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 KŘESÁLEK, 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 Mooros 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 zasílání 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 experimentálnej fyziky FMFI UK, Mlynská dolina F2/148, SK - 842 48 Bratislava, tel.: 00421 7 65 426 706, e-mail: Strba@fmph.uniba.sk*
V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá: *prof. Ing. Ivo Čáp, CSc., Žilinská univerzita - FPV, Hurbanova 15, SK - 010 26 Žilina, tel.: +421 415 136 350, e-mail:ivo.cap@fpv.utc.sk*
Tiskne *TYPOservis Holešov, Masarykova 650, 769 01 Holešov, tel.: 573 398 746, e-mail: typoservis@iol.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 2005

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS

ROČNÍK 50 6/2005

OBSAH

Spektroskopie pružně odražených elektronů - zánovní metoda studia povrchů *(J. Pavluch) 174*

Rastrové optické soustavy *(M. Jiráček) 180*

Přírůstky knihovny SPIE/CS *..... 184*

Srovnání výsledků optického a RTG měření 88 polyetylenových náhrad kyčelního kloubu typu ABG 1 *(J. Gallo, V. Havránek, A. V. Florschutz) 185*

Ohlédnutí za výstavou Interkamera 2005 *(M. Křížek) 188*

Mobilní roboty pro manipulační úlohy ve zdravotnictví *(L. Kárník, V. Buzek) 192*

Význam solární energie roste *(P. Bican, J. Mareš) 195*

Měření disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence s využitím spektrální interferometrie v bílém světle *(P. Hlubina) 196*

Technologický vývoj, oblasti použití a dlouhodobé světelné charakteristiky LED diod *(J. Truhlář, K. Studenovský) 200*

Z dílny starých mistrů *..... 203*

SPIE/CS - společnost optiků informuje *..... 204*

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 HORŇÁK - 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 Physies of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Dagmar SENDERÁKOVÁ - 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 Mooros 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.

Reproduciton 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 Slovac 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 7 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: typoservis@iol.cz
Advertising: editor's office, Kabelíkova 1, CZ-750 02 Přerov, fax: 581 242 222.
Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2005

FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL
VOLUME 50 6/2005

CONTENTS

Elastic Peak Electron Spectroscopy - A Newish Method for Surface Studies *(J. Pavluch)* 174

Raster optical systems *(M. Jiráček)* 180

Recent acquisitions of the SPIE/CS library 184

A comparison of linear polyethylene wear measured by optical and radiologic methods in 88 retrieved ABG 1 cups
(J. Gallo, V. Havránek, A. V. Florschutz) 185

Looking back for the exhibition Interkamera 2005 The significance of solar energy is rising
(M. Křížek) 188

The mobile robots for manipulation task in health area *(L. Kárník, V. Buzek)* 192

The significance of solar energy is rising
(P. Bican, J. Mareš) 195

Measurement of group birefringence of a calcite crystal using white-light spectral interferometry
(P. Hlubina) 196

Technological development, applications and long term light characteristic of LEDs
(J. Truhlář, K. Studenovský) 200

SPIE/CS - Society of optics informs 204

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

Jiří PAVLUCH, katedra elektroniky a vakuové fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, Praha

Spektroskopie pružně odražených elektronů – zánovní metoda studia povrchů

Tento článek s úctou věnuji svému geograficky a věkově vzdálenému, ale duchovně blízkému kolegovi a příteli prof. G. Gergelymu, nestoru světové fyziky povrchů a autoru metody spektroskopie pružně odražených elektronů, který před třemi roky sice již překročil osmdesátku, ale stále je v činné službě. V tuzemsku prof. Gergely ke svému jubileu obdržel zlatou medaili Jana Marka Marci.

ÚVOD

V souvislosti s bouřlivým nástupem a neméně bouřlivým rozvojem nových průmyslových technologií během posledních několika desetiletí se v řadě velmi různorodých praktických aplikací ukázalo, že vlastnosti pevných látek na jejich rozhraní jsou mnohem důležitější než jejich vlastnosti objemové. Pojem rozhraní je přitom velmi široký: V metalurgii může jít např. o hranice krystalových zrn. Vlastnosti ocelí právě na těchto hranicích určují jejich pevnost. Speciálním typem rozhraní je i povrch, tj. vlastně hranice mezi pevnou látkou a vakuem, popřípadě zředěným plynem. Zmíněné praktické aplikace jsou skutečně pro laika překvapivě rozmanité a sahají od elektroniky a zejména mikroelektroniky přes ochranu materiálů proti korozi, tvrdá otěruvzdorná pokrytí obráběcích nástrojů a součástek textilních strojů, průmyslové katalyzátory či detektory toxických látek až k lékařským implantátům či bižuterii. To jsou samozřejmě pouze příklady vyňaté z nepřeberné řady, abychom rozsáhlost oborů, v nichž se fyzika povrchů uplatňuje, ozřejmili.

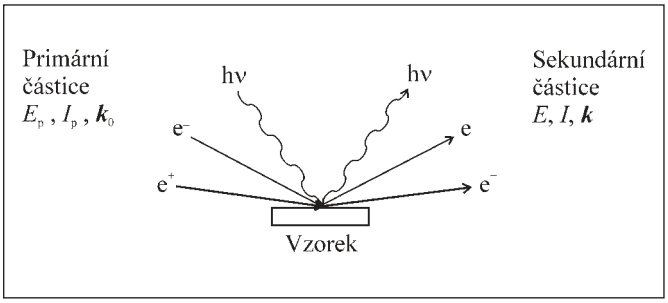
METODY FYZIKY POVRCHŮ

Povrchy pevných látek začaly být studovány pochopitelně již daleko dříve, než jejich důležitost a šíře aplikací teprve postupně vycházely najevo a nově vznikající fyzikální disciplína se plně etablovala. Ač metody fyziky povrchů se rozvinuly až koncem šedesátých či počátkem sedmdesátých let nedávno minulého století a některé jsou ještě mladší, většinou spočívají na principech, které nové nejsou. Byly totiž spjaty s fundamentálními fyzikálními objevy, učiněnými již na počátku minulého století, ale z příznačných důvodů upadly v zapomnění.

Tyto příznačné důvody jsou zejména dva: Jak uvidíme dále, zásadní otázkou při analýze povrchů je připravit povrch dobře definovaný a v tomto stavu ho po dobu analýzy udržet. Metod přípravy čistého povrchu je vícero; některé jsou více, jiné méně univerzální a každá má své výhody i nevýhody. Ač jsou fyzikálně i technicky velmi zajímavé, nemůžeme se o nich v rámci tohoto článku blíže rozepisovat. Důležitá je skutečnost, že se neobejdou bez aplikace techniky ultravysokého vakua (UHV). Jednoduchý výpočet z vakuové fyziky totiž ukazuje, že za tlaku řádově 10^{-4} Pa se původně čistý povrch pokryje jednoatomární vrstvou zbytkových plynů již za řádově 1 s (předpokládáme-li pravděpodobnost ulpění 1, která je ve většině případů blízká realitě). To je samozřejmě lhůta, v níž je nemyslitelné provést jakékoliv spektroskopické měření. Potřebujeme dobu o několik řádů delší, a tudíž i tlak o několik řádů lepší, přinejmenším 10^{-7} Pa, ale lépe 10^{-8} Pa. Některá měření věnovaná studiu povrchových reakcí vyžadují dokonce tlak řádu 10^{-9} Pa. Jelikož ovšem technika UHV nebyla komerčně dostupná až do počátku sedmdesátých let minulého století, povrchové analýzy nedostatečně dobře definovaných vzorků nutně musely přinášet nereprodukovatelné výsledky, čímž neprávem vrhaly špatné světlo na sám princip metody.

Druhou významnou okolností je skutečnost, že v metodách analýzy povrchů máme téměř vždy co do činění s velmi slabým signálem, překrývaným obrovským pozadím často obtížně popsatelného charakteru. Teprve aplikace moderních metod aplikované elektroniky umožnila si s takovou situací poradit a užitečný signál extrahovat.

Metod fyziky povrchů, popřípadě jejich modifikací, postupně vznikla dlouhá řada. Označují se zpravidla zkratkami svých anglických názvů. Jejich společenství je však natolik bohaté, že i pro odborníka se stává až nepřehledným. Přesto mají základní rysy společné: Povrch zkoumaného vzorku je podroben dopadu částic, zvaných primární. Tyto částice mohou být nejrůznějšího druhu – fotony ultrafialového či rentgenového záření, elektrony, ionty, popřípadě i částice neutrální. Popisujeme je veličinami jako jsou energie, proud nebo tok, vlnový vektor atd. Primární částice dopadnuvší na povrch, popřípadě dokonce již bezprostředně před dopadem, vcházejí do vzájemného působení neboli interakce s atomy, které jsou jeho součástí a jsou na něm vázány silami různého původu, druhu a velikosti. V důsledku tohoto vzájemného působení se z povrchu mohou uvolňovat částice, zvané sekundární. Ty opět mohou být nejrůznějšího druhu a jsou popsány analogickými veličinami. Popsaný obecný princip metod analýzy povrchů znázorňuje *obr. 1*.



Obr. 1 Obecný princip metod analýzy povrchů. Primární částice fotony (hν), elektrony (e^-) či ionty (e^+) dopadají na povrch vzorku a jsou charakterizovány svou energií E_p, proudem I_p, vlnovým vektorem $\boldsymbol{k}_0$, popřípadě dalšími veličinami. Sekundární částice, charakterizované analogickými veličinami, povrch vzorku opouštějí a nesou o něm informace.

Podstatné je, že v těchto veličinách, v jejich vzájemné závislosti, popřípadě v závislosti na veličinách primárních, je o zkoumaném povrchu obsažena informace. Vyneseme-li pak některou z těchto závislostí, získáváme určitý typ spektra. Proto také většinu metod studia povrchů nazýváme spektroskopiemi. Některé jsou relativně známé a populární díky své univerzalitě, jiné jsou dosti speciální, a proto málo rozšířené.

K těm prvním patří například rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS, zvaná též ESCA) [1], či spektroskopie Augerových elektronů (AES) [2], ke druhým například inverzní fotoelektronová spektroskopie (IPE) nebo spektroskopie prahových potenciálů (APS),

již se dlouhá léta zabýval autor tohoto článku. Je ovšem třeba si uvědomit, že neexistuje nějaká metoda „lepší“ a jiná naopak „horší“. Každá poskytuje specifické informace, a chceme-li jich o nějakém vzorku, popřípadě o procesech, které na jeho povrchu či v přilehlých podpovrchových vrstvách nastávají, získat co nejvíce, nezbývá nám, než různé analytické metody zkombinovat. Zainteresovaný čtenář nalezne bližší informace v monografiích, jako jsou např. [3], v češtině pak [4].

Povrch sám, jakožto určitý typ rozhraní, a sice rozhraní mezi pevnou látkou a vakuem, popřípadě více či méně zředěným plynem, přitom nepodléhá žádné kvantitativně vyjádřitelné definici. Je to taková k němu přilehlá oblast látky, v níž se projevuje jeho přítomnost z hlediska jejích vlastností. Tato definice je sice poněkud vágní až tautologická, nemáme však lepší. Specifickými vlastnostmi povrchu můžeme mít na mysli jeho obecně jiné složení nebo jinou strukturu, ať již geometrickou či elektronickou. Specifické vlastnosti povrchu jsou důsledkem procesů, které na něm nastávají. Povrch je například vystaven dopadu molekul zbytkových plynů, které na něm ulpívají a modifikují jeho složení, popřípadě difundují do hloubky. Z opačné strany rovněž dochází k difúzi různých složek, až dokonce k jejich segregaci na povrchu (obohacení složení povrchových vrstev o určitou složku). Výsledkem těchto procesů může být až řádově odlišné percentuální chemické složení povrchových vrstev vůči objemu.

Odlišnosti oproti objemu ve struktuře geometrické mohou být také drastické. Jsou způsobeny „snahou“ minimalizovat volnou energii. Tato „snaha“ se projevuje v přeuspořádávání poloh atomů na povrchu (tzv. rekonstrukci) a ve změně vzájemných vzdáleností k povrchu přilehlých atomových rovin (tzv. relaxaci).

Specifika informací, jež různé analytické metody studia povrchů poskytují, spočívají v jejich značně odlišných vlastnostech z hlediska citlivosti, popřípadě selektivity. Přitom pojem „citlivost“ zde užíváme ve dvou rozdílných významech:

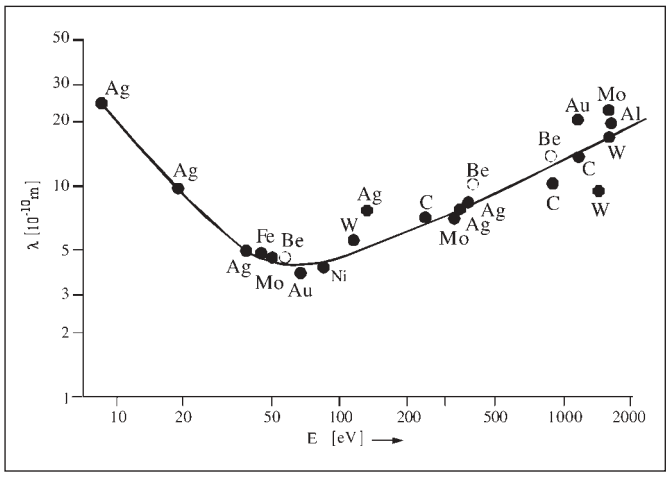
Za prvé můžeme mít na mysli citlivost absolutní, tj. jaké množství látky přítomné na povrchu popřípadě v jeho bezprostřední blízkosti je daná metoda schopna zaregistrovat. Z tohoto hlediska dosahuje citlivost např. AES za běžných podmínek řádově setiny monovrstvy.

Za druhé můžeme citlivostí mínit citlivost povrchovou, neboli hloubku, z níž pocházejí informace danou metodou získávané. V této souvislosti se v literatuře vyskytují různé zdánlivě ekvivalentní pojmy, jako jsou „informační hloubka“, „úniková hloubka“, „útlumová délka“, „střední volná dráha“ apod. Vývoj těchto pojmů souvisel s vývojem povrchových analytických metod, zejména elektronových spektroskopií, a jejich záměnné užívání, jako by šlo o totéž, vede často ke zmatkům. Jsou to však veličiny přesně definované, přičemž tyto definice se čas od času revidují, aby pokud možno stále odpovídaly stavu poznání v dané oblasti, tj. výsledkům základního výzkumu rozptylu elektronů v povrchových oblastech pevných látek.

Pro naše účely se přidržme definic, které podala Americká společnost pro testování a materiály (ASTM) [5]. Podle nich např. tzv. úniková hloubka je definována jako hloubka, v níž pravděpodobnost výstupu elektronu beze ztráty energie klesne na 36,8 % (e^{-1}) své původní hodnoty. Informační hloubka (Information Depth – ID) je definována jako hloubka, z níž pochází určitá část signálu; v případě exponenciálního útlumu signálu 63,2 % tvoří příspěvek povrchové vrstvy o tloušťce rovné únikové hloubce. Aby nevznikal mylný dojem, že úniková a informační hloubka jsou totéž, je třeba zdůraznit dotyčný předpoklad exponenciálního útlumu signálu v závislosti na hloubce, který ve skutečnosti splněn není, jak ukázal základní výzkum zejména v posledních 20-25 letech. Tento předpoklad totiž zanedbává elastický rozptyl elektronů. Zevrubnější rozbor těchto procesů ovšem vysoce překračuje rámec tohoto článku.

Konstatujme však alespoň, že základní veličinou, kterou se popisuje transport elektronů v pevných látkách, je střední volná dráha elektronů pro jejich nepružný rozptyl (Inelastic Mean Free Path – IMFP). Označuje se zpravidla λ a je definována jako střední vzdálenost mezi dvěma po sobě následujícími nepružnými srážkami elektronu. Je to tedy univerzální veličina nezávislá na geometrii experimentu. Na ní jsou závislé vlastnosti všech elektronově spektroskopických metod analýzy povrchů, a zejména je klíčová při jejich analýze kvantitativní. Způsobům jejího výpočtu v závislosti na energii pro různé materiály, jakož i jejím korekcím na různé povrchové jevy, se systematicky a s nesmírným úsilím věnují přední světoví teoretici z oblasti fyziky povrchů. Jejich modelové výpočty se porovnávají s čím dál přesněji a pečlivěji prováděnými experimenty na různých standardizovaných systémech a sofistikovaných spektrometrech.

Pro naše účely postačí, konstatujeme-li, že závislost IMFP na energii není monotónní a že její minimum leží v okolí zhruba 50 eV, kde činí méně než 1 nm, což podle materiálu odpovídá asi 1-3 atomárním vrstvám, tzv. monovrstvám. Stoupá na obě strany, přičemž však ani u energie asi 2000 eV nedosahuje více než asi 10 monovrstev (viz *obr. 2*).



Obr. 2 Závislost střední volné dráhy λ elektronů v látce na jejich energii E

PRINCIP A VLASTNOSTI SPEKTROSKOPIE PRUŽNĚ ODRAŽENÝCH ELEKTRONŮ

Jak již z názvu vyplývá, primárními částicemi ve spektroskopii pružně odražených elektronů (Elastic Peak Electron Spectroscopy – EPES, zkráceně též elastická spektroskopie) [6] jsou elektrony a sleduje se jejich pružný odraz, tj. odraz beze ztráty energie. Sekundárními částicemi jsou tudíž rovněž elektrony, a sice pružně odražené elektrony primární. Jejich pružný odraz nastává na atomových jádrech vzorku, která jsou oproti elektronům velmi těžká, a proto k výměně energie prakticky nedochází. Pravděpodobnost pružného odrazu elektronů se zpravidla označuje η a nazývá koeficientem jejich elastické reflexe. Je závislá na primární energii E_p, atomovém čísle Z vzorku a prostorovém úhlu Ω, do nějž odraz sledujeme. Neboli

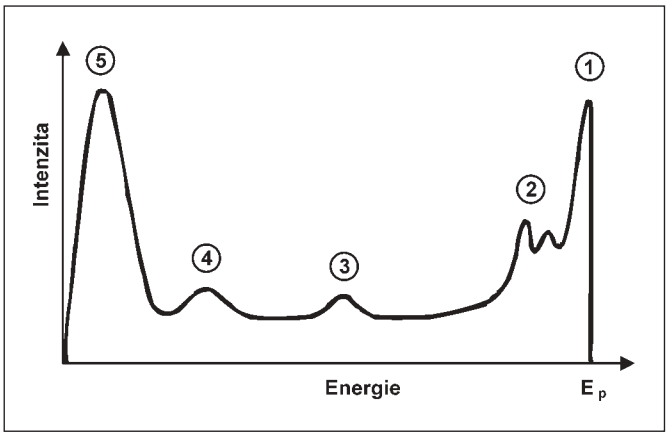
$$\eta = \eta\,(E_p, Z, \Omega). \qquad (1)$$

Označíme-li ve shodě s obr. 1 primární proud I_p a proud pružně, tj. elasticky odražených elektronů I_e, plyne z definice, že

$$\eta = I_e / I_p. \qquad (2)$$

Na *obr. 3* vidíme zidealizované kvalitativní energetické rozdělení sekundárních elektronů, na němž jsou patrné některé významné píky (viz poznámka pod čarou [1]), označené arabskými číslicemi v kroužku:

[1] Český překlad „vrchol“ anglického slova „peak“ se ve spektroskopii nevžil, a proto i v našem článku zůstaneme u počeštěného výrazu „pík“, ač jsme si vědomi, že některým čtenářům může připadat jazykově ohyzdný.



Obr. 3 Rozdělení sekundárních elektronů podle energie. Číslice příslušejí sekundárním elektronům následujícího původu: 1. elastický pík, 2. plasmonové ztráty, 3. ionizační ztráty, 4. Augerovy elektrony, 5. pravé sekundární elektrony

Číslice 1 označuje pík pružně odražených elektronů, tj. těch, jejichž energie zůstala rovna nebo téměř rovna primární energii E_p. Čili jsou to právě ty, které v EPES sledujeme.

Pod číslicí 2 se ukrývají ve skutečnosti malé píky elektronů, které vůči primární energii utrpěly malé ztráty řádově jednotek elektronvoltu (eV), tzv. plasmonové. Jsou to totiž elektrony, které ve vzorku vybudily kolektivní kmity valenčních, popřípadě vodivostních elektronů. Kvantum energie těchto kmitů se nazývá plasmon, podobně jako se kvantum energie mechanických kolektivních kmitů krystalické mřížky nazývá fonon.

Pík 3 přísluší jinému typu charakteristických ztrát energie, a sice ztrátám ionizačním. Tyto energetické ztráty utrpěly elektrony, které ionizovaly určitou vnitřní energetickou hladinu atomů vzorku. V závislosti na atomovém čísle a na hloubce hladiny, tj. typu elektronové slupky a podslupky, se velikosti vazebných energií u běžných prvků pohybují většinou v řádu stovek eV.

Pík 4 je pík tzv. Augerových elektronů, které dostaly název po svém objeviteli, francouzském fyzikovi Pierru Augerovi. Ten svůj objev učinil již roku 1925, avšak teprve od poslední čtvrtiny svého velmi dlouhého života, tj. od přelomu šedesátých a sedmdesátých let minulého století, se dočkal plného rozvoje po sobě pojmenované spektroskopie [2].

Mohutný široký pík 5, který se rozprostírá od nuly do asi 30 eV, je píkem tzv. pravých sekundárních elektronů. Jde o elektrony, které žádnou charakteristickou informaci nenesou a vznikly v různých, popřípadě i kaskádních procesech postupné disipace energie elektronů primárních.

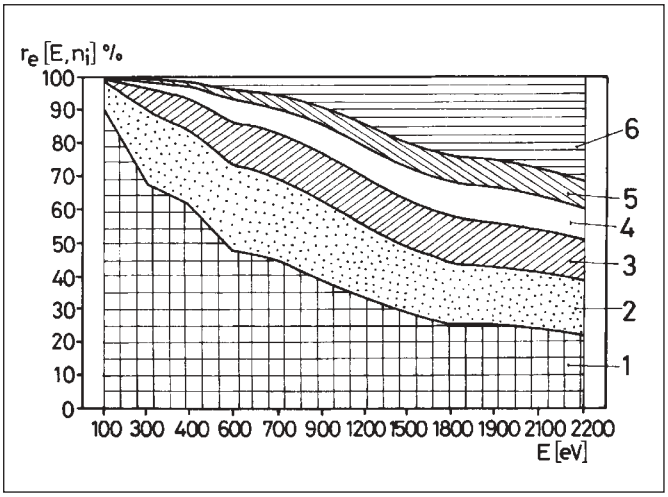
Pro lepší názornost jsou píky 2-4 oproti reálnému spektru kvantitativně značně, ba řádově zvýrazněny. Píky 1 a 5 ovšem zdůrazněny nejsou, nýbrž skutečně dominují celému energetickému spektru sekundárních elektronů, přičemž jejich relativní velikost silně závisí na primární energii.

Z toho vyplývá první vlastnost elastické spektroskopie – dostatečná citlivost ve třetím smyslu toho slova: Stačí používat nízké primární proudy a není třeba činit žádná zvláštní opatření ke zvýšení odstupu signálu od šumu například opakovaným načítáním a průměrováním spekter.

Z první zmíněné okolnosti vyplývá i další cenná vlastnost EPES – nedestruktivnost. Je totiž známo, že nejen dopad iontů o vyšší energii, kde je to vzhledem k jejich hmotnosti pochopitelné, ale i dopad pouhého elektronového svazku povrch vzorku modifikuje. Můžeme-li si tedy dovolit primární proud snížit, je to vzhledem k minimalizaci tohoto efektu vítané.

ID elastické spektroskopie je v principu malá i ve srovnání s ostatními elektronovými spektroskopiemi, uvážíme-li, že nositelé informace ji musí beze ztráty energie projít dvakrát – poprvé od povrchu do hloubky svého odrazu a podruhé od tohoto místa zpět k povrchu. ID je tedy zhruba poloviční oproti únikové hloubce pro elektrony o téže energii, zanedbáme-li ovšem geometrii experimentu a mechanismy elastického rozptylu v povrchových vrstvách. V těchto detailních záležitostech odkazujeme čtenáře na příslušnou originální literaturu, nejnověji např. [7].

