

**3**  
**2006**

# JMO

## JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA FINE MECHANICS AND OPTICS

**PREZENTACE ČESKÉ OPTIKY A MECHANIKY**



ISSN 0447-6441  
Index 46 723

**me opta**

**...KVALITNÍ VÝROBKY JSOU ZÁRUKOU ÚSPĚCHU**

# PŘIHLASTE SE NYNÍ!

## MSV BRNO 18. - 22. 9. 2006

Uzávěrka **31. 3. 2006**

Záštita:



Svaz průmyslu  
a dopravy ČR



MSV 2006

48. mezinárodní  
strojírenský  
veletrh

**AUTOMATIZACE**

Měřicí, řídicí, automatizační  
a regulační technika



IMT 2006

5. mezinárodní  
veletrh obráběcích  
a tvářecích strojů

Veletrhy Brno, a.s.  
Výstaviště 1  
CZ - 647 00 Brno  
Tel.: +420 541 152 926  
Fax: +420 541 153 044  
msv@bv.v.cz  
imt@bv.v.cz  
www.bv.v.cz/msv  
www.bv.v.cz/imt

BVV



Veletrhy  
Brno

## Zaostřeno na MSV 2006

Největší průmyslová přehlídka v zemích „nové“ Evropy - 48. mezinárodní strojírenský veletrh MSV a 5. mezinárodní veletrh obráběcích a tvářecích strojů IMT - se uskuteční v tradičním termínu od 18. do 22. září 2006. Mezinárodní strojírenský veletrh bude rozdělen do deseti specializovaných oborových celků, které společně poskytnou ucelený přehled jak o nabídce produktů a služeb, tak o vývojových trendech klíčových oblastí průmyslové výroby. Do náplně letošního MSV patří také obory, které jsou v lichých letech prezentovány na bienálním mezinárodním veletrhu Transport a Logistika. Nechybí samozřejmě ani obor Elektronika, automatizace a měřicí technika.

Hlavním tématem MSV 2006 bude čtvrtý ročník průřezového projektu Automatizace - bienální prezentace měřicí, řídicí, automatizační a regulační techniky vystavované v rámci všech veletržních oborů. Koná se od roku 2000 vždy v sudých letech a stejně jako veletrhy MSV a IMT je největší oborovou přehlídkou v regionu střední Evropy. Projekt Automatizace je členem Sdružení světových veletrhů automatizační techniky World F.I.M.A. - nezávislé organizace, která sdružuje osmnáct nejvýznamnějších veletrhů automatizační techniky pořádaných v osmnácti zemích čtyř kontinentů. Třetí ročník Automatizace proběhl roce 2004 za účasti 532 firem ze 16 zemí (téměř 22 % zahraničních) na čisté výstavní ploše 7 821 m<sup>2</sup>. Další 232 firem vystavujících na ploše 7 028 m<sup>2</sup> označilo Automatizaci za svůj vedlejší obor.

Od roku 1998 se v sudých letech souběžně s MSV koná Mezinárodní veletrh obráběcích a tvářecích strojů IMT. Jako největší událost svého druhu ve střední a východní Evropě je pořádán s podporou Evropského výboru pro spolupráci v průmyslu obrábění a tváření CECIMO.

Doprovodný program veletrhů MSV a IMT bude sestavován ve spolupráci a za garance předních oborových sdružení v čele se Svazem výrobců a dodavatelů strojírenské techniky a Českomoravskou elektrotechnickou asociací. Vystavovatelé se opět mohou zapojit do prestižních soutěží o Zlaté medaile a AURA - Efektivní veletržní účast. Připravují se také některé zajímavé novinky, o kterých ještě budeme informovat. Přihlášení vystavovatelé dostanou možnost bezplatně prezentovat svou firmu, produkty či služby na PR portálu, který je součástí webových stránek veletrhu.

Pro ty, kteří neváhají se svou účastí na veletrhu, je opět připraveno cenové zvýhodnění včasné přihlášky, které končí 31. března 2006.

Více informací na <http://www.bvv.cz/msv>

## REDAKČNÍ RADA

**Předseda:** RNDr. Miloslav VYCHODIL, CSc., Meopta-optika, a.s., Přerov

**Členové:** RNDr. Ing. Ján BARTL, CSc., ÚM SAV, Bratislava, doc. Dr. RNDr. Zdeněk BOUCHAL, UP, Olomouc, Ing. Igor BREZINA, Bratislava, Ing. Jan DUPÁK, CSc., ÚPT AV ČR, Brno, prof. Ing. Pavol HORŇÁK, DrSc., STU, Bratislava, Ing. Libor HOVORKA, H & H hodinářská s.r.o., Nové Město nad Metují, prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc., SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, RNDr. Vladimír CHLUP, Olomouc, RNDr. Lubomír JASTRABÍK, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, RNDr. Karol KAROVIČ, DrSc., Předsednictvo SAV, Bratislava, RNDr. Pavel KLENOVSKÝ, Český metrologický institut, Brno, RNDr. Josef KRÁSA, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, Ing. Jiří KRŠEK, VUT, Brno, RNDr. Vojtěch KRĚSÁLEK, CSc., UTB, Zlín, Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno, doc. Ing. Martin LIBRA, CSc., ČZU, PRAHA, prof. RNDr. Miroslav LIŠKA, DrSc., VUT, Brno, RNDr. Zdeněk LOŠŤÁK, Meopta-optika, a.s., Přerov, doc. Ing. Petr LOUDA, CSc., TU, Liberec, Ing. Vladimír MATELA, Meopta-optika, a.s., Přerov, prof. RNDr. Jan PEŘINA, DrSc., UP, Olomouc, prof. Ing. Jaromír PIŠTORA, CSc., VŠB - TU, Ostrava, prof. RNDr. Ing. Jaroslav POSPÍŠIL, DrSc., UP, Olomouc, Jan ŘÍDKÝ, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, RNDr. Dagmar SENDERÁKOVÁ, CSc., UK, Bratislava, 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.; Gisbert O. SCHAUER, Sylvania Lighting International, Erlangen, Germany; 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 za spoluúčasti The International Society for Optical Engineering (SPIE/CS) v Nakladatelství Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky.

**Ředitel FZÚ AV ČR:** Ing. Karel JUNGWIRTH, DrSc.

**Odpovědný zástupce vydavatele:** Jan ŘÍDKÝ, CSc.

**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: pelclova@optnw.upol.cz

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

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

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

**Rozšiřuje** vydavatel, Podniková prodejna Meopta-optika, a.s., Přerov, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov a KNIHKUPECTVÍ ACADEMIA, Václavské nám. 34, 110 00 Praha 1.

**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.uts.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 2006

# JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS  
ROČNÍK 51 3/2006

## OBSAH

**Fázová charakteristika femtosekundových impulzů a její vliv na dvojfotonovou fluorescenci** (A. Gaál, I. Bugár, D. Velič, F. Uherek).....63

**Technické prostředky pro měření a řízení parametrů tepelné pohody** (J. Pálka, F. Hruška) .....67

**Aplikace ortogonálních polynomů v teorii optického zobrazení** (A. Mikš, J. Novák).....71

**Reflexní, absorpční a rozptylové světelné jevy a efekty zčervenání zemin ve vztahu k jejich obsahu haematitu** (J. Pospíšil, J. Hrdý, J. Hrdý, jr.) .....76

**Koncentrace záření v solárních fotovoltaických systémech** (M. Libra, V. Poulek) .....82

**Z historie a současnosti optické dílny Akademie věd v Turnově** (Z. Melich) .....86

**SHOT Show 2006** (M. Slaný) .....88

**Veletrh vodičů, světlovodů a trubek** (jpe) .....88

**Komentář k „Poznámce k článku Mikrokanálové plátky – MCP“** (T. Medřík) .....89

**4. mezinárodní sympozium laserových, scintilačních a nelineárních optických materiálů**.....89

**Inovační technologie na HANNOVER MESSE** (jpe) .....90

**Podpora sebezaměstnání jako prevence nezaměstnanosti absolventů odborných škol** (K. Nevřalová) .....90

**Z technické knihovny** (I. Brezina) .....91

**Přirůsteky knihovny SPIE/CS** .....92

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

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

Cena čísla 40 Kč včetně DPH

## ADVISORY BOARD

**Chairman:** Miloslav VYCHODIL - Meopta-optika, a.s., 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.), Jan DUPÁK - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Pavol HORNÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Ing. Libor HOVORKA, H & H hodinářská s.r.o., Nové Město nad Metují, Miroslav HRABOVSKÝ - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP - Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRABÍK - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Karol KAROVIČ - Presidium of the Slovak Academy of Science, Bratislava (Slovak Rep.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Josef KRÁSA - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch KŘESÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric., Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠŤÁK - Meopta-optika, a.s., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, a.s., Přerov (Czech Rep.), Jan PEŘINA - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jaromír PIŠTORA - Tech. Univ., Ostrava (Czech Rep.), Jaroslav POSPÍŠIL - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jan ŘÍDKÝ - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Dagmar SENDEŘÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak rep.), Karel STUDENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen (Germany), Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Paul RAUSNITZ, TCI New York, U. S. A.; Gisbert O. SCHAUER, Sylvania Lighting International, Erlangen, Germany; 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:** Karel JUNGWIRTH

**Editor:** Jan ŘÍDKÝ

**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: pelclova@optnw.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, a.s., 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 2006

# FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL  
VOLUME 51 3/2006

## CONTENTS

**Phase characteristics of fs pulses and its influence on two photon fluorescence** (A. Gaál, I. Bugár, D. Velič, F. Uherek).....63

**Embedded system for measurement and control of thermal comfort parameters** (J. Pálka, F. Hruška).....67

**Application of orthogonal polynomials in optical imaging theory** (A. Mikš, J. Novák).....71

**Light reflection, absorption, scattering and redness effects of soils in relationship to their haematite content** (J. Pospíšil, J. Hrdý, J. Hrdý, jr.) .....76

**Koncentrace záření v solárních fotovoltaických systémech** (M. Libra, V. Poulek).....82

**History of the Optical Workshop of Academy of Sciences CR in Turnov** (Z. Melich).....86

**SHOT Show 2006** (M. Slaný) .....88

**Wire, optical cable and pipe fair** (jpe).....88

**Commentary on "Remarks to the article Microchannel plates - MCP"** (T. Medřík).....89

**4<sup>th</sup> International Symposium on Laser, Scintillator and Non Linear Optical Materials** .....89

**Inovační technologie na HANNOVER MESSE** (jpe).....90

**Podpora sebezaměstnání jako prevence nezaměstnanosti absolventů odborných škol** (K. Nevřalová) .....90

**From technical library** (I. Brezina) .....91

**SPIE/CS library acquisition** .....92

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

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

Price for single copy: 40 Kč incl. VAT

# Fázová charakteristika femtosekundových impulzov a jej vplyv na dvojfotónovú fluorescenciu

*Táto práca sa zaoberá diagnostikou fázovej charakteristiky femtosekundových laserových impulzov a jej ovplyvňovaním pre zväčšenie nelineárneho optického signálu. Predstavujeme jednoimpulznú techniku komplexnej diagnostiky SPIDER, pracujúcu na báze interferencie v spektrálnej oblasti. Fázová charakteristika vyšetovaných impulzov bola ovplyvňovaná pomocou mimorezonátrovej dvojhranolovej sústavy. Bolo ukázané, že zmena fázovej charakteristiky femtosekundových excitačných impulzov vedie k zmene intenzity dvojfotónovej fluorescencie kumarínu C522 v etanole.*

## 1. ÚVOD

Laserové impulzy, ktorých dĺžka je v oblasti piko- alebo femtosekúnd (fs), nazývame ultrakrátkymi impulzmi. Majú široké využitie v nelineárnej optike, napríklad pri frekvenčnej konverzii, pri stimulovaných a viacfotónových procesoch alebo pri nelineárnej optickej spektroskopii. Vďaka fs laserovým impulzom sa otvorili nové horizonty aj pre časovo rozlíšenú spektroskopiu. Molekulárne vibrácie sa odohrávajú na tejto časovej škále a práve preto fs laserové impulzy poskytujú možnosť inicializovať, sledovať a koherentne riadiť veľmi rýchle molekulárne procesy [1]. Koherentné riadenie (Coherent Control) znamená interakciu svetla s materiálom tak krátko po jeho excitácii, že vlnová funkcia excitovanej molekuly interferuje s riadiacim impulzom. Historicky prvé pokusy koherentného riadenia boli zamerané na zvýšenie fluorescenčnej intenzity [2]. Skúmala sa fluorescencia molekuly jódu, po trojfotónovej absorpcii fs excitačných impulzov. Bolo ukázané, že pri koherentnej interakcie svetla s materiálom hrá dôležitú úlohu nielen dĺžka ale aj fázová charakteristika použitých excitačných impulzov. Na základe teoretických výpočtov bolo zistené, že časová závislosť frekvencie ideálnych impulzov by mala mať klesajúcu tendenciu. Laserom indukovaná fluorescencia molekuly jódu potvrdila teóriu, keďže sa získala intenzívnejšia fluorescencia pri použití excitačného impulzu s klesajúcou frekvenciou v čase [3]. Na zvýšenie účinnosti chemických reakcií sa dnes používajú amplitúdovo a fázovo tvarované impulzy [4]. Progresívny smer koherentného riadenia reprezentujú práce [5, 6], kde najmä zavedenie kladnej spätnej väzby do procesu tvarovania impulzov sľubuje nádejnú cestu vývoja v syntéze nových materiálov. Kladná spätná väzba znamená, že sa napr. sledujú produkty reakcie hmotnostným spektrometrom a výsledky sú použité na tvarovanie alebo modulovanie impulzov, ktoré interagujú s východiskovými látkami. S týmto spôsobom sa dá veľmi účinne zvýšiť výťažok študovaných reakcií. Metóda bola úspešne aplikovaná aj pre zvýšenie nelineárneho optického signálu, napríklad pri generácii vysokých harmonických frekvencií v plynch [7], alebo pri dvojfotónovej fluorescencii roztoku farbív [8].

Komplexná časová závislosť elektromagnetického poľa ultrakrátkeho impulzu sa dá opísať pomocou vzťahu

$$\Psi(t) = A(t)e^{i(\omega t - \mathbf{k}r + \varphi)} \quad (1)$$

kde  $A(t)$  je amplitúda,  $\omega$  je kruhová frekvencia,  $t$  je čas,  $\mathbf{k}$  je vlnový a  $r$  je priestorový vektor a  $\varphi$  je fáza. Prvé diagnostické techniky boli zamerané výlučne na meranie amplitúdovej obálky  $A(t)$  impulzov. Vo všeobecnosti však časová závislosť fázy resp. frekvencie impulzov nemusí byť konštantná. V prípade monotónnej frekvenčnej zmeny hovoríme o „chirp“ impulze, ktorý vznikne napríklad pri kvadratickej závislosti fázy od času

$$\varphi(t) = \pm R t^2. \quad (2)$$

V prípade keď  $R > 0$ , frekvencia impulzu sa zväčšuje v čase, hovorí sa o kladnom „chirp“ a v prípade  $R < 0$  o zápornom „chirp“ impulze.

Určiť fázovú charakteristiku impulzov nie je triviálne, lebo perióda oscilácie elektromagnetického poľa pri 800 nm je iba 2,6 fs. Keďže elektronickými prístrojmi sa už nedajú sledovať fs intervaly, boli vyvinuté optické techniky na realizáciu meraní fázovej charakteristiky fs impulzov. Patrí sem napríklad technika SPIDER (Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction), ktorá pracuje v spektrálnej oblasti a časové charakteristiky sú získané pomocou Fourierovej transformácie [9,10]. V tejto práci predstavujeme komplexnú (amplitúdovo-fázovú) diagnostiku fs laserových impulzov pomocou techniky SPIDER. Ukážeme ako bola fázová charakteristika fs impulzov ovplyvňovaná pomocou dvojhranolovej sústavy. Experimentálne výsledky poukazujú na závislosť medzi fázovou charakteristikou excitačných impulzov a intenzitou nelineárneho optického signálu, dvojfotónovej fluorescencie.

## 2. AMPLITÚDOVÁ A FÁZOVÁ DIAGNOSTIKA

Problém diagnostiky ultrakrátkych impulzov spočíva v tom, že ich intenzitná obálka  $I(t) = A^2(t)$  sa nedá zaregistrovať štandardnými elektronickými prístrojmi. Preto sa rozšírili korelačné techniky nelineárnej optiky, pri ktorých sa dĺžka impulzov získa z korelačnej funkcie. Pre ich jednoduchosť a vysoké časové rozlíšenie sa tieto techniky dodnes používajú pri meraní charakteristík veľmi krátkych impulzov. Pre tento účel sa dá využiť ľubovoľný optický jav s registrovateľnou nelineárnou odozvou. V prípade nelineárnych javov súčet odoziev systému na jednotlivé impulzy je iný ako odozva súčtu v tom istom čase dopadajúcich impulzov. Vzájomným oneskorením impulzov sa dá dosiahnuť spojitý prechod medzi dvoma krajnými odozvami systému. Historicky prvé merania boli uskutočnené korelačnou technikou s využitím generácie druhej harmonickej frekvencie SHG (Second Harmonic Generation). Meraním nelineárnej odozvy pri vzájomnom oneskorení dvoch kópií impulzov dostaneme autokorelačnú funkciu druhého rádu

$$G^{(2)}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t - \tau)dt \quad (3)$$

kde  $\tau$  je oneskorenie medzi dvoma kópiami. Dĺžka impulzov  $\tau_p$  sa dá vypočítať zo šírky autokorelačnej funkcie, keď je známy tvar intenzitnej obálky impulzu [11]. Autokorelačná funkcia sa dá získať aj bez použitia nelineárneho procesu meraním interferenčného kontrastu dvoch oneskorených kópií impulzu pomocou ľubovoľného interferometra [12]. Nevýhoda tejto techniky oproti nelineárnym technikám je v tom, že kontrast závisí aj od fázy a nielen od amplitúdy. Preto sa dá táto technika použiť iba v prípade, keď časová závislosť frekvencie impulzov je konštantná.

Zmena fázy a frekvencie optického poľa v čase je však obvyklým javom v prípade fs impulzov. Diagnostika týchto zmien sa začala po rozšírení fs laserov a vznikli dva smery. Techniky prvého smeru fungujú na princípe spektrálnej analýzy autokorelačného signálu. V prípade druhého smeru je využívaná korelácia po spektrálnom rozložení impulzu. Najčastejšie používaná technika FROG (Frequency resolved optical gating) reprezentuje prvý smer. Pri jej použití sa dá aj jednoimpulzným experimentálnym usporiadaním získať komplexná, amplitúdovo-fázová charakteristika impulzu. Zaznamenáva sa dvojdimenzionálny obraz autokorelačného signálu s časovou a frekvenčnou osou. Amplitúdovo-fázová charakteristika impulzu je výsledkom zložitého iteračného výpočtu. Do druhého smeru patrí technika SPIDER, použiteľná aj v oblasti sub-10 fs impulzov. Pri používaní SPIDER techniky treba uskutočniť dve paralelné merania spektrálnej amplitúdy a fázy. Výsledná fázová charakteristika sa získa jednoduchým algebraickým výpočtom.

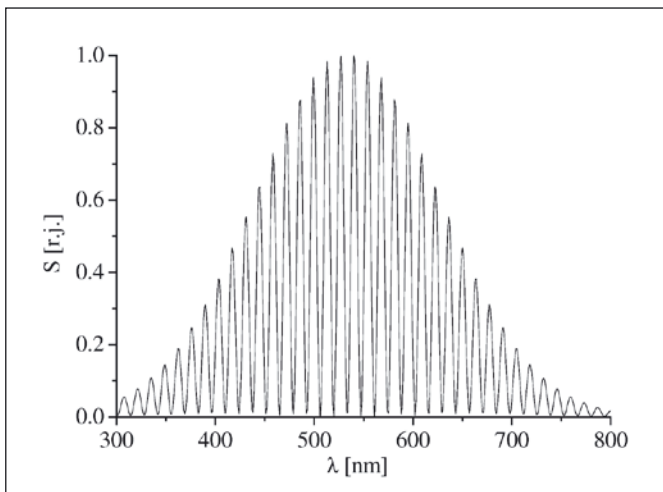
### 3. SPIDER

Podstata techniky SPIDER spočíva v spektrálnej interferencii dvoch frekvenčne posunutých impulzov. Frekvenčný posun je realizovaný pomocou nelineárneho kryštálu, v ktorom dve časovo oneskorené kópie vyšetřovaného impulzu sú zmiešané jedným časovo rozťahnutým impulzom s chirp-om. Rozťahnutý impulz vzniká v dvojmríčkovej sústave a prekrížiže vzájomne oneskorené kópie pod malým uhlom  $\alpha$  v nelineárnom kryštáli. Časové oneskorenie impulzov  $\tau$  v nelineárnom kryštáli je prevedené na spektrálny posun pomocou generácie súčtovej frekvencie SFG (Sum Frequency Generation). Získajú sa tak konvertované impulzy, ktorých stredná frekvencia bude blízka  $2\omega_0$ , kde  $\omega_0$  je stredná frekvencia skúmaných impulzov. Ich frekvenčný posun  $\Omega$  prislúcha zmene frekvencie rozťahnutého impulzu za čas  $\tau$ .

Po vstupe SPIDER signálu do spektrometra sa vytvorí spektrálny interferogram (obr. 1), ktorý je opísaný vzťahom

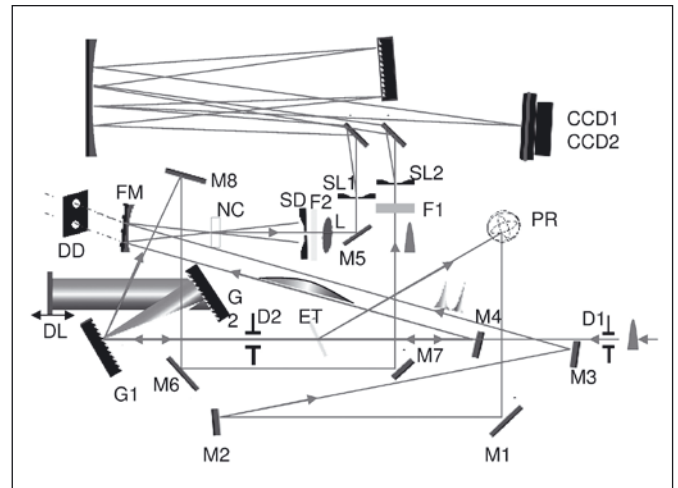
$$S(\omega) = |E(\omega)|^2 + |E(\omega + \Omega)|^2 + 2|E(\omega)|^* |E(\omega + \Omega)| \cdot \cos[\nu(\omega + \Omega) - \nu(\omega) + \omega\tau] \quad (4)$$

kde  $E(\omega)$  je komplexná reprezentácia elektrického poľa skúmaného impulzu,  $\Phi(\omega)$  je spektrálna fáza prvej kópie impulzu a  $\Phi(\omega + \Omega)$  je spektrálna fáza druhej kópie impulzu. Prvé dva členy na pravej strane vzťahu udávajú individuálne spektrum dvoch frekvenčne konvertovaných impulzov. Tretí interferenčný člen má oscilujúci charakter v závislosti od frekvencie  $\omega$ . Presná poloha extrémov pri tom závisí aj od fázového rozdielu medzi spektrálnymi komponentmi interferujúcich impulzov rozdielom  $\Omega$ . Komplexná diagnostika si vyžaduje záznam troch spektier: hlavného, referenčného a signálového. Hlavné spektrum je samotné spektrum vyšetřovaného impulzu



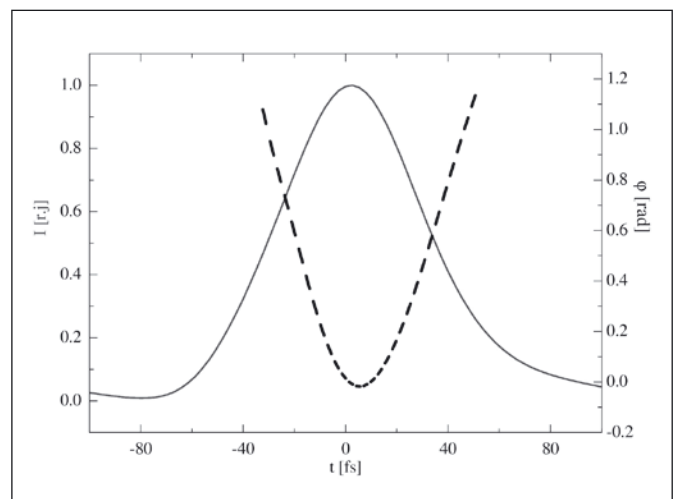
Obr. 1 Spektrum SPIDER signálu

a určuje sa z neho spektrálna amplitúda. Pre získanie referenčného spektra treba pootočiť nelineárny kryštál tak, aby bola generovaná druhá harmonická frekvencia dvoch vzájomne oneskorených impulzov. Týmto spôsobom vznikne spektrálny interferogram bez frekvenčného posunu medzi jednotlivými kópiami. Spektrálna fáza sa určuje z porovnania polohy extrémov referenčného a signálového spektra. Časová závislosť amplitúdy  $A(t)$  a fázy  $\phi(t)$  sa získava z  $A(\omega)$  a  $\phi(\omega)$  pomocou Fourierovej transformácie.



Obr. 2 Schéma prístroja SP - 0,8 - 30.  
ET – etalon, M - zrkadlo, FM – fokusačné zrkadlo, D - clona, DL – oneskorovacia línia, DD – dvojitá clona, G – mriežka, PR – periskop, SL – štrbina, F – filter, L – šošovka, NC – nelineárny kryštál

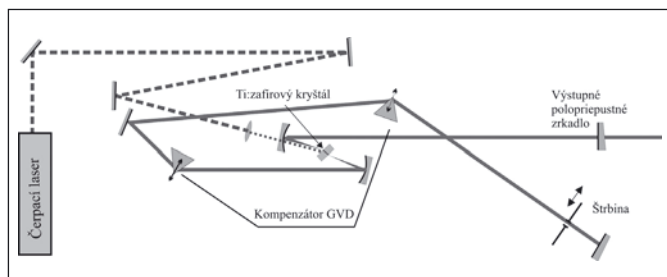
Na získanie komplexnej charakteristiky fs impulzov bol použitý komerčný prístroj CDP SP-0,8-30, znázornený na obr. 2. Rekonštrukcia a vyhodnotenie spektier bola uskutočnená pomocou programu EFRAT. Všetky tri spektrá sa registrovali jednotlivo a pre rekonštrukciu sa znovu načítali do počítača. Software umožňuje sledovať fázové zmeny aj v reálnom čase tak, že sa vopred zaznamená referenčné spektrum, a signálové a hlavné spektrum sa registrujú priebežne. Na obr. 3 je znázornený výsledok rekonštrukcie v prípade typického fs impulzu. Spojitou krivkou je znázornená intenzitná obálka a s prerušovanou čiarou fázová charakteristika. Fázová charakteristika v tvare konvexnej paraboly je dôsledkom kladného chirp-u v impulze.



Obr. 3 Komplexný opis fs impulzu pomocou metódy SPIDER. Spojitá čiara - časová závislosť intenzity, prerušovaná čiara - časová závislosť fázy

#### 4. OVPLYVNENIE FÁZOVEJ CHARAKTERISTIKY fs IMPULZOV

Zdrojom fs impulzov bol Ti:zafírový oscilátor CDP TiF50, shematicky znázornený na obr. 4. Oscilátor bol čerpaný s DPSS laserom Coherent VERDI 5 W, ktorý emituje na vlnovej dĺžke 532 nm. Impulzy vystupujúce z rezonátora mali strednú vlnovú dĺžku 800 nm, opakovaciu frekvenciu 80 MHz a výkon 400 mW.



Obr. 4 Femtosekundový Ti:zafírový oscilátor čerpaný DPSS laserom

Dĺžky impulzov je možné meniť posúvaním hranolov v oscilátore kolmo na zväzok v rozsahu 50 – 100 fs. Synchronizácia móvov lasera funguje na báze Kerrovej samomodulácie impulzov v Ti:zafírovom kryštáli, ktorý je súčasne aj aktívnym prostredím lasera. Spektrálna šírka impulzov je v rozsahu 10 – 20 nm. Pri tejto šírke impulzov treba rátať s rôznou rýchlosťou šírenia jednotlivých vlnových dĺžok  $\lambda$  v aktívnom prostredí, disperziou skupinovej rýchlosti GVD (Group Velocity Dispersion), ktorá je opísaná rovnicou

$$v(\omega) = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (5)$$

kde  $c$  je rýchlosť svetla a  $n$  index lomu.

