

7-8
2008

JMO

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA FINE MECHANICS AND OPTICS

Požadavek:

Vše potřebné pro řízení,
pohony a zajištění
pohybu z jedné ruky

Naplnění:

Bosch Rexroth
- MSV, 15.-19.9.2008
volná plocha M,
stánek č.2
- nový závod, Těžební 2,
Brno

ISSN 0447-6441
Index 46 723

Rexroth - řešení pro všechna průmyslová odvětví

info@boschrexroth.cz www.boschrexroth.cz

Electric Drives
and Controls

Hydraulics

Linear Motion and
Assembly Technologies

Pneumatics

Service

Rexroth
Bosch Group



Lepší pohled na svět

PROGRAM KONFERENCE

OPTIKA A JEMNÁ MECHANIKA 2008

pořádané u příležitosti 75. výročí založení optického průmyslu v Přerově pod záštitou majitele společnosti Meopta - optika, s.r.o., pana Paula Rausnitze, která se koná ve dnech **24. - 26. 9. 2008** v kongresovém sále **hotelu Fit , Dvořákova 21b v Přerově.**

Cíl konference

Informovat o řešených problémech oboru na jednotlivých pracovištích České republiky, seznámit se s moderními trendy optické technologie a dát přehled o možnostech výuky optiky na vysokých školách. Ve více jak 40 vystoupeních zazní informace, které umožní získat ucelený pohled o současném dění v oborech optiky v naší zemi a umožní získat dobrý přehled o moderních trendech oboru. Dalším cílem je vytvořit přátelskou neformální atmosféru k navázání nových kontaktů a také k získání dalších informací o činnostech, které se do nabitého programu již nevešly.

Čestné předsednictvo

prof. Zdeněk Bouchal, DrSc.
prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.
prof. Zdeněk Hradil, DrSc.
ing. Jiří Kršek
prof. RNDr. Miroslav Liška, DrSc.
prof. RNDr. Antonín Mikš, Csc.
doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc.
ing. Vítězslav Motka
prof. RNDr. Jan Peřina, DrSc.
doc. RNDr. Pavel Zemánek, Ph.D.
doc. ing. Josef Zicha, CSc.

Programový výbor

RNDr. Vladimír Chlup
RNDr. Zdeněk Lošťák
RNDr. Miloslav Vychodil, CSc.

Organizační výbor

Hana Filipová	hana.filipova@meopta.com
Zuzana Veselá	zuzana.vesela@meopta.com
Mgr. Michaela Dlouhá	michaela.dlouha@meopta.com

(Pokračování na str. 227)

REDAKČNÍ RADA

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

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

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

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

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

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

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

Šéfredaktor: dipl. tech. Jaroslav NEVŘALA

Adresa redakce v Olomouci (předplatné, nakladatelské služby):

SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 576, fax: 585 631 531, e-mail: eva.pelc clova@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 Českou i Slovenskou republiku. Do všech ostatních zemí je časopis JMO distribuován za jednotnou cenu 10 EUR/ks. Pro členy SPIE/CS činí předplatné 120,- Kč/rok. Předplatné pro studenty Bc., Mgr., Ph.D. a studenty středních škol při osobním odběru činí 120 Kč/rok; v případě zaslání poštou 300,- Kč/rok.

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

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

V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá:

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

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

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

Odborné články jsou lektorovány.

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2008

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS
ROČNÍK 53 7 - 8/2008

OBSAH

- Bosch Rexroth slavnostně otevřel nový závod**
(P. Kapitánik) 195
- Rexroth camoLINE – karteziánský stavebnicový systém integruje pneumatické, mechanické a elektrické funkce**
(T. Bořil) 196
- Vy máte nápad, my máme řešení...** (M. Hrubý) 199
- Testy fotovoltaického systému se zvýšenou efektivitou v reálných podmínkách provozu** (M. Libra, V. Poulek) 201
- Nabídka akcí České metrologické společnosti na září – prosinec 2008** (Z. Tůma) 203
- Dva základní teoretické modely elektronové magnetorezistence elektricky vodivé mezoskopické tenké vrstvy** (J. Pospíšil, F. Pluháček) 204
- Provozní nasazení senzorů Optosurf při kontrole funkčnosti povrchů** (R. Brodmann, B. Brodmann, P. Kracík, K. Tlášek, D. Smutný) 209
- Radiometry a fotometry** (P. Oupický) 211
- Ing. Igor BREZINA sedemdesiatnikom** (Red.) 214
- Prostředí se záporným indexem lomu - I. část**
(M. Miler, H. Hiklová) 215
- Strojírenská měřicí technika** (Č. Nenáhlo) 220
- Měření skupinové disperze optického prvku s využitím spektrální tandemové interferometrie v bílém světle**
(R. Chlebus, P. Hlubina, D. Ciprian) 223

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 JASTRA-BÍK - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch KRŠÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Bohumila LENCOVÁ - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric. Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠTÁK - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), František MÁČA, Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Ing. Monika MÍČHALOVÁ, PHILIPS Slovakia s.r.o., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav MILER - Inst. of Photonics and Electronics of Academy of Sciences, v.v.i., Praha (Czech Rep.) Jan PEŘINA - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jaromír PIŠTORA - Tech. Univ., Ostrava (Czech Rep.), Jaroslav POSPÍŠIL - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Dagmar SENDEŘÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Petr SCHOVÁNEK - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Karel STU-DENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

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

FINE MECHANICS AND OPTICS

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

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

Editor: Miroslav HRABOVSKÝ

Managing Editor: Jaroslav NEVŘALA

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

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

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

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

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

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

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

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

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2008

FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

VOLUME 53

7 - 8/2008

CONTENTS

- Bosch Rexroth inaugurated its new division**
(P. Kapitánik)..... 195
- Rexroth camoLINE – Cartesian modular system integrates pneumatic, mechanical and electrical functions**
(T. Bořil) 196
- You have ideas, we have solutions...** (M. Hrubý)..... 199
- Testing of photovoltaic system with enhanced effectivity under real operation conditions** (M. Libra, V. Poulek)..... 201
- Czech Metrological Society – list of events for September – December 2008** (Z. Tůma)..... 203
- Two basic theoretical models of the electronic magnetoresistance of an electrically conductive mesoscopic thin layer**
(J. Pospíšil, F. Pluháček)..... 204
- Operational employment of Optosurf sensors for reliability surface performance** (R. Brodmann, B. Brodmann, P. Kracík, K. Tlášek, D. Smutný)..... 209
- Radiometers and photometers** (P. Oupický)..... 211
- Ing. Igor BREZINA in his seventies** (Red.)..... 214
- Media with negative refractive index**
(M. Miler, H. Hiklová)..... 215
- Engineering measurement technique** (Č. Nenáhlo)..... 220
- Measurement of an optical element group dispersion using a spectral tandem white light interferometry**
(R. Chlebus, P. Hlubina, D. Ciprian)..... 223

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

Bosch Rexroth slavnostně otevřel nový závod

Rozšíření kapacit pro trvalý nárůst obrátu

Brno. Reiner Leipold-Büttner, člen představenstva akciové společnosti Bosch Rexroth AG, otevřel společně s paní Annou Procházkovou, náměstkyní hejtmana Jihomoravského kraje a s Pavlem Bartošem, viceprezidentem hospodářské komory ČR, nový závod společnosti Bosch Rexroth AG v Brně. Po 14 měsících výstavby se Bosch Rexroth Česká republika oficiálně přestěhoval do nových budov. Po slavnostním aktu měli po dobu dvou dnů zákazníci z celé Evropy možnost přesvědčit se o moderním vybavení závodu. Jako poděkování za velkou angažovanost uspořádal podnik i rodinný den pro všechny zaměstnance a jejich nejbližší.



„Rexroth zvyšuje, a to také díky hospodářskému boomeru ve střední a východní Evropě, již několik let nadprůměrným tempem obrát a buduje po celém světě nové výrobní závody“, zdůraznil při slavnostním otevření Reiner Leipold-Büttner, člen představenstva akciové společnosti Bosch Rexroth AG. „Tím se zúročuje naše trvalá snaha, se kterou se od roku 1990 soustředujeme na vybudování místního know-how v České republice i sousedních státech.“ Společnost Bosch Rexroth AG zvýšila od roku 2002 celosvětový obrát o zhruba 50 procent na přibližně 5,4 miliard eur a očekává také v roce 2008 výrazný růst. „Nepřetržitým zvyšováním našich kapacit, jako zde v Brně, se připravujeme na možnosti dalšího růstu, které se otevřou v příštích letech“, uvedl člen představenstva z Německa.

Největší světový výrobce technologií pro realizaci řízených pohonů investoval do novostavby zhruba 13,5 milionů eur. Bosch Rexroth má v České republice celkem 220 zaměstnanců v Brně a pobočkách v Praze a Ostravě. „Jen za posledních dvanáct měsíců vzniklo v Brně zhruba 60 nových pracovních míst“, řekl Dětrich Robenek, generální ředitel společnosti Bosch Rexroth v České republice.

V těchto nových budovách vznikly kancelářské plochy o výměře 5 200 čtverečních metrů s moderními pracovišti konstrukčního, obchodního a servisního oddělení pro všechna technologická odvětví Rexroth. Kromě toho zhruba 100 odborníků na výrobní ploše o výměře 4 000 čtverečních metrů zhotovuje speciální hydraulické agregáty dle individuálního přání zákazníka určené pro stroje, zařízení a velké projekty s celosvětovou působností. Ty jsou tak říkajíc srdcem pohonů strojů a průmyslových zařízení všeho druhu. Jak v nejznámějších světových operních budovách, tak ve zdymadlových vratech vodních toků. Ve všech světadílech či v jiných velkých projektech zajišťují hydraulické agregáty Rexroth spolehlivý a hospodárný chod.

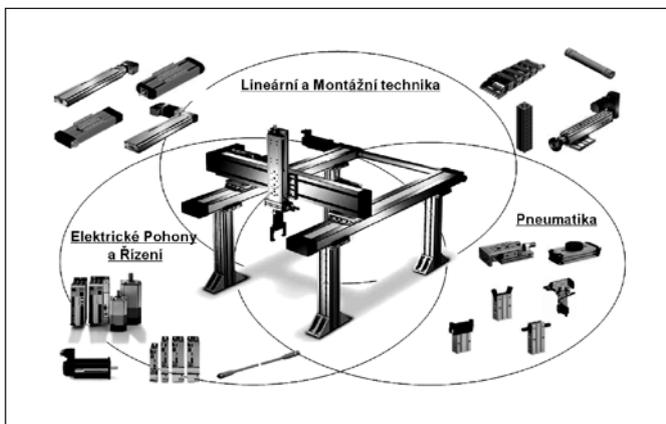


Kontakt: Ing. Petr Kapitánik, Bosch Rexroth, spol. s r.o., Těžební 2/1238, 627 00 Brno, tel.: +420 548 126 103, e-mail: petr.kapitanik@boschrexroth.cz

Rexroth camoLINE – karteziánský stavebnicový systém integruje pneumatické, mechanické a elektrické funkce

1 ÚVOD

Automatizace manipulačních systémů byla překvapivě jedna z posledních oblastí standardizace ve strojírenství. S cílem uspokojit všechny různé individuální požadavky aplikací, museli uživatelé konstruovat a vyrábět tyto systémy kombinováním prvků od různých dodavatelů – včetně jejich odlišných přípojovacích rozměrů a tvarů. V některých případech dokonce museli požadované spojovací díly vyrábět. To vše je nyní vyřešeno stavebnicovým systémem Rexroth camoLINE. S tímto novým systémem výrobce zařízení kombinuje přesně přizpůsobené lineární posuvové systémy a motory s pneumatickými miniposuvy, otočnými kompaktními moduly a chapadly. Díky inovační technice spojování se spolehlivým systémem aretace poloh, dosahuje stavebnicový systém takové úrovně přesnosti v nosné konstrukci, která mohla být dříve dosažena pouze s přídatnými a cenově náročnými zakázkově vyráběnými díly.



Hlavní prvky stavebnicového systému jsou:

- elektrické lineární osy CKK a CKR
- pneumatické miniposuvy MSC, pneumatické otočné moduly RCM a chapadla GSP
- Standardizované spojovací centrážní prvky (pozitivní aretace) a systém nosičů kabelů
- Servomotory a krokové motory s příslušnými regulátory
- Sady dílů pro připevnění na nosnou konstrukci
- Hliníkové profily pro nosné konstrukce

Díky systému pozitivní aretace mezi jednotlivými komponenty dosahuje stavebnicový systém camoLINE velmi vysoké přesnosti montáže prvků a tím revolučně zjednodušuje konstrukci zařízení, montáž a uvedení do provozu.

2 ELEKTROMECHANICKÉ LINEÁRNÍ OSY

Jednoduše sestavitelné profilové konstrukce poskytují nosný systém pro lineární posuvové osy z řady kompaktních modulů, které mohou být montovány buď přímo nebo pomocí standardizovaných upevňovacích dílů pomocí systému pozitivní aretace centrážními kroužky. Protože jsou přípojovací rozměry stejné, uživatelé mohou vybrat nejvhodnější řešení pohonu: kuličkový šroub s vysokou přesností polohování nebo pohon ozubeným řemenem pro vysoké rychlosti pohybu. S dvojnásobným lineárním kuličkovým vedením integrovaným do hliníkového tělesa modulu, nabízí kompaktní modul vysoké hodnoty zatížení a vysokou tuhost. Motory mohou být jednoduše připojeny k hnací přírubě kompaktního lineárního modulu pomocí ustavovacího osazení a přípojovacího závitu. Rexroth nabízí speciálně konstruované standardizované interface pro přímou montáž motoru stejně jako pro připojení převodového řemenu bočního pohonu nebo planetové převodovky.



Obr. 2 Lineární moduly CKK a CKR

Parametry systému: Typ osy:	Zdvih max. [mm]	V max. [m/s]	Min. čas otočení / sevření	Rastr [mm]	Max. zatížení [kg]
CKK	1520	1,13	---	40/20	100 (horizont.)
CKR	1720	5	---	40/20	100 (horizont.)
eCKK	1240	1,16	---	40/20	50 (horizont.)
eCKR	1240	2	---	40/20	30 (horizont.)
VKK	400	0,8	---	40/20	20
MSC	200	0,8	---	40/20	17
RCM	180	---	0,25	---	dle Jmax limitu
GSP-P	8	---	0,02	---	2

Výrobní sortiment je uceleným standardizovaným systémem nosičů kabelů a držáků pro jejich montáž v prostoru. To umožňuje úspornou a rychlou konstrukci a montáž mnoha jednoduchých i víceosých aplikací, a to kompletně včetně nosiče kabelů.

Rexroth IndraDyn servomotory s třídou krytí IP 65 nabízí vysokou dynamiku v kompaktním provedení. Vybavené Hiperface multiturn absolutním encoderem, zachovávají tyto motory absolutní polohu osy, i když je systém vystaven výpadku proudu. To eliminuje potřebu referenčních cyklů, když je systém znovu napájen. Díky této konstrukci, nabízí krokové motory až o 50 % větší krouticí moment než konvenční krokové motory srovnatelných velikostí. Všechny motory mohou být objednány s brzdou nebo bez brzdy, pro specifické požadavky. V produktovém portfoliu jsou ke všem motorům dostupné ovladače.



Obr. 3 Elektrické servomotory a řídicí systémy

3 PNEUMATICKÉ OSY A KOMPONENTY SYSTÉMU CAMOLINE

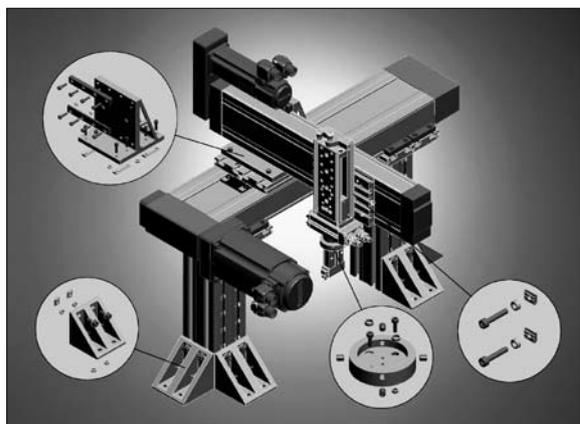
Vysoce výkonné pneumatické prvky, rovněž připravené pro přímou montáž, dovršují stavebnicový systém a zajišťují všechny druhy typických manipulačních úkolů. Miniposuvy s dvěma hnacími válci nabízí mnoho možností pro připevnění k dalším manipulačním prvkům a jsou dostupné v široké škále standardizovaných zdvihů.

Otočné kompaktní moduly charakterizuje přesné a vysoce únosné uložení otočné příruby. Pneumatická paralelní, výkvná a radiální chapadla jsou dostupná v několika velikostech pro pokrytí širokého pole požadavků. Standardizovaná interface těchto prvků umožňují uživatelům kombinovat pneumatické a elektrické osy

v téměř jakýchkoliv konfiguracích, a tím dosáhnout nevhodnějších a ekonomických řešení pohonů pro každou aplikaci. Tato standardizace a inovační technika spojování prvků významně urychluje montáž zařízení a jejich uvedení do provozu.

4 SPOJOVACÍ PRVKY CAMOLINE A PŘÍSLUŠENSTVÍ

Zjednodušení začíná se základním nosným systémem: hliníkové profilové podpěry o rozměrech až do 4000 mm a vybavené dvěma řadami centrážních otvorů standardizovaných rozměrů absolutně nahrazují úsilí věnované konstrukci nosného rámu. Centrální kroužky umožňují uživatelům spojovat jednotlivé komponenty stavebnicového systému k sobě, a to buď přímo na sebe nebo pomocí příslušných spojovacích sad s vytvořením pozitivního aretovaného spoje, který nevyžaduje žádné další úpravy. Úhlové konzoly zajišťují precizní a stabilní upevnění k nosnému rámu.



Obr. 5 Připevňovací sady pro montáž modulů na nosnou konstrukci



Obr. 4 Pneumatický otočný modul RCM, chapadlo GSP a posunová jednotka MSC

Spojovací systém pozitivní aretace systému camoLINE nahrazuje všechny doposud používané nákladné spojovací díly, tzv. adaptéry v manipulačních systémech s vysokými požadavky na přesnost. Nosné konstrukce z hliníkových profilů jsou jednoduché na sestavení. Vytváří podpěrný systém pro lineární osy z řady kompaktních modulů, které mohou být připevněny buď přímo nebo pomocí levných standardizovaných přípojovacích dílů s centrážními kroužky pro pozitivní aretaci.

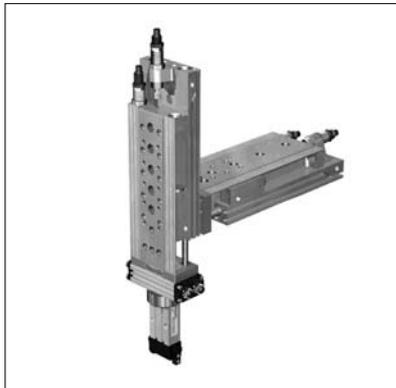
Příslušné nosiče kabelů mohou být upevněny pomocí standardizovaných přípojovacích dílů. To významně zjednodušuje a zrychluje konstrukční práce.

5 PŘÍKLADY APLIKACÍ

1) Pick & place pro vysokou bodovou přesnost:

- rychlé pracovní cykly
- nízká hmotnost přenášených součástí
- tuhé, stabilní posunové osy s vynikající přesností

Parametry systému:	Osy		
	X (Y) pneumatická	Z pneumatická	ω
Max. zdvih [mm] / [°]	200	200	180
Počet mezipoloh	2	2	1
Opak. přesnost [mm] / [°]	0,02	0,02	0,05
Hmotnost součástí [kg]	Max. 17 (1,9 s chapadlem)		



2) Lineární portál s elektrickou svislou osou:

- dlouhé pracovní dráhy
- kombinace různých modulů
- neomezený počet poloh ve vodorovné i svislé ose

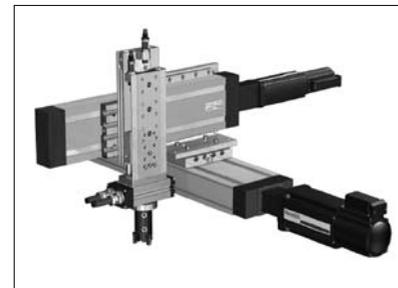
Parametry systému:	Osy	
	X (Y) elektrická	Z elektrická
Max. zdvih [mm] / [°]	1720	1520
Počet mezipoloh	Neomezený	Neomezený
Opak. přesnost [mm] / [°]	0,02	0,02
Hmotnost součástí [kg]	Max. 36	



3) Vícesý XYZ portál pro přesný posuv ve všech směrech:

- pohyb v třídimenzionálním prostoru
- pevný zdvih svislé osy pomocí pneumatického posuvu
- variabilní počet mezipoloh v horizontálních osách
- pomocí elektrických pohonů

Parametry systému:	Osy			
	X elektrická	Y elektrická	Z pneumatická	ω
Max. zdvih [mm] / [°]	1720	1720	200	180
Počet mezipoloh	neomezený	neomezený	1	1
Opak. přesnost [mm] / [°]	0,05	0,05	0,02	0,05
Hmotnost součástí [kg]	Max. 52 (1,9 s chapadlem)			

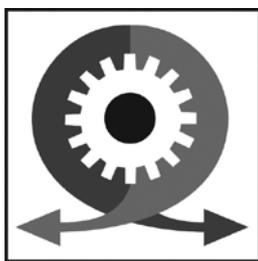


7 ZÁVĚR

Charakteristickou vlastností Rexroth stavebnicového systému camoLINE je možná kombinace různých typů pohonů v jedné aplikaci, což umožňuje konstruovat a vyrábět manipulační zařízení, která přesně vyhovují požadavkům uživatelů. Vysoký je stupeň flexibility díky značné variabilitě elektrických a pneumatických os, včetně otočných kompaktních modulů a chapadel. Standardizované modulární rozměry a uspořádání prvků minimalizuje konstrukční náročnost a výrobní náklady. Nemusí již být používány žádné specifické propojovací prvky, nákladné na výrobu, protože systém camoLINE zahrnuje standardizované propojovací díly. Pozitivní aretační systém zajišťuje dobrou opakovatelnost montáže a rychlou výrobu zařízení. 100% kompatibilita komponentů pro automatizaci - všechny produkty Rexroth pro pohon a řízení z jednoho zdroje.

http://www.boschrexroth.com/business_units/brl/en/produkte/mehrachssysteme/camoLINE/index.jsp

Kontakt: Ing. Tomáš Bořil, Bosch Rexroth, spol. s r.o., Těžební 2/1238, 627 00 Brno tel.: +420 548 126 355, fax: +420 548 126 354, e-mail: tomas.boschrexroth.cz



MSV 2008

Vy máte nápad, my máme řešení

Jubilejní 50. ročník mezinárodního strojírenského veletrhu

15. – 19. září 2008

Výstaviště Brno, hala F, stánek 23

Všude kolem nás je spousta lákadel, na internetu lze najít téměř všechno, ale jak si rychle a pohodlně vybrat TO správné?

Vybrali jsme z neustále se rozšiřující nabídky výrobků pro vás ty nejzajímavější. Pro některé z vás je jistě novinkou, že již také dodáváme elektrické pohony, indukční a optická čidla, průmyslové kamery nebo ventily pro procesní techniku.

Proč trávit drahocenný čas procházením katalogů a porovnáváním jednotlivých výrobků, který je vhodnější, kvalitnější nebo levnější? Raději se zastavte u nás na stánku, kde na vás čeká přes 20 odborníků připravených najít optimální řešení pro vaši automatizační nebo procesní úlohu. Nezáleží na tom, zda jste z malé nebo velké firmy, zda potřebujete technicky vyspělé řešení nebo jednoduchou pneumatiku, odborníci Festo najdou pro vás výkonově i cenově výhodné řešení.

Pokud se nedostanete na veletrh, nevádí, profesionální poradenství můžete využít i po telefonu v našem zákaznickém centru na čísle 261 099 611 nebo nás navštívit v centrále v Praze nebo v automatizačním centru ve Zlíně.

Účinnější automatizace – od součástky k systému

Mechatronický systém zahrnuje výkonné prvky pro nejrůznější automatizační úlohy. Prvky ze stavebnice jsou navzájem přizpůsobené a snadno se smontují díky přizpůsobeným spojovacím dílům z katalogu. Při montáži a uvedení do provozu vám mohou asistovat naši specialisté na elektrické pohony – podpora je u nás samozřejmostí.

- Motor a ovladač: od ovladače krokových motorů CMMS-ST s nízkými náklady až po různými funkcemi vybavený servoovladač CMMP-AS
- Pohony a válce: od dynamického přímočarého pohonu EGC až po vysoce přesný pohon s vřetenem EGSK/EGSP



Elektrický přímočarý pohon EGC s vedením v kuličkových oběžných pouzdech a servomotor CMMS

Společný cíl - efektivita energie

Zvýšená produktivita, snížení nákladů a energetická efektivita jsou rozhodující parametry pro efektivní automatizaci. Díky inovacím a včasnému rozpoznání trendů vyvíjíme a nabízíme již dlouhou dobu energeticky efektivní výrobky a řešení. S prvky a systémy Festo je možné již dnes realizovat překvapivé potenciální úspory. Od oblasti ventilů a ventilových terminálů až po vysoce efektivní úpravu stlačeného vzduchu. Například Energy Monitoring System GFDM. S tímto systémem uspoříte až 35 % nákladů na energii díky lepší údržbě systému stlačeného vzduchu.



Diagnostika stlačeného vzduchu ve výrobě

Cenově atraktivní při 100% kvalitě – cena podle funkce!

Nabízíme portfolio zaměřené na klíčové funkce pro vaše požadavky v pneumatice podle norem standardní pneumatiky. Vyvinuto na základě analýzy běžných klíčových funkcí - bez kompromisu v kvalitě výrobku. Jednoduše platíte jen za funkce, které skutečně



Válec DSNUP podle ISO 6432 s hliníkovou trubkou a víky z polymeru

potřebujete. Jedním z příkladů jsou kruhové válce dle ISO 6432, od těch pro základní úlohy v pneumatice DSNU s polymerovými víky, přes DSNU pro vysokou pracovní zátěž až k nerezové variantě CRDSNU pro náročné provozní podmínky. Nyní si může výrobky Festo dovolit opravdu každý.

Silný tým pro drsné podmínky

Nové robustní kyvné pohony DFPB a ventily Namur jsou zkonstruovány pro často drsné podmínky prostředí v procesním průmyslu. Pro náročné venkovní použití jsme vyvinuli novou řadu pohonů DFPI pro řízení uzavíracích šoupátek a hradítek. Obsahuje vše v jednom - přímočarý pohon s integrovaným odměřováním, blokem s ventily a polohovacím systémem. Jednou z pokročilých funkcí je např. vyloučení nebezpečí námrazy pomocí topného článku. Sami si zvolíte úroveň - od jednotlivého výrobku k balíčku. Dodávky včetně rozváděče obsahujícího řídicí systém, elektrický/ventilový terminál, jednotku pro úpravu stlačeného vzduchu atd. Využijte výhod „One stop shopping“ (vše od jediného dodavatele).



Pohon s řízením v uzavřené smyčce DFPI

Všechny novinky pohromadě

Vyžádejte si bezplatně tištěnou brožuru v češtině nebo se podívejte na www.festo.cz.



Brožura novinky 2008

Kontakt: Marcel Hrubý, Festo, s.r.o., Modřanská 543/76, 147 00 Praha 4, tel.: +420 261 099 611, fax: +420 241 773 384, <http://www.festo.cz>, info_cz@festo.com

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 nevěnujte 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, Kabelkova 1, 750 02 Přerov.