Unikátní vlastností elastické spektroskopie v této souvislosti je ovšem možnost spojité volby ID. V jiných elektronově-spektroskopických metodách jsme nuceni si vybrat mezi několika konkrétními liniemi respektive přechody, spjatými s určitými pevnými energiemi elektronů, popřípadě v rozumné oblasti energií výběr nemáme vůbec a jsme odkázáni na jedinou. Touto energií, na níž podle křivky na obr. 2 závisí IMFP, je pak dána ID. Naproti tomu v elastické spektroskopii ji můžeme volit spojitě a libovolně prostým nastavením urychlujícího napětí primárních elektronů, čili E_p. Potřebujeme-li tedy pracovat s co nejmenší ID, volíme E_p v okolí minima závislosti IMFP na energii, kde je ID skutečně extrémně nízká. Naopak stojíme-li o informaci pocházející z vícera atomových vrstev, E_p příslušně zvýšíme. Relativní příspěvky jednotlivých atomárních vrstev k celkovému signálu EPES v závislosti na E_p výmluvně znázorňuje modelový *obr. 4*, převzatý z [8]. Vidíme, že pro nízké energie se signál vytváří téměř výhradně v první a druhé vrstvě atomů. Příspěvky dalších vrstev jsou zanedbatelné. Příspěvky šesté a dalších vrstev začínají hrát roli až při vysokých energiích.



Obr. 4 Relativní příspěvek r_e jednotlivých povrchových atomárních vrstev, označených pořadovými čísly, k celkovému počtu pružně odražených elektronů v závislosti na energii *E*. *6+* značí příspěvek šesté a všech dalších vrstev. Vypočteno metodou Monte-Carlo pro měď. Převzato z [8]

APLIKACE SPEKTROSKOPIE PRUŽNĚ ODRAŽENÝCH ELEKTRONŮ

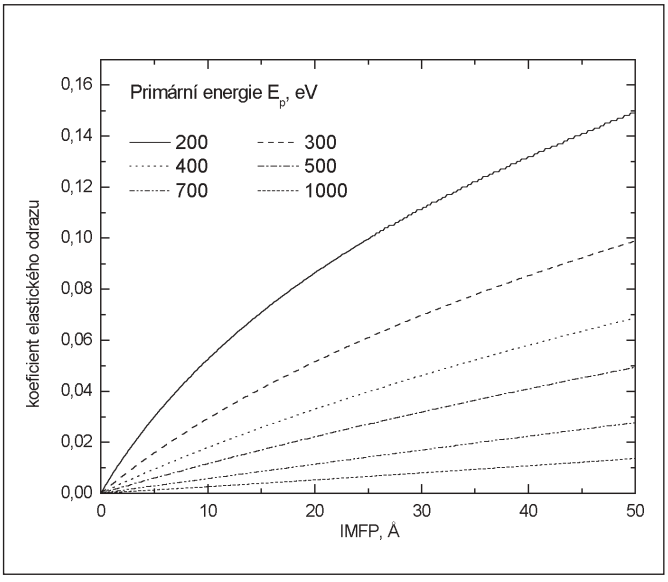
Aplikace EPES vyplývají jak z její jednoduchosti, tak z jejích speciálních vlastností. EPES samozřejmě principiálně není schopna samostatně identifikovat neznámý prvek. Naopak je velmi vhodná k monitorování růstu tenkých vrstev v případech, kdy substrát a deponovaná vrstva mají výrazný kontrast ve svých atomových číslech (viz vztah (1)). V tomto směru byla provedena již řada studií, jejichž slibnost příznačně závisela na kvalitě vakuových podmínek, jež měli autoři k dispozici. My jsme k nim přispěli např. prací [9], v níž se sledoval růst tenké vrstvy zlata na substrátu z hliníku, popřípadě z tzv. aluminy, což je určitá fáze kysličníku hlinitého.

Rovněž v řádkovacích elektronových mikroskopech (SEM) nalezla EPES své uplatnění. Kontrast obrázků ze SEM je větší více než o řád, použijí-li se k zobrazení elektrony odražené pružně, nikoli prostě zpětně rozptýlené.

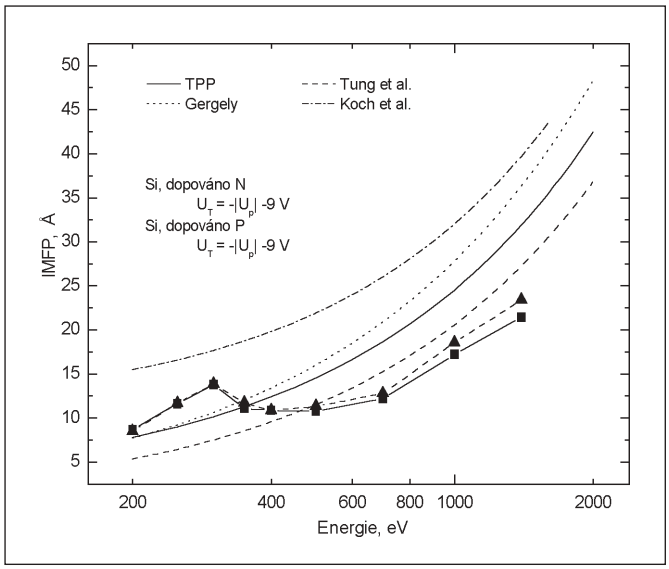
Ze snadné a spojité volby informační hloubky vyplynula další znamenitá aplikace EPES – nedestruktivní hloubkové profilování. Relativně běžné v analýze povrchů je totiž hloubkové profilování destruktivní – zkoumaný povrch se v průběhu měření podrobuje dopadu svazku vysokoenergetických iontů, kterým se postupně odprašuje. Tím se ovšem vzorek zničí, nemluvě o dalších nevýhodách, jakými jsou preferenční odprašování určitých složek, míchání jednotlivých vrstev, destrukce krystalické struktury ad. V EPES vzorek hloubkově profilujeme změnou E_p, aniž bychom ho významně poškozovali. Nicméně vzorek nesmí být zcela neznámý. O jeho kvalitativním profilu musíme mít jakousi představu předem, abychom porovnáním s modelovými výpočty a jejich fitováním pomocí parametrů, které hloubkové složení vzorku popisují, dospěli k údajům kvantitativním. V této souvislosti hovoříme již o zcela nejnovějším stavu vědy v dané oblasti.

Doménou EPES je však studium IMFP elektronů v povrchových oblastech pevných látek, kde je jedinou metodou, která se může obejít bez nezávislých kalibrací [10]. To je ovšem aplikace natolik vzrušující, že u jejího vysvětlení je třeba se pozastavit poněkud blíže:

Transport elektronů v pevné látce beze ztráty energie, tedy vlastně jejich pružný rozptyl, se popisuje buď analyticky, nebo modelováním metodou Monte Carlo. V prvním případě jde o řešení Boltzmannovy transportní rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami [11], ve druhém Monte Carlo simulace nakládají s elektronovými trajektoriemi jako s náhodnou cestou. Na základě modelového popisu transportu elektronů v pevné látce lze pak najít vztah mezi η a IMFP. Tento vztah je funkcí energie a je specifický pro danou geometrii experimentu a daný spektrometr, tj. daný analyzátor energií sekundárních elektronů, a říkáme mu kalibrační křivka. Kalibrační křivky pro spektrometr, který používáme v naší laboratoři a který je vybaven sférickým analyzátorem s brzdným polem (Retarding Field Analyser – RFA), znázorňuje příklad pro křemík, uvedený na *obr. 5*. Na *obr. 6* vidíme výsledek práce – IMFP v křemíku jako funkci energie. Obrázek porovnává takto, tj. experimentálně pomocí metody EPES, určenou IMFP s modelovými, vesměs hladkými křivkami vypočtenými několika autory. Tento dosud nepublikovaný příklad patří k nejnovějším výsledkům, získaným na poli EPES v naší laboratoři. Již dříve jsme se však v rámci široké mezinárodní spolupráce na projektu Copernicus IC15-CT96-0800 "Determination of standardized parameters describing the electron transport for quantitative surface analysis by electron spectroscopies", která probíhala v letech 1997-2000, podíleli na experimentálním určování IMFP metodou EPES v binárních slitinách zlata a mědi [12].

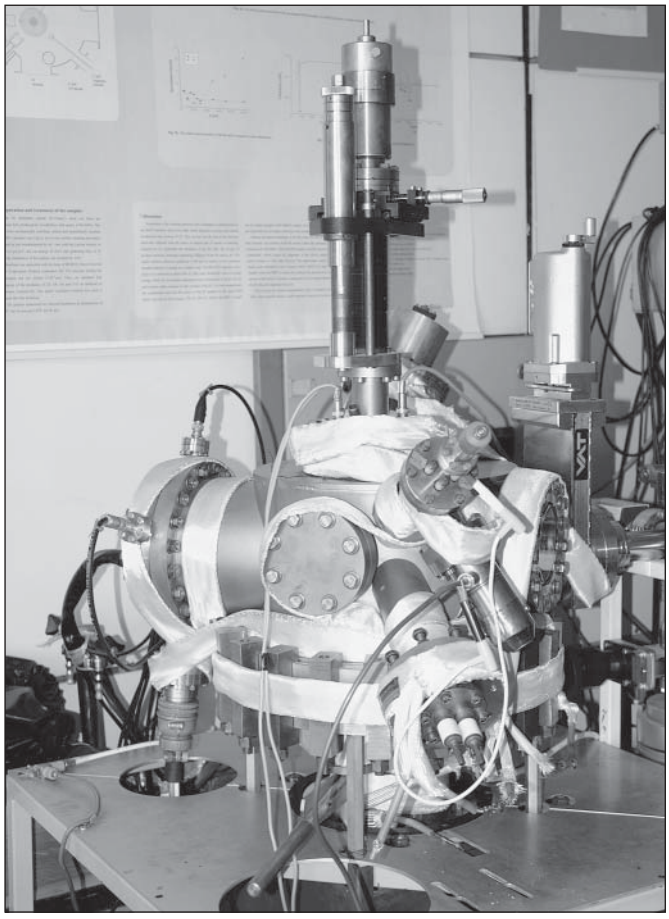


Obr. 5 Kalibrační křivky závislosti koeficientu η elastického odrazu a IMFP pro vybrané primární energie E_p v křemíku



Obr. 6 Porovnání teoreticky a experimentálně stanovené IMFP v křemíku

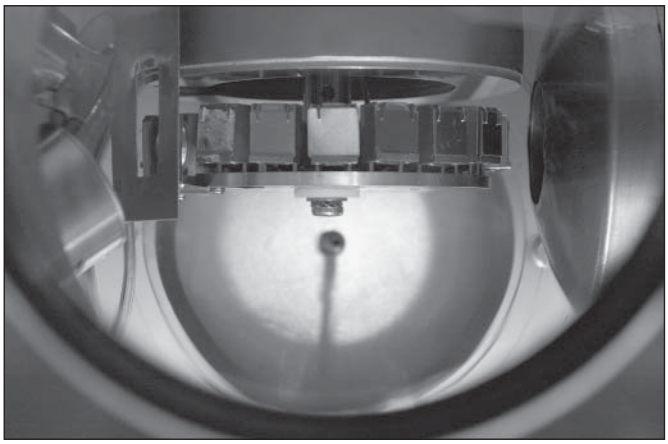
Čtenáři, kteří se dosud nesetkali s UHV aparaturou, natož s elektronovým spektrometrem, si hrubou představu o jeho vnějším vzhledu mohou učinit z fotografie, kterou reprodukujeme na *obr. 7*. Jde o spektrometr EPES, umístěný v laboratoři fyziky povrchů na katedře elektroniky a vakuové fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, která se nachází ve fakultní budově v Praze 8 – Tróji. Jádro aparatury, přesný energetický analyzátor RFA typu



Obr. 7 Fotografie spektrometru EPES, umístěného v laboratoři fyziky povrchů na KEVF MFF UK

„back-view“ o průměru 8“, je namontováno na největší přírubě v levé zadní části obrázku. Nahoře vidíme manipulátor vzorků karuselového typu, který umožňuje jejich rotaci kolem osy φ a lineární posuv ve třech kartézských osách *x, y, z*. Pojme až 18 vzorků, Faradayovu celu k měření profilů elektronových a iontových svazků a křemenný krystal k měření hmotnostní tloušťky vzorků připravovaných napařováním. Ve spodní části stojanu se nachází triodová iontově-sorpční titanová vývěva, která po odplynění vakuové komory spektrometru za zvýšené teploty v ní umožňuje dosáhnout tlaku zbytkových plynů 2×10^{-8} Pa.

Fotografie na *obr. 8* skrz vakuové okénko zachycuje vnitřek naší aparatury. Karusel se vzorky je zvednut v ose *z* tak, aby nezakrýval pohled na analyzátor se čtyřmi mřížkami a souosou elektronovou tryskou. V horní části snímku vidíme rezervoár válcového tvaru, plnitelný kapalným dusíkem. Jeho integrovanou součástí je keramická destička nesoucí pomocné katody na vysokém napětí, sloužící k ohřevu vzorků elektronovým bombardem. Uvedením držáků vzorků do kontaktu s rezervoárem a vhodným nastavením vysokého napětí lze plynule regulovat jejich teplotu v rozsahu zhruba (-200 - +700) °C. To má obrovský význam např. pro optimalizaci depozičních parametrů při přípravě vzorků *in-situ*, tj. přímo pod vakuem ve spektrometru.



Obr. 8 Pohled skrz vakuové okénko na ústřední část spektrometru – otočný karusel se vzorky, umístěný na *x, y, z,* φ manipulátoru. V horní části snímku vidíme rezervoár s kapalným dusíkem, v pozadí sférické mřížky RFA analyzátoru a souosou elektronovou trysku

SHRNUTÍ

V tomto krátkém referativním článku jsme se snažili výstižně charakterizovat jednu z nejnovějších elektronově-spektroskopických metod studia povrchů pevných látek. Osvětlili jsme její princip, nejdůležitější vlastnosti a výhody při její zdánlivé jednoduchosti. Pro čtenáře, jimž není tento obor blízký, jsme se tuto metodu pokoušeli zařadit do kontextu nejen ostatních, běžnějších metod, ale i fyziky povrchů jako takové.

Vhodnou volbou příkladů výsledků, získaných touto metodou, jsme poukázali na skutečnost, že i při mizivé tuzemské společenské prestiži badatelské práce a s ní souvisejícím jejím ekonomickým hodnocením se můžeme začlenit do široké mezinárodní spolupráce a dospíváme k poznatkům, které mohou obstát ve světové konkurenci.

Literatura

[1] K. Siegbahn, C. Nordling, A. Fahlman, R. Nordberg, K. Hamrin, J. Hedman, G. Johansson, T. Bergmark, S. E. Karlsson, I. Lindgren and B. Lindberg: ESCA-Atomic, Molecular and Solid State Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy. Almquist and Wicksell, Uppsala 1967.

[2] D. Briggs and M. P. Seah (eds.): Practical Surface Analysis by Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy. John Wiley, New York 1983.

[3] G. Ertl, J. Küppers: Low energy electrons and surface chemistry, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1985.

[4] L. Eckertová (ed.) a kol.: Metody analýzy povrchů I – Elektronová spektroskopie, Academia, Praha 1990.

[5] Standard Definitions of Terms Related to Surface Analysis, Surf. Interface Anal. **17** (1991), 951.

[6] G. Gergely, Surf. Interface Anal. 3 (1981), 201; Vacuum **33** (1983), 89; Scanning **8** (1986), 203.

[7] L. Zommer et al., bude publikováno.

[8] P. Bondot, A. Porte, B. Gruzza, L. Bideux, S. Mroz, Vacuum **45** (1994), 337.

[9] S. Zuber, V. Nehasil, J. Pavluch, C. Robert, B. Gruzza, V. Matolín, Appl. Surface Sci. **142** (1999), 465.

[10] A. Jablonski, Surf. Sci. **151** (1985), 166.

[11] I. S. Tilinin, W. S. M. Werner, Phys. Rev. **B 46** (1992), 13739.

[12] M. Krawzyk, L. Zommer, A. Jablonski, C. Robert, J. Pavluch, L. Bideux, B. Gruzza, Surf. Interface Anal. **31** (2001), 415.

doc. RNDr. Jiří Pavluch CSc., katedra elektroniky a vakuové fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy
V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail pavluch@mbox.troja.mff.cuni.cz

Technické pokyny pro autory

Příspěvky se přijímají i v elektronické formě. Nejvhodnější je dodat text ve formě souborů z běžných textových editorů, např.: Word for Windows. Sazba časopisu se provádí programem Adobe PageMaker 6.5.

Grafickou část příspěvku je také vhodné dodat v elektronické formě. Mohou to být soubory *.CDR verze 3 až 11, *.EPS, *.TIF *.JPG a jiné běžné formáty. Grafiku nevčleňovat do textu (např. ve Wordu), ale uložit ji na disketu jako samostatné grafické soubory. Bitmapové soubory pro černobílé kresby musí mít rozlišení alespoň 600 dpi, pro černobílé fotografie 200 dpi a pro barevné 300 dpi. Ke každému textu nebo grafice musí být přiložen kontrolní výtisk nebo fotografie. Soubory je možno dodat též na médiu ZIP 100 MB, CD nebo na e-mail: typoservis@iol.cz. Při nejasnostech technického charakteru kontaktujte tiskárnu na tel.: 573 398 746.

Je žádoucí, aby k článkům dodal autor i překlad résumé a název článku do anglického (českého - slovenského) jazyka.

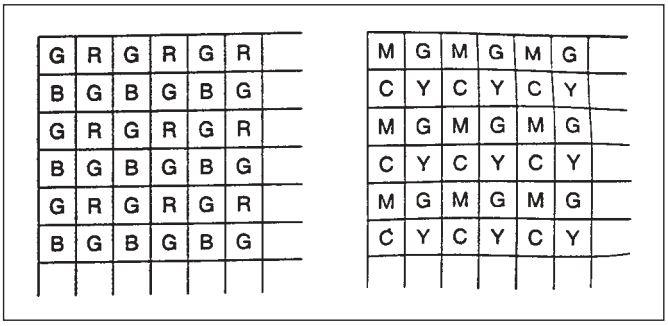
Milič JIRÁČEK, Praha

Rastrové optické soustavy

Optické soustavy, složené z mnoha obvykle stejných optických prvků malých rozměrů, pro které ruští autoři razili souhrnný termín „rastrová optika“, nacházely uplatnění již v minulosti. Byly mezi ně zahrnovány i soustavy větších rozměrů, pracující s dělením optických soustav na menší části (např. Fresnelovy čočky), nebo soustavy složené z menšího počtu stejných optických elementů (např. voštinové čočky expozimetrů). Jako první rastrové soustavy s elementy malých rozměrů, nerozlišitelných okem, se objevily složené filtry pro barevnou fotografii, později soustavy s válcovými čočkovými elementy pro polointegrální plastickou fotografii, čočkové rastry, využívané např. v rychlokinematografii. Další vývoj přináší některé nové aplikace, i když se mnohdy vrací k již zapomenutým starším, využívá se nových technologií a objevují se i nové principy aplikace, uspokojující dříve neexistující požadavky. Dnes se rastrových soustav využívá ve stále širším měřítku, aniž by se uváděly souborně jako součást optického oboru „rastrová optika“.

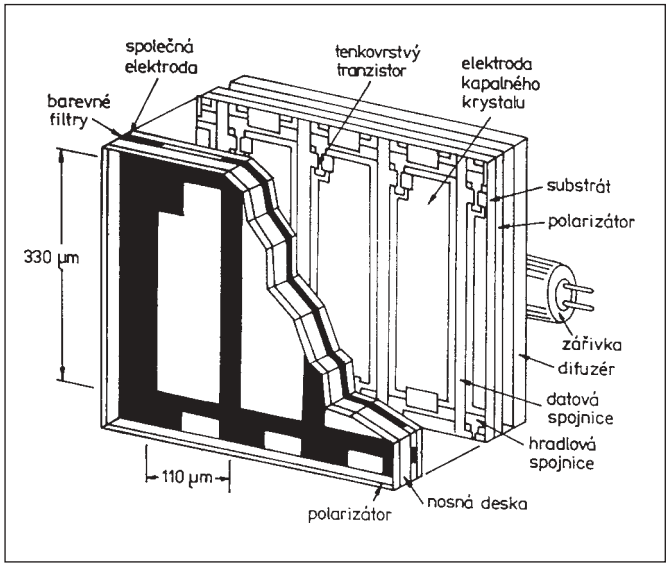
Rastrové filtrové soustavy, využívané v aditivní barevné fotografii před nástupem vícevrstvých subtraktivních barevných materiálů, nalezly svou renesanci ve filtrových soustavách, využívaných v digitální fotografii. Tak jako v aditivní fotografii, i zde je filtrovou soustavou dělen obraz na malé plošky v jednotlivých barvách RGB nebo CMY či jejich kombinací, každá ploška filtruje část obrazu pro jeden obrazový element (pixel). Aby se získala úplná barevná data pro každý obrazový element, interpolují se data z hodnot sousedních elementů s filtry odlišných barev a tak se vypočtou chybějící barevné složky. Postupy interpolace se vyvíjejí již několik set let, aplikace jejich složitějších postupů závisí na technických možnostech, tj. elektronické výbavě.

Nejužívanější je uspořádání filtrů v soustavě Bayerově, kdy se využívá bloků RGGB, zdvojení zelených filtrů respektuje vyšší citlivost oka v této oblasti (v černobílé fotografii se k tomu využívalo žlutozelených filtrů). Filtry RGB propouštějí jen třetinu viditelného spektra, takže na citlivý element dopadá přibližně jen jedna třetina dopadající světelné energie. Proto se objevují i soustavy, využívající filtrů soustavy CMY, z nichž každý propouští asi dvě třetiny dopadající světelné energie. Požadované hodnoty barev RGB pro každý obrazový bod lze získat přepočtem a interpolací. Příklady nejčastěji používaných uspořádání filtrů v digitálních přístrojích jsou na *obr. 1*. V soustavě RGGB obsahuje signál po interpolaci složky R+2G+B, v soustavě MGCY mají složky hodnoty 2R+3G+2B, je tedy i v něm zdůrazněn význam zelené barvy.



Obr. 1 Rozmístění barevných filtrů před citlivými ploškami snímacího obvodu v soustavě RGGB a CMYG

Rastrové filtrové plochy je nutno využívat i u těch typů obrazovek, které jsou založeny na intenzitní modulaci procházejícího světla. Typickým příkladem je obrazovka, s modulací světla kapalnými krystaly, jejíž jednotlivé svítící plošky se filtrují podle toho, kterým dílčím signálem R, G, nebo B jsou modulovány. Rozměry plošky musí být pod rozlišením zraku tj. musí být menší, než asi 0,15 mm při pozorování obrazu ze vzdálenosti 250 mm. Řez obrazovkou s modulací světla kapalnými krystaly je na *obr. 2*.

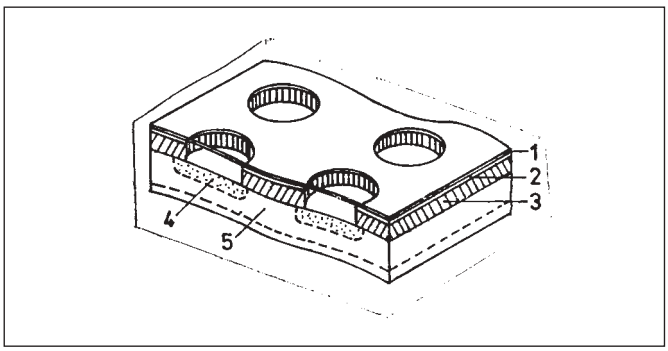


Obr. 2 Řez plochou obrazovkou s modulací světla kapalným krystalem, před jehož jednotlivými elementy je vložena mozaika barevných filtrů RGB

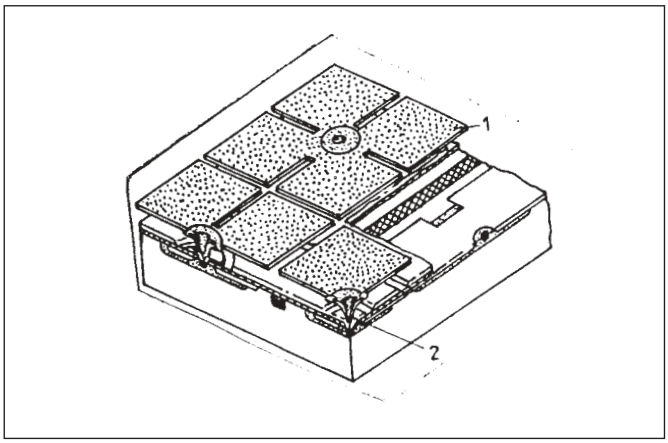
Všechny tyto filtry jsou pravidelně uspořádány, se stejně velkými ploškami. V digitální fotografii se využívá i filtru s náhodným rozložením elementů, kterým se má snížit střet struktur (aliasing) [1]. Jeho účelem je omezit přenos vyšších kmitočtů na snímací obvod, než je Nyquistův kmitočet soustavy obrazových elementů (je-li rozměr pixelu p, pak je Nyquistův kmitočet roven $1/2p$ [cy/mm]) aby nevznikaly rušivé struktury v oblasti vyšších obrazových kmitočtů. Funkce těchto filtrů je založena na interferenci vstupujícího svazku a odrážených složek tohoto svazku v tenké vrstvě. Struktura filtru je rozdělena do náhodně velkých a náhodně uspořádaných plošek tak, aby se nemohla stát zdrojem rušení.

