371, 5 min.	90% ethanol, 10% voda, 2 min.
12 8E75	JD2 [7] 2 min.	-	-	voda 3 min.	JD2 [7] 60 sec.	voda 5 min.
13 10E70	GD-L, 1:2 2 min.	-	-	voda 3 min.	W-O [6], p. 193, 1 min.	voda 5 min.
14 8E70	proces Agfa: vyvolání, přerušení, praní, bělení, praní, vyjasňování, praní, desensibilizace a sušení, opláchnutí etanolem. Složení lázní a doby viz [6], str. 192, viz též [8],[9].					



Obr. 5 Výsledky měření



Obr. 4 Schéma pro měření difrakční účinnosti

4. ZÁVĚR

Z uvedených grafů je zřejmé, že procesy 10 a 11 jsou v praxi nepoužitelné pro velký podíl šumu, procesy 3, 5 a 8 pro malou difrakční účinnost. Nejlepších výsledků jsme dosáhli s procesem 9 – difrakční účinnost byla 36 % a $N/S = 6,8$ %. Dobře použitelné jsou i procesy 4, 7, 12, a proces 14, při kterém je difrakční účinnost 22,4 % a $N/S = 5,8$ %. Vynikající poměr N/S , pouze 1 %, dává proces 6 a vyšší difrakční účinnosti by mohlo být dosaženo pro delší doby osvitů.

Poznámka: Tato práce byla vyvolána potřebou zpracovat skladové zásoby holografických materiálů Agfa-Gevaert v rámci výuky předmětu Holografie, tj. využít tyto materiály ke zhotovení matričních hologramů H1 s malým šumem a duhových hologramů H2 s vysokou difrakční účinností a ještě přijatelným šumem, [10].

Desky byly vyrobeny kolem roku 1982 (rok výroby není na deskách uveden), byly skladovány v chladničce při teplotě 6 °C. Uvedené materiály se již nevyrábějí, ale na světovém trhu jsou v současné době dostupné holografické materiály např. ruské firmy Slavich [11] a firmy Fuji [12] apod.

Autoři článku děkují vedoucímu Odboru přesné mechaniky a optiky v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT, Ing. Janu Hoškovi, Ph.D. za laskavou podporu.

Literatura

- [1] M. Born, E. Wolf: Principles of Optics, Pergamon Press, New York, 1964
- [2] J. Collier, Ch.B. Burekhardt, L.H. Lin: Optical Holography, Academic Press, New York, 1971
- [3] M. C. Huttlely: Diffraction Gratings, Academic Press, London, 1982
- [4] H.I. Bjelkhagen: Silver-Halide Recording Materials for Holography and their Processing, Springer, 1995
- [5] G. Saxby: Practical Holography, I o P, Bristol and Philadelphia, 2004
- [6] G. Wernicke, W. Osten: Holografische Interferometrie, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1982
- [7] www.desigerinlight.com/holo/chem.htm
- [8] Technische Information: Photographische Materialien für die Holographie, Oktober 1969, Gevaert-Agfa N.V., Mortsel – Belgien
- [9] P. Schultze: Red-sensitized, High-resolution Emulsions for Laser Photography, Laser Focus, June 1968, str. 23 – 25
- [10] P. Dvořáková, Š. Němcová, P. Václavík: Holografie, skriptum ČVUT, FS, 2008, Praha, Česká technika
- [11] www.slavich.ru
- [12] www.colourholographic.com

Šárka Němcová, e-mail: sarka.nemcova@fs.cvut.cz, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Odbor přesné mechaniky a optiky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Pavel Václavík, e-mail: pavel.vaclavik@fs.cvut.cz

Technické pokyny pro autory

Příspěvky se přijímají v elektronické formě.

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

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

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

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

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

Pokyny k předávání příspěvku

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

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

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

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

Mechanismus chladnutí nápojů – srozumitelný fyzikální popis

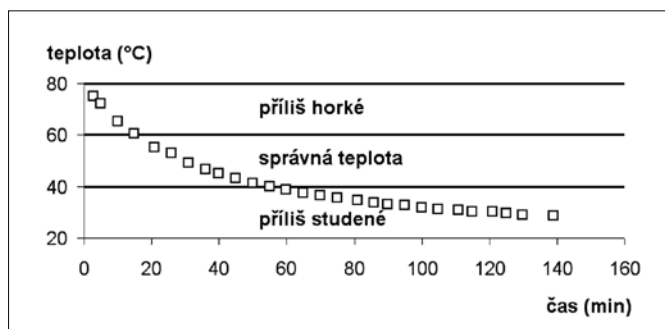
Článek popisuje fyzikální mechanismus chladnutí nápojů.

1. ÚVOD

Představme si běžnou situaci z každodenního života; pomalu chladnoucí zapomenutý šálek kávy – viz *obr. 1*. Má na průběh chladnutí nějaký vliv materiál, z něhož je šálek vyroben? Jaké fyzikální děje probíhají při tomto procesu? Které jsou více a které méně podstatné? Jakým způsobem můžeme proces chladnutí urychlit nebo naopak zpomalit?

Obraťme pozornost k experimentu, který se bude snažit zodpovědět naše otázky. Nejprve měříme časovou závislost chladnutí kávy v porcelánovém hrnku položeném na stole. Měření by mělo být prováděno po optimálních časových intervalech cca 5 min pomocí běžného teploměru (v našem případě rtuťového s přesností kolem 0,3 °C).

Chtěli bychom se zaměřit na detailní porozumění měřené závislosti a odhalit příslušné fyzikální jevy, které utvářejí celý proces. Toho zkusíme dosáhnout sestavením vhodného simulačního modelu a jeho přizpůsobením naměřeným datům.



Obr. 1 Časová závislost chladnutí kávy. Subjektivní hledisko vhodné teploty na pití

2. PRVNÍ MODEL

Začneme jednoduchým předpokladem, že teplo, které přejde za jednotku času z horké kávy do chladnějšího okolí, závisí pouze na teplotním rozdílu kávy a okolí, a to lineárně:

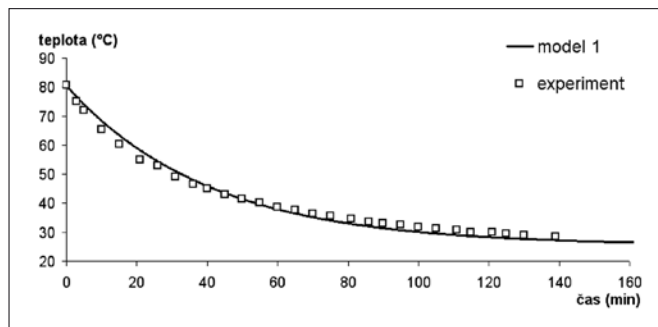
$$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = k(t_k - t_o), \quad (1)$$

kde k je koeficient výměny tepla mezi kávou a okolím, t_k mění se teplota kávy, t_o konstantní teplota okolí. Pokud předpokládáme, že káva je teplotně homogenní, lze rovnici (1) zapsat ve tvaru:

$$\frac{m c \Delta t}{\Delta \tau} = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = k(t_k - t_o), \quad (2)$$

kde m je hmotnost kávy a c její měrná tepelná kapacita. To rovněž odpovídá Newtonovu zákonu chladnutí.

Výše uvedenou rovnici (2) můžeme přibližně a jednoduše řešit numericky bez znalosti způsobů řešení diferenciálních rovnic – s pomocí počítačové aplikace Excel. Je však potřeba volit dostatečně malé časové kroky, aby neměly vliv na výsledek (stačilo volit desetisekundové kroky). Využitím funkce „Řešitel“ v Excelu přizpůsobíme naměřeným datům – „nafitujeme“ – koeficient k .



Obr. 2 Časová závislost teploty během experimentu porovnaná s výsledky prvního modelu (vypočtený koeficient $k = 0,54 \text{ Js}^{-1}\text{K}^{-1}$)

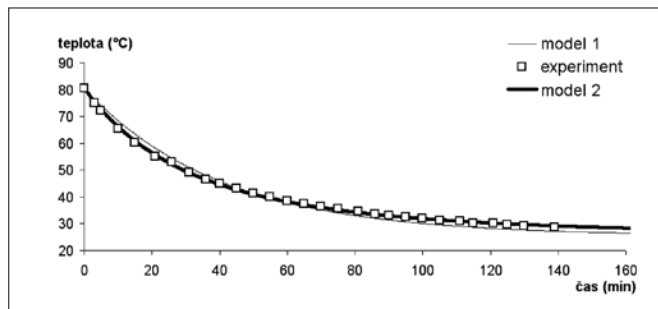
Jak lze usoudit z *obr. 2*, náš první model systematicky podceňuje ztrátu tepla na počátku chladnutí a naopak ji přeceňuje v pozdější fázi děje.

3. DRUHÝ MODEL

Pokusíme se vylepšit shodu modelu s experimentem zavedením předpokladu, že závislost časové změny tepla na rozdílu teplot není lineární, nýbrž mocninná:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = k(t_k - t_o)^x. \quad (3)$$

Zavedení výše uvedeného exponentu je určitá náhrada za lepší a detailnější popis děje. Oba parametry – k a x – jsou „nafitovány“ pomocí Excelu. *Obr. 3* ukazuje lepší shodu druhého modelu s experimentem oproti modelu prvnímu. Kvalitu shody posuzujeme z hodnoty sumy kvadrátů rozdílů mezi experimentálně zjištěnými a vymodelovanými hodnotami, kterou dále dělíme tzv. počtem stupňů volnosti – χ^2/NDF – bližší popis viz např. [2]. Hodnota χ^2/NDF menší nebo srovnatelná s hodnotou 1 znamená přijatelný souhlas teorie a experimentu, zatímco $\chi^2/\text{NDF} \gg 1$ svědčí o systematickém rozdílu mezi teorií a experimentem.



Obr. 3 Porovnání časové závislosti teploty experimentu a obou modelů. V případě druhého modelu jsou vypočtené koeficienty $k = 0,17 \text{ Js}^{-1}\text{K}^{-x}$ a $x = 1,34$. Hodnota χ^2/NDF se mění z 32,1 pro první model na 2,4 pro druhý model

4. TŘETÍ MODEL

Nyní je potřeba rozvést, jaké fyzikální procesy jsou skryty v existenci mocniny v rovnici (3). Jednak můžeme očekávat ztráty tepla při vypařování a s tím související úbytek hmotnosti kávy. Mimo to je teplo vyzařováno do okolí a pohlcováno z okolí. Hrnek, do kterého je káva nalita, se nejdříve zahřeje a potom se ochlazuje. Přítom jeho teplota může být jiná, než je teplota kávy. A teplo prochází skrze všechny povrchy.

Do dalšího modelu zapracujeme výše uvedené procesy:

- přechod tepla z kávy do hrnku:

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta \tau} = k_1 (t_k - t_o), \quad (4)$$

- vypařování kávy do okolí:

$$\frac{\Delta Q_2}{\Delta \tau} = v l_v t_k P, \quad (5)$$

- kde v je rychlost vypařování, l_v měrné skupenské teplo vypařování, P plocha povrchu kapaliny,

- vyzařování tepla z kávy do okolí:

$$\frac{\Delta Q_3}{\Delta \tau} = \alpha \sigma T_k^4 P, \quad (6)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, α pohltivost kávy,

- vyzařování tepla z okolí do kávy:

$$\frac{\Delta Q_4}{\Delta \tau} = \alpha \sigma T_o^4 P, \quad (7)$$

- přechod tepla z hrnku do okolí:

$$\frac{\Delta Q_5}{\Delta \tau} = k_2 (t_h - t_o), \quad (8)$$

kde t_h je teplota hrnku,

- vyzařování tepla z hrnku do okolí:

$$\frac{\Delta Q_6}{\Delta \tau} = \beta \sigma T_h^4 S, \quad (9)$$

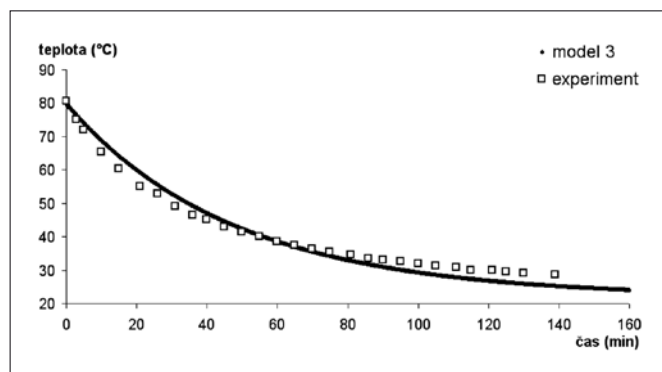
kde S je vyzařující povrch hrnku, β pohltivost materiálu hrnku,

- vyzařování tepla z okolí do hrnku:

$$\frac{\Delta Q_7}{\Delta \tau} = \beta \sigma T_o^4 S. \quad (10)$$

Z obr. 4 je jasně patrný velký rozdíl mezi experimentem a třetím modelem. Náš třetí model pořád ještě není ideální – hrnek je stále „tenký“, tj. ve všech místech má stále stejnou teplotu. Nicméně přínos tohoto modelu oproti modelu předchozímu spočívá v tom, že lépe vysvětluje fyzikální podstatu děje – alespoň v tom, že se káva vypařuje. Vzhledem k tomu, že nemáme hlubší znalosti ohledně vypařování, předpokládáme nejprve lineární teplotní závislost odpařovaného tepla. Pokud jde o parametry α , β , v , k_1 , k_2 , můžeme předpokládat, že jejich výše uvedené závislosti spočívají na reálných základech. Když však vezmeme v úvahu naše kritérium shody modelu a experimentu – hodnotu χ^2/NDF , zjistíme, že pro fyzikálně lépe popsany model vychází hůře ($\chi^2/\text{NDF} = 81,3$ pro třetí model a $\chi^2/\text{NDF} = 32,1$ pro první model).

Ještě předtím než začneme vytvářet další model, který lépe konverguje k realitě, zahrneme do našich úvah úbytek hmotnosti kávy jako důsledek vypařování. Potom bude naše kritérium přesnosti přibližně stejné ($\chi^2/\text{NDF} = 81,6$), ale náš model bude zase o krok blíže skutečnosti.

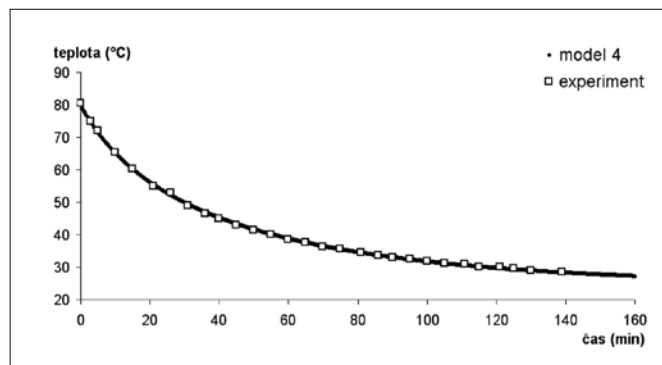


Obr. 4 Porovnání hodnot mezi experimentem a třetím modelem. Hodnoty vypočtených konstant jsou $k_1 = 31,43 \text{ Js}^{-1}\text{K}^{-1}$ a $k_2 = 0,31 \text{ Js}^{-1}\text{K}^{-1}$

5. ČTVRTÝ MODEL

Jak již bylo zmíněno, ze všech členů, které určují změnu tepla, toho nejméně víme o vypařování. Můžeme tedy reálně předpokládat, že největší chybu v našem třetím modelu způsobuje nesprávný předpoklad lineární závislosti teploty na úbytku tepla při vypařování. Do „výparného“ členu změny tepla proto vložíme mocninu teploty z jako volný parametr, jehož hodnotu nám určí excelovský „Řešitel“:

$$\frac{\Delta Q_2}{\Delta \tau} = v l_v t_k^z P. \quad (11)$$



Obr. 5 Časová závislost poklesu teploty – porovnání čtvrtého modelu s experimentem. Vypočtené konstanty jsou $k_1 = 29,87 \text{ Js}^{-1}\text{K}^{-1}$ a $k_2 = 0,18 \text{ Js}^{-1}\text{K}^{-1}$



Obr. 6 Měření rychlosti vypařování: Ponorný vařič řízený jednoduchým spínacím obvodem funguje jako termostat, nádoba s vodou je pravidelně vážena

Po vypočtení hodnoty teplotní mocniny $z = 3,73$ zaznamenáme pozoruhodnou shodu našeho čtvrtého modelu s experimentem – $\chi^2/\text{NDF} = 1,0$ a viz obr. 5.

Naskytá se přirozená otázka: Je hodnota mocniny $z = 3,73$ ve shodě s realitou nebo je to jen umělý výmysl? Odpověď zní: Hodnota mocniny $z = 3,73$ je opravdu ve shodě s realitou. Dává nám ji jednoduchý experiment, kde jsme měřili rychlost vypařování vody jakožto hmotnost odpařené vody v závislosti na teplotě – viz ilustrační obr. 6.

6. PÁTÝ MODEL

V dalším modelu budeme uvažovat nenulovou tloušťku hrnku, abychom mohli diskutovat vliv materiálu různých hrnků. Budeme tedy předpokládat, že teplota na povrchu hrnku je jiná než uvnitř. Proto upravíme dva výše uvedené členy (4) a (8) následujícím způsobem:

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta \tau} = k_1(t_k - t_{hi}), \quad \frac{\Delta Q_5}{\Delta \tau} = k_2(t_{he} - t_o), \quad (12)$$

kde t_{hi} , t_{he} jsou vnitřní a vnější teploty hrnku. Kromě toho je ještě třeba do našeho modelu započítat člen, který zahrnuje přechod tepla hrnkem:

$$\frac{\Delta Q_8}{\Delta \tau} = k_3(t_{hi} - t_{he}). \quad (13)$$



Obr. 7 Tři hrnky z různých materiálů – porcelánový, plechový a vakuový

7. POROVNÁNÍ VLIVU RŮZNÝCH PARAMETRŮ

Postupným zavedením parametrů do našich stále se zpřesňujících modelů a přizpůsobením jejich hodnot, aby co nejlépe odpovídaly experimentu, jsme získali celou sadu parametrů, které experiment popisují poměrně dobře. Nyní zjevně potřebujeme další přesně nastavené experimenty pro specifikaci různých parametrů. Abychom si ověřili význam parametru vypařování, dáme v dalším experimentu na hladinu kapaliny vrstvu tuku. V dalších experimentech používáme hrnky z různých materiálů a tedy i o různých tepelných kapacitách a s různými tepelnými vodivostmi – viz obr. 7.

Srovnání černé kávy a čisté vody zase ukazuje, jakou roli hraje pohltivost tepla povrchem kapaliny. Připravili jsme sadu experimentů za různých podmínek. Nejprve jsme zjistili, že dosažené výsledky nezávisí na hodnotě povrchového napětí a že tedy zásadní odlišnost mezi kávou a vodou je dána pouze různými tepelnými pohltivostmi (mám na mysli pouze v kontextu našeho experimentu, nikoliv v souvislosti s čichovými a chuťovými vjemy).

Další kroky spočívaly v realizaci experimentů pro:

- tři hrnky (porcelánový, plechový a vakuový, tj. s dvojitou stěnou),
- tři nápoje, resp. kapaliny (káva, voda a voda s tukem na hladině).

Určením a porovnáním všech koeficientů jsme došli k následujícím závěrům:

- tmavý povrch kávy vyzařuje a pohlcuje teplo lépe než povrch vody,
- lesklý povrch hrnku vyzařuje a pohlcuje teplo hůř než matný,
- tuk na hladině zabraňuje vypařování,
- teplo prochází porcelánovým hrnkem poněkud hůř než tenkým plecháčkem a mnohem lépe než vakuovým hrnkem.