Testy fotovoltaického systému se zvýšenou efektivitou v reálných podmínkách provozu

ÚVOD

Na stránkách časopisu *Jemná mechanika a optika* jsme již popsali unikátní konstrukci automatického pohyblivého stojanu fotovoltaických (PV) panelů s hřebenovým koncentrátorem záření [1,2], který sleduje pohyb Slunce po obloze a natáčí panely stále kolmo ke směru záření a díky mírné koncentraci záření zvyšuje tok energie na PV panely. Rovněž jsme v práci [3] referovali o testech předchozího menšího PV systému instalovaného na ČZU, zejména o jeho zatížení větrem během vichřice síly orkánu Kyryl v lednu 2007 a uvedli jsme i výpočty působících sil podle práce [5]. Tehdy vichřice v maximu dosáhla rychlosti větru $v = 162 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a během jejího působení nebyl náš PV systém nijak poškozen.

V práci [4] jsme popsali konstrukci nového většího PV systému s výše uvedeným hřebenovým koncentrátorem záření, který byl instalován na Technické fakultě ČZU v létě r. 2007 a uvedli jsme i první výsledky testování. Na Technické fakultě ČZU v Praze jsme již testovali různé solární PV systémy a i tento byl vyvinut ve spolupráci firmy Poulek Solar, s.r.o. a ČZU v Praze. Ve dnech 1. - 2. března 2008 byl i tento PV systém během vichřice Ema podroben neplánované zkoušce zatížení větrem v reálných podmínkách.

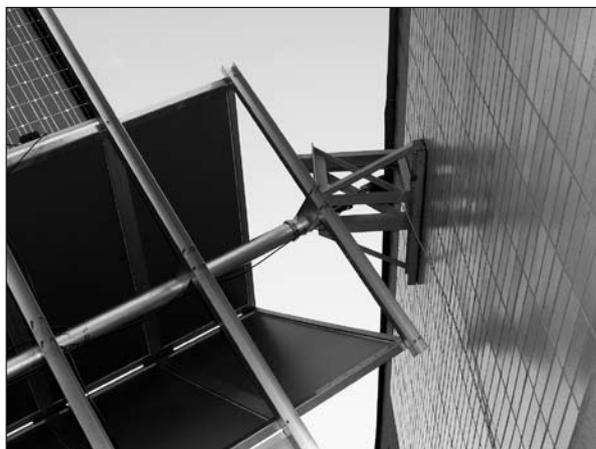
EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Konstrukce PV systému a schéma elektrického zapojení byly uvedeny už v předchozím článku [4], PV systém je pro připomenutí na *obr. 1*. Uchytení horního konce pohyblivého stojanu je vidět

na *obr. 2*. K připevnění ke stěně sloužila konstrukce z ocelových profilů zavěšená na deseti kotvách tvořených závitovou tyčí M12 zavrtanou do stěny a fixovanou dvousložkovou chemickou maltou. Uchytení dolního konce je zřejmě na *obr. 3*, podstavec byl rovněž z ocelových profilů a byl pouze položen na zemi a proti pohybu byl zajištěn ocelovými lankami napnutými do čtyř stran. Detail napnutí kotvicího lanka je vidět na *obr. 4-5*, napínací háčky byly uchyceny ke stěně pomocí stejně provedených kotev.



Obr. 1 PV systém instalovaný a testovaný na ČZU v Praze



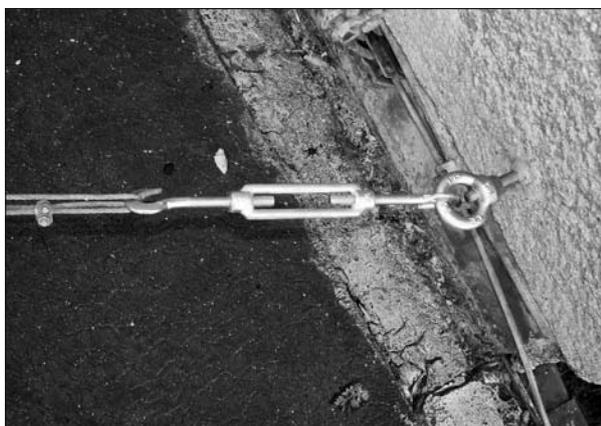
Obr. 2 Uchytení horního konce pohyblivého stojanu



Obr. 3 Uchytení dolního konce pohyblivého stojanu



Obr. 4 Detail napnutí kotvicího lanka



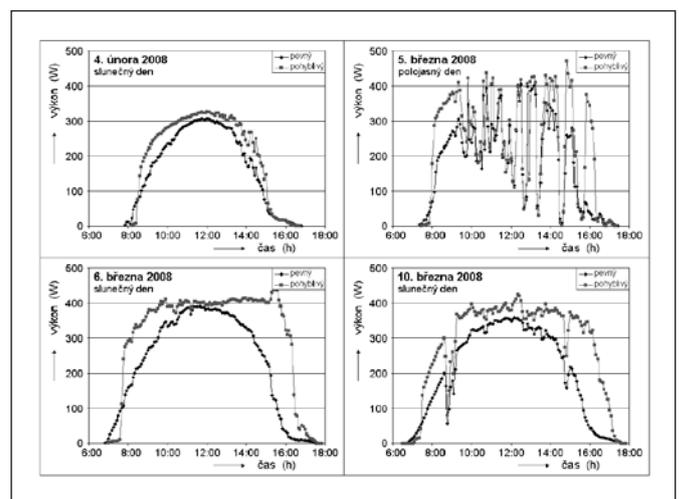
Obr. 5 Detail napnutí kotvicího lanka

VÝSLEDKY A DISKUSE

Ve zmíněných dnech 1. - 2. března 2008 vichřice Ema dosahovala rychlosti větru v nárazech až $v_{max} = 120 \text{ km.h}^{-1}$ směrem od západu. PV systém byl orientován k západu, vítr se tedy opíral do celé plochy PV panelů i hřebenového koncentrátoru záření.

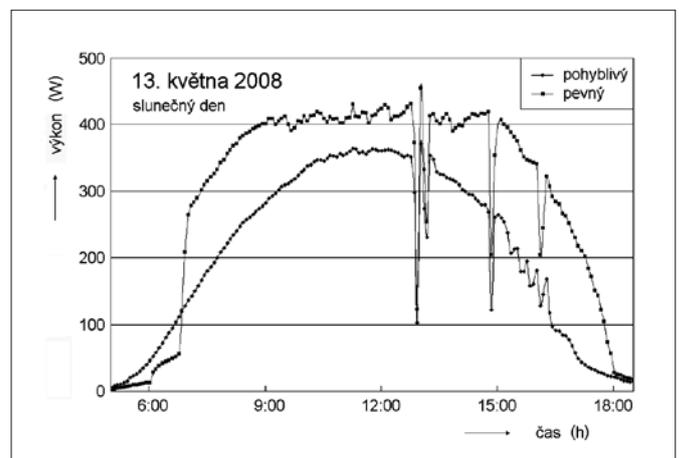
Mezinárodní norma ČSN P ENV 1991-2-4 „Zásady navrhování a zatížení konstrukcí, část 2-4 Zatížení konstrukcí větrem“ se zabývá odolností konstrukcí proti působení větru. Na teritoriu celé Evropy se i v nejhorsích podmínkách počítá s běžným větrem v přízemní vrstvě do rychlosti až $v_{max} = 160 \text{ km.h}^{-1}$. Náš automatický stojan je proti působení větru chráněn samosvorným převodem s maximálním kroučícím momentem $M = 1000 \text{ Nm}$ a jeho konstrukce je dimenzována tak, aby odolala silám větru o rychlosti do $v_{max} = 160 \text{ km.h}^{-1}$. Testy na zatížení větrem jsme u menšího systému prováděli před několika lety v aerodynamickém tunelu ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu v Praze-Letňanech [6]. Během vichřice nebyl poškozen ani mechanismus se samosvorným převodem uvnitř rotační osy, ani konstrukce celého systému. PV systém tedy v této neplánované zkoušce odolnosti v reálném provozu obstál.

Systematické studium závislosti okamžitého výkonu na času a množství vyrobené elektrické energie pokračovalo během zimních a jarních měsíců r. 2008. Příklady takových závislostí během vybraných zimních dnů jsou na obr. 6. Zde jsou porovnávány stejné standardní PV panely čínské výroby, vždy tři panely byly zapojeny do série, připojené k měničiči a střídavý proud z měničů byl dodáván přímo do rozvodné sítě (viz popis konstrukce [4]). Jedna trojice PV panelů byla umístěna na pevném stojanu bez koncentrátoru záření, druhá trojice byla umístěna na pohyblivém stojanu typu TRAXLE™ s hřebenovým koncentrátoru záření. Množství vyrobené elektrické energie odpovídá ploše pod grafem. Je vidět, že během slunečných zimních dnů navýšení množství vyrobené energie činí až 40 % v případě PV panelů na pohyblivém stojanu s hřebenovým koncentrátoru záření. Ale během zimních dnů se Slunce pohybuje nízko nad obzorem, úhel pohybu Slunce po obloze je malý a tím je i malý úhel sledování automatického stojanu. Den je krátký a je větší složka difúzního záření. V důsledku šikmého směru přímého záření u některých PV panelů není zrcadlem přisvícena celá plocha. Méně osvětlené PV články se chovají jako zátěž, tedy celkový proud a následně i výkon jsou limitovány nejméně osvětleným PV článkem.



Obr. 6 Závislost okamžitého výkonu na času během vybraných zimních dnů r. 2008

Na obr. 7 je příklad obdobného měření během slunečného jarního dne. Zde uvedené navýšení množství vyrobené elektrické energie činí 50 %. Je ale vidět, že v ranních hodinách chvíli stíní hřeben zrcadlem PV panelům na západní straně stojanu. Dá se tedy předpokládat,



Obr. 7 Závislost okamžitého výkonu na času během jarního slunečného dne r. 2008

že po optimalizaci konstrukce, co se týče úhlu sledování a nastavení hřebenu zrcadel, se během slunečných letních dnů bude pohybovat toto navýšení množství vyrobené elektrické energie kolem očekávaných 60 % v podmínkách České republiky (50°s.š.).

ZÁVĚRY

Na Technické fakultě ČZU v Praze byl zkonstruován unikátní solární PV systém s automatickým pohyblivým stojanem typu TRAXLE™ a s hřebenovým koncentrátorem záření. Tento PV systém je zde nyní testován.

Konstrukce našeho PV systému vyhověla i z hlediska zatížení větrem. Během vichřice Ema 1. - 2. března 2008 nedošlo k žádnému poškození.

Navýšení množství vyrobené elektrické energie činilo až 50 % v případě PV panelů umístěných na pohyblivém stojanu s hřebenovým koncentrátorem záření v porovnání s pevnými panely bez koncentrátoru záření během jarních slunečných dní.

Více informací a obrázků našich zařízení je možno najít například na internetové adrese <http://www.solar-trackers.com>.

Práce probíhá v rámci výzkumného záměru MSM 6046070905.

Literatura

- [1] V. Poulek, M. Libra, *Nový, levný, pohyblivý, hřebenový koncentrátor záření*, *Jemná mechanika a optika*, **44**, 9, (1999), 282-283, ISSN 0447-6441
- [2] Libra, M., Poulek, V., *Solární energie, fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*, kniha - vydala Česká zemědělská univerzita v Praze, (2006), 149 stran, ISBN 80-213-1488-5
- [3] Libra, M., Poulek, V., *Neplánovaná zkouška odolnosti fotovoltaického solárního systému při zatížení větrem*, *Jemná mechanika a optika*, **52**, 5, (2007), str. 152-153
- [4] Poulek, V., Bican, P., Mareš, J., Libra, M., *Nový fotovoltaický systém se zvýšenou efektivitou na ČZU v Praze*, *Jemná mechanika a optika*, **53**, 2, (2008), str. 48-49
- [5] F. M. White, *Fluid Mechanics*, Mc. Graw-Hill, inc., (1994)
- [6] M. Libra, V. Poulek, *Životnostní zkoušky pohyblivého, fotovoltaického, solárního systému nové konstrukce*, *Jemná mechanika a optika*, **44**, 4, (1999), str. 119-120

prof. Ing. Martin Libra, CSc., Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6, tel.: 224 383 284, e-mail: libra@tf.czu.cz

Ing. Vladislav Poulek, CSc., Poulek Solar, s.r.o., Velvarská 9, 160 00 Praha 6, tel.: 603 342 719, e-mail: info@solar-trackers.com

NABÍDKA AKCÍ ČESKÉ METROLOGICKÉ SPOLEČNOSTI NA ZÁŘÍ – PROSINEC 2008

Česká metrologická společnost Vám předkládá přehled akcí nabízených na poslední čtyři měsíce roku, který může být rozšířen o akce, které by reagovaly na aktuální vzniklou situaci.

Podrobná nabídka všech akcí Společnosti včetně certifikace způsobilosti je dostupná na internetové stránce ČMS www.csvts.cz/cms, ze které si můžete stáhnout přihlášky na jednotlivé akce i žádosti o certifikaci způsobilosti, rozšíření, prodloužení a recertifikaci.

Nabídku s přihláškou si můžete vyžádat i v sekretariátu ČMS: **tel/fax: 221 082 254, e-mail: cms-zk@csvts.cz**. Certifikační místo má samostatnou e-mailovou adresu: **cert-cms@csvts.cz**

22. – 24. září 2008 Plzeň	K 411-08	Kalibrace měřidel délek a úhlů
25. září 2008 ČSVTS Praha, 318	S 423-08	Souřadnicové měřicí stroje
7. – 8. říjen 2008 Hotel Srní, Šumava	K 421-08	Škola měření teploty
20. – 23. říjen 2008 DT Kladno	K 409-08	Stanovení nejistot při kalibraci, měření a zkoušení
12. listopad 2008 Klub LÁVKA	Ko 401-08	10. fórum metrologů
26. listopad 2008 ČSVTS Praha, 318	K 410-08	Způsobilost procesů měření
1. – 5. prosinec 2008 DT Kladno	K 402-08	29. základní kurz metrologie
9. prosinec 2008 ČSVTS Praha, 318	S 420-08	Metrologie pro vedoucí OŘJ

Výhled na I. čtvrtletí 2009

Na toto období připravujeme akce, jejichž názvy mohou být ještě upřesněny ve ZRAVODAJI ČMS 3/2008, který bude rozeslán začátkem prosince 2008 a nabídka bude také zveřejněna v METROLOGII 4/2007. Program může být ještě doplněn podle aktuální situace. Začátkem prosince bude úplná nabídka k dispozici na webové stránce ČMS.

21. leden 2009 ČSVTS Praha, 318	K 419-09	Novinky v oblasti nejistot měření
18. únor 2009 ČSVTS Praha, 319	S 423-08	Nové kalibrační postupy
18. – 19. březen 2009 Plzeň	Ko 417-09	Měřicí technika pro kontrolu jakosti <i>18. mezinárodní seminář s výstavou měřicí techniky</i>

Trvale nabízíme následující korespondenční kurzy, které nejsou vázány na pevný termín:

K 90 Korespondenční kurz metrologie

K 91 Korespondenční kurz pro pracovníky zkušeben

*Ing. Zdeněk Tůma
předseda ČMS*

Dva základní teoretické modely elektronové magnetorezistence elektricky vodivé mezoskopické tenké vrstvy

V tomto článku je diskutován vliv homogenního magnetostatického pole na přenos elektronů v homogenní elektricky vodivé kovové nebo polovodičové mezoskopické tenké vrstvě. K tomuto účelu je využito dvou přiměřených základních teoretických vodivostních modelů, vztažených k její elektrické rezistivitě a mobilitě, koncentraci a hustotě energetických kvantových stavů přítomných elektronů. Jde o klasický Drudeho model, aplikovatelný na slabou podélnou a příčnou magnetorezistenci, a kvantový Shubnikovův – de Haasův model, využitelný pro silnou podélnou magnetorezistenci. Prezentované vzorce vystihují některé specifické magnetorezistenční vlastnosti mezoskopických elektricky vodivých tenkých vrstev s aktuálním praktickým významem pro další miniaturizaci, vývoj a výzkum nových integrovaných elektronických, optoelektronických a elektrooptických systémů.

1. ÚVOD

Tento článek se vztahuje ke dvěma základním jednočásticovým lineárním interpretacím přenosu (přepravě, vedení) elektronů (ke kondukčnímu elektrickému proudu) v homogenní mezoskopické kovové nebo polovodičové tenké vrstvě (filmu) v ustáleném teplotním a elektrickém stavu se zřetelem k působícímu slabému nebo silnému vnějšímu ladicímu homogennímu a statickému magnetickému poli o magnetické indukci B a za předpokladu přiměřeně malých hodnot přiloženého vnějšího zdrojového homogenního elektrostatického pole o intenzitě E .

Zde uvažované mezoskopické elektricky vodivé systémy (mezoskopické elektronové vodiče) jsou materiálové (látkové) vzorky pevné fáze s difuzně rozptýlenými driftově se šířícími elektrony, jejichž efektivní (elektricky účinné) rozměry obvykle nejsou větší než každá z těchto tří základních charakteristických kolizních délek [1-6]: de Broglieho vlnová délka elektronu, střední volná dráha elektronu a délka fázové relaxace elektronu. Tyto rozměry se široce liší u různých mezoskopických (včetně nanometrických) vzorků a jsou výrazně ovlivnitelné například teplotou nebo působícím elektrickým nebo magnetickým polem.

V následujícím textu je přenos (konduktance) elektronů v uvažované homogenní mezoskopické vodivé tenké (prakticky dvourozměrné, tj. 2D) vrstvě charakterizován pomocí plošné elektrické rezistivity (měrného ohmického elektrického odporu vztaženého k jednotce šířky vrstvy) ρ a jejich specifických změn v přítomnosti slabého ($0 < B < 1$ T) nebo silného (1 T $< B < 4$ T) vnějšího magnetostatického pole o velikosti B . Tyto tzv. elektronové magnetorezistenční jevy totiž vedou k cenným novým poznatkům nejen o elektrické rezistivitě, ale například i o koncentraci a mobilitě (pohyblivosti) vodivostních elektronů s aktuálním praktickým významem pro další miniaturizaci a nové funkční alternativy elektronických, optoelektronických a elektrooptických integrovaných zařízení [3-5]. Vzhledem k jejich rozdílným mechanismům a vlastnostem existují různé přiměřené teoretické a experimentální přístupy. V tomto textu jsou prezentovány dva základní teoretické přístupy, a to klasický (nekvantový) a kvantově-mechanický. Pro interpretaci a analýzu vlivu podélného nebo příčného (Hallova) slabého magnetorezistenčního jevu (tj. vlivu slabého magnetického pole na přenos elektronů ve směru délky nebo šířky vrstvy) bývá dostačující klasický Drudeho teoretický formalismus (klasický Drudeho teoretický vodivostní model), kdežto případy vlivu silného magnetického pole vyžadují přiměřené kvantově-mecha-

nické teoretické formalizmy, specifické zvláště pro podélný nebo příčný magnetorezistenční jev [5, 7-15]. Z nich je v tomto článku pozornost zaměřena na kvantový Shubnikovův – de Haasův (SdH) teoretický formalismus (model) s tzv. SdH oscilacemi podélné elektrické rezistivity v závislosti na hodnotách B působícího silného magnetického pole. Tento formalismus je součástí obsažnějšího kvantového Landauova teoretického modelu, přiměřeného i pro interpretaci příčného (Hallova) jednovrstvého magnetorezistenčního jevu v silném magnetickém poli a též například pro exaktní vysvětlení v současnosti existujících komplikovanějších izotropních a anizotropních magnetorezistenčních jevů v jednovrstvých a vícevrstvých strukturách při obřím a obrovském (kolosálním) magnetickém poli (viz např. [5, 12-22]).

2. KLASICKÝ DRUDEHO MODEL SLABÉ MAGNETOREZISTENCE

V souladu například s publikacemi [1-3, 5] lze v rámci klasického Drudeho teoretického modelu kovový nebo polovodičový homogenní mezoskopický vzorek, jímž se šíří elektrony, pojímat jako statistický systém těchto elektronů (elektronový plyn), u něhož lze v uvažovaném ustáleném teplotním a elektrickém stavu při přijatelném lineárním přístupu (pro přiměřeně malé hodnoty přiloženého vnějšího homogenního statického elektrického pole o intenzitě E) předpokládat, že při nulovém vnějším magnetickém poli (o magnetické indukci $B = 0$) je elektrickým polem získaná driftová (unášecí) hybnost $m\mathbf{v}_d$ elektronu o driftové postupné rychlosti \mathbf{v}_d , efektivní hmotnosti m a elektrickém náboji e , přeložená přes jeho původně náhodný pohyb, rovna ztrátě $eE\tau_m$ jeho hybnosti (impulzu) vlivem existujících různých kolizí (srážek) podle relace

$$m\mathbf{v}_d = eE\tau_m, \quad (1)$$

neboli

$$\mathbf{v}_d = \frac{e\tau_m}{m} \mathbf{E}. \quad (2)$$

Přítom τ_m je odpovídající relaxační (obnovovací) doba hybnosti elektronů. Jde o dobu šíření (dobu života) elektronu do úplného zániku nebo úplné obnovy jeho hybnosti vlivem působících rozptylujících kolizí (srážek) s mřížkovou strukturou vzorku, jejími nepravidelnostmi (defekty, poruchami), příměsemi (nečistotami)

a vibracemi (fonony), případně i s jinými elektrony. Velikost příslušné mobility μ driftového elektronu je definovatelná vztahy

$$\mu = \frac{|\mathbf{v}_d|}{|\mathbf{E}|} = \frac{|e|}{m} \tau_m. \quad (3)$$

Jestliže na uvažovaný mezoskopický vodivý vzorek působí homogenní magnetostatické pole o nenulové magnetické indukci $\mathbf{B} \neq 0$, lze v rámci prezentovaného Drudeho modelu akceptovat vektorovým součinem modifikovanou relaci (1) ve tvaru

$$\frac{m\mathbf{v}_d}{\tau_m} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_d \times \mathbf{B}). \quad (4)$$

Přitom pro předpokládaný 2D- mezoskopický vzorek, ležící například v pravoúhlé souřadné rovině (x, y) a mající délku ve směru souřadné osy x , a pro kolmo působící magnetické pole o magnetické indukci $\mathbf{B} = B_z \neq 0$ ve směru souřadné osy z (kdy $B_x = 0$, $B_y = 0$ a tudíž magnetorezistence je maximální) obsahuje tvar (4) složky

$$E_x = \frac{m\mathbf{v}_x}{e\tau_m} - \mathbf{v}_y B, \quad E_y = \frac{m\mathbf{v}_y}{e\tau_m} + \mathbf{v}_x B, \quad (5)$$

kde $\mathbf{v}_x = v_x$, $\mathbf{v}_y = v_y$ a E_x , E_y jsou x -ové a y -ové složky driftové rychlosti \mathbf{v}_d a intenzity \mathbf{E} v rovině (x, y) působícího elektrického pole. Vztahům (5) přísluší ekvivalentní součinnové 2D-maticové vyjádření

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m}{e\tau_m} & -B \\ +B & \frac{m}{e\tau_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Pro účely analýzy přenosu vodivostních elektronů v daném 2D- vodivém mezoskopickém vzorku je vhodné uvažovat hustotu \mathbf{j} driftového elektrického proudu I , vztaženou k jeho jednotkové šířce a vyhovující relaci

$$\mathbf{j} = n_s e \mathbf{v}_d. \quad (7)$$

Přitom n_s je plošná koncentrace v něm obsažených vodivostních elektronů (jejich počet v jeho plošné jednotce). Tím se získá užitečnější forma vyjádření (6) ve tvaru

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m}{e\tau_m} & -B \\ +B & \frac{m}{e\tau_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{j_x}{en_s} \\ \frac{j_y}{en_s} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

kde j_x a j_y jsou x -ová a y -ová složka vektoru \mathbf{j} . Následně využití relace (3) a pro dané uspořádání zavedené konstanty

$$\eta = |e| n_s \mu \quad (9)$$

umožňuje maticový součin (8) přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \eta^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -\mu B \\ +\mu B & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} j_x \\ j_y \end{bmatrix}, \quad (10)$$

z něhož na základě znalostí veličin \mathbf{E} , \mathbf{j} a \mathbf{B} lze přímo samostatně usuzovat na charakteristickou mobilitu μ daného 2D- mezosko-

pického vzorku. Samotné zjištění jeho charakteristického tenzoru rezistivity $\rho(\rho_{xx}, \rho_{xy}, \rho_{yx}, \rho_{yy})$, splňujícího platnou obecnou maticovou relaci

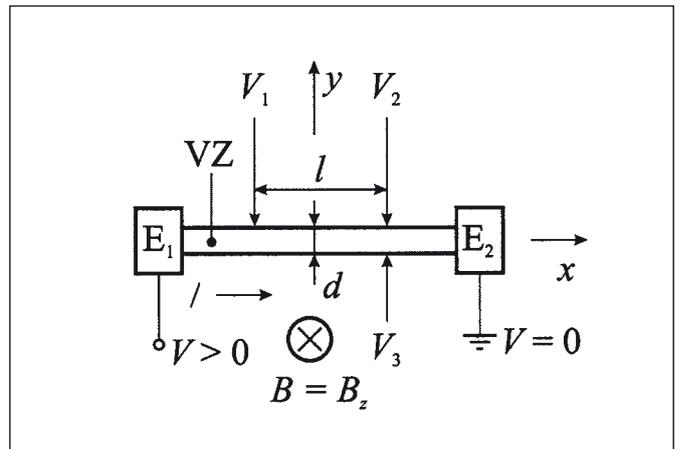
$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} j_x \\ j_y \end{bmatrix}, \quad (11)$$

pak umožňují příslušné vztahy

$$\rho_{xx} = \eta^{-1} = \text{konst.} \quad (12)$$

$$\rho_{yx} = -\rho_{xy} = \frac{\mu B}{\eta} = \frac{B}{|e| n_s}. \quad (13)$$

Tyto vztahy vystihují skutečnost, že v rámci platnosti popsaného jednoduchého klasického Drudeho vodivostního modelu (tj. pro slabou magnetorezistenci uvažovaného 2D- mezoskopického vzorku) je příslušná podélná elektrická rezistivita ρ_{xx} konstantní, kdežto odpovídající příčná (Hallova) rezistivita $\rho_{yx} = -\rho_{xy}$ roste lineárně s lineárním růstem hodnot přítomné magnetické indukce B .