Aby dĺžky impulzov zostali krátke aj po mnohonásobnom prechode cez rezonátor, treba kompenzovať GVD, ktorá má vplyv aj na fázovú charakteristiku impulzov. Za týmto účelom je použitý v rezonátore sústava dvoch hranolov, ktorých vzájomnou polohou sa dá meniť miera negatívnej disperzie systému. Princíp kompenzácie GVD je ukázaný na príklade štvorhranolovej sústavy, znázornenej na obr. 5a. Prechod impulzov cez sklo hranolov zavedie normálne disperzné rozladenie, ale geometria usporiadania spôsobí, že kratšie vlnové dĺžky sa budú šíriť rýchlejšie ako dlhšie. Na obr. 5b je znázornená schéma modifikovaného usporiadania s rovnakým účinkom, keď sa medzi dva prostredné hranoly umiestni zrkadlo a vznikne dvojhranolová sústava. Kolmý pohyb druhého hranola vo zväzku spôsobí zmenu dĺžky dráhy impulzov v skle a tým sa dá vyrovnávať miera negatívnej a pozitívnej disperzie v sústave. Pri pohybe hranolov sa súčasne mení aj fázová charakteristika aj dĺžka generovaných impulzov. Ovplyvňovanie fázovej charakteristiky impulzov v rezonátore je však obmedzené procesom generácie, lebo disperzné rozladenie impulzov spôsobí oslabenie Kerrovho javu v aktívnom prostredí. Z tohto dôvodu bola sústava dvoch hranolov (obr. 5b) umiestnená do zväzku fs impulzov mimo oscilátora na účinnejšie ovplyvnenie zmien fázovej charakteristiky. Zrkadlo za druhým hranolom bolo nastavené tak, aby vstupujúce a vystupujúce zväzky boli priestorovo oddelené.

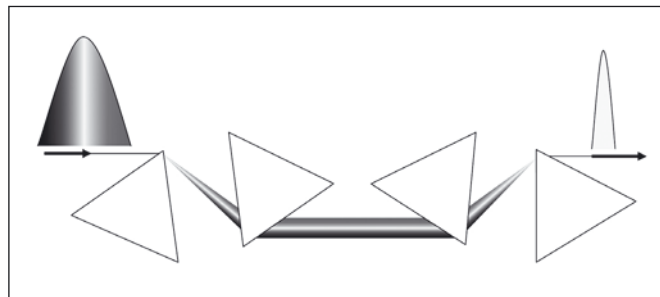
Na ohodnotenie disperzie dvojhranolovej sústavy je vhodné používať disperziu skupinového oneskorenia  $d(\omega)$ , ktorú sa dá vypočítať z GVD na základe vzťahu

$$d(\omega) = v(\omega) / L \quad (6)$$

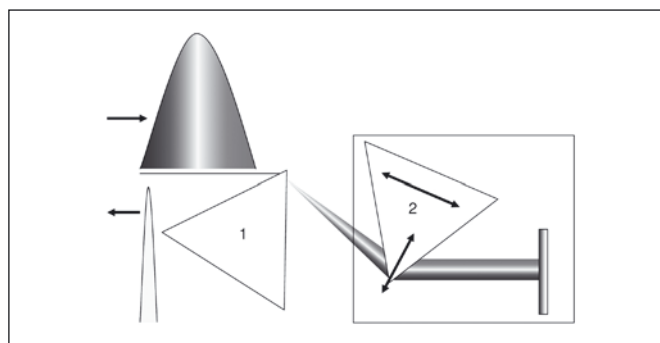
kde  $L$  je optická dráha. V prípade dvojhranolovej sústavy  $d(\omega)$  sa dá zapísať v tvare

$$d(\omega) = \frac{d^2 \varphi}{d\omega^2} \approx -4L_0 \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 + l \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad (7)$$

kde  $L_0$  je optická dráha medzi hranolmi a  $l$  je optická dráha v hranoloch. Záporný člen na pravej strane vzťahu udáva mieru negatívnej disperzie, ktorá sa vytvára pri šírení impulzu medzi hranolmi. Druhý člen opisuje pozitívnu disperziu, ktorú spôsobuje sklo hranolov pri prechode impulzov cez nich. Zmenou vzdialenosti medzi hranolmi, ako aj pohybom v smere kolmom na šírenie zväzku sa dá ovplyvňovať vzájomné oneskorenie frekvenčných zložiek impulzu.



Obr. 5a Štvorhranolová sústava na kompenzáciu GVD. Impulz s kladným chirp-om po prechode cez sústavu sa skráti

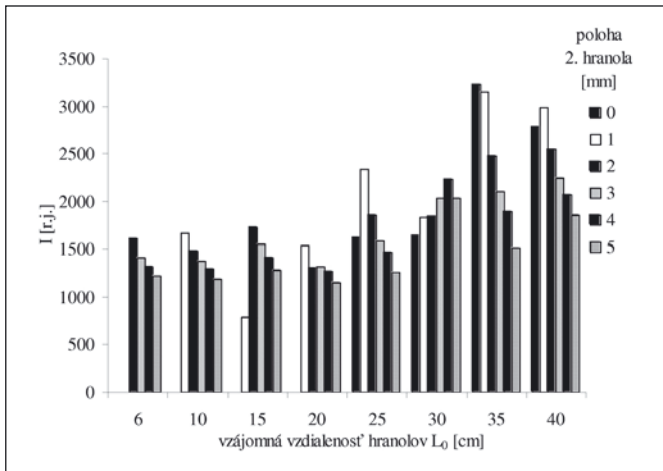


Obr. 5b Dvojhranolová sústava so zrkadlom má rovnaký účinok ako štvorhranolová

#### 5. FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA A DVOJFOTÓNOVÁ FLUORESCENCIA

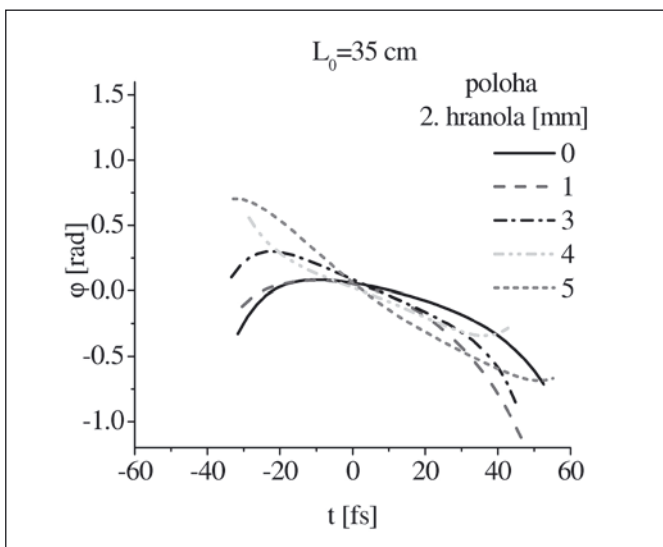
Fázovo ovplyvnené laserové impulzy pomocou sústavy hranolov boli použité na zväčšenie dvojfotónovej fluorescence TPF (Two Photon Fluorescence). V prípade dvojfotónovej fluorescence sa na excitácii podieľajú dva rovnaké fotóny, ktorých súčtová energia prislúcha energetickému rozdielu medzi základnou a excitovanou hladinou fluorescenčného farbiva. Pri použití excitačných impulzov so strednou vlnovou dĺžkou 800 nm sa dal výhodne využiť roztok kumarínu C522 v etanole ako TPF farbivo, s absorpčným pásmom okolo 400 nm. Emisné spektrá boli zaznamenávané po prechode excitačných pulzov cez mimorezonátorovú dvojhranolovú sústavu pri rôznych vzájomných polohách hranolov. Pre tie isté polohy hranolov sa registrovali aj fázové charakteristiky impulzov technikou SPIDER. Skúmali sa tým súvislosti medzi zmenou fázovej charakteristiky excitačných impulzov a intenzity fluorescence. Fázová a intenzitná charakteristika impulzov sa ovplyvňovala zmenou vzájomnej vzdialenosti hranolov od 6 cm do 40 cm a zmenou polohy druhého hranola v smere kolmom na šírenie zväzku v rozsahu 0 mm až 5 mm. Vyhотовilo sa 44 záznamov závislosti fázovej a intenzitnej charakteristiky impulzov od usporiadania geometrie dvojhranolovej sústavy. Podobne sa získal aj súbor záznamov fluorescenčných spektier.

Závislosť fluorescenčnej intenzity kumarínu C522 od vzájomného usporiadania dvoch hranolov je ukázaná na obr. 6. Každý stĺpec na grafe prislúcha jednému záznamu fluorescenčného spektra a  $x$ -ová os zodpovedá vzájomnej vzdialenosti dvoch hranolov  $L_0$ . Zmena polohy druhého hranola kolmo na smer šírenia zväzku je ilustrovaná rôznymi vzormi. Poloha 0 mm znamená prípad, keď zväzok prechádzal cez hrot hranola a so zväčšujúcou hodnotou polohy v smere kolmom na zväzok sa zväčšovala hrúbka skla vo zväzku.



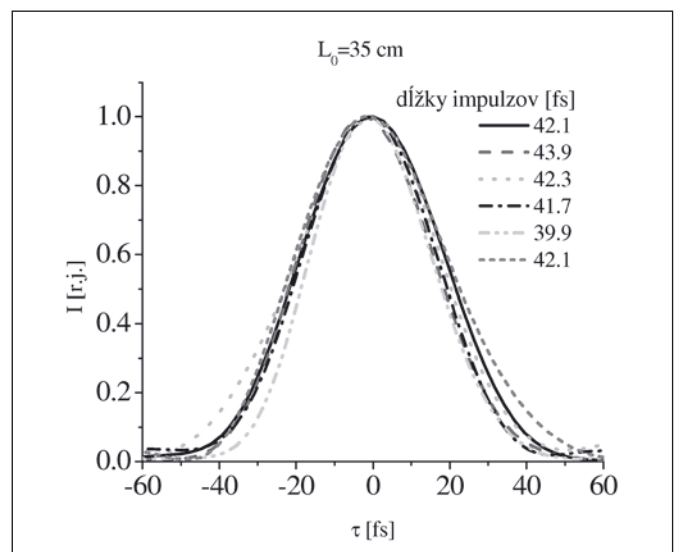
Obr. 6 Závislosť fluorescenčnej intenzity kumarínu C522 od vzájomnej polohy dvoch hranolov

Kvôli geometrii usporiadania sa nepodarilo namerať závislosť pre 0 a 1 milimetrovú polohu druhého hranola pri menších vzájomných vzdialenostiach. Ukázalo sa, že fluorescenčnú intenzitu ovplyvňuje aj zmena vzdialenosti medzi hranolmi a aj zmena polohy hranola vo zväzku. Najvýraznejší trend výsledkov je nárast fluorescenčnej intenzity so zväčšovaním  $L_0$ . Pri zhodnotení kompletnej závislosti boli pozorované až trojnásobné zmeny fluorescenčnej intenzity. Ďalší trend, ktorý charakterizuje súbor stĺpcov pri rovnakých vzájomných vzdialenostiach hranolov je klesajúca fluorescenčná intenzita so zväčšovaním hrúbky skla vo zväzku. Výnimku tvorí jeden súbor z ôsmich, pri  $L_0 = 30$  cm vzdialenosti hranolov, kde sa pozoroval opačný trend. Pri porovnaní dvoch trendov zmena polohy hranola kolmo na šírenie zväzku spôsobila 20%-ný a zmena vzdialenosti až 70%-ný nárast fluorescenčnej intenzity. Všeobecne platí, že fluorescenčná intenzita bola väčšia pri väčších vzdialenostiach hranolov a pri menšej hrúbke skla vo zväzku. Na obrázku 7a je znázornená závislosť fázovej charakteristiky fs impulzov od polohy druhého hranola pri  $L_0 = 35$  cm. Pri tejto vzdialenosti sa pozorovala najväčšia zmena fluorescenčnej intenzity pri zmene polohy druhého hranola vo zväzku. Môžeme si všimnúť, že pri polohách s najväčšou hrúbkou skla a s maximálnou fluorescenčnou intenzitou, časová závislosť frekvencie má konkávny tvar. Zodpovedá to zápornému chirp-u v impulze. Postupne, ako fázová charakteristika nadobúdala lineárny až mierne konvexný tvar, fluorescenčná intenzita



Obr. 7a Fázová charakteristika excitačných impulzov pri 35 cm vzdialenosti hranolov

klesala. Znamená to, že v impulze prevládol mierne kladný chirp. Je to v súlade so vzťahom (7) na základe ktorého väčšia optická dráha  $l$  v hranole spôsobí zväčšenie pozitívnej disperzie sústavy. Na obr. 7b sú znázornené intenzitné obálky excitačných impulzov s ich dĺžkami pri zodpovedajúcich polohách hranola vo zväzku. Pri sledovaní dĺžok impulzov nebola pozorovaná monotónna závislosť, čiže môžeme predpokladať, že zmeny fázovej charakteristiky excitačných impulzov ovplyvnili fluorescenčnú intenzitu kumarínu C522. Podobne nebola pozorovaná súvislosť medzi dĺžkami impulzov a vzájomnou vzdialenosťou hranolov. V prípade fluorescenčnej intenzity sa pozorovalo jej zväčšenie rastúcou vzdialenosťou medzi hranolmi. Zo vzťahu (7) vyplýva, že väčšia vzájomná vzdialenosť hranolov  $L_0$  spôsobí nárast negatívnej disperzie. Zhrnutím vplyvu obidvoch pohybov hranolov sa dá skonštatovať, že zväčšenie negatívnej disperzie sústavy spôsobí nárast fluorescenčnej intenzity. Ukázalo sa, že impulzy so záporným chirp-om ovplyvnia vývoj excitačného stavu C522 v smere zväčšovania účinnosti dvojfotónovej fluorescencie. Tieto výsledky sú v súlade s experimentami autorov [3], ktorí pozorovali nárast fluorescenčnej intenzity pri rastúcej miere záporného chirp-u v excitačných impulzoch. Naše výsledky dokázali, že ovplyvňovaním fázovej charakteristiky impulzov sa dá zväčšiť dvojfotónovú fluorescenciu v prípade roztoku farbív.



Obr. 7b Intenzitné obálky pri tých istých podmienkach ako na obr. 7a s príslušnými dĺžkami pulzov

## 6. ZÁVER

Táto práca sa zaoberala diagnostikou fázovej charakteristiky fs laserových impulzov. Zdrojom fs impulzov bol Ti:zafrový oscilátor CDP TiF50 s vlnovou dĺžkou 800 nm. Použitím mimorezonátorovej dvojhranolovej sústavy bola ovplyvňovaná fázová charakteristika vyšetrovaných impulzov, ktoré sa registrovali technikou SPIDER. Fázovo tvarované impulzy sa použili na excitáciu kumarínu C522 v etanole. Ukázalo sa, že zväčšenie miery záporného chirp-u excitačných impulzov viedlo k zväčšeniu intenzity dvojfotónovej fluorescencie a to aj v prípade zväčšovania vzdialenosti medzi hranolmi, aj pri vysúvaní jedného hranola zo skúmaného zväzku. Touto pomerne jednoduchou technikou sa podarilo doceliť až trojnásobné zmeny intenzity nelineárneho signálu TPF.

Ešte účinnejšie zvýšenie fluorescenčnej intenzity je možné zavedením kladnej spätnej väzby do procesu tvarovania impulzov. Touto metódou je možné získať ideálne excitačné impulzy tak, že sa cielene tvarujú na získanie najväčšej intenzity nelineárneho signálu. Použitie spätnej väzby a riadeného ľubovoľného tvarovania ultrakrátkych impulzov sľubuje ďalšie možnosti hľadania súvislostí medzi fázovou charakteristikou fs impulzov a ich nelineárnym vzájomným pôsobením s materiálmi.



## Literatúra

- [1] ZEWAİL, A.: *Femtochemistry-Ultrafast dynamics of the chemical bond*, World scientific publishing Co. Pte. Ltd. 1994
- [2] CLEAR, R. D., WILSON, K. R. *Journal of Molecular Spectroscopy*, Volume 47, Issue 1, July 1973, p. 39-44
- [3] KOHLER B., ACC. Chem. Res., Vol. 28, No. 3, 1995 p. 133-140
- [4] RABITZ, H. *Science* Vol. 299, 2003, p. 525-527
- [5] DANIEL, C. *Chemical Physics* 267, 2001, p. 247-260
- [6] BERSOHN, R., *Journal of Molecular Structure* 480-481, 1999, p. 231-235
- [7] GIBSON, E. A. Invited paper, *JSTQE* 10 (6) 2004, p.1339-1350
- [8] COMSTOCK, M., LOZOVY, V. V., PASTIRK, I., DANTUS, M., *Optics Express* 12, 2004, p. 1061
- [9] ZUBOV, V. A. *Laser Phys.* 2, 1992, p. 73
- [10] WONG, V. *Opt. Lett.* 19, 1994, p. 287
- [11] DIELS, J.-C., RUDOLPH, W., *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*, Academic Press, ISBN 0-12-215492-4, Boston, 1996
- [12] BUGÁR, I.: Dizertačná práca, FMFI UK Bratislava, 2003

Mgr. Attila Gaál, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, Bratislava

Mgr. Ignác Bugár, PhD.; Doc. Ing. Dušan Velič, PhD., Medzinárodné laserové centrum, Bratislava

Prof. Ing. František Uherek, PhD., Medzinárodné laserové centrum a Katedra mikroelektroniky FEI STU, Bratislava

Jiří PÁLKA, František HRUŠKA, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Institut řízení procesů a aplikované informatiky, Zlín

## Technické prostředky pro měření a řízení parametrů tepelné pohody

*Měření a řízení parametrů tepelné pohody vyžaduje mít k dispozici vhodné technické prostředky. Jsou to jednak prostředky měření fyzikálních parametrů prostředí, dále vyhodnocovací jednotka a jednotka pro řízení parametrů podle indexů tepelné pohody. Pro měření střední radiační teploty byl prováděn výzkum a vývoj zařízení pro její měření, protože se jedná o specifické měření. Dále je vyvíjena jednotka – embeded systém určený pro vyhodnocování indexů tepelné pohody a jednotka pro optimální řízení tepelného komfortu.*

### 1. ÚVOD

Člověk je homoiotherm [1,2], tj. dokáže udržet relativně konstantní tělesnou teplotu i při značně proměnlivém stavu okolního prostředí. Velmi přesné udržování teploty je zajištěno v tělesném jádře člověka, které tvoří orgány hlavy a dutiny hrudní a břišní. Vnější části těla jsou méně homoiothermní. Jejich teplota se mění v závislosti na tepelných podmínkách prostředí ve větším rozsahu. Tento rozsah je ale omezený. Odvod tepla z těla je dán tepelným odporem oblečení a dále fyzikálními parametry prostředí, tj. teplotou vzduchu, povrchovou teplotou stěn a těles okolního prostředí, rychlostí proudění vzduchu a vlhkostí vzduchu. Významná část odvodu tepla se uskutečňuje prouděním okolního vzduchu a sáláním. Pocením se odvádí teplo jako skupenské teplo vody. Dále se teplo odvádí dýcháním.

Tepelná pohoda člověka je velmi důležitý faktor [3]. Pracovní aktivita člověka v uzavřeném prostředí vykonávaná mimo pásmo tepelné pohody zvyšuje celkové zatížení organismu. Pro sledování a vyhodnocování tepelné pohody je vypracována řada metod, které predikují nebo definují nepřímo odezvy organismu na dané prostředí.

Pro řešení systému sledování a řízení parametrů tepelné pohody jsme použili model tepelné pohody stanovující index PMV (Predicted Mean Vote) - střední tepelný pocit. PMV je index předpovídající střední hodnotu, kterou odhlasuje velká skupina lidí podle svých pocitů v daném prostředí na 7-stupňové stupnici pocitu PMV od -3 do +3 (viz. tab. 1). Index je stanoven na základě matematického modelu podle [4]. Dalšími ukazateli při stanovení tepelné pohody jsou:

- ukazatel PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) - předpovídá procento lidí, kteří budou považovat dané prostředí za nepříjemně teplé nebo naopak za nepříjemně chladné, tj. procento lidí, kteří zvolí na stupnici PMV hodnotu -3, -2, +2 nebo +3

- ukazatel DR (Draught Rating) – tento parametr souvisí s nežádoucím ochlazováním těla vlivem průvanu. Ukazuje procento lidí, kteří jsou nespokojeni vlivem průvanu. Tento vliv je méně nepříjemný, když se směr pohybu vzduchu mění.

Tab. 1 7-stupňová stupnice pocitu PMV

Hodnota	Pocit
+3	Horko
+2	Teplo
+1	Mírné teplo
0	Neutrálnost
-1	Mírný chlad
-2	Chlad
-3	Zima

Optimální tepelná pohoda člověka je stav, kdy se odvádí z těla takové množství tepla, které nemění vnitřní teplotu jádra, tj. rovná se vytvářenému množství metabolického tepla. Odvod tepla je zajištěn jednak správnými tepelně izolačními vlastnostmi oděvu a podmínkami prostředí, především teplotou vzduchu, teplotou povrchu okolních stěn, rychlostí proudění vzduchu a vlhkostí vzduchu [5]. Celkový proces tepelné výměny a následně pocitů tepelné pohody ovlivňuje významně celkem šest veličin, uvedených v tab. 2.

Tab. 2 Veličiny pro výpočet PMV

1. Velikost pracovní aktivity	Veličiny o člověku
2. Součinitel tepelného odporu oděvu	
3. Teplota vzduchu	Veličiny pro interiér
4. Střední radiační teplota	
5. Rychlost proudění vzduchu	
6. Relativní vlhkost vzduchu	

Údaj pracovní aktivity člověka a údaj o tepelném odporu jeho oděvu se stanovují podle tabulek. Měření fyzikálních parametrů interiéru, tj. teploty vzduchu okolí, vlhkosti vzduchu a jeho proudění je realizovatelné standardními technickými prostředky. Specifickým a nejobtížněji měřitelným parametrem je střední radiační teplota. Byl prováděn výzkum, vývoj metody a zařízení pro měření a část získaných výsledků je uvedena v následujícím článku.

## 2. VÝBĚR VHODNÉHO SENZORU

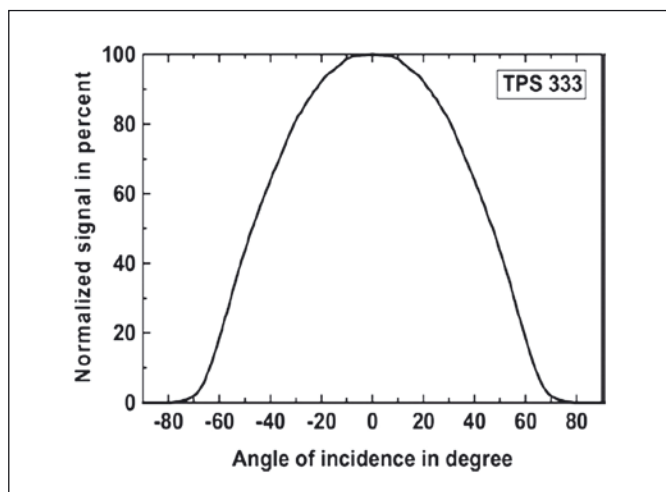
Při výběru vhodného senzoru pro snímač střední radiační teploty jsme se zaměřili na následující typy senzorů:

- pyroelektrické senzory
- bolometry
- termočlávkovou baterii

Jako nejvhodnější senzor pro snímání střední radiační teploty jsme zvolili termočlávkovou baterii (thermopile) a to z několika následujících důvodů:

- 1) je vhodným senzorem pro další elektronické zpracování
- 2) je schopen měřit při optimálních nejistotách s citlivostí 0,1 °C
- 3) možnost snímat tepelný tok elektromagnetického záření povrchu těles v oblasti vlnové délky elektromagnetického záření od 5 do 10 μm.

Pro bezdotykové měření elektromagnetického záření byl vybrán senzor TPS333 od firmy PerkinElmer sestávající se z termočlávkové baterie určené pro snímání oblasti elektromagnetického záření a z termistoru pro referenční měření teploty okolí. Tento senzor má úhel snímání +/- 45° při 50 % hodnoty normalizovaného signálu (viz obr. 1) [8]. Tento senzor umožnil konstruovat snímač ve tvaru půlkoule se 5 senzory, jak je uvedeno v kap. 5. Takto je zajištěno stejnoměrné snímání elektromagnetického záření v půlprostoru interiéru.



Obr. 1 Úhel snímání senzoru

## 3. TEPLOTNÍ KOMPENZACE PŘI VYHODNOCOVÁNÍ STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLOTY

Na termočlávkové baterii se zářením z měřené oblasti vytváří napětí o hodnotě [9]

$$U_{TP} = G \cdot \varphi_{12} \cdot \sigma_0 \cdot [\varepsilon_o \cdot T_o^4 - \varepsilon_s \cdot T_s^4] = K \cdot S_s \cdot \varphi_{12} \cdot \sigma_0 \cdot [\varepsilon_o \cdot T_o^4 - \varepsilon_s \cdot T_s^4] \quad (1)$$

kde  $G$  je konstanta senzoru [ $V \cdot m^2 \cdot W^{-1}$ ]  
 $K$  je citlivost senzoru [ $V \cdot W^{-1}$ ]  
 $S_s$  je detekční plocha senzoru [ $m^2$ ]  
 $T_s$  je teplota senzoru, kterou považujeme za stejnou jako je teplota okolí [K]  
 $\varphi_{12}$  je úhlový součinitel měřené oblasti a senzoru [-]

Na senzor září nejen zkoumaná oblast, ale také okolí. Potom lze napsat, že termočlávková baterie snímá celou oblast s  $\varphi_{12} = 1$  o střední radiační teplotě  $\bar{T}_o$ . Dále z (1) vyplývá, že zesílené napětí vzniklé na termočlávkové baterii je závislé jak na teplotě zkoumané oblasti, tak na teplotě okolí. Tuto závislost je nutné kompenzovat. Tohoto požadavku lze dosáhnout tak, že přičteme k  $U_{TP}(\bar{T}_o, T_s)$  napětí o hodnotě

$$U_s(T_s) = A_{TP} \cdot G \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_s \cdot T_s^4$$

tj.

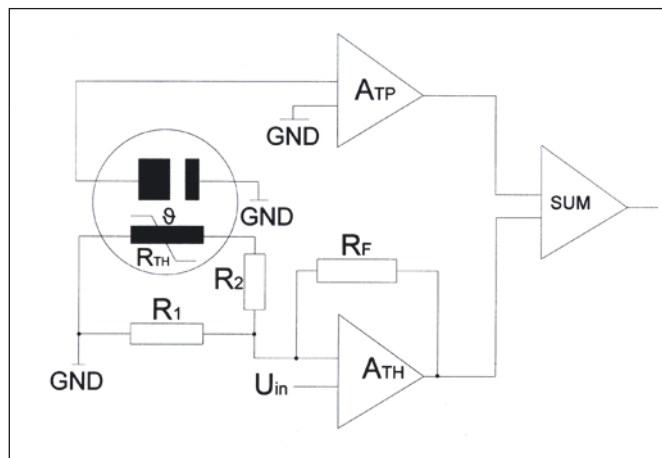
$$U_{TP}(\bar{T}_o, T_s) + U_s(T_s) = U_o(T_o) = A_{TP} \cdot G \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_o \cdot \bar{T}_o^4$$

Elektronický vyhodnocovací obvod určený pro zesílení výstupního napětí z jedné termočlávkové baterie a pro jeho následnou teplotní kompenzaci byl vytvořen podle elektronického obvodu na obr. 2 a teplota měřeného objektu se potom vypočítá jako

$$\bar{T}_o = \sqrt[4]{\frac{U_o(T_o)}{A_{TP} \cdot G \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_o}}$$

kde:  $U_o$  je napětí na výstupu z elektronického obvodu kompenzace [V]  
 $T_o$  je teplota měřeného objektu [K]  
 $A_{TP}$  je zesílení operačního zesilovače [-]  
 $G$  je konstanta senzoru [ $V \cdot m^2 \cdot W^{-1}$ ]  
 $\sigma_0$  je Stefan-Boltzmannova konstanta [ $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ]  
 $\varepsilon_o$  je emisivita měřeného objektu [-]

Celkový obvod pro vyhodnocování signálů ze všech termočlávkových baterií je složen z pěti těchto vyhodnocovacích obvodů.



Obr. 2 Elektronický obvod s termočlávkovou baterií

## 4. MĚŘENÍ STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLOTY V PROSTORU

Vzhledem k tomu, že zpravidla každá stěna v sledovaném prostoru má různou teplotu povrchu, tzn. že vyzařuje a odráží elektromagnetické záření s různou intenzitou, je nutné střední radiační teplotu stanovit jako celek sledovaného prostoru.

Aby se mohla stanovit střední radiační teplota celého polo-prostoru, musí se najít prostorové řešení podle obr. 3. Stanovily se nejdříve hodnoty elektromagnetického záření z jednotlivých poloprostorů ve všech směrech, tj. podle obr. 3:

- podlaha (dílní části P1, P2),
- západ (dílní části Z1, Z2),
- strop (dílní části U1, U2),
- východ (dílní části V1, V2),
- sever (dílní části S1, S2, S3, S4).

Pro řešení má poloprostor rozměry (X,Y,Z) a snímač označený jako plocha  $s$ , byl umístěn v prostoru o souřadnicích (x,y,z) [7].