Kvantitativní srovnání výše uvedených parametrů viz tab. 1.

8. ZÁVĚR

Tento článek ukazuje začátek příběhu, který vzniká na pozadí jevu našeho každodenního života. S dobrým výsledkem jsme vytvořili několik modelů popisujících chladnutí šálku kávy. Sled aproximací ukazuje, jak jsme postupovali ke stále detailnějšímu popisu; které procesy důležité jsou a které ne. Průběh experimentu nás přiměl k zavedení nelinearity do našeho modelu – zavedením mocniny do úbytku tepla daného vypařováním. A platnost našeho předpokladu jsme si ověřili v nezávislém experimentu. Celý příběh za použití jednoduchých prostředků ukazuje cestu od pozorování k popisu podstaty a může pokračovat dalšími studii.

Tabulka 1. Vypočtené („nafitované“) parametry pátého modelu

Nápoj	Hrnek	α	β	$\nu \cdot 10^{11}$ [$\text{kg s}^{-1} \text{K}^{-1} \text{m}^{-2}$]	k_1 [$\text{Js}^{-1} \text{K}^{-1}$]	k_2 [$\text{Js}^{-1} \text{K}^{-1}$]	k_3 [$\text{Js}^{-1} \text{K}^{-1}$]
káva	porcelán	0,990	0,192	15,8	2,90	0,360	2,04
voda	porcelán	0,005	0,192	15,8	2,90	0,360	2,04
tuk na vodě	porcelán	0,005	0,192	1,94	2,90	0,360	2,04
káva	kov	0,990	0,178	15,8	2,90	0,360	2,42
voda	kov	0,005	0,178	15,8	2,90	0,360	2,42
tuk na vodě	kov	0,005	0,178	1,94	2,90	0,360	2,42
káva	vakuový	0,990	0,050	15,8	2,90	0,360	0,187
voda	vakuový	0,005	0,050	15,8	2,90	0,360	0,187
tuk na vodě	vakuový	0,005	0,050	1,94	2,90	0,360	0,187

Poděkování. Tento článek vznikl v rámci výzkumného projektu VZ č. MSM 6046070905.

Literatura

- [1] Karls M A and Scherschel J E 2003 Modeling heat flow in a thermos *Am. J. Phys.* 71 678-683
- [2] Brandt S 1970 *Statistical and computational methods in data analysis* North Holland/ American Elsevier Publishing Company
- [3] Greenwald S J and Bauldry W C *Coffee cooling on a TI-CBL unit and in maple* <http://www.mathsci.appstate.edu/~sjg/papers/CoffeeCooling.pdf>
- [4] *Cooling a Cup of Coffee* <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/coocof2.html>
- [5] *The Coffee problem* <http://www.rogerfrost.com/cof.htm>
- [6] *Newton's Law of Cooling* <http://www.aw-bc.com/ide/Media/pdf/Documents/Part1/Labs/Lab01.pdf>
- [7] *How to use the Newton's Law of Cooling: Curve Fitting Tool* <http://www.aw-bc.com/ide/Media/JavaTools/nlhcddata.html>
- [8] *Martino, J.: Newton's Law of Cooling* <http://www.math.jhu.edu/courses/107/archives/notes/f01/coursenotes/node9.html>
- [9] *Yanik E Coffee, tea or not?* <http://archives.math.utk.edu/ICTCM/EP-7/SA14/pdf/paper.pdf>
- [10] *My Hot Chocolate is Too Hot!* 1999 <http://mathforum.org/calcpow/solutions/solution.ehtml?puzzle=48>

Jan Sedláček, katedra fyziky, Technická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6, e-mail: sedlacek@tf.czu.cz

Jiří Dolejší, Ústav částicové a jaderné fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta University Karlovy, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: Jiri.Dolejsi@mff.cuni.cz

Životné jubileum RNDr. Dagmar Senderákovéj, CSc.

Pre nás, ktorí ju poznáme, znie to neuveriteľné, ale je to tak. Naša kolegyňa sa v plnom zdraví a plná optimizmu dožila v októbri okrúhleho životného jubilea.

Narodila sa 14. októbra 1948 v Levoči. Mladosť prežila vo Svite a v Humennom, kde aj v r. 1966 zmaturovala. Okrem exaktných vied jej v tom čase bola najbližšou umelecká gymnastika, ktorej venovala všetok svoj voľný čas. Po maturite začala študovať matematiku a fyziku na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave a po druhom ročníku štúdiá si vybrala odbor fyzika so zameraním na optiku. Je zaujímavé, že ju neodradila ani známa kniha Blombergena z nelineárnej optiky, ktorú jej *dobromyseľní* učitelia (neskôr kolegovia) strčili do ruky ako základnú literatúru. Jej diplomová práca, ako aj prvé vedecké práce boli potom zamerané na problematiku samofokusácie laserového žiarenia.

Na Prírodovedeckej fakulte, ktorá sa postupne zmenila na Matematicko-fyzikálnu a neskôr na Fakultu matematiky, fyziky a informatiky, pracuje od ukončenia štúdia v r. 1971. Už od začiatku svojho pôsobenia bola zameraná na problematiku modernej optiky. Spočiatku to boli nelineárne optické javy, ale neskôr sa stala fažiskom jej práce optická holografia. V tejto oblasti sa stala známou nielen u nás, ale aj v zahraničí. Bola pri zrode študijného odboru Optika a optoelektronika, dnes Optika a lasery, ktorý sa na území SR študuje len na našej fakulte. Okrem desiatok vedeckých prác je autorkou viacerých učebných textov a spoluautorkou pripravovanej učebnice optiky. Jej rukami prešlo niekoľko desiatok diplomantov, ktorí sa úspešne uplatnili u nás i v zahraničí. Nemalú zásluhu má na každoročnej propagácii štúdiá na našej fakulte. Ale nielen



na našej fakulte, pôsobí aj v prednáškových cykloch rôznych vzdelávacích organizácií na Slovensku.

Významná je jej organizátorská práca na úseku vedy. Je jedinou slovenskou účastníčkou všetkých slovensko-česko-poľských konferencií, ktorých 18. ročník sa konal v uplynulých týždňoch a patrí medzi hlavných organizátorov týchto konferencií doteraz. Žiadne spoločenské zmeny ju neodradili od toho, aby udržovala a prehľbovala spoluprácu najmä s českými a poľskými fyzikálnymi pracovníkmi. Taktiež sústavne sa zúčastňuje organizovania medzinárodných konferencií Photonics Prague. Ako predsedkyňa a teraz tajomníčka Teritoriálneho ICO optického komitétu SR, viceprezidentka SPIE/CS a podpredsedníčka CSSP (Czech and Slovak Society for Photonics) reprezentovala slovenskú optiku na medzinárodnom poli, čomu doteraz venovala nielen mnoho voľného času, ale aj vlastných finančných prostriedkov. Ako členka redakčnej rady JMO prispieva k popularizácii a šíreniu výsledkov modernej optiky vo vede, výchove a vzdelávaní.

Naša jubilanťka má aj viaceré chvályhodné záľuby. Je to záhrada, kde si vyberá vždy tie najťažšie práce. Aj to prispieva k jej výbornému zdravotnému stavu, čo dokazuje aj tým, že do dnešného dňa nepozná čakáreň u lekára zvnútra. V tomto smere verí len vlastným liečebným postupom a elixírom.

Vážená pani doktorka, milá Dagmar, ďakujeme, že si to v našom kolektíve doteraz vydržala a želáme Ti do ďalších rokov veľa zdravia, šťastia a úspechov.

Vladimír Mesároš, Anton Štrba

Interferometrické metody vyhodnocování fáze vlnového pole v optice

V článku je podán přehled vybraných metod vyhodnocování fáze optického vlnového pole, které jsou založeny na interferenčním principu. Jsou zde zmíněny jak klasické, tak i moderní interferometrické metody vyhodnocování fáze, jež se dají prakticky využít v mnoha aplikacích, zejména pak v oblasti optické metrologie ve vědě a průmyslu. Výhodou těchto metod je jejich vysoká přesnost, možnost realizovat bezkontaktní způsob měření v různých aplikacích a provádění vyhodnocení prakticky v reálném čase.

1. ÚVOD

Je dobře známo, že fáze vlnění má fundamentální význam pro popis a analýzu jevů v oblasti šíření a interakce elektromagnetických vlnových polí s prostředím. Vyhodnocováním fáze elektromagnetického vlnění a jejích změn je možno získat množství užitečných informací, které lze v praxi především využít pro aplikace v nejrůznějších měřicích a diagnostických metodách v oblasti fyziky, techniky a lékařství. Důležitým aspektem této problematiky je ten fakt, že fázi elektromagnetického pole v optické části spektra nelze měřit přímo, jelikož neexistují fotodetektory, jejichž odezva by byla srovnatelná s periodou optického záření. Lze proto měřit pouze intenzitu záření užitím různých typů fotodetektorů pro zmíněnou spektrální oblast. Pro současnou praxi je velmi důležité umět získat kvantitativní informaci o fázi nebo jejích změnách. Vývoj problematiky kvantitativního určování fáze optického vlnového pole souvisí především s rozvojem interferometrických a holografických technik pro nedestruktivní testování, rozvojem adaptivních optických systémů a s novými požadavky na kvantitativní analýzu obrazu v různých optických systémech. Existuje velké množství metod pro kvantitativní vyhodnocování fáze v oblasti optiky [1-18]. Tyto metody využívají primárně analýzy interferenčních polí, experimentálního určování gradientu fázových hodnot a numerického řešení rovnice pro transport intenzity v elektromagnetickém poli.

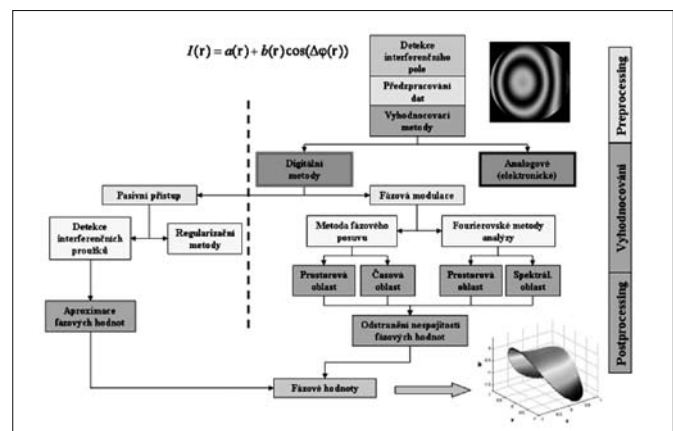
Nejrozšířenější oblastí vyhodnocovacích a měřicích metod jsou v současnosti interferometrické systémy, které též poskytují nejvyšší přesnost určení hodnot fáze. V praxi existuje množství interferometrických metod pro získání kvantitativní informace o fázi vyšetřovaného optického vlnového pole. Tyto metody jsou založeny na fyzikálních principech interference světla. Využívají se zejména metody klasické dvousvazkové interferometrie, stříhové interferometrie, vícesvazkové interferometrie, polarizační interferometrie, interferometrie v bílém světle, apod. Nejpoužívanějším typem metod v praxi jsou metody dvousvazkové interferometrie, které umožňují určit optický dráhový rozdíl, resp. fázový rozdíl mezi dvěma interferujícími vlnami. Tyto metody se např. široce využívají pro kontrolu kvality vyráběných optických prvků a soustav v optické výrobě. V dalším textu se zaměříme na popis procesu kvantitativního vyhodnocování fáze pomocí nejčastěji využívaných metod ve dvousvazkové interferometrii.

2. PROCES VYHODNOCOVÁNÍ FÁZE VE DVOUSVAZKOVÉ INTERFEROMETRII

Dvousvazkové interferometrické měřicí metody [1, 2] jsou založeny na principu interference dvou vlnových polí (předmětového a referenčního) a následné detekci prostorového rozdělení intenzity interferenčního pole na ploše fotodetektoru. Úlohou vyhodnocovacích metod je poté správné určení fázového, resp. dráhového rozdílu mezi interferujícími vlnami. V současné době se rozvíjejí

interferometrické měřicí metody, které zpracovávají měření v reálném čase s použitím počítačových metod analýzy interferenčního pole. Pro detekci a modulaci interferenčního pole používají nových optoelektronických a elektronických prvků (CCD detektory, piezoelektrické posuvy, speciální difrakční prvky, polarizační maticové prvky, fázové modulátory, aj.) a počítačové techniky.

Vyhodnocovací proces lze v zásadě rozčlenit do následujících kroků, jež jsou schematicky znázorněny na obr. 1: *detekce a záznam interferenčního pole (tzv. interferogramu), předzpracování interferogramu (preprocessing), výpočet fázových hodnot, následná analýza (postprocessing)*. Automatická analýza interferenčních struktur pokrývá široké spektrum vyhodnocovacích metod, jež jsou založeny na rekonstrukci fáze z jednoho nebo několika časově, resp. prostorově oddělených měření rozdělení intenzity interferenčního pole.



Obr. 1 Schéma procesu vyhodnocování interferenčního pole

Podle uvedeného schématu lze vyhodnocovací metody rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní přístup spočívá v záznamu jednoho interferogramu v daném časovém okamžiku a následném vyhodnocení pomocí matematických algoritmů. Nejčastěji se v této skupině využívá přímá detekce extrémů intenzity interferenčního pole, popř. specializované regularizační metody [1-3]. Druhý přístup k vyhodnocování fáze spočívá v aktivní fázové modulaci interferenčního pole. Zde jsou nejrozšířenější fourierovské metody analýzy interferogramů (Fourier transform techniques) [1, 2, 4-6] a tzv. metoda fázového posuvu (phase shifting method) [1, 2, 8-13].

V tomto článku se zaměříme na nejrozšířenější metody počítačového vyhodnocování fáze, které se běžně využívají v praxi. Pro analýzu interferogramů a vyhodnocení fázového rozdílu zkoumaného

interferenčního pole se dá použít množství různých typů metod, které jsou založeny na vyhodnocování prostorového a časového průběhu intenzity interferenčního pole, zaznamenaného v rovině fotodetektoru. Jedinou přímo měřitelnou fyzikální veličinou v procesu vyhodnocování interferenčního pole je intenzita tohoto pole. Skutečné rozdělení intenzity interferenčního pole v místě detektoru je poté výchozím bodem pro dále popisované vyhodnocovací metody. Veličinou, která je v průběhu vyhodnocovacího procesu určována pomocí různých typů matematických algoritmů, je fázový rozdíl $\Delta\varphi$ mezi dvěma interferujícími vlnami v rovině detektoru. V případě dvousvazkové interference můžeme popsat prostorové rozdělení intenzity vzniklého interferenčního pole v rovině (x,y) pomocí následujícího vztahu

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[\Delta\varphi(x,y)], \quad (1)$$

kde $I(x,y)$ je intenzita interferenčního pole v rovině detektoru, $a(x,y)$ je funkce charakterizující střední hodnotu intenzity a $b(x,y)$ je funkce určující modulaci interferenčního signálu. Optický dráhový rozdíl $W(x,y)$, který vyjadřuje změnu optické dráhy interferujících svazků, závisí na fázovém rozdílu $\Delta\varphi(x,y)$ podle následujícího vztahu

$$W(x,y) = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi(x,y), \quad (2)$$

kde λ je vlnová délka použitého záření. Vzhledem k tomu, že platí

$$\begin{aligned} \cos[\Delta\varphi(x,y)] &= \cos[m\Delta\varphi(x,y) + 2\pi n] \\ m &= \{-1, 1\}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

nemůže být fázový rozdíl získaný pomocí jednoho interferogramu plně určen (až na znaménko a celočíselný násobek 2π). Problému s neurčitostí fázových hodnot až na znaménko se lze zbavit např. pomocí apriorní informace o průběhu fáze, záznamem více interferogramů s různou změnou fáze nebo fázovou modulací interferenčního pole zavedením vhodně zvolené prostorové frekvence do interferogramu [1,2]. Pomocí většiny algoritmů pro vyhodnocení fáze lze získat fázové hodnoty pouze uvnitř intervalu $[-\pi, \pi]$. Je proto nutné použít speciální matematické algoritmy pro spojitě navázání fázových hodnot (tzv. phase unwrapping) [14-18].

2.1. Detekce a předzpracování interferogramu

První fází analýzy a vyhodnocení fáze je detekce a digitalizace rozdělení intenzity interferenčního pole ve zvolené rovině pozorování (rovině detekce optického záření). Digitální obraz můžeme matematicky popsat pomocí funkce dvou proměnných (souřadnic x,y v rovině detekce optického záření). Hodnoty této obrazové funkce odpovídají měřené fyzikální veličině (tj. intenzitě záření dopadajícího na detektor). Obraz zaznamenaného interferenčního pole se nazývá *interferogram*. Detekovaná intenzita interferenčního pole je zdrojem spojitého dvourozměrného signálu. Avšak pro reálné zpracování obrazové funkce pomocí počítače potřebujeme získat diskrétní reprezentaci tohoto vlnového pole. Proces, který musíme s obrazovou informací provést, se nazývá digitalizace obrazu. Digitalizace spočívá ve vzorkování obrazu na matici $M \times N$ obrazových bodů (pixelů) a v kvantování spojitého pole na každém vzorku do K intervalů, kdy obrazová funkce (intenzita) nabývá celočíselných hodnot. Čím jemnější zvolíme vzorkování a kvantování obrazu, tím lépe je aproximován původní spojitý obrazový signál. Při procesu digitalizace obrazu je tedy pro správný záznam obrazu (interferenčního pole) nutno vhodně vyřešit vzorkování obrazu a volbu kvantovacích úrovní. Pro detekci intenzity interferenčních polí se v současnosti nejvíce používají polovodičové detektory optického záření. Z praktického hlediska se v oblasti optické metrologie uplatňují CCD senzory, jejichž výhodou je vysoké prostorové rozlišení, vysoká citlivost a poměrně nízký šum.

Vzhledem k tomu, že měřená data vždy jistým způsobem obsahují vlivy různých fyzikálních parametrů, které mohou nepříznivým způsobem ovlivňovat měření (často jsou např. vstupní data zatížena různými typy šumu), je nutno často před samotným vyhodnocováním provést digitální předzpracování naměřených dat. Tento proces vede k zajištění vyšší kvality vstupních dat a následně vyšší úspěšnosti zpracování a vyhodnocení měření. Vybrané parametry, které mohou určovat a testovat kvalitu zaznamenané interferenční struktury, jsou např. kontrast interferenčních proužků, poměr signál/šum, spojitost interferenčních proužků, vyváženost intenzity pozadí obrazu, rozdělení prostorových frekvencí proužků v interferogramu, apod. Analyzovaná interferenční struktura je tedy často ovlivněna mnoha rušivými faktory, se kterými se musí co nejlépe vypořádat automatické vyhodnocovací metody. Typické rozdělení reálné detekované intenzity interferenčního pole můžeme psát jako

$$I(x,y) = I_0(x,y) \left[1 + K(x,y)\cos\Delta\varphi(x,y) \right] N_m(x,y) + N_a(x,y), \quad (4)$$

kde I_0 je intenzita pozadí (střední hodnota intenzity v daném místě), K je kontrast interferenčního pole, N_m je multiplikační šum a N_a je aditivní šum. Intenzitu pozadí mohou ovlivňovat zejména následující parametry: energetický profil svazku, nerovnoměrná odrazivost a propustnost použitých optických soustav a vyšetřovaných objektů, nerovnoměrná citlivost použitého fotodetektoru, parazitní difrakční a interferenční jevy v optickém měřicím systému (např. působením prachových částic v optickém systému), stabilita zdroje záření, apod. Změny intenzity pozadí interferogramu, způsobené energetickým profilem svazku, mají nízké frekvence a naopak změny, způsobené nerovnoměrnou odrazivostí povrchů a nerovnoměrnou citlivostí detektoru, se mohou projevit jako vysokofrekvenční složky. Rušivé vlivy okolního prostředí při měření, např. mechanické vibrace nebo fluktuační indexu lomu vzduchu, mohou způsobit vážnou degradaci interferogramů. Proudění vzduchu může náhodně měnit rozložení indexu lomu vzduchu a tím i optický dráhový rozdíl. Popsané negativní faktory mohou výrazným způsobem ovlivnit měření, což se projeví zejména při měření s dlouhými expozičními časy, kdy fluktuační uvedené fyzikální veličiny vedou ke značnému snížení kontrastu a degradaci prováděného měření. Pro odstranění těchto problémů z procesu měření je možno umístit měřicí zařízení na antivibrační stůl a zajistit stabilitu parametrů okolního prostředí při procesu měření, resp. použít takové interferometrické metody, které uvedené vlivy jistým způsobem eliminují. Interferenční signál je dále při detekci a následném elektronickém zpracování částečně degradován přenosovými vlastnostmi optického systému a šumem. K odstranění uváděných negativních vlivů se dají využít mnohé metody digitální analýzy obrazu (prostorová, resp. frekvenční filtrace obrazu, metody vyrovnání kontrastu, apod.) [19]. Pro eliminaci aditivního šumu způsobeného detekčním procesem je též možno využít průměrování několika snímků interferenčního pole v různých časových okamžicích.