Složitějším optickým elementem, než jsou plošky filtru, jsou zrcátka. V důsledku rozvoje polovodičových technologií se daří realizovat i dosti složité mikrosystémy. K jednomu takovému systému, který se podařilo zavést do výroby, patří matice sklopných mikrozrcátek o rozměru 16x16 µm na jednom čipu s počtem elementů 0,5 až 1,3 milionů [2]. Takové soustavy jsou vhodné pro prostorovou modulaci světla a tím i vytváření obrazů. Vývoj těchto zrcátek se odvíjel z jednoduchých soustav pro rastrovou modulaci optického signálu, založených na průhybu tenkých odrazných vrstev, ležících nad otvory (*obr. 3*). Průhyb zajišťovaly elektrostatické síly náboje tenké vrstvy vzhledem k podložce. Tak vznikala miniaturní dutá zrcátka, která rozptylovala odražené světlo a jevila se na odrazné ploše jako tmavší body. Hledání lépe ovladatelných elementů vedlo k vytvoření „čtyřlístkové“ struktury, jejíž odrazné plošky byly formovány jako čtyři samostatné elementy a vykláněly se jednotlivé lístky „čtyřlístku“ (*obr. 4*). Do výroby byla zavedena soustava dle *obr. 5*, ve které je pohyblivé zrcátko uchyceno na torzním závěsu a může se vlivem elektrostatických sil odklánět o +/- 10° k postranním opěrkám. Dopadající světlo se tedy odráží až v úhlu 40°. Do promí-

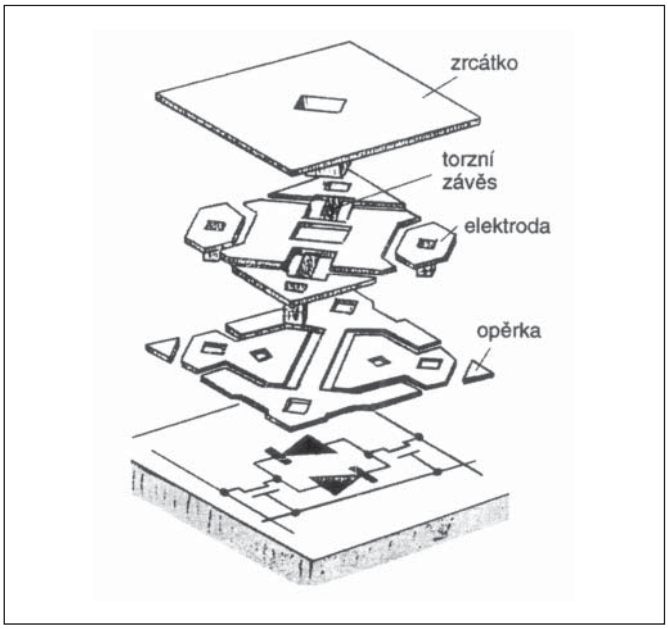
tací optické soustavy se světlo od zrcátek odráží, nebo ji při sklonu míjí. Modulace má tedy binární charakter a je-li třeba modulovat intenzitu odráženého světla v určitém rozsahu hodnot, využívá se časové modulace odklonu zrcátka.



Obr. 3 Prostorový modulátor (stránkovač), využívající průhybu membrány (1) nad elektrodou (2), oddělený izolací (3) od druhé elektrody (4), vše uloženo na podložce (5)

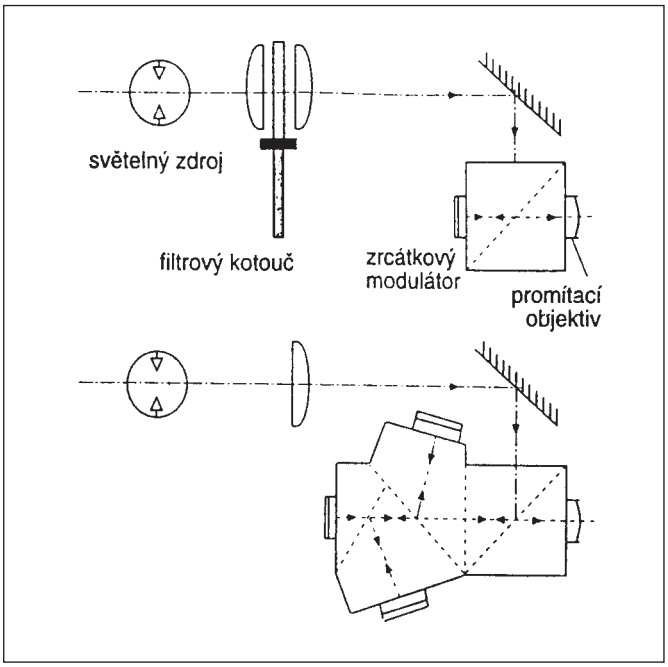


Obr. 4 „Čtyřlístkový“ prostorový modulátor s ohebnými elektrodami (1), uchycenými na společném držáku (2)



Obr. 5 Rozložený zrcátkový plošný modulátor: Zrcátko je uchyceno ve výkyvném držáku, zavěšeném na závěsech; do mezních poloh, omezených zarážkami, je přitahován elektrostatickými silami, jednou z elektrod jsou i zarážky; na podložce je i část zapojení

Tyto zrcátkové čipy byly vyvinuty pro využití jako modulátory světla v promítacích soustavách digitálního obrazu. Nabízejí se dva typy optických soustav. V první je osazen jen jeden zrcátkový čip a ten se postupně promítá ve třech základních barvách, do cesty optického signálu jsou vloženy filtry na otočném kruhu. Je tedy třeba čipy modulovat postupně obrazem v jednotlivých dílčích složkách synchronně s polohou filtru (*obr. 6*). Druhá soustava využívá tří samostatných čipů, každý zobrazuje s příslušným filtrem jen obraz jedné barvy. Toto obrazy se skládají a vytvářejí na promítací ploše barevný obraz. Zrcátkové modulátory našly uplatnění ve statických obrazových projektorech a v soustavách digitální kinematografie [3]. Zrcátkový modulátor s $1{,}3.10^6$ zrcátky (16x16 μm) byl použit v kopírovací soustavě minilabu Gretag, ve kterém se obrazová data promítají ve třech barvách postupně po řádcích na citlivou vrstvu fotografického papíru, a do světelného svazku se zařazují tři barevné filtry na rotujícím kotouči.

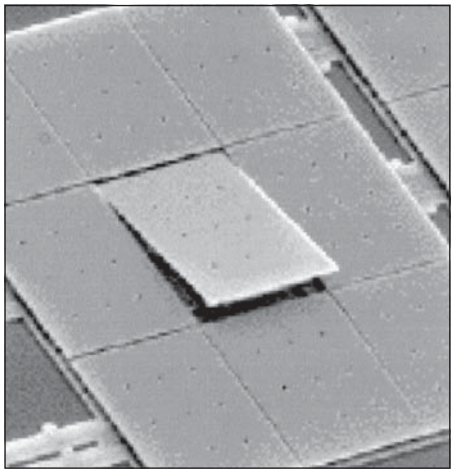


Obr. 6 Dvě promítací soustavy se zrcátkovým modulátorem: Nahoře – s jedním modulátorem a otočným filtrovým kotoučem a hranolem, přivádějícím světlo na zrcátka, promítaná objektivem; dole – s třemi zrcátkovými modulátory s dělicím hranolem, vedoucím světlo na zrcátka a od nich odražené k promítacímu objektivu

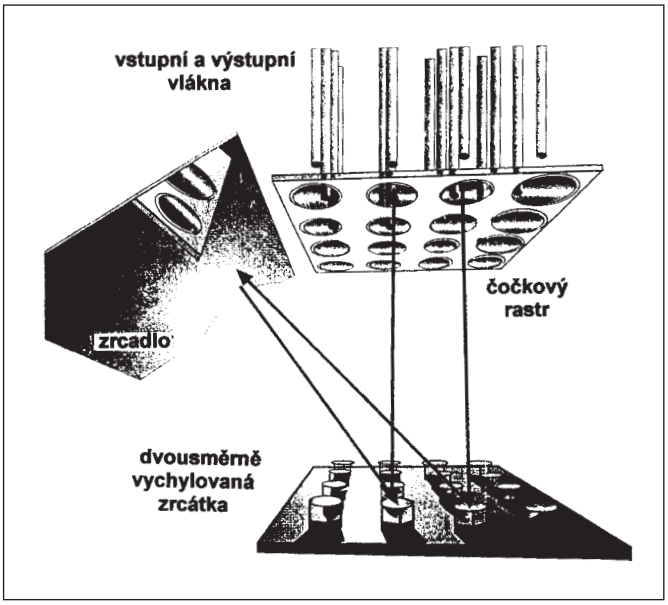
Jiná zrcátková soustava se vyvíjí pro astronomické účely. Soustava je složena ze 4.10^6 zrcátek o rozměrech 100x100 μm a tvoří v klidu rovinu odrazného zrcadla (*obr. 7*) [4]. Odklonem jednoho zrcátka se část obrazu, která na ně dopadá, odkloní ke spektrografu, takže je možné na obraze hvězdné oblohy vydělit jednotlivé zobrazené objekty pro spektrální rozbor. Odklon je stejný, jako u soustav mikrozrcátek, tj. 10°.

Dalším samostatným využitím sklápěných mikrozrcátek jsou soustavy pro přepínání optického signálu mezi optickými vlákny [5, 6, 7, 8]. Soustava se skládá ze vstupní části, ke které jsou přivedena optická vlákna (*obr. 8*) , mezi kterými se signál přepíná. Druhou částí je soustava odkláněcích zrcátek. Paprsek, odražený od nich, se přivádí pomocí zrcadla k jinému zrcátku, které ho vede k žádanému vláknu. I když byla pro tyto účely vyvinuta zrcátka s odklonem ve dvou osách (*obr. 9*), nemohlo by jedno zrcátko obsáhnut přenos od libovolného vlákna k jinému a proto je třeba volit dvoustupňový odklon. Odrazem od pomocného zrcadla se prodlužuje i dráha paprsku a tím i jeho vertikální posun v dané vzdálenosti. Jedna přepínací soustava obsahuje 256 zrcátek, každé

o průměru 0,5 mm, v odstupu 1 mm. Odklánějí vstupní svazky mezi 256 optickými vlákny. Výhoda této soustavy je v tom, že umožňuje přepínat optický signál přímo mezi optickými vlákny. Při použití elektronických přepinačů by bylo nutno konvertovat optický signál na elektrický a zpět. Takový proces je složitý, nelze vyloučit chyby při převodu dat i při přepínání, je až 100-krát náročnější na energii.



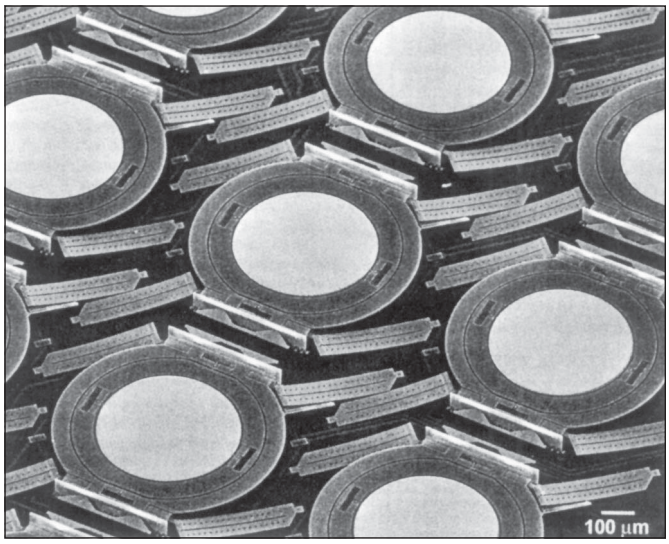
Obr. 7 Dílčí zrcátko ze zrcátkové soustavy pro astronomické účely



Obr. 8 Sestava přepínače vstupních a výstupních optických vláken pomocí sklopných zrcátek; pro větší variabilitu spojení se využívá odrazu od pomocného zrcadla, takže lze pro spojení využít sklonů dvou zrcátek

Na odlišném principu pracuje soustava přepínače se sklápěcími nebo otočnými zrcátky miniaturních rozměrů rozložených ve čtvercové matici. Taková zrcátka lze vyrábět mikromechnickými procesy, popsanými v [9]. Světlo výstupních optických vláken je kolimováno do úzkých svazků, odrazem od zařazeného zrcátka se odráží k výstupnímu vláknu, takže lze zařazováním zrcátek propojit každé vstupní vlákno s každým výstupním.

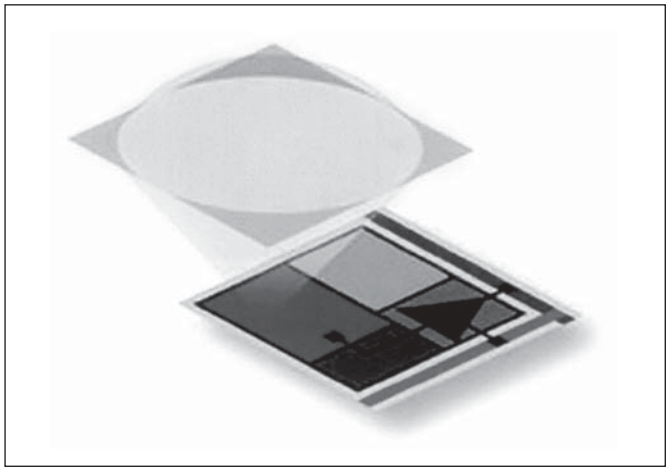
Další rastrové soustavy tvoří dioptrické elementy, především čočkové, jejichž rastrové uspořádání mělo v minulosti spíše okrajové využití. Funkce čočky rastru v soustavě, spolupracující s objektivem, je založena na zobrazení výstupní pupily objektivu ve zmenšeném měřítku, ve zmenšeném obrazu se nerozlišují jasové rozdíly a tak se



Obr. 9 Soustava zrcátek, vychylovatelných ve dvou směrech, určených pro spojovací soustavy optických vláken

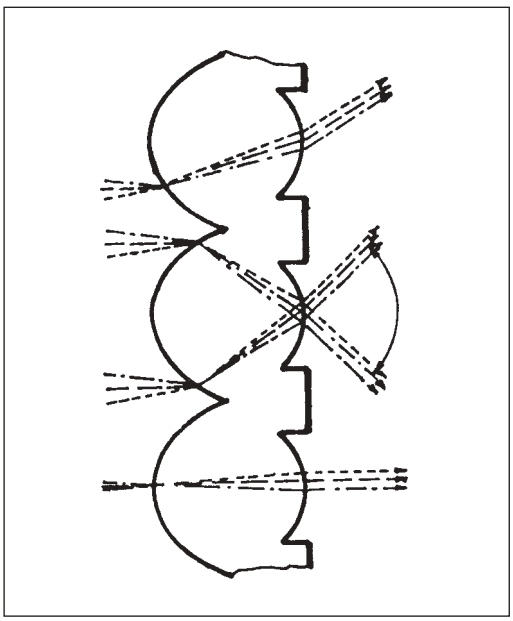
vlastně prostorově digitalizují obrazová data té části obrazu, která na mikročočku dopadá. Protože obraz pod čočkou rastrové soustavy zaujímá jen malou část plochy, na kterou se zobrazuje, je možno posuvem této plochy snímat plynule objekt, který je v čase proměnný. Této vlastnosti se využívalo např. v rychlokinematografii.

Jinou úlohou čočkových elementů rastru je koncentrovat světelnou energii na ně dopadající, na menší plochu. Této vlastnosti se využívá např. v digitální fotografii, neboť v některých soustavách (např. CMOS) je část plochy obrazového elementu pokryta některými prvky zapojení a zbývá tak méně místa na plochu fotocitlivého elementu (vyplnění – fill-in). Aby byla dopadající světelná energie lépe využita, vkládá se před obrazový element čočka (*obr. 10*), která přivádí světlo z větší části obrazové plochy na citlivou plošku, která by sama využila jen menší část dopadajícího světla. Čočka může omezovat zorný úhel, pod kterým přichází světelná energie ke snímacímu elementu, a tím omezovat clonové číslo otvoru objektivu. Na okraji obrazu může část energie dopadajícího světelného svazku dopadat i mimo fotocitlivou plochu. V této aplikaci však nemusí být obraz, formovamý mikročočkou, zaostřen na rovinu snímacího obvodu. V jednodušších případech lze čočkové rastry nahradit zkříženými válcovými rastrovými soustavami.



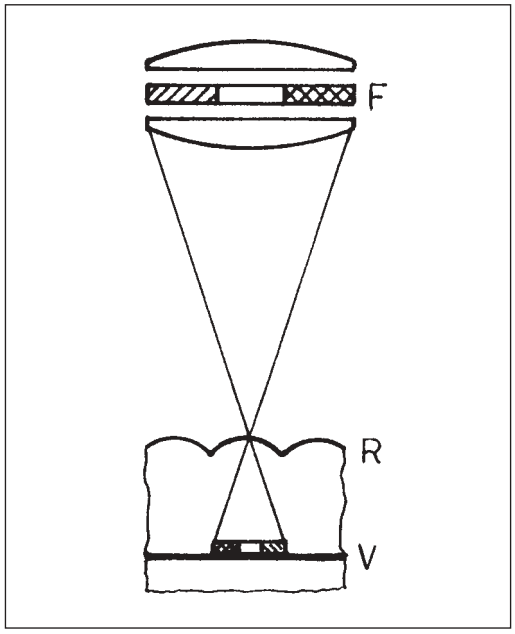
Obr. 10 Element čočkového rastru, umístěného před snímacím obvodem, který koncentruje světelnou energii obrazu na menší snímací plošku obrazového elementu, takže lze část plochy využít pro ovládací obvody

Čočkových elementů uspořádaných rastrově se využívá i u projekčních soustav televizního signálu, aby nedocházelo k rozptylu světelné energie do nežádoucích směrů [10]. Příklad tvaru takových čočkových elementů je na *obr. 11*.



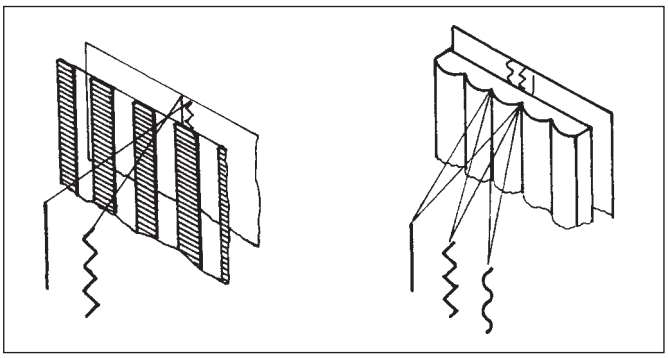
Obr. 11 Elementy rastrové čočkové plochy promítací obrazovky, rozšiřující úzké světelné svazky k očím diváků

Čočkových soustav, složených z válcových čoček, se využívalo v soustavách barevné fotografie. Byly nalisovány na citlivé vrstvě, před otvor objektivu se vložily tři proužkové filtry RGB, rovnoběžné s rastrovými elementy (*obr. 12*). Rastrové elementy promítnou výstupní pupilu do tří proužků pod filtry, každý zobrazuje objekt v jedné dílčí barvě a tak se zaznamená na citlivou vrstvu. Malé rozměry válcových čoček oko nerozliší a tři barevné pruhy vnímá jako jediný – barevný.



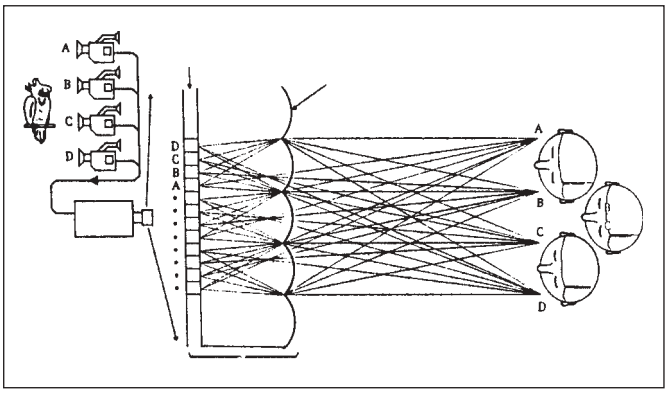
Obr. 12 Snímání barevného obrazu na černobílou citlivou vrstvu (V) pod rastrem (R), jednotlivé barvy se filtrují filtrem (F), vloženým do objektivu

Stejný princip zobrazení dílčích obrazů do jednotlivých proužků či do pruhu, snímaného při pohybu objektivu kolem snímaného objektu se využívá v soustavách stereoskopické nebo tzv. polointegrální plastické fotografie [11, 12, 13, 14, 15]. V tomto případě se snímá přes čarový nebo čočkový rastr před citlivou vrstvou objekt plynule z obloukové dráhy kamery (*obr. 13*). Čočková soustava dovoluje pozorovat takový obraz z pozorovacích pásem, do kterých se vejdou obě oči a při jejich horizontálním posuvu se mění plynule prostorovost obrazu. Použije-li se ke snímání soustavy, složené z několika objektivů, mění se obraz při pozorování méně pozorovatelně a vzniká i lepší prostorový vjem. Lze snímat i tak, že se kamera při snímání pohybuje kolem snímaného objektu a zároveň se posouvá i čočkový rastr před citlivou vrstvou. Tato technika se využívala k výrobě plastických pohlednic.



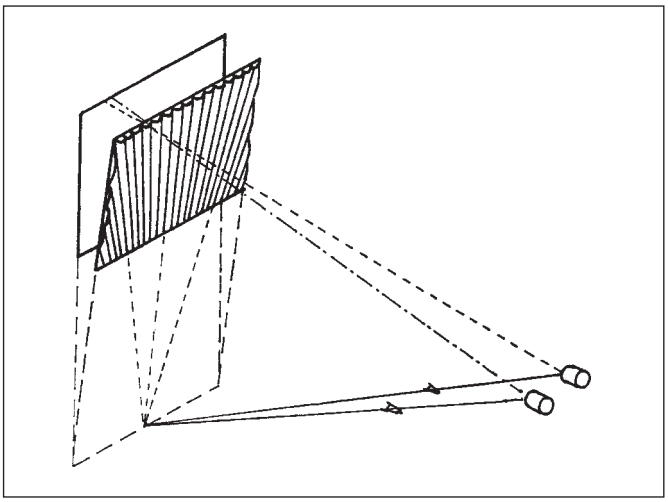
Obr. 13 Promítání prostorově oddělených dílčích stereoskopických obrazů pomocí čarového a čočkového rastru; u něj lze využít i projekce několika dílčích obrazů

Objevují se pokusy o znovuzavedení stereoskopického zobrazení pomocí rastrových ploch pro účely stereoskopické televize (*obr. 14*). Zvláště digitální snímání a digitální projekce obrazu je takovému postupu příznivá, neboť polohy jednotlivých proužků, ze kterých se skládají dílčí obrazy, jsou v obrazové rovině přesně definovatelné a mohou se dobře přizpůsobit válcovému čočkovému rastru. Problém stereoskopického zobrazení v televizi leží mimo techniku pozorování. Při stereoskopickém vnímání vnímá pozorovatel objekt v určité vzdálenosti, takže i jeho vnímaná velikost je na této vzdálenosti závislá. Proto lidé, zobrazení stereoskopicky na obrazovce, se jeví v dané pozorovací vzdálenosti jako trpaslíci.