Pro měření elektromagnetického záření v prostoru je nutné znát úhlový součinitel prostorového záření, který je dán geometrickými poměry mezi měřeným objektem a snímačem. Jako měřené objekty jsou jednotlivé dílní plochy poloprostoru naznačené na obr. 3. Při testování bylo na severní stěnu přiloženo navíc laboratorní černé těleso, použité jako další a proměnný zářivý objekt s plochou  $S_t$ . Pro teoretický výpočet střední radiační teploty poloprostoru pomocí pěti výše uvedených senzorů jsme v programu Excel a MATLAB-Simulink vytvořili matematický model popisující situaci v testovacím prostoru, který vychází ze sálavých tepelných toků  $Q_{O \rightarrow S}$  mezi reálnými povrchy  $S_o, S_s$  (v našem případě mezi povrchem části stěny tvořící poloprostor, povrchem laboratorního černého tělesa a plochou senzoru). Platí vztah [10]:

$$Q_{O \rightarrow S} = H_o \cdot \epsilon_o \cdot S_o \cdot \varphi_{O \rightarrow S} = \delta_o \cdot T_o^4 \cdot \epsilon_o \cdot S_o \cdot \varphi_{O \rightarrow S},$$

kde:  $Q_{O \rightarrow S}$  – je zářivý tok z reálného povrchu  $S_o$  směřující k reálnému povrchu  $S_s$  (W),

$H_o$  – je intenzita záření reálného objektu O [W.m<sup>-2</sup>],

$\epsilon_o$  – je spektrální emisivita povrchu  $S_o$  [-],

$S_o$  – je plocha reálného objektu O [m<sup>2</sup>],

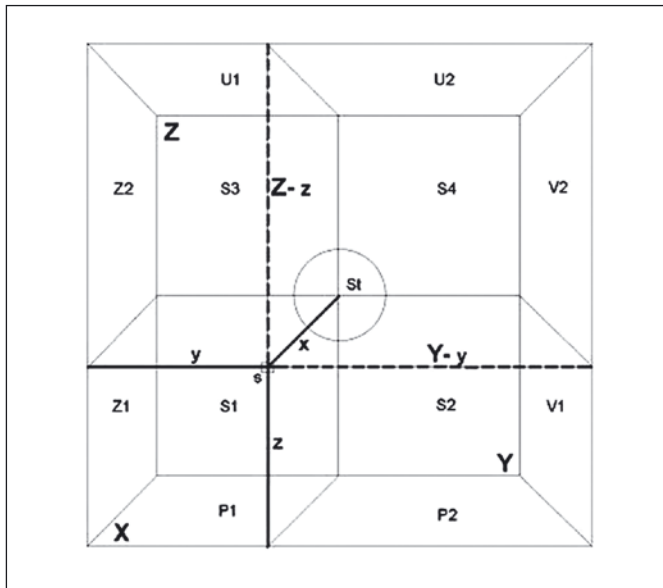
$\varphi_{O \rightarrow S}$  – je úhlový součinitel mezi povrchem  $S_o$  a  $S_s$  [-],

$T_o$  – je absolutní teplota povrchu reálného tělesa O [K],

$\delta_o$  – je Stefan – Boltzmanova konstanta  
[= 5,67032.10<sup>-8</sup> W.m<sup>-2</sup>.K<sup>4</sup>],

O – dílní část stěny nebo plotýnky

S – jednotlivé senzory

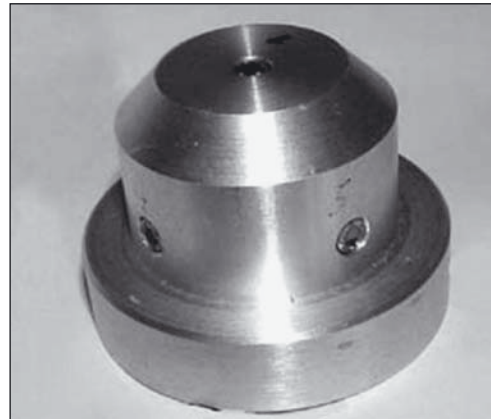


Obr. 3 Umístění snímače a zářivého tělesa v testovacím poloprostoru

## 5. KONSTRUKCE SNÍMAČE STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLoty V POLOPROSTORU

Kompletní snímač musí splňovat požadavek snímání teploty povrchů stěn celého půlprostoru pro vyhodnocení střední radiační radiační teploty. Aby výsledný snímač pokryl celou oblast poloprostoru, navrhli jsme konstrukci zařízení s pěti termočlánkovými bateriemi umístěných v půlkouli. Každý senzor snímá tok elektromagnetického záření z každé jedné stěny místnosti tvořící půlprostor. Snímač díky použitému senzoru je vhodný a plní výše

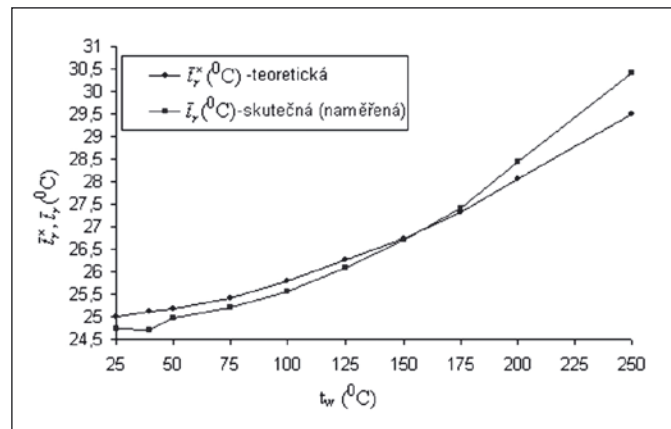
uvedený požadavek, protože jeho úhel snímání je 90°. Pro umístění pěti termočlánkových baterií je zvolena hlavice tvaru půlkoule, tak jak je zobrazeno na obr. 4. Hlavice byla vyrobena z hliníku s malou emisivitou a dobrou tepelnou vodivostí, aby její teplota a teplota krytů senzorů byla shodná s teplotou okolí a nebyla ovlivněna dopadajícím zářením.



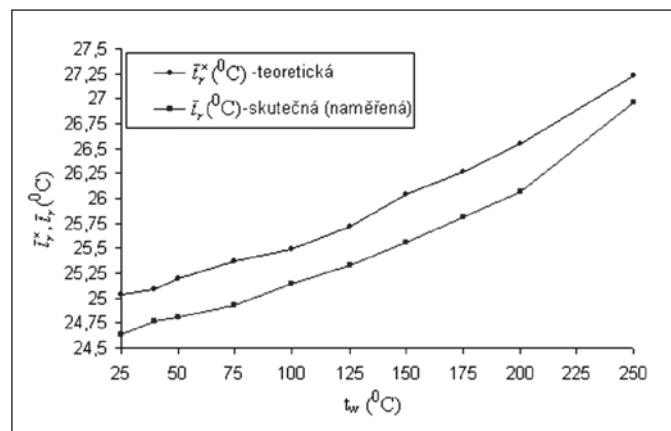
Obr. 4 Hlavice snímače střední radiační teploty

## 6. OVĚŘOVÁNÍ PROSTOROVÉHO SNÍMAČE

Pro ověřování parametrů prostorového snímače střední radiační teploty byla sestavena testovací komora. Ověřování bylo prováděno při změnách teploty vkládaného laboratorního černého tělesa a polohy senzoru. Na obr. 5 a 6 jsou zobrazeny grafické závislosti teplot  $\bar{T}_r$  naměřených prototypem a teplot  $\bar{T}_r^x$  vypočítaných teoreticky podle



Obr. 5 Naměřené hodnoty (vzdálenost I)



Obr. 6 Naměřené hodnoty (vzdálenost II)

teploty vyhřívání tělesa  $t_w$  při dvou různých vzdálenostech snímače od zářícího tělesa. Z grafu na obr. 5 je vidět, že naměřené hodnoty středních radiačních teplot se liší od vypočtených maximálně o cca 0,5 °C a tuto odchylku mají po celou dobu měření, kdežto na grafu na obr. 6 pro vzdálenost II se odchylka neustále mění, nejprve má sestupný charakter, který se od  $t_w = 150$  °C mění na vzestupný, čímž ke konci měření, tj. pro teploty tělesa 175 °C až 250 °C dosahuje hodnot kolem 1 °C, ale i přesto naměřené hodnoty v obou případech splňují požadavek na přesnost, která byla pro měření střední radiační teploty stanovena s tolerancí +/-2 °C.

## 7. VYHODNOCOVACÍ JEDNOTKA INDEXŮ PMV, PPD, DR

Vyhodnocovací jednotka indexů tepelné pohody zajistí pro měřené parametry interiéru a dané parametry o člověku jejich výpočet podle zvoleného modelu. Pro zajištění složitých výpočtů lze uvažovat pouze o zařízení s výpočetním prvkem. Při zvažování konstrukce bylo rozhodnuto použít jako centrální výpočetní prvek integrovaný obvod obsahující jednak centrální výpočetní jednotku na bázi mikrokontroleru s analogovou vstupní stranou. Dále pro pro splnění funkcí spojených s optimálním řízením, musí být integrovaná i výstupní analogová strana a obvody komunikace s okolím.

Tyto integrované obvody zajišťující funkce přepínání více vstupních analogových signálů, programovatelného zesílení signálů PGA (Programmable Gain Amplifier), převod analogových signálů na číslicový údaj ADC (Analog to Digital Converter), monolitický mikropočítač s odpovídajícím vybavením, pro zpětnou konverzi číslicových signálů na analogové DAC (Digital to Analog Converter) a obvody pro sériovou komunikaci. V rámci dalšího vývoje a výzkumu bude tento úkol řešen tímto směrem.

## 8. ZÁVĚR

V článku popisujeme problematiku technických prostředků pro měření a vyhodnocování ukazatelů PMV (Predicted Mean Vote) - střední tepelný pocit, PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)

– předpovězené procento nespokojených, DR (Draught Rating) – procento ovlivněné průvanem, které jsou důležité pro stanovení tepelné pohody. Bylo dosaženo hlavního cíle, tj. vytvořit zařízení, které je schopno měřit specifickou střední radiační teploty v prostoru. Dalším významným výsledkem je rozhodnutí o koncepci moderní inteligentní vyhodnocovací jednotky zajišťující jak vyhodnocení měření, tak i vyhodnocování podle algoritmů pro optimální řízení parametrů prostředí pro komfortní tepelnou pohodu.

## Literatura

- [1] JOKL, M.: Optimální mikroklimatické podmínky pracovišť. VVI, roč. 1997, č. 2, s. 69-72.
- [2] JIRÁK, Z.: Hodnocení mikroklimatických podmínek na pracovišti. Pracov. Lék., sv. 30, 1978, č. 6, s. 229-233.
- [3] MATHAUSEROVÁ, Z.: Působení tepelně vlhkostních podmínek na člověka. VVI, 4/97, s. 203-205.
- [4] ČSN EN ISO 7730. Mírné tepelné prostředí- Stanovení ukazatelů PMV a PPD. Tř. znak 83 3563. Praha: český normalizační institut, 1996.
- [5] HRUŠKA, F.: Sledování a řízení parametrů tepelné pohody. AUTOMA, 2001, č.4, s. 61-63. ISSN 1210-9592. MSM 281100001: GAČR 101/01/0345.
- [6] PÁLKA, J.: Bezdotykové měření teploty pomocí termočlánkové baterie, JMO 3/04.
- [7] SKOČÍK, P. Prostorové měření střední radiační teploty. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, FT, 2004.
- [8] <http://optoelectronics.perkinelmer.com>.
- [9] FRADEN, J. : Handbook of Modern Sensors. Physics, designs, and Applications. Springer Verlag, New York, 1996, s. 556. ISBN: 1-56396-538-0.
- [10] WEBSTER, J., G.: The measurement, instrumentation, and sensors handbook. CRC Press LLC; Springer – Verlag, 1999, s. 1932. ISBN 3-540-64830-5.

Ing. Jiří Pálka, doc. Ing. František Hruška, Ph.D., Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Institut řízení procesů a aplikované informatiky, Mostní 5139, 760 01 Zlín, tel.: 576 035 246

# 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 „ $\pi$ “ 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 nevčleňujte 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 obrázky v souboru typu \*.doc. Bitmapové soubory pro černobílou kresbu musí mít rozlišení alespoň 600 dpi, pro černobílou fotografii nejméně 200 dpi a pro barevnou nejméně 300 dpi. Při generování obrázků v COREL DRAW do souboru typu \*.EPS převedte text do křivek. U souborů typu \*.JPG používejte takový stupeň komprese, aby byla zachována co nejlepší kvalita obrázku. Velikost písma v obrázcích by neměla klesnout pod 1,5 mm (při předpokládané velikosti obrázku po zalomení do tiskové strany).

## Pokyny k předávání příspěvku

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

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

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

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

# Aplikace ortogonálních polynomů v teorii optického zobrazení

*Při návrhu optických soustav je žádoucí, aby zbytkové aberace těchto soustav byly co nejmenší. Analýzou těchto aberací v závislosti na numerické optické soustavě lze najít takové hodnoty numerické apertury, pro které je zbytková aberace nulová. Tyto hodnoty numerické apertury nazýváme korekční pásma. V práci je provedena teoretická analýza této problematiky a jsou odvozeny vztahy pro vyjádření koeficientů vlnové aberace pomocí korekčních pásem a to pro sférickou aberaci třetího a pátého řádu. Je ukázán způsob sestavení ortogonálních polynomů vhodných pro účely optického zobrazení. Užitím odvozených vztahů byl proveden výpočet optimálních korekčních pásem a poloh středů referenční sféry pro případy, kdy požadujeme minimální odchylku vlnové aberace od nuly nebo požadujeme minimalizaci střední kvadratické odchylky vlnové aberace.*

## 1. ÚVOD

Při návrhu optických soustav je žádoucí, aby zbytkové aberace těchto soustav byly co nejmenší. Analýzou průběhu těchto aberací v závislosti na numerické apertuře a zorném poli optické soustavy lze najít takové hodnoty numerické apertury a zorného pole, pro které je sledovaná aberace nulová. Tyto hodnoty numerické apertury a zorného pole nazýváme korekční pásma [1,2]. Při podrobné analýze základních aberací (sférická aberace a koma) optických soustav se ukazuje, že kvalita zobrazení těchto soustav závisí na hodnotách korekčních pásem [1,2]. Hodnoty korekčních pásem jsou závislé na kritériu, které použijeme pro hodnocení kvality zobrazení optických soustav. Cílem této práce je ukázat obecný postup při teoretické analýze této problematiky a odvození vztahů pro vyjádření koeficientů vlnové aberace pomocí korekčních pásem a aplikovat jej na případ sférické aberace třetího a pátého řádu. Dále pak ukázat jednoduchý způsob sestavení ortogonálních polynomů vhodných pro účely optického zobrazení. Užitím odvozených vztahů pak provést výpočet optimálních korekčních pásem, poloh středů referenční sféry a změn poloměrů referenční sféry pro případ, že požadujeme minimální odchylku vlnové aberace od nuly nebo požadujeme minimalizaci střední kvadratické odchylky vlnové aberace.

## 2. ZOBRAZOVACÍ FUNKCE

Jak je známo z geometrické optiky, splňuje bodová zobrazovací funkce  $E(x,y,z)$  následující rovnici [1-10]

$$\left(\frac{\partial E}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial Y}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial Z}\right)^2 = n^2,$$

kde  $n$  je index lomu prostředí a  $x,y,z$  souřadnice bodu v prostoru. Tato rovnice je *základní rovnicí geometrické optiky*. Funkce  $E$  nám udává optickou dráhu (součin geometrické dráhy a indexu lomu prostředí) mezi dvěma body v prostoru. Lze ukázat, že pro *rotačně symetrickou optickou soustavu* lze optickou dráhu mezi body předměťové roviny a mezi body vlnoplochy vyjádřit funkcí [1-10]

$$E = E(e_1, e_2, e_3)$$

kde proměnné  $e_1, e_2$  a  $e_3$  mají tvar

$$2e_1 = x^2 + y^2, \quad e_2 = xx'_R + yy'_R, \quad 2e_3 = x'^2_R + y'^2_R,$$

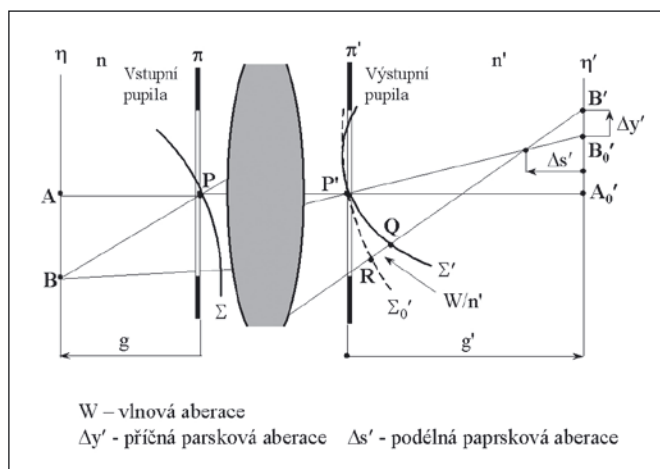
přičemž  $x$  a  $y$  značí souřadnice v předmětové rovině a  $x'_R, y'_R$  jsou souřadnice bodu na referenční sféře v obrazovém prostoru optické soustavy.

## 3. VLNOVÁ ABERACE

Vlnovou aberaci  $W$  budeme nazývat rozdíl optických drah libovolného paprsku a hlavního (referenčního) paprsku, přičemž oba paprsky náleží témuž paprskovému svazku. Platí tedy obecně

$$E = E(e_1, e_2, e_3) - E(e_1, 0, 0), \quad (1)$$

Podle obr. 1 dále platí  $W = [BR] - [BP']$ , kde hranatými závorkami značíme optickou dráhu.



Obr. 1 Aberace optické soustavy

Mezi vlnovou aberací  $W$  a paprskovými aberacemi  $\Delta x'$  a  $\Delta y'$  platí vztahy [1-10]

$$\Delta x' = X' - x'_0 = \frac{R'}{n'} \cdot \frac{\partial W}{\partial x'_R}, \quad (2)$$

$$\Delta y' = Y' - y'_0 = \frac{R'}{n'} \cdot \frac{\partial W}{\partial y'_R},$$

kde  $R' = (R, B_0')$  je poloměr referenční sféry  $\Sigma_0'$  mající střed v bodě  $B_0'(x'_0, y'_0)$ , který je paraxiálním (ideálním) obrazem předmětového bodu  $B$ ,  $x'_R, y'_R$  jsou souřadnice bodu  $R(x'_R, y'_R)$  na referenční sféře  $\Sigma_0'$ ,  $X'$  a  $Y'$  jsou souřadnice průsečíku  $B'(X', Y')$  paprsku s obrazovou rovinou  $\eta'$  optické soustavy a  $n'$  je index lomu obrazového prostředí. Pro clonové číslo  $c$  v obrazovém prostoru optické soustavy platí

$$c = \frac{1}{2n' \sin \sigma'_k}, \quad (3)$$

kde  $\sigma'_k$  je maximální aperturní úhel v obrazovém prostoru při zobrazení osového bodu  $A$  předmětu. Necht  $w$  a  $v$  jsou normované souřadnice [3,11] na referenční sféře ( $v^2 + w^2 \leq 1$ ), potom pro výsledný vztah mezi vlnovými a paprskovými aberacemi platí

$$\Delta x' = 2c \frac{\partial W}{\partial w}, \quad \Delta y' = 2c \frac{\partial W}{\partial v}, \quad (4)$$

Označme nyní

$$2\bar{e}_1 = 2e_1 = y^2, \quad \bar{e}_2 = yv, \quad 2\bar{e}_3 = w^2 + v^2, \quad (5)$$

jako nové proměnné. Aberace optické soustavy si můžeme rozdělit na aberace 1. řádu, aberace 3. řádu, aberace 5. řádu atd. Rozvojem vlnové aberace  $W(\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3)$  v Taylorovu řadu dostáváme

$$a) \text{ Aberace 1. řádu } W_1 = \bar{E}_2 \bar{e}_2 + \bar{E}_3 \bar{e}_3, \quad (6)$$

$$b) \text{ Aberace 3. řádu } W_3 = \frac{1}{2} (2\bar{E}_{12} \bar{e}_1 \bar{e}_2 + \dots + \bar{E}_{33} \bar{e}_3^2), \quad (7)$$

$$c) \text{ Aberace 5. řádu } W_5 = \frac{1}{6} (3\bar{E}_{112} \bar{e}_1^2 \bar{e}_2 + \dots + \bar{E}_{333} \bar{e}_3^3), \text{ atd. } (8)$$

### 3.1. Aberace 1. řádu

Zabývejme se nyní *aperturními paprsky*, tj. zobrazením bodů ležících na optické ose soustavy. Pro aperturní paprsky platí  $\bar{e}_1 = \bar{e}_2 = 0$  a tedy

$$W_1 = \bar{E}_3 \bar{e}_3 = \frac{1}{2} \bar{E}_3 (v^2 + w^2). \quad (9)$$

Protože jde o rotační souměrnost, stačí zkoumat jen poledník vlnoplochy. Užitím vztahů (4) dostáváme

$$\Delta y' = 2c \frac{\partial W}{\partial v} = 2c \bar{E}_3 v.$$

Označíme-li jako  $\delta s_0$  vzdálenost nového středu referenční sféry od původního středu referenční sféry (měřenou podél osy paprskového svazku), potom pro  $v = v_k = 1$  máme

$$\Delta y'_k = -\frac{\delta s_0}{2c} = 2c \bar{E}_3.$$

Dosazením do (9) obdržíme

$$W_1 = -\frac{\delta s_0}{8c^2} (v^2 + w^2). \quad (10)$$

Zavedeme nyní následující označení

$$q = v^2 + w^2, \quad v = \sqrt{q} \cdot \cos \varphi, \quad w = \sqrt{q} \cdot \sin \varphi,$$

kde  $\varphi$  je polární souřadnice (úhel) v rovině výstupní pupily. Při tomto označení dostáváme

$$W_1 = -\frac{\delta s_0}{8c^2} q = W_{001} q. \quad (11)$$

Tuto aberaci vznikající posuvem  $\delta s_0$  středu referenční sféry podél osy svazku nazýváme *podélná defokuse*.

### 3.2. Aberace 5. řádu

S aberacemi pátého řádu spolupůsobí obvykle aberace třetího. Máme tedy pro *celkovou aberaci pátého řádu*

$$W = W_{002} (v^2 + w^2)^2 + W_{003} (v^2 + w^2)^3,$$

kde jednotlivé koeficienty značí:  $W_{002}$  - otvorová vada 3. řádu,  $W_{003}$  - otvorová vada 5. řádu. Parciální derivace podle proměnných  $v, w$  jsou dány vztahy

$$\frac{\partial W}{\partial v} = 4W_{002} (v^2 + w^2)v + 6W_{003} (v^2 + w^2)^2 v,$$

$$\frac{\partial W}{\partial w} = 4W_{002} (v^2 + w^2)w + 6W_{003} (v^2 + w^2)^2 w.$$

Vzhledem k rotační souměrnosti stačí, omezíme-li se jen na poledníkový řez ( $w = 0$ ), platí

$$\Delta y' = 2c(4W_{002}v^3 + 6W_{003}v^5),$$

dále platí pro  $v = v_k = 1$

$$\frac{\Delta s'_k}{4c^2} = 4W_{002} + 6W_{003},$$

kde  $\Delta s'_k = 2c \Delta y'_k$  je podélná aberace (podélná sférická aberace). Předpokládejme dále, že pro  $v = v_0$  je  $\Delta y' = 0$ . Označíme-li  $q_0$  jako *korekční pásmo*, potom platí

$$0 = 2W_{002} + 3W_{003} q_0,$$

což, ve spojení s předcházející rovnicí, dává

$$W_{002} = -\frac{3}{2} W_{003} q_0, \quad W_{003} = \frac{\Delta s'_k}{24(1-q_0)c^2}. \quad (12)$$

Koeficient  $W_{003}$  si můžeme také vyjádřit pomocí extrémní hodnoty  $\Delta s'_{\text{ext}}$  podélné sférické aberace. Užitím předcházejících vztahů dostáváme

$$W_{003} = -\frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{6c^2 q_0^2}. \quad (13)$$

Podélná sférická aberace bude mít extrémní hodnotu pro pásmo  $q_{\text{ext}} = q_0/2$ . Dosazením za  $W_{002}$  a  $W_{003}$  do rovnice pro  $W$  obdržíme

$$W = \frac{\Delta s'_k (2q - 3q_0) q^2}{48c^2 (1 - q_0)} = \frac{\Delta s'_{\text{ext}} (3q_0 - 2q) q^2}{12c^2 q_0^2}. \quad (14)$$

Tato aberace se nazývá *otvorová vada pátého řádu*. Výsledná vlnová aberace je dána součtem vztahů (11) a (14), platí tedy

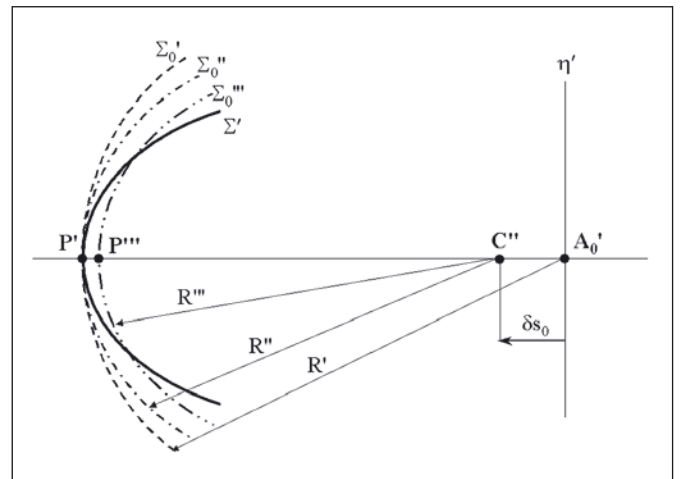
$$W = W_{003} q^3 + W_{002} q^2 + W_{001} q + W_{000}, \quad (15)$$

kde  $W_{000}$  je konstanta, jejíž význam je uveden níže. Dále pak značí

$$W_{003} = \frac{\Delta s'_k}{24c^2 (1 - q_0)} = -\frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{6c^2 q_0^2}, \quad W_{002} = -\frac{3}{2} q_0 W_{003}, \quad (16)$$

$$W_{001} = -\frac{\delta s_0}{8c^2}, \quad W_{000} = \delta R''.$$

Vztahy (15) a (16) jsou tedy obecným vyjádřením vlnové aberace optické soustavy pro případ současného působení sférické aberace třetího a pátého řádu spolu s defokusací. Koeficienty  $W_{003}$  a  $W_{002}$  nám charakterizují vlnovou aberaci vzhledem k referenční sféře  $\Sigma'_0$  se středem v paraxiálním obrazovém bodě  $A'_0$  a procházející středem  $P'$  výstupní pupily optické soustavy (*obr. 2*) [1,12].  $R'$  ( $P', A'_0$ ) je poloměr této referenční sféry. Koeficient  $W_{001}$  nám udává změnu vlnové aberace v důsledku posunu středu referenční sféry o hodnotu  $\delta s_0$  od paraxiálního obrazového bodu  $A'_0$  [12].



Obr. 2 Referenční sféry

Tato nová referenční sféra  $\Sigma_0''$  opět prochází středem  $P'$  výstupní pupily optické soustavy a její poloměr má hodnotu  $R'' = R' + \delta s_0$ . Člen  $W_{000} = \delta R''$  nám umožňuje vypočítat *optimální referenční sféru*  $\Sigma_0'''$ , která již neprochází středem  $P'$  výstupní pupily optické soustavy, ale bodem  $P'''$ , který leží ve vzdálenosti  $\delta R''$  od bodu  $P'$ , její poloměr má hodnotu  $R'' = R' + \delta s_0 + \delta R''$  a její střed leží ve vzdálenosti  $\delta s_0$  od paraxiálního obrazového bodu  $A_0'$ .

#### 4. VÝPOČET OPTIMÁLNÍ HODNOTY KOREKČNÍHO PÁSMÁ

Jak je ze vztahů (15) a (16) patrné, bude průběh vlnové aberace závislý na hodnotě korekčního pásma  $q_0$ . Zabýváme se nyní problémem určení optimální hodnoty korekčního pásma. Optimální hodnota korekčního pásma bude záviset na kritériu, které si zvolíme pro posouzení vlivu vlnové aberace na vyšetřovaný proces. Jako kritérium pro posouzení vlivu vlnové aberace na vyšetřovaný proces si zvolíme následující kritéria:

- maximální odchylku vlnové aberace od nuly
- minimální hodnotu střední kvadratické odchylky vlnové aberace

##### 4.1. Výpočet korekčního pásma minimalizujícího maximální odchylku vlnové aberace

Předpokládáme nyní, že kritériem pro výpočet optimální hodnoty korekčního pásma bude maximální odchylka vlnové aberace od nuly. Toto kritérium má význam např. v oblasti měření tvaru optických ploch, kdy se nám jedná o určení odchylek jednotlivých bodů měřené plochy od nominálního tvaru této plochy. Jak je známo z matematiky, polynomy, které minimalizují maximální odchylku od nuly jsou Čebyševovy polynomy [13,14].