2.2. Metody vyhodnocení lokálních extrémů intenzity interferenčního pole

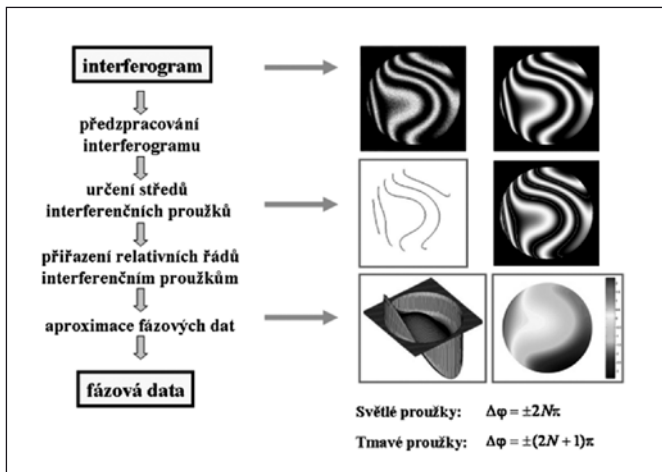
Nyní si popíšeme vyhodnocovací metody, jež jsou založeny na předpokladu, že lokální extrémy rozdělení intenzity v interferogramu odpovídají extrémům předpokládané struktury detekovaného interferenčního signálu (1). V tom případě je fázový rozdíl interferenčního pole v bodech, nacházejících se v lokálních extrémech (minimech nebo maximech) průběhu intenzity interferenčního pole, rovný lichému nebo sudému násobku π . Automatická identifikace těchto intenzitních extrémů, tj. hledání středů interferenčních proužků, je digitální obdobou dřívějších manuálních či poloautomatických technik vyhodnocování interferogramů, používaných zejména v holografické interferometrii a při testování v optickém průmyslu, kdy byly zjišťovány body ležící na středech interferenčních proužků,

ať již ručně nebo pomocí digitalizačních tabletů. Tyto metody však nezajišťovaly dostatečnou přesnost vyhodnocení a neumožňovaly provést analýzu měření v kvazireálném čase.

Hlavním cílem vyhodnocovacích algoritmů je tedy získání bodů na středech interferenčních proužků, ve kterých je fázový rozdíl znám, a následně provedení aproximace fázového rozdílu. Proces analýzy interferenčního pole pomocí uvedené metody (obr. 2) lze popsat následujícími kroky:

1. záznam a digitalizace interferenčního pole
2. specifikace analyzované oblasti interferogramu
3. předzpracování interferogramu
4. určení středů interferenčních proužků
5. číslování proužků přiřazením interferenčního řádu
6. aproximace fázových hodnot z dat na interferenčních proužcích

Existuje několik různých přístupů, jak více či méně efektivně řešit problém určení středů interferenčních proužků [2, 3]. Tyto přístupy digitální analýzy obrazu můžeme v zásadě rozdělit na metody založené na segmentaci struktur v digitálním obrazu nebo na metody, využívající různých maticových operátorů a lokálních vlastností okolí vyšetřovaných obrazových bodů v digitálním obrazu.



Obr. 2 Proces vyhodnocování fáze metodou lokalizace středů interferenčních proužků

Metody segmentace interferenční struktury jsou založeny na rozdělení digitálního obrazu do oddělených podoblastí, reprezentujících světlé a tmavé proužky, na základě vhodných lokálních vlastností interferogramu (např. gradientu rozdělení intenzity, resp. střední hodnoty intenzity). Jiným vhodným přístupem je určování lokálních extrémů ve struktuře interferenčních proužků porovnáváním hodnot intenzity sousedních obrazových bodů v blízkém okolí zkoumaného bodu (přímé hledání extrémů na základě gradientu rozdělení intenzity). Je nutno poznamenat, že rekonstrukce fázových hodnot ze středů jednotlivých interferenčních proužků, získaných některou z předchozích metod, není zdaleka snadný a jednoznačný problém vzhledem k předchozímu zpracování interferenční struktury. Pomocí této metody, vycházející z jednoho interferogramu, získáme bez apriorní informace o měřené veličině vždy nejednoznačný výsledek ve znaménku hledaného fázového rozdílu $\Delta\varphi$.

Další fází vyhodnocování interferogramu po správném určení středů interferenčních proužků je jejich jednoznačné očíslování (tj. přiřazení relativního řádu interferenčním proužkům). Pro získání fázových hodnot musíme postupně v souladu s jistými pravidly jednotlivým proužkům přiřadit relativní řády. Po bezchybném a jednoznačném očíslování interferenčních proužků je možné aproximovat fázový rozdíl z bodů ležících na středech jednotlivých proužků. Je nutné použít vhodné matematické metody aproxima-

ce, resp. interpolace na dvourozměrné oblasti. Naměřená fázová data představují nepravidelně uspořádané body o souřadnicích (x,y) , ve kterých je známa hodnota fáze $\Delta\varphi$, resp. vlnoplochy W (optického dráhového rozdílu). Z matematického hlediska se jedná o aproximaci funkce dvou proměnných na určité oblasti, známe-li v řadě bodů této oblasti její funkční hodnoty. Z technického hlediska jsou nejdůležitější dva typy geometrických oblastí, a sice kruhová a čtvercová oblast, neboť optické prvky, apertury optických soustav a maticové fotodetektory mají nejčastěji kruhový (eliptický) nebo čtvercový (obdélníkový) tvar. V praxi se většinou užívá polynomiální aproximace pomocí vhodně zvolených polynomů (např. Zernikeovy či Legendrovy polynomy).

Při aproximaci fázových hodnot (resp. hodnot dráhového rozdílu) metodou lokalizace extrémů rozdělení intenzity v interferogramu se *maxima intenzity*, tj. světlé interferenční proužky, budou nacházet v místech, kde je splněna podmínka

$$\Delta\varphi = \pm 2N\pi, \quad N = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Minima intenzity, tj. tmavé interferenční proužky, se budou nacházet v místech, kde je splněna podmínka

$$\Delta\varphi = \pm(2N+1)\pi, \quad N = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Použijeme-li metodu globální aproximace fázového rozdílu $\Delta\varphi$, potom např. vybereme reprezentativní body ležící na středech tmavých interferenčních proužků. Jednotlivé koeficienty polynomiální aproximace je možno nalézt pomocí metody nejmenších čtverců. Tím dostaneme soustavu lineárních rovnic $\mathbf{H}\mathbf{k} = \mathbf{f}$ pro $i = 1, 2, 3, \dots, M$, kde M je počet vybraných bodů, ležících na středech tmavých interferenčních proužků a kde pro prvky H_{ik} matice \mathbf{H} soustavy potom platí

$$H_{ik} = P_k(x_i, y_i), \quad \mathbf{k}^T = \{k_i\}, \quad (5)$$

$$\mathbf{f}^T = \{(2N_1+1)\pi, \dots, (2N_M+1)\pi\},$$

přičemž $P_k(x, y)$ jsou zvolené polynomy. Řešením této soustavy lineárních rovnic poté získáme hodnoty koeficientů aproximace fázového rozdílu pomocí zvolených polynomů.

2.3. Metoda Fourierovy transformace rozdělení intenzity interferenčního pole

Tato vyhodnocovací metoda [1, 2, 4-6] využívá specifických vlastností spektra prostorových frekvencí detekovaného rozdělení intenzity interferenčního pole. Pro spektrální analýzu interferogramu se používá diskretní Fourierova transformace interferenčního signálu. Spektrum je charakterizováno jedním hlavním a dvěma vedlejšími spektrálními vrcholy. Spektrální vrchol v oblasti nulových frekvencí reprezentuje nízkofrekvenční složku, která má původ ve funkci modulace intenzity pozadí interferogramu. Dva vedlejší spektrální vrcholy poté nesou informaci o fázovém rozdílu interferenčního pole $\Delta\varphi$. Užitím adaptivních pásmových filtrů ve frekvenční oblasti lze získat jeden z vedlejších spektrálních vrcholů. Následně zpětnou Fourierovou transformací obdržíme fázové hodnoty, které se nacházejí v intervalu $[-\pi, \pi]$. Nespojitosť fázových hodnot, vzniklé procesem vyhodnocení, musí být odstraněny vhodnými matematickými algoritmy (phase unwrapping) [14-18]. Uvedený proces vyhodnocení je schematicky znázorněn na obr. 3 pro případ vyhodnocování interferenčního pole s tzv. referenční prostorovou frekvencí. Základní interferenční rovnici (1) lze přepsat pomocí exponenciálních funkcí do následujícího tvaru

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) + c^*(x, y), \quad (6)$$

kde

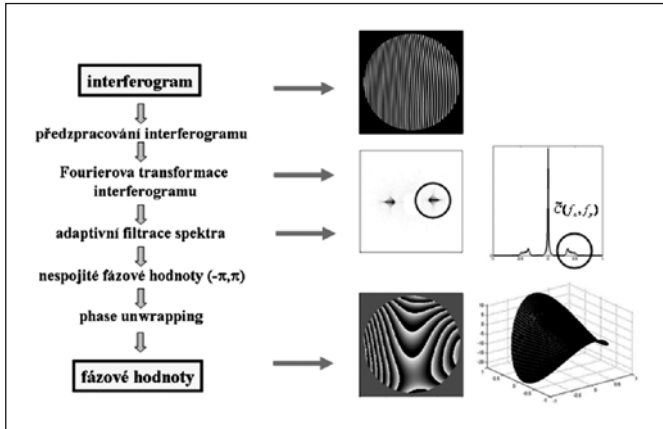
$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{i\Delta\varphi(x, y)},$$

Fourierovské spektrum interferogramu má poté tvar

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \mathbf{F}\{I(x, y)\} = \tilde{A}(f_x, f_y) + \tilde{C}(f_x, f_y) + \tilde{C}^*(f_x, f_y), \quad (7)$$

$$\tilde{C} = 0,5 \cdot \mathbf{F}\{be^{i\Delta\varphi}\},$$

kde f_x, f_y jsou prostorové frekvence, \mathbf{F} označuje symbol pro Fourierovu transformaci $\tilde{I}(f_x, f_y)$, $\tilde{A}(f_x, f_y)$, $\tilde{C}(f_x, f_y)$ jsou transformace funkcí $I(x, y)$, $a(x, y)$, $c(x, y)$ a $*$ značí komplexně sdruženou funkci.



Obr. 3 Proces vyhodnocování interferenčního pole metodou Fourierovy transformace

Jelikož $I(x, y)$ je reálná funkce prostorových proměnných, potom její Fourierova transformace je hermitovská funkce v oblasti prostorových frekvencí, tj. platí

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \tilde{I}^*(-f_x, -f_y).$$

Amplitudové spektrum $|\tilde{I}(f_x, f_y)|$ je proto symetrické vzhledem k členu $\tilde{I}(0, 0)$. Funkce $\tilde{A}(f_x, f_y)$ obsahuje člen $\tilde{I}(0, 0)$ a spektrum charakterizující nízkofrekvenční kolísání intenzity pozadí vyšetřované interferenční struktury. Členy $\tilde{C}(f_x, f_y)$ a $\tilde{C}^*(f_x, f_y)$ nesou vzhledem k uvedeným vlastnostem stejnou informaci. Cílem analýzy je tedy vhodným způsobem oddělit jednu z těchto složek a zpětně určit fázový rozdíl $\Delta\varphi(x, y)$.

To lze provést pásmovou filtrací spektra interferogramu [2, 4-6]. Inverzní Fourierovou transformací poté získáme komplexní funkci $c(x, y)$, ze které již lze určit fázový rozdíl zkoumaného interferenčního pole

$$\Delta\varphi_W(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[\mathbf{F}^{-1}\{\tilde{C}(f_x, f_y)\}]}{\text{Re}[\mathbf{F}^{-1}\{\tilde{C}(f_x, f_y)\}]}, \quad \Delta\varphi_W \in [-\pi, \pi]. \quad (8)$$

kde \mathbf{F}^{-1} označuje symbol pro inverzní Fourierovu transformaci. Pásmová filtrace spektra interferogramu ve spektrální oblasti je zásadním krokem této vyhodnocovací metody. Pomocí vhodně zvoleného filtru se dá velmi dobře odstranit šum a nerovnoměrná intenzita pozadí, avšak nesprávně zvolený filtr může způsobit vážné porušení výsledných dat. Metoda je jednoduchá a snadno realizovatelná v praxi. Nicméně vyhodnocení fáze trpí některými nedostatky a omezeními. Značnou nevýhodou této metody může být špatná oddělitelnost vedlejšího spektrálního vrcholu od zbytku spektra. Tento problém může být řešen zavedením tzv. *referenční prostorové frekvence* do referenčního svazku [2], což umožní lepší separaci vedlejších spektrálních vrcholů. Fourierovské spektrum interferogramu má poté tvar

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \tilde{A}(f_x, f_y) + \tilde{C}(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) + \tilde{C}^*(f_x + f_{0x}, f_y + f_{0y}), \quad (9)$$

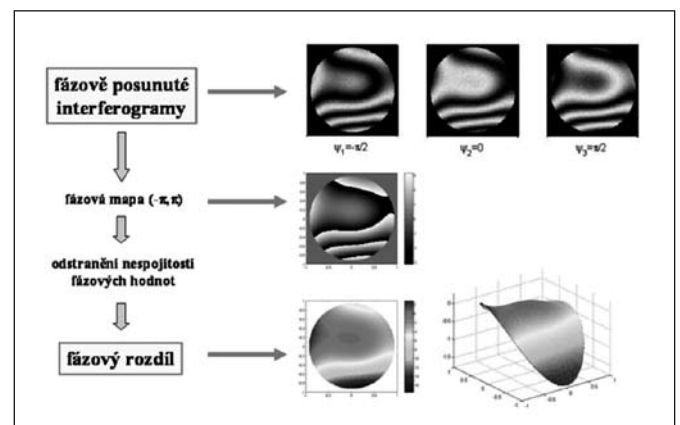
kde f_x, f_y jsou prostorové frekvence a f_{0x}, f_{0y} jsou referenční prostorové frekvence. Vzhledem k tomu, že obrazová funkce (2D interferenční signál) je prostorově omezená funkce, potom její Fourierova transformace je funkce neomezená a tudíž dochází k jistým chybám a prolínání jednotlivých členů spektra. Předpokladem pro úspěšné použití této metody je dobrá oddělitelnost postranních spektrálních vrcholů od nízkofrekvenčního spektra signálu. Odfiltrované spektrum je posunuto ve směru x a y o hodnotu odpovídající referenční frekvenci (f_{0x}, f_{0y}) a je provedena inverzní Fourierova transformace, jejímž výsledkem je rozložení fázových hodnot $\Delta\varphi_W$ v intervalu $[-\pi, \pi]$. U těchto fázových hodnot je poté nutno odstranit nespojitosti způsobené vyhodnocovacím procesem. Hlavní zdroje chyb v uvedené metodě zahrnují chyby spojené s procedurou diskretní Fourierovy transformace, chyby způsobené nesprávnou filtrací ve frekvenční oblasti a vliv šumu.

2.4. Jiné metody demodulace fázových hodnot použitím jednoho interferogramu

Předchozí metody mají výhodu v tom, že jsou relativně jednoduché a experimentálně nenáročné, neboť pro vyhodnocení používají pouze jeden snímek interferenčního pole. Existují i jiné metody tohoto typu [1, 2] (např. metoda využívající nelineárních optimalizačních algoritmů nebo demodulace fázových hodnot v prostorové oblasti zavedením referenční prostorové frekvence). Nicméně tyto metody nejsou vzhledem ke svým nedostatkům, výpočetní náročnosti nebo dosahované přesnosti v praxi příliš používány.

2.5. Metoda fázového posuvu v časové oblasti

Metoda je založena na principu vyhodnocení interferenčního signálu s použitím fázové modulace interferenčního pole [1, 2, 8-13]. Metoda používá pro rekonstrukci fázových hodnot několik interferogramů, které se od sebe odlišují jistou změnou fáze. Obecně jsou potřeba minimálně tři fázově posunutá měření intenzity interferenčního pole pro jednoznačné získání fázového rozdílu interferenčního pole. Schéma vyhodnocovacího procesu v metodě fázového posuvu je znázorněno pro případ tříkrokového algoritmu s fázovým posuvem $\pi/2$ na obr. 4. Vyhodnocením pomocí speciálních matematických algoritmů lze poté získat fázové hodnoty v intervalu $[-\pi, \pi]$. Při interferenci dvou koherentních vlnových polí (referenčního a předmětového) se řízená změna fáze (fázový posuv) interferenčního signálu obvykle zavádí do referenčního svazku. V praxi se dá realizovat mnoha odlišnými způsoby, např. použitím zrcadla s piezoelektrickým posuvem, použitím posuvných hranolů, sklápěním planoparalelní skleněné destičky v dráze svazku, použitím akustooptického modulátoru, fázových modulátorů světla, kombinací polarizačních a fázových prvků, aj. [1, 2, 8]. Asi nejběžnější metodou, jak uskutečnit fázový posuv, je přesné nastavování různých optických prvků (např. zrcadla) v dráze referenčního svazku pomocí piezoposuvu.



Obr. 4 Proces vyhodnocení fázových hodnot metodou fázového posuvu

Metoda fázového posuvu pro analýzu interferenčního pole se začala používat již v polovině sedmdesátých let dvacátého století pro aplikace v oblasti klasické interferometrie a holografické interferometrie. V současnosti se řadí mezi nepoužívanější metody vyhodnocení fáze s velmi vysokou přesností. Minimální počet tří fázově posunutých interferogramů je určen neznámými veličinami v základní interferenční rovnici (1). Měřením intenzity pro různé hodnoty fázového posuvu ψ je poté možno určit hledaný fázový rozdíl $\Delta\varphi$ interferenčního pole v každém bodě interferogramu. Fázové hodnoty jsou, na rozdíl od předešlých metod, vzhledem k použití více interferogramů určeny s vysokou přesností ve všech obrazových bodech maticového fotodetektoru a jednoznačně, bez problémů s jejich znaménkem; lze v principu použít libovolných hodnot fázového posuvu, je vhodné pro snazší analýzu ponechat fázový posuv ψ konstantní.