Obr. 14 Televizní snímání pomocí čtyř kamer (A-D) a zobrazení čtyř dílčích obrazů proloženými proužky (A-D), ty pozorují diváci pomocí čočkového rastru před obrazovkou

Tomu lze předejít jen projekcí stereoskopického obrazu na větší promítací plochu, ovšem pro správnou reprodukci prostorových dimensí je nutné, aby byla snímací a zobrazovací soustava ve vzá-



Obr. 15 Formování pozorovacích pásem perspektivním optickým rastrem v rovině hlediště, což umožní pozorovat stereoskopický obraz většímu počtu diváků

jemném vztahu. Aby nebyl divák vázán na pevnou polohu, lze použít systém sledování polohy jeho oka a podle to posouvat obraz vzhledem k rastru, takže pozorovací pásmo sleduje polohu oka.

Pro pozorování obrazu omezeným počtem diváků je možno využít rastru s válcovými čočkami, diváci pak mohou pozorovat obraz z určité plochy hlediště (*obr. 15*). Pro větší sály je vhodná soustava, která byla využita v SSSR v padesátých letech s vějířovitě uspořádanými čočkovými elementy rastru, skloněného k rovině promítací plochy tak, že vzniká oblast pozorovacích pásem, rozložených v rovině očí diváků , kteří si musejí najít správnou polohu, aby každé oko leželo v jemu příslušném pásmu. Rozsah hlediště je vymezen touto možností. Navrhovatelé soustav bezbrýlového pozorování televizního obrazu počítají zatím spíše s menším počtem diváků a tím i menšími nároky na rastrovou soustavu.

Rastrové optické soustavy nacházejí v mnoha praktických aplikacích významné uplatnění a jistě by k jejich využití přispělo i hlubší propracování popisu jejich funkce a společných vlastností. To nabývá na významu s poklesem rozměrů těchto elementů, kdy se mohou uplatňovat jevy, nepozorovatelné na soustavách s většími elementy. Rozvoj mikromechaniky k takovým soustavám směřuje.

Literatura

[1] Jiráček, M.: Aliasing jako střet rastrových struktur, ST č. 8, 2002, str. 8-10, XI
[2] Jiráček, M.: Zrcátkový projektor, ST č. 4, 1997, str. 8;
[3] Jiráček, M.: Digitální kinematografie. ST č. 3, 2001, str. 3-5
[4] Micromirrors, considered for space, Phot. Sp, Jan. 2000
[5] Bishop, D. - Giles, R. - Roxlo, Ch.: Micromirrors, Phot. Sp., March 2000, str. 167-169
[6] McCarty, D.: Photonic switches: fast but functional? Phot. Sp., March 2001, str. 140-150
[7] Hecht, J.: All-optical networks need optical switches, LFW, May 2000, str. 189-196
[8] Jones-Bey, H.: The big world of little MEMS, LFW, Jan. 2001, str. 122 – 130
[9] Jiráček, M.: Mikromechanická optika, ST č.12, 1998, str. 17-19
[10] Ikeushi, Y.: Unique aspect ratio adds impact to Pioneer's widescreen TVs, JEI, Dec. 1993, str. 26-33
[11] Börner, R.: Autostereoskopische Rückprojektions- und Flachbildschirme, FKT, č. 11, 1994, str. 594-600
[12] Börner, R.: Neue autostereoskopische Bildschirme, FKT, č. 7, 2000, str. 440-444
[13] Börner, R.: Vier autostereoskopische Einpersonen-Monitore mit Trackingsystemen, FKT, č. 12, 1998, str. 747-751
[14] Travis A.R.L.: The display of three-dimensional video images, Proc. IEEE, sv. 85, č. 11, Nov. 1997, str. 1817-1831

Ing. Milič Jiráček CSc., Tychonova 5, 160 00 Praha 6, tel.: 233 340 671, e-mail: milic@jiracek.cz

Přírůstky knihovny SPIE/CS

1004 Diffractive/Holographic Technologies and Spatial Light Modulators VII
(24-25 January 2000, San Jose, California)
Vol. 3951

1005 Practical Holography XIV and Holographic Materials VI
(24-25 January 2000, San Jose, California)
Vol. 3956

1006 Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Photography
Applications
(24-26 January 2000, San Jose, USA)
Vol. 3965

1007 Nondestructive Evaluation of Aging Materials and Composites IV
(8-9 March 2000, Newport Beach, USA)
Vol. 3993

1008 Saratov Fall Meeting '99 Optical Technologies in Biophysics and
Medicine
(5-8 October 1999, Saratov, Russia)
Vol. 4001

1009 Optical Pattern Recognition XI
(26-27 April 2000, Orlando, Florida)
Vol. 4043

1010 Fourth Internatinal Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques:
Advances and Applications
(21-23 June 2000, Ancona , Italy)
Vol. 4072

1011 Novel Optical Systems Design and Optimization III
(31 July- 1 August 2000, San Diego, USA)
Vol. 4092

1012 Laser Interferometry X: Techniques and Analysis
(31 July - 1 August 2000, San Diego, USA)
Vol. 4101

1013 Holography 2000
(10-14 July 2000, St. Pölten, Austria)
Vol. 4149

1014 Optical Measurement and Nondestructive Testing: Techniques and Applications
(8-10 November 2000, Beijing, China)
Vol. 4221

Jiří GALLO, Department of Orthopaedics, Palacký University and Faculty Hospital, Olomouc, Czech Republic
Vítězslav HAVRÁNEK, Joint Laboratory of Optics Palacký University and Academy of Sciences of Czech Republic, Olomouc, Czech Republic
Anthony V. FLORSCHUTZ, Palacký University, Olomouc, Czech Republic

A comparison of linear polyethylene wear measured by optical and radiologic methods in 88 retrieved ABG 1 cups

The aim of this study was to compare the accuracy of three manually performed in vivo x-ray linear polyethylene wear measurement techniques (Livermore, Charnley, and Dorr methods) with our original in vitro microscopic procedure. Statistical analysis confirmed that the Livermore method was most accurate, followed by the Charnley and Dorr techniques.

Keywords: total hip arthroplasty, polyethylene wear, optical measurement, x-ray measurement, ABG 1

1. INTRODUCTION

Polyethylene (PE) wear of artificial joint surfaces limits the longevity of total hip and knee arthroplasties [1, 2]. Hip implants with wear rates up to 0.05 mm per year usually have very low incidences of periprosthetic osteolysis and loosening [3]. Conversely, implants with wear rates of more than 0.2 mm per year pose a significantly higher risk of osteolysis and prosthetic failure [4]. These facts have encouraged the development and improvement of non-radiologic (*in vitro*) and radiologic (*in vivo*) methods for PE wear quantification [5]. *In vitro* methods rely on intact prosthetic device retrieval for evaluation, while *in vivo* methods typically require at least one radiograph of an implanted (*in situ*) prosthetic device.

In general, PE wear is considered to be an identifiable material defect regardless of plastic deformation [6]. In practice, linear wear measurements correspond to the largest distance between the originally manufactured femoral head position and its resulting position at implant retrieval (*Fig. 1*). The linear wear value can then be utilized to determine the volumetric wear [7]. At the Palacký University and Academy of Sciences Joint Laboratory of Optics (Olomouc, Czech Republic), a new method has recently been developed to measure PE wear rates *in vitro* using Universal-type measuring microscope (VEB Carl Zeiss Jena, Germany) [8].

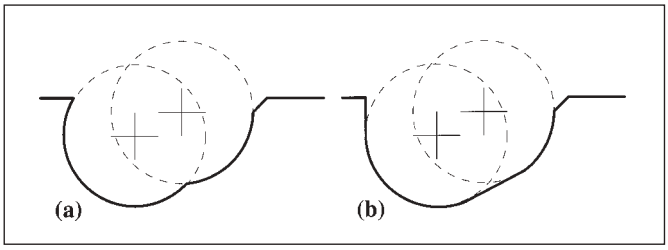


Fig. 1 Shift of the prosthetic ball from the manufactured position to the prerevision maximal wear position

In our previous study, the inner accuracy of optical method was assessed in a set of 30 retrieved acetabular cups, ranging between ±1 to 4 μm and ±1 to 9 mm^3 for linear and volumetric wear, respectively [7]. Based on these results, data from optical method can be used as a reference standard for other PE wear measurements and we assume that its level of accuracy is approximately two orders higher than manually performed radiologic techniques. Using different radiologic methods, wear measurements of a single PE liner significantly differ, and therefore, it seems necessary to determine which of them best characterizes the true linear wear and/or has the highest systematic error.

2. SET OF RETRIEVED POLYETHYLENE (PE) LINERS AND DESIGN OF THE STUDY

Between the years 2002 and 2004, linear wear was measured in more than 100 retrieved ABG I PE liners (Howmedica, Staines, U.K.) by above mentioned optical method [8]. Parallel radiologic measurements were performed according to their original descriptions [9, 10, 11] as part of a double blinded *in vivo* study. Excessively damaged PE liners were excluded since precise optical measurements were not possible under such circumstances. Cases with incomplete x-ray documentation were also excluded. In total, 88 PE liners were included in the study. The outer cup diameters ranged from 46 to 60 mm with 2 mm increments between sizes, and the original PE liner thickness varied from 4.9 to 11.9 mm.

3. POLYETHYLENE LINER MEASUREMENT

Wear-related displacement of the prosthetic femoral head in the PE liner was measured by four methods (*Tab. 1*), including our optical technique (*M*) and three radiologic methods originally described by Livermore et al (*L*) [9], Charnley and Halley (*C*) [10], and Dorr and Wan (*D*) [11]. Using the optical method, maximum linear wear was estimated by manually measuring nine space coordinates located on the prosthetic head surfaces using the Universal-type measuring microscope equipped with a touch stylus. Both the manufactured and final post-wear retrieved positions were used to calculate the prosthetic head shift [7, 8].

Since the date of the last x-ray image was not necessarily the same as cup retrieval, absolute radiologically measured wear differed from the optical one. To overcome this discrepancy, we compared data using linear wear rates (i.e. mm per year) in place of absolute values.

Tab. 1 Statistical description of the four wear measurement sets (minimum, Q_I, median, Q_{III}, maximum)

	L [mm/r]	*C* [mm/r]	*D* [mm/r]	M [mm/r]
Minimum	0,018	0,034	0,074	0,026
Q I	0,172	0,179	0,188	0,180
Medián	0,279	0,296	0,313	0,344
Q III	0,518	0,574	0,594	0,568
Maximum	2,116	2,193	2,343	2,522

4. SYSTEMATIC ERROR

4.1. Optical vs. radiologic methods

The first step of our analysis was to determine the relationship between radiologic and optical methods with respect to systematic error. We used a difference *A* (1) and a quotient *B* (2) approach:

$$A = \frac{1}{N}\sum_{N}(P_n - M_n) = 0,021 \text{ mm / year}, \quad (1)$$

$$B = \frac{1}{N}\sum_{N}\frac{P_n}{M_n} = 1,216, \quad (2)$$

where *N* is the total number of PE liners (88 in our study), P_n is the arithmetic average of radiologic measurements for cup *n*, and *M* is the value of optical measurement for cup *n*.

A difference of 0.021 mm per year is negligible in comparison to the predicted uncertainty for each of the methods used, but a quotient of 1.216 is significant.

To determine the differences and quotients for each radiologic method separately, P_n in formulas (1) and (2) was substituted with *L*, *C*, or *D*, representing measurements made by Livermore, Charnley, or Dorr methods, respectively (*Tab. 2*).

Tab. 2 Differences and quotients for each of the radiologic method

Method	Difference (mm/yr)	Quotient
Livermore	-0.006	1.115
Charnley	0.025	1.216
Dorr	0.045	1.316

The smallest average difference and quotient were found for the Livermore method as compared to *M*. In contrast, the Dorr method was characterized to have the largest average difference (0.045 mm per year) and quotient (1.316).

5. CHANCE ERROR

5.1. Maximum error frequency

The chance error was determined for each cup measurement as a maximal deviation of a radiologic value from *M* followed by their summation (*Fig. 2*). There were maximum errors in 29, 20.5, and 38.5 cup measurements for *L*, *C*, and *D*, respectively. The tenth fraction appeared in the calculations because of the identical values in some cup measurements.

According to this analysis, the Charnley technique is the most reliable, while the Dorr method shows the highest frequency of maximum errors. However, the differences were not significant.

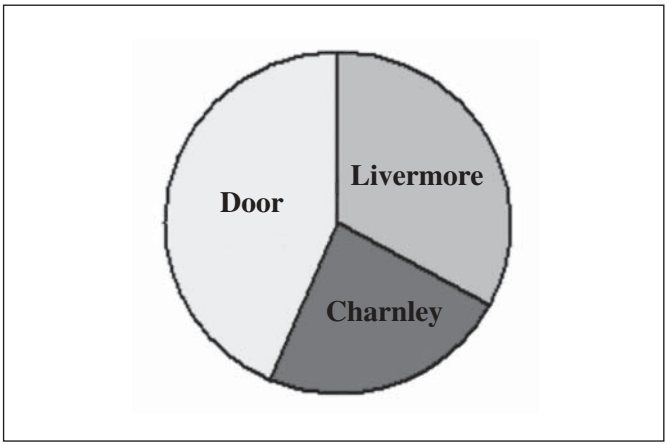


Fig. 2 Maximum error distribution for each radiologic technique

5.2. Reduced quotients of radiologic methods

Each maximal deviation from *M* for cup *n* (5.1.) using a given radiologic method was excluded to obtain a survey of chance error. The average quotients were then calculated from this reduced set of radiologic PE cup measurements (*Tab. 3*).

Tab. 3 Average quotients for whole and reduced set of polyethylene wear measurements

Method	Whole Average	Reduced Average
Livermore	1.115	1.127
Charnley	1.216	1.203
Dorr	1.316	1.153
Average X-ray	1.216	1.163

Data in table 3 shows that the quotients for the Livermore and Charnley methods were similar, and thus their chance error was distributed symmetrically around the optical reference values (*M*). Using the reduced group, the Dorr method and the average radiologic values were remarkably closer to 1.0, implicating chance error as the cause of measurement overestimation.

6. CORRELATION BETWEEN RADIOLOGIC AND OPTICAL METHODS

The correlation coefficients for each radiologic method were calculated against the optical standard (*Tab. 4*). The reduced data sets were obtained as previously described in section 5.2.

Tab. 4 Correlation coefficients for each radiologic method under investigation

Method	Complete Data	Reduced Data
Livermore	0.861	0.789
Charnley	0.874	0.903
Dorr	0.872	0.952

A strong correlation was found for the complete data set of each radiologic method. However, when using the reduced data set, the Charnley and Dorr methods exhibited the best correlations (*Fig. 3, 4*). Surprisingly, there was a decrease in correlation using the Livermore method (0.789).

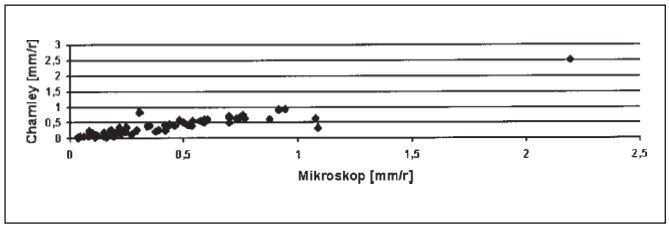


Fig. 3 Correlation between the Charnley method and the microscopic standard

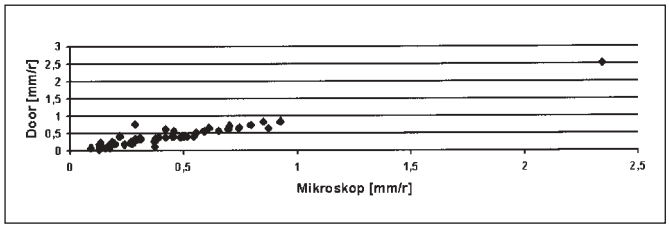


Fig. 4 Correlation between the Dorr method and the microscopic standard

Both the figures clearly show that the regression line intersects approximately at the origin of the coordinate axis and its slope corresponds to the data in table 3.

7. CONCLUSIONS

This study confirms that the manually performed Livermore method is the most reliable technique for PE liner wear measurements followed by the Charnley method, whose results are improved after dividing by 1.2 *(Tab. 3)*. The Dorr method seems to be the least reliable according to difference and quotient analysis, and has the highest frequency of maximal errors. Paradoxically, when a reduced data set is used, the Dorr method correlates the best to the optical standard, producing even better results after dividing by 1.15 (Tab. 3).

8. DISCUSSION

Charnley et al. were the first to study and report on radiologic PE wear measurements and they estimated the accuracy of their technique to be within 0.5 mm of the true wear value [10]. Conversely, Clarke et al. doubted the entire concept of radiologic PE wear measurements and pointed out the possible errors of these methods [12]. Since then, PE wear measurement research has moved towards digital imaging and computer-assisted analysis [13]. Unfortunately, in everyday clinical practice these instruments are not widely available.

The results of our study confirm that the accuracy level of the Livermore technique closely approaches our optical standard. Similar findings have been reported in the literature [14, 15]. For example, Ebramzadeh et al. investigated the Livermore method under laboratory conditions and calculated that the median error of measurement was 0.1 mm [15]. Under the same conditions, they also tested the Charnley and Dorr methods, finding median errors of 0.23 and above 1.7 mm, respectively ($p < 0.001$). In the clinical part of their study, they revealed only slight differences between the median errors of the Livermore and Dorr methods (0.4 mm versus 0.6 mm) after an average 126-month follow-up of 14 retrieved PE cups. They concluded that *in vitro* tested radiologic methods had a tendency to underestimate the true extent of wear. On the contrary, *in vivo* measurements using the Livermore method overestimated the extent of wear by 0.25 mm on average, and the Dorr method underestimated it by about 0.32 mm.

Pollock et al. manually performed measurements of PE liner thickness using the Dorr and Livermore methods and found average errors of 1.54 ± 1.21 mm and 0.07 ± 0.62 mm, respectively ($p < 0.01$) [16]. They investigated 17 retrieved PE cups after a mean of 12.0 years *in situ* (range from 5.9 to 14.9). After transformation of their measured values into a linear wear rate form, the resulting rank of radiologic method accuracy is similar as in our study.

In this context, the results of Martell et al. [13], who used computer-assisted techniques, seem to be much more exact. Their average error for phantom linear wear measurements was between 0.011 mm (for two-dimensional analysis) and 0.005 mm (for three-dimensional analysis), with standard deviations of 0.149 mm and 0.125 mm, respectively.

All PE wear measurement methods depend on a certain degree of mathematical support in at least a single calculation. It was our ambition to perform a deeper statistical processing of our 88 PE wear measurements. We attempted to decrease the impact of chance error on accuracy by excluding the radiologic measurements that excessively deviated from the optical standard set for each cup. This led to stronger correlations for the Charnley and Dorr methods, demonstrating the normal distribution of errors in these methods and illustrating the influence of chance error. At the same time, it strongly focuses our attention on precise measurement techniques.

ACKNOWLEDGEMENTS

We wish to thank Mrs. Jarmila Potomková and Miss Barbora Ludíková for their help in preparing this manuscript.

References

[1] Harris WH 2001 Wear and periprosthetic osteolysis: the problem. Clin Orthop **393**:66-70.

[2] Berry DJ 2004 Recognizing and identifying osteolysis around total knee arthroplasty. Instr Course Lect **53**:261-4.

[3] Dumbleton JH, Manley MT, Edidin AA 2002 A literature review of the association between wear rate and osteolysis in total hip arthroplasty. J Arthroplasty **17**(5):649-61.

[4] Orishimo KF, Claus AM, Sychterz CJ, Engh CA 2003 Relationship between polyethylene wear and osteolysis in hips with a second-generation porous-coated cementless cup after seven years of follow-up. J Bone Joint Surg Am **85-A**(6):1095-9.

[5] Oparaugo PC, Clarke IC, Malchau H, Herberts P 2001 Correlation of wear debris-induced osteolysis and revision with volumetric wear-rates of polyethylene: a survey of 8 reports in the literature. Acta Orthop Scand **72**(1):22-8.

[6] Yamaguchi M, Bauer TW, Hashimoto Y 1999 Deformation of the acetabular polyethylene liner and the backside gap. J Arthroplasty **14**(4):464-69.

[7] Gallo J, Havránek V, Hrabovský, M 2003 Measurement of retrieved polyethylene cup by universal microscope. Fine Mechanics and Optics **48**(11-12):333-338.

[8] Havránek V 2002 Measurement by universal microscope. Fine Mechanics and Optics **47**(1):20-22.

[9] Livermore J, Ilstrup D, Morrey B 1990 Effect of femoral head size on wear of the polyethylene acetabular component. J Bone Joint Surg Am **72**(4):518-28.

[10] Charnley J, Halley DK 1975 Rate of wear in total hip replacement. Clin Orthop **112**:170-9.

[11] Dorr LD, Wan Z 1995 Ten years of experience with porous acetabular components for revision surgery. Clin Orthop **319**:191-200.

[12] Clarke JC, Black K, Rennie C, Amstutz HC 1976 Can wear in total hip arthroplasties be assessed from radiographs? Clin Orthop **121**:126-42.

[13] Martell JM, Berkson E, Berger R, Jacobs J 2003 Comparison of two and three-dimensional computerized polyethylene wear analysis after total hip arthroplasty. J Bone Joint Surg Am **85-A**(6):1111-7.

[14] Kang JS, Park SR, Ebramzadeh E, Dorr LD 2003 Measurement of polyethylene wear in total hip arthroplasty-accuracy versus ease of use. Yonsei Med J **44**(3):473-8.

[15] Ebramzadeh E, Sangiorgio SN, Lattuada F, Kang JS, Chiesa R, McKellop HA, Dorr LD 2003 Accuracy of measurement of polyethylene wear with use of radiographs of total hip replacements. J Bone Joint Surg Am **85-A**(12):2378-84.

[16] Pollock D, Sychterz CJ, Engh CA 2001 A clinically practical method of manually assessing polyethylene liner thickness. J Bone Joint Surg Am **83-A**(12):1803-9.

Jiří Gallo, M.D., Ph.D., Department of Orthopaedics, Palacký University and Faculty Hospital Olomouc, I. P. Pavlova 6, 775 20 Olomouc; Czech Republic. Tel.: +420 588 442 507, e-mail: jiri.gallo@volny.cz

Vítězslav Havránek, Ing., RNDr., Joint Laboratory of Optics Palacký University and Academy of Sciences of Czech Republic, Tř. 17. listopadu 50a, 772 02 Olomouc; Czech Republic. Tel.: +420 585 631 520, e-mail: havranek@optnw.upol.cz

Anthony V. Florschutz, M.D., Palacký University, Faculty of Medicine, Hněvotínská 3, 775 03 Olomouc, Czech Republic

Miloslav KŘÍŽEK, Praha

Ohlédnutí za výstavou Interkamera 2005

Ve dnech 13. – 15. dubna 2005 se ve střední hale a pravém křídle Průmyslového paláce pražského Výstaviště konal již 23. ročník výstavy Interkamera. Nechci se již vracet ke změně v číslování minulých ročníků, blíže viz. literatura [1]. Podívejme se však, v čem se ten letošní ročník lišil od těch předchozích. Letos se zúčastnilo 41 firem.

Největší expozici měla firma KODAK, která na svém stánku představila řadu digitálních minilabů Kodak System DLS Rapide, viz. *obr. 1*. Tvoří ji modely 80, 85 a 89. Všechny uvedené modely mohou zpracovávat jak digitální, tak i klasická média za použití technologie expozice MSB (Microlens Sharpened Beam) s rozlišením 340 dpi pro formát 20 x 30 cm. Formáty fotografií mohou být v rozsahu 9 x 13 cm až 25 x 30 cm. Kapacita jednotlivých modelů je pro formát 15,2 x 10,2 cm 800 obrázků/hod. (model 80), 1 100 obrázků/hod. (model 85) a 1 500 obrázků/hod. (model 89). Předváděn byl i digitální kiosek Picture Maker ve stolním provedení, který spolupracuje s novými mobilními telefony Nokia, které mají zabudovaný fotoaparát.

Obr. 1 Minilab KODAK System 80 DLS Rapide

V oblasti digitálních fotoaparátů nabízí firma KODAK přístroje řady Kodak Easy Share ve třech třídách. Od nejnižší třídy CX s rozlišením 2 až 5 Mpixelů, přes stylovou třídu LS s rozlišením 4 až 5 Mpixelů až po nejvýkonnější třídu DX s rozlišením až 6,1 Mpixelů. V každé třídě si uživatel může vybrat model, který mu nejlépe vyhovuje. Zastavme se u modelu Kodak Easy Share LS755, viz. *obr. 2*. Přístroj má rozlišení 5 Mpixelů a je osazen objektivem Schneider-Kreuznach C-Variogon 6 – 18,1 mm (odpovídá 36 – 108 mm pro 35 mm formát filmu). Fotografie lze z fotoaparátu vytisknout bez PC za použití tiskárny Easy Share printer doc plus. Lze zvolit ze 4 formátů obrázků, maximální formát je 10 x 15 cm. Tisk jednoho obrázku termosublimační technologií trvá 90 sekund.