Má-li se vlnová aberace  $W$ , daná vztahem (15), minimálně odchylovat od nuly, musí se pravá část rovnice (15) rovnat příslušnému Čebyševovu polynomu. Musí tedy platit  $W = T_3^*$ , kde  $T_3^*$  je posunutý Čebyševův polynom [13,14]. Tedy

$$W = W_{003}q^3 + W_{002}q^2 + W_{001}q^2 + W_{000} = 32q^3 - 48q^2 + 18q - 1. \quad (17)$$

Porovnáním koeficientů ve vztahu (17) dostáváme

$$W_{003} = -\frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{6c^2 q_0^2} = 32, W_{002} = -\frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{6c^2 q_0^2} = 20, W_{001} = -\frac{\delta s_0}{8c^2} = 18,$$

$$W_{000} = \delta R'' = -1.$$

Řešením těchto vztahů dostáváme

$$q_0 = 1, \quad \delta s_0 = 3\Delta s'_{\text{ext}} / 4 = 0,75 \Delta s'_{\text{ext}}, \quad \delta R'' = \frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{192c^2}. \quad (18)$$

Ze vztahů (18) je patrné, že optimální hodnota korekčního pásma v případě sférické aberace je  $q_0 = 1$  a tedy sférická aberace je korigována pro paprsky procházející krajem výstupní pupily optické soustavy. Poloha středu referenční sféry se pak nachází ve vzdálenosti  $\delta s_0 = \Delta s'_{\text{ext}}$  od paraxiální obrazové roviny, kde  $\Delta s'_{\text{ext}}$  je podélná sférická aberace pro pásmo  $q = q_{\text{ext}} = 0,5 q_0$ .

##### 4.2. Výpočet korekčního pásma minimalizujícího střední kvadratickou odchylku vlnové aberace

Jako kritérium kvality obrazu vezmeme normovanou intenzitu ve středu difrakčního obrazce (Strehlova definice) tj. poměr intenzity ve středu difrakčního obrazce optické soustavy zatížené aberacemi a fyzikálně dokonalé optické soustavy. Optickou soustavu považujeme za rovnocennou fyzikálně dokonalé optické soustavě, je-li Strehlova definice větší než 0,8 (Strehlovo kritérium). Pro Strehlovu definici v případě optické soustavy s kruhovou pupilou platí [1,5,8]

$$\text{S.D.} = 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \left( \overline{W^2} - \overline{W}^2 \right), \quad (19)$$

kde

$$\overline{W} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad \overline{W^2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W^2(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

kde  $W(r, \varphi)$  je vlnová aberace,  $r$  a  $\varphi$  jsou polární souřadnice v pupile a  $\lambda$  je vlnová délka světla. Ze vztahu (19) je patrné, že Strehlova definice přímo souvisí se střední kvadratickou odchylkou vlnové aberace. Předpokládejme nyní, že kritériem pro výpočet optimální hodnoty korekčního pásma bude minimální hodnota střední kvadratické odchylky vlnové aberace. Jak je ze vztahu (15) patrné, v případě sférické vady nezávisí vlnová aberace na polární souřadnici  $\varphi$ , ale jen na souřadnici  $r$ , tedy

$$W(r, \varphi) = W(r).$$

Potom platí

$$\overline{W} = 2 \int_0^1 W(r) r dr, \quad \overline{W^2} = 2 \int_0^1 W^2(r) r dr, \quad (20)$$

Hledejme nyní vyjádření vlnové aberace  $W(r)$  pomocí polynomů, které jsou ortogonální na intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ .

Připomeňme si nyní základní vlastnosti ortogonálních polynomů [13,14], které získáme ortogonalizací posloupnosti nezávislých funkcí  $\{\Psi_n(t) = t^n\}$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) na intervalu  $t \in \langle a, b \rangle$ :

- 1) *Libovolný polynom stupně  $n$  si můžeme vyjádřit pomocí lineární kombinace ortogonálních polynomů  $P_m(t)$  ( $m = 0, 1, 2, \dots, n$ ).*
- 2) *Ortogonální polynomy  $P_m(t)$  jsou jednoznačně určeny vahou  $\rho(t)$  (až na konstantní součinitel).*
- 3) *Pro skalární součin dvou různých ortogonálních polynomů platí*

$$\int_a^b P_m(t) P_n(t) \rho(t) dt = 0, \quad m \neq n. \quad (21)$$

- 4) *Explicitní tvar polynomů  $P_n(t)$  je*

$$P_n(t) = K_n \begin{vmatrix} C_0 & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ C_1 & C_2 & C_3 & \dots & C_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n-1} & C_n & C_{n+1} & \dots & C_{2n-1} \\ 1 & t & t^2 & \dots & t^n \end{vmatrix}, \quad C_n = \int_a^b t^n \rho(t) dt. \quad (22)$$

kde  $K_n$  je normovací konstanta.

- 5) *Libovolné tři po sobě následující polynomy ortogonální soustavy  $\{P_n(t)\}$  jsou mezi sebou vázány rekurentními vztahy*

$$t P_n(t) = \alpha_n P_{n+1}(t) + \beta_n P_n(t) + \gamma_n P_{n-1}(t), \quad (23)$$

kde  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$  a  $\gamma_n$  jsou konstanty.

Hodnoty konstant  $\beta_n$  a  $\gamma_n$  získáme následujícím způsobem. Vynásobme vztah (23) nejprve  $\rho(t)P_n(t)$  a integrujme v intervalu  $\langle a, b \rangle$ , potom  $\rho(t)P_{n-1}(t)$  a opět integrujme v intervalu  $\langle a, b \rangle$ . Užitím vztahu (21) dostáváme

$$\beta_n = \frac{\int_a^b \rho(t) P_n^2(t) dt}{\int_a^b \rho(t) P_n^2(t) dt}, \quad \gamma_n = \frac{\int_a^b \rho(t) P_n(t) P_{n-1}(t) dt}{\int_a^b \rho(t) P_{n-1}^2(t) dt}. \quad (24)$$

Hodnotu konstanty  $\alpha_n$  získáme tím způsobem, že budeme požadovat, aby se hodnota polynomů  $P_n(t)$  pro nějakou hodnotu  $t = t_\alpha \in \langle a, b \rangle$  rovnala konstantě. Dosazením do (23) dostáváme

$$\alpha_n = t_\alpha - \beta_n - \gamma_n. \quad (25)$$

Hodnotu konstanty  $K_n$  určíme z nějaké doplňující podmínky kladené na polynomy  $P_n(t)$ . Požadujeme např. aby se hodnota polynomů  $P_n(t)$  pro nějakou hodnotu  $t = t_\alpha \in \langle a, b \rangle$  rovnala konstantě tj.  $P_n(t_\alpha) = K_\alpha$  ze vztahu (22) pro konstantu  $K_n$  dostáváme

$$K_\alpha = K_n \begin{vmatrix} C_0 & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ C_1 & C_2 & C_3 & \dots & C_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n-1} & C_n & C_{n+1} & \dots & C_{2n-1} \\ 1 & t_\alpha & t_\alpha^2 & \dots & t_\alpha^n \end{vmatrix}. \quad (26)$$

Aplikujme nyní výše uvedené vztahy na náš případ sférické aberace pátého řádu. Jak je ze vztahu (15) patrné, je vlnová aberace závislá jen na sudých mocninách radiální polární souřadnice  $r$  bodu na referenční sféře a tedy položíme  $t = r^2$ . Uvážíme-li vztahy (20) vidíme, že váhová funkce je rovna jedné ( $\rho(t) = 1$ ) a  $t \in (0, 1)$ . Dále požadujeme, aby pro  $t = 1$  měly polynomy hodnotu  $P_n(1) = 1$ . Zavedme nyní označení

$$R_n(r) = P_n(r^2).$$

Nyní můžeme přistoupit k výpočtu našich polynomů  $R_n(r)$ . Ze vztahů (22) a (26) dostáváme

$$C_n = \int_0^1 r^{2n} r \, dr = \frac{1}{n+1}, \quad R_0(r) = 1.$$

Dále pak

$$R_1(r) = K_1 \begin{vmatrix} 1 & 1/2 \\ 1 & r^2 \end{vmatrix} = \frac{K_1}{2} (2r^2 - 1) = 2r^2 - 1.$$

$$R_2(r) = K_2 \begin{vmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1/2 & 1/3 & 1/4 \\ 1 & r^2 & r^4 \end{vmatrix} = \frac{K_2}{72} (6r^4 - 6r^2 + 1) = 6r^4 - 6r^2 + 1$$

Známe-li první dva polynomy  $R_0(r) = 1$  a  $R_1(r) = 2r^2 - 1$ , můžeme pro výpočet dalších polynomů též užít rekurentní vztahy (23) a (24), které v našem případě mají tvar

$$r^2 R_n(r) = \alpha_n R_{n+1}(r) + \beta_n R_n(r) + \gamma_n R_{n-1}(r), \quad (27)$$

$$\beta_n = \frac{\int_0^1 R_n^2(r) r^3 \, dr}{\int_0^1 R_n^2(r) r \, dr}, \quad \gamma_n = \frac{\int_0^1 R_n(r) R_{n-1}(r) r^3 \, dr}{\int_0^1 R_{n-1}^2(r) r \, dr}, \quad (28)$$

$$\alpha_n = 1 - \beta_n - \gamma_n.$$

Vztah (27) můžeme přepsat do přehlednějšího tvaru a sice

$$R_{n+1}(r) = \frac{(r^2 - \beta_n)R_n(r) - \gamma_n R_{n-1}(r)}{\alpha_n}, \quad (29)$$

Položíme-li nyní  $n = 1$ , dostáváme ze vztahů (28)

$$\beta_1 = 1/2, \quad \gamma_1 = 1/6, \quad \alpha_1 = 1/3.$$

Dosažením do (29) máme

$$R_2(r) = \frac{(r^2 - 1/2)(2r^2 - 1) - 1/6}{1/3} = 6r^4 - 6r^2 + 1,$$

což je vztah shodný se vztahem získaným předcházejícím způsobem. Analogicky pak dostáváme pro  $n = 2$

$$R_3(r) = 20r^6 - 30r^4 + 12r^2 - 1 \quad \text{atd.}$$

Shrneme-li získané výsledky, máme v přehledu

$$R_0(r) = 1, \quad R_1(r) = 2r^2 - 1, \quad R_2(r) = 6r^4 - 6r^2 + 1, \quad (30)$$

$$R_3(r) = 20r^6 - 30r^4 + 12r^2 - 1.$$

Vyjádříme-li si nyní vlnovou aberaci pomocí polynomů  $R_n(r)$  a to ve tvaru

$$W_n(r) = A_n R_n(r),$$

kde  $A_n$  je konstanta. Potom, dosažením do vztahu (20), dostáváme ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )

$$\overline{W}_n = 2 \int_0^1 W_n(r) r \, dr = 2 A_n \int_0^1 R_n(r) r \, dr = 0, \quad (31)$$

$$\overline{W}_n^2 = 2 A_n^2 \int_0^1 R_n^2(r) r \, dr = \frac{A_n^2}{2n+1}.$$

Pro  $n = 0$  dostáváme

$$\overline{W}_0 = 2 A_0 \int_0^1 R_0(r) r \, dr = A_0, \quad \overline{W}_0^2 = 2 A_0^2 \int_0^1 R_0^2(r) r \, dr = A_0^2. \quad (32)$$

Vidíme tedy, že polynomy  $R_n(r)$  nám vyjadřují vlnovou aberaci tak, že její střední hodnota je rovna koeficientu  $A_0$ . Vyjadřeme si nyní vlnovou aberaci ve tvaru

$$W(r) = \sum_{n=0}^N A_n R_n(r), \quad (33)$$

kde

$$R_n(r) = \sum_{i=0}^n a_{ni} r^{2i}.$$

Pro střední hodnotu vlnové aberace pak dostáváme

$$\overline{W} = 2 \int_0^1 \left[ \sum_{n=0}^N A_n R_n(r) \right] r \, dr = \sum_{n=0}^N A_n \sum_{i=0}^n \frac{a_{ni}}{i+1} = A_0.$$

Dále pak pro střední hodnotu kvadrátu vlnové aberace platí

$$\overline{W^2} = 2 \int_0^1 \left[ \sum_{n=0}^N A_n R_n(r) \right]^2 r \, dr =$$

$$= 2 \int_0^1 \left[ \sum_{n=0}^N A_n^2 R_n^2(r) \right] r \, dr + 4 \int_0^1 \left[ \sum_{j=0}^{N-1} A_j R_j(r) \sum_{k=j+1}^N A_k R_k(r) \right] r \, dr$$

Vzhledem ke vztahu (23), tj. ortogonalitě polynomů  $R_n(r)$ , je druhý integrál na pravé straně roven nule a tedy

$$\overline{W^2} = 2 \int_0^1 \left[ \sum_{n=0}^N A_n R_n(r) \right]^2 r \, dr =$$

$$= 2 \int_0^1 \left[ \sum_{n=0}^N A_n^2 R_n^2(r) \right] r \, dr = 2 \sum_{n=0}^N A_n^2 \int_0^1 R_n^2(r) r \, dr = A_0^2 + \sum_{n=1}^N \frac{A_n^2}{2n+1}.$$

Pro Strehlovu definici potom dostáváme

$$\text{S.D.} = 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \left( \overline{W^2} - \overline{W}^2 \right) =$$

$$= 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \overline{W^2} = 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sum_{n=1}^N \frac{A_n^2}{2n+1}. \quad (34)$$

Ze vztahu (34) je patrná výhoda použití ortogonálních polynomů  $R_n(r)$  pro vyjádření vlnové aberace.

Polynomy  $R_n(r)$ , které jsme získali výše uvedeným postupem jsou v úzkém vztahu s *Zernikeovými polynomy*  $R_n^0(r)$  [5,8,10], *Legendreovými polynomy*  $P_n(x)$  a *Jakobiovými polynomy*  $G_n(p, q, x)$  [13,14], platí ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )

$$R_n(r) = R_{2n}^0(r) = P_n(2r^2 - 1) = (-1)^n G_n(1, 1, r^2),$$

kde pro první čtyři Jakobiovy polynomy platí



$$G_0(p, q, x) = 1,$$

$$G_1(p, q, x) = 1 - \binom{1}{1} \frac{p+1}{q} x,$$

$$G_2(p, q, x) = 1 - \binom{2}{1} \frac{p+2}{q} x + \binom{2}{2} \frac{(p+2)(p+3)}{q(q+1)} x^2,$$

$$G_3(p, q, x) = 1 - \binom{3}{1} \frac{p+3}{q} x + \binom{3}{2} \frac{(p+3)(p+4)}{q(q+1)} x^2 - \binom{3}{3} \frac{(p+3)(p+4)(p+5)}{q(q+1)(q+2)} x^3$$

Má-li vlnová aberace  $W$ , daná vztahem (15), minimalizovat střední kvadratickou odchylku vlnové aberace, musí se pravá část rovnice (15) rovnat polynomu  $R_3(r)$ . Musí tedy platit  $W(r) = R_3(r)$ . Tedy při označení  $q = r^2$

$$W = W_{003}q^3 + W_{002}q^2 + W_{001}q + W_{000} = 20q^3 - 30q^2 + 12q - 1. \quad (35)$$

Porovnáním koeficientů ve vztahu (35) dostáváme

$$W_{003} = -\frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{6c^2 q_0^2} = 20, \quad W_{002} = -\frac{3}{2} q_0 W_{003} = -30,$$

$$W_{001} = -\frac{\delta s_0}{8c^2} = 12, \quad W_{000} = \delta R'' = -1,$$

Řešením těchto vztahů dostáváme

$$q_0 = 1, \quad \delta s_0 = 4\Delta s'_{\text{ext}} / 5 = 0,8 \Delta s'_{\text{ext}}, \quad \delta R'' = \frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{120c^2}. \quad (36)$$

Ze vztahů (36) je patrné, že optimální hodnota korekčního pásma v případě sférické aberace je  $q_0 = 1$  a tedy sférická aberace je korigována pro paprsky procházející krajem výstupní pupily optické soustavy. Poloha středu referenční sféry se pak nachází ve vzdálenosti  $\delta s_0 = 0,8 \Delta s'_{\text{ext}}$  od paraxiální obrazové roviny, kde  $\Delta s'_{\text{ext}}$  je podélná sférická aberace pro pásmo  $q = q_{\text{ext}} = 0,5 q_0$ .

Výše uvedené výsledky lze také získat následujícím, poněkud zdlouhavějším, způsobem pomocí Strehlovy definice. Podle předcházejícího platí ( $q = r^2$ ).

$$W(q) = W_{003}q^3 + W_{002}q^2 + W_{001}q + W_{000}, \quad (37)$$

$$W(q) = \sum_{n=0}^3 A_n R_n(q), \quad (38)$$

$$R_0(q) = 1, \quad R_1(q) = 2q - 1, \quad R_2(q) = 6q^2 - 6q + 1, \quad R_3(q) = 20q^3 - 30q^2 + 12q - 1. \quad (39)$$

Vyjádříme-li si nyní ze vztahů (39) veličiny  $q^3$ ,  $q^2$  a  $q$  dostáváme

$$q = \frac{1}{2} [R_1(q) + R_0(q)],$$

$$q^2 = \frac{1}{6} [R_2(q) + 3R_1(q) + 2R_0(q)],$$

$$q^3 = \frac{1}{20} [R_3(q) + 5R_2(q) + 9R_1(q) + 5R_0(q)],$$

Dosadíme-li nyní tyto vztahy do vztahu (37), potom užitím vztahu (38) obdržíme

$$A_0 = \frac{1}{4} W_{003} + \frac{1}{3} W_{002} + \frac{1}{2} W_{001} + W_{000}, \quad A_1 = \frac{9}{20} W_{003} + \frac{1}{2} W_{002} + \frac{1}{2} W_{001},$$

$$A_2 = \frac{1}{4} W_{003} + \frac{1}{6} W_{002}, \quad A_3 = \frac{1}{20} W_{003}, \quad (40)$$

Má-li být Strehlova definice maximální, musí být ve vztahu (34) co nejvíce koeficientů  $A_n$  rovno nule. Položíme-li tedy  $A_0 = 0$ ,  $A_1 = 0$ ,  $A_2 = 0$ , dostáváme z předcházejících vztahů

$$W_{000} = -\frac{1}{20} W_{003}, \quad W_{001} = \frac{3}{5} W_{003}, \quad W_{002} = -\frac{3}{2} W_{003}.$$

Podle vztahů (16) platí

$$W_{003} = -\frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{6c^2 q_0^2}, \quad W_{002} = -\frac{3}{2} q_0 W_{003}, \quad W_{001} = -\frac{\delta s_0}{8c^2}.$$

Porovnáním s předcházejícími vztahy dostáváme

$$q_0 = 1, \quad \delta s_0 = 4\Delta s'_{\text{ext}} / 5 = 0,8 \Delta s'_{\text{ext}}, \quad W_{000} = \delta R'' = \frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{120c^2}$$

což jsou identické výsledky s (36). Maximální hodnota Strehlovy definice je pak rovna

$$(S.D.)_{\text{max}} = 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{A_3^2}{7} = 1 - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{W_{003}^2}{2800}.$$

Z tohoto vztahu můžeme určit toleranci na sférickou aberaci. Má-li být Strehlova definice větší než 0,8, potom z předcházejícího vztahu dostáváme

$$W_{003} \leq 3,77 \lambda, \quad \text{a tedy} \quad \Delta s'_{\text{ext}} \leq 23 \lambda c^2.$$

Shrneme-li výše dosažené výsledky vidíme, že v případě sférické aberace, kdy požadujeme, aby se vlnová aberace optické soustavy "minimálně lišila od nuly" tj. měla minimální absolutní hodnotu v daném intervalu, musí optická soustava splňovat následující podmínky,

$$q_0 = 1, \quad \delta s_0 = 3\Delta s'_{\text{ext}} / 4 = 0,75 \Delta s'_{\text{ext}}, \quad \delta R'' = \frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{192c^2}. \quad (41)$$

V případě, že požadujeme maximální hodnotu Strehlovy definice, musí optická soustava splňovat následující podmínky,

$$q_0 = 1, \quad \delta s_0 = 4\Delta s'_{\text{ext}} / 5 = 0,8 \Delta s'_{\text{ext}}, \quad \delta R'' = \frac{\Delta s'_{\text{ext}}}{120c^2}. \quad (42)$$

Jak je patrné ze vztahů (41) a (42), v obou případech je optimální korekce sférické aberace optické soustavy ta, kdy je hodnota korekčního pásma  $q_0 = 1$ , tj. podélná sférická aberace je rovna nule pro paprsek procházející krajem výstupní pupily optické soustavy. To je zcela nový výsledek, který má velký praktický význam. Říká, že optické soustavy používané pro měření (např. objektivы interferometrů), tak i optické zobrazovací soustavy (např. fotografické objektivы apod.) budou mít optimální korekci, bude-li sférická aberace korigována pro krajní pásmo apertury (pro paprsek procházející krajem výstupní pupily optické soustavy). Dále byly v obou případech odvozeny nové vztahy pro výpočet změny  $\delta R''$  poloměru referenční sféry.

## 5. ZÁVĚR

V práci byla provedena podrobná teoretická analýza výpočtu koeficientů vlnové aberace až do pátého řádu a to pomocí korekčních pásem, tj. pásem, v kterých je hodnota podélné sférické aberace nulová. Říkáme, že pro tato pásma je sférická aberace korigována. Při výpočtech optických systémů je toto vyjádření výhodné a názorné, neboť aberace jsou ve většině případů korigovány pro určité pásmo v oblasti numerické apertury. Odvozené vztahy představují jedno z možných vyjádření koeficientů vlnové aberace, které je však velmi názorné z praktického hlediska. Dále byl ukázán způsob výpočtu polynomů ortogonálních v oblasti jednotkového kruhu. Užitím odvozených vztahů a ortogonálních polynomů byl proveden výpočet optimálních korekčních pásem, poloh středu referenční sféry a změn poloměrů referenční sféry pro případ, kdy požadujeme minimální odchylku vlnové aberace od nuly a pro případ kdy požadujeme minimalizaci střední kvadratické odchylky vlnové aberace (maximalizace Strehlovy definice).

## Literatura

- [1] MIKŠ, A.: *Aplikovaná optika 10*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000.
- [2] MARÉCHAL, A.: *Imagerie Géométrique Aberrations*. Revue d'Optique, Paris, 1952.
- [3] HERZBERGER, M.: *Modern Geometrical Optics*. Interscience, New York, 1958.
- [4] MOUROULIS, P. - MACDONALD, J.: *Geometrical Optics and Optical Design*. Oxford University Press, New York, 1997.
- [5] BORN, M. - WOLF, E.: *Principles of Optics*. Oxford University Press, New York, 1964.
- [6] HOPKINS, H. H.: *Wave theory of Aberrations*. Oxford University Press, New York, 1950.
- [7] COX, A.: *A System of Optical Design*. Focal Press, London, 1964.
- [8] HAFERKORN, H.: *Bewertung optischer Systeme*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1986.
- [9] WELFORD, W. T.: *Aberrations of the Symmetrical Optical Systems*. Academic Press, London, 1974.
- [10] BUCHDAHL, H. A.: *An Introduction to Hamiltonian Optics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1970.
- [11] HOPKINS, H. H.: *Canonical Pupil Coordinates in Geometrical Optics and Diffraction Image Theory*. Jap. J. Appl. Physics, Vol.4, Sup. I, 1965, pp.31-35.
- [12] MIKŠ, A.: *Dependence of the Wave-Front Aberration on the Radius of the Reference Sphere*. Journal of the Optical Society of America A. 2002, vol. 19, no. 6, p. 1187-1190.
- [13] KORN, G. A. - KORN, T.M.: *Mathematical Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1968.
- [14] NIKIFOROV, A. F. - UVAROV, V. B.: *Osnovy teorii specialnych funkcij*. Nauka, Moskva 1974.

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

Ing. Jiří Novák, PhD., katedra fyziky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice,  
tel.: 224 354 435, fax: 233 333 226, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz

Jaroslav POSPÍŠIL, Jan HRDÝ, Jan HRDÝ, jr.

Department of Experimental Physics of Palacký University and Joint Laboratory of Optics of Palacký University and Institute of Physics of Academy of Sciences, Olomouc, Czech Republic

# Light reflection, absorption, scattering and redness effects of soils in relationship to their haematite content

*The article presents coherent theoretical considerations about the specific light reflection, absorption, scattering and redness properties of soils containing usually the haematite, goethite and remaining iron oxide-free components. For such a purpose, the relevant mathematical expressions are introduced and explained according to the considered three basic color classification systems, chosen redness rates definitions and soil components contents. Finally, examples of soil color effects are presented and interpreted. They ratify the usefulness of the exploited quantities and described evaluational procedures for the routine soil colorimetry.*

**Keywords:** Soil haematite and goethite, basic color systems, redness rates, soil haematite content

## 1. INTRODUCTION

Soils, described elsewhere [1], are mixtures containing commonly the iron (Fe) oxide mineral and organic compounds which interact with the incident light of the wavelength range  $\Delta\lambda \approx 400 - 800$  nm and are usually neither completely transparent nor completely opaque. In such pigment mixtures, their particles partly reflect, absorb and scatter the incident light. These characteristic optical properties can be investigated effectively by the Kubelka-Munk (K-M) theory (approach), especially in the cases of well drained soil samples (specimens) with small amounts of organic matter. In such soils, the iron oxides (especially the haematite,  $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ , and goethite,  $\alpha - \text{FeOOH}$ ) are, generally, the dominant pigments [2-4]. The corresponding spectral considerations can be completed by the so-called second-derivative spectrometry for improvement of resolution of fine structures of the optical spectra curves [5].

The quantified assessment of characteristic color properties of soils, affected by their optical properties mentioned above, enables a relevant color (colorimetric) classification system (space, model). In this article, the profitable three color systems are exploited, i.e. the CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) tristimulus color system ( $X, Y, Z$ ), the CIE color system ( $L^*, a^*, b^*$ ), known as the CIELAB system, and the Munsell color system ( $H, V, C$ ) [6-14]. These systems are purposefully applied to characteristic redness (redding) effects of haematite (hematite) and goethite on the soil colors. Haematite makes the soil color reddish because the primary haematite bright red hue is very effective in masking the primary yellow or yellow-brown hue of goethite. Thus investigation of characteristic soil redness and its relationship to haematite content (concentration) in soils, containing haematite and goethite and

having a wide range of morphological and mineralogical features, is interesting and useful in practice. That is why this problem is considered above all in the present article. The considerations are based on the chosen redness rates, which are defined, interpreted, analyzed and applied to some different soils in the following text.

## 2. THEORETICAL BACKGROUND OF THE LIGHT REFLECTION, ABSORPTION AND SCATTERING IN A SOIL SAMPLE

Let us consider an extensive semi-transparent color soil sample (layer) of a pigment mixture of thickness  $D$ . The sample is irradiated along  $D$  with a diffuse quasi-monochromatic light flux of dominant wavelength  $\lambda$ . This flux is formed in fact by a mixture of its downward component, influenced by the sample absorbance (absorption factor)  $\mathcal{A}(\lambda)$  and the scattering (scattering factor)  $\mathcal{S}(\lambda)$ , and of its upwards component influenced by the sample reflectance (reflection factor)  $\mathcal{R}(\lambda)$  over the sample background of reflectance  $\mathcal{R}_b(\lambda)$ . In accordance with [2-4], the most general hyperbolic expression of  $\mathcal{R}(\lambda)$  is

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{1 - \mathcal{R}_b(\lambda) \{a(\lambda) - b(\lambda) \coth[b(\lambda) \mathcal{S}(\lambda) D]\}}{a(\lambda) - \mathcal{R}_b(\lambda) + b(\lambda) \coth[b(\lambda) \mathcal{S}(\lambda) D]}, \quad (1)$$

where

$$a(\lambda) = 1 + \frac{\mathcal{A}(\lambda)}{\mathcal{S}(\lambda)}, \quad b(\lambda) = [a^2(\lambda) - 1]^{1/2}. \quad (2)$$

In the limiting case of sufficient sample thickness  $D$  so that further increase of  $D$  does not change the sample reflectance  $\mathcal{R}(\lambda)$ , it can be assumed the negligible influence of  $\mathcal{R}_b(\lambda)$  on  $\mathcal{R}(\lambda)$  in Eq. (1). This situation occurs for samples of  $D$  equal to few tenths of millimeter. Under such a case, Eq. (1) changes to the form

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{\mathcal{S}(\lambda)}{\mathcal{A}(\lambda) + \mathcal{S}(\lambda) \{ \mathcal{A}(\lambda) [\mathcal{A}(\lambda) + 2\mathcal{S}(\lambda)] \}^{1/2}}, \quad (3)$$

which simpler form is

$$\Theta(\lambda) = \frac{\mathcal{A}(\lambda)}{\mathcal{S}(\lambda)} = \frac{[1 - \mathcal{R}(\lambda)]^2}{2\mathcal{R}(\lambda)}. \quad (4)$$

If the quantities  $\mathcal{A}(\lambda)$  and  $\mathcal{S}(\lambda)$  can be treated as a simple additive functions of components  $\mathcal{A}_n(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_n(\lambda)$  of total numbers  $N$  weighted by their relative contents (proportions, concentrations)  $\kappa_n$ , i.e. if

$$\mathcal{A}(\lambda) \hat{=} \mathcal{A}_M(\lambda) = \sum_{n=1}^N \kappa_n \mathcal{A}_n(\lambda), \quad \mathcal{S}(\lambda) \hat{=} \mathcal{S}_M(\lambda) = \sum_{n=1}^N \kappa_n \mathcal{S}_n(\lambda), \quad (5)$$

then Eq.(4) for such mixture M is

$$\Theta_M(\lambda) = \frac{\mathcal{A}_M(\lambda)}{\mathcal{S}_M(\lambda)} = \frac{[1 - \mathcal{R}_M(\lambda)]^2}{2\mathcal{R}_M(\lambda)} = \frac{\sum_{n=1}^N \kappa_n \mathcal{A}_n(\lambda)}{\sum_{n=1}^N \kappa_n \mathcal{S}_n(\lambda)}. \quad (6)$$

When a pigment mixture M acts as the so-called white scatter of single weighted total scattering  $\kappa_{sc} \mathcal{S}_{sc}(\lambda)$ , Eq.(6) changes to the form

$$\Theta_M(\lambda) = \frac{\sum_{n=1}^N \kappa_n \mathcal{A}_n(\lambda)}{\kappa_{sc} \mathcal{S}_{sc}(\lambda)}. \quad (7)$$

This is a case of soils with low organic matter where the constituent components (inclusive of feldspars, clay minerals or quartz)

can be considered together with iron oxide components as one (white-gray) scatter, like the dithionite and dissolve iron oxide pigments. From Eq. (7) follows the linear relationship between  $\Theta_M(\lambda)$  and the contents  $\kappa_{sc}$  of soil pigments. It can be also shown from Eqs. (4) and (7) that additions of small amounts of a pigment to a white scatter causes a decrease of  $\mathcal{R}_M(\lambda)$  values. Such an effect is seen, for example, in an addition of haematite to a haematite-free soil [15].