Problém získání fázových hodnot je obdobný procesu určení fáze reálného harmonického signálu. Tento problém může být řešen a popsán např. pomocí metody nejmenších čtverců [2]. Rozdělení intenzity v bodech (x,y) jednotlivých detekovaných snímků lze psát jako

$$I_i(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos[\Delta\varphi(x,y) + \psi_i] \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, N \quad N \geq 3,$$

kde funkce $a(x,y)$ a $b(x,y)$ vyjadřují střední hodnotu intenzity a modulaci interferenčního signálu, $\Delta\varphi(x,y)$ je fázový rozdíl interferujících svazků a ψ_i je fázový posuv příslušný i -tému snímku interferenčního pole. Pro získání fázových hodnot je nutné řešit systém nelineárních rovnic pro každý bod (x,y) interferogramu. V případě, že hodnoty fázového posuvu ψ_i jsou předem určeny, potom zbývají ještě tři veličiny $a(x,y)$, $b(x,y)$ a $\Delta\varphi(x,y)$, které je nutno určit. Je tedy nutno provést minimálně $N = 3$ měření intenzity se známým fázovým posuvem, abychom mohli určit neznámé veličiny. Pro fázové hodnoty $\Delta\varphi(x,y)$ lze odvodit obecný vztah

$$\Delta\varphi(x,y) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^N I_i(x,y) [Q_{11} + Q_{12} \cos \psi_i + Q_{13} \sin \psi_i]}{\sum_{i=1}^N I_i(x,y) [Q_{21} + Q_{22} \cos \psi_i + Q_{23} \sin \psi_i]} \right), \quad (11)$$

kde

$$Q_{11} = g_{12}g_{23} - g_{13}g_{22}, \quad Q_{12} = g_{12}g_{13} - g_{11}g_{23}, \quad Q_{13} = g_{11}g_{22} - g_{12}^2,$$

$$Q_{21} = g_{12}g_{33} - g_{13}g_{23}, \quad Q_{22} = g_{13}^2 - g_{11}g_{33}, \quad Q_{23} = g_{11}g_{23} - g_{12}g_{13},$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{12} & g_{22} & g_{23} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & \sum \cos \psi_i & \sum \sin \psi_i \\ \sum \cos \psi_i & \sum \cos^2 \psi_i & \sum \cos \psi_i \sin \psi_i \\ \sum \sin \psi_i & \sum \cos \psi_i \sin \psi_i & \sum \sin^2 \psi_i \end{pmatrix}.$$

Často je vhodné uvažovat hodnoty fázového posuvu konstantní a rovnoměrně rozdělené v k periodách interferenčního signálu, tj. tak, aby platilo

$$\psi_i = \frac{2\pi k}{N}(i-1) + \psi_1, \quad i = 1, \dots, N \quad N \geq 3. \quad (12)$$

Pokud si ve speciálním případě pro $k = 1$ vyjádříme vztah (11), potom dostáváme pro hledaný fázový rozdíl $\Delta\varphi(x,y)$

$$\Delta\varphi(x,y) = \text{tg}^{-1} \left(- \frac{\sum_{i=1}^N I_i(x,y) \sin \psi_i}{\sum_{i=1}^N I_i(x,y) \cos \psi_i} \right). \quad (13)$$

Kontrast interferenčních proužků $K(x,y)$ v bodě (x,y) interferenčního pole potom můžeme vyjádřit jako $\Delta\varphi(x,y)$

$$K(x,y) = \frac{2 \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N I_i(x,y) \cos \psi_i \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N I_i(x,y) \sin \psi_i \right]^2}}{\sum_{i=1}^N I_i(x,y)}. \quad (14)$$

Podle kontrastu interferenčních proužků lze např. určit oblasti interferogramu s dostatečně kvalitními vstupními daty pro analýzu. Metoda fázového posuvu pro určení fázového rozdílu dvou interferujících vlnových polí nabízí oproti jiným vyhodnocovacím metodám řadu výhod, např.

- fázový rozdíl je vypočítáván ve všech bodech vyšetřované oblasti,
- vzhledem k použití více interferogramů není žádný problém se znaménkem fázových hodnot,
- k dispozici je mnoho výpočetních algoritmů, které se liší svými vlastnostmi (citlivostí na ovlivňující faktory, počtem potřebných snímků interferenčního pole, časovou náročností),
- složky aditivního a multiplikativního šumu jsou automaticky kompenzovány během vyhodnocovacího procesu,
- s vhodnými prvky měřicího zařízení je možno dosáhnout vysoké přesnosti v určení hledaného fázového rozdílu,
- možnost rozhodnout na základě vypočítaného kontrastu interferenční struktury, zda jde o relevantní data, popřípadě zjistit hranice vyšetřované oblasti pro analýzu,
- pomocí některých algoritmů lze určit v průběhu výpočtu hodnotu fázového posuvu a provést kalibraci zařízení pro fázový posuv.

Tabulka 1 Vybrané vyhodnocovací algoritmy

Počet kroků N	Hodnota ψ	Fázový posuv $\Delta\psi$	$\text{tg } \Delta\psi$
3	0	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{(2I_1 - 3I_2 + I_3)}{\sqrt{3}(I_2 - I_3)}$
3	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{(I_1 - I_3)}{(2I_2 - I_1 - I_3)}$
4	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)}$
4	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{(-I_1 - I_2 + I_3 + I_4)}{(I_1 - I_2 - I_3 + I_4)}$
5	0	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\sqrt{3}(2I_1 - 3I_2 - 4I_3 + 5I_5)}{(8I_1 + 3I_2 - 4I_3 - 6I_4 - I_5)}$
5	$-\pi$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2(I_2 - I_4)}{(2I_3 - I_1 - I_5)}$
7	0	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\sqrt{3}(-I_2 - I_3 + I_5 + I_6)}{(I_1 + I_2 - I_3 - 2I_4 - I_5 + I_6 + I_7)}$
7	$-\frac{3\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{(-I_1 + 7I_3 - 7I_5 + I_7)}{(-4I_2 + 8I_4 - 4I_6)}$
9	$-\pi$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{(I_2 + 2I_3 + I_4 - I_6 - 2I_7 - I_8)}{(-I_1 - I_2 + I_4 + 2I_5 + I_6 - I_8 - I_9)}$
11	$-\frac{5\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{(I_1 - 8I_3 + 15I_5 - 15I_7 + 8I_9 - I_{11})}{(4I_2 - 12I_4 + 16I_6 - 12I_8 + 4I_{10})}$

Pomocí popsaných vztahů lze získat různé vyhodnocovací algoritmy, které se liší počtem N měření intenzity interferenčního pole a hodnotami fázových posuvů ψ_i . Při jinak totožných faktorech, které ovlivňují průběh měření (např. přesnost nastavení posuvu fáze, nelinearita detektoru záření, apod.), se budou algoritmy lišit citlivostí na některé z těchto faktorů. V tabulce 1 jsou uvedeny některé vyhodnocovací algoritmy, které se liší počtem prováděných měření a hodnotami fázového posuvu.

Jiným zajímavým typem vyhodnocovacích algoritmů jsou algoritmy, kde předpokládáme, že fázový posuv ψ mezi jednotlivými snímky má předem neznámou, ale konstantní hodnotu. Tímto postupem lze získat vyhodnocovací algoritmy, které jsou výhodné z hlediska jejich kompenzace vlivu lineárních chyb zařízení pro fázový posuv a možnosti kalibrace tohoto zařízení. Pomocí uvedených vyhodnocovacích algoritmů lze vždy získat hledané fázové hodnoty $\Delta\varphi_w(x,y)$ v intervalu $[-\pi, \pi]$. Z těchto hodnot je poté možno pomocí vhodných metod pro odstranění nespojitostí fáze získat výsledný spojitý průběh hodnot $\Delta\varphi(x,y)$.

Vzhledem k tomu, že fázový rozdíl $\Delta\varphi$ v daném bodě interferenčního pole je vyjádřen pomocí hodnot intenzity v tomto bodě, kterou určujeme měřením, je nutné použít takový algoritmus, který dává co nejmenší chybu fázového rozdílu při daných chybách v určení hodnot intenzity. Totéž platí o fázových posuvech referenčního vlnového pole, jejichž hodnoty také musíme přesně určit. Optimální je takový vyhodnocovací algoritmus, který je co nejméně citlivý k chybám měření intenzity interferenčního pole a hodnot nastavení fázového posuvu. Pro snížení citlivosti vyhodnocovacích algoritmů je možno zvyšovat počet kroků N nebo vhodně volit hodnoty fázových posuvů ψ . Tak lze dojít k algoritmům, které jsou méně citlivé na nepříznivé ovlivňující faktory. Tím, že musíme provádět větší počet měření, se však prodlužuje doba měření, což může být v řadě praktických případů nežádoucí. Přesnost systémů používajících fázový posuv je ovlivněna několika zdroji možných chyb, zejména chybou zařízení pro fázový posuv, nelinearitami detektoru intenzity interferenčního pole, nesinusoidálním profilem interferenčních proužků, procesem digitalizace interferenčního signálu, kolísáním kontrastu a intenzity pozadí interferogramu během záznamu, zbytkovými aberacemi v optickém měřicím systému a fluktuacemi fyzikálních veličin charakterizujících vlastnosti prostředí, ve kterém měření probíhá. Chyby způsobené nesprávnou kalibrací zařízení pro fázový posuv mohou být obvykle eliminovány správnou kalibrací a volbou vhodného vyhodnocovacího algoritmu. Avšak některé faktory omezující přesnost měření, např. nelineární odezva detektoru nebo zařízení pro fázový posuv, se nedají z měřicího procesu snadno vyloučit, a proto je též nutno zkoumat vliv těchto faktorů na výslednou chybu fázových hodnot při použití různých vyhodnocovacích algoritmů. Obecně je možno konstatovat, že vliv chyb jednotlivých prvků měřicího systému se snižuje s počtem provedených měření.

2.6. Metody odstraňování nespojitosti fáze

Jak již bylo několikrát zmíněno, pomocí některých vyhodnocovacích metod (např. metoda fázového posuvu a metoda Fourierovy transformace) získáme vzhledem k charakteru rekonstrukčních algoritmů nespojitě rozdělení fázových hodnot v intervalu $[-\pi, \pi]$. Bezchybné odstranění těchto nespojitostí (tzv. *phase unwrapping*) spočívá v procesu integrace fázových hodnot [14-18]. V případě interferogramů s nízkou úrovní šumu a spojitým průběhem fázových hodnot je tento proces jednoduchou záležitostí, avšak u interferogramů, které jsou zatíženy vyšší úrovní šumu, nejsou dostatečně vzorkovány nebo obsahují fázové singularities, může být správné odstranění nespojitostí fázových hodnot velký problém. Operace odstranění nespojitostí ve fázových hodnotách φ může být vyjádřena jednoduše následujícím vztahem

$$\varphi_w(x,y) = \varphi(x,y) + 2\pi m(x,y),$$

kde $m(x,y)$ jsou celočíselné hodnoty takové, že $-\pi < \varphi_w \leq \pi$. Nelineární operace v procesu rekonstrukce fázových hodnot je funkce

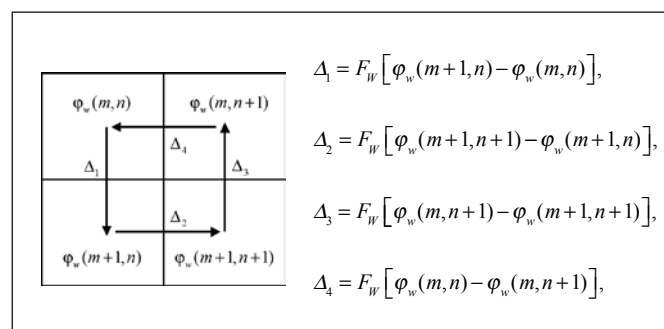
$$\varphi_w(x,y) = F_w[\varphi(x,y)] = \tan^{-1} \varphi(x,y).$$

Tato rekonstrukční funkce F_w vzhledem ke své matematické podstatě vytváří nespojitou, „zubatou“, strukturu rozdělení fázových hodnot. Cílem popisovaného procesu je nalézt spojitou funkci $\varphi(x,y)$.

Popisovaný proces je vcelku jednoduše řešitelný u tzv. *konzistentních* fázových map, které jsou získány ze vstupních dat (interferogramu) s vysokou kvalitou. Avšak problém nastane v případě fázových dat, která jsou porušena některými z následujících faktorů:

- nízká úroveň poměru signál/šum způsobená vlivem šumu v procesu měření, detekce a záznamu interferogramu nebo nízkým kontrastem interferogramu,
- porušení vzorkovací podmínky (nedostatečné vzorkování digitálního obrazu),
- diskontinuita fáze.

Jednoduchá metoda pro zjištění nekonzistentních oblastí ve fázových mapách je výpočet součtu $\sum \Delta_i$ rozdílů fázových hodnot Δ_i , na které je aplikován operátor F_w , podél uzavřené cesty v okně o velikosti 2×2 obrazové body (obr. 5).



Obr. 5 Konzistence hodnot fáze

Všechny body uvnitř okna jsou konzistentní, jestliže je výsledný součet roven nule, v opačném případě jde o nekonzistentní body. Předpokladem pro použití základního schématu odstranění nespojitostí fázových map je to, že fázový rozdíl mezi dvěma sousedními obrazovými body se nesmí lišit o více než π . Tato podmínka vychází z předpokladu pro správné vzorkování digitálního obrazu (tzv. Nyquistova frekvence), která vyžaduje požadavek minimálně dvou obrazových bodů na jeden proužek, tj. omezuje maximální prostorové frekvence interferenčních proužků na polovinu vzorkovací frekvence senzoru pro záznam interferogramu. Nejjednodušší řešení je použít fotodetektory s vyšším rozlišením. Oblasti, které způsobují nekonzistentnost fázových hodnot, mohou být pomocí vhodných digitálních obrazových masek vyloučeny z procesu rekonstrukce fáze. V praxi byly navrženy odlišné algoritmy, které se různým způsobem potýkají s popsaným problémem.

Potřeba robustních matematických algoritmů pro vyhodnocování nekonzistentních fázových dat vedla k rozvoji této problematiky, která je stále intenzivně zkoumána. Existuje několik přístupů, jak získat výsledné spojitě rozdělení fázových hodnot. Jde o matematické techniky založené na integraci gradientu fázových hodnot dle vztahu

$$\varphi = \int_C \nabla \varphi \, dr + \varphi(r_0),$$

kde C je trajektorie spojující obrazové body r_0 a r . V případě šumu ve vstupních fázových datech je uvedený integrál závislý na integrační cestě. Jedna skupina algoritmů je založena na hledání vhodné integrační cesty v závislosti na kvalitě vstupních dat. Další skupina algoritmů je založena na principu minimalizace funkcionálu J , který

popisuje chybu mezi diferencemi skutečné fáze a diferencemi výchozích fázových hodnot, na které je aplikován operátor F_w , tj.

$$J = \iint w(\nabla\phi - \nabla\phi) dx dy, \quad \nabla\phi = F_w[\Delta\phi_w],$$

kde $\nabla\phi$ je gradient skutečných fázových hodnot, $\nabla\phi$ je gradient vypočtený z měřených fázových hodnot a w je váhová funkce, která je vybrána na základě míry kvality fázových dat. Je nutno poznamenat, že existují i jiné zajímavé přístupy k této problematice. Jednou z nich je např. použití vlastností Fourierovy transformace fázových hodnot [15]. Pro fázové hodnoty můžeme obecně psát rovnici

$$\varphi_w(\mathbf{r}) + 2\pi m(\mathbf{r}) = \varphi(\mathbf{r}) + n(\mathbf{r}) = \psi(\mathbf{r}),$$

kde $m(\mathbf{r})$ je celé číslo a $n(\mathbf{r})$ je šum ve fázových hodnotách na pozici dané polohovým vektorem $\mathbf{r} = (x, y)$. Aplikujeme-li na předchozí vztah operátor gradientu $\nabla_{\perp} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, potom dostaneme

$$2\pi\nabla_{\perp} m(\mathbf{r}) = \nabla_{\perp} \psi(\mathbf{r}) - \nabla_{\perp} \varphi_w(\mathbf{r})$$

Zavedením komplexní funkce

$$Z(\mathbf{r}) = \exp\{i[\varphi_w(\mathbf{r}) + 2\pi m(\mathbf{r})]\} = \exp\{i\varphi_w(\mathbf{r})\} = \exp\{i\psi(\mathbf{r})\},$$

pro kterou platí

$$\nabla_{\perp} \psi(\mathbf{r}) = \text{Re}[\nabla_{\perp} Z(\mathbf{r}) / iZ(\mathbf{r})],$$

obdržíme pro gradient funkce $m(\mathbf{r})$

$$\nabla_{\perp} m(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \text{Re} \left[\frac{\nabla_{\perp} Z(\mathbf{r})}{iZ(\mathbf{r})} \right] - \nabla_{\perp} \varphi_w(\mathbf{r}).$$

Dále pro libovolnou diferencovatelnou skalární funkci $m(\mathbf{r})$ na jednoduše souvislé oblasti Ω platí

$$m(\mathbf{r}) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{2\pi i} \mathbf{F}^{-1} \left[\frac{f_x \mathbf{F}(\partial m / \partial x) + f_y \mathbf{F}(\partial m / \partial y)}{f_x^2 + f_y^2} \right] \right\},$$

kde f_x, f_y jsou prostorové frekvence ($f_x^2 + f_y^2 \neq 0$) a \mathbf{F} resp. \mathbf{F}^{-1} značí přímou, resp. inverzní Fourierovu transformaci. Užitím předchozího vztahu je exaktně vyřešen problém zpětné rekonstrukce fáze.

3. ZÁVĚR

Článek stručně popisuje proces kvantitativního vyhodnocení fáze optického vlnového pole na základě interferometrických metod. Bylo zde uvedeno členění jednotlivých vyhodnocovacích metod a podrobněji byly rozebírány metody, které se široce využívají v praxi při měřeních pomocí dvousvazkové interferometrie. Jedná se zejména o principiálně jednoduché a velmi rozšířené metody polynomiální aproximace průběhu interferenčních proužků a následného numerického výpočtu fáze. Nevýhodou těchto metod je jejich nižší přesnost vyhodnocení fázových hodnot, citlivost k šumu a omezený rozsah hodnot fáze v důsledku vysoké prostorové frekvence interferenčních proužků nebo složitěho tvaru. Další způsob získání fáze vlnového pole, který byl popsán, využívá vlastnosti Fourierovy transformace zaznamenaného prostorového rozdělení intenzity interferenčního pole. I když jsou metody založené na Fourierově transformaci principiálně jednoduché, je v praxi často obtížné s jejich pomocí dosáhnout vysoké přesnosti vyhodnocení fázových hodnot. Poslední skupinou metod, které se stále rozvíjejí, jsou metody založené na měření intenzity interferenčního pole s definovanou změnou fáze referenčního pole. Tyto

metody jsou vyvíjeny již dlouhou dobu a z dosud známých metod poskytují nejpřesnější výsledky. Nevýhodou těchto metod je však velmi vysoká cena zařízení, která tyto metody realizují v praxi, citlivost na mechanické vibrace a také to, že doba potřebná k získání potřebných informací může být delší než je charakteristická doba vyšetřovaného procesu. Nicméně v současné době probíhá výzkum a vývoj vyhodnocovacích metod stejného typu, které by posledně jmenovaný nedostatek eliminovaly. V článku byla též nastíněna problematika algoritmů pro rekonstrukci spojitěho rozdělení fázových hodnot. Uvedené metody lze využít v nejrůznějších aplikacích v oblasti vědy, techniky a lékařství.

Tato práce byla podpořena projektem MSM6840770022 Ministerstva školství ČR.