Obr. 1 Možné experimentální uspořádání k měření podélné a příčné (Hallovy) rezistivity ρ_{xx} a ρ_{yx} 2D- mezoskopického elektrického vodiče VZ ve slabém kolmém homogenním a statickém magnetickém poli o indukci $B = B_z$ pomocí zjištěných poklesů $U_x = V_1 - V_2$ a $U_H = U_y = V_2 - V_3$ lokálních elektrických potenciálů V_1 , V_2 a V_3 a vztahů (16)

Rezistivity ρ_{yx} a ρ_{xy} uvažovaného 2D- mezoskopického vzorku lze podle publikace [4] měřit pomocí experimentálního uspořádání na obr. 1: Stejnýsměrný kondukční elektrický proud I (s technickou orientací) o hustotě (7) prochází z elektrody E_1 o kladném elektrickém potenciálu $V > 0$ 2D- mezoskopickým vzorkem VZ o šířce d ve směru x jeho délky l do elektrody E_2 ($V = 0$) a měří se jeho podélný napěťový pokles (pokles lokálních elektrických potenciálů) $U_x = \Delta V_x = V_1 - V_2$ a příčný (Hallův) napěťový pokles $U_H = \Delta V_H = V_2 - V_3$. Protože v tomto uspořádání je $j_y = 0$, platí vztahy

$$E_x = \rho_{xx} j_x, \quad E_y = \rho_{yx} j_x, \quad (14)$$

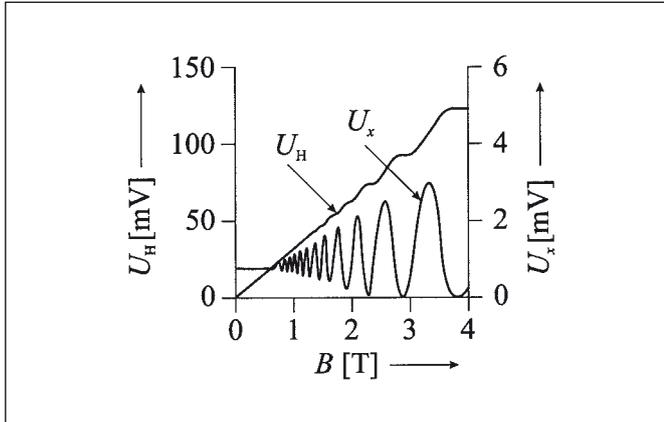
kde

$$j_x = \frac{I}{d}, \quad E_x = \frac{U_x}{l}, \quad E_y = \frac{U_H}{d}, \quad (15)$$

Takže elektrické rezistivity ρ_{xx} a ρ_{yx} souvisí s měřeními hodnotami U_x a U_H podle relací

$$\rho_{xx} = \frac{U_x d}{I l}, \quad \rho_{yx} = \frac{U_H}{I}. \quad (16)$$

Příklad naměřených závislostí veličin U_x a U_H na přiloženém kolmém vnějším homogenním magnetickém poli o magnetické indukci $B = B_z$ plochou $\mathcal{S} = ld$ tenké (2D) polovodičové vrstvy GaAs v souřadné rovině (x, y) , prezentovaných publikacemi [4, 5], je na obr. 2 (pro $l = 1$ mm, $d = 0,38$ mm, $I = 25,5$ μ A). Tyto výsledky potvrzují prostřednictvím závislostí $U_x(B)$ a $U_H(B)$ již zmíněný teoretický fakt, že v diskutovaném slabém podélném magnetickém poli prakticky zůstává veličina $\rho_{xx}(B)$ konstantní, kdežto příčná veličina $\rho_{yx}(B)$ vykazuje lineární růst s lineárním růstem velikosti B magnetického pole.



Obr. 2 Ukázka naměřených závislostí elektrických napětí $U_x(B)$ a $U_H(B)$ na přiložené slabé a silné magnetické indukci B ($0 < B < 1$ T a 1 T $< B < 4$ T) pro 2D- mezoskopickou polovodičovou vrstvu GaAs v uspořádání podle obr. 1

Zmíněná metoda měření rezistivit ρ_{xx} a ρ_{yx} je základní způsob objektivního hodnocení kvality přenosu elektronů (elektrických konduktivit, neboli měrných elektrických vodivostí $\gamma_{xx} = 1/\rho_{xx}$ a $\rho_{yx} = 1/\rho_{yx}$) zvláště polovodičových tenkých vrstev ve slabém magnetickém poli. Ten totiž výhodně umožňuje separované zjišťování i příslušných jejich charakteristických veličin $n_s(B)$ a $\mu(B)$ pro jednotlivé parametrické hodnoty B , a to prostřednictvím vztahů (13), (12) a (16) formulovatelných relacemi

$$n_s(B) = \frac{1}{|e|} \left[\frac{d\rho_{yx}(B)}{dB} \right]^{-1} = \frac{I}{|e|} \left[\frac{dU_H(B)}{dB} \right]^{-1}, \quad (17)$$

$$\mu(B) = \frac{1}{|e|n_s(B)\rho_{xx}(B)} = \frac{I l}{|e|n_s(B)U_H(B)d}. \quad (18)$$

Například pro 2D- uspořádání podle obr. 1 a podmínky podle obr. 2 vychází při naměřených elektrických napětích $U_x(B=0) = 0,7$ mV a $U_H(B=1$ T) = 33,3 mV tyto výsledky ($|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C):

$$\rho_{xx} = \frac{U_x d}{I l} \approx 10,43 \Omega, \quad \rho_{yx} = \frac{U_H}{I} = \frac{B}{|e|n_s} \approx 1,306 \cdot 10^3 \Omega, \quad (19)$$

$$n_s = \frac{B}{|e|\rho_{yx}} \approx 4,8 \cdot 10^{15} / \text{m}^2, \quad (20)$$

$$\mu(B) = \frac{1}{|e|n_s\rho_{xx}} \approx 1,25 \cdot 10^2 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}.$$

Z nich jsou též patrné jednotky uvedených veličin, přiměřené využitým 2D- úvahám.

3. KVANTOVÝ SHUBNIKOVŮV – DE HAASŮV MODEL SILNÉ PODÉLNÉ MAGNETOREZISTENCE

Dosavadní zkušenosti ukazují (viz např. [5, 7-15]), že při zde diskutované podélné magnetorezistenci může závislost $\rho_{xx}(B)$ u mezoskopické 2D- vodivé vrstvy vykazovat oscilace, kdežto závislost $\rho_{yx}(B)$ obsahuje horizontální úseky (plata), příslušející minimům funkce $\rho_{xx}(B)$ blízkým nule. Tyto tzv. Shubnikovovy – de Haasovy (SdH) oscilace veličiny $\rho_{xx}(B)$ a příslušné horizontální úseky veličiny $\rho_{yx}(B)$ se nejvýrazněji projevují u polovodičů, zvláště při nízkých absolutních teplotách $T \leq 4$ K a nemusí se vyskytovat při vyšších teplotách $T \geq 77$ K. Jejich vysvětlení poskytuje přiměřený kvantově-mechanický SdH teoretický formalismus (kvantový SdH vodivostní model). Ten je založen na předpokladu, že v silném magnetickém poli o indukci B se původní skoková plošná hustota

$$N_s(W) = \frac{m}{\pi\hbar^2} \sigma(W - W_s) \quad (21)$$

kvantované energie W elektronu o efektivní hmotnosti m v 2D- polovodičové vrstvě, sdružená s dolní hranicí – dnem W_s jejího vodivostního energetického diagramu, přemění (rozštěpí) na oscilační sled (posloupnost) dílčích hustotních stavů $N_s(W, B)$ o vzájemných vzdálenostech $\hbar\omega_c$. Přitom

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{|e|B}{m} \quad (22)$$

je tzv. cyklotronová úhlová frekvence, která přísluší kruhovému pohybu elektronu v předpokládaném kolmém magnetickém statickém poli o indukci $B = B_z$; $\hbar = h/2\pi$ je Diracova konstanta (h reprezentuje Planckovu konstantu).

Při možném zanedbání přidavného Zeemanova spektrálního rozštěpení veličiny $N_s(W, B)$ vlivem magnetické indukce B a rozptylových procesů uvnitř vzorku lze při tomto přiblížení tuto veličinu vystihnout řadou

$$N_s(W, B) \approx \frac{2|e|B}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \delta[W - W_s - (n+0,5)\hbar\omega_c] = N_{\max} \sum_{n=0}^{\infty} \delta(W - W_n), \quad (23)$$

kde

$$N_{\max} = \frac{2|e|B}{h} = \frac{m}{\pi\hbar^2} \hbar\omega_c \quad (24)$$

jsou její maximální hodnoty (vrcholy).

Je vidět, že zatímco v relaci (21) vystupuje jednotková skoková funkce o definici

$$\sigma(W - W_s) = 1 \text{ pro } W > W_s, \\ \sigma(W - W_s) = 0 \text{ pro } W < W_s \quad (25)$$

a o jednotkovém skoku v bodě $W = W_s$, řada (23) obsahuje složkové Diracovy delta funkce

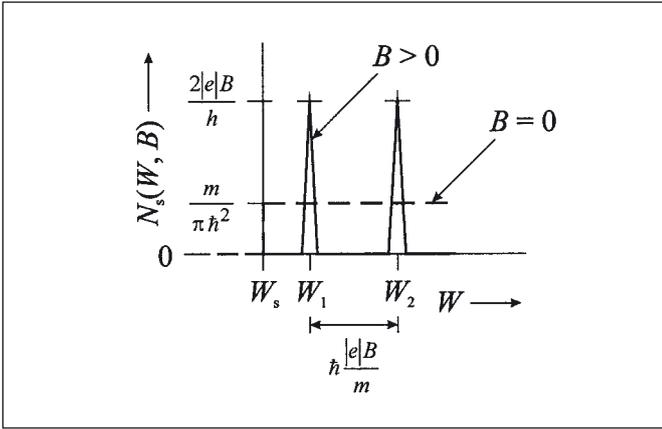
$$\delta[W - W_s - (n+0,5)\hbar\omega_c] = \delta(W - W_n) \quad (26)$$

o teoretickém pořadí (dílčích kvantových číslech) $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$, které přísluší jejím maximům (tzv. Landauovým hladinám) pro energetické hodnoty

$$W_n = W_s + (n+0,5)\hbar\omega_c. \quad (27)$$

Přitom přidavné energie $(n+0,5)\hbar\omega_c$ odpovídají uvažovanému zidealizovanému štěpícímu vlivu přiloženého magnetického pole na veličinu (21), která je vyjádřitelná pomocí jednotky $1/\text{m}^2 \cdot \text{eV}$.

V důsledku kolizních rozptylových procesů v dané 2D- polovodičové vrstvě jsou zmíněné ideální delta pulzy (26) ve skutečnosti rozšířené a konečné parametrické hodnoty B vedou v souladu s výrazem $2|e|B/h$ k příslušným konečným pulzním vrcholům odpovídající reálné posloupnosti $N_s(W, B > 0)$. Příklad dvou takových pulzů ve špičaté aproximaci je v závislosti na energiích $W_1 < W_2$ pro $B > 0$ schematicky znázorněn na obr. 3. Nulové hodnotě $B = 0$ odpovídá skoková nepulzní funkce typu (21).



Obr. 3 Schematické znázornění sledu dvou dílčích elektronových energetických kvantových hustot $N_s(W, B > 0)$ v rozptylující 2D- mezoskopické polovodičové vrstvě, vzniklých rozštěpením původní hustoty $N_s(W, B = 0)$ přiloženým silným magnetickým polem $B > 0$

Je-li v daném 2D- vodivém vzorku známá plošná koncentrace n_s jeho vodivostních elektronů, která například podle publikace [5] splňuje obecný definiční vztah

$$n_s = \frac{m}{\pi\hbar^2} (W_F - W_s),$$

kde W_F je charakteristická Fermiho energie, lze zjistit odpovídající efektivní počet ν_s jimi obsazených Landauových hladin pomocí relace

$$\nu_s = \frac{n_s h}{2|e|B}. \quad (28)$$

Například pro $B = 2\text{ T}$ je $2|e|B/h = 6 \cdot 10^{14}/\text{m}^2$ a pro $n_s = 5 \cdot 10^{15}/\text{m}^2$ vychází $\nu_s = 5,2$. To znamená, že v tomto případě je vodivostními elektrony plně obsazeno pět Landauových hladin, kdežto šestá Landauova hladina je obsazena jen částečně.

Změna velikosti B magnetického pole vede v souladu se vztahem (28) ke změně velikosti veličiny ν_s . Přitom maxima rezistivity $\rho_{xx}(B)$ přísluší polovině sousedních hodnot veličiny (28) [5]. Takže odpovídající hodnoty B_1 a B_2 pro po sobě následující Landauovy vrcholy musí splňovat teoretickou rovnost

$$\Delta\nu_s = \frac{n_s h}{2|e|B_1} - \frac{n_s h}{2|e|B_2} = 1, \quad (29)$$

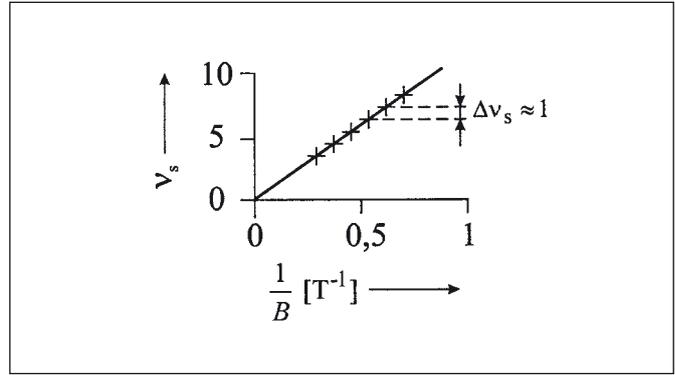
kteří odpovídá přiměřená teoretická hodnota

$$n_s = \frac{2|e|}{h} \frac{\Delta\nu_s}{\frac{1}{B_1} - \frac{1}{B_2}} = \frac{2|e|}{h} \frac{1}{\frac{1}{B_1} - \frac{1}{B_2}}. \quad (30)$$

V praxi lze vybrat mnoho rozdílných hodnot B_1 a B_2 , které přísluší různým pářům po sobě následujících vrcholů, přibližně

poskytující stejné výsledky pro elektronovou koncentraci n_s . Obvyklý postup spočívá v zjištění poloh maxim veličiny $\rho_{xx}(1/B)$ v závislosti na hodnotách $1/B$. Tato maxima by měla ležet na přímce, jejíž sklon udává veličinu n_s . Například pro silné magnetické pole o grafech na obr. 2 a 4 vychází pro Landauovy vrcholy ν_s v bodech $B = 1,3, 1,5, 1,65, 2,1, 2,5, 3,2\text{ T}$ hodnoty $B^{-1} = 0,76, 0,67, 0,60, 0,48, 0,40, 0,31\text{ T}^{-1}$, $\Delta B^{-1} \approx 0,09\text{ T}^{-1}$, $\Delta\nu_s \approx 1$ a

$$n_s = \frac{2|e|}{h} \frac{\Delta\nu_s}{\Delta B^{-1}} \approx 5,3 \cdot 10^{15}/\text{m}^2. \quad (31)$$



Obr. 4 Příklad prakticky lineární závislosti $\nu_s(1/B)$ počtu ν_s obsazených Landauových hladin 2D- mezoskopické polovodičové vrstvy GaAs na reciproké indukci $1/B$ přiloženého silného magnetického pole. Šest reprezentativních hodnot veličiny ν_s je vyznačeno křížky

Přesné kvantové zdůvodnění faktu, že hustota kvantových stavů (21) vykazuje v silném magnetickém poli sled Landauových vrcholů, vyplývá z výpočtu vlastních funkcí a vlastních hodnot příslušné Schrödingerovy rovnice, obsahující vektorový potenciál tohoto pole (viz např. [5]). Jeho základní ideu lze však jednodušeji interpretovat i semiklasicky, a to platným předpokladem, že elektron o hmotnosti m , elektrickém náboji e a postupné rychlosti v vykonává kruhový pohyb o úhlové frekvenci $\omega = 2\pi f$ v pravouhlé souřadné rovině (x, y) , působí-li na něj v kolmém směru z magnetické pole o nenulové indukci $\mathbf{B} = B_z \mathbf{z}$. Z příslušného druhého Newtonova pohybového zákona v Lorentzovském tvaru

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (32)$$

pak plyne, že poloměr r_c tohoto pohybu je přímo úměrný rychlosti v podle vztahů (viz např. [23]):

$$r_c = \frac{v}{\omega_c} = \frac{m}{|e|B} v. \quad (33)$$

kde $\omega_c = |e|B/m$. Z kvantově-mechanického hlediska (viz např. [24]) však obvod $2\pi r_c$ uvažované kruhové dráhy musí být celistvým κ -násobkem de Broglieho vlnové délky $\lambda = h/mv$:

$$2\pi r_c = \kappa \frac{h}{mv}. \quad (34)$$

Odpovídající kinetická energie elektronu $mv^2/2$ může tudíž vykazovat jen diskrétní hodnoty

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{\kappa h \omega_c}{2}. \quad (35)$$

Takže aplikovaný semiklasický přístup vede k relaci

$$W_\kappa = W_s + 0,5\kappa h \omega_c. \quad (36)$$

Tato relace se sice formálně liší od kvantově-mechanické rovnice (27), ale též prakticky potvrzuje existenci štěpení plošné hustoty elektronových kvantových stavů $N_s(W)$ na sled kvantových stavů $N_s(W, B)$ vlivem působící magnetické indukce B , a to v ideálním případě podle vyjádření

$$N_s(W, B) \approx \frac{2|e|B}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \delta(W - W_s - 0,5\kappa\hbar\omega_c) \quad (37)$$

Přitom toto vyjádření souhlasí s řadou (23) pro posunutá kvantová čísla

$$\kappa = 2(n + 0,5). \quad (38)$$

K zjištění nutné velikosti B magnetického pole pro realizaci rozštěpení typu (23) nebo (37) kvantového stavu (21) je třeba splnit podmínku, že před ztrátou hybnosti elektronu vlivem jeho rozptylu musí elektron být schopen zkompletovat několik kruhových drah. To znamená, že musí být splněna nerovnost

$$\frac{1}{\omega_c} \ll \tau_m, \quad (39)$$

neboli

$$\hbar\omega_c \gg \frac{\hbar}{\tau_m}, \quad (40)$$

kde τ_m je již zmíněná relaxační doba hybnosti elektronu. Takže s přihlédnutím k platnosti relací (22) a (3) musí veličina B vyhovovat podmínce

$$B \gg \frac{1}{\mu}. \quad (41)$$

To znamená, že studované SdH oscilace podélné rezistivity $\rho_{xx}(B)$ v uvažované 2D- elektricky vodivé vrstvě, vyplývající ze vzniklých Landauových hladin $N_s(W, B)$, jsou prokazatelné pro silná magnetická pole B daleko větší než je reciproká hodnota její mobility μ . Zkušenosti ukazují, že SdH oscilace veličiny $\rho_{xx}(B)$ bývají viditelné i u menších magnetických polí pro vzorky velké mobility μ . Například pro $\mu = 10^2 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ musí veličina B přesáhnout hodnotu 10^2 T .

V praxi obvykle bývá elektronová koncentrace n_s , zjištěná z SdH dat (30), poněkud menší než je její hodnota n_s vyvozená z relací (17) pro slabé magnetické pole. Tento fakt je důsledkem toho, že tato data obvykle obsahují i vlivy nepřiměřených drah elektronů, unikajících z daného vodivého vzorku. Takové dráhy jsou typicky sdruženy s malými mobilitami elektronů a při neextrémních hodnotách B nemívají pozorovatelný účinek.

4. ZÁVĚR

V tomto článku je pozornost zaměřena k teoretické interpretaci vlivu vnějšího slabého nebo silného homogenního a statického magnetického pole na elektronovou vodivost tenkých mezoskopických kovových a polovodičových vrstev v rámci jejich klasického Drudeho nebo kvantového Shubnikovova – de Haasova teoretického vodivostního modelu a zavedené elektrické rezistivity, mobility, koncentrace a hustoty energetických kvantových stavů vodivostního elektronu ve zvoleném vzorku vrstvy. Prezentované vektorové a maticové relace ukazují, že v rámci platnosti klasického Drudeho modelu slabé elektronové magnetorezistence je příslušná podélná elektrická rezistivita vzorku nezávislá na hodnotách uvažované magnetické indukce, kdežto odpovídající příčná elektrická rezistivita roste lineárně s jejím lineárním růstem. Naproti tomu pre-

zentované kvantové Shubnikovovy – de Haasovy relace, přiměřeně diskutované podélné elektrické rezistivity vzorku při silné magnetorezistenci, vystihují vznik jejích oscilací v závislosti na působící magnetické indukci, které jsou důsledkem magnetického rozštěpení původní hustoty energetických kvantových stavů vzorku.

Článek vznikl v rámci spolupráce na řešení Výzkumného záměru FZÚ AV ČR číslo AVOZ 10100522 a Projektu AV ČR číslo KAN 301 370 701.

Literatura

- [1] Klemperer O., *Electron Physics of the Free Electron*. Butterworths, London 1972.
- [2] Ishimaru A., *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. Academic Press, New York 1978.
- [3] Ando T., Fowler A.B., Stern F., Electronic properties of two-dimensional systems. *Rev. Mod. Phys.*, **54**, 1982, 437.
- [4] Cage E., Dziuba R.F., Field B.F., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-34**, 1985, 301.
- [5] Datta S., *Electronic Transport in Mesoscopic Systems*. Cambridge Univ. Press, Cambridge 2005.
- [6] Pospíšil J., Šafařová K., Kvantové pojetí konfigurace elektronů v mezoskopických polovodičích. *Jemná mech. a optika*, roč. **53**, 2008, č. 6, 172 - 179.
- [7] Peierls R., *Surprises in Theoretical Physics*. Princeton Univ. Press, Princeton 1979.
- [8] Von Klitzing K., Dorda G., Pepper M., *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 1980, 494.
- [9] Halperin B.I., *Phys. Rev. B*, **25**, 1982, 2185.
- [10] Laughlin R.B., *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 1983, 1395.
- [11] MacDonald A.H., Streda P., *Phys. Rev. B*, **29**, 1984, 1616.
- [12] Prange R.E., Girvin S.M. (Eds.), *The Quantum Hall Effect*. Springer-Verlag, New York 1987.
- [13] Chakraborty T., Pietilainen P., *The Fractional Quantum Hall Effect*. Springer-Verlag, Berlin 1988.
- [14] Beenakker C.W.J., Van Houten H., Quantum transport in semiconductor nanostructures. In: Ehrenreich H., Turnbull D. (Eds.), *Solid State Physics*, Academic Press, New York 1991.
- [15] Chakraborty T., The quantum Hall effect. In: Landberg P.T., *Handbook on Semiconductors*, Chap. 19. North-Holland, Amsterdam 1992.
- [16] Grünberg P., Schreiber R., Pang Y., Brodsky M.B., Sowers H., Layered magnetic structures: Evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr interlayers. *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 1986, No. 19, 2442-2445.
- [17] Hinchey L.L., Mills D.L., Magnetic properties of superlattices formed from ferromagnetic and antiferromagnetic materials. *Phys. Rev. B*, **33**, 1986, No. 5, 3329-3343.
- [18] Carbone C., Alvarado S.F., Antiparallel coupling between Fe layers separated by a Cr interlayer: Dependence of the magnetization on the film thickness. *Phys. Rev. B*, **36**, 1987, No. 4, 2433.
- [19] Baibach M. N., Broto J.M., Fert A., Van Dau F.N., Petroff F., Eitenne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J., Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 1988, No. 21, 2472-2475.
- [20] Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W., Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Phys. Rev. B*, **39**, 1989, No. 7, 4828-4830.
- [21] Berkowitz A.E., Mitchell J.R., Crey M.J., Young A.P., Zhang S., Spada F.E., Parker F.T., Hutten A., Thomas G., Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys. *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 1992, No. 25, 3745-3748.
- [22] Xiao J.Q., Jiang J.S., Chien C.L., Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems. *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 1992, No. 25, 3749-3752.
- [23] Fuka J., Havelka B., *Elektrina a magnetismus*. SPN, Praha 1965.
- [24] Formánek J., *Úvod do kvantové teorie*. Části I a II. Academia, Praha 2004.

Prof. RNDr. Ing. Jaroslav Pospíšil, DrSc., katedra experimentální fyziky PřF Univerzity Palackého a Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50a, 772 09 Olomouc, tel.: 585 634 283, e-mail: pospis@prfnw.upol.cz,
RNDr. František Pluháček, Ph.D., katedra optiky a laboratoř kvantové optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Tř. 17. listopadu 50, 772 02 Olomouc, tel.: 585 5634 310, e-mail: pluhacek@prfnw.upol.cz

Provozní nasazení senzorů Optosurf při kontrole funkčnosti povrchů

Metoda rozptýleného světla doplňuje tradiční dotykové metody měření a umožňuje charakterizaci povrchů pomocí jednoduchých parametrů. Vysoká rychlost měření dovoluje 100% kontrolu a ověření funkčnosti všech dílů. Takto lze podstatně lépe charakterizovat např. kluzné plochy.

Klíčová slova: rozptýlené světlo, bezdotyková metoda, funkčnost povrchů, drsnost povrchu

1. ÚVOD

Výroba a zajištění jakosti technických funkčních ploch v automobilové výrobě se stává stále komplexnějším problémem. Příčinou je jednak fakt, že mikrostruktura povrchu vysoce namáhaných ploch je dodatečným obráběním, jako válečkováním, finišováním a lapováním, cíleně modifikována, na druhé straně nemohou být tyto změny textury často dostatečně přesně popsány obvyklými parametry dotykového měření (R_a , R_z , R_k).

Pomocí nové metody měření na principu rozptýleného světla jsou nyní jak vlastní výroba, tak i řízení jakosti způsobitelné (doplňkově k dotykové nebo optické – bezdotykové metodě) zaručit stoprocentní kontrolu funkčních ploch bezprostředně ve výrobním procesu. Při výrobě např. klikových hřídelí je pomocí této metody možné kvantifikovat jakost ložiskových sedel.

2. DRSNOST POPISUJE FUNKČNOST POVRCHU

Je-li k popisu funkční plochy jako určující parametr vzata drsnost, je nutné přihlédnout k faktu, že všechny parametry jsou vztaženy na kolmé hodnoty (výška, hloubka). Tyto reprezentují pouze jednorozměrnou hodnotu (výškovou koordinátu a z ní vypočítanou hodnotu drsnosti) pro třírozměrnou topografii povrchu (viz. obr. 1). U ložiskových sedel klikových a vačkových hřídelí zajišťují zobrazené plošky dobrý kontakt, na druhé straně se ve „chtěných“ vrypech (spodní graf) schraňuje dostatek oleje na to, aby ani při vysokých otáčkách nedošlo k odtržení potřebného olejového filmu. Tyto vlastnosti výše zobrazený otevřený profil nevykazuje.

Čistě vertikální parametr R_z nelze v tomto případě k popisu kluzných vlastností tohoto povrchu použít. Jiné parametry, jako např. R_m nebo R_k mohou sice tyto rozdílné typy profilů lépe popsat, v hraničních případech však také nejsou schopny spolehlivě rozlišit určitou strukturu profilu od druhé. Příčinou toho všeho je

dnes běžná praxe, že k charakterizaci celé plochy slouží pouze velmi malý profil sejmутý diamantovým hrotem snímací jehly. V hraničních oblastech výrobních tolerancí tak nemohou být spolehlivě rozlišeny plochy s různou technologií opracování.

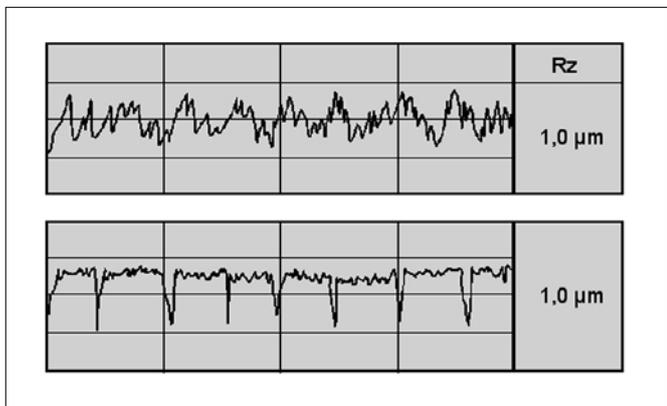
Výsledkem procesu broušení je struktura vrypů s profilovými špičkami, následný proces finišování tyto špičky částečně odstraní. Podobně jako při válečkování nebo superfinišování jsou povrchy modifikovány do té míry, že se jejich funkční vlastnosti výrazně zlepší. Ve výrobě motorů má tato modifikace povrchu velký význam. Klikové nebo vačkové hřídele bývají finišovány, aby se výrazně zlepšilo jak jejich chování při záběhu motoru, tak i tribologické vlastnosti (tření, opotřebení).