For a color prediction under the considered K-M theory, it is necessary to determine the values  $\mathcal{A}_M(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_M(\lambda)$  of the considered soil mixture by using the sums of Eqs.(6). In the simplest couple case when a pigment of weighted values  $\kappa_p \mathcal{A}_p(\lambda)$  and  $\kappa_p \mathcal{S}_p(\lambda)$  is mixed with a standard pigment of values  $\kappa_s \mathcal{A}_s(\lambda)$  and  $\kappa_s \mathcal{S}_s(\lambda)$ , Eq.(6) becomes

$$\Theta_M(\lambda) = \frac{\kappa_p \mathcal{A}_p(\lambda) + \kappa_s \mathcal{A}_s(\lambda)}{\kappa_p \mathcal{S}_p(\lambda) + \kappa_s \mathcal{S}_s(\lambda)}. \quad (8)$$

Moreover, if the standard pigment is a white reflectance surface of  $\mathcal{R}_s(\lambda)$  and  $\mathcal{A}_s(\lambda) = 0$ , Eq.(8) changes to the linear relation

$$\frac{1}{\Theta_M(\lambda)} = \frac{\kappa_s \mathcal{S}_s(\lambda)}{\kappa_p \mathcal{A}_p(\lambda)} + \frac{\mathcal{S}_p(\lambda)}{\mathcal{A}_p(\lambda)} = \frac{2\mathcal{R}_M(\lambda)}{[1 - \mathcal{R}_M(\lambda)]^2}. \quad (9)$$

Here  $\mathcal{R}_M(\lambda)$  is the reflectance of the whole pigment mixture. If we plot  $1/\Theta_M(\lambda)$  against given  $\kappa_s/\kappa_p$ , the slope of the corresponding straight line is  $\mathcal{S}_s(\lambda)/\mathcal{A}_p(\lambda)$  and its intercept is  $\mathcal{S}_p(\lambda)/\mathcal{A}_p(\lambda)$  (see Fig. 1). Also the value  $\mathcal{S}_s(\lambda) = 1$  can be adopted. Thus the corresponding graphical form of Eq.(9) gives directly the values  $\mathcal{A}_p(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_p(\lambda)$  for the considered wavelength  $\lambda$  and the utilized standard pigment.

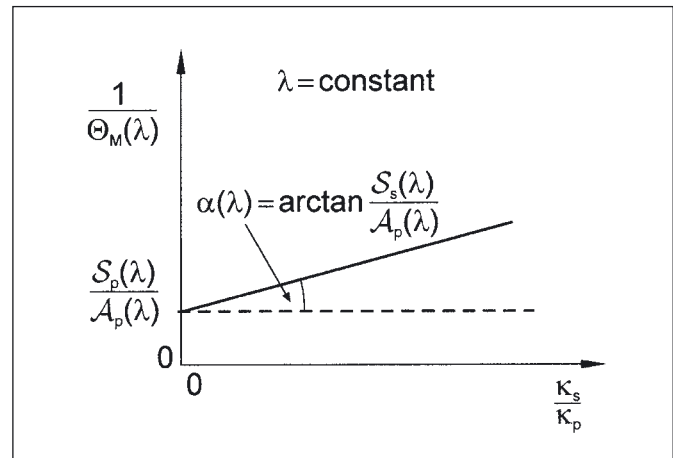


Fig. 1 Illustration of a linear graphical dependence of  $1/\Theta_M(\lambda)$  according to  $\kappa_s/\kappa_p$  for  $\lambda = \text{constant}$ . Such a dependence agree to first Eq. (9)

Let us consider now the real case of a soil mixture containing the soil haematite of content  $\kappa_h$ , the soil goethite of content  $\kappa_g$  and the remaining (deferrated, iron oxide-free) component (including the organic matter) of the content

$$\kappa_r = 1 - \kappa_h - \kappa_g. \quad (10)$$

These contents can be determined separately by the conventional or differential X-ray diffraction method on the untreated soil fraction [16-18], while the corresponding absorbance and scattering values  $\mathcal{A}_h(\lambda)$ ,  $\mathcal{A}_g(\lambda)$ ,  $\mathcal{A}_r(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_h(\lambda)$ ,  $\mathcal{S}_g(\lambda)$ ,  $\mathcal{S}_r(\lambda)$ , realizing the accepted weighted sums

$$\mathcal{A}_M(\lambda) = \kappa_h \mathcal{A}_h(\lambda) + \kappa_g \mathcal{A}_g(\lambda) + \kappa_r \mathcal{A}_r(\lambda), \quad (11)$$

$$\mathcal{S}_M(\lambda) = \kappa_h \mathcal{S}_h(\lambda) + \kappa_g \mathcal{S}_g(\lambda) + \kappa_r \mathcal{S}_r(\lambda), \quad (12)$$

cannot be measured directly for any light wavelength  $\lambda$ . This statement follows from the fact that the precise quantitative separation of soil haematite and soil goethite components under consideration from the associated iron oxide-free soil component is not available, usually. Because the total values  $\mathcal{A}_M(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_M(\lambda)$  of Eqs. (11) and (12) can be known for a chosen number of complete soils (they are obtainable by separate spectrophotometrical measurements), we can estimate the corresponding sufficient average (most probable, best, optimal) soil components representative values  $\overline{\mathcal{A}}_h(\lambda)$ ,  $\overline{\mathcal{A}}_g(\lambda)$ ,  $\overline{\mathcal{A}}_r(\lambda)$ ,  $\overline{\mathcal{S}}_h(\lambda)$ ,  $\overline{\mathcal{S}}_g(\lambda)$  and  $\overline{\mathcal{S}}_r(\lambda)$  by the way suggested in [4]. Such a way is based on exploitation of a total number  $m$  of soil samples, higher than the total number 3 of unknowns ( $m > 3$ ), in every separated Eqs. (11) and (12). The relevant average values, mentioned above, are the results of application of the minimization least-squares procedures of symbolic forms

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m [\mathcal{A}_{M_i}(\lambda) - \mathcal{A}_M(\lambda)]^2 \right\}, \quad (13)$$

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m [\mathcal{S}_{M_i}(\lambda) - \mathcal{S}_M(\lambda)]^2 \right\}, \quad (14)$$

where  $\mathcal{A}_{M_i}(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_{M_i}(\lambda)$  are the obtained values of  $\mathcal{A}_M(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_M(\lambda)$ . To find the minima of Eqs. (13) and (14), their partial derivatives according to  $\mathcal{A}_h(\lambda)$ ,  $\mathcal{A}_g(\lambda)$ ,  $\mathcal{A}_r(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_h(\lambda)$ ,  $\mathcal{S}_g(\lambda)$ ,  $\mathcal{S}_r(\lambda)$  equated to zero are suitable. They give, namely, the searched average values  $\overline{\mathcal{A}}_h(\lambda)$ ,  $\overline{\mathcal{A}}_g(\lambda)$ ,  $\overline{\mathcal{A}}_r(\lambda)$ , and  $\overline{\mathcal{S}}_h(\lambda)$ ,  $\overline{\mathcal{S}}_g(\lambda)$ ,  $\overline{\mathcal{S}}_r(\lambda)$  for the considered wavelength  $\lambda$ .

### 3. PRESENTATION AND INTERPRETATION OF THE CHOSEN SOIL REDNESS RATES UNDER EXPLOITED COLOR SYSTEMS

To quantify the redness effect by haematite, occurring obviously in soils, various suitable redness rates (ratings, indices, degrees) were defined which allow the numerical assessment of the haematite content in soils. For instance, two useful empirical redness rates were suggested and applied in [15]. Their definitions are of forms:

$$\rho_1(Y, x, y) = \frac{(x - 0.35)^2}{(y - 0.35)Y}, \quad (15)$$

$$\rho_1(H, V, C) = \frac{(10 - H)C}{V}. \quad (16)$$

The quantities of Eqs. (15) and (16) were modified and extended afterwards to the following triad of redness rates by [4]:

$$\rho_2(Y, x, y) = \frac{10^4 (x - 0.34)^2}{(y - 0.34)Y^2}, \quad (17)$$

$$\rho_2(L^*, a^*, b^*) = \frac{10^{10} a^* (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}}{b^* L^{*6}}, \quad (18)$$

$$\rho_2(H, V, C) = \frac{10^3 (10 - H)^3 C}{V^6}, \quad (19)$$

The definitions of Eqs. (17) - (19) relate to three classical color classification systems  $(X, Y, Z)$ ,  $(L^*, a^*, b^*)$  and  $(H, V, C)$ , which are introduced in the following text, while Eqs. (15) and (16) are

associated only to two color classification systems  $(X, Y, Z)$  and  $(H, V, C)$ . All the introduced redness rates are most optimal for the artificial binary mixtures of haematite and remaining iron oxide-free soil component. Unfortunately, they are restricted by saturation in redness for haematite content higher than about 0.15. According to [4], the quantities of Eqs. (17) - (19), following from tests until the maximum correlation was obtained between the redness rate and haematite content  $\kappa_h$ , seems to be more realistic and hence more useful in practice rather than the quantities of Eqs. (15) and (16). Hence, only the quantities of Eqs. (17) - (19) are considered in the following text. The tests mentioned above also show usefulness of Eqs. (17) - (19) to determine the redness effects of haematite in a binary mixture with goethite. In such cases, the color changes occur up to about  $\kappa_h = 0.1$  for haematite and up to about  $\kappa_g = 0.3$  for goethite. In the case of pure haematite, a decrease in the redness rate was observed for  $\kappa_h > 0.15$ , while in goethite the primary yellowness decreases for  $\kappa_g > 0.5$ . Because of obvious much lower pigmenting effectivity of goethite in three-part haematite, goethite and iron oxide-free soils, their color redness effects are essentially insensitive to the goethite content  $\kappa_g$ . Hence, the maximum value  $\kappa_h = 0.15$  (already mentioned above for nonsaturated redness) can be accepted also for such soils. The common (average) pigment mixtures found in natural soils of haematite, goethite and iron oxide-free components usually contain  $\kappa_h < 0.15$  and  $\kappa_g < 0.15$ . Therefore, the exploitation of the redness rates of Eqs. (17) - (19) is allowable.

In accordance with [6-14], the quantities (color coordinates) in Eqs. (15) - (19) realize the classical definitions:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}, \quad (20)$$

$$X = k \int_{\Delta\lambda} \mathcal{P}(\lambda) \mathcal{E}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad (21a)$$

$$Y = k \int_{\Delta\lambda} \mathcal{P}(\lambda) \mathcal{E}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad (21b)$$

$$Z = k \int_{\Delta\lambda} \mathcal{P}(\lambda) \mathcal{E}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (21c)$$

$$k = \frac{100}{\int_{\Delta\lambda} \mathcal{E}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}, \quad (22)$$

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16, \quad \text{for } \frac{Y}{Y_0} > 0.008856, \quad (23a)$$

$$L^* = 903.3 \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3}, \quad \text{for } \frac{Y}{Y_0} \leq 0.008856, \quad (23b)$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right], \quad (23c)$$

$$b^* = 500 \left[ \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right], \quad (23d)$$

$$H \triangleq H^* = \arctan \frac{b^*}{a^*}, \quad V \triangleq L^*, \quad C \triangleq C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}, \quad (24)$$

where  $X_0$ ,  $Y_0$  and  $Z_0$  are the CIE tristimulus color coordinates for the illuminant reference white.

The sample light spectral composition function  $\mathcal{P}(\lambda)$  in Eqs. (21) represents either the reflectance spectrum  $\mathcal{R}(\lambda)$  (if the sample is considered as opaque) or the absorbance spectrum  $\mathcal{A}(\lambda)$  (if the sample is considered as transparent),  $\mathcal{E}(\lambda)$  denotes the power

spectrum of a (standard) light source (illuminant) illuminating the sample and  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$  are the CIE standard stimuli spectral curves (color-matching functions). The normalizing coefficient  $k$  is suitably chosen on a scale having tristimulus value  $Y = 100$  for a perfectly diffusing surface in the case of opaque sample, or for a perfectly transparent and scattering sample.  $L^*$  represents the color luminance values with luminous scale from 0 to 100 ( $0 \triangleq$  black,  $100 \triangleq$  white), while  $a^*$  and  $b^*$  denote the representative chromaticity (coloring) values ( $+a^* \triangleq$  red,  $-a^* \triangleq$  green,  $+b^* \triangleq$  yellow,  $-b^* \triangleq$  blue). The corresponding color hue is denoted by  $H^*$  and the color saturation (chroma) values are  $C^*$ . In the case of the Munsell color notation ( $H, V, C$ ), the color coordinates  $H$ ,  $V$  and  $C$  relate to the values  $H^*$ ,  $L^*$  and  $C^*$  with different scales. They can be converted from  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  values using the procedure of ASTM [19].

#### 4. EXAMPLES OF SOIL COLOR EFFECTS

From the previous text follows that the soil redness effects can be profitably estimated either on the basis of K-M theory or by means of the redness rates which are accepted by Eqs. (17) – (19). In this section, examples of both approaches are shown.

For soil color assessments it is necessary to prepare at first the relevant soil samples and, if need be, a suitable comparative white standard. The manner in which a soil sample is prepared markedly affects, namely, the color characteristic values and functions. Unfortunately, no standard method of sample preparation has been adopted by soil scientists so far. This fact makes difficulty of unambiguous comparison the results obtained by different authors. The only common experience is that the color sample material should be suitably treated (processed), finely divided (grinded, powdered) and gently pressed to tablets of circular or rectangular cross-section and relevant sizes. In such cases, the colors appear expressive in dependence of the concrete sample production, sample sort, sample physical state, sample frame and holder, exploited theoretical approach, measuring procedure and measuring conditions [1,4,8-10,15].

The results of color determination under K-M theory obtained so far for different untreated or treated soil mixtures show marked differences of the corresponding spectra  $A_M(\lambda)$ ,  $S_M(\lambda)$ ,  $R_M(\lambda)$  and  $A_h(\lambda)$ ,  $A_g(\lambda)$ ,  $A_r(\lambda)$ ,  $S_h(\lambda)$ ,  $S_g(\lambda)$ ,  $S_r(\lambda)$ , or of their averages. Example of smoothed specific reflectance-wavelength dependences  $R_M(\lambda)$ , measured by [4] for three dry artificial binary mixtures of synthetic haematite and goethite components, is shown in Fig. 2. The chosen and indicated haematite and goethite relative contents, determined by using the diffractive X-ray diffraction method, are:  $\kappa_h = 0$ ,  $\kappa_g = 0.099$ ;  $\kappa_h = 0.132$ ,  $\kappa_g = 0$ ;  $\kappa_h = 0.166$ ,  $\kappa_g = 0.138$ . The components were powdered at first by a ball mill, mixed and filled into 8x17 mm aluminium frame and then gently pressed against a filter paper to minimize preferred orientations and unsuitable specular light reflections which can occur during measurements. The reflectance values  $R_M(\lambda)$  of the mixtures were measured from  $\lambda = 400$  to 700 nm at 10 nm intervals by the double beam Perkin-Elmer Lambda 3 spectrophotometer equipped with a reflectance (integrating sphere) attachment. The comparative white standard material was barium sulfate,  $\text{BaSO}_4$ , of  $R_S(\lambda) \approx 1$ .

It is evident from Fig. 2 that a pure haematite ( $\kappa_g = 0$ ) relates to smaller values of  $R_M(\lambda)$ , while a pure goethite ( $\kappa_h = 0$ ) gives larger amounts of  $R_M(\lambda)$ . In addition, the mixtures of haematite and goethite lead standardly to smaller values of  $R_M(\lambda)$  for about  $\lambda > 500$  nm. Moreover, the added comparison of measured  $R_M(\lambda)$  values with the values calculated using the appropriately modified Eqs. (6) of the K-M theory for preliminarily known functions  $A_h(\lambda)$  and  $S_h(\lambda)$ , mentioned in [4], shows good agreement, especially for mixtures with less than about 0.2 of haematite and goethite contents. Thus the K-M approach can be also safely used for predicting the spectral properties of mixtures mentioned above. However, a moisture existence causes unwanted specular light reflections that creates problems in applications of the K-M theory.

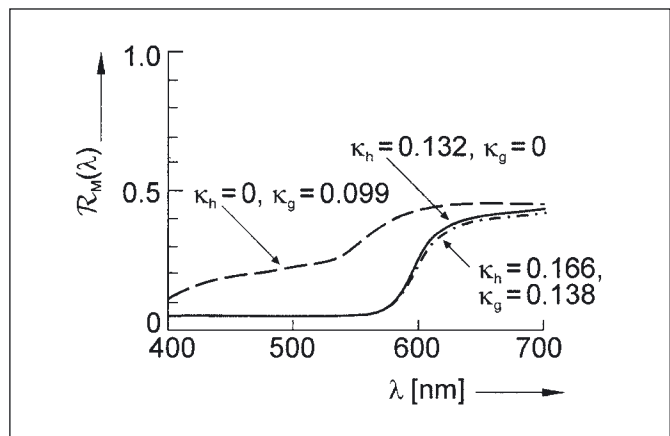


Fig. 2 Example of smoothed specific reflectance – wavelength dependences  $R_M(\lambda)$  measured for three dry artificial binary mixtures of synthetic haematite and goethite. Their contents  $\kappa_h$  and  $\kappa_g$  are indicated

Smoothed examples of average values  $\bar{A}_h(\lambda)$ ,  $\bar{A}_g(\lambda)$ ,  $\bar{A}_r(\lambda)$ ,  $\bar{S}_h(\lambda)$ ,  $\bar{S}_g(\lambda)$  and  $\bar{S}_r(\lambda)$ , calculated by the minimization least-squares procedures for a common soil mixture, are shown in Figs. 3 and 4 [4]. The corresponding average reflectance spectra  $\bar{R}_h(\lambda)$ ,  $\bar{R}_g(\lambda)$  and  $\bar{R}_r(\lambda)$ , calculated using the forms of general Eqs. (4), are illustrated in Fig. 5. They relate to the Munsell color system ( $H, V, C$ ) of color coordinates  $H = 3.4$  YR,  $V = 4.6$ ,  $C = 6.6$  for haematite,  $H = 9.2$  YR,  $V = 5.5$ ,  $C = 4.5$  for goethite, and  $H = 6.7$  YR,  $V = 7.5$ ,  $C = 2.2$  for the iron-free residue. Hence, the soil haematite appears slightly yellowish and lighter than most of the synthetic haematites [20], while the soil goethite is slightly redder and it is of lower chroma than most of the synthetic goethites [21]. Finally, the soil iron oxide-free component appears pinkish gray in comparison with, for example, the gray dithionite-treated soils.

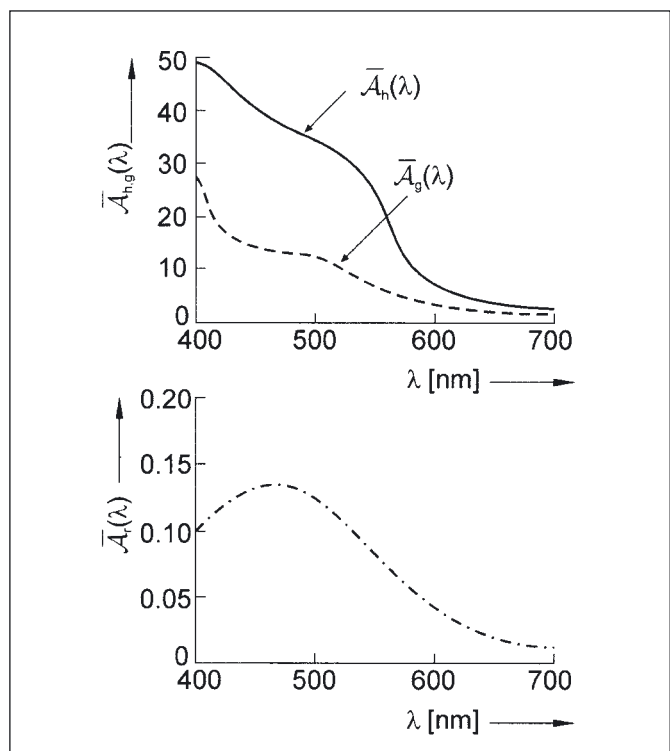


Fig. 3 Example of calculated and smoothed average absorbance spectra  $A_h(\lambda)$ ,  $A_g(\lambda)$  and  $A_r(\lambda)$  for a common soil mixture

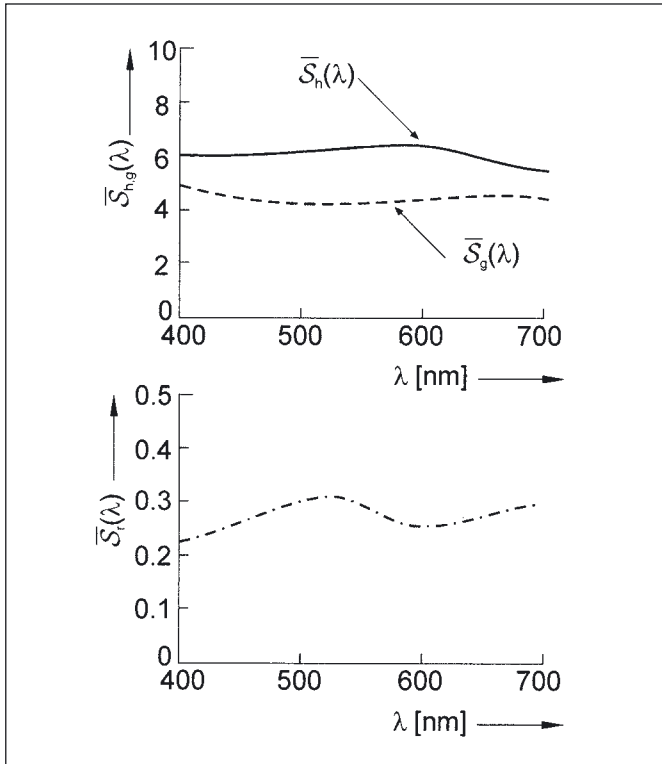


Fig. 4 Calculated and smoothed average scattering spectra  $\bar{S}_h(\lambda)$ ,  $\bar{S}_g(\lambda)$  and  $\bar{S}_r(\lambda)$  which relate to the spectra of Fig. 3

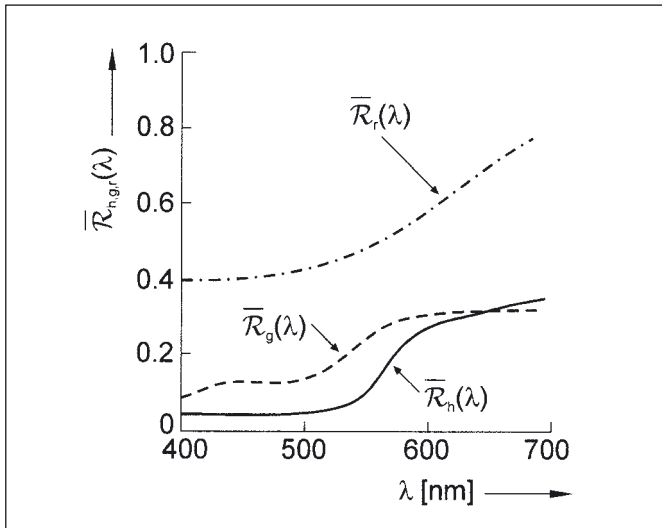


Fig. 5 Smoothed average reflectance spectra  $\bar{R}_h(\lambda)$ ,  $\bar{R}_g(\lambda)$  and  $\bar{R}_r(\lambda)$  relating to the spectra of Figs. 3 and 4

Beside the possibility of direct determination of the contents  $\kappa_h$ ,  $\kappa_g$  and  $\kappa_r$  by a X-ray measuring manner, also the K-M Eqs. (11) and (12) are exploitable for such a purpose. The exploitation consists in assessment of  $\mathcal{A}_M(\lambda)$  and  $\mathcal{S}_M(\lambda)$  by spectrophotometrical measurements of several soil-white standard mixtures. This gives, both for Eqs. (11) and (12), two unknowns, i.e.  $c_h$  and  $c_g$ , because also Eq. (10) is valid. Therefore, data for only one wavelength are sufficient to solve the system. However, the useful data can be also obtained only by Eq. (11), or by Eq. (12), for two or more different wavelengths. When more than two wavelengths are used, the number  $m$  of equations exceeds the number of unknowns ( $m > 2$ ). In this case the minimization least – squares approach can be used to obtain the best values for  $c_h$  and  $c_g$ . In [4] it is referred that for 98 soils and 31

wavelengths of 10 nm steps within the range  $\lambda = 400 - 700$  nm, the sufficient correlation ( $r^2 \approx 0.82$ ) between the predicted (calculated) and measured haematite contents  $\kappa_h$  was obtained.

Let us consider now the relationship between the natural common soil redness rates of considered Eqs. (17) - (19) and the haematite content  $\kappa_h$  no exceeding the nonsaturated limit 0.15 and determined firstly by a procedure mentioned above. For such a purpose, the accurate measurements of reflectances  $\mathcal{R}_M(\lambda) \triangleq \mathcal{P}(\lambda)$  of the considered soil samples are necessary to obtain the color coordinates of Eqs. (20) - (24) and then the redness rates of Eqs. (17) - (19). If a properly calibrated colorimeter is used, the direct assessment of color coordinates is available. The smoothed linear graphs of redness rates in Fig. 6, following from measured results by [4], correlate well with the haematite content  $\kappa_h$  of a group of 98 dry common soils. The corresponding optimal linear mathematical relations (regression equations) are:

$$\rho_2(Y,x,y) = 1.37\kappa_h + 0.28, \quad (25)$$

$$\rho_2(L^*,a^*,b^*) = 1.97\kappa_h + 0.54, \quad (26)$$

$$\rho_2(H,V,C) = 1.85\kappa_h - 10. \quad (27)$$

The best correlation ( $r^2 = 0.86$ ) was found for Eq. (26), little worse correlation ( $r^2 = 0.86$ ) relates to Eq. (25) and the worst correlation ( $r^2 = 0.67$ ) belongs to Eq. (27). Hence, the redness rate of Eq. (26), giving also more redness results up to the saturation state mentioned above, seems to be more adequate and useful in practice rather than the also applicable redness rates of Eqs. (25) and (27) to predict the haematite content in a soil. To avoid saturation problems, the soils suspected to contain excess of haematite can be diluted, for example, with a known amount of dithionite-treated soil. It is necessary also to note that the results presented in this section are specific for the chosen sets of soils and conditions. Their changes produce obviously the corresponding changes of the results and conclusions.