Firma EASTMAN KODAK byla založena Georgem Eastmanem (1854 – 1932) v Rochesteru (USA) a vždy patřila k průkopníkům fotografických technik, zejména fotomateriálů. Problémy zaznamenala ve chvíli, kdy začala prosazovat „infoimaging“. Bylo to v období internetového boomu a tato investice firmě nevyšla. Pod dojmem tohoto neúspěchu bylo vedení firmy velmi skeptické k nástupu digitální fotografie. Kodak předpovídal pouze pozvolné snižování trhu s filmovými materiály. Ještě v roce 1999 rostl

Obr. 2 Digitální fotoaparát KODAK Easy Share LS755

trh s klasickými filmy asi o 14 % ročně, ale v roce 2000 dochází ke stagnaci a společnosti klesá obrat i zisk. Protože v tu dobu firma nenabídla žádnou zásadní inovaci, klesly akcie firmy z 90 na pouhých 20 dolarů za akcii. Svoji strategii v digitálních technologiích realizoval Kodak až v roce 2003. Pozdě, ale přece. Vybral si jeden z mála digitálních segmentů, který ještě nebyl zcela obsazený a to přímý tisk fotografií z digitálních přístrojů. Samoobslužné kiosky od Kodaku včetně webových aplikací mají úspěch. Také v oblasti digitálních fotoaparátů kde byla firma ještě nedávno neznámá je dnes na americkém trhu na 2. místě, hned za SONY.

Firma CANON má v digitálních přístrojích bohatou tradici. Vzpomeňme na model z řady digitálních fotoaparátů Power Shot, viz. literatura [2], na který letos navázaly modely Power Shot A510/520 s rozlišením 3,2 Mpixelů, respektive 4 Mpixely. Oba přístroje mají 4-násobný optický zoom a kromě optického hledáčku jsou vybaveny LCD displejem 1,8“. Velmi kladně lze z uživatelského hlediska hodnotit, že přístroje mají menu v češtině.

CANON představil také studiovou profesionální digitální jednookou zrcadlovku EOS 1Ds mark II, viz. *obr. 3*. Je osazena CMOS snímačem o velikosti kinofilmového formátu s rozlišením 16,7 Mpixelů. O zpracování obrazu se stará obrazový procesor DIGIC II. Nastavitelný rozsah expozice je 1/8 000 s až 30 s a citlivost 50 – 3 200 ISO. Tělo přístroje je z hořčíkové slitiny a má hmotnost 1 215 g. LCD TFT displej má rozlišení 230 000 pixelů a rozměr 2“. Data lze z fotoaparátu přenášet i bezdrátově. Po zásluze byl tento přístroj oceněn zlatým objektivem Interkamery v kategorii digitálních SLR profesionálních fotoaparátů.

Bohaté nabídce periferií dominovala fototiskárna CANON PIXMA iP8500. Je vybavena mikrotryskami, které umožňují vytvářet kapičky inkoustu o objemu pouhé 2 pikolitry. Má 8 inkoustů a rozlišení tisku je 4 800 x 2 400 dpi. Rychlost tisku je 17 str./min. pro ČB tisk a 15 str./min. pro barevný tisk. Tisknout lze na média až do formátu A4. Tiskárna je vybavena rozhraním USB 2.0 Hi-Speed. Tisknout lze samozřejmě i přímo z kamery systémem PictBridge. I tento produkt byl oceněn zlatým objektivem v kategorii fototiskáren.

Obr. 3 Digitální zrcadlovka CANON EOS 1 Ds mark II

Firma OLYMPUS ukázala řadu novinek v digitálních fotoaparátech. Mezi nimi v řadě Camedia model C – 60 ZOOM, viz. *obr. 4*. CCD snímač má rozlišení 6,1 Mpixelů a obrázky se ukládají na paměťovou kartu xD-Picture Card. Je použit nový obrazový procesor TruePic Turbo s lepším barevným podáním. Přístroj má k dispozici 3-násobný optický a 4-násobný digitální zoom. Bez baterie a karty má hmotnost pouhých 198 g.

Obr. 4 Digitální fotoaparát OLYMPUS Camedia C – 60 ZOOM

Na stánku firmy OLYMPUS jsme mohli spatřit také fotoaparáty legendární značky HASSELBLAD, kterou OLYMPUS u nás zastupuje. Když zakladatel firmy, Victor Hasselblad (1906 – 1978) představil v roce 1948 svůj první fotoaparát, jistě netušil, že svými výrobky dobude nejen celý svět, ale i vesmír. Od roku 1962 fotoaparáty Hasselblad doprovázely americké kosmonauty na všech letech s lidskou posádkou. Dnes si obdivovatelé této značky mohou sestavit z přibližně 300 nabízených dílů přístroj, který nejlépe vyhoví jejich požadavkům. Např. model Hasselblad 503CW, viz. *obr. 5*, umožňuje focení na formáty 6 x 6 cm, 6 x 4,5 cm a 6 x 3 cm. Posun filmu lze zvolit manuální nebo motorický. Rozsah uzávěrky je 1 s až 1/500 s. Ke kameře jsou k dispozici objektivy Zeiss CF, CB a C s ohniskovými vzdálenostmi od 30 do 500 mm. Tělo z hliníkové slitiny má hmotnost 600 g a rozměry 180 x 114 x 110 mm. Naprostou lahůdku jsem si nechal nakonec. Dánská firma Phase One nabízí k tomuto přístroji digitální stěnu Phase One P25. Má naprosto unikátní parametry. CCD snímač má rozlišení 22 Mpixelů a rozměry 48,9 x 36,7 mm. To je více jak dvojnásobek kinofilmového formátu. Jediný obrázek v RAW formátu pak má neuvěřitelných 25 Mpixelů. Citlivost lze nastavit v rozsahu 50 – 800 ISO. Kromě modelu 503CW lze digitální stěnu použít i pro modely Hasselblad H1, 555ELD, 553ELX, 501CM, 203FE a 205FCC. Další varianty se vyrábějí pro vybrané modely aparátů značek Mamiya a Contax.

Obr. 5 Fotoaparát HASSELBLAD 503 CW

Firma NORITSU předvedla na svém stánku novou řadu klasických minilabů QSS-32, která zahrnuje celkem 9 systémů. Například model QSS-3213 má kapacitu až 1 620 obr./hod. formátu 9 x 13 cm z negativu nebo digitálního média. Již 2. generace suchého minilabu dDP (Digital Dry Printer) vyvinutá spoluprací firem NORITSU KOKI a EPSON byla k vidění v modelových provedeních 421 a 621, viz. *obr. 6*. Systém používá inkjetovou tiskovou technologii se 7 barvami. Kapacita tisku pro formát 9 x 13 cm je 400 obr./hod. u modelu 421 a 580 obr./hod. pro model 621.

Obr. 6 Minilab NORITSU dDP - 621

Společnost KONICA MINOLTA Photo Imaging Czech předvedla na svém stánku několik novinek v digitálních fotoaparátech. Mezi nimi zaujal model Dynax 7D, viz. *obr. 7*. Jde o první digitální jednookou zrcadlovku firmy KONICA MINOLTA. Kostra přístroje

je z odolné hořčíkové slitiny. CCD snímač o ploše 23,5 x 15,7 mm má kapacitu 6,3 Mpixelů. Rozsah expozice je 1/4000 s až 30 s. K prohlížení snímků lze použít LCD TFT displej 2,5“ s kapacitou 207 000 pixelů. Citlivost lze nastavit v rozsahu 100 - 3 200 ISO. Za zmínku stojí, že se jedná o první digitální zrcadlovku na světě s funkcí Anti Shake integrovanou v těle přístroje. Jak tento systém funguje? CCD snímač je napojen na vysoce citlivé snímače úhlové rychlosti a na systém SIDM (Smooth Impact Drive Mechanism). Systém neustále posouvá snímačem tak, aby kompenzoval otřesy přístroje.

Obr. 7 Digitální zrcadlovka KONICA MINOLTA Dynax 7D

Nejen designem zaujal fotoaparát Dimage Z5, viz. *obr. 8*. Má 12 násobný optický Mega Zoom (odpovídá 35 – 420 mm pro kinofilm), CCD snímač s kapacitou 5,2 Mpixelů a expozici v rozsahu 1/1000 s až 4 s. Co skutečně zaujme je funkce rychlého automatického zaostřování Rapid AF. Zaostření trvá pouze 0,2 s pro širokoúhlé záběry a 0,3 s v režimu teleobjektivu. Tyto časy vyniknou zejména při focení rychle se pohybujících objektů.

Obr. 8 Digitální fotoaparát KONICA MINOLTA Dimage Z5

Firma FUJIFILM předvedla celou řadu novinek digitálních fotoaparátů řady FinePix. Ve stylových přístrojích zaujal model FinePix F10, viz. *obr. 9*, s rozlišením 6,3 Mpixelů. K vysoké dosažené kvalitě výsledných obrázků přispívají 3 faktory. Za prvé je to nový Super CCD HR 5. generace jehož pixely jsou umístěny v 45 stupňovém úhlu, což umožňuje zmenšit rozteče mezi jednotlivými obrazovými body a zároveň zvětšit počet fotodiod na stejné ploše oproti klasickému uspořádání při zachování vysoké citlivosti. Za druhé je to obrazový RP (Real Photo) procesor s vyhodnocováním směru světla, optimalizací reprodukce barevného podání a algoritmem hladšího tónování s minimem šumu v tmavých oblastech kůže. Za třetí je to objektiv FUJINON s mimořádně vysokou světelností za použití asférických čoček. Přístroj je vybaven 3-násobným optickým a 6,2-násobným digitálním zoomem. Na zadní stěně nalezneme přehledný LCD displej 2,5“ s rozlišením 115 000 pixelů.

Obr. 9 Digitální fotoaparát FUJIFILM FinePix F10

V oblasti digitálních minilabů má firma FUJIFILM na co navazovat. Vzpomeňme si na minilab FUJIFILM Digital Lab System oceněný na Interkameře v roce 1997, viz. literatura [3]. Na té letošní jsme mohli obdivovat unikátní minilab Frontier 570. Jeho parametry hovoří samy za sebe. Kromě automatické retuše prachu a škrábanců na filmových předlohách dokáže zařízení zpracovat 2 040 obr./hod. formátu 10 x 15 cm anebo až 2 210 obr./hod. formátu 9 x 13 cm.

Při této příležitosti není na škodu připomenout, že v roce 2006 uplyne již 25 roků od vynálezu minilabu. V roce 1981 představila první minilab na světě francouzská firma KIS PHOTO INDUSTRIE, s jejímiž výrobky jsme se mohli později setkávat i na výstavách Interkamera.

Obr. 10 Digitální fototiskárna FUJIFILM Printpix NC – 400D

Univerzálním řešením pro tisk digitálních fotografií jsou tiskárny FUJIFILM Printpix. Jedná se o technologii vyvinutou firmou FUJIFILM pro tisk barevných fotografií bez použití inkoustových náplní, pásek nebo tonerů a tedy velmi šetrnou k životnímu prostředí. Jak je to možné? Speciální papír Printpix obsahuje barevné vrstvy v systému CMY. Po tepelné expozici tiskovou hlavou tiskárny lze zobrazit 256 barevných odstínů tvořených až 16,77 miliony barev. Obraz se po vytištění zafixuje UV zářením. Tiskárna Printpix NC – 400D, viz. *obr. 10*, má rozlišení 300 dpi a obrázky jsou odolné barevným změnám až 10 let v interiéru anebo 30 let na tmavém místě.

Na stánku firmy LIBEREK jsme mohli vidět samoobslužné kiosky MITSUBISHI pod označením DPSKIOSK a to v provedení stojanovém i stolním, viz. *obr. 11*. Ve vrchní části je vždy dotyková obrazovka, čtečky všech typů paměťových karet, čtečka čipových platebních karet, CD/DVD-RW jednotka, tiskárna na stvrzenky a řídící jednotka systému. Ve spodní části je jedna až dvě tiskárny na formáty 10 x 15, 13 x 18 a 15 x 21/23 cm.

Obr. 11 Samoobslužný kiosk MITSUBISHI

Obr. 12 Dalekohled FOMEI BinoCam 10 x 25

Firma FOMEI nabízela na svém stánku bohaté příslušenství od stojanů až po brašny na fotoaparáty. Mezi jinými produkty jsme zde ale také mohli spatřit dalekohledy BinoCam s integrovaným digitálním záznamem obrazu, viz. *obr. 12*. Model BinoCam 10 x 25 má 16 MB paměť, CMOS snímač s rozlišením 1,2 Mpixelů a zorný úhel 5,6 deg. Je vhodný pro turistiku, myslivost aj.

Firma EPSON představila na svém stánku řadu kvalitních fototiskáren, jako např. model Stylus Photo R200 s rozlišením 5 760 x 1 440 dpi. Tisk probíhá pomocí tiskové hlavy s 540 tryskami za použití 6 barevných náplní. Tisk barevného obrázku 10 x 15 cm v jemném režimu trvá 36 s. Ve skenerech zaujal EPSON Perfection 4990 Photo s rozlišením 4 800 x 9 600 dpi ve 48 bitové hloubce barev. Skenovat lze předlohy do formátu A4.

Na letošní Interkameře chyběly některé z velkých firem, které se dříve účastnily, jmenujme např. firmu HAMA. Podívejme se však na závěr na trendy v digitálním světě. Mobilních telefonů vybavených fotoaparátem se v roce 2004 prodalo na celém světě 4x více než samotných digitálních kamer. Nutno také připomenout, že stoupá kvalita fotoaparátů zabudovaných v telefonech. Z celkového počtu prodaných mobilů pak ty, které mají objektiv tvoří 38 %. Pokud nás zajímá pořadí na prvních třech místech na trhu mobilů s kamerou, je následující – Nokia 18 %, Motorola 17 % a Samsung 13 %. Do dvou let se počítá s tím , že paměťová karta na obrázky se stane u mobilů standardem. Analogové video bylo definitivně překonáno digitálním DVD. I zde je však patrný pokrok. Firma TDK představila BR (Blue Ray) DVD s kapacitou 100 GB. Je to umožněno tím, že disk obsahuje 4 záznamové vrstvy, každá s kapacitou 25 GB. Firma SONY, která je jednou ze zakládajících společností odpovědnou za standard Blue Ray, předpovídá komerční nasazení těchto disků do dvou let. Konkurenčním projektem k Blue Ray je standard HD-DVD firmy TOSHIBA a NEC. TOSHIBA představila disk s kapacitou 15 GB ve 3 vrstvách, tedy celkově 45 GB. Toto DVD se má objevit na trhu již koncem roku 2005.

A jaký bude skutečný vývoj? Přijďte se podívat na jaře 2006 již na 24. ročník Interkamery.

Literatura

[1] Křížek: Ohlédnutí za výstavou Interkamera 2003, JMO, č. 8-9, FZÚ AV ČR, Praha, 2003, ss. 244 – 248

[2] Křížek: Ohlédnutí za výstavou Interkamera 2001, JMO, č. 6, FZÚ AV ČR, Praha, 2001, ss. 203 – 207

[3] Křížek: Ohlédnutí za výstavou Interkamera '97, JMO, č. 9, FZÚ AV ČR, Praha, 1997, ss. 264 – 269

Ing. Miloslav Křížek, H. Malířové 18, 169 00 Praha 6

Ladislav KÁRNÍK, Vladislav BUZEK, Fakulta strojní VŠB – TU v Ostravě

Mobilní roboty pro manipulační úlohy ve zdravotnictví

Mobilní roboty mohou vykonávat řadu manipulačních úloh a nahradit monotónní práci vykonávanou člověkem. V některých případech může jít o manipulaci s nebezpečným materiálem jako jsou např. laboratorní vzorky virů apod. Mobilní roboty mohou manipulovat také s těžkými a objemnými předměty. Některé mobilní roboty se využívají k transportu pacientů.

Úvod

Mobilní roboty určené pro manipulační úlohy v oblasti zdravotnictví dnes vykonávají celou řadu činností které jsou pro člověka namáhavé a monotónní. Může jít např. o rozvoz léků, jídel, obvazového materiálu apod. Manipulace může být v tomto případě spojena také s transportem na větší vzdálenosti.

Jiná situace může nastat při manipulaci ve skladech kde je zapotřebí přemísťovat objemné a těžké předměty. Může jít např. o manipulaci s paletami, krabicemi apod. V neposlední řadě se mohou mobilní roboty využívat k transportu pacientů z nemocničního pokoje na ošetřovny, k rehabilitacím apod. Ve všech případech jde o robotická zařízení která mohou nahradit obslužný personál nebo do jisté míry ulehčit provádění některých opakujících se manipulačních činností.

Mobilní roboty pro manipulační úlohy

Zdravotnictví je oblast ve které se každý den provádí spousta manipulačních úkonů vykonávaných obslužným personálem. Jde přitom o stále se opakující úkony které se dají nahradit robotem. Všude tam kde se provádí transport předmětů či materiálu který musí přenášet člověk se dá využít mobilní robot. Jedná se přitom vesměs o vnitřní prostředí. V současnosti nemusí být vždy vhodné podmínky pro aplikaci mobilních robotických prostředků [2]. Proto je zapotřebí do budoucna při projektování nemocničních zařízení uvažovat také s možnosti nasazení mobilních robotických prostředků pro tyto a jiné činnosti. Zejména to bude platit v případě kdy budou pro manipulační úlohy využívány autonomní mobilní roboty.

Obr. 1 Autonomní mobilní robot ROMEO pro obsluhu lidí

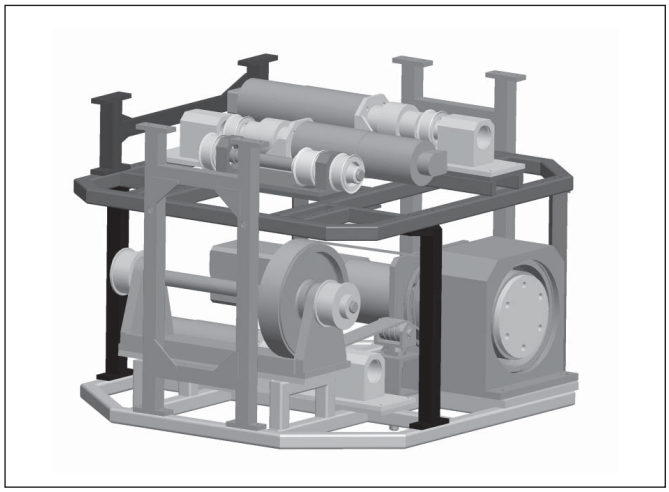
Příklad mobilního servisního robotu s manipulační nástavbou na kolovém podvozku je znázorněný na *obr. 1* [3]. Jde o autonomní robot ROMEO který je určený pro obsluhu lidí a provádění manipulačně dopravních úloh. Manipulační nástavba může uchopit předmět a transportovat jej na vzdálené místo.

Na katedře robototechniky, VŠB-TU v Ostravě, Fakulty strojní se v rámci výzkumného úkolu vyvíjí servisní mobilní robot s manipulační nástavbou který lze mimo jiné využít také v oblasti zdravotnictví. Vzhledem k tomu, že se dá manipulovat s hmotnosti do 5 kg lze tento robot využít např. pro úlohy typu:

- manipulace s předměty obecného tvaru a jejich transport mezi odděleními,
- transport předmětů ze skladu na oddělení,
- manipulace s laboratorními vzorky a jejich transport,
- manipulační činnosti ve skladech,
- obsluha pacientů.

Celý mobilní robot je složený ze dvou základních modulů:

- podvozkový modul,
- Modul manipulační nástavby.

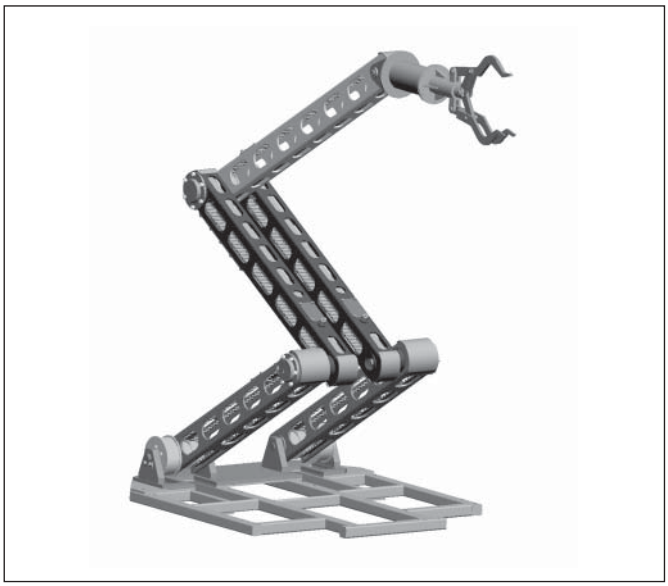


Obr. 2 Umístění pohonů pro manipulační nástavbu

Podvozkový modul je opatřen dvěmi pohonnými jednotkami tvořenými motory MAXON s planetovou převodovkou, enkoderem a modulem pro řízení polohy. Pohony jsou napájeny z baterií, umístěnými ve spodní části rámu podvozku, což přispívá ke snížení těžiště a tím ke zvýšení stability robotu. Uvedené baterie slouží i pro napájení pohonů nástavby. Řídicí počítač a senzorický systém je rovněž umístěn ve spodní části podvozku s možnosti snadného přístupu. Čtyřkolový podvozek je realizován a odzkoušen a v současné době se pracuje na výrobě a montáži manipulační nástavby [1].

Modul manipulační nástavby je řešen jako tříramenný kloubový mechanizmus s pohony v základu (viz *obr. 2*). Toto řešení opět přispívá ke stabilitě robotu, protože polohu těžiště tohoto modulu

ovlivňuje zejména poloha pohonů, které jsou v tomto případě umístěny v dolní části modulu. Z důvodu kompaktnosti konstrukce byla zvolena koncepce tří kloubově spojených ramen, které ve své výchozí poloze nepřesahují kruhový půdorys podvozkového modulu. Z bočního pohledu je mechanizmus volen tak, aby bylo možno ramena poskládat vedle sebe tak, aby ve vertikálním směru zabírały pokud možno co nejmenší rozměr. Schéma manipulační nástavby bez pohonů je znázorněno na *obr. 3*



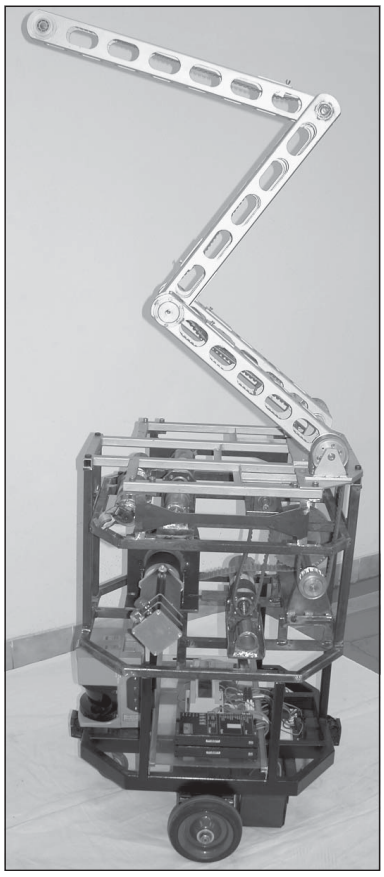
Obr. 3 Schéma manipulační nástavby bez pohonů

Jako pohony byly použity opět pohony MAXON, velikostně odstupňované podle momentových požadavků v jednotlivých kloubech. K přenosu kroutícího momentu z pohonných jednotek na příslušný kloub jsou použity ozubené řemeny a řemenice firmy Chiaravalli. Pro zvolenou aplikaci jsou použity čtyři pohonné jednotky, rozmístěné na dvou patrech sendvičové nástavby. Tři jednotky jsou určeny pro tři klouby ramen a čtvrtá jednotka je vyhrazena pro pohon zápěstí s jedním stupněm volnosti. Pro pohon prvního kloubu byl vybrán motor MAXON s výkonem 250 W v kombinaci s planetovou převodovkou s výstupním kroutícím momentem 120 Nm. Pro zvětšení kroutícího momentu a rovnoměrnější přenos kroutícího momentu na dvojici ramen prvního stupně je do přenosového řetězce vložena předloha s převodovým poměrem 2:1. Pro pohon druhého stupně je použitý motor MAXON s výkonem 80 W s převodovkou dávající výstupní moment 50N m. Pro poslední rameno a natáčení zápěstí jsou použity motory MAXON 40 W s převodovkou s maximálním výstupním momentem 50 Nm. Všechny pohony jsou doplněny encodéry pro zajištění přesného řízení poloh ramen. Vzhledem k tomu, že pohony MAXON vycházejí konstrukčně dlouhé a při nutnosti použit spojku pro vyrovnání případných nesouososti u pohonu prvního stupně by pohon přesahoval kruhový půdorys robotu, bylo proto nutno řešit pohonnou jednotku netradičním způsobem. Dutá hřídel, uložená ve dvou radiálních ložiscích a obepínající Oldhamovu spojku umožnila zkrátit celkovou délku pohonné jednotky. Jednotlivé řemenové převody jsou doplněny napínacím ústrojím k zajištění dostatečně tuhého a přesného přenosu kroutícího momentu.