Literatura

- [1] Malacara D., (ed.): Optical shop testing, John Wiley and Sons, New York, 2007
- [2] Malacara D., Servin M., Malacara Z.: Interferogram analysis for optical testing, Taylor & Francis, New York 2005.
- [3] Robinson D.W., Reid G.T.: Interferogram analysis: Digital fringe pattern measurement techniques, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1993.
- [4] Takeda M., Ina H., Kobayashi S.: Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.* **72** (1), 156 (1982).
- [5] Kreis T. M., Jueptner W. P.: Fourier transform evaluation of interference patterns: demodulation and sign ambiguity. *Proc. SPIE.* **1553**, 263-273 (1992).
- [6] Pirga M., Kujawinska M.: Two directional spatial-carrier phase-shifting method for analysis of crossed and closed fringe patterns. *Opt. Eng.* **34** (8), 2459-2466 (1995).
- [7] Mikš A., Novák J.: Fringe tracing technique in the process of optical testing. *Proceedings of International Workshop: Physical and Material Engineering 2002*. Prague: CTU, 73-76 (2002).
- [8] Creath K.: Phase - measurement interferometry techniques, *Progress in Optics Vol. XXVI*, E. Wolf, Ed., Elsevier Science, Amsterdam 1988.
- [9] Lai G., Yatagai T.: Generalized phase-shifting interferometry. *J. Opt. Soc. Am. A.* **8** (5), 822-827 (1991).
- [10] Novák J., Novák P., Mikš A.: Multi-step phase-shifting algorithms insensitive to linear phase shift errors. *Opt. Comm.* **281** (21), 5302-5309 (2008).
- [11] Novák J.: Five-step phase-shifting algorithms with unknown values of phase shift. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics.* **114** (2), 63-68 (2003).
- [12] Novák J., Mikš A.: Modern optoelectronic methods for non-contact deformation measurement in industry. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics.* **4** (6), 413-420 (2002).
- [13] Novák J.: Vícekrokové algoritmy nezávislé na lineární chybě fázového posuvu. *Jemná mechanika a optika.* **47** (11-12), 348-352 (2002).
- [14] Ghiglia D.C., Pritt M.D.: Two-dimensional phase unwrapping: Theory, algorithms and software, John Wiley & Sons, Inc., New York 1998.
- [15] Schofield M. A., Zhu Y.: Fast phase unwrapping algorithm for interferometric applications. *Optics Letters* **28** (14) 1194-1196 (2003).
- [16] Chen C. W., Zebker H. A.: Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *J. Opt. Soc. Am. A.* **17** (3), 401-414 (2003).
- [17] Baldi A.: Phase unwrapping by region growing. *Appl. Opt.* **42** (14), 2498-2505 (2003).
- [18] Chang H. Y., Chen C. W., Lee C. K., Hu C. P.: The tapestry cellular automata phase unwrapping algorithm for interferogram analysis. *Optics and Lasers in Engineering* **30** (6) 487-502 (1998).
- [19] Gonzales, R. C., White, P.: Digital image processing, Addison-Wesley, Reading 1987.

Doc. Ing. Jiří Novák, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel.: 224 354 435, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz. Ing. Pavel Novák, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel.: 224 354 435, e-mail: pavel.novak.3@fsv.cvut.cz

Šestá mezinárodní konference Photonics Prague 2008

Česká a slovenská společnost pro fotoniku uspořádala svou již šestou konferenci Photonics Prague o fotonických zařízeních a systémech. Konference se konala 27.-29. srpna 2008 v hotelu Artemis Olympik v Praze. Excelentní a vysoce zajímavé plenární přednášky byly následovány 13 sekcemi o různých aspektech optiky s 29 zvanými vystoupeními, 78 referáty a 51 posterů. SPIE při této příležitosti udělila ceny pro nejlepší studentské prezentace a ČSSF ex-equo cenu pro dva mladé české vědce.

Česká a slovenská společnost pro fotoniku (ČSSF) uspořádala ve dnech 27. – 29. srpna 2008 v pražském hotelu Artemis Olympik svou již šestou mezinárodní konferenci Photonics Prague, která je tradičně zaměřena na pokrok, který byl za poslední tři roky dosažen ve fotonice, jejích součástkách, zařízeních a systémech.

Konference se již ve vědeckém světě etablovala a díky tomu se i významné mezinárodní společnosti SPIE, ICO, OSA, EOS podílely jako spolupracující organizace na jejím zdárném průběhu. Konference byla také podpořena Akademií věd České republiky, Slovenskou akademií věd a ČVUT slavící v letošním roce 75 let optické výroby, poskytla informační materiály a malé dárky pro všechny účastníky.



Obr. 1 Ing. Jedlička (předseda ČSSF) zahajuje konferenci a prof. Tománek vítá účastníky z 34 zemí. První dva plenární řečníci (Reinhart Poprawe a Andrew Rawicz) netrpělivě čekají na své vystoupení

Přesto, jako vždy, největší práce ležela na organizačním výboru konference ČSSF a Action M Agency a na členech mezinárodního programového výboru.

Registrace účastníků na místě probíhala díky zkušenosti organizátorů z Agentury M Action plynule, takže bylo možné zahájit ve středu 27. srpna konferenci dle plánu přesně v 9.00 hodin.

Po krátkém úvodním slově předsedy konference prof. Pavla Tománka, který přivítal 165 vědců z 36 zemí, pozdravil účastníky jménem pořádající ČSSF její předseda Ing. Miroslav Jedlička, který se nato ujal moderování prvních dvou plenárních přednášek. Byli jsme velmi rádi, že konference mohla začít trochu netradičně v historickém tónu, když Andrew Rawicz (Fraserova Universita, Kanada) hovořil o životě Theodora Harolda Maimana a jeho cestě za objevem a rozvojem laseru. Velmi inspirující a emotivní přednáška byla doplněna ukázkami z Maimanových vystoupení a přednášek. Na tuto přednášku potom navázal Reinhart Poprawe (Fraunhoferův institut v Cáchách, Německo), který na konferenci



Obr. 2 Prof. Rawicz (Kanada) hovoří o životě a díle objevitele laseru Theodora Maimana

zastupoval i Evropskou technologickou platformu Photonics21. V kontrastu k předchozímu řečníkovi seznámil posluchače s nejnovějšími typy laserů – diskovým, vláknovým, tyčinkovým, deskovým a perspektivami jejich využití v průmyslu.

Bylo požitkem sledovat dalšího plenárního řečníka, Kishana Dholakiu (Universita St. Andrew, Skotsko), který prakticky protančil svou přednášku o strukturovaných světelných polích pro biofotoniku i Oliviera Martina (EPFL Lausanne, Švýcarsko), který zasvěceně a se zápletem pohovořil o řízení a kontrole světla v nanoměřítku pomocí plasmonických antén a nanostruktur.

Vlastní konference se rozjela naplno ve středu odpoledne a pokračovala ve dvou paralelních sekcích, po jejichž skončení ve středu a ve čtvrtek následovala posterová prezentace. Až na nepatrné



Obr. 3 Prof. Tománek, Alex Pulchart (SPIE) a vítězky studentské SPIE ceny - Kamila Hrabovská, Preeti Patil, Alena Zavadilová



Obr. 4 Vítězové ceny ČSSF pro mladé vědce – Jan Fiala FJFI (vlevo) a Zdeněk Buchta (vpravo)

výjimky byla tentokrát úroveň všech referátů velmi vysoká, což také svědčí o významu akce. Podařilo se získat špičkové odborníky a mnohá vystoupení byla vzrušující a velmi inspirující, což se projevovalo také v hojné diskusi.

Již tradičně proběhla malá výstava obrazů s optickými motivy dr. Jitky Brúnové-Lachman.

Středeční večer byl zasvěcen recepci v 19. patře hotelu Olympik. Bylo nádherné sledovat západ slunce nad Prahou z míst, kde nikdo z pražských účastníků konference ještě nikdy předtím nebyl. Welcome drink a ruku podávali každému hostu osobně Ing. Jedlička a prof. Tománek. Mnohá neformální jednání účastníků byla zahájena právě na recepci, protože jinak bylo jednání jednotlivých konferencí velmi pracovní.

O významu akce hovoří i fakt, že se jí osobně zúčastnili zástupci spolupracujících organizací – Gert von Bally (Univerzita Münster, Německo) – Associate Secretary ICO, Theo Tschudi (Univerzita Darmstadt, Německo) - EOS, Irina Sorokina - OSA, Alexandra Pulchart - SPIE Europe.

Navíc SPIE poprvé podpořila konferenci pomocí své ceny pro studentské prezentace.

Výsledky vypadají tak, jako by konference podpořila další program SPIE a to Ženy v optice. První tři místa obsadily mladé dámy v pořadí:

1. Alena Zavadilová (FJFI ČVUT v Praze), “Intracavity synchronously pumped PPLN picosecond optical parametric oscillator”,

2. Preeti B. Patil (Indický technologický institut Bombaj), “Electrical modelling of single defects in photonic crystal waveguides”,

3. Kamila Hrabovská (VŠB – TU Ostrava) “Optical and magneto-optical properties of as-quenched CoFeSiB amorphous ribbon”.

Kromě finanční odměny je součástí ceny i roční studentský poplatek a omezený bezplatný přístup do knihovny SPIE.

Zároveň ČSSF vyhlásila výsledky soutěže pro mladé vědce o cenu ČSSF, která se uděluje na této konferenci. Tentokrát hodnotící komise vybrala 2 účastníky konference, kteří se o cenu podělili: Zdeněk Buchta (ÚPT AV ČR, v.v.i., Brno) a Jan Fiala (FJFI ČVUT v Praze). Kromě tříletého členské poplatku v ČSSF si rozdělili finanční odměnu.

Na konec několik čísel, která dokreslují úspěšnost akce. Za 3 dny konference, která sestávala z 13 sekcí (viz obálka JMO č. 1, 2008), odezněly 4 plenární přednášky na vysoce aktuální témata, 29 zvaných přednášek, 78 sdělení a bylo prezentováno 51 posterů. Z původně přihlášených 165 vědců (z toho českých a slovenských 45) se nakonec dostavilo 147. Na odborné výstavě se podíleli 4 vystavovatelé. Na výborném chodu konference se podílely pracovnice Action M Agency pod vedením Mileny Zeithamlové. Jím patří dík za to, že účastníci nezpozorovali žádné nedostatky v průběhu těchto tří dnů.

Dle závěrečného hodnocení účastníků (i následných mailů) byli téměř všichni nadšeni jak odbornou úrovní, tak i přijetím a organizací. Proto patří dík předsedě konference všem, kteří se na této práci aktivně podíleli.

Pavel Tománek

Vybrané trendy v oblasti interferometrických metod pro kontrolu optiky

V článku je podán přehled vybraných moderních interferometrických metod, použitelných pro kontrolu kvality optické výroby. Jsou zde zmíněny fyzikální principy těchto měřicích a vyhodnocovacích metod společně s jejich výhodami a nevýhodami. Dále jsou naznačeny vybrané trendy vývoje v oblasti interferometrických metod a problémy, které je nutno řešit v oblasti praxe optické průmyslové kontroly.

1. ÚVOD

Zvyšující se nároky na kvalitu vyráběných optických soustav a prvků vyžadují důslednou kontrolu kvality na každém stupni výroby a kladou zvýšené požadavky na přesnost používaných měřicích a vyhodnocovacích metod. Při kontrole kvality v optické výrobě patří k základním úkolům kontrola tvaru povrchů jednotlivých vyráběných optických prvků (např. čočky, hranoly, zrcadla, apod.) a kontrola kvality zobrazení vyráběných optických soustav. Tato kontrola probíhá jak v průběhu výrobního procesu, tak po dokončení výrobku. V zásadě lze metody kontroly optiky rozdělit na metody *kontaktní* (dotykové) a *bezkontaktní* (bezdotykové). Nevýhodou kontaktních metod je jejich poměrně nízká přesnost a často i dlouhý čas nutný k provedení a vyhodnocení měření a existuje též možnost poškození testované plochy.

Hodnocení tvaru optických ploch vyráběných prvků se určuje obvykle odchylkou od jejich nominálního tvaru, např. od sférické či rovinné plochy. Tyto odchylky vznikají v důsledku nedokonalosti technologického procesu výroby. Každá vyráběná optická plocha má při návrhu předepsáno s jakou přesností má být vyrobena a úkolem kontroly je poté zjistit, zda vyrobená plocha tyto požadavky splňuje, tj. zda je vyrobena v rámci povolených výrobních tolerancí. Přesnost výroby optických ploch se udává v násobcích vlnové délky, většinou jako střední kvadratická odchylka dráhového rozdílu mezi vlnoplochou, odraženou od testované plochy, a vlnoplochou referenční. Klasický vizuální způsob interferometrického hodnocení kvality optických ploch pomocí kalibrů [1, 2] je dosti subjektivní a vždy je nutno vyrobit kalibr, se kterým se testovaná plocha interferometricky porovnává. Výroba kalibrů je však dosti náročná jak časově, tak i finančně (např. pro každou hodnotu poloměru křivosti sférické plochy musí být vyroben kalibr, tj. plocha o řád přesnější nežli kontrolovaná plocha). Dále může dojít při procesu měření k poškrábání měřené plochy kalibrem a naopak. Proto byly vyvinuty interferometrické bezkontaktní měřicí postupy, který umožňují provést hodnocení tvaru vyráběných optických ploch, např. pomocí vhodně konstruovaných interferometrů Fizeauova nebo Twyman-Greenova typu [1-3]. S rozvojem fotodetektorů, optoelektroniky a počítačové techniky se u těchto měření přešlo od vizuálního k plně automatickému vyhodnocování tvaru optických ploch. Pro vyhodnocování se využívají speciální algoritmy [1-3], jež umožňující určit tvar vlnoplochy na základě měření intenzity interferenčního pole vzniklého interferencí vyšetřovaného předmětového vlnového pole s referenčním vlnovým polem. Je tak možné kvantitativně určit dráhový rozdíl mezi referenční a předmětovou vlnou, který přímo souvisí s kvalitou testované optické plochy.

V případě výroby optických prvků s asférickými plochami je situace složitější jak z hlediska výroby, tak i následné kontroly. V praxi se kontrola často provádí tím způsobem, že kontrolovanou asférickou plochu srovnáváme se sférickou plochou, která se jí co nejvíce přimyká. Mezi asférickou plochou a sférickou plochou kalibru pak vznikne soustava interferenčních proužků, které svým tvarem a polohou charakterizují tvar asférické plochy, a to v pří-

padě, že měřená plocha a plocha kalibru jsou vůči sobě ve správné poloze. Tyto podmínky lze při výrobě a testování asférických ploch jen velmi obtížně splnit, a proto je kontrola asférických ploch i v dnešní době poměrně složitý problém. Pro měření lze využít modifikace interferometrických metod pro měření sférických ploch, kdy lze navrhnout pro každou asférickou plochu tzv. nulový kalibr na bázi difraktivního prvku [2]. V současnosti se intenzivně pracuje na vývoji metod, které by umožňovaly bezkontaktním způsobem velmi přesně měřit asférické optické plochy s velkými odchylkami od optimální sférické plochy.

Vzhledem k tomu, že uvedené interferometrické metody porovnávají tvar vyšetřované plochy s plochou referenční, je jejich přesnost závislá na kvalitě referenčního povrchu. Velmi přesné referenční plochy (rovinné, resp. sférické), které jsou využívány v interferometrech, dosahují kvality povrchu lepší nežli $\lambda/15$, kde λ je vlnová délka použitého záření. Opakovatelnost měření dosahovaná pomocí speciálních interferometrických vyhodnocovacích metod, jež se obvykle udává jako střední kvadratická odchylka několika sad průměrovaných měření kalibrační plochy, dosahuje až hodnot $\lambda/5000$ (za přísně dodržovaných laboratorních podmínek). Možnosti těchto metod tak plně vyhovují požadavkům na přesnost měření tvaru optických ploch v optickém průmyslu.

Hodnocení kvality zobrazení se obvykle charakterizuje pomocí vlnové aberace, která charakterizuje korekční stav dané optické soustavy, resp. optické funkce přenosu (OTF). Aberacemi (vadami) optických soustav nazýváme odchylky zobrazení reálné optické soustavy od ideální optické soustavy. Aberace optických soustav vznikají z několika příčin, a to v důsledku lomu a odrazu světla na plochách optické soustavy, nedokonalostí výroby optických soustav a vadami materiálu, ze kterého jsou optické prvky vyráběny. Má-li být zobrazení optickou soustavou co nejdokonalejší, musí být vlnová aberace korigována tak, aby její zbytková hodnota byla co nejmenší, a to v co nejširší spektrální oblasti. Měření vlnové aberace (deformace vlnoplochy po průchodu optickou soustavou) lze realizovat pomocí interferometrických metod, např. využitím již dříve zmiňovaných interferometrů, které nám umožňují přímé určení deformace vlnoplochy vzhledem k přesně definované referenční vlnoploše (obvykle sférické nebo rovinné). Na základě měření aberací optických soustav je poté možno určit další charakteristiky, které se obvykle udávají při hodnocení kvality zobrazení (např. hodnotu Strehlovy definice, hodnoty funkce přenosu kontrastu (MTF) apod.).

Obrovskou výhodou interferometrických metod je jejich vysoká přesnost a citlivost. Základní nevýhodou většiny interferometrických metod, která omezuje možnosti jejich použití, je vysoká citlivost na termomechanické vlastnosti měřicího prostředí (např. vibrace, teplotní fluktuační měřicího prostředí, apod.), zvýšené požadavky na experimentální realizaci a omezený dynamický rozsah měření. Proto je možno tyto přístroje především využít pro laboratorní vyšetřování kvality optických soustav. Vývoj interferometrických

metod se v současné době zaměřuje především do oblasti vytváření nových měřicích zařízení a robustních technik rekonstrukce fáze vlnového pole v reálném čase, které nejsou prakticky závislé na vlastnostech měřicího prostředí a jsou tudíž široce aplikovatelné v metodách průmyslové kontroly za běžných provozních podmínek [4-13]. V dalším textu se zaměříme na přehled některých vybraných moderních metod vhodných pro testování optiky.

2. TRENDY VÝVOJE INTERFEROMETRICKÝCH METOD

V souvislosti se stále vyššími požadavky na kvalitu výroby optiky dochází ke zvyšování požadavků na metody výrobní kontroly. Interferometrické metody, jež jsou tradičními metodami optické kontroly, se těmto požadavkům musí postupně přizpůsobovat. Klasické interferometrické měřicí systémy vzhledem ke svému fyzikálnímu principu (interference světla) a počítačovým vyhodnocovacím metodám umožňují s vysokou přesností měřit fázi, resp. optický dráhový rozdíl, ale pouze s omezeným dynamickým rozsahem a omezenou možností vyšetřování dynamických jevů. Značná citlivost současných interferometrických měřicích metod na vnější faktory, které výrazným způsobem ovlivňují přesnost a možnosti použití těchto metod (vibrace, teplotní fluktuace měřicího prostředí, apod.) vede k vývoji nových typů interferometrů, které jsou vůči uvedeným faktorům velmi odolné. Snahou je konstruovat takové měřicí přístroje, které by měly co nejuniverzálnější použití a byly co nejméně citlivé na nepříznivé vnější podmínky. V praxi to znamená provést měření a vyhodnocení fáze v co nejkratším čase. To lze realizovat v zásadě takovým způsobem, že buď můžeme interferenční pole vyhodnotit v reálném čase na základě jednoho měření interferenčního pole (např. metodami fourierovské analýzy interferogramů) nebo použijeme principu okamžitého záznamu fázově modulovaného interferenčního pole v různých místech prostoru. Dále zde dochází ke stále větší potřebě měření vyráběných optických prvků a soustav přímo ve výrobním procesu, což sebou přináší nové požadavky na robustnost kontrolních metod a možnost jejich použití v podmínkách průmyslového provozu. Do budoucna lze očekávat, že trendem v oblasti výrobní kontroly budou integrované systémy pro výrobu a kontrolu optiky.