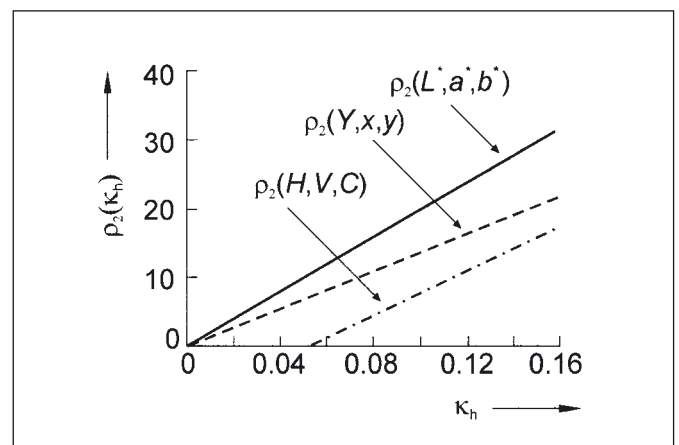


Fig. 6 Smoothed optimal linear dependences of redness rates  $\rho_2(Y,x,y)$ ,  $\rho_2(L^*,a^*,b^*)$  and  $\rho_2(H,V,C)$  according to the haematite content  $\kappa_h$  of a natural common soil

## 5. CONCLUSION

This article presents the theoretical considerations about the specific light reflection, absorption, scattering and redness properties of soils containing usually the haematite, goethite and remaining (iron oxide-free) components. Such effects determine and markedly influence, namely, the soil color appearances.

At first, the basic relations for the soil sample reflection, absorption and scattering light wavelength spectra are presented and analyzed. Secondly, the defined soil redness rates are explained in relationship to the three basic color classification systems exploited.

Finally, some concrete light reflection, absorption, scattering and redness properties, relating to the haematite contents in soils, are illustrated graphically, or also by optimal equations.

The coherent text of this article summarizes, completes and classifies some fundamental scientific results, opinions, conclusions and ideas published by contemporary research workers about the subjects of consideration. The presented procedure for quantitative characterization of the effects mentioned above requires accurate light reflectance, or also light absorbance and scattering, properly calibrated spectrometric measurements of the relevant soil color sample prepared by a suitable grinding manner. The contents of every sample components are ascertainable by a X-ray diffraction method. The successive exploitation of the spectra mentioned above in the defined relations of three considered color classification systems gives their color coordinates. They are needed for estimation as the redness rates under consideration as their relationships to the corresponding soil haematite contents. Some presented examples of such relationships ratify usefulness of the introduced redness rates in the routine soil colorimetry.

Experience show that the specific redness rates definitions applied in this article seems to be more realistic in many cases than the also existing other definitions. We can conclude that for obtaining useful results (expressive color hues) by the considered procedures it is necessary to prepare the suitable soil samples by careful dividing and pressing their materials to relevant tablets. No standard method of sample preparation has been adopted so far. Moreover, the measuring and computational results are also influenced, generally, by the sample sort, sample physical state, exploited evaluation procedure and measuring conditions. These facts yield frequently only specific results that make difficult an unambiguous comparison of results by different laboratories. Nevertheless, the color approach to soils evaluation can be accepted as a useful complementary means of other analytic methods existing at present, like the Raman spectroscopy, infrared optical spectroscopy, Mössbauer spectroscopy, thermal and chemical analysis, microscopy, etc.

## References

- [1] Cornell R.M., Schwartmann U., *The Iron Oxides. Structures, Properties, Reactions, Occurrence and Uses.* VCH Verlagsg. mbH, Weinheim 1996.
- [2] Kubelka P., Munk F., "Ein Beitrag zur Optik der Farbenschichten". *Zeitschr. Tech. Physik*, **12**, 1931, 593-620.
- [3] Kubelka P., "New contribution to the optics of intensity light-scattering materials. Part I." *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 1948, 448-460.
- [4] Barrón V., Torrent J., "Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides soil color". *J. Soil Sci.*, **37**, 1986, 499-510.
- [5] Kosmas C., Curi N., Bryant R.B., Franzmeier D.P., "Characterization of iron oxide minerals by second-derivate visible spectroscopy". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**, 1984, 401-405.
- [6] Duncan, D. R., "The colour of pigment mixtures". *J. Oil and Color Chem. Assoc.*, **32**, 1949, 296-321.
- [7] Hunter R. S., *The Measurement of Appearance.* J. Wiley, New York 1975.
- [8] Wyszecky G., Stiles W.S., *Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae.* J. Wiley, New York 1982.
- [9] Torrent J., Barrón V., "Laboratory measurement of soil color: Theory and practice". *In: Bigham J.M. and Ciolkosz E.J. (eds.): Soil Colors. Soil Sci. Soc. Am. J., Spec. Publ. 31, Madison, WI 1993, 21-33.*
- [10] Schwertmann U., "Relations between iron oxides, soil color, and soil formation". *In: Bigham J.M. and Ciolkosz E.J. (eds.): Soil Colors. Soil Sci. Soc. Am. J., Spec. Publ. 31, Madison, WI 1993, 51-69.*
- [11] Munsell A.M., *Color Notation.* Munsell Color Comp., Baltimore 1941.
- [12] Munsell Standard Ed., *Munsell Soil Color Charts.* Munsell Color Comp., Baltimore 1975.
- [13] Malacara D., *Color Vision and Colorimetry. Theory and Applications.* SPIE Press, Bellington 2002.
- [14] Pospíšil J., Hrdý J., "Specification of some common iron oxides by their optical spectra and colours". *Fine Mech. and Optics (Jemná mech. a optika)*, **50**, 2005, 255-262.
- [15] Torrent J., Schwertmann U., Fechter H., Alferez F., "Quantitative relationships between soil color and haematite content". *Soil Sci.*, **136**, 1983, 354-358.
- [16] Kämpf N., Schwertmann U., "The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soil". *Clays Clay Miner.*, **30**, 1982, 401-408.
- [17] Kämpf N., Schwertmann U., "Quantitative determination of goethite and haematite in kaolinic soils by X-ray diffraction". *Clay Miner.*, **17**, 1982, 359-363.
- [18] Schulze D. G., "Identification of soil iron oxide minerals by differential X-ray diffraction". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, 1981, 437-440.
- [19] Standard D 1535-58T of ASTM (Amer. Soc. for Testing and Materials). *In: Annual Book of ASTM Standarts.* Philadelphia 1980.
- [20] Barrón V., Torrent J., "Influence of aluminium substitution on the color of synthetic hematites". *Clays and Clay Minerals*, **32**, 1984, 157-158.
- [21] Kosmas C., "Visible spectra and color of synthetic Al-substituted goethites and hematites". Ph.D. Thesis. Purdue University, Indiana 1984.

Prof. RNDr. Ing. Jaroslav Pospíšil, DrSc., RNDr. Jan Hrdý, Ph.D. and Jan Hrdý, jr., Department of Experimental Physics of Palacký University and Joint Laboratory of Optics of Palacký University and Institute of Physics of Academy of Sciences, 17. listopadu 50, 772 09 Olomouc, Czech Republic. Tel.: +420 585 634 283, E-mail: pospis@prfnw.upol.cz

## Koncentrace záření v solárních fotovoltaických systémech

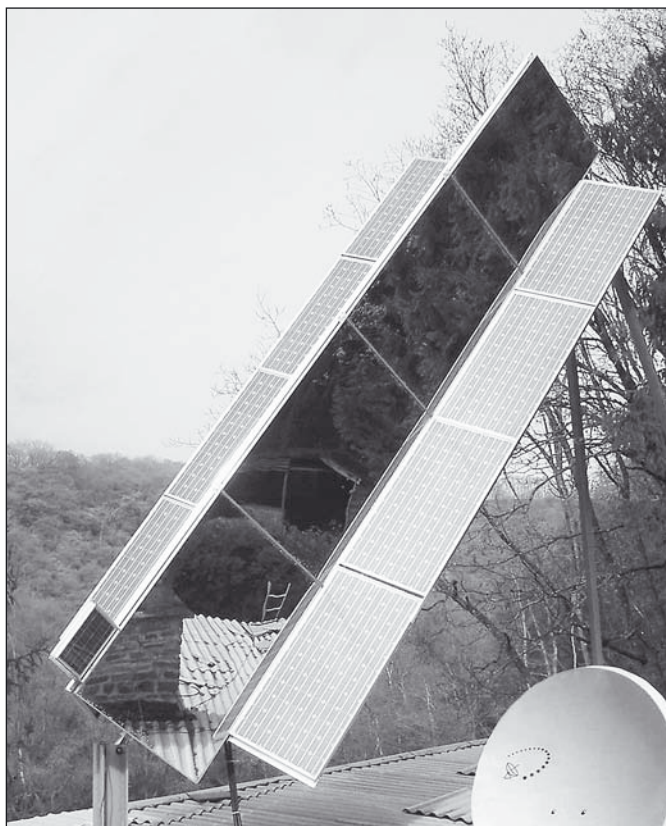
### ÚVOD

Koncentrace záření se často používá k zvýšení efektivity solárních systémů. Již dříve jsme v Jemné mechanice a optice publikovali článek [6] o mírném hřebenovém koncentrátoru záření, ve kterém jsme uvedli, že takový koncentrátor v kombinaci se sledovačem Slunce a s pohyblivým stojanem může podstatně navýšit množství elektrické energie vyrobené ve fotovoltaických (PV) panelech, neboť PV panely jsou neustále natočeny kolmo ke směru slunečního záření a jsou osvětleny zářením vyšší intenzity. Množství vyrobené energie je dáno integrálem  $W = \int P dt$ , kde

$P$  je okamžitý výkon a  $t$  je čas. V tomto článku uvádíme přehled různých koncentrátorů záření používaných k zvýšení efektivity solárních systémů.

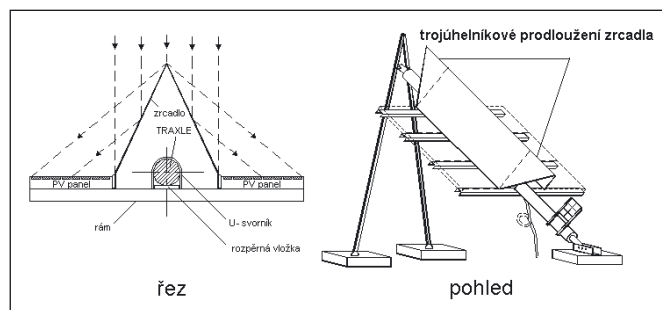
### KONCENTRÁTORY S ROVINNÝMI ZRCADLY

Koncentrátory s rovinnými zrcadly mohou mít uspořádání žlabové [1,2] nebo hřebenové [3,4,5,6]. Systém s hřebenovým koncentrátozem kombinuje sledovač Slunce s přídatnými zrcadly ve tvaru vnitřního hřebene. Hřeben tvoří mírný koncentrátor záření



Obr. 1 PV systém s pohyblivým stojanem TRAXLE™ a s hřebenovým koncentrátozem záření instalovaný v Lucembursku

s koncentračním poměrem  $c \approx 1,6 \div 1,7$  a náš systém s takovým koncentrátozem a s pohyblivým stojanem TRAXLE™ je na obr. 1. U jednoosých sledovačů s horizontální i polární osou bývá zrcadlo na krajích prodlouženo za fotovoltaické panely, aby bylo zajištěno homogenní osvětlení solárních panelů i při sezónních změnách úhlu mezi horizontální rovinou a rovinou pohybu Slunce po obloze. U sledovačů Slunce s polární osou a s nastavitelným sklonem osy



Obr. 2 Schéma PV systému s hřebenovým koncentrátozem záření

podle ročního období není prodloužené zrcadlo nutné. Na obr. 2 je schéma uvedeného systému v pohledu a v řezu. Vrcholový úhel, který spolu zrcadla svírají, musí být volen tak, aby odražené záření dopadalo rovnoměrně na celou plochu panelu, jak je zde znázorněno. Toto uspořádání umožňuje rovněž dobré proudění vzduchu kolem PV panelů, je tedy dosaženo účinné chlazení a PV panely se nepřehřívají. Výhodou rovinných zrcadel je i to, že koncentrují nejen přímé ale i difúzní sluneční záření. Výběr materiálu zrcadla [7, 8, 9] je podstatný z hlediska životnosti a efektivity.

Tento pohyblivý hřebenový koncentrátor je velmi kompaktní, jednoduchý a spolehlivý a úspěšně jsme ho vyzkoušeli na řadě pohyblivých stojanů. Na rozdíl od jiných níže uvedených koncentrátorů není nutný žádný další podpůrný systém zrcadel a i momenty sil působené větrem jsou výrazně redukovány. Standardní verze pohyblivého, hřebenového koncentrátoru může být přizpůsobena velikostem solárních systémů od dvou malých PV panelů až po velké systémy např. s deseti velkými fotovoltaickými panely (po 200 W). Velký pohyblivý fotovoltaický systém s deseti PV panely je v podmínkách suchého slunečného podnebí množstvím vyrobené energie ekvivalentní pevnému systému s osmnácti stejnými PV panely. Aplikace hřebenového koncentrátoru záření na různé pohyblivé solární systémy je velmi jednoduchá. Může být použit u jednoosých sledovačů s vodorovnou i s polární osou, u dvouosých sledovačů, stejně jako u sledovačů se svislou osou otočných o 360° pro aplikace za polárním kruhem či ve vesmíru [10]. Zrcadlo nemusí být lesklé, naopak matné zrcadlo má své výhody, neboť koncentruje jen nablízko a neoslňuje reflexí na větší vzdálenosti.

Systém se žlabovým koncentrátozem je na obr. 3. Koncentrační poměr ( $c = 2 \div 2,4$ ) u standardních V-žlabových koncentrátorů je však poměrně vysoký a je omezeno proudění vzduchu kolem PV panelů a jejich přirozené chlazení. Při běžných intenzitách přímého slunečního záření může způsobovat přehřívání a postupný rozklad a hnědnutí EVA (etylvinylacetát) fólie v PV panelech a degradaci laminátu v zapouzdření. Zejména hnědnutí EVA fólie snižuje transparentci a tím i účinnost celého systému. Navíc vyšší teplota PV panelů vede podle zákonitostí fyziky polovodičů k dalšímu snížení účinnosti fotovoltaické přeměny energie v důsledku vyšší teploty PV článků. Systém s takovým uspořádáním je proto vhodný spíše do vyšších zeměpisných šířek, kde je trvale nižší intenzita slunečního záření. Například systémy v USA (Carrisa Plains) nevydržely koncentraci záření tohoto V-žlabového koncentrátoru, rozložila se v nich a zhnědla EVA fólie a panely byly velice brzy nepoužitelné pro nízkou účinnost. U podobného systému ve Španělsku (Sevilla) byla po této zkušenosti namontována čidla teploty PV panelů a při dosažení kritické teploty se jedno vnější zrcadlo odklonilo. Delším pozorováním bylo zjištěno, že toto zrcadlo je odkloněno po většinu času a tudíž zde nemá praktický význam.

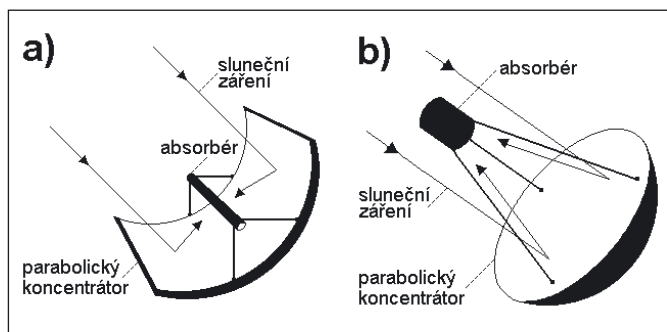




Obr. 3 PV systém se žlabovým koncentrátorem záření

### KONCENTRÁTORY S LINEÁRNÍM OHNISKEM

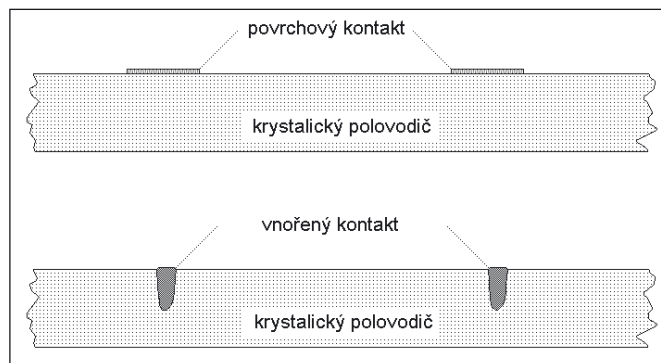
Zvláštní kapitolu v konstrukci solárních systémů tvoří systémy s vysokou koncentrací záření. Zde je však třeba filtrovat informace, protože řada principů může dobře fungovat v laboratoři, ale v reálném provozu selžou. Systémy bývají opatřené parabolickými zrcadly či Fresnelovými čočkami. Jsou vysoce efektivní avšak značně kontroverzní zejména z důvodu náročnosti konstrukce a tím i vysoké ceny a také pro svou nižší spolehlivost. Systémy vyžadují vysokou přesnost orientace ( $\Delta\varphi \leq 0,1^\circ$ ), aby záření dopadalo skutečně na PV panely. Vyžadují i masivní konstrukci, aby nedocházelo k deformaci parabol ani ke snížení přesnosti orientace gravitačními silami či silami působenými větrem. Parabolické koncentrátoři dokáží koncentrovat pouze přímé sluneční záření na rozdíl od žlabových či hřebenových koncentrátů s rovinnými zrcadly, které koncentrují i difúzní záření. Vyplatí se tedy pouze v místech s vysokým počtem slunečných dní v roce a s vysokým poměrem přímého záření k difúznímu. Tento poměr může snižovat vyšší vlhkost v atmosféře zejména v přímořských oblastech, která zvyšuje četnost mlh a oparů, které více rozptylují sluneční záření.



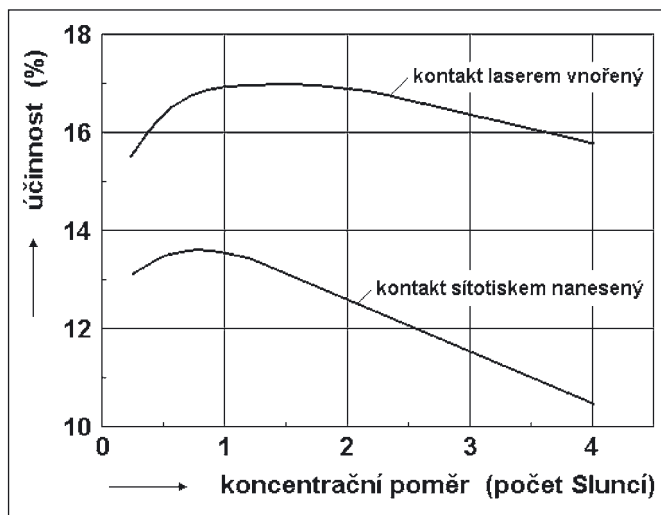
Obr. 4 Schéma koncentrátoři záření a) s lineárním ohniskem, b) s bodovým ohniskem

Parabolické koncentrátoři s lineárním ohniskem vypadají v principu podobně jako na obr. 4a. Dosahují koncentračního poměru slunečního záření až  $c \approx 30$ , ale problémem bývá zajištění homogenity ozáření. Při vysoké koncentraci záření je totiž homogenita nezbytná, neboť jinak důsledkem nerovnoměrného ohřevu panely praskají. PV panely je třeba účinně chladit, proto se umísťují na žebrované kovové chladiče a konstrukce panelů bývá odlišná od panelů používaných v systémech s nízkou koncentrací záření. Mřížkové kontakty bývají vnořené do objemu materiálu polovodiče pomocí laserových technologií. Oproti kontaktům naneseným sítotiskem na povrch článku se tak zvětší plocha styku kontaktu s polovodičem (tj. plocha kterou lze odvádět elektrický

náboj) a zvětší se i průřez kontaktu pro lepší vedení podstatně vyšších proudů při vysoké koncentraci záření. Mohou se používat PV panely na bázi krystalického GaAs, které jsou však mnohem dražší. U nich se mnohem méně projevuje efekt poklesu účinnosti při rostoucí teplotě, než je tomu u PV panelů na bázi krystalického křemíku. Panely na bázi tenkých vrstev zde vůbec nepřicházejí v úvahu. PV články i panely bývají podlouhlé s malou šířkou, neboť tak se mohou lépe chladit a navíc mohou mít kratší příčné větve mřížkových či hřebínkových sběrných kontaktů. Na obr. 5 je schéma povrchového a vnořeného kontaktu v řezu materiálem polovodiče. Porovnání účinnosti PV článku v případě kontaktu sítotiskem naneseného a laserem vnořeného na koncentračním poměru záření je na obr. 6 [11]. Je vidět, že laserem vnořený kontakt má maximum posunutě směrem k vyšší koncentraci záření a s rostoucí koncentrací záření klesá účinnost pomaleji.

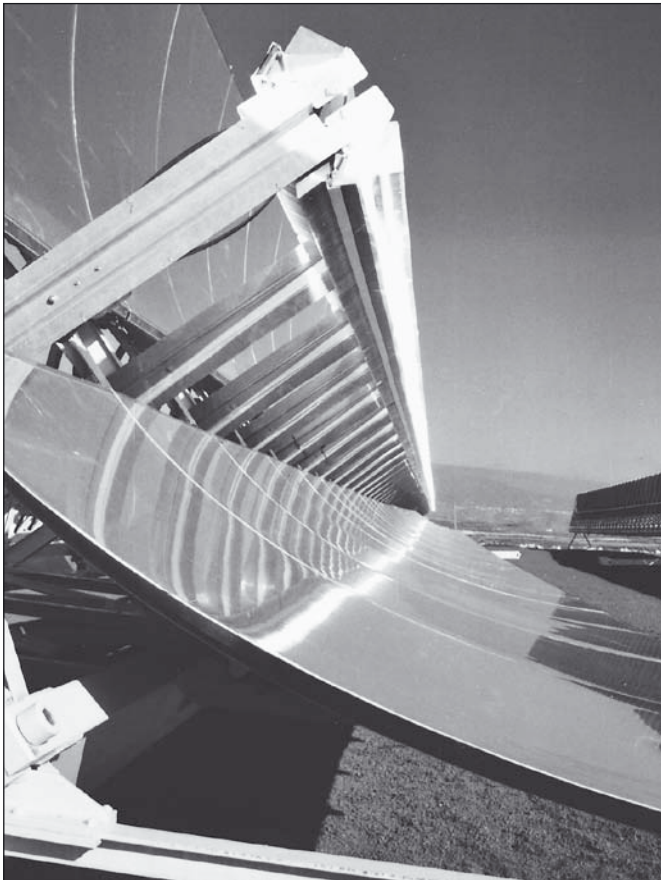


Obr. 5 Schéma povrchového a vnořeného kontaktu v řezu materiálem polovodiče

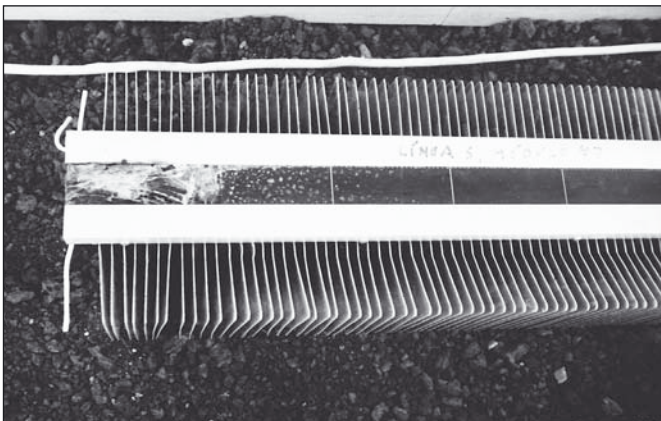


Obr. 6 Závislost účinnosti PV článku na koncentračním poměru záření v případě kontaktu sítotiskem naneseného a laserem vnořeného

Jako příklad velkého projektu PV systému s vysokou koncentrací můžeme uvést projekt Eukleides na Kanárských ostrovech na ostrově Tenerife ve výzkumném ústavu ITER na využití alternativní energie. Jedná se o systémy s parabolickými koncentrátoři s lineárním ohniskem a se speciálními PV panely na bázi monokrystalického křemíku. Projekt se od samého počátku v roce 1997 potýká s problémem přesnosti orientace a s problémem praskání PV panelů. Z obr. 7 je patrná masivní konstrukce i problém přesné orientace systému. V ohnisku je vidět, jak koncentrované záření dopadá mimo vlastní PV panely. Vyřazené popraskané PV panely i s masivními žebrovými chladiči jsou v detailu na obr. 8, popraskaní panelu je patrné na levé straně.



Obr. 7 PV systém s parabolickým koncentrátorem záření s lineárním ohniskem na Kanárských ostrovech - projekt Eukleides

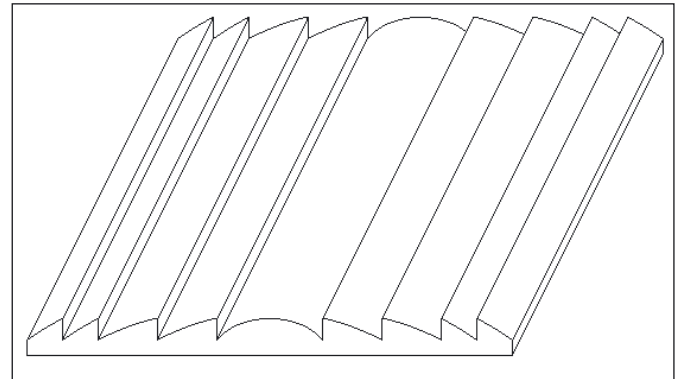


Obr. 8 Popraskané PV panely na Kanárských ostrovech - projekt Eukleides

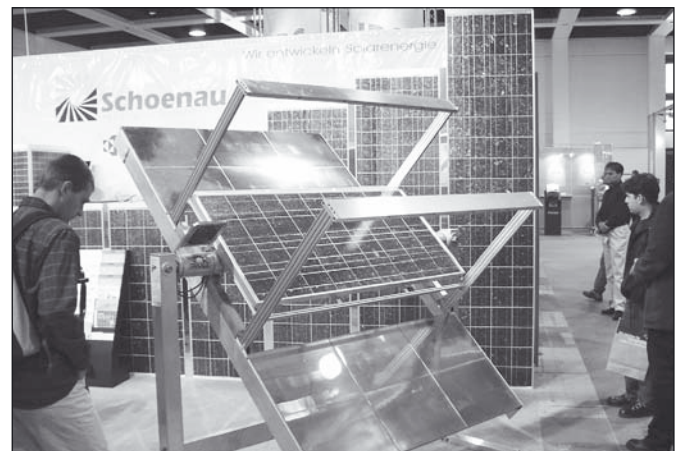
Materiál parabolických zrcadel je rovněž značným problémem a je třeba vážit poměr kvality a ceny. Většinou se používají zrcadla hliníková. Dražší bývá hliníkový plech chráněný lakem či eloxem proti oxidaci a slepnutí, levnější bývá pohliníkováný plast. Plasty však propouštějí plyny a páry, což způsobuje oxidaci optické vrstvy. Tenké vrstvy stříbra na plastu brzy černají a i když hliníkové vrstvy vydrží podstatně déle, ani ony nejsou ideální z hlediska životnosti zrcadla. Nejlepší jsou skleněná zrcadla. Sklo není propustné pro plyny a páry a optické vrstvy tak nejsou narušovány. Zezadu se zrcadla obvykle chrání ještě nějakou vrstvou nepropustnou pro optické záření kvůli omezení fotodegradace optické vrstvy.

Koncentrátory na bázi Fresnelových čoček s lineárním ohniskem jsou jednodušší, ale i koncentrační poměr je nižší, (cca  $c \approx 10$ ). Vlastní Fresnelovy čočky bývají vyrobeny z fólie ze silikonového

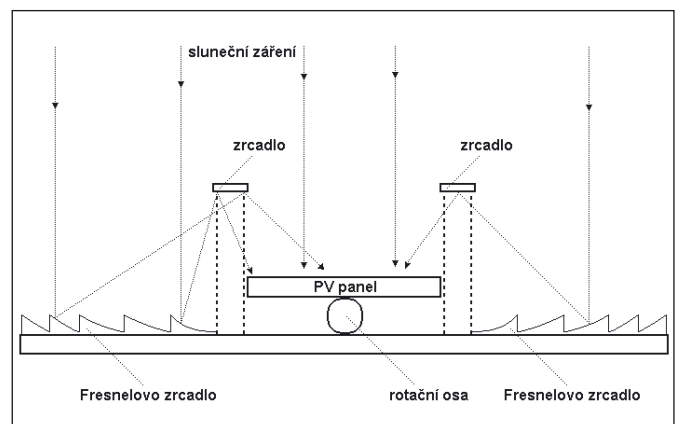
polymeru s rovnoběžnými drážkami (segmenty čočky) vyrytými diamantovými noži nebo ze skla s válcovanými drážkami. Fresnelova čočka s lineárním ohniskem je schematicky znázorněna na obr. 9. Je tenká, nutnou tloušťku materiálu pro zakřivení povrchových ploch nahrazuje rozdělení čočky na drobné segmenty. Reálná Fresnelova čočka má segmentů mnohem více, než je na obrázku naznačeno. Na obr. 10 je náš PV systém s Fresnelovými zrcadly s lineárním ohniskem a se sledovačem Slunce TRAXLE™ (Poulek Solar, s.r.o.) prezentovaný na výstavě v Berlíně r. 2002. Schéma tohoto systému je na obr. 11. Kvalitní Fresnelovy čočky ze silikonového polymeru vyrábí například americká firma 3M a firma ENTECH je montuje do svých PV systémů, v ČR vyrábí skleněné válcované Fresnelovy čočky firma GLAVERBEL v Teplicích a firma SOLAR GLASS v Teplicích je montuje do PV systémů.