Typové řemenice z hliníkových slitin byly individuálně upravovány podle potřeby a použití v jednotlivých uzlech. Celý blok s pohony je uložen ve dvou patrech nad sebou (viz obr. 2). Spodní patro je přišroubováno na základním pojezdovém modulu pomocí distančních sloupků. Na toto patro je pak sendvičovým způsobem přišroubováno střední patro se zbývajícími pohony opět pomocí distančních sloupků. Poslední horní patro už slouží k uchycení vlastní kloubové konstrukce manipulační nástavby. Schéma celého robotu namodelovaného v systému Pro/ENGINEER je znázorněno na *obr. 4*.

Robot bude v první fázi zkoušek vybaven poměrně jednoduchým chapadlem (viz obr. 3 a obr. 4), umožňujícím provádět základní uchopovací manipulace a podle výsledků a konkrétní aplikace robotu bude chapadlo rekonstruováno do konečné podoby.

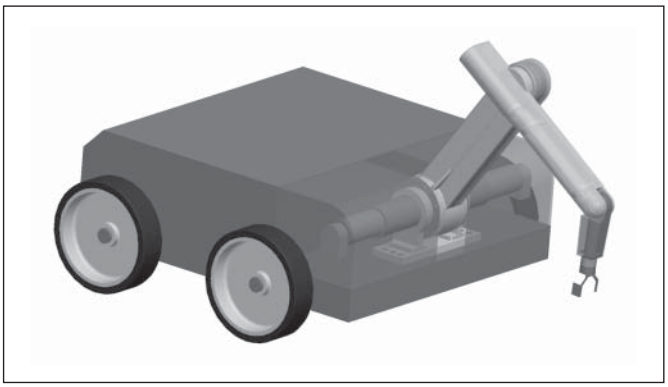
Obr. 4 Schéma celého servisního robotu



Obr. 5 Vyrobený robot s manipulační nástavbou

V úvahu přichází také varianta víceprstého chapadla. Rovněž orientační ústrojí může být doplněno dalším stupněm volnosti podle požadavků konkrétních aplikace. Dosah manipulační nástavby je 1200 mm od svislé osy robotu. To umožňuje obsáhnout poměrně velký prostor v bezprostředním okolí robotu. Schéma vyrobeného robotu bez vnějších krytů a chapadla je znázorněno na *obr. 5*.

Další varianta mobilního robotu pro manipulační úlohy který byl navržen je znázorněn na *obr. 6*. Robot může provádět manipulaci s předměty obecného tvaru s možností jejich transportu na nosné plošině modulu podvozku. Také tuto variantu mobilního robotu lze využít v oblasti zdravotnictví k podobným účelům jako předchozí konstrukci. Rozdíl je v tom, že manipulační nástavba robotu může manipulovat s předměty do hmotnosti 1,5 kg a má menší pracovní dosah.

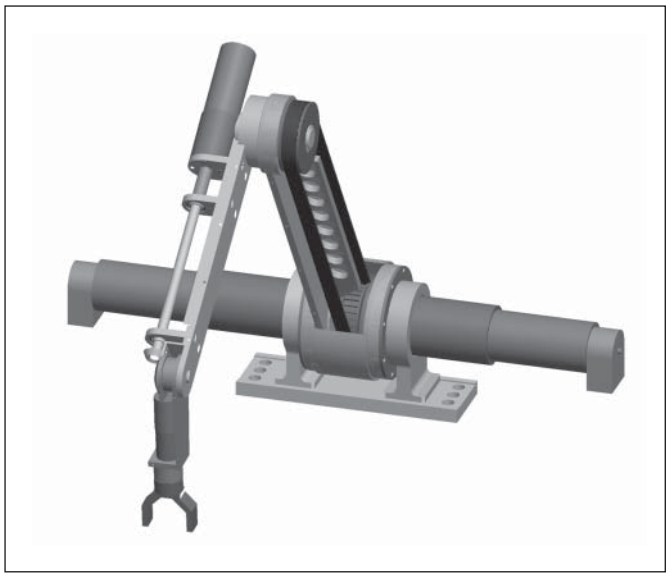


Obr. 6 Model mobilního robotu pro manipulaci a transport

Celý robot je i v tomto případě tvořen modulem podvozku a modulem manipulační nástavby. Pohon podvozku zabezpečují opět motor MAXON s planetovou převodovkou, enkoderem a moduly pro řízení polohy. Manipulační nástavba má 4 stupně volnosti, z toho 2 stupně pro polohovací ústrojí (rotace kolem dvou vodorovných os) a 2 stupně pro orientační ústrojí (rotace kolem vodorovné osy a rotace chapadla kolem střední osy posledního ramene. Tato struktura poskytuje mobilnímu robotu poměrně široké manipulační schopnosti. V případě potřeby je možno vyřešit další stupeň volnosti jako součást chapadla.

Manipulační nástavba se na podvozek mobilního robotu připevní pomocí základového interface, který je potřeba přesně specifikovat až na základě konstrukce podvozku pro danou servisní úlohu. Dva motory nejbližší základu (motory pro klouby 1 a 2) nejsou kryté pevnou konstrukcí, protože se předpokládá jejich schování do skříně podvozku. Všechny rotační klouby jsou poháněny pomocí motorů MAXON. Rozsah rotačního pohybu v kloubu 1 je 160°. Rozsah rotačního pohybu v kloubu 3 je ±90°. Rozsah rotačního pohybu v kloubech 2 a 4 je ±90°.

Všechna 3 ramena jsou tvořena nosným rámem a plechovými kryty připevněnými pomocí šroubů. Kryty chrání převodové mechanismy umístěné v ramenech (ozubený řemen a řemenice, hří-



Obr. 7 Manipulační nástavba

dele, ložiska, motory). Všechny kryty lze jednoduše odejmout pro provedení údržby a oprav. Manipulační nástavba bez krytů je znázorněna na *obr. 7*. Manipulační nástavba má dosah 530 mm od osy rotace v prvním kloubu. Celý systém je určený pro aplikace ve vnitřním prostředí a lze ho ovládat operátorem.

Závěr

Cílem článku bylo ukázat možnosti využití servisních mobilních robotů pro manipulační úlohy v oblasti zdravotnictví. Z důvodu omezeného rozsahu článku není problematika řešena detailně.

Tento článek prezentuje poznatky získané při řešení grantového projektu J17/98:272300008, podporovaného z fondu pro rozvoj vysokých škol MŠMT.

Literatura

[1] BUZEK, V. – KÁRNÍK, L. Servisní mobilní robot pro obslužné aplikace. In SERVISNÍ ROBOTIKA, Ostrava, katedra robototechniky FS VŠB-TU Ostrava, 2003, sborník anotací str. 7, ISBN 80-248-0494-8.
[2] KÁRNÍK, L.-KNOFLÍČEK, R.-MARCINČIN, J. N. Mobilní roboty. Opava: MÁRFY SLEZSKO, 2000. 210 s. ISBN 80-902746-2-5.
[3] http://ais.gmd.de/ROB/romeo.html s.html

Ing. Ladislav Kárník, CSc., Fakulta strojní VŠB-TU v Ostravě, ul. 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava Poruba, ČR,
tel.: 00420-596 994 123, e-mail: ladislav.karnik@vsb.cz
Ing. Vladislav Buzek, Fakulta strojní VŠB-TU v Ostravě, ul. 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava Poruba, ČR,
tel.: 00420-596 994 255, e-mail: vladislav.buzek@vsb.cz

Petr BICAN, JAN MAREŠ, Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, Praha

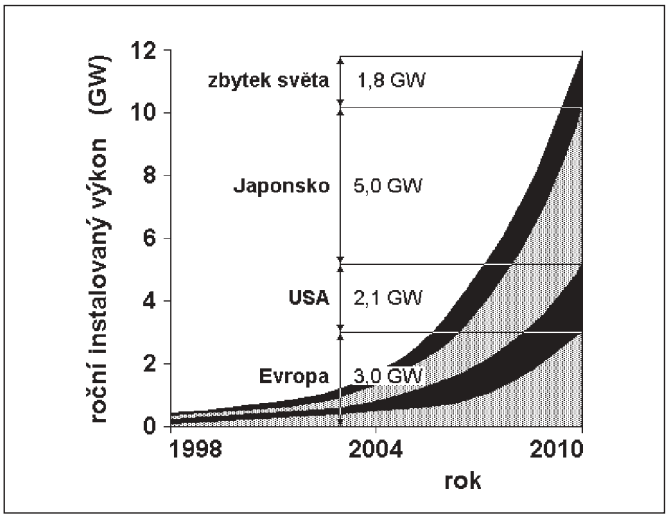
Význam solární energie roste

Využití jen jednoho promile energie dopadající na Zemi ze Slunce by dokázalo uspokojit veškerou současnou energetickou spotřebu lidstva [1]. Stále více se instalují jak solární systémy fototermické na ohřev vody či vytápění, tak solární systémy fotovoltaické na výrobu elektrické energie. Jako příklad je na *obr. 1* fototermický kolektor presentovaný na mezinárodní odborné výstavě Aquatherm Praha 2004. Oborem zájmu autorů je ale fotovoltaika, proto se dále hovoří pouze o ní.

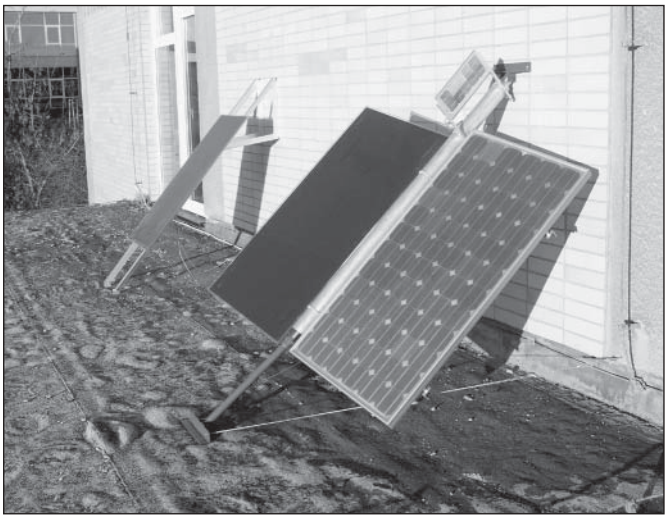
Obr. 1 Fototermický kolektor presentovaný na mezinárodní odborné výstavě Aqua-therm Praha 2004

Celosvětová výroba a instalace fotovoltaických (PV) solárních panelů se každý rok významně zvyšuje [2-4]. Zatímco před deseti lety výroba nedosahovala ani 100 MW/rok maximálního výkonu panelů, letos už přesahuje 1000 MW/rok a předpokládá se v následujících letech ještě rychlejší růst. *Obr. 2* byl zpracován podle podkladů EPIA (European Photovoltaic Industry Agency) a ukazuje nárůst instalovaného výkonu fotovoltaických panelů v uvedených oblastech světa v posledních letech a také předpokládaný nárůst v nejbližších letech. Je vidět, že v roce 2010 se předpokládá celosvětový objem výroby a instalace fotovoltaických panelů poblíž hranice 12 GW/rok a největší nárůst se předpokládá v Japonsku. To je celkem pochopitelné, neboť Japonsko je průmyslovou zemí s malými vlastními zásobami primárních zdrojů energie, které musí dovážet. V Evropě se očekává trochu větší nárůst instalace než v USA, což je zřejmě způsobeno dotační politikou některých evropských států. Díky dotační politice v Německu se letos čtvrtina světové výroby instaluje právě zde [5] a podobná dotační politika se připravuje i ve Španělsku, Francii a Itálii. Zbytek světa tvoří zejména rozvojové země, kde je nízká kupní síla a patrně proto zde bude nejmenší nárůst instalace fotovoltaických panelů. Podle prognózy WEC (World Energy Council) by po roce 2040 měla solární energie tvořit největší podíl na celosvětové výrobě energie. Je tedy téměř jisté, že uvedený nárůst výroby se bude i nadále zvětšovat.

V loňském roce autoři instalovali na České zemědělské univerzitě v Praze malý fotovoltaický solární systém přímo spojený se sítí. Tento systém (*obr. 3*) je tvořen třemi PV panely, z toho dva panely jsou umístěny na pohyblivém automatickém stojanu typu TRAXLE™, který natáčí PV panely neustále kolmo ke směru přímého slunečního záření. Pohyblivý stojan (vyvinutý ve spolupráci firmy Poulek Solar, s.r.o. a ČZU v Praze) byl podrobně popsán například v práci [3]. Jeden z PV panelů je standardní na bázi tenkých vrstev amorfního křemíku s maximálním výkonem 40 W, druhý je oboustranný na bázi polykrystalického křemíku s maximálním výkonem 100 W. Třetí panel slouží jako referenční, je na bázi tenkých vrstev amorfního křemíku s maximálním výkonem 40 W a má pevný stojan. Stejnosměrný elektrický proud z PV panelů je v měničích OK4E-100 (NKF-Electronics) transformován na střídavý a přímo dodáván do sítě. Výstup na počítač umožňuje měřit z jednotlivých PV panelů okamžitý výkon, množství vyrobené energie a okamžité stejnosměrné napětí panelů i střídavé napětí v síti. Měniče sfázují střídavý proud se sítí a z bezpečnostních důvodů se automaticky odpojí při poklesu napětí v síti.



Obr. 2 Roční instalovaný výkon fotovoltaických panelů v jednotlivých oblastech světa



Obr. 3 Malý fotovoltaický solární systém přímo spojený se sítí instalovaný na České zemědělské univerzitě v Praze

Na takto zkonstruovaném solárním systému se začalo na podzim 2004 měřit a porovnávat množství vyrobené energie v místních podmínkách Prahy 6-Suchdola. Během podzimu ale nebyl žádný slunečný den, jen menší počet polojasných dní a také v místních podmínkách (50°šš) se navýšení množství vyrobené energie v případě pohyblivého systému s oboustrannými panely oproti pevnému systému se standardními panely nejvíce projeví v letním období. Proto s definitivními závěry ještě počkáme, ale první výsledky naznačují, že toto navýšení v podzimních polojasných dnech činí cca 30 %, což je v souladu s prací [2].

Práce byla podpořena interním grantem TF ČZU
č. 31120/1312/313139.

Literatura

[1] M. Cenek a kol., *Obnovitelné zdroje energie*, FCC Public, Praha, (2001).
[2] V. Poulek, M. Libra, *Fotovoltaické solární systémy s oboustrannými panely*, Jemná mechanika a optika, **47**, 9, (2002), 287-288.
[3] V. Poulek, M. Libra, *Solární fotovoltaický systém s vysokou účinností*, Elektro, **12**, 8-9, (2002), 72-75.
[4] M. Libra, V. Poulek, *Solární energie – stále aktuální problematika!*, Jemná mechanika a optika, **47**, 2, (2002), 58-59.
[5] M. Libra, V. Poulek, *Paříž hostila fotovoltaickou konferenci a výstavu*, Elektro, **15**, 1, (2005), 8-9.

Ing. Petr Bican, Jan Mareš (student), Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6,
tel.: 224 383 317, e-mail: bicanp@tf.czu.cz

Petr HLUBINA, Institut fyziky, VŠB-TU Ostrava

Měření disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence s využitím spektrální interferometrie v bílém světle

Spektrální interferenční metoda je použita k přímému měření disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence v širokém oboru vlnových délek. Využívá se tandemového uspořádání Michelsonova interferometru a měřeného dvojlomného krystalu známé tloušťky s polarizátorem a analyzátorem a faktu, že spektrální interferenční proužky jsou na výstupu této konfigurace rozlišeny spektrometrem o nízké rozlišovací schopnosti pouze v okolí tzv. vyrovnávací vlnové délky. Určením této vyrovnávací vlnové délky v závislosti na dráhovém rozdílu nastaveném v interferometru lze přímo měřit spektrální závislost skupinového dvojlomu daného jednoosého krystalu a porovnat ji s teorií. Příspěvek navíc ukazuje, že hodnoty dráhového rozdílu nastaveného v interferometru jsou v souladu s teorií lineárně závislé na skupinovém dvojlomu krystalu islandského vápence a že směrnice této lineární závislosti určuje s velkou přesností tloušťku dvojlomného krystalu.

1. ÚVOD

Mezi nejdůležitější charakteristiky izotropních optických materiálů patří disperzní charakteristiky [1], které vyjadřují závislost indexu lomu materiálu na vlnové délce. Nejnovější aplikace optické interferometrie ve spektrální oblasti [2] se promítly i do oblasti měření disperze, ve které zaznamenáváme významné rozšíření metod měření pracujících se zdroji bílého světla [3-9]. Spektrálně-interferenční metody využívající zdrojů bílého světla nacházejí uplatnění při určování disperzních křivek optických materiálů v reálném čase [3], při přesném určování tloušťky a indexu lomu materiálů s normální disperzí [4], při měření efektivní tloušťky polopropustného zrcadla a disperze skupinového indexu lomu [5], při měření chromatické disperze optických materiálů [6], při měření vzdáleností v disperzních interferometrech [7, 8], při určování indexu lomu a disperze pevných látek [9], resp. při přímém měření skupinových zpoždění [10]. Spektrálně-interferenční metody pracující se zdroji bílého světla se dále používají ke studiu mezividové disperze ve dvouvidových optických vláknech [11], resp. k měření disperze dvojlomu speciálních optických vláken [12].

Cílem tohoto příspěvku je rozšíření využití metody spektrální interferometrie v bílém světle [12] k přímému měření disperze v anizotropním materiálu, tj. k přímému měření disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence. Metoda pracuje se zdrojem bílého světla - halogenovou žárovkou - a tandemovým uspořádáním Michelsonova interferometru a měřeného jednoosého krystalu známé tloušťky s polarizátorem a analyzátorem, přičemž se využívá známé skutečnosti, že spektrální interferenční proužky jsou na výstupu této konfigurace rozlišeny spektrometrem o nízké rozlišovací schopnosti pouze v okolí tzv. vyrovnávací vlnové délky. Je to vlnová délka, na které je rozdíl skupinových optických drah mezi dvěma polarizacemi vln, které se šíří jednoosým dvojlomným krystalem, roven dráhovému rozdílu nastavenému v Michelsonově interferometru. Změnou dráhového rozdílu v Michelsonově interferometru se mění vyrovnávací vlnová délka a tudíž lze přímo měřit spektrální závislost skupinového dvojlomu v daném jednoosém krystalu známé tloušťky. Touto novou metodou byla změřena disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence v širokém spektrálním oboru. Navíc byly s velkou přesností určeny dvě tloušťky tohoto dvojlomného krystalu.

2. METODA MĚŘENÍ

Uvažujme tandemové uspořádání Michelsonova interferometru a vzorku jednoosého dvojlomného krystalu tloušťky t s optickou osou orientovanou kolmo na osu svazku v interferometru podle *obrázku 1* spolu s polarizátorem a analyzátorem. Dvojlomný krystal nechť je charakterizován spektrální závislostí fázového dvojlomu $B(\lambda)$, který je definován relací:

$$B(\lambda) = n_e(\lambda) - n_o(\lambda), \quad (1)$$

kde $n_e(\lambda)$ a $n_o(\lambda)$ jsou indexy lomu mimořádné a řádné vlny, šířící se dvojlomným krystalem a λ je vlnová délka. Dále nechť je dvojlomný krystal charakterizován spektrální závislostí skupinového dvojlomu $G(\lambda)$, který je definován relací:

$$G(\lambda) = B(\lambda) - \lambda \mathrm{d}B(l)/\mathrm{d}\lambda, \quad (2)$$

Je-li v Michelsonově interferometru nastaven vhodný kladný dráhový rozdíl Δ_M, lze zaznamenat optickým spektrometrem o šířce odezvové funkce $\Delta\lambda_R$ spektrální interferogram, který v případě jednoosého krystalu se záporným dvojlomem, tj. např. islandského vápence – kalcitu, vyhovuje vyjádření [12]:

$$I(\Delta_M; \lambda) = I_0(\lambda)\{1 + 0{,}5V_{\alpha\beta}(\lambda) \exp\{-(-\pi^2/2)([\Delta_M + G(\lambda)t] \Delta\lambda_R/\lambda^2)^2\}\cos[(2\pi/\lambda)\,\Delta_M + B(\lambda)t]\}, \quad (3)$$

kde $I_0(\lambda)$ je nemodulované spektrum a $V_{\alpha\beta}(\lambda)$ je člen viditelnosti odrážející vliv polarizátoru a analyzátoru. Ze vztahu (3) je zřejmé, že lze rozlišit tzv. vyrovnávací vlnovou délku λ_0, pro kterou je viditelnost spektrálních interferenčních proužků největší a která splňuje relaci:

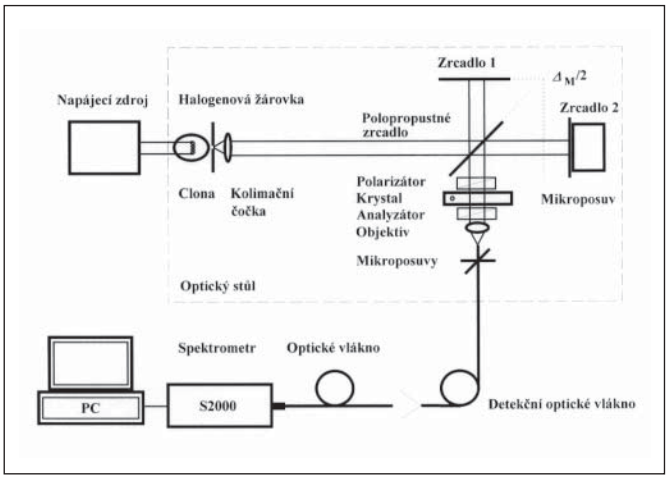
$$\Delta_M = -G(\lambda_0)t. \quad (4)$$

Můžeme tak konstatovat, že změna dráhového rozdílu Δ_M nastaveného v Michelsonově interferometru vede ke změně vyrovnávací vlnové délky λ_0, což při splnění vztahu (4) jinými slovy znamená, že lze přímo měřit spektrální závislost skupinového dvojlomu $G(\lambda_0)$ jednoosého krystalu známé tloušťky t.

Naměřenou spektrální závislost lze porovnat s teoretickou závislostí, která plyne ze vztahu (2) a z disperzní relace pro fázový dvojlom $B(\lambda)$, která má např. pro krystal islandského vápence tvar [13]:

$$B(\lambda) = H + \frac{I\lambda^2}{\lambda^2 - J} + \frac{K\lambda^2}{\lambda^2 - L}, \quad (5)$$

kde vlnová délka λ je v mikrometrech a konstanty mají následující hodnoty pro pokojovou teplotu: $H = -29{,}435688 \times 10^{-3}$, $I = -134{,}804456 \times 10^{-3}$, $J = -294{,}96110 \times 10^{-3}$, $K = 2{,}17641576 \times 10^{-2}$ a $L = 80$. Ze vztahu (4) je dále zřejmé, že lze určit z hodnot vyrovnávacích vlnových délek λ_0 naměřených pro dráhové rozdíly Δ_M nastavené v Michelsonově interferometru tloušťku t jednoosého krystalu, známe-li jeho disperzi skupinového dvojlomu $G(\lambda_0)$.