Další problematikou, která se intenzivně rozvíjí, je metrologie asférických ploch. Interferometrické metody zde hrají nezastupitelnou roli vzhledem k možnostem provádění vysoce přesných měření. Cílem vývoje v této oblasti by měly být interferometrické metody, které budou umožňovat měření asférických ploch s velkým dynamickým rozsahem prakticky v reálném čase.

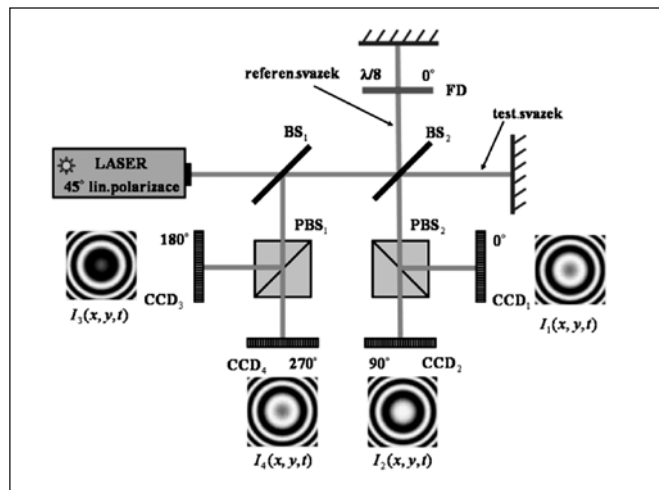
3. DYNAMICKÁ POLARIZAČNÍ INTERFEROMETRIE

Pro současný záznam více fázově modulovaných interferogramů ve stejném časovém okamžiku se v praxi využívají principy polarizační interferometrie. Vzhledem k současnému záznamu interferogramů s definovanou změnou fáze se k vyhodnocení měření využívá metoda fázového posuvu. Princip těchto metod umožňuje jejich použití i při měření rychlých dynamických dějů, což s běžnými interferometry není možné. V současnosti již existují některé interferometrické systémy, např. Phase-Cam (fy 4D Technology) a HyperPhase (fy ESDI), které provádějí záznam fázově posunutých interferogramů v jednom časovém okamžiku pomocí vhodných polarizačních, fázových a difrakčních prvků [5-10]. Avšak i tato zařízení jsou v současnosti velmi náročná na výrobu, finančně nákladná a jejich mechanická a optoelektronická konstrukce je relativně dosti složitá.

2.1. Záznam interferogramů s fázovým posuvem na více detektorech

Jedním ze způsobů realizace uvedených měřicích a vyhodnocovacích zařízení je záznam prostorově oddělených interferogramů se vzájemným fázovým posuvem na více fotodetektorech (např. CCD). Na obr. 1 je schematicky znázorněna jedna z možností experimentálního uspořádání takového interferometru [4]. Zařízení

vycházející z laseru je lineárně polarizováno ve směru 45° vzhledem k ose x zvoleného souřadného systému. Svazek je rozdělen pomocí děličů svazku BS_1 a BS_2 na referenční a předmětový svazek. Do referenčního svazku je zařazena dále fázová destička FD (fázový posuv $\lambda/8$, orientace ve směru x), která způsobí po dvojnásobném průchodu referenčního svazku fázový posuv 90° mezi složkami ve směru x a y .



Obr. 1 Současný záznam fázově modulovaného interferenčního pole na více detektorech

Pomocí polarizačních děličů svazku PBS_1 a PBS_2 jsou poté vytvořeny čtyři svazky, které dopadají na jednotlivé CCD detektory. Předmětový svazek dopadá na měřený předmět (např. plochu optického prvku) a po odrazu prochází zpětně do interferometru. Referenční a předmětové svazky spolu interferují a vytvářejí čtyři interferogramy s fázovým posuvem 0° , 90° , 180° a 270° . Hodnotu fáze φ vlnového pole v jednotlivých bodech (x,y) detekovaného interferenčního pole a v daném časovém okamžiku t poté můžeme získat použitím některého z čtyřkrokových algoritmů s fázovým posuvem $\psi = \pi/2 = 90^\circ$ [2, 3], např.

$$\operatorname{tg} \varphi(x, y, t) = \frac{I_4(x, y, t) - I_2(x, y, t)}{I_1(x, y, t) - I_3(x, y, t)}, \quad \text{resp.} \quad (1a)$$

$$\operatorname{tg} \varphi(x, y, t) = \frac{-I_1(x, y, t) - I_2(x, y, t) + I_3(x, y, t) + I_4(x, y, t)}{I_1(x, y, t) - I_2(x, y, t) - I_3(x, y, t) + I_4(x, y, t)}, \quad (1b)$$

kde $I_k(x,y,t)$ jsou hodnoty intenzity interferenčního pole v bodě o souřadnicích (x,y) a $k = 1, \dots, 4$ označují pořadí detekovaného interferogramu pro fázový posuv 0° , 90° , 180° a 270° . Uvedený případ detekce interferenčního pole má některé nevýhody pro praktické využití. Zejména je tato metoda velice náročná na justáž a kalibraci jednotlivých optických prvků a CCD detektorů.

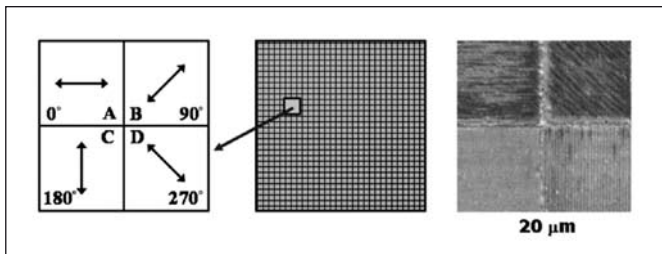
2.2. Záznam interferogramů s fázovým posuvem na jednom detektoru

Z hlediska finančních nároků, složitosti optomechanického systému, kalibrace a justáže se jako lepší způsob realizace současného záznamu několika prostorově oddělených fázově posunutých interferogramů jeví použití pouze jednoho detektoru s vysokým rozlišením. Tímto detektorem musí být v jednom okamžiku zaznamenáno prostorově oddělené interferenční pole, jež je fázově modulováno. V praxi lze použít několik způsobů konstrukce takového zařízení [4-8]. Jedním z nich je použití vhodných difrakčních optických prvků nebo polarizačních děličů světla, které umožní vytvoření prostorově oddělených interferujících svazků s různým fázovým posuvem. Jiným způsobem současného záznamu fázově

modulovaného interferenčního pole může být prostorový fázový posuv na jednotlivých pixelech detektoru. K tomu lze použít speciálních maticových mikropolarizačních prvků [6, 7]. Fázi referenčního a předmětového svazku můžeme změnit pomocí vhodného fázového filtru, který je tvořen čtvrtvlnnou fázovou destičkou a lineárním polarizátorem. Čtvrtvlnná destička je orientována tak, aby po průchodu měl referenční svazek pravotočivou kruhovou polarizaci a svazek předmětový levotočivou kruhovou polarizaci. Intenzitu interferenčního pole, které vznikne složením obou svazků po průchodu čtvrtvlnnou destičkou a lineárním polarizátorem se směrem roviny polarizace α vzhledem k ose x souřadného systému, můžeme vyjádřit jako

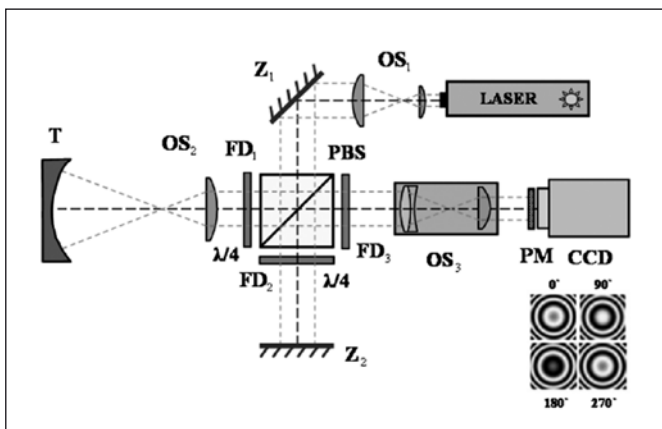
$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos[\varphi(x, y) + 2\alpha], \quad (2)$$

kde $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$ jsou hodnoty intenzity referenčního, resp. předmětového svazku v bodě (x, y) a φ je fáze vlnového pole. Vidíme, že mezi interferujícími svazky nastane fázový posuv $\psi = 2\alpha$. Takovýto fázový filtr má též tu výhodu, že fázový posuv je prakticky nezávislý na vlnové délce světla. Jestliže tedy vytvoříme takovou fázovou masku, kde jednotlivé sousední lineární polarizační prvky budou mít směr polarizační roviny 0° , 45° , 90° a 135° , potom fázový posuv ψ bude roven 0° , 90° , 180° a 270° . Tímto způsobem lze vytvořit maticové pole mikropolarizačních prvků, přičemž každý element (pixel) zavádí odlišnou polarizaci (obr. 2). Z technologického hlediska je nutné, aby každý mikropolarizační prvek masky odpovídal obrazovému bodu plošného detektoru.



Obr. 2 Maticové pole mikropolarizátorů

Fáze vlnového pole φ může být poté vypočtena pomocí čtyř sousedních prvků užitím algoritmů pro metodu fázového posuvu. Na obr. 3 je znázorněno schéma Twyman-Greenova polarizačního interferometru, uzpůsobeného pro vyhodnocení fáze vlnového pole [5-7, 9]. Pole mikropolarizátorů PM je umístěno těsně před CCD senzorem a je zajištěno, že každý polarizační element je umístěn nad odpovídajícími pixely obrazového CCD snímače.



Obr.3 Twyman-Greenův interferometr s maticovým polem mikropolarizátorů (4D Technology)

Polarizační interferometr je konstruován následujícím způsobem. Ze zdroje záření (laseru) vychází lineárně polarizovaný svazek světla, který je pomocí optické soustavy OS_1 rozšířen a po odrazu na zrcadle Z_1 dopadá na polarizační dělič svazku PBS, který způsobí to, že referenční a předmětový svazek je vzájemně ortogonálně polarizován. Do obou ramen interferometru (referenční a předmětový svazek) jsou umístěny čtvrtvlnné fázové destičky FD_1 a FD_2 , které zaručují to, že oba svazky projdou zpětně polarizačním děličem PBS a vytvoří interferenční pole. V referenční větvi se svazek odráží na referenčním rovinném zrcadle Z_2 . Předmětový svazek prochází vhodnou optickou soustavou OS_2 (jejíž typ závisí na typu testované optické soustavy nebo plochy – na obrázku je naznačeno testování tvaru sférické odrazné plochy) a dopadá na předmět T (např. testovaná plocha). Po zpětném průchodu děličem PBS oba polarizované svazky procházejí čtvrtvlnnou fázovou destičkou FD_3 , která způsobuje levotočivou, resp. pravotočivou kruhovou polarizaci předmětového, resp. referenčního svazku. Interferenční pole je detekováno CCD detektorem s maskou mikropolarizátorů. Detekované interferenční pole má vždy ve čtyřech sousedních obrazových bodech odlišnou hodnotu fázového posuvu $\psi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$. Hodnotu fáze φ vlnového pole v jednotlivých bodech (x, y) detekovaného interferenčního pole můžeme např. určit použitím vhodných vyhodnocovacích algoritmů pro metodu prostorového fázového posuvu. Je opět možno použít čtyřkrokový algoritmus

$$\operatorname{tg} \varphi(x, y) = \frac{I_D(x, y) - I_B(x, y)}{I_A(x, y) - I_C(x, y)}, \quad (3)$$

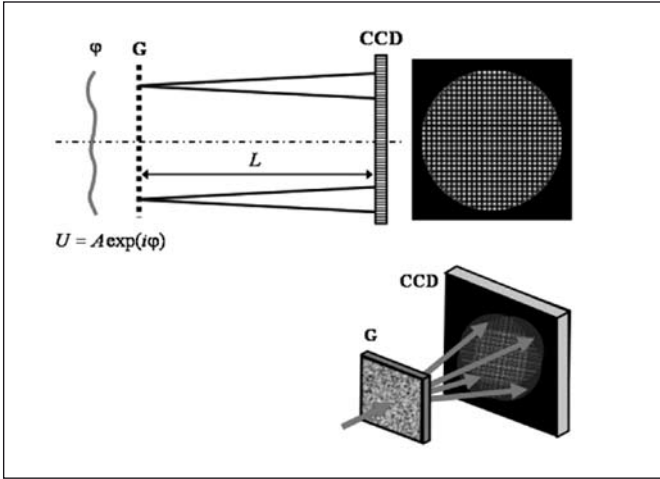
kde I_A, I_B, I_C, I_D jsou hodnoty intenzity interferenčního pole ve čtyřech sousedních obrazových bodech (A, B, C, D) s různou hodnotou fázového posuvu $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$, resp. 270° . Tento algoritmus je poté možno opakovaně použít pro další čtveřice sousedních pixelů (2×2 superpixel). Jistým omezením je to, že fáze se nesmí na sousedních pixelech příliš měnit. V principu je možno použít i jiné algoritmy pro metodu fázového posuvu. Uvedená metoda má výhodu v tom, že používá jeden detektor a tedy justáž a kalibrace zařízení je jednodušší. Nicméně vysoké požadavky musí být kladeny na přesné nastavení polarizační masky vůči detektoru. Popsané metody detekce prostorově oddělených a fázově modulovaných interferogramů lze využít i pro jiné typy interferometrů.

Závěrem lze poznamenat, že uvedené interferometrické metody jsou v současnosti ještě ve vývoji a lze očekávat rozvoj nových metod a vyhodnocovacích s využitím nejmodernějších optoelektronických prvků a počítačové analýzy interferenčního pole. Zatím jsou tato zařízení relativně složitá a finančně nákladná. Nicméně vzhledem k jejich aplikacím v běžných průmyslových podmínkách při vyšetřování statických a dynamických procesů lze v blízké budoucnosti očekávat jejich větší rozšíření a postupné nahrazování klasických interferometrických metod a postupů společně s rozvojem dalších neinterferometrických technik vyhodnocování fáze.

3. VÍCESVAZKOVÉ INTERFEROMETRICKÉ METODY VYHODNOCOVÁNÍ FÁZE

V praxi existuje velké množství možností, jak využít fyzikálního principu interference světla k určování optického dráhového rozdílu, resp. fáze vyšetřovaného vlnového pole. Jako velmi zajímavé z hlediska praktických aplikací se jeví využití vícenásobné interference koherentního záření. Velmi výhodné řešení se nabízí ve formě vícesvazkové stříhové interferometrie [11-13]. Předpokládejme, že máme vlnové pole (např. deformovanou rovinnou vlnu po průchodu optickou soustavou zatíženou aberacemi), jehož fázi (resp. deformaci vlnoplochy) chceme získat. Na obr. 4 je schematicky znázorněna jedna možnost, jak toho dosáhnout.

Použitím vhodného difrakčního prvku G rozdělíme dopadající svazek na čtyři prostorově oddělené svazky (s velmi malým difrakčním úhlem), které spolu interferují. Interferencí těchto svazků



Obr. 4 Princip vyhodnocení fáze pomocí čtyřsvazkové stříhové interferometrie

vzniká pravidelná struktura intenzitních maxim a minim, kterou lze detekovat s pomocí CCD senzoru. Jestliže je dopadající vlnoplocha deformována (např. oproti rovinné referenční vlnoploše), potom je deformována i detekovaná interferenční struktura (intenzitní maxima se posunou). Ze změny deformace poté můžeme určit tvar vlnoplochy W , resp. fázi φ vyšetřovaného vlnového pole. Poloha jednotlivých interferenčních maxim souvisí přímo s gradientem vlnoplochy. Měřicí systémy tohoto typu již běžně nabízí firma Phasics Corp. [15].

Předpokládejme, že normalizovanou komplexní amplitudu U monochromatického vlnového pole, které dopadá na difrakční prvek G , je možno zapsat jako

$$U(\mathbf{r}) = \exp[ikW(\mathbf{r})] = \exp[i\varphi(\mathbf{r})],$$

kde $W = 2\pi/\lambda$ je vlnové číslo, λ je vlnová délka záření a $\mathbf{r} = (x, y)$ je polohový vektor bodu v rovině kolmé ke směru šíření vlnového pole. Prvek G nechť vytváří $n = 4$ prostorově oddělená vlnová pole o amplitudě

$$U_j(\mathbf{r}) = \exp\{i[\varphi(\mathbf{r}) + \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r}]\}, \quad \mathbf{k}_j = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{s}_j = k \mathbf{s}_j, \quad (4)$$

kde \mathbf{k}_j je vlnový vektor jednotlivých vln, které se vytvoří po rozdělení původní vlny, \mathbf{s}_j je jednotkový vektor ve směru šíření jednotlivých vln. Pro intenzitu $I_0(\mathbf{r})$ vlnového pole v rovině prvku G platí

$$I_0(\mathbf{r}) = \left| \sum_{j=1}^4 U_j(\mathbf{r}) \right|^2 = 4 + \sum_{p=1}^4 \sum_{q=1, q \neq p}^4 \exp[i(\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_q) \cdot \mathbf{r}]. \quad (5)$$

Použitím rovnice pro transport intenzity v elektromagnetickém poli můžeme pro intenzitu $I_0(\mathbf{r}, z)$ v rovině detekce, jež je umístěna ve vzdálenosti L od prvku G , přibližně psát

$$I(\mathbf{r}, z) = I_0(\mathbf{r}) - \frac{L}{k} \left[I_0(\mathbf{r}) \nabla_{\perp}^2 \varphi(\mathbf{r}) + \nabla_{\perp} I_0(\mathbf{r}) \nabla_{\perp} \varphi(\mathbf{r}) \right].$$

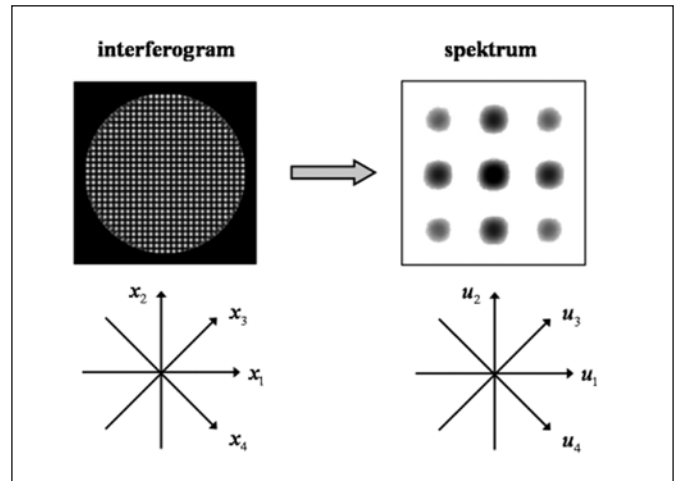
Dosažením vztahu pro intenzitu $I_0(\mathbf{r})$ v rovině $z = 0$ dostáváme

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}) &= 4 \left[1 - \frac{L}{k} \nabla_{\perp}^2 \varphi(\mathbf{r}) \right] + \\ &+ \sum_{p=1}^4 \sum_{q=1, q \neq p}^4 \left\{ \left[1 - \frac{L}{k} \nabla_{\perp}^2 \varphi(\mathbf{r}) \right] - i \frac{L}{k} (\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_q) \nabla_{\perp} \varphi(\mathbf{r}) \right\} \exp[i(\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_q) \cdot \mathbf{r}] = \\ &= 4A + \sum_{p=1}^4 \sum_{q=1, q \neq p}^4 \{A + B\} \exp[i(\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_q) \cdot \mathbf{r}]. \end{aligned}$$

Provedeme-li Fourierovu transformaci rozdělení intenzity interferenčního pole v rovině detekce, potom získáme spektrum

$$\tilde{I}(\mathbf{u}) = 4\tilde{A} + \sum_{p=1}^4 \sum_{q=1, q \neq p}^4 \{ \tilde{A} + \tilde{B} \} * \delta[(\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_q) \cdot \mathbf{u}], \quad (6)$$

kde \tilde{A}, \tilde{B} jsou symboly pro Fourierovu transformaci funkcí A, B , δ je Diracova delta funkce, \mathbf{u} je vektor prostorových frekvencí ve spektrální rovině, příslušný polohovému vektoru \mathbf{r} a $*$ označuje operaci konvoluce. Rozborem předchozího vztahu zjistíme, že fourierovské spektrum se skládá z nízkofrekvenčního členu $4\tilde{A}$ a devíti postranních spekter, umístěných ve vrcholech a uprostřed hran obdélníka ve spektrální rovině (obr. 5). Uvedené vedlejší spektrální vrcholy obsahují informaci o gradientu fáze $\nabla_{\perp} \varphi(\mathbf{r})$, které lze získat např. pomocí metody Fourierovy transformace pro vyhodnocování tvaru vlnoplochy z hodnot jejího gradientu. Obdržíme tak hodnoty derivace fáze ve čtyřech různých směrech (x, y a 2 diagonální směry).