Obr. 9 Schéma Fresnelovy čočky s lineárním ohniskem v řezu



Obr. 10 Solární fotovoltaický systém s Fresnelovými zrcadly s pohyblivým stojanem TRAXLE™ prezentovaný na výstavě v Berlíně 2002

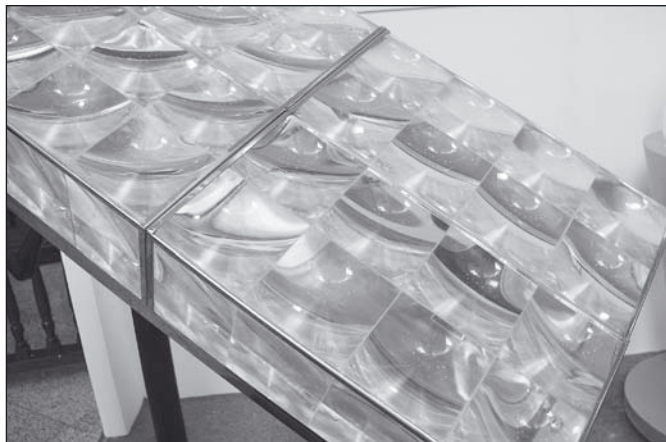


Obr. 11 Schéma solárního fotovoltaického systému s Fresnelovými zrcadly

## KONCENTRÁTORY S BODOVÝM OHNISKEM

Technicky nejnáročnější jsou parabolické koncentrátory s bodovým ohniskem. Vypadají v principu podobně jako na obr. 4b, dosahují koncentračního poměru slunečního záření až  $c \approx 1000$ , ale vyžadují vysokou přesnost orientace ( $\Delta\varphi \leq 0,1^\circ$ ) ve dvou osách a to bývá největší problém jak technický, tak i finanční. Problémy s konstrukcí PV článků na bázi krystalického GaAs či křemíku a s jejich chlazením se zde dále stupňují. Laserem vnořené kontakty zde musí být kvůli vysokým proudovým hustotám a PV článek bývá připájen celou plochou k masivní měděné desce opatřené na zadní straně žebrovaným chladičem. Na obr. 12 je takový PV panel složený z modulů s Fresnelovými čočkami s bodovým ohniskem prezentovaný na výstavě v Shanghai 2005, na obr. 13 je detailní pohled přes Fresnelovu čočku. Rozměry čočky jsou  $270 \times 270 \text{ mm}^2$ , rozměry PV článku jsou  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ , koncentrační poměr je tedy  $c \approx 729$ . Plastová čočka může degradovat UV zářením, uvnitř panelu může kondenzovat voda, články mohou praskat v důsledku přehřívání. Čočky koncentrují pouze přímé sluneční záření, difúzní nikoliv, hodí se tedy jen do míst s dostatkem přímého záření. Výhodou takové konstrukce je nižší cena v přepočtu na 1W výkonu.

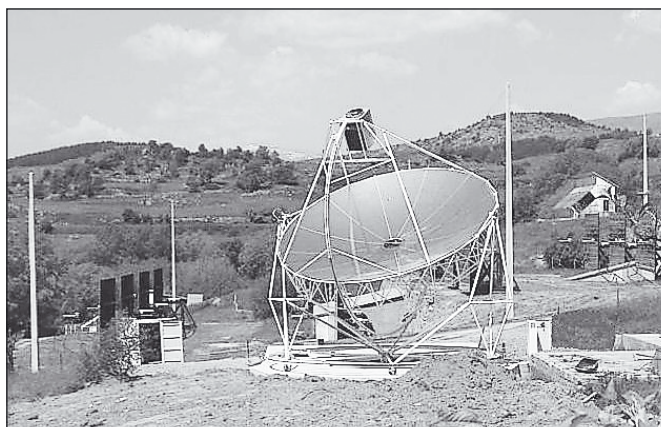
Na obr. 14 je systém s parabolickým zrcadlem s bodovým ohniskem. Zde se však nejedná o fotovoltaický systém, ale o kombinovaný systém, v němž energie koncentrovaného záření se využívá k ohřevu teplého válce Stirlingova motoru a motor pohání klasický generátor elektrické energie.



Obr. 12 PV panel složený z modulů s Fresnelovými čočkami s bodovým ohniskem prezentovaný na výstavě v Shanghai 2005



Obr. 13 Pohled na PV článek pro vysokou koncentraci záření přes Fresnelovu čočku



Obr. 14 Solární systém s parabolickým zrcadlem s bodovým ohniskem a se Stirlingovým motorem

## Literatura

- [1] F. H. Klotz, *PV systems with V-trough concentration and passive tracking concept and economic potential in Europe*, Proc.13th European PV Solar Energy Conference, Nice 23. - 27. říjen 1995, str.1060 - 1063.
- [2] S. Nann, *Potentials for tracking photovoltaic systems and V-troughs in moderate climates*, Solar Energy, 45, (1991), str. 385 - 393.
- [3] M. Libra, V. Poulek, *Bifacial PV Modules in Solar Trackers and Concentrators, a New Approach to Supplying Power in Agriculture*, kapitola v knize "Physical Methods in Agriculture, Approach to Precision and Quality", Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, (2002) str. 83 - 104, ISBN 0-306-47430-1
- [4] V. Poulek, M. Libra, *Solární fotovoltaický systém s vysokou účinností*, Elektro, 12, 8-9, (2002), str. 72 - 75
- [5] V. Poulek, M. Libra, *A New Low Cost Tracking Ridge Concentrator*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 61, 2, (2000), str.199-202
- [6] V. Poulek, M. Libra, *Nový, levný, pohyblivý, hřebenový koncentrátor záření*, Jemná mechanika a optika, 44, 9, (1999), str.282-283
- [7] P. Nostell, A. Roos, B. Karlsson, *Ageing of solar booster reflector materials*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 54, (1998), str.235-246.
- [8] B. Perers, B. Karlsson, M. Bergkvist, *Intensity Distribution in the Plane From Structured Booster Reflectors With Rolling Grooves and Corrugations*, Solar Energy, 53, (1994), str.215-226.
- [9] P. Schissel, G. Jorgensen, C. Kennedy, R. Goggin, *Silvered PMMA reflectors*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 33, (1994), str.183-197.
- [10] V. Poulek, M. Libra, *A Very Simple Solar Tracker for Space and Terrestrial Applications*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 60, (2000), str.99-103
- [11] A. Cole a kol, *Optimisation of the Front Contact for Low to Medium concentrations in LGBC Silicon Solar Cells*, Proc. 15<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference, (PVSEC-15), 10.-15. říjen 2005, Shanghai, China, str.537-538, ISBN 7-5323-8225-7

Práce probíhá v rámci výzkumného záměru MSM 604 607 0905.

Doc. Ing. Martin Libra, CSc., Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Kamýčká 129, 165 21 Praha 6, tel. 224383284, e-mail:libra@tf.czu.cz

Ing. Vladislav Poulek, CSc., Poulek Solar, s.r.o., Velvarská 9, 160 00 Praha 6, tel. 603342719, e-mail: info@solar-trackers.com

## Z historie a současnosti optické dílny Akademie věd v Turnově

*Je popsána historie výzkumného a vývojového optického pracoviště Akademie věd ČR v Turnově, od svého založení v roce 1965 do dneška, kdy je dílna připojena jako detašované pracoviště a samostatné oddělení Ústavu fyziky plazmatu AV ČR.*

V letošním roce a.s. Dioptra Turnov oslaví 110 let od svého založení. Jde v České republice o nejstarší optický závod, který kontinuálně vyrábí optické prvky, především v oblasti oftalmologické optiky [1,2]. Ve městě Turnov je s výrobou optiky spojeno několik dalších pracovišť, a to Crytur s.r.o. [3], a také pracoviště, které je součástí Akademie věd ČR.

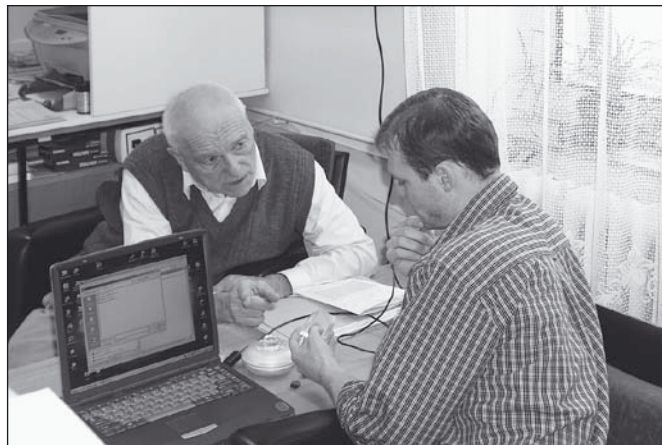
Historie turnovské optické výroby je založena na tradici opracování polodrahokamů, nacházejících se na nedaleké hoře Kozákov. Zpracování šperkového kamene je ve městě a okolí dokladováno již od 15. století. Kromě využití polodrahokamů a dovážených drahokamů naši předci dovedli výtečně pracovat s barevným sklem. A to tak dokonale, že k odlišení skla od drahokamů zadalo v roce 1934 příčinu ke vzniku Stanice pro hodnocení drahých kamenů, pozdějšího Výzkumného ústavu monokrystalů. Tento ústav byl v šedesátých letech 20. století rozšířen a přejmenován na národní podnik Monokrystal Turnov. Dodnes v Turnově stojí původní historická huť, kde se barevná kompozice tavila.

Když Astronomický ústav Československé akademie věd po zahájení programu Interkosmos hledal v roce 1964 pracoviště pro realizaci optiky pro družicové experimenty, bylo vytypováno několik vhodných podniků pro takové práce. Již od založení ČSAV v roce 1952 se ve Výzkumném ústavu monokrystalů řešila celá řada projektů ve spolupráci s Akademií. V brusírně ústavu bylo vyčleněno několik pracovníků, kteří převážně pracovali na obrábění krystalů i různých atypických optických dílců jenom pro ústav ČSAV. Proto jako nejsnadnější řešení bylo zvoleno rozšíření tohoto kolektivu brusírny. A tak od 1. 1. 1965 bylo při Astronomickém ústavu ČSAV v Ondřejově vytvořeno detašované optické pracoviště se sídlem v Turnově. Od svého vzniku, až do roku 1985, dílna fyzicky spadala pod n.p. Monokrystal. Po vybudování svých nových objektů n.p. Monokrystal předaly budovy Astronomickému ústavu v Ondřejově a dílna působila samostatně v objektu ve Dvořákově ulici v Turnově.

Svou náplní práce bylo hlavním úkolem Optické dílny Astronomického ústavu především zajistit výzkum, vývoj a výrobu optických součástí programu Interkosmos, dále pak zajistit i pro ostatní ústavy ČSAV vývoj a výrobu nedostatkových atypických optických prvků.



Dílnské školení zaměstnanců z piezoelektriny



Diskuse nad optickými krystaly

Od roku 1985 též bylo započato se stavbou nového pracoviště ve Skálově ulici - byly zakoupeny dva starší domy a ty rekonstruovány do současné podoby. Od roku 1991 až do konce roku 2005 byla Vývojová optická dílna AV ČR jedním ze samostatných ústavů Akademie věd ČR. S počtem cca 20 zaměstnanců šlo o nejmenší ústav Akademie.

S ohledem na přijetí zákona 341/2005 Sb. o veřejných výzkumných institucích, byla Vývojová optická dílna AV ČR rozhodnutím Akademického sněmu sloučena k 1. 1. 2006 s Ústavem fyziky plazmatu AV ČR v Praze, kdy tento ústav byl jedním z největších odběratelů pracovištěm vyvíjené a vyráběné optiky. Sloučením vznikly z původního pracoviště v Turnově dvě oddělení, jedno s původním názvem Vývojová optická dílna, jako servisní pracoviště v oblasti optiky s působností pro celou AV ČR, a dále vědecké pracoviště s názvem Optická diagnostika, jehož úkolem je zajišťovat výzkumnou a vývojovou problematiku v oblasti optiky jak pro vlastní Ústav fyziky plazmatu, tak též pro mimoústavní pracoviště, a to nejen v AV ČR.

Pracoviště ÚFP AV ČR v Turnově dlouhodobě spolupracuje s ostatními podniky obdobného výrobního charakteru, které ve městě působí. Jde hlavně o turnovské závody, které se zabývají opracováním skla a křehkých materiálů, jako je například a.s. Dioptra Turnov, Crytur s.r.o., Konvex Rovensko p/T., Preciosa a.s., Dias Turnov s.r.o., Saint-Gobain Advanced Ceramics, s.r.o. Oboustranně výhodná spolupráce je udržována i s mnoha dalšími menšími pracovišti, zabývajícími se sklářstvím v okolí Turnova. Dílna též spolupracuje se školami při výchově mladé generace optiků na úrovni učňovského školství, středních škol i škol vysokých.

Turnovské optické pracoviště AV ČR je vhodně vybaveno klasickými výrobními stroji na zakázkovou výrobu všech optických dílů, v rozměrech od mikročoček, až do rozměrů 500 mm, a též příslušnou měřicí technikou. Tato zařízení byla převážně dodána od fy Zeiss Jena, pro nově dokončené pracoviště koncem 80 let. Pracovníci dílny zvládají nejen klasickou optickou výrobu. V dílně jsou realizovány i velmi náročné přesné elementy laserové optiky. Z krystalů se na pracovišti obrábí především krystalický křemen a krystalický vápenc, ale také germanium, křemík či CaF<sub>2</sub>, a i dal-

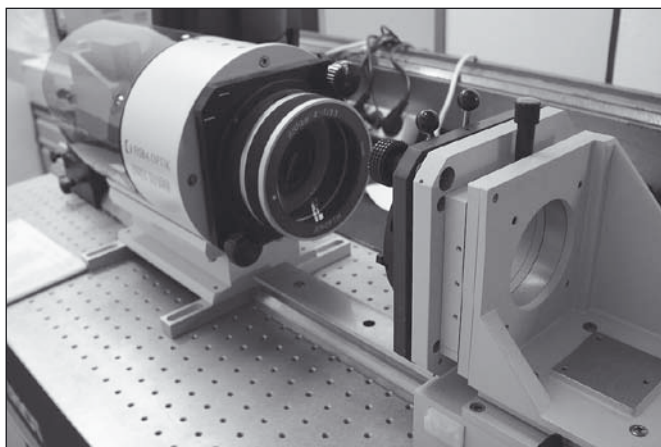
ší méně používané optické materiály [8]. Na pracovišti tenkých vrstev je možno zajistit všechny typy vrstvení, a to jak klasickým napařováním, tak i vrstvení technologií magnetronového napařování. Pracuje se zde především s tvrdými dielektriky na bázi  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a též s kovy Al, Ag, Cu, Ni, Cr, Au atd. Pracoviště je známo výrobou polotovarů k realizaci rentgenové optiky pracující v kosmu, i výrobou speciálních mikroobjektív pro RTG ozařování.

V oblasti výzkumu a vývoje na pracovišti dlouhodobě odborně působil a dosud příležitostně přijde poradit dr. Ivan Šolc, známý svými pracemi v oboru krystalové a rentgenové optiky [4].

Za éru 40 let existence se může pracoviště pochlubit celou řadou unikátních výsledků práce. V 70. letech byla vyvinuta optika pro experimenty umožňující zobrazení v RTG oblasti spektra. Galvanoplasticky zhotovené objektivy pro astronomická měření RTG činnosti Slunce, které na pracovišti byly navrženy a vyrobeny, byly tehdy světovou novinkou. Bylo pracováno na úzkopásmových dvojlomně polarizačních interferenčních filtrech Šolcova i Lyotova typu, především pro pozorování chromosféry Slunce a pro diagnostiku a hrazení laserů. V této oblasti byly realizovány metodami napařování úzkopásmové dielektrické filtry Fabry-Perotova typu s pevným dielektrikem. Byla zhotovena řada atypických optických prvků a zařízení pro optické měřicí přístroje v ústavech ČSAV a AV ČR, zejména optika ke stavbě laserů.

Po roce 1989, kdy většina pracovišť ČSAV podstatně redukovala stavy pracovníků, se dílna stala soběstačná a produkovala řadu zajímavých optických děl jak pro pracoviště AV ČR, tak též mimo ústavy Akademie, a to jak v tuzemsku, tak na vývoz. Vedle klasických zakázkových optických děl se pracoviště prosadilo v oblasti výroby astronomické optiky, kde se dařilo navrhnout a realizovat astronomické soustavy pracující v difrakčním limitu.

Ke kontrole vyráběných elementů je pracoviště vybaveno řadou kontrolních přístrojů. Pro přesná délková měření se používá několik Abbeho délkoměrů, nebo prostorový tří souřadnicový délkoměr typu DEA. K měření rovinnosti slouží Fizeauovy interferometry. Pro orientaci krystalů a z nich vyráběných optických děl je nutno využívat celou základnu přístrojů, od klasického polarizačního mikroskopu, stauroskopu, konoskopu, po originálně konstruovaný rtg goniometr, či stauroskopický ortoskop s Nakamürovou dvojdiskou. Přesný goniometr s podvteřinovou přesností je používán jak ke kontrole úhlů hranolů, tak pro určení indexu lomu materiálů. K rychlému měření hodnot indexu lomu běžných skel slouží Pulfrichtův refraktometr. K měření spektrální propustnosti materiálů a ke studiu i kontrole napařovaných vrstev se využívá několika typů spektrofotometrů. K hodnocení výsledné kvality



Sférointerferometr firmy Fisba

prvků a soustav je používán sférointerferometr s příslušenstvím a Ronchiho stínový test.

V posledních třech letech bylo pracoviště doplněno moderními měřicími přístroji, a to například sférointerferometrem od firmy Fisba, vláknovými spektrofotometry pro UV, VIS i IČ oblast spektra, přesným fotometrem, fokometrem, CCD kamerami. Všechny tyto přístroje mají digitální výstup signálů.

Kromě používání vlastních jednodušších programů pro analýzu a syntézu optických úloh byl na pracoviště zakoupen software pro návrhy v oblasti tenkých vrstev, i software pro klasické optické výpočty. Pro hodnocení a zpracování výsledků měření se používá balík statistických programů. Ke kreslení dokumentace slouží programy AutoCad a VariCad. Vlastní programy vytvářené na pracovišti jsou psány v prostředí Delphi, či v prostředí Matlab.

Do oddělení Optická diagnostika mimo stávajících zaměstnanců nastoupili doktorandi, kteří zde pracují na svých výzkumných úlohách. Pracoviště je zapojeno do řešení grantů a projektů cíleného výzkumu – v této oblasti se podařilo realizovat nové unikátní přístroje a optické díly [5, 6, 7]. Na mnoha grantových projektech se pracoviště podílí návrhy a realizací optických soustav.

Nelze říci, že by na turnovském pracovišti Akademie věd ČR nebyly problémy – takových problémů je při řešení atypických a unikátních úkolů vždy celá řada. Lze však doufat, že jak vlastním přičiněním všech zaměstnanců pracoviště, tak i opatřeními vedení Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, či vyšších orgánů AV ČR, zůstane turnovské optické pracoviště ostrůvkem ve světě optiky, kde budou i nadále vznikat unikátní optické díly.



Objektivy pro průmyslové kamery

## Literatura

- [1] Kalina, J.: Dvě výročí Dioptry. JMO, **51**, 2006, s. 31.
- [2] Dioptra Turnov: Přítomnost a budoucnost. JMO, **40**, 1995, s. 17.
- [3] Blažek, K. – Houžvička, J.: Crytur, spol. s r.o. JMO, **50**, 2005, s. 235-236.
- [4] Lochman, J.: K sedmdesátinám RNDr. Ivana Šolce, CSc. JMO, **42**, 1997, s. 129.
- [5] Projekt IS1082001, projekt ISQ100820502. Grantová agentura AV ČR.
- [6] Melich, Z. - Šolc, I. – Křivský, L. - Klimeš, J.: Řetězový filtr pro pozorování Slunce v čáře K. JMO, **48**, 2003, s. 330-332.
- [7] Melich, Z. – Šolc, I., - Klimeš, J.: Řetězové filtry s šikmým úhlem řezu dvojlomných destiček. Sborník přednášek ze semináře, Hvězdárna Úpice 2005, v tisku.
- [8] Melich, Z.: Prvky krystalové optiky. JMO, **38**, 1993, s. 286-290.

RNDr. Zbyněk Melich, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, oddělení Optická diagnostika, Skálava 89, 511 01 Turnov, tel. +420 481 322 622, fax. +420 481 322 913, e-mail: vod@cas.cz, http://www.ipp.cas.cz

## SHOT Show 2006

Ve dnech 9. – 12. 2. 2006 se konala jedna z nejvýznamnějších světových výstav loveckého vybavení pro pobyt v přírodě SHOT Show 2006. Důležitou součástí vystavovaného sortimentu je lovecká a sportovní optika, a proto se Meopta této výstavy aktivně účastní již od konce devadesátých let. Výstava se tradičně koná v některém z těchto měst USA: Las Vegas, Orlando, New Orleans nebo Atlanta. Letos se výstava uskutečnila v Las Vegas.

Letošní SHOT Show (**S**hooting, **H**unting & **O**utdoor **T**rade \*) prolomila hned několik rekordů: Zúčastnilo se jí 1 846 vystavovatelů, celková návštěvnost čítala 39 209 lidí, z toho 23 740 zástupců nakupujících firem, 1 387 novinářů a 14 082 zástupců vystavovatelů. Dlužno podotknout, že obdobně jako IWA v Německu, není SHOT Show otevřena laické veřejnosti.

Meopta měla na výstavě stánek o celkové ploše 400 čtverečních stop (asi 36 m<sup>2</sup>) a představovala zde svůj kompletní sortiment sportovní optiky. Největší zájem na sebe poutaly puškohledy řady Meostar R1 a binokuláry Meostar B1. Tyto výrobky tvoří hlavní část prodeje Meopty v USA a rozhodně stojí za zmínku, že je americký trh přijímá velmi dobře. Na stánku Meopty bylo po celou dobu výstavy velmi živo, zástupci jednotlivých prodejních skupin předváděli dealerům výrobky Meopty, vysvětlovali prodejní programy a v neposlední řadě sepisovali objednávky. Jen za samotné 4 dny výstavy byly podepsány objednávky v souhrnné hodnotě 120 tisíc dolarů, tedy asi 3 mil. Kč.

Mimoходом – to je asi největší odlišnost americké SHOT Show a německé IWA. Zatímco evropský veletrh není moc o objednávkách - zboží se objednává v jiných termínech – a slouží především k pravidelnému setkávání prodejců s nakupujícími, seznamování s novinkami a sledování konkurence, americká „show“ doslova srší atmosférou „co neprodáš dnes, už nikdy prodat nemusíš“.

Prodej sportovní optiky Meopta do USA a Kanady překročil vloni 25 mil. Kč, což představuje více než 50% nárůst ve srovnání s rokem 2004. Trend prodeje v USA jenom potvrzuje správnost obchodní strategie Meopty na americkém trhu nastoupené



Stánek Meopty na letošní SHOT Show

v r. 2003, jejímž základem je dceřinná společnost Meopta USA LLC sídlící v areálu mateřské společnosti TCI New York. Celkový posun Meopty na americkém trhu výstižně charakterizuje následující postřeh z letošní SHOT Show: Ještě před dvěma lety se u stánku Meopty zastavovali Američané s otázkou: „Meopta? Kdo jste? To jsem nikdy neslyšel!“ Letos se z jejich úst ozývalo nejčastěji: „Ááá, Meopta, tady jste, nemohl jsem vás najít. Máte bezva dalekohledy ...“ Věřte, nevěřte, to se dobře poslouchá!

\*) veletrh střelecký, lovecký a pro pobyt v přírodě

RNDr. Miloš Slaný  
manažer prodeje  
Meopta-optika, a. s., Přerov

## Veletrh vodičů, světlovodů a trubek

Každý sudý rok jsou na výstavišti v Düsseldorfu pořádány společně dva na světě největší a nejvýznamnější veletrhy kovozpracujícího průmyslu WIRE a TUBE. Letos se budou konat ve dne 24. až 28. dubna ve všech 17 výstavních halách na celkové užité ploše 80 464 m<sup>2</sup> za účasti 1693 vystavovatelů z 57 zemí.



**WIRE** – mezinárodní odborný veletrh drátů, kabelů a světlovodů bude umístěn v halách 9 až 12, 15 až 17 na užité výstavní ploše 49 660 m<sup>2</sup>. Zúčastní se na něm 985 vystavovatelů. Výstavní nomenklatura je zaměřena na materiály, výrobní prostředky, technologie a hotové výrobky. Návštěvníkům se představí komplexní nabídka strojů na dráty, kabely a světlovodná vlákna, stroje válcování, tvarování a úpravu povrchu

drátů, na výrobu vodičů, kabelů a skleněných vláken, na spojování a svařování drátů i světlovodů. Světlovodné kabely ze skla nebo plastů jsou někdy vyráběny společně s měděnými vodiči. Uvedena budou také technická zařízení s inovativními procesy, jež slouží k výrobě drátů a k jejich úpravám včetně strojů na výrobu kabelů a splétání lan. Doplní je stroje na výrobu pružin, různé tvářecí stroje, nástroje, související technologie, tváření a mazání, regulační, zkušební, měřicí systémy, manipulační prostředky a automatizační technika.



**TUBE** – mezinárodní odborný veletrh trub a trubek obsadí haly 1 až 8, 13 až 14 s užitou výstavní plochou 30 804 m<sup>2</sup> a s 708 vystavovateli. Vystavovatelé jsou vesměs výrobci a dodavatelé surovin, materiálů, hotových výrobků, strojů i technologií k výrobě kovových trub a trubek litím, tažením, válcováním, svařováním a tepelným zpracováním pro stavební konstrukce nebo např. pro nosné sloupky elektrických a trolejových vedení, rozvody vody ve vodárenství, teplé užitkové vody a páry v teplárenství, energetice, chemickém a potravinářském průmyslu. Další výrobky jsou z plastů a jiných umělých hmot, keramiky a skla. V nomenklatuře veletrhu je také nářadí a technologické postupy, související zkušební, měřicí, regulační a automatizační technika, skladové hospodářství, manipulace s materiálem a výrobky, logistika, doprava a jiné.

Tyto veletrhy budou doprovázeny přednáškami, firemními dny a nejrůznějšími prezentacemi. Podrobnější informace o vystavovatelích a novinkách je možné najít také na adresách [www.wire.de](http://www.wire.de), [www.tube.de](http://www.tube.de) a [www.messe-duesseldorf.de](http://www.messe-duesseldorf.de). Další informace, katalogy a vstupenky (platné též k bezplatným jízdám MHD v Düsseldorfu) za snížené ceny lze získat v předprodeji u zástupce veletržní správy pro ČR a Slovensko, kterým jsou Veletrhy Brno a.s., odbor zahraničního zastoupení, Mgr. Romana Šilhánková, Výstaviště 1, 647 00 Brno, tel.: 541 152 940, fax: 541 153 051 a e-mail: [r.silhankova@bv.cz](mailto:r.silhankova@bv.cz).

## Komentář k „Poznámce k článku Mikrokanáلكové plátky – MCP“

Velice děkuji za věcné a podnětné poznámky k mému článku [1]. Myslím, že zpětná vazba mezi autorem a čtenáři je důležitá, protože vede k získání zkušeností, jak psát a publikovat. Článek [1] měl být stručnou rešerší na téma mikrokanáلكových prvků (MCP - Microchannel Plates) a rozhodně si nekladl za cíl podrobně popsat veškeré jevy a problémy spojené s tímto zajímavým prvkem. Chtěl bych tímto dodatkem k již zmiňovanému článku některé věci doplnit a případně vysvětlit důvody, které mě vedly k jejich uvedení. Také bych chtěl poděkovat redakci JMO, že mi to umožnila a dala k tomu prostor.

V různých zdrojích jsem se setkal s odlišnou terminologií, týkající se této oblasti, nabyt jsem dojmu, že ještě není úplně sjednocena. Nebylo mým záměrem zavádět novou terminologii, ani jsem nechtěl nijak ovlivňovat čtenáře. Označení „plátek“ mi v dané chvíli připadalo vhodné a logické.

Je pravdou, že se pro výrobu mikrokanáلكových struktur ve velké míře používají materiály na bázi skloviny, ale existují i jiné postupy a materiály pro jejich získání. Jedním z nich je právě hliník, například [2]. V této práci je popsán postup, jak lze z hliníku pomocí elektrochemické oxidace hliníkové elektrody získat vrstvu tvořenou oxidem hliníku. Tato vrstva je následně oddělena v podobě destičky od hliníkového substrátu a pomocí fotolitografie a dalších chemických procesů je v tomto materiálu vytvořena stabilní mikrokanáلكová struktura. Následující chemické a technologické procesy vytvoří na této struktuře vrstvy, umožňující její použití k zesílení některých druhů záření.