Obr. 1 Schéma experimentální sestavy s Michelsonovým interferometrem pro měření skupinového dvojlomu jednoosého krystalu nebo jeho tloušťky

3. EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Záznam a vyhodnocení spektrálních interferogramů vedoucí k získání vyrovnávacích vlnových délek jsme prováděli v experimentální sestavě s Michelsonovým interferometrem, polarizátorem, dvojlomným krystalem, analyzátorem a kompaktním spektrometrem podle obrázku 1. Michelsonův interferometr byl složen z dvojice zrcadel, jednoho polopropustného zrcadla konečné tloušťky a kompenzační desky stejného materiálu a stejné tloušťky. Jedno z dvojice zrcadel bylo součástí mikroposuvu, který umožňoval definované mikrometrové posunutí. Jako zdroje optického záření jsme použili 20 W halogenovou žárovku, jejíž napájecí napětí 5 V bylo přivedeno od stabilizovaného zdroje. Použitím clony a čočky jsme vytvořili kolimovaný svazek bílého světla vstupujícího do interferometru. Kolimovaný svazek na výstupu interferometru dopadal na kombinaci polarizátor, dvojlomný krystal a analyzátor. Dvojlomný krystal byl krystal islandského vápence, jehož dvě dvojice ploch rovnoběžných s optickou osou (viz obrázek 1) byly vyleštěny s přesností 15‘ a odpovídaly jim tloušťky $t = (26505 \pm 10)$ μm a $t = (64650 \pm 20)$ μm. Optické pole z výstupu této sestavy bylo soustředěno mikroskopickým objektivem do detekčního optického vlákna. Následovalo optické vlákno spektrometru, vlastní kompaktní spektrometr S2000, A/D převodník a osobní počítač PC.

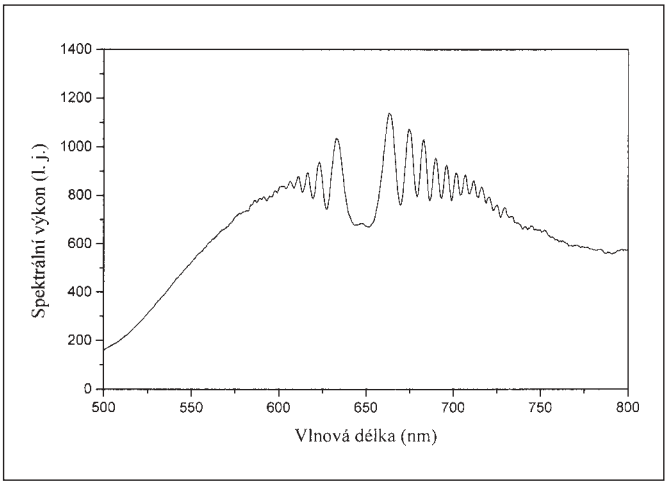
Kompaktní spektrometr S2000, jehož hlavními částmi jsou mřížka se 600 vrypy na milimetr a lineární CCD detekční prvek s 2048 pixely, pracoval v rozsahu od 350 do 1000 nm. Rozlišovací schopnost a šířka odezvové funkce kompaktního spektrometru byly určeny efektivní šířkou optického svazku z jádra optického vlákna na jeho vstupu [14, 15]. V našem případě bylo použito optické vlákno o průměru jádra 50 μm. Spektrometr byl spojen s 12 bitovým A/D převodníkem, který byl ve formě karty ADC1000 zasunut do osobního počítače. Citlivost spektrometru byla při daných světelných podmínkách určena softwarově nastavitelnou integrační dobou. V měřicí sestavě podle obrázku 1 bylo možno optický výkon ve vláknu spektrometru měnit změnou vzdálenosti vstupního čela vlákna spektrometru od výstupního čela detekčního optického vlákna. Spektrální interferogramy zaznamenané kompaktním spektrometrem pro různé dráhové rozdíly Δ_M nastavené v Michelsonově interferometru byly základem určení závislosti vyrovnávací vlnové délky λ_0 na dráhovém rozdílu Δ_M.

4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUSE

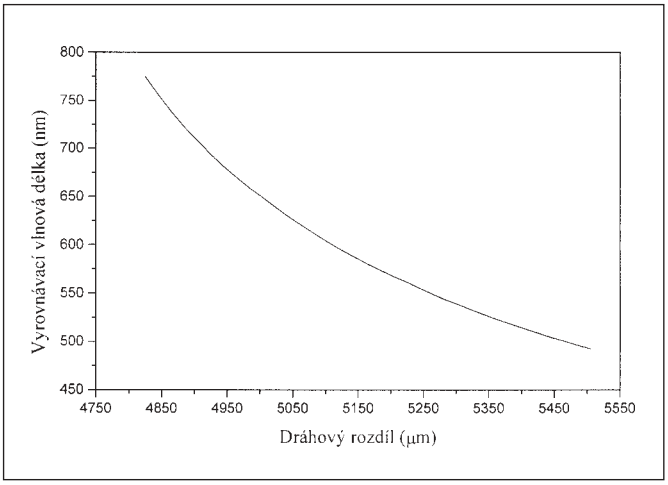
Nejprve jsme natočili polarizátor a analyzátor vzhledem ke směru šíření řádné a mimořádné vlny dvojlomným krystalem tak, abychom dosáhli maximální viditelnosti spektrálních interferenčních proužků, kdy $V_{\alpha\beta}(\lambda) \approx 1$. Poté jsme provedli záznam a vyhodnocení spektrálních interferogramů s určením odpovídajících vyrovnávacích vlnových délek pro první tloušťku dvojlomného krystalu. Na *obrázku 2* je pro ilustraci ukázán spektrální interferogram zaznamenaný pro nastavený dráhový rozdíl $\Delta_M = 5005$ μm. Spektrální interferogram velice dobře odhaluje interferenční proužky s proměnnou periodou a s proměnnou viditelností. Z obrázku je jednoznačně patrné, že spektrální interferenční proužky vykazují v tomto případě největší periodu a viditelnost kolem vyrovnávací vlnové délky $\lambda_0 = 648{,}56$ nm. Proměnnost viditelnosti spektrálních interferenčních proužků, vedoucí k jejich potlačení na vlnových délkách vzdálených od vyrovnávací vlnové délky, je způsobena omezenou rozlišovací schopností kompaktního spektrometru [14, 15].

Záznamem a vyhodnocením dalších spektrálních interferogramů jsme zjistili, že pro dráhový rozdíl Δ_M, nastavený v rozsahu od 4825 do 5505 μm, se vyrovnávací vlnové délky λ_0 mění v rozsahu přibližně od 493 do 775 nm. To dokazuje o*brázek 3*, na kterém je znázorněna závislost změřené vyrovnávací vlnové délky λ_0 na dráhovém rozdílu Δ_M nastaveném v interferometru, který byl měněn s krokem 10 μm. Znalost tloušťky t vzorku dvojlomného krystalu islandského vápence nám dále umožňuje s použitím vztahu (4) určení jeho skupinového dvojlomu $G(\lambda_0)$. *Obrázek 4* tak prezentuje závislost naměřeného skupinového dvojlomu $G(\lambda_0)$ krystalu islandského vápence na vyrovnávací vlnové délce λ_0 spolu s teoretickou

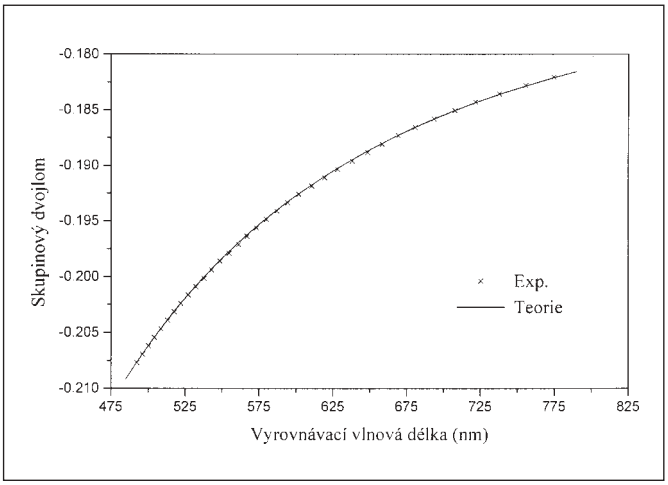
závislostí danou vztahy (2) a (5). Obrázek 4 tak ilustruje velmi dobrou shodu teorie s experimentem a postižení disperze dvojlomu krystalu islandského vápence v širokém spektrálním oboru.



Obr. 2 Spektrální interferogram pro první tloušťku jednoosého krystalu zaznamenaný při dráhovém rozdílu Δ_M =5 005 μm nastaveném v interferometru

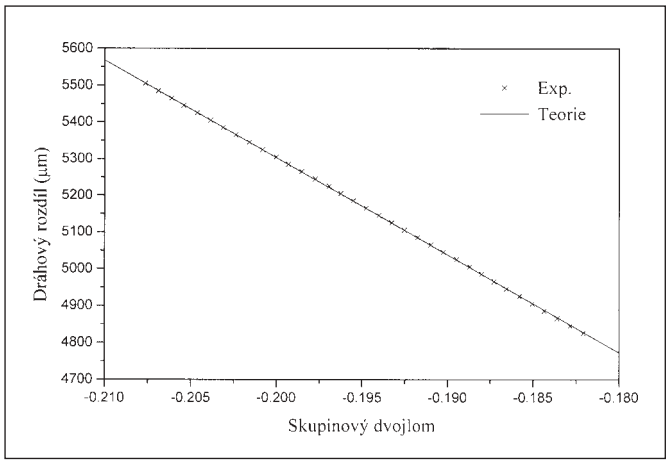


Obr. 3 Závislost naměřené vyrovnávací vlnové délky na nastaveném dráhovém rozdílu v Michelsonově interferometru pro první tloušťku jednoosého krystalu



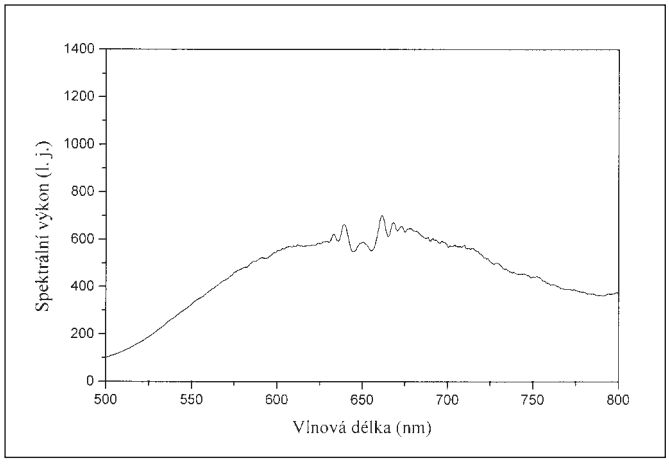
Obr. 4 Závislost naměřeného skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence na vyrovnávací vlnové délce spolu s teoretickou závislostí

Znalost disperzní relace pro dvojlom krystalu islandského vápence (5) umožňuje s použitím vztahů (2) a (4) zpřesnění určení tloušťky *t* dvojlomného krystalu. Vyneseme-li závislost dráhového rozdílu Δ_M nastaveného v Michelsonově interferometru na skupinovém dvojlomu $G(\lambda_0)$ krystalu islandského vápence, dostaneme podle vztahu (4) lineární závislost, jejíž směrnice určuje tloušťku *t* krystalu. Tuto skutečnost dokládá *obrázek 5*, ve kterém jsou experimentálně získané hodnoty proloženy přímkou, přičemž směrnice této přímky dává tloušťku t = (26514,4 ±1,4) μm, která je ve velmi dobré shodě se skutečnou tloušťkou krystalu.



Obr. 5 Závislost dráhového rozdílu nastaveného v Michelsonově interferometru na skupinovém dvojlomu krystalu islandského vápence spolu s teoretickou lineární závislostí

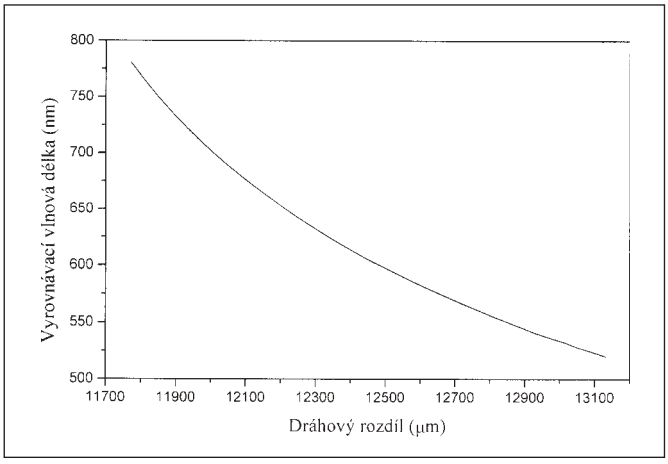
Dále jsme provedli záznam a vyhodnocení spektrálních interferogramů s určením odpovídajících vyrovnávacích vlnových délek pro druhou tloušťku dvojlomného krystalu. Na *obrázku 6* je pro ilustraci ukázán spektrální interferogram zaznamenaný pro nastavený dráhový rozdíl Δ_M = 12212 μm, kterému odpovídá vyrovnávací vlnová délka λ_0 = 650,19 nm. V porovnání se spektrálním interferogramem z obrázku 2 vidíme, že pro danou rozlišovací schopnost spektrometru lze z důvodů větší tloušťky a tedy vyšší disperze dvojlomného krystalu spektrální interferenční proužky rozlišit s menší viditelností a v užším spektrálním oboru.



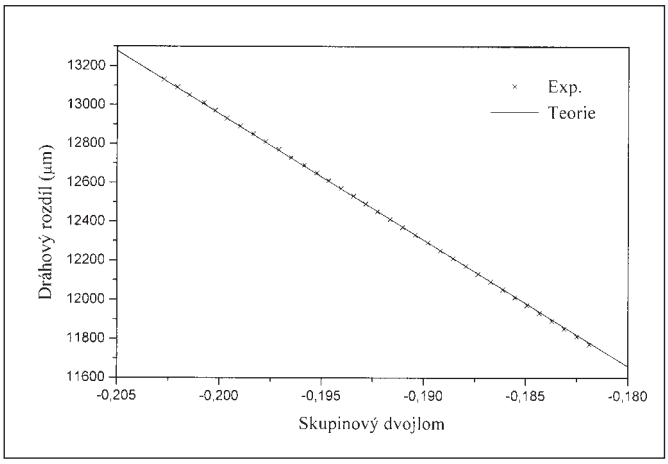
Obr. 6 Spektrální interferogram zaznamenaný pro druhou tloušťku jednoosého krystalu při dráhovém rozdílu Δ_M=12212 μm nastaveném v interferometru

Záznamem a vyhodnocením dalších spektrálních interferogramů jsme zjistili, že pro dráhový rozdíl Δ_M, nastavený v rozsahu od 11772 do 13132 μm, se vyrovnávací vlnové délky λ_0 mění v rozsahu

přibližně od 520 do 781 nm. To dokazuje o*brázek 7*, na kterém je znázorněna závislost změřené vyrovnávací vlnové délky λ_0 na dráhovém rozdílu Δ_M nastaveném v interferometru, který byl měněn s krokem 20 μm. Znalost skupinového dvojlomu $G(\lambda_0)$ krystalu islandského vápence nám opět umožňuje s použitím vztahů (2) a (4) zpřesnění určení jeho tloušťky *t*. Na *obrázku 8* je vynesena závislost dráhového rozdílu Δ_M nastaveného v Michelsonově interferometru na skupinovém dvojlomu $G(\lambda_0)$ krystalu islandského vápence spolu s proloženou přímkou. Směrnice této přímky nám dává tloušťku t = (64770,7 ±4,2) μm, která je opět ve velmi dobré shodě se skutečnou tloušťkou krystalu.



Obr. 7 Závislost naměřené vyrovnávací vlnové délky na nastaveném dráhovém rozdílu v Michelsonově interferometru pro druhou tloušťku jednoosého krystalu



Obr. 8 Závislost dráhového rozdílu nastaveného v Michelsonově interferometru na skupinovém dvojlomu krystalu islandského vápence spolu s teoretickou lineární závislostí

5. ZÁVĚR

Práce prezentuje novou metodu měření disperze dvojlomu jednoosých krystalů známé tloušťky. Metoda využívá tandemového uspořádání Michelsonova interferometru a měřeného dvojlomného krystalu s polarizátorem a analyzátorem a známého faktu, že spektrální interferenční proužky jsou na výstupu této konfigurace rozlišeny spektrometrem o nízké rozlišovací schopnosti pouze v okolí tzv. vyrovnávací vlnové délky. Jejím určením v závislosti na změně dráhového rozdílu nastaveného v interferometru lze přímo měřit spektrální závislost skupinového dvojlomu daného jednoosého krystalu známé tloušťky. Tímto novým způsobem byla v dostatečně širokém spektrálním oboru úspěšně změřena disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence.

Příspěvek dále ukazuje, že znalost disperze skupinového dvojlomu krystalu islandského vápence, v našem případě vyjádřená známými disperzními relacemi, dovoluje v souladu s teorií aproximovat dráhové rozdíly nastavené v interferometru jako lineárně závislé na skupinovém dvojlomu krystalu a že směrnice této lineární závislosti určuje s velkou přesností tloušťku krystalu. Výše prezentovaná metoda měření disperze skupinového dvojlomu může být využita při výzkumu disperze nových typů optických materiálů, popř. při návrhu např. optických vláknových senzorů, které využívají interferenci mezi polarizačními vidy optického vlákna.

Práce byla částečně podpořena Grantovou agenturou ČR (projekt č. 202/03/0776)

Literatura

[1] BORN, M. - WOLF, E.: Principles of Optics. Cambridge, Cambridge University Press 1999.
[2] MANDEL, L. - WOLF, E.: Optical Coherence and Quantum Optics. Cambridge, Cambridge University Press 1995.
[3] SÁINZ, C. *et al.*:. Real time interferometric measurements of dispersion curves. Opt. Commun., *110*, 1994, s. 381.
[4] KUMAR, V. N. - RAO, D. N.: Using interference in the frequency domain for precise determination of thickness and refractive indices of normal dispersive materials. J. Opt. Soc. Am., *B12*, 1995, s. 1559.
[5] HLUBINA, P.: Měření efektivní tloušťky polopropustného zrcadla nevykompenzovaného Michelsonova interferometru měřením vyrovnávací vlnové délky. JMO, *46*, 2001, s. 208.
[6] HLUBINA, P.: Měření koeficientu materiálové disperze optických vzorků s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. JMO, *47*, 2002, s. 153.
[7] SCHNELL, U. *et al.*: Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer on the target. Opt. Lett., *21*, 1996, s. 528.
[8] HLUBINA, P.: Měření vzdáleností a posunutí zrcadla interferometru s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. JMO, *48*, 2003, s. 50.
[9] NASSIF, A., Y.: Accurate measurement of refraction and dispersion of a solid by a double-layer interferometer. Appl. Opt., *36*, 1997, s. 779.
[10] LIANG, Y. - GROVER, C. P.: Modified white-light Mach-Zehnder interferometer for direct group-delay measurements. Appl. Opt., *37*, 1998, s. 4105.
[11] HLUBINA, P.: Měření vyrovnávací vlnové délky a mezividové disperze v optických vláknech s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. JMO, *47*, 2002, s. 69.
[12] HLUBINA, P.- MARTYNKIEN, T. - URBANCZYK, W.: Měření disperze dvojlomu v optických vláknech s eliptickým jádrem s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. JMO, *49*, 2004, s. 3.
[13] GHOSH, G.: Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystal. Opt. Commun., *163*, 1999, s. 95.
[14] HLUBINA, P.: Měření šířky odezvové funkce kompaktního spektrometru s využitím spektrální dvousvazkové interference. JMO, *46*, 2001, s. 22.
[15] HLUBINA, P.: Měření spektrální závislosti šířky odezvové funkce kompaktního spektrometru s využitím dvousvazkové spektrální interference v bílém světle. JMO, *47*, 2002, s. 312.

doc. RNDr. Petr Hlubina, CSc., Institut fyziky, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba,
tel.: 597 323 134, fax: 597 323 139, e-mail: petr.hlubina@vsb.cz

Jan TRUHLÁŘ, Karel STUDENOVSKÝ, Odbor přesné mechaniky a optiky Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze

Technologický vývoj, oblasti použití a dlouhodobé světelné charakteristiky LED diod

V článku jsou popsány základní technologické a konstrukční kroky ve vývoji LED diod od jejich uvedení na trh v šedesátých letech minulého století. Jsou zde uvedeny obecné informace o materiálových systémech, používaných technologiích a problémech souvisejících s tvarem čipu LED diod. Jedna z kapitol obsahuje přehled hlavních oblastí aplikací LED diod spolu s popisem základních vlastností a jejich srovnání s klasickými světelnými zdroji. Poslední část popisuje experiment, zaměřený na dlouhodobé sledování změn zářivého výkonu několika typů LED diod dostupných na trhu a přináší stručné zhodnocení naměřených výsledků.

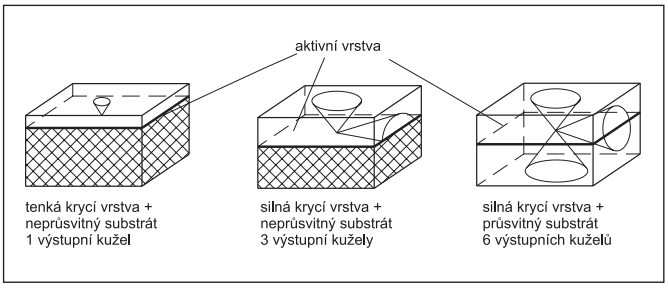
1. ÚVOD

První komerčně dostupné diody LED (LED z anglického Light Emitting Diode) ve viditelné oblasti byly nabídnuty firmou General Eletric Corporation na počátku šedesátých let minulého století [1]. Tomuto předcházelo téměř jedno desetiletí intenzivního výzkumu několika přírodních i umělých polovodičových sloučenin. Nabízené diody byly založeny na ternární sloučenině GaAsP a vyzařovaly v červené oblasti, jejich světelná účinnost se pohybovala v desetinách procenta a cena za kus se v té době dosahovala 260 dolarů! Od té doby prošel vývoj těchto polovodičových zdrojů záření velmi výrazným a prudkým vývojem, který odrážel značný komerční potenciál těchto zdrojů a byl podmíněn novými technologickými a konstrukčními přístupy v této oblasti.

2. HLAVNÍ TECHNOLOGIE

Z technologického hlediska sem patří především uplatnění epitaxní technologie růstu tenkých vrstev z plynné fáze metalo-organických sloučenin (MOCVD) a ze svazku molekul (MBE). Zvládnutí těchto technologií umožnilo výrobu jednoduchých a dvojitých heteropřechodů ze složitých polovodičových sloučenin, které fundamentálně zvýšily účinnost rekombinačních procesů ve struktuře čipu světloemitujících diod a tedy i vnitřní kvantovou účinnost diod. Díky vhodnosti technologie MOCVD pro hromadnou výrobu vytlačila tato do značné míry starší technologii založenou na růstu vrstev z kapalné fáze (LPE), která je navíc pro výrobu některých složitějších polovodičových sloučenin nevhodná [2]. Dnes se pro výrobu určitých struktur čipů používá kombinace obou technologií, protože je časově i technologicky velmi náročné vyrobit silné vrstvy pouze pomocí MOCVD. Struktura dvojitého heteropřechodu se dnes používá u naprosté většiny LED diod, výroba těch výkonnějších z nich je její existencí přímo podmíněna. Bohužel byť jen stručná diskuse tohoto fenoménu přesahuje rámec tohoto článku, ale poměrně dobře uspořádaný popis teorie a problematiky výroby heteropřechodů lze nalézt v literatuře [3].

Dalšího výrazného zvýšení účinnosti bylo dosaženo náhradou neprůsvitného substrátu GaAs, sloužícího pro růst celé řady optic-



Obr. 1 Zvýšení účinnosti emise záření záměnou substrátu neprůsvitného za průsvitný

ky aktivních polovodičových vrstev díky vhodné velikosti krystalové mřížky, substrátem GaP, který je pro viditelné záření s vlnovou délkou nad 550 nm dobře průsvitný díky své větší šířce zakázaného pásu (2,26 eV). Tento pokrok byl opět podmíněn zvládnutím technologie zvané v angličtině wafer bonding, kdy se růstový substrát GaAs odleptá vhodným činidlem a nový (GaP) se připojí k vytvořeným strukturám místo něho pomocí jednoosového tlaku za zvýšené teploty. Jak se taková záměna substrátů projeví na množství světla, které je schopno opustit diodu, je patrné na *obr. 1*.