Pro řízení jakosti je velmi důležité nejen měření hloubky drsnosti povrchu, ale i schopnost analýzou profilu rozlišit jednotlivé způsoby opracování. Bude-li např. kliková hřídel s otevřeným profilem (obr. 1, stejná hodnota R_z u horního i spodního profilu) namontována do motoru, je podstatně vyšší pravděpodobnost jejího předčasného opotřebení. Je tedy velmi žádoucí, aby kromě vertikálního parametru R_z byla možnost vyhodnocení charakteristického tvaru profilu po finišování, a to dle možností pro 100 % všech dílů. Měření dotykovými profilometry je pro tuto úlohu značně pomalé a v hraniční oblasti nedostatečně přesné.

3. METODA ROZPTÝLENÉHO SVĚTLA PRO HODNOCENÍ LOŽISKOVÉ PLOCHY KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ

Metoda rozptýleného světla byla dosud používána výhradně pro rozměry v řádu nanometrů. Měření povrchu pomocí rozptýleného světla systémem QS 500, nedávno uvedeného na trh firmou OptoSurf, je vhodná pro střední rozsah drsnosti ($0,01 < R_a < 1 \mu\text{m}$) a vyhodnocuje spolehlivě rozdíly v hloubce drsnosti, texturu ve směru opracování a tvar profilu. Kontrolovaný povrch je skenován světelným paprskem o průměru stopy 0,9 mm a odražené světlo je snímáno detektorem. Hodnota rozptýlení je statisticky vyhodnocena a vypočítán optický parametr drsnosti S_o , který odpovídá přibližně parametru úhlu profilu R_dq , který vyhodnocuje jak vertikální, tak horizontální souřadnici profilu. Rychlost měření je vysoká (více než 1000 měření drsnosti za sekundu), senzor spolehlivě pracuje i za velmi drsných podmínek. Mohou být měřeny nejen všechny jednotlivé díly, nýbrž i veškeré funkční plochy na jednotlivém dílu. Parametr S_o je nezávislý na odrazivosti plochy, tmavé (kalené) plochy mají stejnou hodnotu drsnosti jako plochy světlé (nekalené). Další výhodou tohoto senzoru je necitlivost na vibrace. Vzdálenost senzoru od měřené plochy se může měnit až o 1 mm bez jakéhokoliv vlivu na hodnotu parametru S_o .

Následující hodnoty jsou výsledkem měření u Škoda Auto Mladá Boleslav (obr. 2). Senzor byl testován ve výrobě na různých dílech motoru (kliková a vačková hřídel). Snímání je dynamické, hřídel se otáčí, senzor samočinně zaregistruje správnou pozici pro měření (světelný paprsek musí dopadat kolmo na plochu) a následně zaznamená platné hodnoty měření.

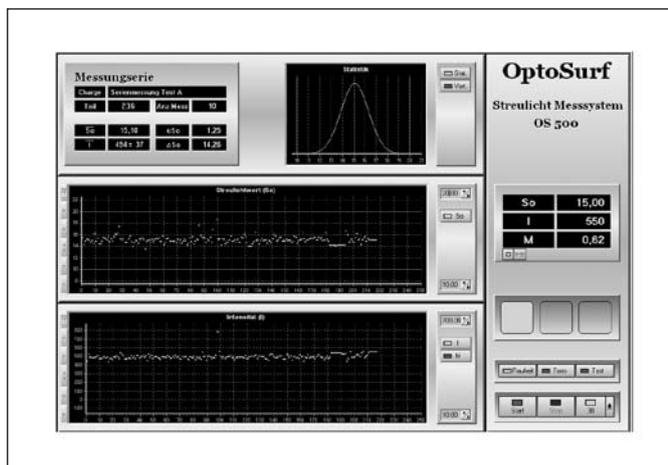


Obr. 1 Profily měřené dotykovým profilometrem se stejnou hodnotou R_z , ale rozdílnou funkčností. Otevřený profil nahoře je výrazně méně vhodný pro kluzné ložisko než spodní uzavřený profil



Obr. 2 Měření klikového hřídele systémem OptoSurf QS 500

V průběhu zkoušek bylo změřeno přibližně 160 broušených a finišovaných klikových hřídelí, nejdříve klasickým dotykovým způsobem a poté měřicím systémem OptoSurf QS 500. První měření proběhlo na plochách očištěných od oleje, druhé bylo opakováno bez očištění. Měřením se ukázalo, že systém je schopen jednoznač-



Obr. 5 Zobrazení naměřených hodnot

ně rozlišit díly finišované od broušených (obr. 3 a 4 - viz 3. str. obálky). U dotykového způsobu měření existuje oblast překrývání, kde se finišované díly od broušených nedají jednoznačně odlišit (bílé plochy). Vyhodnocení s přihlédnutím k parametru Rk bylo sice lepší, stále však ještě existovaly oblasti překrývání, kdy se oba procesy nedaly od sebe odlišit.

Měření provedená v druhém kroku ukázala, že ani olejový film na ploše nemá zásadní vliv na rozlišovací schopnost senzoru. Hodnota parametru So se pouze posunula směrem k vyšším hodnotám o cca 15 %.

Na základě výsledků zkoušek lze konstatovat, že použití metody rozptýleného světla přináší velké výhody při kontrole jakosti ve výrobě motorů. Důležité funkční plochy mohou být stoprocentně kontrolovány a optický parametr So (v průběhu roku 2008 bude zaveden do DIN norem jako Aq) je schopen jednoznačně rozlišovat různé způsoby opracování lépe než veškeré dosavadní parametry dotykového způsobu kontroly povrchu. Robustní provedení senzoru dovoluje jeho nasazení bezprostředně ve výrobním procesu.

4. SOFTWARE PRO KONTROLU VÝROBNÍHO PROCESU

Senzor je řízen softwarem ke sběru dat, který ukládá naměřené hodnoty do SQL datové banky (obr. 5). Vymezením hraničních hodnot může být dosaženo plně automatizované kontroly s tím, že díly, které přesáhnou hraniční hodnoty, jsou automaticky vyřazeny. Pomocí statistických funkcí jsou z jednotlivých naměřených hodnot vyhodnoceny střední hodnota, standardní a maximální odchylka. Kromě toho je vedena statistika všech nástrojů pro výrobní šarži, čímž je možné zdokumentovat průběh výrobního procesu.

Senzor na rozptýlené světlo jako in-line měřicí systém kontroluje výrobní proces a dodává průběžná data o stavu výrobního stroje. To umožňuje závčas rozeznat chyby výrobního procesu (výpadek chlazení, poškození ložisek, opotřebení nástroje apod.), ale i zaznamenat údaje o kvalitě produkce v dlouhém časovém úseku.

5. ZÁVĚR

V současné době probíhají zkoušky použitelnosti systému OptoSurf ke kontrole celé řady dalších součástí – dílů valivých ložisek, pístnic atd. V České republice koordinuje tyto akce MESING, spol. s r.o., která bude zajišťovat i vlastní realizaci (měřidla, stanice, automaty). Se systémem OptoSurf a jednou z jeho novějších aplikací budou mít možnost zájemci se seznámit i v expozici MESING na MSV Brno 2008.

Recenzent: Ing. Jan Kůr

Milí čtenáři a obchodní přátelé,

rádi Vás přivítáme na letošním jubilejním 50. mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně ve dnech 15. - 19. září 2008. Najdete nás v pavilonu A2, stánek 47.

Dr. Reiner Brodmann, Dr. Boris Brodmann, Ing. Petr Kracík, OptoSurf Nobelstrasse 9-13, D-76275 Ettlingen, tel.: +497 243 766 013, e-mail: r.brodmann@optosurf.com

Ing. Karel Tlášek, Škoda Auto, a.s., Tř. V. Klimenta 869, 293 60 Mladá Boleslav, tel.: +420 326 814 105, e-mail: karel.tlasek@skoda-auto.cz

Ing. Daniel Smutný, Mesing, spol. s r. o., Mariánské nám. 1, 617 00 Brno, tel.: +420 545 426 217, e-mail: daniel.smutny@mesing.cz

Radiometry a fotometry

Není to tak dávno, co jsem psal článek o fotometrech [12], které jsme ve Vývojové optické dílně AV ČR děle než deset let vyvíjeli i vyráběli. Výhrady oponenta k některým termínům mne postupně vedly dál do terminologie a musel jsem nakonec svůj článek podstatně zkorigovat. Tak jsem časem dospěl přes internet i k článku profesora Jamese M. Palmera o fotometrii a radiometrii. Tento článek mne velmi zaujal. Jednak jsem svoji terminologii na jeho základě změnil, takže fotometry jsem přejmenoval na radiometry (ještě později jsem radiometry zkusmo nahradil názvem fotonometry, viz závěr tohoto článku), jednak jsem došel k závěru, že nebudu sám, kdo v tomto oboru tápal anebo tápe, a že snad bude i pro českou technickou a vědeckou společnost užitečné se nad používanou terminologií zamyslet a snažit se ji postupně sjednotit. Článek prof. J. M. Palmera obsahuje řadu dalších zajímavých informací, které mohou být i pro naše odborníky v dotčených praktických oborech velmi užitečné. Proto jsem se zde pokusil o co možno nejsrozumitelnější překlad jeho základních tezí.

Radiometrie a fotometrie

jsou příkladem oborů, kde slova mají rozhodující význam. V běžně používaných termínech pro fotometrii a radiometrii je však mnoho matoucích informací a koncepčních nejasností, o čemž je možné se přesvědčit jak na běžných webových stránkách, tak i ve fundovanějších odborných textech.

Radiometrie je měření optického záření, což je elektromagnetické záření s frekvencemi v rozsahu 3×10^{11} až 3×10^{16} Hz. Tento rozsah frekvencí odpovídá vlnovým délkám od 0,01 do 1000 mikrometrů a obsahuje obory záření obvykle nazývané jako ultrafialové, viditelné a infračervené záření. Dvě z typických jednotek, s nimiž se zde budeme určitě setkávat, jsou W/m^2 a fotony/sec-steradián (h/s.sr v soustavě SI).

Fotometrie je měření světla, které je definováno jako elektromagnetické záření pozorovatelné lidským okem. Tím je omezeno na vlnové délky od 360 nm do 830 nm (tak je to uvedeno v definicích a normách - průměrné lidské oko je však schopné rozlišit světlo jen od cca 400 nm do 750 nm). Fotometrie je tedy obdobou radiometrie, ale s tou výjimkou, že vše je převažováno spektrální citlivostí lidského oka.

Vizuální fotometrie používala oka jako srovnávacího detektoru. Fyzikální fotometrie používá senzory optické radiace, jejichž spektrální citlivost je uměle korigována podle spektrální citlivosti lidského oka. Typickými fotometrickými jednotkami jsou lumény, luxy, candely a spousta dalších zvláštních až bizarních jednotek, jejichž používání je vysloveně konvenční a často až matoucí a zavádějící.

Jediným podstatným rozdílem mezi radiometrií a fotometrií je fakt, že zatímco radiometrie zkoumá celé spektrum optické radiace, fotometrie se omezuje na viditelné spektrum tak, jak je definováno citlivostí lidského oka. Můžeme říct, že fotometrie je složitější na pochopení, předně už kvůli složitě až tajemné terminologii, na druhé straně je lépe realizovatelná, protože se omezuje na poměrně úzký spektrální rozsah. Naproti tomu je radiometrie jednoduše pochopitelná, ale o to složitěji se realizují její měřicí metody.

Veličiny a jednotky používané v radiometrii

Radiometrické veličiny mohou být rozděleny do dvou koncepčních oborů - ty, které vyjadřují výkon nebo energii a ty, které jsou spojeny s geometrií.

Energie je v soustavě SI odvozená veličina, měřená je jednotkou joule [J]. Doporučený symbol pro energii je Q .

Výkon je další odvozená veličina, je to změna (derivace) energie vzhledem k času, dQ/dt , jednotkou výkonu je watt [W]. Doporučeným symbolem pro výkon je Φ , používá se i písmeno P .

Energie je integrálem výkonu v průběhu času, jako taková je používána např. u integračních senzorů pro pulsní zdroje. Výkon je používán k vyjádření intenzity kontinuálních zdrojů.

Nyní se můžeme vrátit ke spojení výkonu a geometrických veličin.

Ozáření (Irradiance), též hustota toku (flux density), je další odvozenou veličinou soustavy SI. Je to výkon dopadající na jednotkovou plochu ze všech směrů z jednotkové polokoule směrem k ploše, která koinciduje s její základnou. Symbol pro ozáření je E a jednotkou je W/m^2 .

Radiační excitace (Radiant excitance), obdoba ozáření, je výkon, který z této plochy vystupuje. Symbol pro radiační excitaci je M a jednotkou je W/m^2 .

Ozáření, resp. radiační excitace, je derivací výkonu vzhledem k určité ploše, $d\Phi/dA$. Integrálem ozáření, resp. excitace přes plochu, je výkon.

Radiační intenzita (Radiant intensity) je další odvozenou veličinou soustavy SI. Její jednotkou je W/sr . Používaným symbolem je I . Tato intenzita je derivací výkonu s ohledem na prostorový úhel, $d\Phi/d\omega$. Integrálem intenzity přes prostorový úhel je výkon.

Zářivost (Radiance) je poslední odvozenou veličinou pro radiometrii v soustavě SI. Její jednotkou je $W.m^{-2}.sr$. Je to výkon přes projekční plochu ve vymezeném prostorovém úhlu. Používaným symbolem je L . Zářivost je derivace výkonu s ohledem na projekční plochu a prostorový úhel, $d\Phi/d\omega dA \cos(\theta)$, kde θ je úhel mezi normálou plochy (kolmicí k ploše) a určeným směrem. Integrálem zářivosti přes plochu a prostorový úhel je výkon.

Velkým problémem vyžadujícím řadu dohod je používání či nepoužívání termínu **intenzita**. Někdo jej používá pro W/sr , někdo jej používá pro W/m^2 a další jej používají pro $W.m^{-2}.sr$. V soustavě SI je to však jasně definováno, a to v definici základní jednotky zářivé intenzity, tj. candely. Některé pokusy o alternativní definice s použitím přídavných slov jako „prostorová“ (field) nebo „optická“ (pro W/m^2) nebo „specifická“ (používaná pro $W.m^{-2}.sr$) však přidávají jenom na nedorozuměních. Základním konceptem je zde veličina na jednotkový prostorový úhel (W/sr). Je to však složitější problém přesahující rozsah tohoto článku a je řešen např. v [10].

Fotonová kvanta jsou základem pro všechny úvahy a řešení. S radiometrickými jednotkami jsou fotony spojeny vztahem $Q_p = hc/\lambda$, kde Q_p je energie fotonu s vlnovou délkou λ , h je Planckova konstanta a c je rychlost světla. Např. pro vlnovou délku 1 μm energii 1 J (= Ws) odpovídá množství 5×10^{18} fotonů. Opačně, pro 1 μm , 1 foton má energii 2×10^{-19} J.

Pro fotonové záření lze obecně použít všechny časoprostorové jednotky soustavy SI ($s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$).

Veličiny používané ve fotometrii

V podstatě jsou to tytéž veličiny, které jsme probírali v radiometrii, s tou výjimkou, že jsou korigovány v souladu se spektrální citlivostí lidského oka a mají většinou velmi zvláštní jména. Používané symboly jsou identické se symboly používanými v radiometrii, s tím rozdílem, že jsou doplněny indexem „v“ zdůrazňujícím jejich vizuální význam. V tabulce 1 jsou fotometrické veličiny a jednotky uvedeny komparačně s radiometrickými.

Tabulka 1

Veličina	Radiometrie	Fotometrie
výkon (tok)	watt [W]	lumen [lm]
výkon (tok) přes jednotku plochy	W/m ²	lm/m ² = lux [lx]
výkon (tok) přes jednotku prostorového úhlu	W/sr	lm/sr = candela [cd]
výkon (tok) přes jednotku plochy omezenou jednotkovým prostorovým úhlem	W.m ⁻² .sr	lm.m ⁻² .sr = cd/m ² = nit

Nyní se můžeme na rozdíly a definice podívat podrobněji.

Světelná intenzita

Symbolem světelné intenzity je I_v , jednotkou je candela, značí se cd.

Candela je vedena jako základní jednotka soustavy SI. Je určena následující definicí:

Candela je světelná intenzita, v daném směru, ze zdroje, který emituje monochromatické záření o frekvenci 540×10^{12} Hz, a který má v daném směru zářivou intenzitu $1/683$ W v jednotkovém prostorovém úhlu (steradiánu).

Candela byla dříve definována jako světelná intenzita vyzářovaná v kolmém směru z plochy o velikosti $1/600\,000$ m² z černého tělesa při teplotě tuhnutí platiny pod tlakem $101\,325$ Pa (N/m²). Tato definice byla prvně přijata v roce 1946 a byla později modifikována 13. CGPM v roce 1967.

Plocha $1/600\,000$ m² byla zvolena pro zachování návaznosti nové definované jednotky na předchozí standardy.

V roce 1979 byla tato definice zrušena a nahrazena již výše uvedenou definicí. Hodnota 683 lm/W byla pro novou definici zvolena na základě nejlepší měřitelnosti pro černé těleso realizované s tuhnutí platinou (chyba při určení jednotky černým tělesem se pohybovala od 620 do 700 lm/W, v závislosti na stanovení teploty bodu tuhnutí platiny).

Tato nová definice musela být přijata z několika důvodů. Bod tuhnutí platiny (≈ 2042 K) je svázán s jinou základní jednotkou soustavy SI pro teplotu, kelvinem a přesné určení této teploty má podstatný vliv na hodnotu candely a zvyšuje tak její neurčitost. Dále, realizace černého tělesa potřebných parametrů byla natolik obtížná, že zde bylo fakticky jen několik pokusů o jeho realizaci. Jestliže by skutečná teplota byla mírně mimo očekávanou hodnotu, bod tuhnutí nebude konstantní a teplota zářivé komory bude rovněž mimo (relativní spektrální vyzářování z černého tělesa se mění ve viditelném oboru až o tři řády).

Vývoj nových možností pro stanovení jednotky candela proto vedl k mnohem snadněji realizovatelným standardům.

Všimněte si, že ani starší, ani nová definice nejsou nijak spojeny s citlivostí lidského oka. Budeme se zabývat fotometrickými jednotkami, které tuto citlivost respektují, ale základní jednotka soustavy SI candela je na ní nezávislá.

Všimneme si dále, že v definici jednotky není žádná zmínka o prostorovém rozložení definované intenzity. Světelná intenzita, často spojovaná s izotropním bodovým zdrojem, je tedy platnou specifikací i při charakterizování vysoce směrových světelných zdrojů, jakými jsou např. reflektory a LED diody.

Ačkoli candela je zařazena mezi základní jednotky soustavy SI, není na nich podle nové definice nezávislá, protože je definována přes odvozenou jednotku této soustavy, a tou je watt. Není zde ani důvod ji mezi tyto základní jednotky SI řadit a zůstává zde pouze z důvodů historických a kontinuálních, i když by de facto měla být zařazena mezi jednotky v soustavě SI odvozené.

Světelný tok

Lumen je odvozená jednotka soustavy SI pro světelný tok. Použitá zkratka je lm a používaným symbolem je zde Φ_v . Lumen je odvozen z candely a je to světelný tok, který emituje izotropní světelný zdroj se světelnou intenzitou 1 cd do prostorového úhlu 1 sr. Lumen je tedy stanoven jako součin světelné intenzity a prostorového úhlu, tj. $cd \times sr$. Tato jednotka je analogická k jednotce pro radiační tok, od níž se liší jen vahou v intenzitě měřeno senzitivitou lidského oka. Je-li světelný zdroj izotropní, je vztah mezi lumeny a candelou jednoduše určený rovnicí $1\text{ cd} = 4\pi\text{ lm}$. Jinak řečeno, izotropní zdroj se světelnou intenzitou 1 cd emituje do celého prostoru světelný tok 4π lm, kde celý prostor má prostorový úhel právě 4π steradiánů. Totéž bude platit i při jiném jednoduchém zápisu $1\text{ cd} = 1\text{ lm/sr}$ analogicky k ekvivalentní radiometrické definici.

Jestliže zdroj není izotropní, vztah mezi candelou a lumenem může být většinou pouze empirický. K základním metodám pro určení celkového světelného toku ze zdroje patřilo měření světelné intenzity v mnoha směrech za použití goniofotometru a posléze numerická integrace přes celou sféru. Mezi novější metody patří komparační měření za použití „kalibrovaných“ lamp co by reference v integrační kouli, kterážto metoda umožňuje téměř rutinní měření celkové světelné intenzity.

Lumeny jsou jednotkou, která určuje kvalitu žárovek, když je půjdeme kupovat do obchodu. Požadujeme maximum lumenů při minimálním příkonu a odpovídající životnosti. I projekční přístroje jsou charakterizovány lumeny určujícími hustotu světelného toku směřujícího k projekční ploše.

Osvětlení je další odvozenou veličinou v SI, která se váže k hustotě světelného toku. Má pro jednotku speciální jméno **lux** a její rozměr určuje světelný tok 1 lm dopadající na plochu čtverečního metru, tj. lm/m^2 . Používaným symbolem je E_v . Většina měřičů světla měří právě tuto veličinu, protože má v osvětlovací technice velkou důležitost. Typické hodnoty jsou od 20 lx pro osvětlení nemocničních chodeb v noci až $100\,000$ lx na plném slunci.

Svitivost by pravděpodobně měla být přidána mezi odvozené veličiny soustavy SI, ale není tam. Je analogií k zářivosti, odlišuje se od lumenu vazbou na plochu a směr. Má rovněž speciální jméno pro jednotku, **nit**, a ta je definována buď jako cd/m^2 nebo jako $lm.m^{-2}.sr$, což je totéž. Používaným symbolem je L_v . Je nejčastěji používána jako charakteristika jasnosti určité emitující nebo odrážející plochy. Typickým příkladem je svitivost televizních nebo počítačových obrazovek. Ty mají svitivost mezi 100 až 250 nt. Sluncem osvětlená reflektující plocha může mít více než 1000 nt.

Existuje celá řada dalších fotometrických jednotek, které se dosud používají zejména v angloamerické literatuře, kde se můžeme setkat s modifikací výše popsaných jednotek s jednotkami délek ve stopách a pod. Jedná se však již vesměs o zastaralou terminologii, kterou se zde nebudeme zabývat.

Spektrálně závislé veličiny

Záření z většiny zdrojů je spektrálně rozložitelné, ale záření samo nenese žádnou bezprostřední informaci o svém spektrálním rozložení. Spektrálně závislé veličiny, jako např. výkon, jsou definovány jako podíl z měřené veličiny a určeného rozsahu vlnových délek. Jinými slovy, spektrálně závislé veličiny jsou odvozené veličiny dělené vlnovou délkou a tu mají i ve svém rozměru (λ^{-1}).

Jejich integrací přes určený rozsah vlnových délek dostaneme jejich celkovou hodnotu. Tyto spektrálně závislé veličiny se proto používají s indexem vlnové délky, jako např. L_λ , E_λ , Φ a I_λ .

Některé další veličiny (jako například propustnost, odraz, odezva atd.) se mění s vlnovou délkou, ale nejsou od ní odvozené, proto je nemá smysl přes vlnovou délku integrovat. Jinak jsou vlnovou délkou jednoznačně určené, např. $\rho(\lambda)$ nebo $\tau(\lambda)$.

Konverze radiometrických a fotometrických veličin

Z definice candely víme, že 1 cd dává 683 lm na 1 W při kmitočtu 540 THz, což odpovídá vlnové délce 555 nm (ve vakuu nebo ve vzduchu). Je to vlnová délka, která odpovídá maximální citlivosti lidského oka. Konverze z wattů na lumeny při jakékoli jiné vlnové délce vede přes přepočtení výkonu ve wattech podle křivek $V(\lambda)$ resp. $V'(\lambda)$, které Mezinárodní komise pro míry a váhy (CGPM) schválila pro určování fotometrických veličin světelných zdrojů.

Pro obecný převod světelného toku z monochromatického zdroje musíme znát spektrum zdroje a použít rovnici

$$X_v = K_m \int_0^\infty X_\lambda V(\lambda) d\lambda,$$

kde X_v je světelná veličina, $V(\lambda)$ je fotopická (nebo scotopická) spektrální účinnostní funkce a X_λ je odpovídající radiační veličina. Za X_v a X_λ můžeme dosazovat světelný tok [lm] a spektrální výkon [W/nm], světelnou intenzitu [cd] a spektrální radiační intenzitu [W.sr⁻¹/nm], osvětlení [lx] a spektrální ozáření [W.m⁻²/nm], nebo svítivost [cd/m²] a spektrální zářivost [W.m⁻².sr⁻¹/nm].

Tato rovnice reprezentuje vážení, vizuální odezvy v dané vlnové délce na radiační veličinu v téže vlnové délce. Konstanta K_m je převodní faktor, a sice maximum spektrální světelné účinnosti pro fotopické vidění, 683 l_m/W (případně $K'_m = 1700$ lm/W pro scotopické vidění).

Pro větší intenzity použijeme křivku $V(\lambda)$ pro citlivost oka za denního světla (fotopické - čípkové - vidění), pro malé intenzity použijeme křivku $V'(\lambda)$ pro citlivost oka ve tmě (scotopické - tyčinkové - vidění). Scotopická křivka má svoji vlastní konstantu K'_m , maximum spektrální světelné účinnosti nastává zde při 507 nm a tato hodnota byla zvolena tak, aby korespondovala s fotopickou křivkou na vlnové délce 555 nm, po přepočtu z hodnoty 683 lm/W.

Při výpočtu celkové hodnoty vzhledem k vlastnostem křivky $V(\lambda)$ stačí, když provedeme integraci od 360 nm do 830 nm, hranice jsou vzaty z tabulky CIE pro $V(\lambda)$. A jelikož funkce $V(\lambda)$ je definována tabulkou empirických hodnot, je nejlepší tuto integraci provádět numericky.

Jako aproximaci lze použít Gaussovu křivku. Pokud ji porovnáme s tabelovanými daty pro záření černého tělesa, zjistíme, že rozdíl bude menší než 1% mezi teplotami 1500 K až 20000 K. Tento výsledek je přijatelný pro hladké křivky, ale nelze jej použít pro úzkopásmové zdroje, jakými jsou např. LED diody.

Jako příklad převodu pro monochromatický zdroj můžeme použít laserová ukazovátka pro vlnové délky 635 nm a 670 nm:

Při 635 nm je $V(\lambda) = 0,217$ a pokud laser má výkon 5 mW, pak dává světelný tok $0,005\text{ W} \times 0,217 \times 683 \text{ lm/W} = 0,74 \text{ lm}$.

Při 670 nm to bude jen $0,005 \text{ W} \times 0,032 \times 683 \text{ lm/W} = 0,11 \text{ lm}$. Proto laserové ukazovátka s 635 nm vytvoří stopu cca 7krát jasnější než totéž ukazovátka s vlnovou délkou 670 nm a stejným výkonem v mW (za předpokladu stejného průměru osvětlené stopy).

Nyní se ještě podíváme na konverzi lumenů na waty. Jak jsme viděli, potřebujeme k tomu funkci obdobnou té, kterou jsme uvedli pro konverzi z radiometrických veličin na fotometrické. K tomu opět můžeme použít křivku $V(\lambda)$ (nebo $V'(\lambda)$) v limitech 360 až 830 nm, kde je nenulová. Správný výpočet je však mnohem obtížnější jednak vzhledem k nízkým hodnotám této křivky v okolí mezí pro vlnové délky, jednak se budeme snažit převést zpět veličinu, která byla převážena a zintegrována do konstanty. Dále, nestačí znát jenom spektrální křivku zdroje v limitech křivky $V(\lambda)$, ale musíme jí znát v celém oboru vlnových délek, které zdroj emituje. K tomu je potřeba použít jistě předpoklady, jejichž vysvětlení přesahuje rozsah tohoto článku.