K zmínce o jiném použití mikrokanáلكové struktury, než je zesilování některých druhů záření, mě přivedly práce z oblasti astrofyziky [3, 4]. Právě zde jsou příslušně modifikované mikrokanáلكové prvky použity pro úpravu, například fokusaci, různých druhů RTG záření.

Motivací pro publikování grafu 3 [5] byla snaha znázornit, na jaké druhy elektromagnetického záření je citlivá samotná mikrokanáلكová struktura. Schopnost detekce dalších druhů elektromagnetického záření je podmíněna převedením detekovaného záření na tu část spektra, na kterou je mikrokanáلكový prvek citlivý. Uznávám, že jsem na tuto skutečnost ve svém článku dostatečně neupozornil. Detekce iontů je výrobci, např. [6, 7], uváděna jako jedna z možností použití mikrokanáلكových prvků. Příkladem takového detektoru

je systém [8], který je osazený dvojicí mikrokanáلكových destiček. Maximální rozdíl napětí přiváděného mezi čelo prvního prvku a výstupní stranu druhého prvku obvykle nepřesahuje 2200 V. Pro malé ionty o energii 2 keV je to však dostačující energie k vzniku efektivní elektronové emise z povrchu kanáلكů. Pro detekci těžších iontů, například biomolekul, potřebujeme zajistit dostatečné urychlovací napětí.

Bod týkající se iontové bariéry je z mého pohledu diskutabilní. Například z článku [9] vyplývá toto: při použití GaAs fotokatody u noktovizorů III. generace dochází k průniku nechtěných iontů do mikrokanáلكů. Pohyb v mikrokanáلكech může způsobit jejich velmi rychlé opotřebení a následně i krátkou životnost celého systému. Obranou vůči tomuto jevu je použití iontového filtru (bariéry), který zabraňuje průniku iontů z fotokatody do mikrokanáلكů. Bohužel informace týkající se technologického řešení iontové bariéry v noktovizorech nemám k dispozici, proto jsem ve svém článku [1] prezentoval řešení, které se používá při detekci RTG záření [10]. V tomto případě se detektor doplňuje iontovými štíty (filtry), které zabraňují průniku nežádoucích iontů a UV záření do mikrokanáلكů.

Problematika týkající se mikrokanáلكových struktur je velmi obsáhlá a zahrnuje mnoho oblastí, takže ji není možné shrnout do jediného článku, aniž by nedošlo k vzniku diskutabilních formulací. Proto jsem se snažil o objasnění a doplnění původního článku [1]. Ještě jednou děkuji za podnětné poznámky.

- [1] Medřík T.: Mikrokanáلكové plátky – MCP, JMO 10/2005, 291 - 293
- [2] Delendik K., Emeliantchik I., Litomin A., Rumyantsev V., Voitik O.: Aluminum Oxide Microchannel Plates, [www.bo.infn.it/sminiato/sm02/talk/igor.doc](http://www.bo.infn.it/sminiato/sm02/talk/igor.doc)
- [3] [http://www.src.le.ac.uk/projects/lobster/ov\\_optics.htm](http://www.src.le.ac.uk/projects/lobster/ov_optics.htm)
- [4] <https://escies.org/public/mnt4/S8.4Bavdaz.pdf>
- [5] <http://www.kore.co.uk/mcp-faq.htm#5>
- [6] <http://www.sales.hamamatsu.com/en/home.php>
- [7] <http://www.burle.com/index.html>
- [8] [http://www.sciner.com/MCP/microchannel\\_plate\\_FAQ.htm](http://www.sciner.com/MCP/microchannel_plate_FAQ.htm)
- [9] Ruitter K., Bartošík P.: Mikrokanáلكové zesilovače jasu obrazu XD-4, JMO 5/2002, 139 - 140
- [10] <http://hea-www.harvard.edu/HRC/overview/hrcprinc.html>

Mgr. Tomáš Medřík, katedra optiky Univerzity Palackého, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 634 271, e-mail: medrik@optics.upol.cz

## 4. mezinárodní sympozium laserových, scintilačních a nelineárních optických materiálů

27. – 30. června 2006, Praha, Česká republika

Fyzikální ústav Akademie věd České republiky a Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská České technické univerzity Vás zvou na 4. mezinárodní sympozium laserových, scintilátorových a nelineárních optických materiálů (ISLNOM-4), které se bude konat v Praze ve dnech od 27. do 30. června, 2006. ISLNOM-4 bude pokračovat v tradici založené předchozími setkáními v Singapur (1997), Lyonu, Francii (2000) a v Keys-

tonu, USA (2003). Tato konference poskytne mezioborové fórum pro prezentace nejnovějších výzkumných trendů v oblasti základního a aplikovaného vývoje na poli optických a optoelektronických materiálů, zahrnující přípravné technologie, charakteristiky a aplikace k souvisejícím tématům.

Bližší informace: <http://www.fzu.cz/activities/conferences/islnom4/>

# Inovační technologie na HANNOVER MESSE



Na světově největším mezinárodním veletrhu inovačních technologií, průmyslových komponent a řešení HANNOVER MESSE 2006, pořádaném ve dnech 24. až 28. dubna 2006 v 17 halách hannoverského výstaviště na užité výstavní ploše 143 000 m<sup>2</sup>, se zúčastní přes 5000 vystavovatelů ze 60 zemí a je na něm očekáváno asi 300 000 návštěvníků.

Na veletrhu je zastoupeno 10 samostatných mezinárodních odborných veletrhů a jejich doprovodný program sestává z přibližně 1000 speciálních informačních akcí, fór, zvláštních přehlídek i několika nových témat. Mezi čtyřmi hlavními a nejvíce zastoupenými obory bude automatizace a energetika:

- **INTERKAMA+** – veletrh pro automatizaci spojených technologických procesů; [www.interkama.com](http://www.interkama.com)
- **Factory Automation** – veletrh pro automatizaci nespojitě výroby; [www.factory-automation-hannover.com](http://www.factory-automation-hannover.com)
- **Industrial Building Automation** – veletrh systémů automatizace budov a výroby; [www.industrial-building-automation-hannover.com](http://www.industrial-building-automation-hannover.com)
- **Energy** – veletrh obnovitelné a konvenční výroby, zásobování, přenosu a distribuce energie; [www.energy-hannover.com](http://www.energy-hannover.com)
- **Pipeline Technology** – veletrh pro plánování, stavbu, provoz a automatizaci potrubních a kanalizačních sítí; [www.pipeline-technology-hannover.com](http://www.pipeline-technology-hannover.com)
- **Subcontracting** – veletrh subdodávek a materiálů pro výrobu vozidel, strojírenství a investiční výstavbu; [www.subcontracting-hannover.com](http://www.subcontracting-hannover.com)
- **Digital Factory** – veletrh pro integrované procesy a řešení IT; [www.digital-factory.com](http://www.digital-factory.com)
- **Industrial Facility Management & Services** – veletrh pro průmyslové služby, údržbu a Condition Monitoring; [www.industrial-fm-services-hannover.com](http://www.industrial-fm-services-hannover.com)
- **MicroTechnology** – veletrh aplikované mikrosystémové techniky a nanotechnologií; [www.microtechnology-hannover.com](http://www.microtechnology-hannover.com)
- **Research & Technology** – trh inovací pro výzkum a vývoj; [www.research-technology-hannover.com](http://www.research-technology-hannover.com)



Každý rok se v Hannoveru zúčastňuje také Česká republika. Prakticky na všech dílčích veletrzích se představí české firmy. Letos jich bude celkem 25 a obsadí užitečnou výstavní plochu 500 m<sup>2</sup>. V oboru subdodávek organizuje RAPID a.s., Praha v hale 3 společný stánek.

Na HANNOVER MESSE 2006 bude partnerskou zemí Indie a prezentace se stane výkladní skříní indického hospodářství. V hale 6 se představí jako jeden z nejsilnějších trhů budoucnosti. Mezi vystavovateli bude řada indických podniků, především z oborů automatizace, energetiky a průmyslových subdodávek. Vytvoří se optimální prostředí pro intenzivní bilaterální kontakty s indickou ekonomikou. Jsou očekáváni významní zástupci indického hospodářství a politiky. Vystoupení Indie bude doprovázeno bohatým politickým a kulturním programem.

Podrobnější informace o jednotlivých oborových akcích jsou uvedeny na dílčích internetových stránkách a k celému programu veletrhu na [www.hannovermesse.de](http://www.hannovermesse.de). Zlevněné vstupenky a katalogy mohou zájemci o návštěvu zakoupit v předprodeji u výhradního zástupce společnosti Deutsche Messe AG, Hannover v ČR, kterým je Ing. Eva Václavíková, Myslbekova 7, 169 00 Praha 6, tel./fax: 220 510 057 a 220 517 837, [www.hf-czechrepublic.com](http://www.hf-czechrepublic.com), e-mail: [info@hf-czechrepublic.com](mailto:info@hf-czechrepublic.com).

(jpe)

## Podpora sebezaměstnání jako prevence nezaměstnanosti absolventů odborných škol



Úřady práce v celé České republice evidují vysoký podíl absolventů odborných škol na celkové nezaměstnanosti. Ve snaze ovlivnit tento stav vznikl projekt „Selfemployment

– podpora sebezaměstnání“, který je od dubna 2005 realizován v rámci programu Phare 2003 Rozvoj lidských zdrojů.

Cílem projektu je vytvořit motivační a vzdělávací program průvodce podnikáním, který mladé absolventy připraví a motivuje k nástupu na podnikatelskou dráhu a poskytne jim poradenskou pomoc v prvním roce provozu živnosti. Průvodce má elektronickou, pro cílovou skupinu atraktivní podobu a pro učitele, vzdělávací a výchovné pracovníky je zpracován i jako tištěná publikace. Internetová verze je zdarma přístupná na adrese [www.selfemployment.cz](http://www.selfemployment.cz).

Produkt bude brzy distribuován do středních škol a vzdělávacích zařízení v ČR a na úřady práce a je určen jak nezaměstnaným, tak studentům jako prevence nezaměstnanosti.

Zárukou vytvoření kvalitního a zacíleného materiálu je spolupráce organizací z různých oblastí: koordinátora projektu vzdělávacího zařízení Tempo Training & Consulting s.r.o. a partnerů: Regionální poradenské a informační centrum Opava, Asociace malých a středních podniků a živnostníků ČR, Střední škola Opava a Střední škola elektrostavební a dřevozpracující, Frýdek – Místek.

Na začátku roku 2006 jsme realizovali testování průvodce na skupinách nezaměstnaných, zejména absolventů a občanů do 25 let věku. V partnerských školách byl produkt zapracován přímo do výuky. Účastníci nám poskytli velmi pozitivní hodnocení, proto nyní přistupujeme k distribuci produktu.

Projekt je financován Evropskou unií a českým státním rozpočtem.

Kontakt: Ing. Kateřina Nevřalová, Tempo TC s.r.o., tel: 573 345 107, e-mail: [nevralovi@tiscali.cz](mailto:nevralovi@tiscali.cz).



**NORTHROP, R. B.: Introduction to Instrumentation and Measurements. (Úvod do prístrojovej techniky a merania). 2. vyd., CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton 2005, XXI + 743 s., ISBN 0-8493-3773-9, cena: 29,99 GBP**

Dielo renomovaného amerického autora je koncipované v zásade ako vysokoškolská učebnica pre oblasť prístrojovej techniky a merania, môže však byť svojím obsahom využiteľné i pre výskumníkov a praktikov. Monografia je rozdelená do jedenástich kapitol a obsahuje rozsiahly súpis literatúry (281 prameňov), početné ilustrácie a vecný index.

Úvodná kap. sa zaoberá všeobecnými otázkami meracích systémov, ich konštrukciou, chybami, ako aj opisom niektorých nových etalónov elektrických veličín. V 2. kap. sa autor zaoberá podrobne spracovaním analógových signálov, zosilňovačmi a pod.

Pomerne rozsiahla 3. kap. je venovaná problematike šumov pri elektrických meraniach, porúch interferenčného charakteru a postupov na ich odstránení. Ďalšie dve kapitoly sa týkajú prístrojovej techniky na meranie veličín jednosmerného a striedavého prúdu.

V 6. kap. autor podáva prehľad o vstupných charakteristikách snímačov (napr. pre snímače teploty, vlhkosti, polohy, rýchlosti a pod.). Tiež sú tu uvedené informácie o snímačoch ionizujúceho žiarenia, optických kódových diskoch a o metódach Dopplerovského merania rýchlosti. V 7. kap. sú podrobne podané aplikácie snímačov na meranie uhlového zrýchlenia, uhlovej rýchlosti, sklonu, sily, tlaku, teploty. Tiež je tu zmienka o systéme určovania absolútnej polohy – GPS.

Základným elektrickým meraniam je venovaná obsažná kapitola 8. Ťažiskom sú metódy merania napätia a prúdu, ale nechýbajú ani poznatky o meraní magnetických veličín a meraní odporu, kapacity a indukčnosti. Ďalšia kap. pojednáva aj o vzorkovaní a digitálnej kvantifikácii; zmienka je tu aj o tzv. virtuálnych meracích prístrojoch.

10. kap. je úvodom do spracovania digitálnych signálov; asi táto kap. mala byť zaradená už za kap. 2! Posledná kap. monografie obsahuje 4 príklady návrhu meracích systémov (ide o polarimeter, systém na meranie porúch podzemných káblov, laserový rýchlomer a indikátor objektov).

Za každou kapitolou (okrem jedenástej) je uvedený súbor problémov – príkladov, slúžiacich pre opakovanie a precvičenie príslušnej látky. Škoda, že k tomu nie sú aj riešenia! Hodnotné dielo pre každého praktického metrologa!

*I. Brezina*

**Metrologija i metrologično osigurjavanje 2004. (Metrologija a metrologické zabezpečenie 2004). Sbornik dokladi, SOFT-TREJD Sofia 2004, 416 s., ISBN 954-9725-89-8.**

Zborník obsahuje materiály – príspevky z XIV. vedeckého sympózia s medzinárodnou účasťou, ktoré sa konalo v Sozopole (Bulharsko), v dňoch 14. – 18. 9. 2004. Hlavnými organizátormi akcie boli: Tech. univerzita v Sofii, Štátna agentúra pre normalizáciu a metrologiu, Zväz bulharských metrologov a atomová elektráreň Kozloduj.

Texty v zborníku (v jazykoch: bulharskom, ruskom a anglickom) sú usporiadané podľa sekcií sympózia, t. j. do siedmich kapitol.

1. kap. obsahuje 4 príspevky všeobecného charakteru (Česká republika tu má zastúpenie autormi J. Horský a J. Horská).

V 2. kap. sú príspevky pod tematickým zameraním na jednotnosť, správnosť a kvalitu meraní (21 článkov). Dominujú tu témy o kalibrácii, neistotách a všeobecných otázkach metrologického zabezpečenia. V ďalšej kap. zborníka (Snímače, meracie prístroje a systémy) sú uverejnené príspevky (20 článkov), zaoberajúce sa najmä inštrumentálnymi aspektami procesu merania.

Sekcia III. (kap. 4 zborníka) bola venovaná meraniu geometrických veličín. Aj keď v tomto prípade ide hlavne o meranie dĺžok a rovinných uhlov, sú uvedené poznatky rozhodne podnetné a zaujímavé pre každého metrologa, pracujúceho v oblasti metrologie geometrických veličín.

Ďalšia kap. zborníka je venovaná meraniu ekologických a biotechnologických parametrov (9 príspevkov). Určite zaujímavá časť diela aj pre medicínskych pracovníkov!

Veľmi obsiahla časť zborníka, podávajúca príspevky V. sekcie (19 príspevkov) sa zaoberá tematikou metrologickej praxe. I keď tento termín má veľmi široký obsah, z analýzy týchto textov sa dá odvodiť, že ťažisko bolo venované otázkam správnej metrologickej praxe, určovaniu rekalibračných intervalov a niektorým edukačným problémom.

V poslednej kap. zborníka sú uverejnené komerčné príspevky piatich firiem, vyrábajúcich meradlá geometrických, optických a elektrických veličín.

Zborník možno doporučiť praktikom – metrologom i ostatným záujemcom o metrologické zabezpečenie.

*I. Brezina*

**KOCH, A. W. a kol: Optische Messtechnik an technischen Oberflächen. (Optické meranie na technických povrchoch).**

**1. vyd., Expert Verlag, Renningen-Malmsheim 2003, 212 s., ISBN 3-8169-1372-5, cena: 38,00 EUR.**

Pomocou optických (bezdotykových) meracích metód možno merať parametre technických povrchov rýchlo a správne. Tieto metódy sú nielen efektívne, ale aj nenáročné a aplikovateľné v laboratóriách a priamo v produkčných podmienkach.

Autorský kolektív nemeckých odborníkov (7 spoluautorov) v svojej monografii prezentuje najnovšie poznatky z prístrojovej techniky a metodiky merania parametrov technických povrchov. Dielo je veľmi dobre ilustrované (167 obrázkov) a doplnené rozsiahlym súpisom literárnych prameňov (418 citácií !!!).

Kniha je štruktúrovaná do siedmich kapitol; v prvej kap. je vysvetlená motivácia pre napísanie takejto monografie, ako aj definície základných termínov.

Základy laserovej meracej techniky sú podané v 2. kap. Predovšetkým sú tu vysvetlené základné termíny, podstata interferenčného javu, princíp laserov a podrobnosti o optických detektoroch. Nadväzná 3. kap. sa zaoberá meraním dĺžok, rýchlosti a klasifikáciou objektov. Nechýba tu ani stať o Dopplerovskej metóde merania rýchlosti.

Veľmi dôležitá kap. 4 je venovaná meraniu tvaru povrchov. Podané sú tu metódy interferenčné, ako aj iné. Zaujímavá je spracovaná stať o aplikácii škvrnkovej interferometrie.

Piata kap. analyzuje otázky použitia optických snímačov pri meraní tvarov. Uvedené sú tu ako postupy laserovej triangulácie (aj s niektorými rozbormi neistôt merania), tak aj ostatné aspekty tejto metódy, vrátane výpočtov neistôt príslušných meraní. Posledná stať tejto kap. uvádza súhrn a porovnanie uvedených meracích metód.

V šiestej kap. diela sa autori zaoberali oblasťou merania parametrov drsnosti povrchu. Ide tu nesporne o veľmi aktuálnu problematiku, pretože drsnosť má význačný vplyv na funkčnosť a kvalitu viacerých produktov (napr. v automobilovom priemysle). Akcent tu je daný na optické meracie metódy, ale v závere kapitoly sa nachádza veľmi interesantná porovnávací analýza optických a mechanických metód, čo môže slúžiť ako podporný súbor informácií pre pracovníkov metrologických laboratórií v praxi. Posledná kap. monografie je venovaná meraniu parametrov tenkých vrstiev.

Solídna a informatívne bohatá publikácia – vhodná pre každého praktického metrologa!

*I. Brezina*

**Redakční poznámka:** Tato recenze byla z části (jen po popis týkající se 4. kapitoly) uveřejněna v č. 3/05 na str. 100. Redakce se omlouvá za toto nedopatření. Recenzi Ing. Igora Breziny proto otiskujeme nyní v celém rozsahu. Děkujeme za pochopení.

*Redakce*

# CONTENTS

## Phase characteristics of fs pulses and its influence on two photon fluorescence (A. Gaál, I. Bugár, D. Velič, F. Uherek).....63

This article deal with phase diagnostics of femtosecond laser pulses and with its change to increase a nonlinear optical signal. We introduce a single shot technique of complex diagnostics SPIDER, which works on the base of interference in spectral region. Phase characteristics of investigated fs pulses incoming from oscillator was controlled by a prism pair. There was shown that phase characteristics changes of fs pulses leads to intensity changes of two photon fluorescence of coumarine C522 in ethanol.

## Embedded system for measurement and control of thermal comfort parameters (J. Pálka, F. Hruška).....67

The measurement and the control of thermal comfort parameters require appropriate technical means. These are devices specified for the acquisition of physical parameters of an environment; evaluating data and controlling according thermal comfort indexes. Research and development in measurement of mean radiant temperature has been done, because this parameter is the specific one. Further a unit – an embedded system proposed for the evaluation of the thermal comfort indexes and for the optimal control of thermal comfort is being developed.

## Application of orthogonal polynomials in optical imaging theory (A. Mikš, J. Novák).....71

It is desirable to obtain residual aberrations of designed optical systems as small as possible during the design process of optical systems. By analysis of the dependence of aberrations on the numerical aperture, it is possible to find such values of the numerical aperture, where the residual aberration is zero. These values of the numerical aperture are called correction zones. The work theoretically analyses the described problem and equations are derived for expression of wave aberration coefficients using correction zones for the third and fifth order aberrations. Moreover, it is shown the process of derivation of orthogonal polynomials that are suitable for the optical imaging theory. Using the derived polynomials, it was performed the calculation of optimal correction zones and optimal position of the centre of reference sphere for two cases: minimization of maximal deviation of the wave aberration from zero, and minimization of the root-mean-square error of wave aberration.

## Concentration of radiation in solar photovoltaic cells

(M. Libra, V. Poulek) .....82

## History of the Optical Workshop of Academy of Sciences CR in Turnov (Z. Melich).....86

In the paper it is circumscribed the history of research and development optical workshop of Academy of Sciences CR in Turnov from its foundation in 1965 up to nowadays when workshop is incorporate as a field workplace and independent department of Institute of Plasma Physics AS CR in Prague.

## SHOT Show 2006 (M. Slaný) .....88

## Wire, optical cable and pipe fair (jpe) .....88

## Commentary on “Remarks to the article Microchannel plates - MCP” (T. Medřík).....89

## 4<sup>th</sup> International Symposium on Laser, Scintillator and Non Linear Optical Materials .....89

## Innovation technology in HANNOVER MESSE (jpe).....90

## Self-employment subvention as an unemployment prevention of graduates from technical schools (K. Nevřalová) .....90

## From technical library (I. Brezina) .....91

## SPIE/CS library acquisition .....92

# ANOTACE

## Reflexní, absorpční a rozptylové světelné jevy a efekty zčervenání zemín ve vztahu k jejich obsahu haematitu (J. Pospíšil, J. Hrdý, J. Hrdý, jr.) .....76

Článek prezentuje souvislé teoretické úvahy o specifických reflexních, absorpčních a rozptylových světelných jevech a efektech zčervenání zemín, obvykle obsahujících haematit, goethit a zbyvájeící složky bez kyslíčnicků železa. K tomuto účelu jsou zavedeny a vysvětleny příslušné matematické relace vzhledem k uvažovaným třem základním barevným klasifikačním systémům, vybraným definicím stupňů zčervenání a obsahům zeminových složek. Nakonec jsou uvedeny a vysvětleny příklady jejich specifických forem. Tyto formy potvrzují užitečnost využitých veličin a popsaných vyhodnocovacích postupů v běžné kolorimetrii zemín.

## Přírůstky knihovny SPIE/CS

1063 Optical Manufacturing and Testing V  
(3-5 August 2003, San Diego, California, USA)  
Vol. 5180

1064 Wave-Optical Systems Engineering II  
(3-4 August 2003, San Diego, California, USA)  
Vol. 5182

1065 Optical Diagnostics for Fluids, Solids, and Combustion II  
(3-4 August 2003, San Diego, California, USA)  
Vol. 5191

1066 Signal and Data Processing of Small Targets 2003  
(5-7 August 2003, San Diego, California, USA)  
Vol. 5204

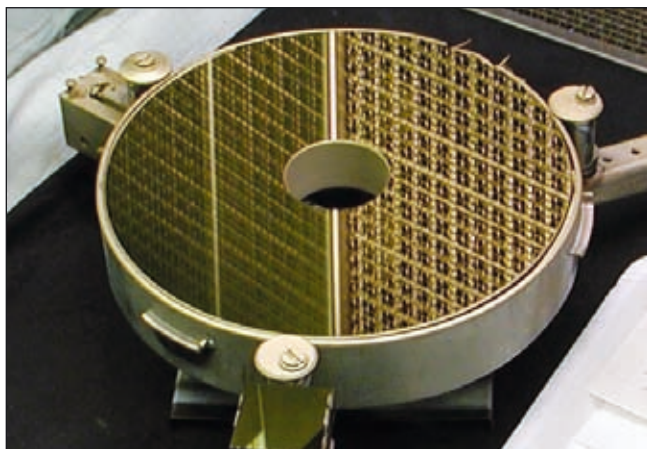
1067 Organic Holographic Materials and Applications  
(7-8 August 2003, San Diego, California, USA)  
Vol. 5216

1068 Optical Design and Engineering  
(30 September – 3 October 2003, St. Etienne, France)  
Vol. 5249

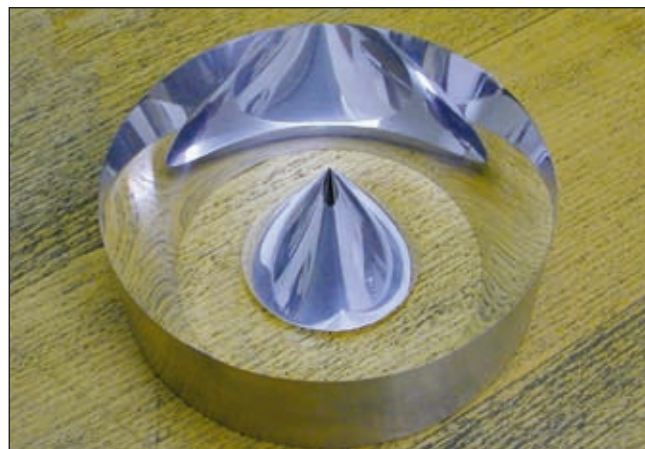
1069 Optical Fabrication, Testing, and Metrology  
(30 September – 3 October 2003, St. Etienne, France)  
Vol. 5252

1070 Practical Holography XVIII: Materials and Applications  
(19-20 January 2004, San Jose, California, USA)  
Vol. 5290

## UNIKÁTNÍ VÝROBKY VÝVOJOVÉ OPTICKÉ DÍLNY AV ČR Z TURNOVA



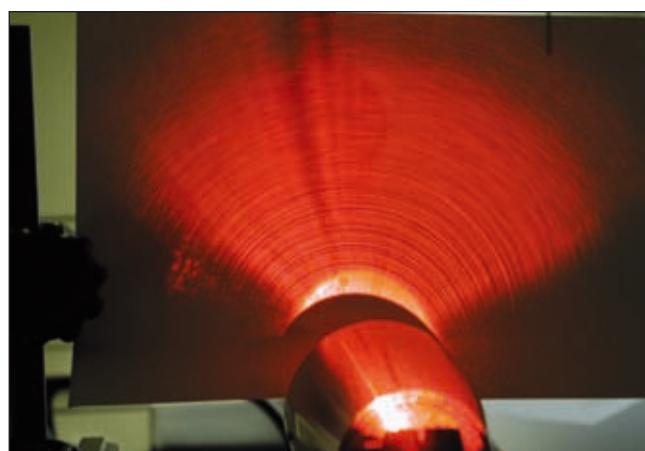
Přesné paraboloidické zrcadlo pro IČ obor



Kuželová zrcadlová optika



Polotovary RTG kolimačních asférických zrcadel



Využití rozptylu ke kontrole mikrodrsnosti optických ploch



Prvky krystalové optiky



RTG kolimační objektivy

Ilustrační foto k článku Z historie a současnosti optické dílny Akademie věd v Turnově

# AMPER 2006

## 14. mezinárodní veletrh elektrotechniky a elektroniky

- elektronické prvky a moduly
  - zařízení pro výrobu a rozvod elektrické energie
  - telekomunikace, radiokomunikace, síťové služby a výpočetní technika
  - obrazová a zvuková technika
  - automatizační, řídicí a regulační technika
  - stroje, zařízení, nářadí a pomůcky
  - elektroinstalační technika
  - pohony a výkonová elektronika
  - měřicí a zkušební technika
  - zabezpečovací technika
  - osvětlovací technika
  - elektrotepelná technika
  - vodiče a kabely
  - služby
- 
- událost světa elektrotechniky a elektroniky na mezinárodní úrovni
  - odborníci a obchodníci z 21 evropských i zámořských zemí
  - nejnovější výrobky a technologie, které představí téměř 800 firem
  - opět větší v kompletně zrenovovaných prostorách PVA Letňany
  - konference, prezentace a školení na řadu aktuálních témat o rozvoji v oboru
  - soutěž o nejlepší exponát veletrhu „Zlatý Amper 2006“
  - prostor pro úspěšná jednání, důležitá rozhodnutí a nasměrování obchodní strategie
- 
- **AMPER - jednotka Vašeho úspěchu!**

**4. - 7. 4. 2006**

Pražský veletržní areál Letňany

[www.amper.cz](http://www.amper.cz)

**TERINVEST** spol. s r.o., tel.: 221992134, 126, fax: 221992139, [www.terinvest.com](http://www.terinvest.com), e-mail: [amper@terinvest.com](mailto:amper@terinvest.com)