Obr. 5 Spektrum rozdělení intenzity u čtyřsvazkové stříhové interferometrie

Pro vyhodnocení fáze φ (resp. tvaru vlnoplochy W) z hodnot jejího gradientu můžeme použít několik způsobů. Použijeme-li např. diskrétní Fourierovy transformace, potom mezi hodnotami fáze a jejího gradientu platí vzájemný vztah [2,13]

$$\tilde{G}_j = \text{FT} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right] = 2\pi i u_j \text{FT}(\varphi), \quad (7)$$

kde u_j je prostorová frekvence ve spektrální rovině, příslušná souřadnici x_j , přičemž

$$x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = (x + y) / \sqrt{2}, \quad x_4 = (x - y) / \sqrt{2}.$$

Minimalizační funkce odchylky

$$E\{\text{FT}(\varphi)\} = \sum_j |\tilde{G}_j - 2\pi i u_j \text{FT}(\varphi)|^2 \quad (8)$$

metodou nejmenších čtverců dostaneme pro odhad Fourierovy transformace fázových hodnot

$$\text{FT}(\varphi) = \frac{-i}{2\pi} \frac{\sum_j u_j \text{FT} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right]}{\sum_j u_j^2}. \quad (9)$$

Inverzní Fourierovou transformací poté získáme hodnoty fáze. Využitím derivací fáze ϕ ve čtyřech směrech x_i tak lze získat velmi přesný odhad fáze zkoumaného vlnového pole. Důležitou podmínkou pro aplikaci této metody je zajištění dostatečné separace postranních spekter rozdělení intenzity interferenčního pole. Citlivost a dynamický rozsah metody lze poté jednoduše nastavit změnou vzdálenosti L roviny detekce interferenčního pole a rozlišením plošného fotodetektoru záření.

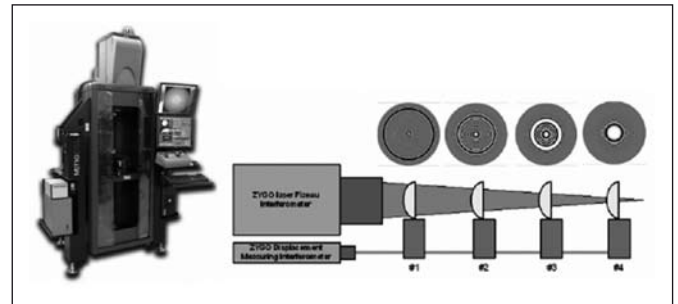
4. INTERFEROMETRICKÉ METODY KONTROLY ASFÉRIKÝCH OPTICKÝCH PLOCH

Jak již bylo poznamenáno dříve, dosud plně nedořešeným problémem v oblasti kontroly kvality optické výroby je problematika interferometrického měření tvaru asférických ploch [2, 14-21]. V praxi existuje množství kontaktních a bezkontaktních měřicích metod, založených na různých fyzikálních principech, které lze využít pro kontrolu tvaru asfér. Nicméně většina těchto metod nevyhovuje požadavkům kontroly asférických optických ploch v optickém průmyslu. Nevýhodou většiny těchto metod je dlouhý čas měření, nízká přesnost měření, malý dynamický rozsah měřených hodnot, apod. Jsou sice vyvinuty interferometrické systémy pro bezkontaktní měření asférických ploch pomocí nulových kalibrů a počítačově generovaných hologramů [2], avšak pro každou asférickou plochu je potřeba jiných kalibrů nebo počítačově generovaných hologramů. Snahou je proto vyvinout takové interferometrické metody, které by umožňovaly kontrolu asférických ploch různého tvaru bez potřeby těchto speciálních a finančně nákladných prvků. V případě interferometrické kontroly silně asférických povrchů dochází při záznamu interferenčního pole k porušení Nyquistovy vzorkovací podmínky a kontrola nemůže být provedena pomocí standardních interferometrických metod. V dalším textu se zaměříme na tři případy moderních interferometrických metod, které umožňují měření asfér s velkou odchylkou od optimální sféry.

Pro případ interferometrické kontroly vyráběných asférických ploch je možné rozdělit vyšetřovanou plochu na podoblasti (subapertury), provádět měření na těchto subaperturách, kde je splněna vzorkovací podmínka a následně numericky rekonstruovat odchylku sférické plochy na základě numerických algoritmů, které využívají spojování vzájemně se překrývajících měřicích subapertur [14-16]. Takový systém (subaperture stitching interferometer), který byl vyvinut firmou QED Technologies [20] je ukázán na obr. 6.

Jinou metodou, kterou patentovala a využívá firma Zygo Corp. ve svém interferometru Zygo VeriFire™ Asphere, je kombinace skenovací metody, založené na Fizeauově interferometru se sférickou referenční plochou, a současného měření pozice bodů vyšetřované plochy pomocí laserového dálkoměrného zařízení [17, 21]. Princip

je schématicky znázorněn na obr. 7. Princip spočívá v postupném záznamu interferogramů testované plochy pro několik pozic plochy (posuv v jedné ose) a následném počítačovém vyhodnocení pomocí numerických algoritmů.



Obr. 7 Měřicí interferometrický systém VeriFire™ Asphere pro kontrolu asférických ploch (Zygo Corp.)

Speciální metodou, která by mohla výrazněji rozšířit dynamický rozsah měřených hodnot v oblasti interferometrické kontroly asfér, je metoda, jež využívá záznamu intenzity interferenčního pole, které je vzorkováno pod Nyquistovou frekvencí (tzv. sub-Nyquist interferometry). Pro vyhodnocení podvzorkované struktury interferogramu poté používá apriorního předpokladu o spojitosti tvaru měřené plochy a jeho derivací [18, 19]. V současné době je na této bázi již komerčně nabízen měřicí systém Intellium™ Asphere firmy ESDI [10]. Tento interferometr Fizeauova typu umožňuje velmi rychlé a přesné měření silně asférických ploch. Systém je společně s podvzorkovaným interferogramem při testování sférické plochy znázorněn na obr. 8.

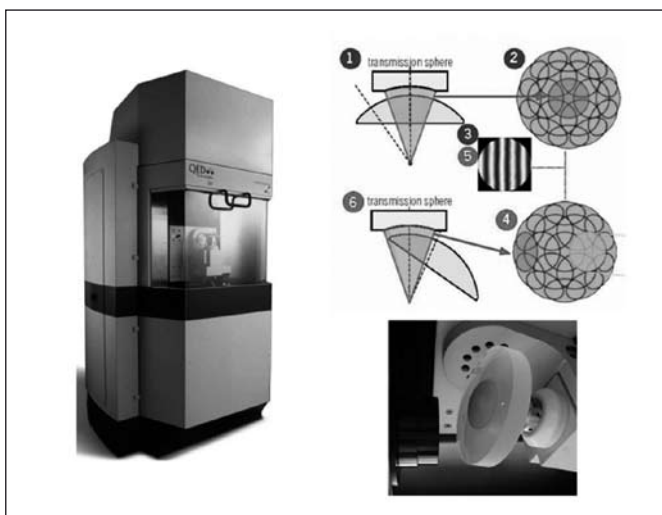


Obr. 8 Interferometr Intellium™ Asphere pro kontrolu asférických ploch (ESDI)

Na závěr je nutné poznamenat, že v oblasti průmyslové kontroly asférických ploch existuje stále velký potenciál pro vývoj nových a zlepšování stávajících metod optické kontroly. V blízké budoucnosti lze očekávat rozvinutí metod testování asfér s pomocí speciálních prvků jako jsou deformovatelné optické prvky, prvky mikrooptiky, apod.

5. ZÁVĚR

V článku byly popsány vybrané interferometrické metody, které umožňují provádět vysoce přesná měření optiky i ve velmi nepříznivých podmínkách. Pomocí těchto metod lze též provádět měření dynamických událostí. Metody využívají záznamu několika snímků intenzity fázově modulovaného interferenčního pole v jednom časovém okamžiku, resp. záznamu jednoho snímku interferenčního pole a následného numerického vyhodnocení. Byly též stručně uvedeny některé moderní metody pro bezkontaktní interferometrickou kontrolu asférických ploch. V článku byly též naznačeny vybrané trendy vývoje v oblasti interferometrických metod a problémy, které bude nutno řešit v oblasti praxe optické průmyslové kontroly. Zejména se jedná o problematiku kontroly asférických optických ploch a větší integraci kontrolních a diagnostických metod do procesu optické výroby.



Obr. 6 Subaperture stitching interferometer SSI-A pro kontrolu asférických ploch (QED Technologies)

Tato práce byla podpořena projektem MSM6840770022 Ministerstva školství ČR.

Literatura

- [1] Mikš A.: Interferometrické metody vyhodnocování sférických ploch v optice. *Jemná mechanika a optika*, **29** (1), 2001.
- [2] Malacara D., (ed.): *Optical shop testing*, John Wiley and Sons, New York, 2007.
- [3] Malacara D., Servin M., Malacara Z.: *Interferogram analysis for optical testing*. Taylor & Francis, New York 2005.
- [4] Wyant J. C.: Advances in interferometric surface measurement. *Proc. SPIE*. **6024**, 1-11 (2005).
- [5] Brock N., Hayes J., Kimbrough B., Millerd J., North-Morris M., Novak M., Wyant J. C.: Dynamic interferometry. *Proc. SPIE*. **5875**, 101-110 (2005).
- [6] Brock N., Hayes J., Kimbrough B., Millerd J., North-Morris M., Novak M., Wyant J. C.: Modern approaches in phase measuring metrology. *Proc. SPIE*. **5856**, 14-22 (2005).
- [7] Novak M., Millerd J., Brock N., North-Morris M., Hayes J., Wyant J.: Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer. *Appl. Opt.* **44** (32), 6861-6868 (2005).
- [8] Ngoi B. K. A., Venkatakrishnan K., Sivakumar N. R.: Phase-shifting interferometry immune to vibration. *Appl. Opt.* **40** (19), 3211-3214 (2001).
- [9] <http://www.4dtechnology.com/>
- [10] <http://www.engsynthesis.com/>
- [11] Primot J., Guérineau N.: Achromatic three-wave lateral shearing interferometer for wavefront analysis and correction. *Proc. SPIE*. **3737**, 214-220 (1999).
- [12] Primot J., Sogno L.: Achromatic three-wave (or more) lateral shearing interferometer. *J. Opt. Soc. Am.* **12** (12), 2679-2685 (1995).
- [13] Velghe S., Primot J., Guérineau N., Cohen M., Wattellier B.: Wave-front reconstruction from multidirectional phase derivatives generated by multilateral shearing interferometers. *Optics Letters*. **30** (3), 245-247 (2005).
- [14] Bray M.: *Stitching Interferometry: How and Why it Works*, *Proc. SPIE.*, **3739**, 259-273 (1999).
- [15] <http://www.phasics.com/>
- [16] Fleig J., P. Dumas, P. E. Murphy and G. Forbes: An Automated Subaperture Stitching Interferometer Workstation for Spherical and Aspherical Surfaces, *Proc. SPIE*, **5188**, 296-307 (2003).
- [17] Murphy P. E., J. Fleig, G. Forbes and M. Tricard: High Precision Metrology of Domes and Aspheric Optics, *Proc. SPIE*, **5786**, 112-121 (2005).
- [18] M.F. Kuechel, US Patent Nos. 6,781,700, 6,972,849 and 6,879,402.
- [19] Greivenkamp J. E.: Sub-Nyquist Interferometry, *Appl. Opt.*, **26**, 5245-5258 (1987).
- [20] Servín M., D. Malacara, Sub-Nyquist Interferometry Using a Computer-Stored Reference, *J. Mod. Opt.*, **43**, 1723-1729 (1996).
- [21] <http://www.qedmrf.com/>
- [22] <http://www.zygo.com/>

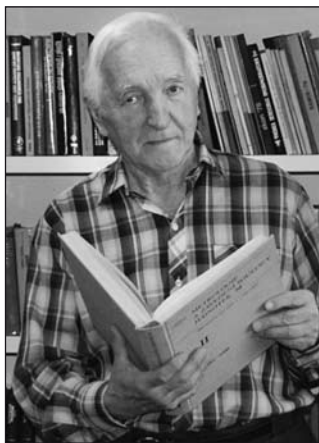
Doc. Ing. Jiří Novák, Ph.D., Ing. Pavel Novák, Ph.D., prof. RNDr. Antonín Mikš, CSc., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel.: 224 354 435, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz.

Zemřel RNDr. Vladimír Malíšek, CSc.

Dne 19. října 2008 zemřel RNDr. Vladimír Malíšek, CSc., jeden z významných pracovníků PřF UP v Olomouci. Narodil se 23. 4. 1933 v Olomouci.

Jeho nečekané úmrtí nás nemile překvapilo, neboť jsme ho znali jako vitálního a čínorodého člověka, bez náznaků nějaké nemoci. Šlo o milého a veselého spolupracovníka, kterého měli všichni rádi a jehož vyprávěčské schopnosti humorných historek ze života byly fascinující. Jako vynikající znalec historie a filozofie fyziky, matematiky, moderní fyziky, optiky a teorie i praxe varhanní hudby exceloval nejen při výuce na ČVUT a VŠZ v Praze a později hlavně na PřF UP v Olomouci, ale též při vystoupeních na různých odborných konferencích a seminářích. Jako erudovaný vědecký pracovník ÚŘE a Laboratoře optiky ČSAV v Praze a později katedry optiky PřF UP a Společné laboratoře optiky UP a FZÚ AV ČR v Olomouci dosáhl mnoha výrazných a publikovaných vědeckých výsledků, hlavně v oblasti vibrační optické spektroskopie, optického zobrazení a měření indexu lomu kapalin v infračervené oblasti spektra a s tím souvisejícím zviditelněním teplotních polí.

Například společně s doc. RNDr. Miroslavem Milerem, DrSc. napsal odbornou knížku *Vibrační spektroskopie*, která vyšla i v angličtině. Své poznatky o této vědecké disciplíně potom didakticky



zpracoval do učebního textu *Úvod do optické spektroskopie* pro studenty optiky na PřF UP v Olomouci. Též vydal užitečné knihy *Dějiny fyziky*, zpracovanou podle oborů, *Historie fyziky* z chronologického hlediska a popularizační dílo *Co víte o dějinách fyziky*. Jednotlivým oborům fyziky je věnována jeho další publikace *Vývojnázorů na světlo* a zajímavá je také jeho monografie, nazvaná *Isaac Newton*. Užitečné jsou i jeho překlady populárně-vědeckých knih L.D. Landau, *Fyzika pro každého* a A. I. Achiezer, *Vývoj fyzikálního obrazu světa*. Řadu článků přeložil do sborníku *Věda a lidstvo*.

Mnoho let se v lokálním a celostátním měřítku věnoval činnosti v rámci Jednoty československých a českých matematiků a fyziků, jejímž je zasloužilým a čestným členem. Byl též významným spoluorganizátorem několika Česko-polsko-slovenských optických konferencí na českém území, desátého světového optického kongresu v Praze a i pravidelných celostátních optických seminářů na UP v Olomouci.

Ztratili jsme skromného a pracovitého vědce a pedagoga a seriózního a obětavého přítele, který však bude dál žít v našich srdcích. Čest jeho památce.

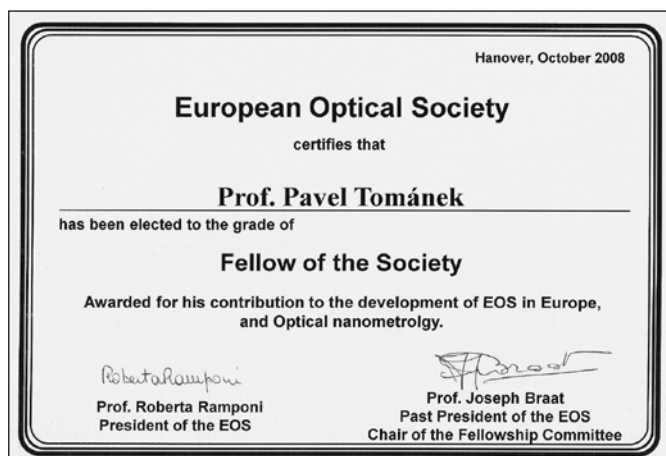
*Za spolupracovníky a přátele
prof. Jaroslav Pospíšil*

Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc. – Fellow of EOS

Při příležitosti prestižní konference EOS Annual Topical Meeting (29. 9. – 3. 10. 2008) a veletrhů Opto, Mesurexpo, Forum de l'Electronique a Visio-show na výstavišti Parc des Exposition, Paris-Nord Villepinte, probíhala i výroční valná hromada Evropské optické společnosti (EOS).

Do programu jednání bylo zařazeno také slavnostní jmenování osmi nových „chlapíků“ - Fellows EOS, které představil Past president společnosti prof. Joseph Braat (Nizozemí):

Marco Amiense (Itálie), Nicolas Gisin (Švýcarsko), Philippe Granger (Francie), Massimo Inguscio (Itálie), Karl Knapp (Švýcarsko), Pavel Tománek (Česká republika), Peter Török (Velká Británie) a Jari Turunen (Finsko).



Prof. Tománek představuje svůj diplom

Na toto významné ocenění byl prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc. z Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně navržen výborem České a slovenské společnosti pro fotoniku (ČSSF) a dalšími individuálními návrhovateli z řad prominentních evropských optiků. Zdůvodněním návrhu bylo ocenění jeho příspěvku k rozvoji optické nanometrologie a významné práce pro rozkvet EOS.

Prof. P. Tománek dlouhodobě aktivně pracuje v různých výborech EOS prakticky od jejího založení. Od r. 1993 do 2006 byl zástupcem ČSSF v Poradním výboru EOS. Od r. 2006 je předsedou tohoto výboru. Jako jediný zástupce zemí střední a východní Evropy je členem Rady ředitelů a Výkonného výboru EOS. Aktivně se podílí na rozvoji členské základny společnosti a na rozšíření sféry jejího vlivu v Evropě. I jeho přičiněním EOS v sobě v současné době zahrnuje 18 národních optických či fotonických společností a má více než 5000 členů.

Prof. Tománek je členem Výkonného výboru ČSSF a hlavním organizátorem dnes již velmi uznávaných pravidelných mezinárodních konferencí Photonics Prague. Po doc. RNDr. Miroslavu Milerovi, DrSc, který získal jmenování Fellow of the EOS v r. 2007 má tedy Česká republika dalšího člena tohoto úctyhodného sboru. Je potěšující, že i českým vědcům, kteří na evropském fóru aktivně reprezentují svou společnost, se dostává významného ocenění v evropském rámci.