ZÁVĚR

V některých případech je velmi obtížné pro určité modifikace čehokoli zvolit a používat tu nejsprávnější terminologii. Uvedu zde příklad běžně používaného přístroje, jakým je **fotometr** (?) pro napařovačky na nepřímé měření tloušťky napařované vrstvy. Jak jsem uvedl s otazníkem, tento přístroj se běžně nazývá fotometrem. Jak jsme však zjistili, ve skutečnosti to fotometr není.

Fotometry jsou podle správné terminologie přístroje, které měří lumeny, luxy a nebo nitě, možná candely, prakticky se vyrábějí jedině luxmetry, ostatní fotometrické veličiny se pak vypočítávají (velmi složitě a těžce) ze změřeného osvětlení. Takže, i když jsme zatím u napařovaček vždycky mluvili o fotometru, měřili jsme, málo platně - radiometrem. Pojem „radiometr“ je však v češtině a slovenštině silně svázán s pojmem radiace ve smyslu radioaktivity anebo rádiových vln, a proto ani název radiometr, i když terminologicky je jistě formálně správný, se českému uchu nezdá být tím pravým. Když jsem při jednom seřizování fotometru u napařovačky doslova „lovil“ nějaké fotony, napadlo mne, že by se pro tyto a podobné přístroje mohl ujmout název, který by jistě obstál i v českém pravopisu, a je formálně správný a výstižný - **fotonometr**. A snadný bude i jeho překlad do jiných jazyků - příklad - photonometer, kde už se tento název rovněž občas objevuje. A od té doby tento název běžně používám. Tak uvidíme, jestli se alespoň u nás ujme.

Jinou možností by byla náhrada pojmu fotometr českým ekvivalentem **světloměr** (obdoba anglického a často používaného **lightmeter**). Obávám se však, že při naší cestě do Evropy se takový název jen stěží ujme, byť je zcela logický a česko-slovensky správný. Ale co kdyby ...

Tento článek vznikl v rámci projektu cíleného výzkumu AV ČR ISQ 1008 20502.

Literatura

- [1] „The International System of Units (SI).“ 7th edition (1998), BIPM. Originál dokumentace je ve francouzštině, překlad do angličtiny je na adrese: http://www.bipm.fr/enus/6_publications/si/si-brochure.html
- [2] NIST Special Publication SP330 „The International System of Units (SI)“, je US edice dokumentů BIPM
- [3] NIST Special Publication SP81 „Guide for the Use of the International System of Units (SI)“, <http://physics.nist.gov/Document/sp811.pdf>
- [4] DeCusatis, C., „Handbook of Applied Photometry.“ AIP Press (1997), s kapitolami technických expertů BIPM, CIE and NIST
- [5] Rea, M., ed. „Lighting Handbook: Reference and Application“, 8th edition, Illuminating Engineering Society of North America (1993), <http://www.iesna.org/>
- [6] „The Basis of Physical Photometry“ CIE Technical Report 18.2 (1983), <http://www.cie.co.at/cie/>
- [7] „Symbols, Units and Nomenclature in Physics“ International Union of Pure and Applied Physics (1987)
- [8] „American National Standard Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering“ ANSI Standard ANSI/IESNA RP-16 96 (1996), <http://www.iesna.org/>
- [9] James M. Palmer, „Radiometry vers. photometry FAQ“, <http://www.optics.arizona.edu/Palmer/rpfaq/tpfaq.htm>
- [10] James M. Palmer, „Getting Intense on Intensity“ for Metrologia (official journal of the BIPM) and a letter to OSA's „Optics and Photonics News“
- [11] James M. Palmer, „Tentative table of contents for forthcoming book The Art of Radiometry“, <http://www.optics.arizona.edu/Palmer/artradjp.html>
- [12] Pavel Oupický: „Spektrální radiometry pro měření světelných podmínek pro růst rostlin“, JMO 10/2006

Užitečné webové adresy

BIPM (Int. Bureau of Weights & Measures)

<http://www.bipm.fr>

NIST (Nat'l Inst. of Standards & Technology)

<http://physics.nist.gov/cuu/>

ISO (International Standards Organization)

<http://www.iso.ch/>

ANSI (American Nat'l Standards Institute)

<http://www.ansi.org/>

CIE (International Commission on Illumination)

<http://www.cie.co.at/cie/>

IESNA (Illum. Eng. Society of N. America)

<http://www.iesna.org/>

IUPAP (Int. Union of Pure & Applied Physics)

<http://www.physics.umanitoba.ca/IUPAP/IUPAP.html>

CVL (Color Vision Lab at UCSD)

<http://cvision.ucsd.edu/index.htm>

AIP (American Institute of Physics)

<http://www.aip.org/>

SPIE - International Society for Opt. Eng

<http://www.spie.org/>

OSA (Optical Society of America)

<http://www.osa.org/>

Poznámka: Redakce časopisu JMO předkládá čtenářům tento zajímavý článek k diskusi.

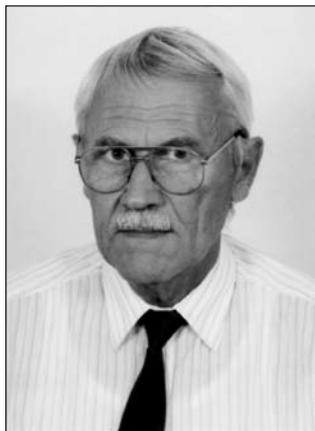
Ing. Pavel Oupický, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., oddělení Optické diagnostiky, Skálava 89, 511 01 Turnov, tel.: 481 549 442, fax: 481 322 913, e-mail: oupicky@ipp.cas.cz, web: www.optikavod.cz nebo www.ipp.cas.cz

Ing. Igor BREZINA sedemdesiatnikom

Popredný slovenský metroológ I. Brezina, člen red. rady JMO od r. 1990, sa dožil 11. 6. 2008 okrúhleho jubilea. Po stredoškolských štúdiách v Trnave (maturoval v r. 1955) pokračoval na SVŠT v Bratislave, kde absolvoval v r. 1960 štúdium geodézie. Následne pracoval v geodetickej praxi pri náročných astronomickogeodetických meraniach, ako aj pri kalibrácii teodolitov.

V r. 1962 prešiel na základe konkurzu na Ústav teórie merania SAV v Bratislave, kde sa výskumne venoval problematike teórie chýb meraní, matematickou štatistikou a kalibráciou meradiel. Súčasne absolvoval v r. 1965 štúdium vybraných disciplín aplikovanej matematiky na Prírodoved. fak. Univerzity Komenského v Bratislave. Rok 1967 znamenal v odbornej dráhe jubilanta význačnú zmenu: nastúpil na novovytvorený Čs. metrologický ústav v Bratislave, kde postupne prešiel celou paletou funkcií – od radového pracovníka, až po riaditeľa ústavu (ČSMÚ). Rozpad ČSFR však znamenal aj podstatný zásah do štruktúry metrologických orgánov a jubilant to pocítil markantne: noví šéfovia mu dali pocítiť svoju „priazeň“ tak, že napokon v r. 1998 bol nútený zo služieb Slov. metrologického ústavu odísť do dôchodku. Jubilant sa však nedal odradiť, v r. 1999 (kedy krátko pôsobil aj vo funkcii poradcu predsedu ÚNMS SR) založil Laboratórium metrologických analýz, ktoré doteraz vedie a poskytuje záujemcom v praxi rôzne konzultačné a poradenské služby.

Odborná aktivita jubilanta bola od začiatku venovaná predovšetkým metrologii geometrických veličín, špeciálne angulárnej metrologii a neskôr súradnicovej metrologii. Okrem toho sa venoval aj problematike všeobecnej metrologie (neistoty, nadväznosť, tvorba etalónov, metodiky kalibrácie apod.), čo sa odrazilo i v pedagogickom pôsobení (v r. 2000 až 2006) na TU Wien.



Publikačná činnosť I. Brezina je veľmi rozsiahla – doteraz uverejnil vyše 170 pôvodných príspevkov v domácich i zahraničných periodikách, vydal 4 odborné monografie (dve z toho v zahraničí) a v JMO (kde začal publikovať od r. 1971) mu vyšlo 13 článkov, 21 referátov a 157 recenzií kníh, skrípt a dizertácií.

Jubilantova odborná aktivita sa odzrkadľuje aj v pôsobení viacerých medzinárodných grémií: aktívne participoval v prac. skupine ISO TC 3/WG 10 „Geometrical co-ordinate measurements“, v IMEK-u (v r. 1993-96 bol predsedom Slov. výboru IMEKO), ako aj v činnosti prípravných výborov niekoľkých metrologických podujatí doma (od r. 1984 odb. garant konferencií „Meranie a meracia technika v strojárstve“) i v zahraničí.

V r. 1991-92 pôsobil aj ako člen št. skúšobnej komisie na Stavebnej fakulte STU Bratislava, neskôr sa vzdelával aj v oblasti práva; v r. 1996 ukončil toto štúdium v rámci Univerzity tretieho veku na KU v Bratislave.

V súčasnosti sa jubilant venuje predovšetkým fundamentálnym otázkam kalibrácie meradiel (aj v súvislosti s tvorbou novej slovenskej metrologickej legislatívy), metrologickej terminológii a problematike analýz meracieho procesu.

Redakcia a Redakčná rada časopisu JMO praje Ing. Brezinovi do ďalších rokov života veľa zdravia, publikačného elánu a optimizmu, ako aj sústavnú podporu pre náš časopis.

Red.

Prostředí se záporným indexem lomu - I. část

Článek popisuje chování elektromagnetického záření při průchodu prostředím vykazujícím záporný index lomu. Takové materiály příroda nezná, proto se dlouho prakticky nikdo nezabýval ani teorií takových hypotetických látek. Teprve od počátku tohoto století, kdy se podařilo vytvořit několik vzorků uměle a popsat jejich mimořádné vlastnosti, zájem o tento nový fenomén rychle roste.

Klíčová slova: záporný index lomu, permitivita, permeabilita, grupová rychlost, fázová rychlost.

OBECNÁ ČÁST

Dlouhá desetiletí a snad i staletí nikoho z optiků nenapadlo, že by index lomu mohl být záporný. Index lomu n jako poměr fázové rychlosti světla ve vakuu c_0 k fázové rychlosti světla ve studovaném prostředí c

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (1)$$

je u přirozených homogenních a izotropních prostředí dán jako druhá odmocnina součinu relativní permitivity ϵ_r a relativní permeability μ_r materiálu

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2)$$

Index lomu se vždy bral jako základní hodnota odmocniny, tj. jako kladné číslo, protože se zdálo nepřirozené, aby v důsledku záporného indexu lomu $n < 0$ byla fázová rychlost také záporná $c < 0$ a byla namířena do opačného směru než fázová rychlost ve vakuu c_0 .

Předchozí vztahy vyplývají z vlnové rovnice pro šíření elektromagnetických vln, kdy např. pro skalární vlnu v homogenním a izotropním prostředí bez zdrojů platí

$$\Delta \hat{u} - \epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial t^2} = 0,$$

kde Δ je Laplaceův symbol, který má v pravouhlých souřadnicích tvar

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

a koeficient u parciální derivace podle času je roven druhé mocnině převrácené hodnoty fázové rychlosti světla ve studovaném prostředí

$$\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r = \frac{1}{c^2}.$$

Fázová rychlost světla ve vakuu je pak dána vztahem

$$c_0 = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

a je to základní fyzikální konstanta s hodnotou $c_0 = 299\,792\,458$ m/s.

Rovinná elektromagnetická vlna jako řešení vlnové rovnice je vyjádřena vztahem

$$\hat{u} = A \sin \left\{ \pm \omega (t - \Delta z) \right\},$$

kde v důsledku kauzality, tj. že později, s časovým posunem Δt , kmitá bod vzdálenější od počátku šíření vlnění. Tedy že znaménko uvnitř kulaté závorky musí být záporné. Potom

$$\hat{u} = A \sin \left\{ \pm \left(\omega t - \omega \frac{\Delta z}{c} \right) \right\},$$

kde koeficient při souřadnici Δz je úhlový vlnočet $k = \omega/c = (2\pi/\lambda_0)$ n . Pokud je $n > 0$, nejsou s kauzalitou žádné problémy. Pokud by ovšem bylo $n < 0$, bylo by třeba, aby další veličina byla záporná. V tomto případě bude z záporné, odkud plyne, že fáze narůstá ve směru opačném k šíření energie.

Zápornou hodnotu odmocniny (2) pro index lomu

$$n = -\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

hypoteticky zkoumal V.G. Veselago [1] v r. 1967, ale již v r. 1944 známý fyzik L. I. Mandelštam [2] na takovou možnost ve svých přednáškách upozorňoval. Na začátku tohoto desetiletí nastartoval novou vlnu studia záporného indexu lomu J. B. Pendry [3]. On i Veselago ukázali, že zápornou odmocninu je třeba vzít tehdy, když obě veličiny pod odmocnítkem jsou současně záporné: $\epsilon_r < 0$ i $\mu_r < 0$. Formálně matematicky bychom mohli pro obě záporné veličiny psát

$$\sqrt{\epsilon_r \mu_r} = i \sqrt{|\epsilon_r|} i \sqrt{|\mu_r|} = -\sqrt{|\epsilon_r| |\mu_r|},$$

protože platí $i^2 = -1$, ale podrobnější rozbor např. v práci [4] ukázal, že při matematicky exaktnějším přístupu je záležitost poněkud složitější, ale tím se zde nemůžeme zabývat.

Je známo, že energie vlnění je nesena vlnovým balíkem, který se šíří tzv. grupovou rychlostí c_g . Příčinou je disperze světelných vln, tj. závislost vlnové délky světla λ ve studovaném prostředí na kmitočtu světla a šíření klubka (balíku) světelných vln s vlnovými délkami v určitém rozmezí. Místo kmitočtu ν se výhodněji spíše užívá úhlový kmitočet $\omega = 2\pi\nu$. V prostředí s kladným indexem lomu je přirozeně fázová rychlost světla c_p namířena stejným směrem jako rychlost grupová c_g . Jinak je tomu v prostředí se záporným indexem lomu.

Uvedme, že fázová rychlost je dána poměrem úhlového kmitočtu k úhlovému vlnočtu

$$c_p = \frac{\omega}{k},$$

zatímco grupová rychlost je dána podílem diferenciálů těchto veličin

$$c_g = \frac{d\omega}{dk}.$$

Uvedme také, jaká je závislost grupového indexu lomu n_g na fázovém indexu lomu n_p . Grupový index lomu je definován jako

$$n_g = \frac{c_0}{c_g},$$

odkud použitím předchozí definice pro grupovou rychlost platí

$$n_g = \frac{c_0}{\frac{d\omega}{dk}} = c_0 \frac{dk}{d\omega}.$$

Úhlový vlnovek lze napsat jako

$$k = \frac{\omega}{c_p} = \frac{\omega}{c_0} n_p$$

neboli

$$c_0 k = \omega n_p,$$

odkud diferenciací obdržíme

$$c_0 dk = d(\omega n_p) = \omega dn_p + d\omega n_p,$$

takže nakonec pro grupový index lomu bude

$$n_g = \frac{c_0 dk}{d\omega} = n_p \left\{ \omega \right\} + \omega \frac{dn_p \left\{ \omega \right\}}{d\omega}.$$

Pro grupovou rychlost pak platí

$$c_g = \frac{c_0}{n_p \left\{ \omega \right\} + \omega \frac{dn_p \left\{ \omega \right\}}{d\omega}}.$$

Jestliže fázová rychlost je kladná, $c_p > 0$, a tedy i fázový index lomu je kladný, $n_p > 0$, a jestliže současně je disperze normální (s růstem frekvence roste index lomu, $dn_p/d\omega > 0$), pak vztah pro grupovou rychlost nepředstavuje žádné problémy, i když např. index lomu klesne pod jedničku a fázová rychlost bude větší než rychlost světla ve vakuu. Grupová rychlost c_g bude menší než rychlost fázová c_p a bude mít stejný smysl. Jestliže však je disperze anomální, $dn_p/d\omega < 0$, pak pro $dn_p/d\omega < -n_p/\omega$ nastane případ, kdy grupová rychlost nabude záporného znaménka, $c_g < 0$, a bude mít opačný smysl než fázová rychlost, $c_p > 0$. Anomální disperze se u běžných materiálů vyskytuje v rozmezí absorpční čáry, je tedy spojena se silnou absorpcí.

Při záporné fázové rychlosti, čili záporném fázovém indexu lomu, $n_p < 0$, je úvaha poněkud složitější. Aby byla grupová rychlost kladná, musí jmenovatel být kladný. To vyjadřuje nerovnost

$$n_p \left\{ \omega \right\} < \omega \frac{dn_p \left\{ \omega \right\}}{d\omega}$$

neboli

$$\omega \frac{dn_p \left\{ \omega \right\}}{d\omega} > \left| n_p \left\{ \omega \right\} \right| > 0.$$

Pro kladné hodnoty úhlového kmitočtu musí být i změna indexu lomu se změnou úhlového kmitočtu kladná. Vzhledem k tomu, že index lomu se předpokládá záporný, musí se jeho absolutní velikost opět zmenšovat s růstem kmitočtu.

Pro zápornou fázovou rychlost, $c_p < 0$, a pro opačný případ poslední nerovnosti bude i grupová rychlost záporná, $c_g < 0$. Pak se absolutní velikost fázového indexu lomu zvětšuje s růstem kmitočtu.

V Dodatku I jsou uvedeny běžné příklady (s kladným fázovým indexem lomu) pro chování optických veličin v rozmezí a okolí optické absorpční čáry pro látky sestávající z izolovaných oscilá-

torů. Fázový index lomu se nemůže dostat do záporných hodnot, ale grupový ano. V takovém případě ovšem fázová rychlost má kladný směr, zatímco grupová rychlost má záporný směr.

Jaké vlastnosti musí mít disperzní prostředí, aby fázová rychlost byla namířena proti rychlosti grupové? Přetlumočme zde přístup k tomuto problému uvedený v práci [5]. Disperzní prostředí je charakterizováno disperzní relací, což je funkce závislosti úhlového vlnoveku k na úhlovém kmitočtu ω , která se napíše jako $k = K\{\omega\}$. Častěji se však tato závislost píše obráceně jako funkce $\omega = W\{k\}$, což vede u mnohých k nepochopení věci. Zapišeme vlnové klubko jako kontinuum disperzních rovinných vln

$$\hat{u}\{z, t\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U\{\omega\} \exp\{i(\omega t - K\{\omega\}z)\} d\omega.$$

Pro komplexně sdruženou vlnu z toho vyplývá

$$\hat{u}^*\{z, t\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U^*\{\omega\} \exp\{-i(\omega t - K\{\omega\}z)\} d\omega$$

a jestliže formálně nahradíme veličinu $\omega \rightarrow -\omega$, můžeme napsat poslední vztah jako

$$\hat{u}^*\{z, t\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U^*\{-\omega\} \exp\{i(\omega t + K\{-\omega\}z)\} d\omega.$$

Z porovnáním obou posledních rovnic vyplývá, že pro reálné vlnové klubko musí platit

$$K\{\omega\} = -K\{-\omega\},$$

a tedy, že disperzní relace musí být lichou funkcí. Podobně samozřejmě můžeme napsat

$$W\{k\} = -W\{-k\}.$$

Položme si otázku, jaký je nejjednodušší model disperzní relace, který může být použit pro materiál se záporným indexem lomu. Takovým tvarem by mohla být např. nepřímá úměrnost

$$\omega = W\{k\} = -\frac{C}{k}$$

pro $C > 0$. Tato funkce je lichá a splňuje tak uvedený požadavek. Pro nejjednodušší závislost $C = 1$ je graf funkce uveden na obr. 1. Pro levý horní kvadrant platí, že když se úhlový kmitočet zvětšuje, zmenšuje se úhlový vlnovek k a s ním i index lomu n , což představuje tzv. anomální disperzi. V tomto kvadrantu je $\omega = \omega' > 0$ a přitom

$$k = -k' = -\frac{C}{\omega'} < 0.$$

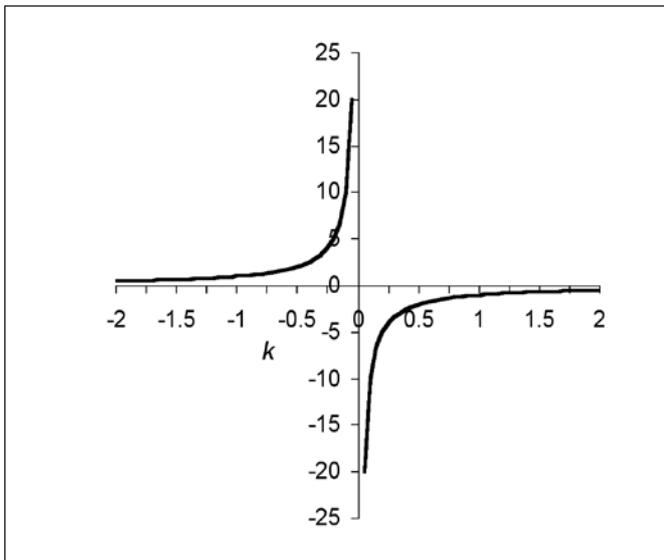
Porovnáním posledních vztahů pak pro fázovou rychlost je

$$c_p\{\omega'\} = \frac{\omega}{k} \Big|_{\omega'} = -\frac{\omega'^2}{C} < 0$$

a pro grupovou rychlost je

$$c_g\{\omega'\} = \frac{d\omega}{dk} \Big|_{\omega'} = \frac{C}{k^2} \Big|_{\omega'} = \frac{\omega'^2}{C} > 0.$$

Rychlost fázová má záporné znaménko a rychlost grupová naopak kladné. Tzn., že energie se šíří v kladném směru, zatímco fáze narůstá v záporném směru.



Obr. 1 Graf nejjednoduššího průběhu disperzní relace pro záporný index lomu

DŮSLEDKY NEGATIVNÍHO INDEXU LOMU PRO OPTIKU

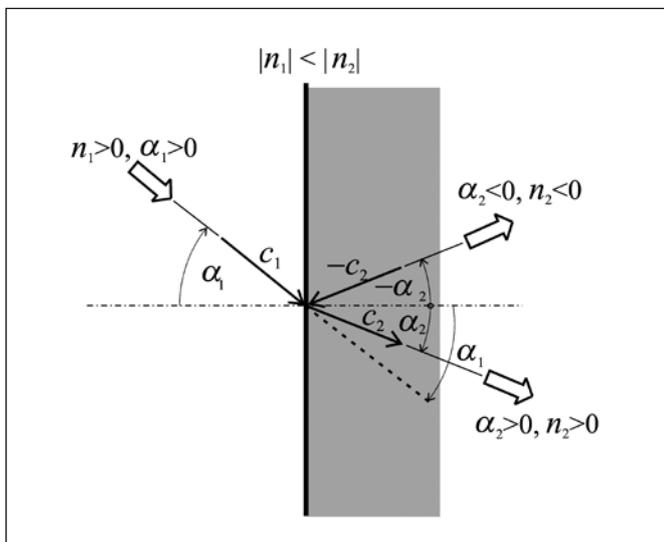
Možnost existence záporného indexu lomu otevřela brány ke studiu neobvyklých a exotických jevů v optice.

Tak především jde o šíření světla z běžného prostředí s kladným indexem lomu do prostředí se záporným indexem lomu. Tento problém je řešen např. v [6, 7]. Pro lom platí obecný Snellův zákon lomu, který napíšeme v symetrickém tvaru

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2,$$

kde n_1, n_2 jsou indexy lomu prvního (dopadu) resp. druhého (lomu) prostředí a α_1, α_2 jsou úhly dopadu resp. lomu. Pokud jsou oba indexy lomu kladné, nastává běžný případ lomu: odchylka úhlu směrem ke kolmici dopadu, jestliže druhé prostředí je opticky hustší ($n_1 < n_2$), nebo odchylka úhlu směrem od kolmice dopadu, jestliže druhé prostředí je opticky řidší ($n_1 > n_2$). Přitom paprsky zůstávají v kvadrantu, ve kterém by se šířil paprsek bez lomu.

Na obr. 2 je situace pro lom ke kolmici. Na téměř obrázku je znázorněn i lom z prostředí kladného indexu lomu $n_1 > 0$ do prostředí záporného indexu lomu $n_2 < 0$. Úhel lomu v absolutní ve-



Obr. 2 Snellův zákon pro kladný nebo záporný index lomu druhého prostředí

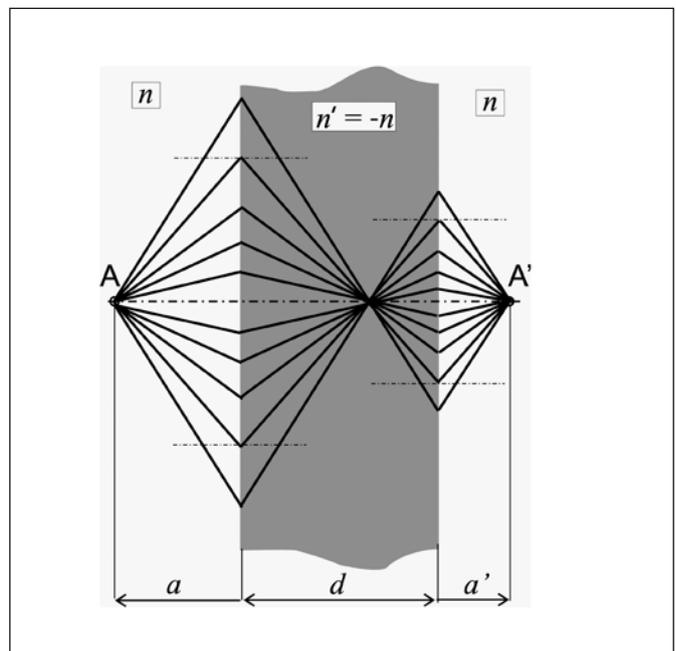
likosti zůstává stejně velký, ale je nakreslen v záporném smyslu úhlu. Nachází se v protilehlém kvadrantu prostředí lomu. Pro lom od kolmice, v případě opticky řidšího druhého prostředí, nastává za obvyklých podmínek i úplný vnitřní odraz, když se lomený paprsek šíří podél rozhraní.

Na základě Snellova zákona již zmíněný Veselago navrhl optickou čočku vyrobenou z materiálu se záporným indexem lomu, která má rovinná rovnoběžná rozhraní. Pendry ji nazval perfektní čočkou, protože nemá kulovou vadu. Její vzhled je uveden na obr. 3, z kterého je patrné, že pro jakkoliv velkou aperturu se paprsky vycházející z předmětového bodu A opět sejdou v obrazovém bodě A'. Přitom ovšem je nutno zavést mezizobrazení uvnitř čočky, protože u této čočky zobrazuje, stejně jako je tomu i u obvyklých čoček, i jedno rozhraní. Je třeba zdůraznit, že absolutní velikosti indexů lomu okolí a čočky musí být stejná. Jinak by vznikla kulová vada. Zajímavou vlastností je, že taková čočka nemá optickou osu. Každá kolmice k rozhraním může zastávat funkci optické osy čočky.

Jestliže vzdálenost předmětu od prvního rozhraní označíme $-a$ a obdobně vzdálenost obrazu od druhého rozhraní a' , pak pro zobrazení platí

$$a' - a = d,$$

kde d je tloušťka vrstvy.

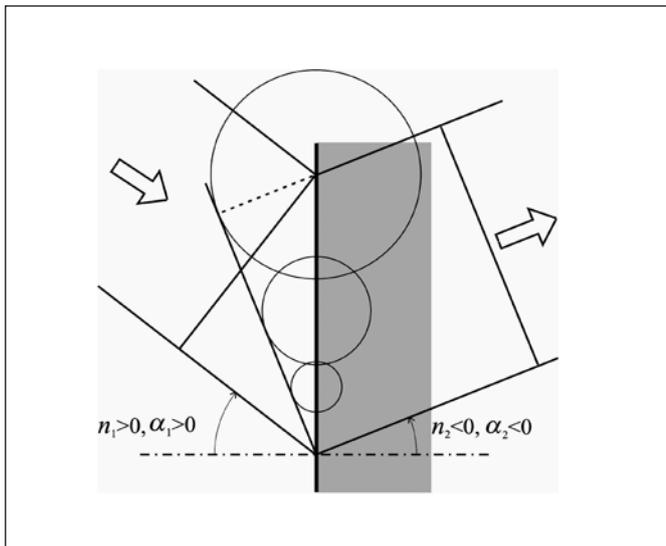


Obr. 3 Perfektní čočka z materiálu se záporným indexem lomu

Snellův zákon lomu se často odvozuje z Huygensova principu, kdy výsledná vlnoplocha se dostane jako obálka elementárních vlnoploch. Jestliže se použije pro běžný kladný index lomu obálka předních úseků elementárních vlnoploch, pro záporný index lomu je třeba v důsledku narůstání fáze v opačném směru vzít *zadní úseky elementárních vlnoploch*, jak je znázorněno na obr. 4. Je celkem zřejmé, že jestliže bude průchod světla opačný, z prostředí se záporným indexem lomu do prostředí s kladným indexem lomu, bude konstrukce lomu obdobná.

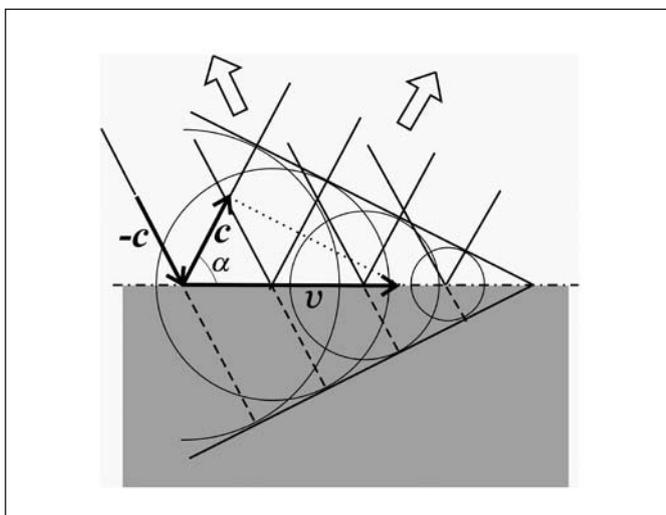
Ukažme si několik dalších příkladů na využití Huygensova principu pro konstrukci šíření světla v prostředích, v nichž se vyskytuje záporný index lomu.

Především jde o Čerenkovův efekt, kdy se nabitě částice pohybují rychlostí v vyšší, než je fázová rychlost světla c v onom prostředí. Pak se vytváří vlnoplocha obdobná Machově rázové vlně v akustice. V prostředí s kladným indexem lomu je situace jasná. Vlnoplocha se šíří jako obálka předních částí elementárních vlnoploch.



Obr. 4 Konstrukce lomu do prostředí se záporným indexem lomu na základě Huygensova principu

ploch a na obr. 5 se světlo šíří do směru pravého horního rohu obrázku. Směřuje tam nejen tok světelné energie, ale též vektor fázové rychlosti. Samozřejmě se světlo šíří symetricky i v dolní polovině obrázku. Naproti tomu pro prostředí se záporným indexem lomu se musí vytvořit obálka ze zadních částí elementárních vlnoploch. To znamená, že světelný tok se šíří od trajektorie částic pod symetrickým úhlem směrem do levého horního rohu obrázku a fázová rychlost má směr k trajektorii částic. Samozřejmě obdobně to platí i pro horní polovinu obrázku. Snad není na úkor porozumění, že oba případy jsou uvedeny na jednom obrázku bez případů symetrických podle trajektorie částic. V prostředí s kladným indexem lomu se světlo šíří směrem do pravého horního a dolního rohu, zatímco v záporném prostředí se šíří ve směru do levých rohů.

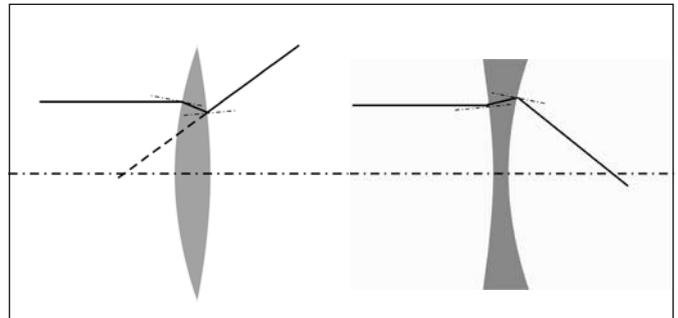


Obr. 5 Vlnoplochy šíření Čerenkovova záření pro prostředí s kladným nebo záporným indexem lomu

K Čerenkovově efektu je možno ještě dodat, že lom a odraz světla lze také pojímat jako vznik čerenkovovských vlnoploch, protože na rozhraní mezi dvěma prostředími se zdroj elementárních vlnoploch jakoby šíří nadsvětelnou rychlostí v prostředí odrazu nebo lomu.

Zajímavé jsou čočky vytvářené z materiálů se záporným indexem lomu. Zmíněný Veselago již tehdy ve svém článku naznačil chod paprsků ve spojce a rozptylce zhotovených ze záporného

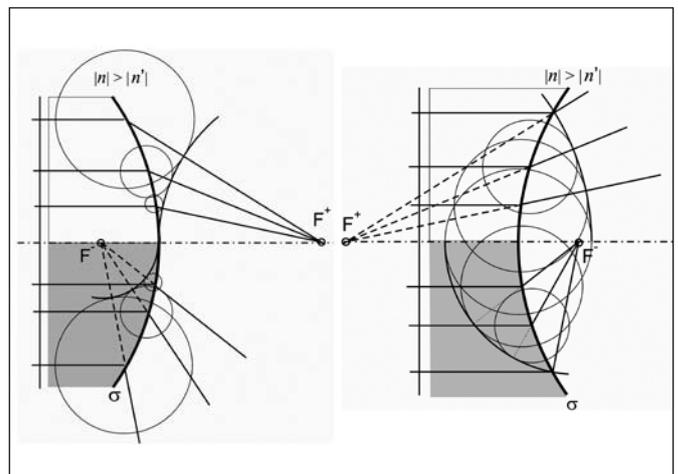
indexu lomu (obr. 6). Uvedl, že se tak změní jejich účinek, který se ovšem také změní v případě, že jde o čočky s nižším indexem lomu v prostředí s vyšším indexem lomu: spojka rozptyluje paprsky, rozptylka je soustřeďuje.



Obr. 6 Účinek čoček zhotovených z materiálu se záporným indexem lomu: spojka paprsky rozptyluje, rozptylka je soustřeďuje

Obrázek ukazuje případ, kdy čočky jsou z materiálu, jehož index lomu je v absolutní hodnotě stejný jako má okolí, ale má záporné znaménko. To vyplývá ze stejně velkých ale opačných úhlů lomu.

Ještě názornější je využití Huygensova principu k určení funkce kulové lámavé plochy oddělující prostředí s kladným a záporným indexem lomu. Na obr. 7 je situace pro vypuklou a vydutou lámavou plochu s předním indexem lomu v prosté hodnotě vyšším než je zadní index lomu. Pro běžný kladný index lomu jde v prvním případě o spojný účinek a v druhém případě o účinek rozptylný. To je ukázáno v horní polovině obou částí obrázku. Obě obálkové vlnoplochy byly vytvořeny, jak je obvyklé, z předních částí elementárních vlnoploch. Ve spodních polovinách obou částí obrázku jsou uvedeny případy se záporným indexem lomu, kdy se změní účinek čoček, v prvním případě vzniká rozptylný účinek a v druhém účinek spojný. Vlnoplochy ovšem vznikly jako obálky zadních úseků elementárních vlnoploch. Je přitom zřejmé, že lámavé schopnosti se zvětšily, protože ohniska se několikanásobně přiblížila.



Obr. 7 Využití Huygensova principu k určení funkce lámavé plochy oddělující prostředí s kladným a záporným indexem lomu

DODATEK I

Vyšetřujeme chování optických veličin v rozmezí a okolí absorpčních čar látek s molekulární strukturou, která je popsána jednooscilátorovým dipólovým přechodem pro volné atomy a molekuly. Jde o tzv. Lorenzův model.

Pohybovou rovnicí pro oscilátor, který je tlumený (tlumení je úměrné rychlosti) a s budicí silou danou elektromagnetickým polem, lze napsat ve tvaru

$$m\ddot{\mathbf{r}} + g\dot{\mathbf{r}} + q\mathbf{r} = e\mathbf{E}', \quad (\text{I.1})$$

kde m a e jsou hmotnost, resp. náboj kmitající částice. Budící pole má tvar

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E}'_0 \exp\{-i\omega t\}, \quad (\text{I.2})$$

kde ω je úhlový kmitočet pole. Pro řešení v obecném tvaru

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 \exp\{-i\omega t\} \quad (\text{I.3})$$

se dostane jako výsledek

$$\mathbf{r} = \frac{-(e/m)\mathbf{E}'}{(\omega_0^2 - \omega^2) - i\gamma\omega}. \quad (\text{I.4})$$

Vychýlením \mathbf{r} vznikne polarizace

$$\mathbf{P} = N e \mathbf{r} = \frac{-Ne^2}{m} \frac{\mathbf{E}'}{(\omega_0^2 - \omega^2) - i\gamma\omega}, \quad (\text{I.5})$$

a permitivitu obdržíme jako

$$\varepsilon = 1 - 4\pi\mathbf{P} = 1 + 2 \frac{Ne^2}{m} \frac{2\pi\mathbf{E}'}{(\omega_0^2 - \omega^2) - i\gamma\omega}. \quad (\text{I.6})$$

Oddělením reálné a imaginární části pak bude

$$\varepsilon = 1 + 2 \frac{e^2}{m} N f \left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} + \frac{i\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \right), \quad (\text{I.7})$$

kde jsme zavedli tzv. mohutnost oscilátoru jako $f = 2\pi\mathbf{E}'$.

Komplexní permitivita $\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$ je druhá mocnina komplexního indexu lomu $\mathbf{n} = n - i\kappa$, odkud vyplývá

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 = \mathbf{n}^2 = (n - i\kappa)^2 = (n^2 - \kappa^2) - i2n\kappa. \quad (\text{I.8})$$

Reálná část permitivity je pak dána vztahem

$$\varepsilon_1 = n^2 - \kappa^2 = 1 + \frac{2e^2}{m} N f \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (\text{I.9})$$

a imaginární část permitivity vztahem

$$\varepsilon_2 = 2n\kappa = 4\pi \frac{Ne^2}{m} \frac{\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}. \quad (\text{I.10})$$

Často se pro zjednodušení výpočtů přistupovalo v okolí rezonance k přibližnému vyjádření, které vycházelo z přibližných vztahů

$$\begin{aligned} \omega_0^2 - \omega^2 &= (\omega_0 - \omega)(\omega_0 + \omega) \approx (\omega_0 - \omega)2\omega_0 \\ (\omega_0^2 - \omega^2)^2 &= (\omega_0 - \omega)^2 (\omega_0 + \omega)^2 \approx (\omega_0 - \omega)^2 4\omega_0^2 \end{aligned}$$

a vztah pro reálnou permitivitu bylo lze napsat ve tvaru

$$n^2 - \kappa^2 = 1 + \frac{2e^2}{m} \frac{Nf}{\omega_0} \frac{\omega_0 - \omega}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\gamma/2)^2} \quad (\text{I.11})$$

a pro polovinu imaginární části ve tvaru

$$n\kappa = \frac{e^2}{m} \frac{Nf}{\omega_0} \frac{\gamma}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\gamma/2)^2}. \quad (\text{I.12})$$

Dnes se toto zjednodušení nepoužívá, protože výpočetní prostředky nejsou omezené jako dříve.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory projektu AV ČR KAN301370701 a výzkumného záměru AV0Z20670512.

Literatura

- [1] V. G. Veselago: Elektrodinamika věščestv s odnovenemno otricatělnymi značenijami ε and μ . *Usp. Fiz. Nauk* 92/3 (1967) 517-26 (v ruštině - anglický překlad The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ . *Sov. Phys. Usp.* 10/4 (1968) 509- 514.
- [2] L. I. Mandelshtam: *Polnoje sobranije trudov* (Akadēmija Nauk SSSR) 5 (1950) 428-67 (pouze v ruštině).
- [3] J. B. Pendry: Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.* 85/18 (2000) 3966-9.
- [4] D. Felbacq, A. Moreau: Direct evidence of negative refraction at media with negative ε and μ . *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 5/3 (2003) L9-11.
- [5] P. P. Banerjee, G. Nehmetallah: Linear and nonlinear propagation in negative index materials. *J. Opt. Soc. Am. B* 23/11 (2006) 2348-55.
- [6] C. G. Parazzoli, R. B. Greigor, K. Li, B.E.C. Koltenbach and M. Tanielian, "Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law," *Phys. Rev. Lett.* 90 (2003) 107401-4.
- [7] R. W. Ziolkowski and E. Heyman, Wave propagation in media having negative permittivity and permeability. *Phys. Rev. E* 64/5 (2001) 056625, Part 2.

Doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc., Ústav fotoniky a elektroniky AV, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8, tel.: 266 773 430, e-mail: miler@ure.cas.cz

RNDr. Helena Hiklová, Společná laboratoř optiky a FZÚ AV ČR UP Olomouc, tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 506, e-mail: helena.hiklova@upol.cz

Strojírenská měřicí technika

Článek popisuje některé vývojové trendy ve strojírenské měřicí technice, související zejména s rozvojem výroby a kontroly kvality. Tyto tendence dále dokládá příkladem některých progresivních měřicích zařízení.

ÚVOD

V jednom z minulých čísel našeho časopisu byla uveřejněna informace o mezinárodním semináři *Měřicí technika pro kontrolu jakosti*, který se konal v Plzni v březnu t.r [1]. Navazujeme na tuto zprávu a přinášíme přehled o některých zajímavých exponátech, na tomto semináři vystavených. Přehled je doplněn ještě o další novinky, které byly k vidění na mezinárodním veletrhu zabezpečování jakosti CONTROL (Stuttgart, duben 2008). Pokusili jsme se vytipovat některé význačné trendy ve vývoji měřicí techniky, jak vyplynuly z obou uvedených akcí.

RYCHLÝ ROZVOJ MĚŘICÍ TECHNIKY

Když jsme posuzovali vývojové trendy měřicí techniky, byli jsme překvapeni, s jakou rychlostí jsou zaváděny do praktického používání nové principy měření nebo měřicí metody, resp. v jak krátkých intervalech se objevují na trhu nové typy měřicích přístrojů. Tyto tendence nejsou samoúčelné, ale souvisejí s vývojovými trendy ve vlastní strojírenské výrobě. Posuzujeme-li tyto trendy z hlediska metrologie, jde zejména o soustavné zvyšování přesnosti výrobního procesu. Nejde přitom o žádné zanedbatelné hodnoty. Odhaduje se, že za každých deset až patnáct let se zvýší přesnost strojírenské výroby v průměru o jeden stupeň přesnosti (IT).

Přesnost měřicích zařízení můžeme posuzovat pomocí různých charakteristik, např. největší dovolené chyby měřicího přístroje, nejistoty měření apod. I když rozlišitelnost měřidla neposkytuje jednoznačný pohled na přesnost přístroje, umožňuje utvořit si alespoň zjednodušený obrázek o tom, kam se vývoj přesnosti měření ubírá. Koncem dvacátého století se rozlišitelnost digitálních délkových přístrojů pohybovala v mikrometrické, popř. submikrometrické oblasti, např. u špičkových souřadnicových měřicích strojů 0,1 μm , u laserových interferometrů dokonce 0,01 μm . V současné době rozlišitelnost velmi přesných přístrojů dosahuje nanometrické oblasti (1 nm = 10^{-9} m, tj. 0,001 μm). Ale ani to není konečný stav. Když v publikaci *Měření vybraných geometrických veličin* [2] v kapitole *Vykročení do XXI. století* její autor vyslovil domněnku, že u extrémně přesných přístrojů v průběhu tohoto století budeme muset uvažovat řádově v pikometrech (1 pm = 10^{-12} m, resp. 10^{-6} μm), některým čtenářům to připadalo nereálné. Skutečnost je však jiná: již v prvé dekádě nového století rozlišitelnost dosahuje do této oblasti. Můžeme to doložit na příkladu mimořádně přesného měřicího systému CCI (Taylor Hobson, Velká Británie) pro 3D měření struktury povrchu, u kterého rozlišitelnost je 10 pm nebo chcete-li 0,01 nm.

Objektivnější je ovšem posouzení přesnosti přístroje pomocí maximální dovolené chyby (MPE_E), kterou stanoví obvykle výrobci měřicích zařízení. Považujeme MPE_E za jednu z nejdůležitějších metrologických charakteristik měřicích přístrojů, a proto ji v následujících částech článku budeme uvádět. Jinou takovou charakteristikou je nejistota měření (vyjádřená obvykle jako rozšířená nejistota U), která se stává uživatelům měřicí techniky, zejména metrologům, zkušebním technikům nebo pracovníkům technické kontroly, nepostradatelnou pomůckou při prokazování shody s požadovanou specifikací (viz ČSN EN ISO 14253-1) [3], nebo při přezkušování způsobilosti kontrolních operací.

Poznámka: Pokud je v tomto článku ve vzorci MPE_E uváděna měřená délka L , je vyjádřena v milimetrech.

I v konstrukci měřicích přístrojů se projevují změny, které přispívají k lepším metrologickým i ekonomickým vlastnostem měřicích přístrojů. Jednou z takových tendencí je stále častější používání optických měřicích metod, ať již jde o nasazení optických senzorů u souřadnicových měřicích strojů (zejména multisenzorových) nebo při měření struktury povrchu, kde použití optických metod podstatně zkracuje měřicí proces. Jiným výrazným vývojovým trendem jsou tendence související se zvyšováním kvality výrobků. Jde jednak o zvyšování rychlosti měření, jednak o umístování kontrolních zařízení co nejbližší k místu výroby, často přímo do výrobní linky. Důvod je jednoduchý: zkrátit co nejvíce dobu mezi vznikem neshodného výrobku a jeho identifikací. Rovněž stoupající požadavky na stoprocentní kontrolu zejména větších výrobních dávek vedou k potřebě zrychlovat kontrolní operace. Také další vývojová tendence souvisí se stupňováním významu kontroly kvality, resp. jejího řízení. Stále více přejímacích orgánů stále častěji požaduje, aby výsledky měření, resp. kontroly byly doloženy protokolem a aby z nich bylo možno vyhodnotit závěry pro další řízení výrobního procesu.

SOUŘADNICOVÉ MĚŘICÍ STROJE

Souřadnicové měřicí stroje (dále jen CMM – Coordinate Measuring Machines) patří dlouhodobě k nejrychleji se rozvíjejícím skupinám měřicích prostředků. Tento vývoj se ubírá několika směry. Jednak vznikají stroje, které jsou přizpůsobeny práci v dílenském prostředí, některé z nich se vyznačují jednoduchostí obsluhy. To umožňuje, aby na nich mohli pracovat i výrobní dělníci nebo další pracovníci, kteří nemají fundované základy měřicí techniky a metrologie. Vedle toho se ubírá vývoj CMM ke stále přesnějším strojům, univerzálním měřicím centrům, jejichž MPE_E leží v mikrometrické a nanometrické oblasti. Zároveň vznikají nové druhy CMM, založené na jiných řešeních. V této kapitole proto uvedeme rychle se rozšiřující skupinu multisenzorových CMM a stroje založené na principu počítačové tomografie.

Typickým příkladem CMM, určeného pro nasazení v dílně (může být však nasazen i v metrologické laboratoři) je skenovací CNC stroj výložníkového typu, **DURA MAX-TP** (Carl Zeiss, Německo). Měřicí stroj se snadno přemísťuje, takže se může podle momentální potřeby nasadit tam, kde je nejvíce zapotřebí, tedy i přímo ve výrobní lince. Měřicí rozsahy (x, y, z) jsou 500 mm x 500 mm x 500 mm. V teplotním rozsahu (18 až 30) °C, charakteristickém pro drsné dílenské prostředí, je $MPE_E = (2,9 + L/200)$ μm , při měření v rozsahu teploty (18 až 22) °C, např. v metrologické laboratoři, je chyba měření podstatně nižší, $MPE_E = (2,4 + L/300)$ μm .

Druhou skupinu CMM tvoří přesná univerzální měřicí centra, schopná proměřovat v automatickém režimu i středně velké složité obrobky. Rozvoj mikroelektronického průmyslu však vyvolává potřebu vzniku velmi přesných CMM s měřicími rozsahy podstatně menšími než v předchozím případě. Uvedeme zde dva typické představitele.

CMM F25 (Carl Zeiss, Německo) je laboratorní stroj určený pro měření součástí jako jsou mikromotory apod. Měřicí rozsahy jsou 135 mm x 135 mm x 100 mm, rozlišitelnost odměřovacích systémů ze skleněné keramiky je 7,8 nm. Při zachování okolní teploty v intervalu $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ K}$ je $MPE_E = (0,25 + L/666)\text{ }\mu\text{m}$. Dalším příkladem velmi přesného měřicího zařízení, i když limitovaného malým měřicím rozsahem, je **polohovací a měřicí stroj NMM-1** (SIOS Meßtechnik, Německo) s měřicím rozsahy 25 mm x 25 mm x 5 mm a rozlišitelností 0,1 nm. Stroj se používá pro velmi přesná měření v mikroelektronice, optice a molekulární biologii. Podle informací výrobce jde o nejpřesnější měřicí stroj této kategorie na světě. Ve všech třech souřadnicových osách stroje je uplatněn komparátorový princip (vyločení Abbeho chyby). Nejistota měření při nejnáročnějších operacích nepřekročí hodnotu $U = 1\text{ nm}$.

U multisenzorových měřicích strojů se nejedná o určitou zvláštní kategorii CMM, ale o speciální souřadnicová měřicí zařízení, obvykle mostové konstrukce, používající různé druhy senzorů (dotkových i bezdotkových). Ostatně jeden z těchto přesných strojů, **Werth - VideoCheck HA**, pracuje v Českém metrologickém institutu již půl druhého roku. Letos byl na trh uveden nový typ, **Werth - VideoCheck UA** (Werth Messtechnik, Německo). Měřicí rozsahy jsou v osách x a y 400 mm, v ose z 200 mm, rozlišitelnost 1 nm. Stroj je určen pro měření v submikrometrickém rozsahu. Vysoká přesnost (UA – Ultra Accuracy) není nadsázkou, pro její dodržení (při měření v rovině $MPE_E = (0,5 + L/600)\text{ }\mu\text{m}$ se však musí při měření zachovávat přísný teplotní režim (kolísání teploty max. $\pm 0,1\text{ K}$, teplotní gradient 0,1 K/h), pokud se však nedodrží, přesnost měření klesá.

Počítačová tomografie (Computer Tomography – dále jen CT) je poměrně mladá velmi rychle se rozvíjející metrologická disciplína, která prochází rychlým vývojem. Metoda je založena na rentgenové tomografii, využívající schopnosti rentgenového záření pronikat kontrolovanými objekty. Záření procházející objektem je zachycováno na rentgenový detektor, kde vytvoří dvourozměrný rentgenogram. Trojrozměrný obraz měřeného objektu nebo jeho části se vytvoří postupným snímáním několika set dvourozměrných rentgenogramů, pořízených při postupném natáčení objektu. Prvé přístroje, pracující na principu CT, byly vystaveny na veletrhu CONTROL již v roce 2005. V následujícím roce obdržel **počítačový tomograf Werth Tomoscope** zlatou medaili Mezinárodního strojírenského veletrhu v Brně.

MĚŘENÍ V DÍLNĚ

Progresivní vývoj se projevuje i u dílenských měřidel, která se používají často déle než sto let a kde by bylo možno tedy předpokládat, že jejich vývoj je již dokončen. Např. závitové trny, které se používají již od třicátých let minulého století, se doplňují o další funkci, měření délky závitu, např. **závitové trny** (Leitech, Německo). Ale i u třmenových mikrometrů, jejichž používání při kontrole strojů spadá do začátku minulého století, se prosazují novinky, které podstatně zlepšují metrologické parametry přístroje. Japonská firma MITUTOYO zvětšila u některých typů stoupání mikrometrického větene z dosud obvyklých 0,5 mm na 2 mm. To přispělo k větší rychlosti nastavování nových měřených rozměrů. Vzdor vyšší rychlosti měření je přesnost měření větší, než uvádí norma DIN 863. Maximální dovolená chyba nového typu mikrometru je 2 μm .

Jiným význačným trendem u dílenských měřidel je možnost bezdrátového přenosu měřených hodnot z přístroje na pracoviště centrálního zpracování dat. U dílenských komunálních měřidel lze tato data přenášet i na větší vzdálenosti (desítky i více metrů). Např. u měřicích trnů MikroWave (Marposs, Itálie) zařízení pro bezdrátový přenos (induktivní bezdotková technika a akumulátor) je integrováno přímo do rukojeti měřidla. Měřené hodnoty se přenášejí v reálném čase stejně spolehlivě jako při kabelovém spojení až do vzdálenosti 10 m. Jiným příkladem takového přenosu je vícekanálový indikační přístroj **Diatron 6000** (DIATEST, Německo)

s možností ukládat měřené hodnoty do paměti a se statistickými funkcemi. Měřené hodnoty, snímané z elektronických přístrojů, např. číselníkových úchylkoměrů nebo posuvek, se mohou přenášet do přístroje Diatron 6000 bezdrátově.

Progresivní dílenská měřicí technika se nepoužívá pouze na pracovištích technické kontroly nebo u výrobních techniků. Nasazení CNC obráběcích strojů vyžaduje, aby i na nich byla instalována měřicí čidla, ať již jde o automatickou kontrolu opotřebení, resp. stavu řezného nástroje nebo o obrobkové sondy, které zjišťují změny rozměrů obráběné součásti a přenášejí tyto informace do řídicího systému CNC stroje. I u těchto čidel se prosazuje bezkabelový přenos indikovaných hodnot. Firma Renishaw vyrábí některé druhy nástrojových i obrobkových sond s bezdrátovým provedením. Komunikace probíhá v infračervené oblasti, která poskytuje spolehlivý přenos dat v prostředí pracovního prostoru stroje.

Ve vyšších typech výrob se používají automatické, popř. poloautomatické stanice, které se zpravidla vyrábějí na objednávku podle požadavků zákazníků. Některé z těchto stanic tvoří součást výrobních linek a na základě zpětné vazby řídí obráběcí stroje. Měřicí prvek tvoří převážně indukčnostní snímače s opakovatelností až 0,01 μm , začínají se používat bezkontaktní laserové metody, ve speciálních případech i pneumaticko-elektrické metody. Jako příklad uvádíme **automatický měřicí komplex pro měření geometrických rozměrů železničních kol** (AMEST, Praha). Jde o měřicí stanici, určenou pro stoprocentní kontrolu kol sériově vyráběných v nepřetržitém třísměnném provozu, doplněnou manipulátorem. Měření zabezpečují speciální kamery a lasery. Kontrolované parametry kola se vyhodnocují speciální elektronikou vybavenou vlastním softwarem, která zabezpečuje záznam a ukládání výsledků měření každého označeného kola. Otočný manipulátor urychluje proces měření. Zatímco na jednom jeho rameni probíhá měření, z druhého ramene se změřené kolo snímá a ihned se vkládá další. Výkon stanice je 40 proměřených kol za hodinu.