Pavel Tománek představuje svůj diplom a Joseph Braat (Nizozemí) nového „chlapíka“ EOS

Miroslav Jedlička

Palenčár, R. – Kureková, E. – Halaj, M.: Meranie a metrologia pre manažérov. 1. vyd., Slovenská technická univerzita, Bratislava 2007, 253 s., ISBN 978-80-227-2743-3.

Trojica skúsených pedagógov z bratislavskej STU sa podujala na neľahkú úlohu: napísať učebnicu o metrologii pre manažérov kvality, ktorí sa logicky v svojej praktickej činnosti musia zaoberať aj meraním. Je zrejmé, že pri koncipovaní textu autori nemohli vyčerpať celú šírku metrologickej problematiky, ale museli sa obmedziť na základy (niečo v štýle malej „metrologickej abecedy“), na najdôležitejšie druhy merania, ako aj na otázky manažérstva merania a akreditácie laboratórií.

Dielo je rozdelené na 18 kapitol. Prvé tri kapitoly obsahujú už spomenuté základy, kde sú vysvetlené fundamentálne pojmy, podstata metrického systému jednotiek, meracie princípy a vlastnosti meradiel, ako i dosť podrobné informácie o fyzikálnych princípoch siedmich druhov snímačov.

4. kapitola sa zaoberá tematikou merania teploty, 5. kap. meraním tlaku (s dôrazom na bližší popis rôznych druhov tlakomerov). 6. kap. je venovaná aktuálnej problematike pretečeného množstva merania (objemový prietok, hmotnostný prietok), aj meraniu rýchlosti prúdenia tekutín (anemometria). Zaujímavá tematika merania výšky hladiny je obsahom kap. 7.

Meraniu najdôležitejšej geometrickej veličiny – dĺžky, venovali autori podľa nášho názoru v kap. 8 menej priestoru, než si táto

veličina vyžaduje. Dve nasledovné kapitoly sa zaoberajú súradnicovou meracou technikou (kde by snáď bola užitočná aj zmienka o kalibrácii súradnicových meracích strojov) a meraním uhlov (tu postrádame aj novšie informácie o uhlomerných metódach merania odchýlok tvaru a polohy).

Meranie frekvencie otáčania je náplňou kap. 11, ďalšie dve kapitoly sú venované meraniu sily a hmotnosti (t. j. váženiu). 14. kap. je významná pre všetkých, ktorí plánujú merania v praxi.

15. kapitola monografie si zasluhuje zvláštnu pozornosť, pretože tu je podaná zrozumiteľným spôsobom problematika spracovania a vyhodnotenia meraných údajov. Výklad o chybách merania, neistotách, ich zdrojoch a postupoch určovania je zavŕšený vzorovými príkladmi výpočtu neistôt.

Kap. 16 objasňuje otázky manažérstva merania (model systému, metrol. confirmácia, spôsobilosť meracieho procesu, riadenie mer. procesov, atď.). Stručná zmienka o laboratóriách s riadeným prostredím je v kap. 17. Posledná kap. monografie vysvetľuje podstatu akreditácie a certifikácie. Zoznam literatúry (sumárne 59 položiek, ktoré sa však v texte nevyskytujú konkrétne citované) uzatvára toto dielo.

Záverom možno konštatovať, že autori sa zhostili svojej úlohy veľmi dobre a recenzovaná monografia môže slúžiť nielen ako učebnica, ale aj ako príručka manažérom v priemysle, ktorí sú konfrontovaní s problémami kvality merania a kvality produkcie všeobecne.

I. Brezina

Z dílny starých mistrů

(34. pokračování)



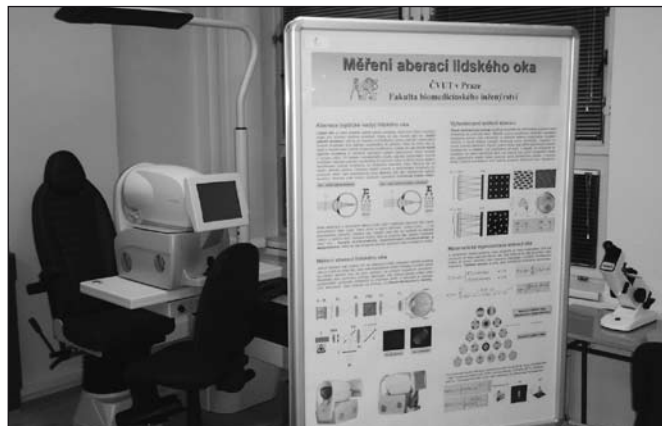
- Při varném stříbření mosazi se postupuje tak, že v nádobě s neporušenou glazurou se rozpustí v 1 l horké vody 40 g vinného kamene a 14 g dávivého vinného kamene. Do tohoto roztoku se dále přidá 50 g kyseliny solné, 125 g granulovaného – nejlépe práškového cínu a 50 g práškového antimonu. Směs se zahřeje do varu a předměty se do ní ponořují. Po max. hodinovém vaření je mosaz pokryta pěkným, pevným a trvalým povlakem stříbra.
- Ponořovací stříbření podle Kaysera vyžaduje rozpuštění 1 kg dvojsiřičitanu sodného a 100 g dusičnanu stříbrného v 1 l vody. Roztok se používá za studena.
- Pro stříbření třením (vtíráním) je podle Langbeina jedna z nejlepších směsí tohoto složení: 10 g chloridu stříbrného, 10 g kyselého vinanu draselného (vinný kámen) v prášku, 20 g kuchyňské soli a přídavek takového množství vody, až má směs těstovitou konzistenci. Namísto suchého chloridu stříbrného je lépe použít čerstvě rozpadlého chloridu stříbrného.
- K témuž účelu stříbrnění dává Stockmeier tento předpis: 15 g dusičnanu stříbrného, rozpuštěného v 1/4 litru vody se dosadí roztokem 7 g kuchyňské soli v trošce vody a vymíchává se až do sražení vyloučeného chloridu stříbrného. Odfiltrovaný chlorid stříbrný se v mokřem stavu tře s 20 g vinného kamene a 40 g kuchyňské soli (za případného zředění vodou). Tato směs se utírá měkkou kůží nebo hadříkem na odmaštěných plochách, až dojde k jejich postříbření.
- K zrnitému stříbření dělicích kruhů a škal přístrojů se podle údajů Říšského fyzikálně-technického ústavu používá 1 díl práškového stříbra, 2 díly vinanu draselného (vinný kámen) a 6 dílů kuchyňské soli. Sůl se nejdříve vysuší a potom se v třecí míse smísí s vinným kamenem. Směs se vysype na bílý papír a přidá se práškové stříbro (jinak by větší podíl práškového stříbra ulpěl na stěnách misky). Po dokonalém smísení se stříbrnicí směs uchová v těsně uzavřené nádobě. Ke stříbření určené a předem obroušené stupnice se omyjí vinným kamenem a vodou, potom vodou zvlhčená stříbrnicí hmota se intenzivním tlakem prstů nanáší, až je docleno žádoucí tloušťky a bělosti vrstvy stříbra. Postříbřené plochy se vinným kamenem a vodou omyjí a osuší. Eventuálně mohou být pokryty bezbarvým lakem. V protikladu ke stříbření s chloridem stříbrným zůstávají tyto plochy bílé. Stříbrný prášek lze použít ve třech zrnících: jemném, středním a hrubém a volba je dána velikostí plochy určené ke stříbření. Dělicí kruhy a bubínky nesmí být stříbřeny kupř. na soustruhu; podmínkou stříbření je totiž intenzivní vtírání stříbrnicího prášku.
- Stříbrnicí prášek pro kovy sestává z 15 g taveného cínu a 15 g rtuti, co nejlépe rozetřené s přídavkem 120 g preparovaného jeleního parohu. Prášek se intenzivně na určené plochy vtírá a kovy získají vzhled stříbra.
- Podle Fieldera postříbření spočívá v tom, že předmět se tře hadříkem, namočeným ve směsi 5 dílů dusičnanu stříbrného, 300 – 350 dílů chloridu sodného, 80 – 100 dílů vinného kamene a 350 – 400 dílů tripelové lešticí hlínky.

Obor Optika a optometrie na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT

Počátkem října 2008 Akreditační komise MŠMT schválila rozšíření akreditace bakalářského studijního programu Biomedicínská a klinická technika na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT (FBMI) v Praze o nový obor Optika a optometrie pro prezenční formu studia. Výuka v uvedeném oboru bude zahájena od zimního semestru roku 2009. Bakalářský studijní obor Optika a optometrie je zcela nově zavedený obor studia na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT, který si klade za cíl přípravu kvalifikovaných odborníků v oblasti optiky a optometrie v souladu s požadavky Evropské rady optiky a optometrie (ECOO) a vzdělávání nelékařských zdravotnických pracovníků v souladu s platnými legislativními předpisy o nelékařských zdravotnických povoláních. Délka studia jsou 3 roky a absolvent získává titul Bc.

Bakalářské studium v uvedeném oboru je profesně zaměřené studium, kde si studenti osvojí vědomosti a praktické dovednosti z oblasti optiky, optometrie, oftalmologie a dalších souvisejících oborů. Během tříletého studia získá student znalosti z předmětů přírodovědného základu (matematiky, fyziky, chemie, biologie, aj.), z preklinických a klinických lékařských předmětů (anatomie, fyziologie, histologie, patologie) s důrazem na lidské oko a předmětů s optickým zaměřením, které jsou základem přípravy pro další odborné předměty z oblasti optiky, optometrie, oftalmologie a přístrojové techniky, využívané v uvedených oborech. Při sestavování obsahu studia byla respektována skutečnost, že studium optometrie bez znalostí, potřebných ke kvalifikaci očního optika, by nebylo dostačující. Proto je studium rozšířeno i o náplň oboru oční optiky. Během studia budou studenti seznámeni též s principy podnikání, vedení optické provozovny, právními i ekonomickými předpisy.

V rámci struktury studijního plánu oboru Optika a optometrie je do výuky zahrnuto vysoké množství hodin vlastní odborné praxe u jednotlivých předmětů a laboratorních cvičení, což umožní studentům lépe proniknout do praktické problematiky oční optiky a optometrie. Vzhledem k multidisciplinárnímu zaměření nového oboru se na výuce (jak teoretické tak praktické) budou podílet specialisté z ostatních fakult ČVUT v Praze, 2. a 3. Lékařské fakulty Univerzity Karlovy a další odborníci z oblasti optiky, optometrie a oftalmologie. Primární část teoretické i praktické výuky bude probíhat v komplexu



FBMI na Kladně, kde byla zřízena laboratoř oční optiky a optometrie. Studenti se též v průběhu studia seznámí s mnoha moderními lékařskými pracovišti a optickými provozovnami. Nadaní studenti budou moci absolvovat zahraniční stáže. Po ukončení mohou absolventi oboru Optika a optometrie dále pokračovat ve studiu dvouletého navazujícího magisterského programu Biomedicínská a klinická technika v oborech Přístroje a metody pro biomedicínu a Systémová integrace procesů ve zdravotnictví.

Absolvent studijního oboru Optika a optometrie se stane vysokoškolsky vzdělaným odborníkem, který je teoreticky i prakticky připraven pro práci optika, optometristy a kontaktologa. Bude mít teoretické i praktické znalosti z oblasti optiky, optometrie, oftalmologie, přístrojové techniky, metod stanovení refrakčních vad a jejich korekcí všemi typy optických pomůcek, teorie binokulárního vidění, použití speciálních pomůcek pro těžce zrakově postižené, apod. V rozsahu znalostí a praktických dovedností bude schopen vyrobit brýle a navrhnout je i z estetického hlediska. Stane se odborníkem v oblasti kontaktních čoček, dovede stanovit typ i všechny parametry vhodné kontaktní čočky, bude mít hluboké znalosti a praktické dovednosti v oblasti aplikace kontaktních čoček a péče o ně. Co se týká praktického uplatnění absolventů studia, ti budou moci pracovat nejen jako oční optici či optometristé, ale i v oblasti práce se speciálními lékařskými přístroji, v oblasti výroby a aplikace brýlových a kontaktních čoček a dalších příbuzných oborů. Získané vědomosti a praktické dovednosti mohou uplatnit ve zdravotnických zařízeních, aplikačních centrech kontaktních čoček, v provozovnách oční optiky, ve výrobě brýlových a kontaktních čoček, brýlových obrub a u firem, jež se zabývají vývojem, výrobou, prodejem a servisem přístrojové techniky pro optiku, oftalmologii a optometrii.

Přijímací řízení do bakalářského studia v oboru Optika a optometrie probíhá formou písemných přijímacích zkoušek. Uchazeč o studium skládá přijímací zkoušky ze dvou předmětů. Povinným předmětem je biologie. Druhý předmět si může student vybrat z kombinace matematika, fyzika nebo informatika. Termín odevzdání přihlášek ke studiu je 31. březen 2009. Přihlášku je možné odevzdat osobně na studijním oddělení Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT, nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno 2 nebo elektronicky na stránce <https://prihlaska.cvut.cz/apps/kos/prihlaska/>, či poštou doporučeně s razítkem podání nejpozději 31. března 2009. Všechny další informace o daném studijním oboru lze nalézt na stránce www.fbmi.cvut.cz.

Blanka Brůnová, Jiří Novák

Prof. MUDr. Blanka Brůnová, DrSc., České vysoké učení technické, Fakulta biomedicínského inženýrství, katedra přírodovědných oborů, nám. Sítná 3105, 272 00 Kladno. Tel.: 312 608 206, 224 358 496, e-mail: brunova@fbmi.cvut.cz

Doc. Ing. Jiří Novák, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel.: 224 354 435, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz.

CONTENTS

Education and research in optical fields at Institute of Physics, VSB-Technical University of Ostrava

(J. Pištora, J. Vlček, M. Lesňák) 291
The contribution is devoted to short view on programmes related to the optics and educated by members of Institute of Physics, VSB-Technical University of Ostrava. The second part describes the selected activities of optics and nanostructures research team.

Effect of the reflectance model on determination of the thin-film thickness

(M. Luňáčková, J. Luňáček, D. Ciprian, P. Hlubina) 293
This paper presents the effect of various reflectance models of the thin-film structure system on determination of the thin-film thickness. A special program was created in software package Matlab, which is able to calculate theoretical spectral reflectance in selected wavelength interval for the certain thin-film thickness. Afterwards, this reflectance, which simulates experimental reflectance during the following study, is processed by other program in Matlab. In this way the simulated reflectance is fitted to theoretical one with thin-film thickness as fitted parameter. Different combinations of optical parameters - dispersive and non-dispersive - for the thin-film structure system can be used as the input for the program files in the fitted reflection spectrum. Finally, the effect of reflectance models on the value of the thin-film thickness is discussed.

Key words: Fresnel's formulas, spectral reflectance, thin-film structure, dispersion

Diagnostic measurement of vibrations in assessment of focusing tube wear during hydro-abrasive splitting of aluminium

(S. Hloch, J. Valíček) 295
Abrasive waterjet cutting monitoring of materials in recent years has become an important area of research. The article deals with potential applications vibration analysis at technological process of cutting of material. In order to provide the vibration analysis at abrasive waterjet cutting, have been carried out experiments to measure vibration and ultrasonic emissions in order to ascertain the context of the parameters measured vibrations with the technology division of aluminium. The main challenge is finding the existence of the link between the focusing tube wear and vibration.

Keywords: abrasive waterjet cutting, vibration analysis, focusing tube wear

Computer simulation of the system for non-contact vibration scanning of rotating and sliding machine and device parts

(R. Krehel) 298

Laser comparator for calibration of length sensors (O. Číp, M. Čížek, Z. Buchta, B. Mikel, J. Lazar, J. Kür, R. Wíttek, P. Konečný, D. Smutný, P. Balling P. Křen) 301

The article covers the topic of a laser comparator for calibration of length sensors that has been developed in cooperation with MESING, Institute of Scientific Instruments of the ASCR and Czech Metrology Institute. The laser comparator is destined for manufacturers of sensors and length meters as well as for factory metrology centres that deal with precision engineering. The comparator allows to calibrate the sensors with a measuring range up to 100 mm at the position reproducibility of 1 nm.

Transmission Phase Gratings on Silver-Halide Materials

(Š. Němcová, P. Václavík) 303
This paper deals with an effect of a chemical processing and an exposure time to the diffraction efficiency and the signal/noise ratio of diffraction gratings made on silver-halide emulsions Agfa Gevaert. The results of measurements on gratings treated by 14 different chemical processes are presented.

Cooling Mechanism of Drinks - an Understandable Physical Description (J. Sedláček, J. Dolejší) 307

The paper describes the physical mechanism of the drinks cooling.

RNDr. Dagmar Senderáková, CSc.'s anniversary

(V. Mesároš, A. Štrba) 310

Interferometric methods for phase evaluation of wave field in optics (J. Novák, P. Novák) 311

The article presents a survey of selected methods for phase evaluation of optical wave fields based on interference principle. There are mentioned both the classical and modern interferometric methods for phase evaluation usable in many applications, especially in scientific and industrial optical metrology. Their advantage is a high precision, non-contact way of measurement and results obtained practically in real time.

Sixth International Conference Photonics Prague 2008

(P. Tománek) 318
Czech and Slovak Society for Photonics organised its 6th conference Photonics Prague dealing with Photonics, Devices and Systems. The Conference was held on August 27-27, 2008 in Artemis Olympik hotel in Prague.

150 participants from 34 countries answered to the invitation of Organizing and Program Committees. The excellent and exciting 4 plenary talks were followed by successful thirteen sessions (with 29 invited, 78 oral and 51 posters presentations) on various aspects of Photonics.

SPiE Best student presentation Awards have been distributed among three young ladies, and CSSF Award received ex-aequo two young Czech scientists.

Selected trends in the field of interferometric methods for optical control (J. Novák, P. Novák, A. Mikš) 320

The article presents a survey of selected modern interferometric methods suitable for quality control in optical production. There are mentioned physical principles of these measuring and evaluating methods together with their advantages and disadvantages. Also the selected progress trends of interferometric methods are suggested including problems needed to be solved in practical tasks of optical industrial control.

RNDr. Vladimír Malíšek, CSc. deceased (J. Pospíšil) 325

Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc. – Fellow of EOS

(M. Jedlička) 326

From technical library (I. Brezina) 327

Optics and Optometry - field of study at the Faculty of Biomedical Engineering, Czech Technical University in Prague

(B. Brůnová, J. Novák) 328

ANOTACE

Laserový komparátor pro kalibraci délkových snímačů

(O. Číp, M. Čížek, Z. Buchta, B. Mikel, J. Lazar, J. Kür, R. Wíttek, P. Konečný, D. Smutný, P. Balling P. Křen) 301
Článek pojednává o laserovém komparátoru pro kalibraci délkových snímačů, vyvinutém ve spolupráci MESING, ÚPT AV ČR a ČMI. Je určen jak pro výrobce snímačů a délkoměrů, tak i pro podniková metrologická střediska firem přesného strojírenství. Komparátor umožňuje kalibraci snímačů s rozsahem měření až 100 mm při reprodukovatelnosti polohy 1 nm.

zaostřeno **na optiku**



OPTA

15. mezinárodní veletrh oční optiky, optometrie a oftalmologie

- Zvýrazněné téma 2009 **"SPORTS & VISION"**
- **Premiéry a novinky** připravované prodejci a distributory pro jaro/léto 2009
- Možnost prezentace značek formou módních přehlídek a "street show"
- **TOP OPTA 2009** - soutěž o nejlepší exponát veletrhu
- Nová **návštěvnická soutěž** o exponátovou novinku na veletrhu
- Mezinárodní kongres **OPTA 2009** za podpory **ECOO** opět v Brně
- **Lectures Point** - pro firemní a odborné přednášky a prezentace

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

Brno, Výstaviště

27. 2. – 1. 3.

2009

www.opta.cz

Central European
Exhibition Centre



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

BVV 
Veletrhy
Brno