V moderní strojírenské výrobě se uplatňují systémy strojního, resp. počítačového vidění. Připomínáme **inteligentní kamery a počítačové kamerové systémy** největšího světového výrobce v této oblasti, společnosti COGNEX, USA. Inteligentní kamery řady DVT obsahují část pro zachycení obrazu, dále pro jeho vyhodnocení a předání výsledků. Základ systému tvoří CMOS nebo CCD snímací prvek s rozlišením (640 x 480) nebo (1280 x 1024) obrazových bodů.

STRUKTURA POVRCHU ZNAMENÁ VÍCE NEŽ DRSNOST

Vývoj měřicí techniky v oblasti mikrogeometrie je ovlivňován novými normami GPS (Geometrical Product Specification - Geometrické specifikace produktů, resp. Geometrické požadavky na výrobky), zejména ČSN EN ISO 4287 [4]. Tato norma zahrnuje do struktury povrchu vedle drsnosti povrchu (označení R) ještě vlnitost (W) a základní profil (P). Jde o řadu nových parametrů, které umožní technický povrch a jeho vlastnosti lépe popsat než jediným parametrem, např. R_a , jak je dosud zvykem. Z hlediska měřicí techniky je tento problém zvládnut. Další otázkou však je, jak budou informace, získané z měření struktury povrchu, využity. To však již přesahuje zaměření tohoto článku a vyžádalo by si větší prostor.

Novinkou v oblasti dílenských profiloměrů je přístroj **SURTRONIC 25S** (Taylor Hobson, Velká Británie). Přístroj je vybaven indukčním snímačem s měřicím rozsahem 500 μm a rozlišením 0,01 μm . Strukturu povrchu lze měřit pomocí až 18 různých parametrů drsnosti a vlnitosti, dále se měří přímost v rozsahu do 25 mm. Do paměti přístroje se ukládá až 100 měřených hodnot k dalšímu zpracování. Přístroj pracuje s cut-offem, resp. mezními vlnovými délkami (0,25, 0,8 a 2,5) mm. Výhodou přístroje je volitelná filtrace: gaussovský filtr, který je normalizován v ČSN EN ISO 13565, nebo dříve normalizovaný filtr 2RC, který někteří výrobci dosud uvádějí na výkresech.

V oblasti struktury povrchu dochází k renesanci optických měření, ať již jde o optické přístroje nebo o nové metody měření a vyhodnocování. Příkladem je přístroj **MicroProf 200 Multisensor** (Fries Research & Technology – FRT, Německo). Na základě odraženého světla od měřeného povrchu lze získat informace o výšce struktury povrchu (drsnoti povrchu, vlnitosti). Měřicí postup je automatický, vzhledem k tomu, že použitý senzor pracuje bez jakýchkoli pohyblivých částí, je také rychlý. Lze tedy provádět stoprocentní kontrolu struktury povrchu i u velkých dávek obrobků, typických pro velkosériovou výrobu, např. v automobilovém průmyslu. Přístroje mohou být podle charakteru měřicí úlohy vybaveny různými snímači, popř. dodatečně doplněny rastrovacím elektronovým mikroskopem se zónou rastrování 80 μm x 80 μm . Maximální výškový měřicí rozsah je 8 μm , rozlišení je lepší než 1 nm ve všech třech osách.

Příkladem přístrojů pro optické měření struktury povrchu jsou dále profilometry NJ-Optimal a **NJ-Portable** (nanoJura, Francie), uzpůsobené pro bezdotykové měření struktury povrchu v oblasti mikro- a nanogeometrie. Přístroj 3D NJ-Portable je určen k měření na ploše 25 mm x 25 mm, kontrolovaný povrch se snímá integrovanou mikrokamerou a měří pomocí konfokálního senzoru s měřicím rozsahem 480 μm a rozlišitelností ve vertikálním směru 2 nm. Přístroj NJ Optimal může pracovat bezdotykově nebo dotykově, rozlišitelnost je opět 2 nm.

S kontrolou struktury povrchu souvisí i nový obor metrologie, tzv. povrchová defektometrie.

Některé přesné součásti, zejména pro automobilový a ložiskářský průmysl, vyžadují dokončování funkčních ploch speciálními technologiemi, které zabezpečují vysokou kvalitu povrchu (až $Ra = 0,01 \mu\text{m}$). Vizualní kontrola těchto ploch je značně nespolehlivá. Měřicí zařízení, založené na principu rozptýlení odraženého světla, vyvinula firma MESING, Brno ve spolupráci s Ústavem měření SAV Bratislava. Použitá metoda rozptylu světelného svazku i snímače povrchových vad jsou popsány v literatuře [5].

KALIBRACE MĚŘIDEL

K základním přístrojům délkové metrologické laboratoře patří délkoměr a měřicí mikroskop. I u těchto přístrojů, jejichž počáteční využití v metrologii spadá do poloviny minulého století, dochází k rychlému vývoji, spojenému s četnými inovacemi. Z oblasti délkoměrů připomínáme **univerzální délkoměr LABCONCEPT Premium** (Trimos, Švýcarsko). Vysoké přesnosti je dosaženo důsledným dodržáním Abbeho komparátorového principu. Délkoměr pracuje s měřicím rozsahem 550 mm (typ LABC500) nebo 1050 mm (LABC1000). Rozlišitelnost odměřovacího systému může dosáhnout až 0,01 μm . Největší dovolená chyba $MPE_E = (0,15 + L/2000) \mu\text{m}$ platí za předpokladu, že teplota bude ležet v rozsahu 20,0 $^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ K}$, a relativní vlhkost (50 ± 5) %. Délkoměr je vybaven kompenzačním teplotním systémem, který pracuje v rozsahu (16 až 24) $^{\circ}\text{C}$.

Příkladem progresivního mikroskopu je **měřicí videomikroskop NEXIV VMR** (NIKON Japonsko), určený pro automatická měření při výrobě mechanických dílů, elektronických součástek, matic a forem. Rozlišitelnost odměřovacího systému mikroskopu je 0,01 μm , popř. 0,1 μm . Maximální dovolená chyba měření v rovině ($x - y$) u nejpřesnějšího přístroje je dána výrazem $MPE_E = (0,9 + 3 L/1000) \mu\text{m}$. Této extrémní přesnosti však také odpovídají teplotní podmínky, které musí měřicí laboratoř splnit: teplota ovzduší 20,0 $^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \text{ K}$, její kolísání max. 0,1 K/h.

Připomeňme také laserové interferometry, které se používají při kalibraci délkoměrů, CMM i velkých přesných obráběcích strojů. Firma Renishaw (Velká Británie) dodává laserový **měřicí kalibrační systém XL-80** s pracovním rozsahem 80 metrů a rozlišitelností 1 nm. Maximální dovolená chyba $MPE_E = 0,5 \mu\text{m.m}^{-1}$. Působení ovlivňujících veličin (teplota, tlak a vlhkost vzduchu) je automaticky korigováno. Doplněním programu pro kompenzaci lineárních chyb lze v softwaru přístroje vytvořit z výsledků měření korekční hodnoty pro různé řídicí systémy CNC obráběcích strojů.

Ve strojírenské výrobě se často používají přesné inkrementální snímače s velkým měřicím rozsahem (až 100 mm), pro jejichž kalibraci se obtížně hledá zařízení, které by bylo vhodné z hlediska potřebné přesnosti. Mezeru v této oblasti zaplní měřicí stanice TMP 100 (Feinmess Jena, Německo). Jako etalon je použit miniaturní interferometr. Maximální dovolená chyba měření MPE_E je 0,03 μm . Kalibrace probíhá v měřicí komoře při teplotě 20,0 $^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ K}$, přičemž během kalibrace jednoho snímače nesmí teplota v komoře kolísat o více než 5 mK. Jiným příkladem přístroje pro kalibraci přesných indukčních snímačů je kalibrační interferometr s laserem He-Ne, který vyvíjí brněnská firma MESING ve spolupráci s ÚPT-AV ČR a ČMS LPM Praha.

MÍSTO ZÁVĚRU

Pokusili jsme se nastítnit stručný přehled současného stavu strojírenské měřicí techniky.

Toto téma však vyvolává nové otázky: Jaké budou další cesty vývoje měřicí techniky? A jak se tento vývoj projeví na práci strojírenských metrologů, kontrolorů a zkušebních techniků? Jak přispěje nová měřicí technika ke zvýšení kvality produkce a konkurenceschopnosti strojírenských podniků? Na tyto a mnoho dalších otázek se pokusíme společně nalézt odpovědi na mezinárodní konferenci *Měřicí technika pro kontrolu jakosti*. Konference naváže na dlouholetou tradici plzeňských stejnojmenných seminářů. Poznamenejte si prosím její termín: 18. a 19. března 2009. Takže na shledanou opět v Plzni!

Literatura

- [1] Brezina, I.: *17. mezinárodní seminář "Měřicí technika pro kontrolu jakosti"*. Jemná mechanika a optika, č. 4/2008, s. 127
- [2] Nenáhlo, Č.: *Měření vybraných geometrických veličin*. Česká metrologická společnost, 1999
- [3] ČSN EN ISO 14253-1:2000 (01 4100) GPS – Zkoušení obrobků a měřidel měřením – Část 1: Pravidla o prokazování shody nebo neshody se specifikací
- [4] ČSN EN ISO 4287:1999 (01 4450) GPS Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu
- [5] Bartl J., Lacko V., Hain M., Smutný D.: *Optické snímače povrchu přesných strojírenských součástí*. Jemná mechanika a optika, č. 5/2007, s.139 -143

Měření skupinové disperze optického prvku s využitím spektrální tandemové interferometrie v bílém světle

V tomto článku je představena nová metoda měření skupinové disperze optického prvku s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. Článek prezentuje teorii a experiment využívající tzv. spektrální tandemové interferometrie v bílém světle, kdy jsou za sebou řazeny dva interferometry. V tomto příspěvku využíváme Michelsonův a Machův-Zehnderův interferometr, do jehož jednoho ramene je vložen optický prvek známé tloušťky. Ze zaznamenaných spektrálních interferenčních signálů je následně odečtena vyrovnávací vlnová délka, pro kterou je úhrnný skupinový optický dráhový rozdíl mezi svazky nulový. Na základě tohoto měření byla určena skupinová disperze skleněného vzorku a byl potvrzen soulad s měřením, které využívá pouze Michelsonova interferometru.

1. ÚVOD

Skupinový index lomu a jeho spektrální závislost, tj. skupinová disperze, patří mezi základní parametry a charakteristiky izotropních a anizotropních optických materiálů [1]. Pro měření skupinové disperze se s výhodou používá interferometrie v bílém světle, která pracuje se zdrojem bílého světla a Michelsonovým nebo Machovým-Zehnderovým interferometrem.

Je známo, že interferometrie v bílém světle využívá metod, které se dělí na časové nebo spektrální [2], podle toho, zda interferenci pozorujeme v časové nebo spektrální oblasti. Pomocí časové metody je měřena doba průchodu optického impulsu vzorkem. Umístíme-li vzorek do jednoho ramene z interferometru, můžeme pozorovat jím zavedené časové zpoždění [2]. Metoda spektrální interferometrie je založena na pozorování spektrálních interferenčních proužků [3-6]. Tato metoda rovněž umožňuje měřit periodu spektrálních interferenčních proužků v blízkosti tzv. vyrovnávací vlnové délky, kterou můžeme v interferogramu pozorovat, když se skupinový optický dráhový rozdíl mezi svazky blíží nule [7, 8].

Spektrální metoda má jistá omezení při měření tlustých vzorků nebo silně disperzních materiálů, protože v tomto případě jsou interferenční proužky mimo oblast vyrovnávací vlnové délky, kde jsou obtížně rozlišitelné. Měření skupinové disperze takových vzorků a materiálů je možné, pokud pracujeme ve spektrální oblasti, která zahrnuje vyrovnávací vlnovou délku, kterou můžeme posouvat [7-9]. Modifikace této metody s tandemovým uspořádáním Michelsonova interferometru a dvojlomného optického prvku byla použita při měření disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence známé tloušťky [10], resp. dvojlomného optického vlákna známé délky [11]. Jiná modifikace této techniky byla využita k měření skupinové disperze křemenného krystalu [12]. Další metoda, která využívá Machova-Zehnderova interferometru, byla použita pro měření disperzních charakteristik optických vláken [13].

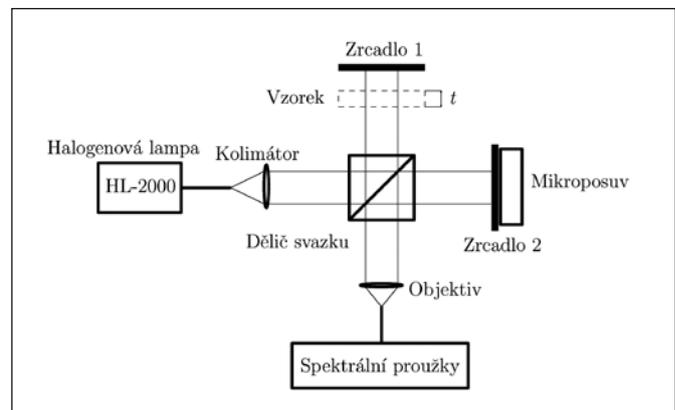
Cílem tohoto příspěvku je ukázat na využití spektrální tandemové interferometrie v bílém světle pro přesná a rychlá měření skupinové disperze optických prvků [14]. Nejprve je v Michelsonově interferometru s děličem svazku ve tvaru kostky změřena skupinová disperze skleněného vzorku známé tloušťky. Poté jsou v tandemové konfiguraci Michelsonova interferometru a Machova-Zehnderova interferometru s destičkovými děliči svazku zaznamenány vláknově optickým spektrometrem interferogramy v oblasti vlnových délek od 450 do 950 nm. Z nich je odečtena vyrovnávací vlnová délka a následně změřen skupinový index lomu pro výše zmíněný skleněný vzorek. Výsledky obou měření skupinové disperze jsou ve velmi dobré shodě.

2. TEORIE

2.1 Disperzní Michelsonův interferometr

Pro rozdíl optických drah $\Delta_M(\lambda)$ mezi svazky v disperzním Michelsonově interferometru, který je prezentován na obrázku 1, platí:

$$\Delta_M(\lambda) = 2(L_M - l_M) - 2t[n(\lambda) - 1], \quad (1)$$



Obr. 1 Měřicí sestava s disperzním Michelsonovým interferometrem se vzorkem známé tloušťky t

kde l_M a L_M označují dráhy svazků ve vzduchu v prvním (měřicím) a druhém (referenčním) rameni interferometru před vložením vzorku o známé tloušťce t a indexu lomu $n(\lambda)$ do měřicího ramene interferometru. Na výstupu interferometru je zaznamenán vláknově optickým spektrometrem interferenční signál $S_M(\lambda) = I(\lambda)/I^{(0)}(\lambda)$, kde $I(\lambda)$ je modulované spektrum a $I^{(0)}(\lambda)$ je nemodulované (referenční) spektrum. Platí

$$S_M(\lambda) = 1 + V_I \exp\left\{-\left(\pi^2 / 2\right)\left[\Delta_M^g(\lambda) \Delta \lambda_R / \lambda^2\right]^2\right\} \cos\left[\left(2\pi / \lambda\right) \Delta_M(\lambda)\right]. \quad (2)$$

kde V_I je celková viditelnost interferenčních proužků, Δ_R je šířka gaussovské odezvové funkce spektrometru [15] a $\Delta_M^g(\lambda)$ je skupinový optický dráhový rozdíl, který je určen vztahem

$$\Delta_M^g(\lambda) = 2(L_M - l_M) - 2t[N(\lambda) - 1], \quad (3)$$

kde $N(\lambda)$ je skupinový index lomu definovaný jako

$$N(\lambda) = n(\lambda) - \lambda \frac{dn(\lambda)}{d\lambda}. \quad (4)$$

Na výstupu Michelsonova interferometru pozorujeme spektrální interferenční proužky s proměnnou periodou. Největší periodu vykazují proužky, které jsou lokalizovány v oblasti kolem tzv. vyrovnávací vlnové délky, na níž je skupinový rozdíl optických drah mezi svazky nulový a platí

$$\Delta_M^g(\lambda_0) = 2(L_M - l_M) - 2t[N(\lambda_0) - 1] = 0. \quad (5)$$

Díky tomu může být poloha zrcadla určena vztahem

$$L_M(\lambda_0) = l_M + t[N(\lambda_0) - 1]. \quad (6)$$

V případě, kdy $t=0$, tj. interferometr je nedisperzní a platí $\Delta_M^g(\lambda) = \Delta_M = 2(L_M - l_M)$, lze psát pro spektrální interferenční signál zaznamenaný na výstupu nedisperzního Michelsonova interferometru

$$S_M(\lambda) = 1 + V_I \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left[\Delta_M \Delta\lambda_R / \lambda^2\right]^2\right\} \cos\left[(2\pi/\lambda)\Delta_M\right], \quad (7)$$

ze kterého plyne možnost určení polohy $L_{M0} = l_M$ druhého zrcadla, pro kterou je interferometr vyvážený a pro kterou mají spektrální interferenční proužky nekonečnou periodu.

Vyjádříme-li posunutí druhého zrcadla disperzního interferometru vzhledem k poloze zrcadla odpovídající vyváženému nedisperznímu interferometru jako $\Delta L_M(\lambda_0) = L_M(\lambda_0) - L_{M0}$, můžeme pak pro skupinový index lomu na dané vyrovnávací délce λ_0 psát

$$N(\lambda_0) = 1 + \Delta L_M(\lambda_0) / t. \quad (8)$$

Tento vztah lze přímo využít pro měření skupinového indexu lomu $N(\lambda_0)$ v závislosti na vyrovnávací vlnové délce λ_0 pro vzorek známé tloušťky t . Odhad maximální a minimální tloušťky vzorku, jehož disperze může být měřena, je diskutován v článku [14].

2.2 Disperzní Machův–Zehnderův interferometr

Uvažujme disperzní Machův–Zehnderův interferometr, který je prezentován na obrázku 2, do jehož měřicího ramene je vložen vzorek známé tloušťky t a indexu lomu $n(\lambda)$. Pro tento případ je optický dráhový rozdíl $\Delta_{MZ}(\lambda)$ mezi svazky interferometru vyjádřen vztahem

$$\Delta_{MZ}(\lambda) = (L_{MZ} - l_{MZ}) - t[N(\lambda) - 1]. \quad (9)$$

Dosažením skupinového indexu lomu $N(\lambda)$, který je definován vztahem (4), do vztahu (9) dostáváme skupinový optický dráhový rozdíl $\Delta_{MZ}^g(\lambda)$ ve tvaru

$$\Delta_{MZ}^g(\lambda) = (L_{MZ} - l_{MZ}) - t[N(\lambda) - 1]. \quad (10)$$

Spektrální interferenční signál $S_{MZ}(\lambda)$ zaznamenaný na výstupu interferometru je vyjádřen vztahem

$$S_{MZ}(\lambda) = 1 + V_I \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left[\Delta_{MZ}^g(\lambda) \Delta\lambda_R / \lambda^2\right]^2\right\} \cos\left[(2\pi/\lambda)\Delta_{MZ}(\lambda)\right]. \quad (11)$$

Spektrální interferenční proužky mají největší periodu v okolí vyrovnávací vlnové délky λ_0 a s využitím vztahu pro skupinový optický dráhový rozdíl $\Delta_{MZ}^g(\lambda)$ může být odpovídající dráha svazku ve vzduchu vyjádřena vztahem

$$L_{MZ}(\lambda_0) = l_M + t[N(\lambda_0) - 1]. \quad (12)$$

Jestliže zavedeme dráhový rozdíl $\Delta L_{MZ}(\lambda_0) = L_{MZ}(\lambda_0) - L_{MZ0}$, kde $L_{MZ} = L_{MZ0} = l_{MZ}$ odpovídá dráze svazku ve vzduchu v referenční větvi nedisperzního interferometru, dostaneme velice jednoduchý vztah

$$N(\lambda_0) = 1 + \Delta L_{MZ}(\lambda_0) / t, \quad (13)$$

který umožňuje, podobně jako v případě Michelsonova interferometru, měření skupinového indexu lomu $N(\lambda_0)$ v závislosti na vyrovnávací vlnové délce λ_0 pro vzorek známé tloušťky t . Také u této konfigurace můžeme provést odhad pro maximální a minimální tloušťku vzorku, jehož skupinová disperze může být měřena [14].

2.3 Tandemové uspořádání dvou interferometrů

Pro tandemovou konfiguraci nedisperzního Michelsonova a disperzního Machova–Zehnderova interferometru, do kterého je vložen vzorek tloušťky t , je spektrální interferenční signál na výstupu konfigurace vyjádřen za předpokladu $\Delta_M > 0$ a $\Delta_{MZ} \gg 0$ vztahem

$$S_T(\lambda) = 1 + V_I \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left[\Delta_M \Delta\lambda_R / \lambda^2\right]^2\right\} \cos\left[(2\pi/\lambda)\Delta_M\right] + 0.5V_I \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left[\left(\Delta_M - \Delta_{MZ}^g(\lambda)\right) \Delta\lambda_R / \lambda^2\right]^2\right\} \times \cos\left[(2\pi/\lambda)\left(\Delta_M - \Delta_{MZ}(\lambda)\right)\right]. \quad (14)$$

Na obrázku 3 je ukázán teoretický spektrální interferenční signál s interferenčními proužky, které jsou lokalizovány v blízkosti vyrovnávací vlnové délky $\lambda_0 = 525,43$ nm a které odpovídají $\Delta_M = 1364$ μm , $L_{MZ} - l_{MZ} = 9070$ μm a destičce z křemenného skla tloušťky $t = 15850$ μm . Použitím rovnice vyjadřující dráhový rozdíl v nedisperzním interferometru a rovnice pro skupinový optický dráhový rozdíl v disperzním Machově–Zehnderově interferometru dostáváme vztah pro skupinový index lomu

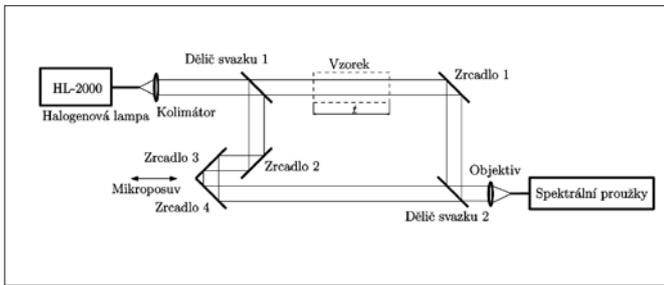
$$N(\lambda_0) = 1 + \left[\Delta L_{MZ}(\lambda_0) - 2\Delta L_M\right] / t. \quad (15)$$

Na základě tohoto vztahu můžeme přesně měřit skupinový index lomu $N(\lambda_0)$ jako funkci vyrovnávací vlnové délky λ_0 pro vzorek o známé tloušťce t .

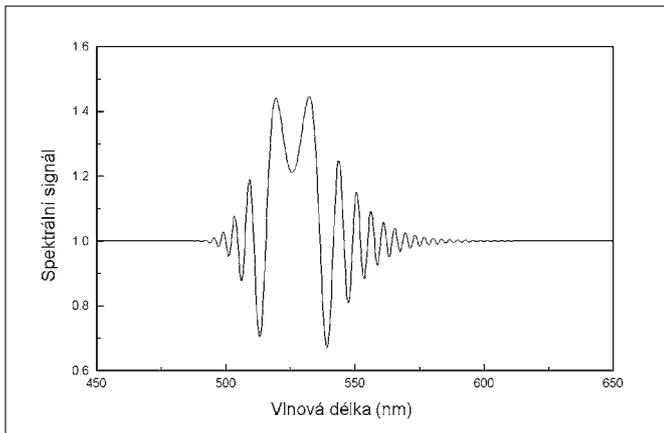
3. EXPERIMENTÁLNÍ POSTUP

Experimentální postup pro měření skupinové disperze optických prvků pomocí spektrální tandemové interferometrie v bílém světle zahrnoval použití dvou sestav. A to sestavy Michelsonova interferometru se vzorkem o známé tloušťce t , resp. tandemové uspořádání Michelsonova a Machova–Zehnderova interferometru, do jehož měřicího ramene byl vložen vzorek o známé tloušťce t .

První experimentální sestava je na obrázku 1 a zahrnuje Michelsonův interferometr, zdroj bílého světla (halogenová žárovka s optikou), vláknově optický spektrometr S2000, A/D převodník a osobní počítač. Vláknově optický spektrometr S2000 pracuje v rozsahu vlnových délek 350 až 1000 nm a obsahuje difrakční mřížku, která má 600 vrypů na milimetr a lineární CCD detekční prvek s 2048 pixely. Rozlišovací schopnost a šířka odezvy funkce spektrometru jsou určeny efektivní šířkou optického svazku v jádru optického vlákna na jeho vstupu [15]. Pro naše měření jsme použili optické vlákno o průměru jádra 50 μm . Druhá experimentální sestava zahrnuje Michelsonův interferometr z obrázku 1 v tandemovém uspořádání s dalším interferometrem, který je na obrázku 2 a který zahrnuje Machův–Zehnderův interferometr, do jehož měřicího ramene je vložen skleněný vzorek o známé tloušťce t .



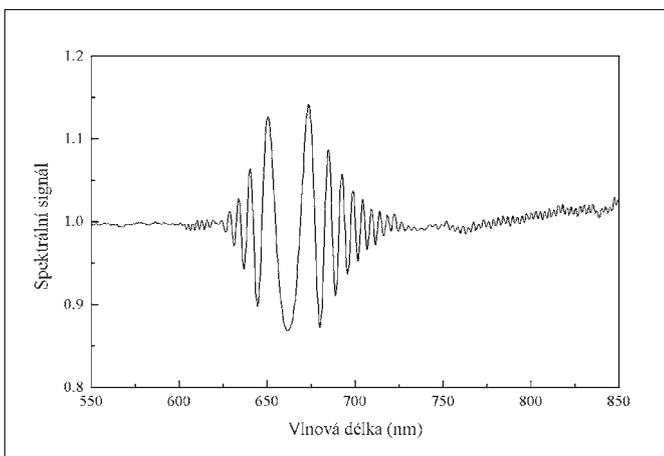
Obr. 2 Měřicí sestava s disperzním Machovým-Zehnderovým interferometrem se vzorkem známé tloušťky t



Obr. 3 Teoretický spektrální interferenční signál pro tandemové uspořádání Michelsonova a Machova-Zehnderova interferometru se vzorkem známé tloušťky v měřicím rameni

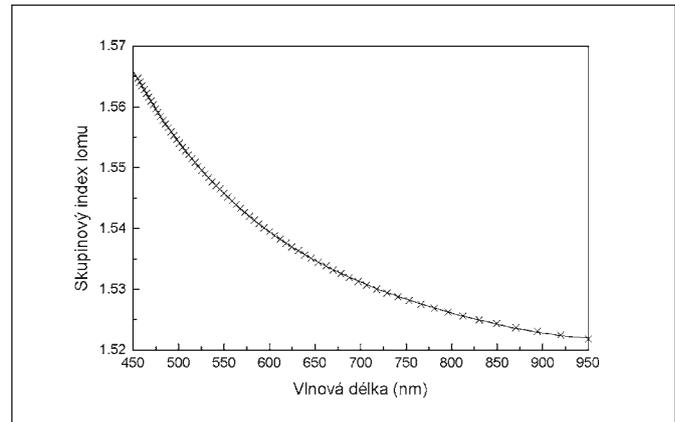
4. VÝSLEKY EXPERIMENTU A DISKUSE

V předchozích příspěvcích, které se zabývaly měřením skupinového indexu lomu optických vzorků pomocí Michelsonova interferometru (např. [12]), bylo třeba nastavit takovou pozici L_{M0} zrcadla 2 v interferometru, pro kterou je interferometr vyvážený. Výsledky popisované v těchto příspěvcích jsme aplikovali při nastavování zrcadla do správné polohy. Využili jsme skutečnosti, že pro pozici L_{M0} mají spektrální interferenční proužky největší periodu. Vložením skleněného vzorku o známé tloušťce, v našem případě $t = (15850 \pm 10) \mu\text{m}$, do měřicího ramene Michelsonova interferometru podle obrázku 1 bylo nutno přemístit zrcadlo 2 do takové pozice, pro kterou jsou spektrální interferenční proužky viditelné. Nastavování zrcadla 2 do správné polohy se provádělo manuálně. Obrázek 4 ukazuje příklad zaznamenaného spektrálního signálu pro



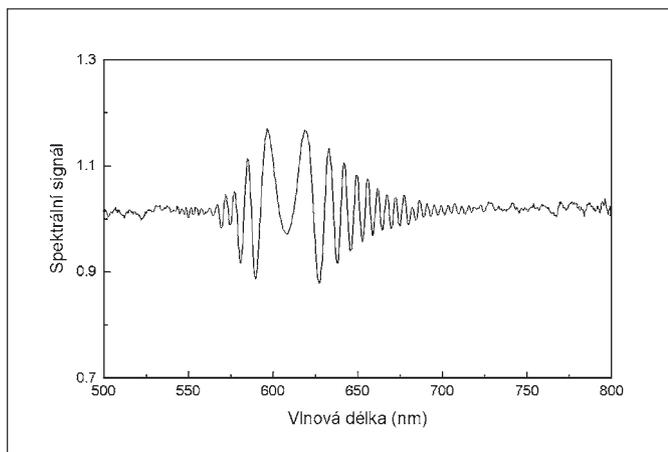
Obr. 4 Zaznamenaný spektrální interferenční signál pro posunutí zrcadla $\Delta L_M = 8461 \mu\text{m}$ (samostatný Michelsonův interferometr)

posunutí zrcadla $\Delta L_M = 8461 \mu\text{m}$ s interferenčními proužky, které jsou lokalizovány v blízkosti vyrovnávací vlnové délky $\lambda_0 = 661,94 \text{ nm}$. Výše uvedeným postupem jsme změřili i vyrovnávací vlnové délky při dalších nastavených posunutích ΔL_M . Zrcadlo 2 bylo posouváno s konstantním krokem $10 \mu\text{m}$. Po každém posunutí byl zaznamenán spektrální interferenční signál. Ze série spektrálních interferogramů, které odpovídaly posunutím ΔL_M v rozsahu 8951 až 8271 μm , byly odečteny vyrovnávací vlnové délky λ_0 , které byly změřeny v rozsahu 455 až 950 nm. Měřením závislosti posunutí $\Delta L_M(\lambda_0)$ na vyrovnávací vlnové délce λ_0 můžeme s využitím vztahu (8) přesně určit skupinový index lomu $N(\lambda_0)$ skleněného vzorku jako funkci vyrovnávací vlnové délky λ_0 . Tuto funkci názorně ukazují křivky na obrázku 5, které jsou proloženy funkcí ve formě polynomu (plná čára).

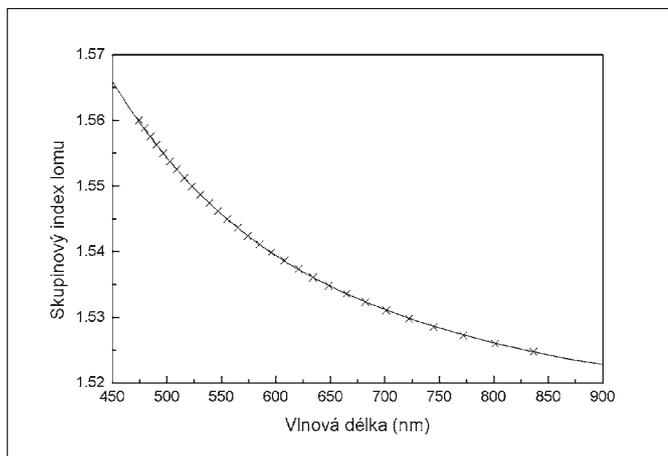


Obr. 5 Závislost skupinového indexu lomu na vlnové délce pro skleněný vzorek (křivka odpovídá proložené funkci - polynomu)

V předchozích příspěvcích, které se zabývaly měřením skupinového indexu lomu optických vzorků pomocí Machova-Zehnderova interferometru (např. [13]), se určovala virtuální (nenastavitelná) pozice zrcadla L_{MZ0} pro kterou je Machův-Zehnderův interferometr vyvážen. S výhodou se využilo tandemové konfigurace Michelsonova a Machova-Zehnderova interferometru, kdy platí $\Delta L_M = \Delta L_{MZO}$. Následně byla nastavena pozice zrcadel 3 a 4, kdy platí $\Delta L_{MZ} = L_{MZ} - L_{MZO}$. Hlavní výhodou této sestavy je připojení světelného zdroje k interferometru pomocí optického vlákna. To nám umožňuje velmi snadno měnit zdroje světla (polovodičový laser za zdroj bílého světla a naopak) a správně polohovat optický vzorek v měřicím rameni interferometru. Na základě odečtení vyrovnávací vlnové délky ze zaznamenaného interferogramu jsme následně určili skupinovou disperzi skleněného vzorku (stejně jako v případě Michelsonova interferometru) vloženého do testovacího ramene Machova-Zehnderova interferometru. Jelikož tloušťka vzorku je menší než limity rovnice (13), tj. skupinovou disperzi nelze měřit v samostatném Machově-Zehnderově interferometru (na rozdíl od případu např. křemenného krystalu o tloušťce $t = (40890 \pm 10) \mu\text{m}$ [13]), bylo využito tandemového uspořádání s Michelsonovým interferometrem. U této konfigurace byla nejprve nastavena pozice zrcadla 2 Michelsonova interferometru tak, aby bylo možno pozorovat interferenční proužky. Dráhový rozdíl ΔL_{MZ} v Machově-Zehnderově interferometru byl měněn pro analýzu ostatních interferenčních signálů tak, aby byla určena závislost vyrovnávací vlnové délky λ_0 na celkovém dráhovém rozdílu $\Delta L = \Delta L_{MZ} - 2\Delta L_M$. Jako příklad nám může posloužit obrázek 6, kdy spektrální interferenční signál byl zaznamenan pro dráhový rozdíl $\Delta L = 8537 \mu\text{m}$. Spektrální interferenční proužky bylo možno lokalizovat pouze v okolí vyrovnávací vlnové délky $\lambda_0 = 608,01 \text{ nm}$. Použitím rovnice (15) můžeme přesně určit skupinový index lomu $N(\lambda_0)$ skleněného vzorku jako funkci vyrovnávací vlnové délky λ_0 . Tato funkce je reprezentována na obrázku 7 křivky. Spolu s nimi je plnou čarou znázorněna závislost, kterou jsme získali měřením s použitím Michelsonova interferometru (viz obrázek 5). Vidíme velice dobrou shodu mezi výsledky obou měření.



Obr. 6 Zaznamenaný spektrální interferenční signál pro dráhový rozdíl $\Delta L = 8537 \mu\text{m}$ (tandemová sestava dvou interferometrů)



Obr. 7 Závislost skupinového indexu lomu na vlnové délce pro skleněný vzorek spolu s křivkou z obrázku 5

5. ZÁVĚR

V tomto článku byla použita metoda spektrální tandemové interferometrie pro měření skupinové disperze optického vzorku. Výše prezentovaná metoda využívá Michelsonův interferometr v tandemovém uspořádání s Machovým-Zehnderovým interferometrem a vzorkem, který je vložen do jeho měřicího ramene. V první části příspěvku byly prezentovány teoretické základy. V další části byly prezentovány metody a následně byly ukázány experimenty jak s jednotlivým (Michelsonovým) interferometrem, tak s tandemovým uspořádáním dvou interferometrů. Výsledky, které byly získány, potvrzují, že výše uvedená metoda založená na záznamu spektrální interferenčních signálů je jednoduchá a přesná.

Práce byla podpořena interním grantem VŠB-TU Ostrava (IGS HGF VŠB-TUO).

Literatura

- [1] BORN, M. - WOLF, E.: Principles of Optics. Cambridge, Cambridge University Press 1999.
- [2] KNOX, W. H. - PEARSON, N. M. - LI, K. D. - HIRLIMANN, C. A.: Interferometric measurements of femtosecond group delay in optical components. *Opt. Lett.*, 13, 1988, s. 574.
- [3] SÁINZ, C. *et al.*: Real time interferometric measurements of dispersion curves. *Opt. Commun.*, 110, 1994, s. 381.
- [4] KUMAR, V. N. - RAO, D. N.: Using interference in the frequency domain for precise determination of thickness and refractive indices of normal dispersive materials. *J. Opt. Soc. Am.*, B12, 1995, s. 1559.
- [5] DELBARRE, H. - PRZYGDZKI, C. - TASSOU, M. - BOUCHER, D.: High-precision index measurement in anisotropic crystals using white-light spectral interferometry. *Appl. Phys. B*, 70, 2000, s. 45.
- [6] NASSIF, A., Y.: Accurate measurement of refraction and dispersion of a solid by a double-layer interferometer. *Appl. Opt.*, 36, 1997, s. 779.
- [7] HLUBINA, P.: Měření efektivní tloušťky polopropustného zrcadla nevykompenzovaného Michelsonova interferometru měřením vyrovnávací vlnové délky. *JMO*, 46, 2001, s. 208.
- [8] HLUBINA, P.: Měření vyrovnávací vlnové délky a mezivodové disperze v optických vláknech s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. *JMO*, 47, 2002, s. 69.
- [9] LIANG, Y. - GROVER, C. P.: Modified white-light Mach-Zehnder interferometer for direct group-delay measurements. *Appl. Opt.*, 37, 1998, s. 4105.
- [10] HLUBINA, P.: Měření disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. *JMO*, 50, 2005, s. 196.
- [11] HLUBINA, P. - MARTYNKIEN, T. - URBANČZYK, W.: Měření disperze dvojlomu v optických vláknech s eliptickým jádrem s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. *JMO*, 49, 2004, s. 3.
- [12] KNYBLOVÁ L. - HLUBINA, P. - CIPRIAN, D.: Měření disperze skupinového indexu lomu řádné a mimořádné vlny v krystalu křemene pomocí spektrální interferometrie v bílém světle. *JMO*, 51, 2006, s. 138.
- [13] CHLEBUS, R. - HLUBINA, P. - CIPRIAN, D.: Direct measurement of group dispersion of optical components using white-light spectral interferometry. *Opto-Electron. Rev.*, 15, 2007, s. 144.
- [14] CHLEBUS, R. - HLUBINA, P. - CIPRIAN, D.: Spectral-domain tandem interferometry to measure the group dispersion of optical samples. *Opt. Las. Eng.*, přijato k publikaci.
- [15] HLUBINA, P.: Měření spektrální závislosti šířky odezvové funkce kompaktního spektrometru s využitím dvousvazkové interference v bílém světle. *JMO*, 47, 2002, s. 312.

Ing. Radek Chlebus., Institut fyziky, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: 597 323 666, fax: 597 323 403. e-mail: radek.chlebus.fmmi@vsb.cz.

Doc. RNDr. Petr Hlubina CSc., Institut fyziky, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: 597 323 403, fax: 597 323 139. e-mail: petr.hlubina@vsb.cz.

RNDr. Dalibor Ciprian Ph.D., Institut fyziky, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: 597 323 398, fax: 597 323 403. e-mail: dalibor.ciprian@vsb.cz.

Program konference

Středa 24. 9. 2008

- 9.00 hod. **Slavnostní zahájení**
- 9.10 hod. - 9.45 hod. **75 let tradice přerovské optiky a cesta do budoucnosti**
- 9.45 hod. - 10.00 hod. **Výuková a výzkumná činnost na katedře optiky PŘF UP**
Zdeněk Hradil, katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, UP v Olomouci
- 10.00 hod. - 10.15 hod. **Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR; současnost a spolupráce se společností Meopta – optika s.r.o. v zrcadle historie i perspektiv moderní optiky**
Miroslav Hrabovský, Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR, UP v Olomouci
- 10.15 hod. - 10.30 hod. **Studium optických vlastností kondenzovaných látek na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity**
Eduard Schmidt, Ústav fyziky pevných látek, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
- 10.30 hod. - 10.45 hod. **Fyzikální elektronika a nanotechnologie – nový obor na VUT v Brně**
Pavel Tománek, Ústav fyziky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně
- 10.45 hod.-11.00 hod. **Systémy pro generaci nedifrakčních svazků a přenos mechanických účinků světla – výsledky spolupráce tří institucí projektu Tandem.** Zdeněk Lošťák, Zdeněk Bouchal, Pavel Zemánek, Meopta-optika, s.r.o., katedra optiky UP Olomouc, ÚPT AV ČR
- 11.15 hod. - 12.00 hod. **Vybrané směry rozvoje aplikované optiky**
Antonín Mikš, katedra fyziky, Fakulta stavební, ČVUT Praha
- 13.30 hod. - 14.15 hod. **Advanced technologies in precision optics manufacturing - view to 2015**
Rolf Rascher, Fachhochschule Deggendorf, Deggendorf, Německo
- 14.15 hod. - 14.30 hod. **Optické technologie v Meoptě - včera, dnes a zítra.** Stanislav Michal, Meopta-optika, s.r.o.
- 14.30 hod. - 14.45 hod. **Metody Monte Carlo v praxi optického konstruktéra Meopty**
Vlastislav Svoboda, Meopta-optika, s.r.o.
- 15.00 hod.-15.30 hod. **Mikroskopové adaptéry pro optické chytání, mikrodisekci a excitaci v biologických experimentech**
Mojmír Šerý, Antonín Pochylý, Milan Kalman, Zdeněk Lošťák, Pavel Zemánek, Ústav přístrojové techniky AV ČR, Meopta-optika, s.r.o.
- 15.30 hod. - 15.45 hod. **Realizace dynamické laserové pinzety s využitím prostorového modulátoru světla**
Radek Čelechovský, katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, UP v Olomouci
- 15.45 hod. - 16.00 hod. **Pokročilé optické mikromanipulační techniky.** Pavel Zemánek, Ústav přístrojové techniky AV ČR
- 16.00 hod. - 16.15 hod. **Holografické zobrazení v optické mikroskopii.** Radim Chmelík, Hana Janečková, Luděk Lovicar, Ústav fyzikálního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně
- 16.30 hod. - 16.45 hod. **Syntetické optické difrakční prvky**
Pavel Fiala, Marek Škereň, Milan Květoň, David Najdek, katedra fyzikální elektroniky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT Praha

- 16.45 hod. - 17.00 hod. **Má záporný index lomu nějaký význam pro praktickou optiku?**
Miroslav Miler, Helena Hiklová, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR
- 17.00 hod. - 17.15 hod. **Principy a perspektivy singulární optiky**
Zdeněk Bouchal, Katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, UP v Olomouci
- 17.15 hod. - 17.30 hod. **První výsledky projektu AUGER v článku pro časopis SCIENCE**
Petr Schovánek, Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR, UP v Olomouci
- 20.00 hod. **Optické úkazy na obloze**
Jiří Bajer, katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, UP v Olomouci. Duha, koróna, gloriola, haló, zelený záblesk a další optické úkazy na obloze, jejich vznik, vysvětlení a krásné obrázky.
- 21.00 hod. **Zrození dalekohledu**
Vladimír Chlup, katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, UP v Olomouci
Co předcházelo 25. září roku 1608 a co následovalo krátce poté.

Čtvrtek 25. 9. 2008

- 8.00 hod. - 8.45 hod. **Moderní optika v Olomouci**
Jan Peřina, katedra optiky a Společná laboratoř optiky, UP a FZÚ AV ČR v Olomouci
- 8.45 hod. - 9.00 hod. **Optické kvantové zpracování informace**
Jaromír Fiurášek, katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, UP a FZÚ AV ČR v Olomouci
- 9.00 hod. - 9.15 hod. **Experimentální zpracování kvantové informace pomocí optických hradel**
Antonín Černocho, Jan Soubusta, Lucie Bartůšková, Jaromír Fiurášek, Miloslav Dušek
Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR, katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, UP v Olomouci
- 9.15 hod. - 9.30 hod. **Metody sčítání fotonů**
Ondřej Haderka, Jan Peřina Jr., Martin Hamar, Václav Michálek. Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR, UP v Olomouci
- 9.45 hod. - 10.00hod. **Užití metody korelace polí koherenční zrnitosti pro měření v mechanice.** Petr Šmíd, Pavel Horváth, Miroslav Hrabovský, Ivana Vašková. Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR
- 10.00 hod. - 10.15hod **Elipsometrie s totálním odrazem**
Jaromír Pištora, Jaroslav Vlček, Michal Lesňák, Institut fyziky, Institut matematiky a deskriptivní geometrie, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
- 10.15 hod.-10.30 hod. **Uhlově závislá elipsometrie pro VUV spektrální obor.** Alexander Dejnecka, Fyzikální ústav Akademie věd České republiky
- 10.30 hod. - 10.45 hod. **Růst diamantových tenkých vrstev pro základní výzkum a průmyslové aplikace**
Alexander Kromka, Jiří Potměšil, Milan Vaněček. Fyzikální ústav Akademie věd České republiky
- 11.00 hod. - 11.15 hod. **Ultrarychlá laserová spektroskopie**
Petr Malý, katedra chemické fyziky a optiky, Matematicko-fyzikální fakulta, UK Praha
- 11.15 hod. - 11.30 hod. **Optika na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT.** Pavel Fiala, Marek Škereň, katedra fyzikální elektroniky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT Praha

(Pokračování na 3. str. obálky)

CONTENTS

Bosch Rexroth inaugurated its new division (P. Kapitáník)	195
Rexroth camoLINE – Cartesian modular system integrates pneumatic, mechanical and electrical functions (T. Bořil).....	196
You have ideas, we have solutions... (M. Hrubý).....	199
Testing of photovoltaic system with enhanced effectivity under real operation conditions (M. Libra, V. Poulek).....	201
Czech Metrological Society – list of events for September – December 2008 (Z. Tůma).....	203
Two basic theoretical models of the electronic magnetoresistance of an electrically conductive mesoscopic thin layer (J. Pospíšil, F. Pluháček)	204
The influence of a homogeneous magnetostatic field to the transfer of electrons in an homogeneous electrically conductive metallic or semiconductor mesoscopic thin layer is discussed in this article. For such a purpose, the two adequate basic theoretical conduction models, relating to its electrical resistivity and mobility, concentration and density of energetic quantum states of presented electrons, are utilized. They contain the classical Drude model, applicable to a weak longitudinal and transversal magnetoresistance, and the quantum Shubnikov – de Haas model, exploitable to a strong longitudinal magnetoresistance. The formulae presented declare some specific magnetoresistance properties of mesoscopic electrically conductive thin layers with actual practical importance for next miniaturization, development and investigation of new integrated electronical, opto-electronical and electro-optical systems.	
Operational employment of Optosurf sensors for reliability surface performance (R. Brodmann, B. Brodmann, P. Kracík, K. Tlášek, D. Smutný)	209
The method of diffused light is complements the traditional contact measuring methods and supports a surface characterization using simple parameters. The high measurement rate allows 100% control and verification performance reliability of all parts. In this way it is possible to characterize considerably better for instance slide surfaces.	
Radiometers and photometers (P. Oupický).....	211
Recently I have accomplished an article dealing with photometers [12], more than 10 years developed and produced in the	

Optical development workshop of the Academy of Sciences of the Czech Republic. My oponent's argumentation against some terms provoked me to immerse more deeply into the terminology what finally gave rise to the fundamental article corrections. In course of time I found on web an article of prof. James M. Palker devoted to the photometry and radiometry which attracted my interest. Using his ideas I altered my terminology and renamed the photometry as radiometry (and later the radiometry was tentatively replaced by photonmetry, see this article conclusions) and I concluded that I was not alone being lost in this area and it will be useful for the Czech technical community to think hard about used terms and to try to unify the terminology step by step. The prof. J. M. Palmer's article involves a lot of other interesting ideas which can be very useful also for our experts in practical fields. Therefore I am attempting here to translate his basic thesis in the most understandable manner.

Ing. Igor BREZINA in his seventies (Red.).....	214
---	-----

Media with negative refractive index (M. Miler, H. Hiklová).....	215
--	-----

The article describes behavior of electromagnetic radiation passing through negative refractive index material. Such material doesn't exist in the nature and almost nobody interested in it's theory for long time. Interest in this new medium has been increasing since the beginning of this century when several artificial samples were made and described their their extraordinary features.

Engineering measurement technique (Č. Nenáhlo).....	220
--	-----

This article describes some state-of-the-art tendencies in the engineering measurement technique related especially to the production progress and quality control. These tendencies are documented by the examples of modern measurement equipments.

Measurement of an optical element group dispersion using a spectral tandem white light interferometry (R. Chlebus, P. Hlubina, D. Ciprian).....	223
---	-----

In this article we present theoretically and experimentally a new measurement method of an optical element group dispersion using a spectral tandem white light interferometry, when two interferometers are used in tandem. Here we employ Michelson and Mach-Zehnder interferometers with an optical element of known thickness placed in one of their arms. From the recorded spectral interference signals there is deduced the balanced wavelength, for which the total group optical path difference between the beams is vanishing. From the experimental data the group dispersion of the glass sample was determined in accordance with the measurement results obtained using the Michelson interferometer only.

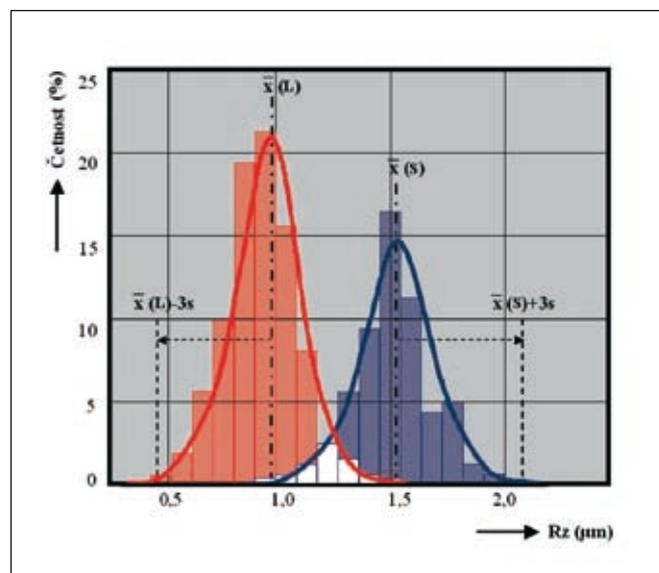
Oprava

V čísle 4/2008 časopisu JMO bylo v anglickém obsahu (CONTENTS) uvedeno chybně jméno recenzenta knihy Multisenzorová souřadnicová měřicí technika. Správný text zní: From technical library (I. Brezina). Děkujeme za pochopení a autoru recenze se omlouváme.

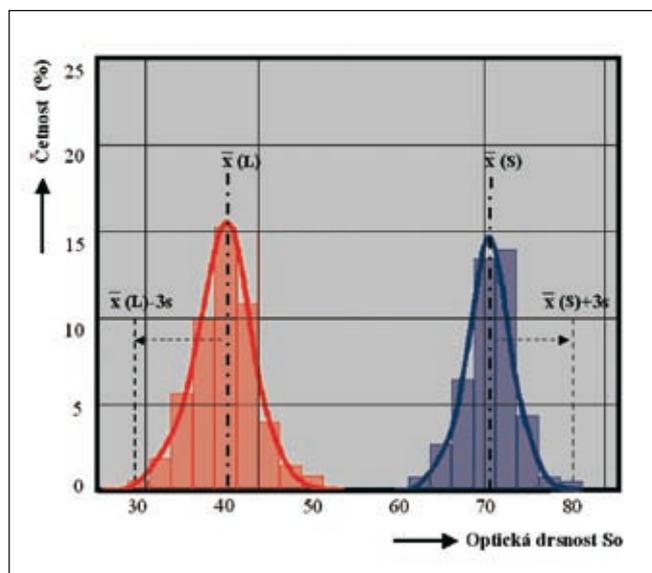
Redakce

Obrázky k článku Provozní nasazení senzorů Optosurf při kontrole funkčnosti povrchů

(str. 209 - 210)



Obr. 3 Měření povrchu dotykovou metodou. Hodnoty R_z u finišovaných hřídelí (červeně), u broušených hřídelí (modře), oblast překrytí (bíle)



Obr. 4 Měření povrchu systémem QS 500. Hodnoty S_o u finišovaných hřídelí (červeně), u broušených hřídelí (modře)

Program konference

(Dokončení ze str. 227)

11.30 hod. - 11.45 hod. **Solární fotovoltaický systém se zvýšenou účinností**

Martin Libra, katedra fyziky, Technická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze

11.45 hod. - 12.00 hod. **Evropská optická společnost (EOS) – hybná síla optiky v Evropě**

Pavel Tománek, Ústav fyziky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně

13.30 hod. - 13.45 hod. **Optické vlastnosti rohovky lidského oka**

František Pluháček, katedra optiky, Přírodovědecká fakulta, UP v Olomouci

13.45 hod. - 14.00 hod. **Aplikace optických topografických metod v medicíně**

Dušan Mandát, Miroslav Hrabovský, Tomáš Rossler, Michal Pochmon, J. Gallo, Vítězslav Havránek, Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR

14.00 hod. - 14.30 hod. **Optické vlastnosti tenkých vrstev průhledných vodivých oxidů měřené metodou PDS**

Zdeněk Remeš, Fyzikální ústav Akademie věd České republiky

14.30 hod. - 14.45 hod. **Zkušenosti s moderním optickým monitoringem tenkých vrstev na aparaturách Syrus firmy Leybold Optics**

Jiří Jankuj, Jaromír Březina, Tomáš Konkol Meopta-optika, s.r.o.

14.45 hod. - 15.00 hod. **Antireflexní vrstvy pro barvodělicí hranolové soustavy.** Pavel Obdržálek, Jiří Zdráhal, Meopta - optika, s.r.o.

15.15 hod. - 15.30 hod. **Živá optika - aplikace aktivní a adaptivní optiky v konstrukcích astronomických dalekohledů**

Josef Zicha, katedra přístrojové a řídicí techniky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze

15.30 hod. - 15.45 hod. **Interferometrické metody analýzy fáze vlnových polí v optice**

Jiří Novák, katedra fyziky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze

15.45 hod. - 16.00 hod. **Gradientní metody analýzy fáze vlnových polí v optice**

Pavel Novák, katedra fyziky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze

16.00 hod. - 16.30 hod. **Využití Shack Hartmannova senzoru pro měření optických soustav**

Milan Vraštil, Meopta - optika, s.r.o.

16.30 hod. - 16.45 hod. **Optické soustavy datových projektorů**

Mojmír Havlík, Josef Hnilo, Meopta-optika, s.r.o.

16.45 hod. - 17.00 hod. **Optické systémy na současném bojišti**

Vladimír Chlup, Pramacom-HT, spol. s r.o.

Pátek 26. 9. 2008

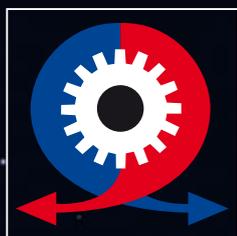
9.00 hod. - 11.00 hod. Prohlídka vývojových, technologických a výrobních pracovišť společnosti Meopta - optika, s.r.o.

Sylaby příspěvků obdrží účastníci konference při registraci v den zahájení konference. Případné další informace budou zveřejněny na www.meopta.com.

FESTO

Vítejte!

Přijďte si prohlédnout na náš stánek novinky z oblastí:
elektrické pohony, procesní technika, cenově atraktivní
výrobky pro základní aplikace a systémy pro úspory energie.
Těšíme se na vás v hale F, stánek 23.



MSV 2008

15. – 19. 9. 2008
hala F | stánek 23