3. MATERIÁLY

Výrazného rozšíření od počátku vývoje doznala také škála materiálů tvořících jednotlivé části čipu LED diod. Pro výrobu aktivních vrstev komerčně vyráběných diod se používají především ternární a kvaternární sloučeniny prvků ze IIIA a VA skupiny Mendělejevovy tabulky prvků. Mezi prvními byla zvládnuta výroba sloučeniny GaAs emitující v infračervené oblasti, dále následoval GaAsP a GaP, které se, dopované či nedopované dusíkem, dodnes používají pro výrobu méně výkonných LED. V současné době tvoří aktivní vrstvy čipů většinou sloučeniny na bázi AlGaAs, AlGaInP a GaInN, jež umožňují výrobu vysocesvítivých diod.

Každá z těchto polovodičových sloučenin nabízí jiné šířky zakázaného pásu a tudíž i jiné charakteristické barvy emitovaného světla. Tato závislost může být popsán přibližným vztahem:

$$\lambda = \frac{1,24}{E_g}$$

Kde λ je vlnová délka emitovaného světla v mikrometrech a E_g je šířka zakázaného pásu daného polovodiče v elektronvoltech.

Systém $Al_xGa_{1-x}As$ umožňuje účinnou emisi pouze červeného světla (nad 621nm), slitiny $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P$ mají podstatně větší možnosti a vyrábějí se z nich červeně, oranžově, jantarově a žlutě svítící diody. Konkrétní šířka zakázaného pásu těchto sloučenin a tedy i barva emitovaného světla je závislá na hodnotě x obsahu Al ve sloučenině.

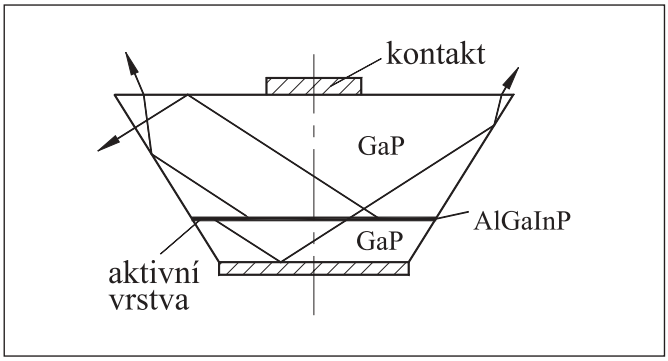
Výroba struktur pro LED diody na bázi GaInN byla technologicky zvládnuta až v průběhu devadesátých let minulého století. Diody založené na tomto materiálovém systému emitují světlo v blízké UV, fialové, modré a zelené části spektra. Modře emitující diody potom slouží také jako primární zdroj záření pro generaci bílého světla kdy se část zářivého toku transformuje pomocí fotoluminoforu na široké spektrum, čímž se docílí bílého vjemu z emitovaného záření.

4. VLIV TVARU ČIPU A VNĚJŠÍ SCHRÁNKY

Další cestou, kterou se ubírají snahy o zvýšení účinnosti diod LED byla změna tvaru čipu diody a vhodná volba materiálu epoxidové kapsle, ve které bývá čip zalit. Účelem těchto opatření je omezit co možná v největší míře ztráty způsobené totálním odrazem záření vygenerovaného v aktivní vrstvě zpět do čipu diody.

Tyto ztráty hrají významnou roli, protože index lomu polovodičů má hodnotu okolo 3,5, čemuž na rozhraní se vzduchem odpovídá úhel totálního odrazu zhruba 17° a značná část záření se tedy odráží zpět do čipu diody, kde se podílí především na generaci tepla.

K oddělení jednotlivých čipů ze základního plátku polovodičového substrátu se využívá řezání nebo štípání podél přirozených krystalografických rovin polovodiče. Výroba jiného tvaru čipu než je krychle či kvádr je velmi nákladná zahrnující většinou litografické postupy a dosud žádná z takových technologií nenašla širší uplatnění ve velkosériové výrobě LED diod. V roce 1999 však byla představena a popsána [4] dioda jejíž tvar čipu připomíná malou komolou pyramidu obráceno vzhůru nohama jak je patrné na *obr. 2*. Ze schématu je patrné že ostré rohy čipu výrazně zvyšují šanci záření uniknout z pasti totálního odrazu. Touto úpravou spolu s využitím nejlepších dostupných materiálů a technologií bylo dosaženo vnější kvantové účinnosti přesahující 50 % a světelné účinnosti až 100 lm na jeden Watt elektrického příkonu. Protože tento tvar čipu je možno vyrobit pomocí řezání ze základního substrátu, tedy bez dalšího litografického kroku, existuje větší šance že bude tuto technologii možno využít i komerčně.



Obr. 2 Schéma chodu vybraných paprsků v čipu tvaru převrácené pyramidy

5. OBLASTI APLIKACE SVĚTLOEMITUJÍCÍCH DIOD

Veškeré výše zmíněné postupy a konstrukce, jejichž výčet zde není zdaleka kompletní, tak spolu s výrazným zlepšením čistoty jednotlivých materiálů způsobily, že na současném trhu jsou dostupné diody LED v množství barev a tvarů, které lze těžko najít u jakéhokoliv jiného typu zdroje světla.

Je proto až s podivem, že přes veškerý vývoj a výrazné zlepšení charakteristik, jsou LED diody stále považovány za podřadnější zdroje sloužící především k indikačním a dekorativním účelům, na něž nejsou kladeny příliš vysoké požadavky z hlediska výkonu a kvality. V posledních několika letech však vysocesvítivé LED diody (také HB-LED z anglického High Brightness LED) nacházejí uplatnění v oblastech kde dříve dominovaly klasické zdroje (osvětlovací účely, přenosné svítilny apod.) a také často podmiňují vznik nových aplikací, kde by jiný zdroj nemohl být použit. Je pravdou že ač se termín HB-LED vyskytuje již několik let v odborné literatuře, neexistují žádná přesná kritéria pro oddělení vysocesvítivých LED diod od těch, řekněme, pro běžné účely. Hranice je velmi nejasná a pravděpodobně nikdy nedojde k definici jasné oddělovací čáry. Jedním z často uváděných kritérií je možnost funkčního použití takových diod (HB-LED) i v prostředí, které běžně ozařuje přímé sluneční světlo či jiný výkonný zdroj světla.

Důvodů pro stále širší uplatnění HB-LED je hned několik, mezi hlavní patří jejich vyšší světelná účinnost v porovnání s klasickými zdroji, výrazně vyšší světelný tok v porovnání s běžnými LED diodami, široká barevná škála emitovaného světla, minimální produkce tepla, malý zastavěný prostor, kompatibilita s elektronickými obvody, odolnost proti vlivům prostředí a v neposlední řadě dlouhá životnost, která je však z hlediska některých parametrů diskutabilní a bude ji věnována poslední část tohoto článku.

Všechny LED diody jsou z podstaty vzniku záření v polovodičových strukturách monochromatické zdroje s položířkou spektra okolo 20 nm, což je předurčuje k použití v aplikacích kde je třeba barevné světlo.

Jedinou výjimkou jsou bílé diody, jež jsou primárně také monochromatické, k dosažení dostatečně širokého spektra však využívají sekundárního mechanismu fotoluminiscence. Jejich využití potom zahrnuje velké množství aplikací pro obecné osvětlovací účely (Solid State Lightning), což je činí neobyčejně zajímavými z hlediska jejich komerčního využití v budoucnosti. Přehled nejvýznačnějších oblastí aplikací vysocesvítivých LED diod spolu s tržbami v jednotlivých oblastech za rok 2002 je v *tab. 1*.

Z tabulky 1 je patné, že trhu dominují zakázky z oblasti mobilních aplikací spotřební elektroniky. Tento trh bude s největší pravděpodobností dominovat i v následujících letech, ale jak již bylo zmíněno výše, výrobci LED diod očekávají největší růst v oblasti běžného osvětlení s využitím bílých LED. Světelná účinnost bílých LED dostupných na trhu se pohybuje okolo 50 lm/W zatímco u klasických wolframových žárovek je to pouze kolem 17 lm/W. Bohužel LED diody nemohou stále konkurovat klasickým zdrojům absolutním světelným výkonem a jejich cena za lumen je také několikrát vyšší. Celkový světelný tok jedné diody se totiž pohybuje v řádu jednotek lumenů, u těch nejlepších v desítkách lumenů, zatímco 60W wolframová žárovka produkuje zhruba 1100 lumenů. K použití LED diod bude tedy docházet převážně v aplikacích kde spolehlivost, barevnost, odolnost proti vnějším vlivům, dlouhá životnost a z toho plynoucí nízké náklady na výměnu a údržbu zdroje světla budou hrát větší roli než pořizovací cena a vysoký světelný výkon.

Tab. 1 Obrat trhu s vysocesvítivými LED diodami v jednotlivých segmentech trhu a jejich procentuální podíl na trhu v roce 2002. Převzato z [5]

Oblast aplikací	**Tržby za rok 2002**	**Konkrétní aplikace**
Mobilní přístroje	$716 mil. (40 %)	Podsvícení displejů a klávesnic mobilních telefonů, PDA, digitálních kamer
Informační tabule	$442 mil. (23 %)	Velkoplošné barevné obrazovky, informační panely pro řízení dopravy na dálnicích, mobilní informační zařízení
Automobily	$332 mil. (18 %)	Interiér (osvětlení palubní desky, svítidla pro usnadnění orientace), vnější osvětlení vozidel (zadní koncová a brzdová světla, směrová a obrysová světla)
Osvětlovací účely	$85 mil. (5 %)	Strojní vidění, osvětlení interiérů, speciální osvětlení, blesková světla aj.
Dopravní značení	$44 mil. (2 %)	Světla tříbarevné soustavy pro řízení provozu, navigační světla na letištích a železnici
Jiné	$221 mil. (12 %)	Indikační lampy v průmyslové a spotřební elektronice, zábavní produkty aj.

6. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DLOUHODOBÝCH CHARAKTERISTIK VYBRANÝCH SVĚTLOEMITUJÍCÍCH DIOD

Při úvaze o jakékoliv aplikaci diod LED je nutné dobře znát jejich vlastnosti jak světelné tak elektrické. Nejdůležitějšími světelnými vlastnostmi jsou celkový světelný výkon, spektrální charakteristika záření, prostorové rozložení světelného toku a časová stabilita světelného výkonu. První tři vlastnosti lze poměrně snadno vyčíst z prospektů každého renomovaného výrobce. Pro náročnější aplikace je vhodné provést přeměření těchto vlastností některou z metod používaných i pro klasické zdroje záření. Takový postup má u LED diod své opodstatnění, protože technologie jejich výroby podobně jako výroba jiných polovodičových prvků má částečně stochastický charakter a jednotlivé diody, byť se stejným typovým označením, se od sebe mohou více či méně lišit. Nejvýraznější rozdíly lze nalézt u prostorového rozložení intenzity vyzařování a celkovém vyzařovaném výkonu, relativně zanedbatelné jsou změny ve spektrálním rozložení záření.

Velmi problematická je naopak situace kdy je třeba nalézt informaci o životnosti některé konkrétní diody a o změnách jejího zářivého či světelného výkonu v čase. Obecně udávanou životností téměř u všech typů světloemitujících diod je 100 000 hodin. To je doba výrazně převyšující životnost jakéhokoliv jiného světelného zdroje a poukazuje na to, že u těchto zdrojů záření lze těžko předpokládat nějakou náhlou poruchu jak ostatně dokazují poměrně komplexní testy výrobců. Jen zřídka však lze nalézt změny parametrů během takto dlouhé doby či záruku, že zůstávají stabilní. To se však dá těžko předpokládat, protože procesy generující světlo v polovodičových strukturách podléhají degradaci v závislosti na době provozu a provozních podmínkách. Tímto tématem se již zabývalo mnoho studií zejména ve vztahu k polovodičovým laserům. Studie a experimenty vztahující se konkrétně na světloemitující diody lze nalézt v např. v [6], [7], [8]. V mnoha případech jde o procesy poměrně významné, velmi často překvapivě rychlé a tudíž se značným vlivem na úvahy o použití LED diod.

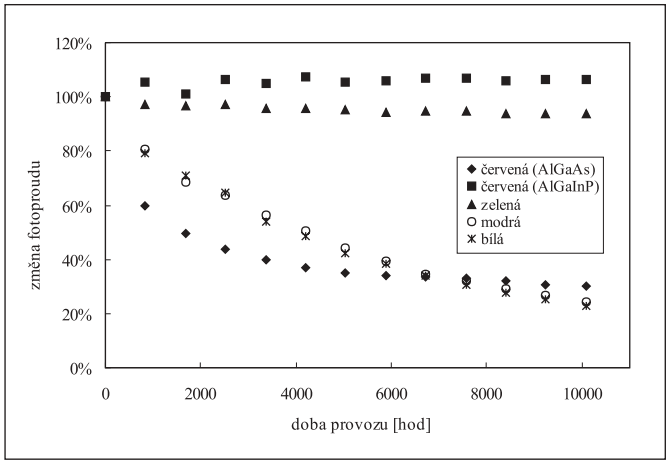
Experiment prováděný na Odboru přesné mechaniky a optiky se zabýval měřením změn zářivého výkonu za normálních teplotních podmínek u diod dosažitelných na trhu a použitelných v náročnějších aplikacích. K testu byly vybrány světloemitující diody renomovaných výrobců, klasické konstrukce s vnějším průměrem epoxidové schránky 3 a 5 mm. Testované diody emitovaly světlo v základních barvách tedy modré, zelené a červené. Součástí experimentu byly také bíle svítící diody.

7. POPIS EXPERIMENTU

Jednotlivé typy a základní charakteristiky testovaných diod jsou uvedeny v *tab. 2*. Uspořádání měřících míst a metodika experimentu byly velice jednoduché z důvodu maximálního omezení systematických chyb v průběhu dlouhotrvajícího měření. Tab. 2 obsahuje základní údaje o testovaných diodách a konečnou změnu vyzařovaného výkonu v procentech.

LED diody byly během experimentu umístěny ve světlotěsných komorách a v pravidelných intervalech byla část jejich světelného výkonu měřena pomocí velkoplošné fotodiody. Protože LED diody jsou velmi směrové zdroje tak takové uspořádání zajišťuje, že většina vyzařovaného výkonu dopadala na citlivou plochu fotodiody. Fotoproud vygenerovaný dopadem záření byl přímo snímán mikroampérmetrem a lze jej považovat za úměrný celkovému vyzařovanému výkonu.

LED diody byly v průběhu celého experimentu napájeny konstantním proudem, jehož hodnoty pro jednotlivé skupiny diod jsou opět uvedeny v tabulce 2. Doba trvání experimentu byla 10 000 hodin, tedy 1/10 udávané životnosti diod. Porovnat průběhy změn snímaného fotoproudu pro jednotlivé skupiny LED diod lze v grafu na *obr. 3*.



Obr. 3 Průměrná relativní změna hodnot fotoproudu pro jednotlivé skupiny LED diod v průběhu měření jejich zářivého výkonu

8. ZÁVĚR

Z naměřených hodnot (obr. 3) je patrný značný rozdíl ve světelném výkonu jednotlivých typů diod v průběhu experimentu. Zaznamenána je vždy relativní změna snímaného fotoproudu, kdy za 100 % byl brán počáteční údaj.

Za povšimnutí stojí především velmi rozdílné průběhy změny emitovaného výkonu pro červené diody. Zatímco diody s aktivní vrstvou z AlGaInP vykazovaly po 10 000 hodinách nepřetržitého provozu dokonce vyšší výkon než na začátku měření, u diod na bázi AlGaAs byl zaznamenán pokles výkonu v průměru na 30 %

Tab. 2 Základní parametry testovaných LED diod

Výrobce	Kingbright Ltd.	Nichia Corp.	Agilent Tech	Agilent Tech	Agilent Tech
Typové označení	LC-53 SRC/F	N301UGC	HLMP-CB15	HLMP-EH31	HLMP-CW31
Barva světla	červená	zelená	modrá	červená	bílá
Složení aktivní vrstvy	AlGaAs	InGaN	InGaN	AlGaInP	InGaN
Počet měřených diod	6	4	4	4	4
Napájecí proud [mA]	20	30	30	40	30
Katalog. osová svítivost [cd]	3,5 ÷ 4	2,2 ÷ 6,8	0,765 ÷ 1,575	1,9 ÷ 5,5	0,45 ÷ 0,6
Vyzařovací úhel $2\Theta_{1/2}$	30°	15°	15°	30°	15°
Rel. změna za 10 000 hod [%]	**30**	**94**	**24**	**107**	**23**

původní hodnoty. To je velmi výrazný rozdíl a patrně rozhodující pro aplikace vyžadující červené diody. Možné důvody pro tak významný pokles výkonu diod na bázi AlGaAs lze nalézt v [9]. Zde je zmiňována vysoká náchylnost Al ve sloučenině k oxidaci, ke které dochází navzdory zalití čipu do epoxidové schránky. Dalším důvodem je značný nárůst počtu dislokací v krystalové mřížce polovodiče způsobený mechanickým tlakem, který je důsledkem řádového rozdílu teplotních koeficientů roztažnosti samotného čipu diody a epoxidové schránky. A zdá se, že diody na bázi AlGaAs jsou na tento jev výrazně více citlivé.

Zelené diody na bázi InGaN vykazovaly v průběhu experimentu minimální změny ve vyzařovaném výkonu a z jejich průběhu lze těžko předpovídat další vývoj.

Nejvyššího poklesu, a to ve významné shodě, dosáhly diody svítící modře a bíle. Jde o diody stejného výrobce založené také na sloučenině InGaN a lze tedy předpokládat, že jde o stejný čip. To vede k závěru, že pokles výkonu bíle emitující diody je způsobem především degradací polovodiče a vliv luminoforu je zanedbatelný. Pokles zářivého výkonu za 10 000 hodin, což je doba o něco delší než jeden rok, byl v obou případech zhruba na čtvrtinu původního a jevil stále klesající tendenci. Tento jev, pokud se bude projevovat i u dalších generací diod, může velmi významně ovlivnit úvahy o možném nahrazení klasických zdrojů bílého světla diodami LED a bude zajisté předmětem dalšího zkoumání, stejně jako vliv teploty na degradaci světelného výkonu v čase.

Literatura

[1] SCHUBERT, F. E.: *Light Emitting Diodes*, 1st ed., Cambridge University Press, 2003, ISBN 0 521 53351 1

[2] STRINGFELLOW, G. B.: *Materials Issues in High-Brightness Light-Emitting Diodes* in *High Brightness Light Emitting Diodes* edited by STRINGFELOW, H. B. - CRAFORD, M. G., Semiconductors and Semimetals Vol. 48, 1st ed., Academic Press, 1997, ISBN 0-12-752156-9

[3] KISH, F.A. – FLETCHER, R. M.: A*lGaInP Light Emitting Diodes* in *High Brightness Light Emitting Diodes* edited by STRINGFELOW, H. B. - CRAFORD, M. G., Semiconductors and Semimetals Vol. 48, 1st ed., Academic Press, 1997, ISBN 0-12-752156-9

[4] KRAMES M. R. et. al.: *High-Power truncated-inverted-pyramid (AlxGa1-x)0.5In0.5P/GaP light-emitting diodes exhibiting >50 % external quantum efficiency*, Appl. Phys. Lett. 75, pp. 2365, 1999

[5] STEELE R.: *HB-LEDs: the market drive towards solid-state lighting*, COMPOUND SEMICONDUCTOR, Three-Fives and Silicon Heterostructures, Vol. 8, No. 11, DEC 2003

[6] CHUANG S.L. - ISHIBASHI A. - KIJIMA S., at al.: *Kinetic model for degradation of light-emitting diodes*, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, Vol. 33, No. 6, 970-979, JUN 1997

[7] YANAGISAWA T. - KOJIMA T.: *Degradation of InGaN blue light-emitting diodes under continuous and low-speed pulse operations*, MICROELECTRONICS RELIABILITY 43: 977-980, JUN 2003

[8] YANAGISAWA T.: *The degradation of GaAlAs red light-emitting diodes under continuous and low-speed pulse operations*, MICROELECTRONICS RELIABILITY 38: 1627-1630, 1998

[9] STERANKA F. M.: *AlGaAs Red Light-Emitting Diodes* in *High Brightness Light Emitting Diodes* edited by STRINGFELOW, H. B. - CRAFORD, M. G., Semiconductors and Semimetals, Vol. 48, 1st ed., Academic Press, 1997, ISBN 0-12-752156-9

Ing. Jan Truhlář, tel.: 607 617 952, email: xtruhlarj@seznam.cz,
Prof. Ing. Karel Studenovský, DrSc., tel.: 224 352 434, email: karel.studenovsky@fs.cvut.cz
Fakulta strojní ČVUT, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Odbor přesné mechaniky a optiky, Technická 4, 166 07 Praha 6

Z dílny starých mistrů

(24. pokračování)

- Čisticí prostředek k odstranění rezavých skvrn železa nebo oceli lze podle Buchnera odstranit tímto roztokem: smíchá se a) 100 g chloridu cíničitého v malých dávkách a za stálého třepání s 1 litrem vody; přitom zahřátá tekutina se nechá vychladnout. Potom se rozpustí: b) 2,5 g kyseliny vinné v 1 litru vody a smísí se s roztokem a) Do této směsi se po dostatečném protřepání přidá 20 ccm indiga ve stonásobném rozředění vodou. Doporučuje se řádné protřepání.

- K témuž účelu slouží směs 20 dílů dýmavé kyseliny sírové, 2 dílů loje a 4 dílů parafinu, které se roztaví a smísí. Potom se pomalu vmíchá 30 dílů mleté pemzy. Směs se míchá až do vychladnutí.

- Zkorodovaná místa niklových předmětů se odstraní tak, že tato se nejdříve natřou tukem a po několika dnech se pravidelně potírají čpavkem. Porušený povrch do hloubky vyžaduje roztok kyseliny šťavelové nebo zředěnou kyselinu solnou. Působení obou kyselin však může trvat jen okamžik. Potom následuje omytí vodou a houbou. K leštění se používá triplová lešticí hlinka nebo lešticí červeň. Podle potřeby se postup opakuje.

- K leštění desek z tvrdé gumy (ebonitu) se podle druhu gumy a typu požadované politury použije pemza, anglická červeň, triplová lešticí hlinka nebo směs těchto látek v různých stupních tvrdosti. Desky se nejdříve brousí smirkovým papírem a obrousí-li se nejjemnějším zrněním smirku, pak se leští pemzou s vodou a parafinovým olejem, potom dodatečně tripelovou lešticí hlinkou a nakonec se leští flanelem.

- K dosažení vysokého lesku tvrdých gumových desek se tyto přeleští plaveným smirkem a olejem, načež se vyleští na vysoký lesk směsí nejjemnější lešticí červeně a vídeňského vápna v poměru 5:1 s olejem. Obtížnou a zdlouhavou práci urychlí a usnadní použití na soustruhu upevněných kotoučů.

CONTENTS

Elastic Peak Electron Spectroscopy - A Newish Method for Surface Studies (J. Pavluch) 174

Raster optical systems (M. Jiráček) 180

Recent acquisitions of the SPIE/CS library 184

Looking back for the exhibition Interkamera 2005
The significance of solar energy is rising (M. Křížek) 188
Already 23rd Interkamera exhibition was held April 13 - 15, 2005 in the middle and right wings of the Industrial Palace of Prague Exhibition Centre, Czech Republic. I do not want to recur the change of numbering of previous events, details can be seen in [1]. However, let us have a look at what are the differences between this year event and past ones.

The mobile robots for manipulation task in health area
(L. Kárník, V. Buzek) 192
The mobile robots they can practice order manipulation tasks and replace by monotonous work practice of human being. In any case there is concern manipulation with a dangerous material such as laboratory samples virus etc. The mobile robots they can manipulated with heavy and large subjects too. The some of mobile robots we can exploited to transporting of patient.

The significance of solar energy is rising
(P. Bican, J. Mareš) 195

Measurement of group birefringence of a calcite crystal using white-light spectral interferometry (P. Hlubina) 196
A spectral interferometric method is used to a direct measurement of the group birefringence dispersion of a calcite crystal over a wide wavelength range. We use a tandem configuration of a Michelson interferometer and a birefringent crystal of known thickness to be measured with a polarizer and an analyzer and the fact that the spectral interference fringes are resolved at the output of this configuration by a low-resolution spectrometer only in the vicinity of the so-called equalization wavelength. Determining the equalization wavelength as a function of the path difference adjusted in the interferometer, the spectral dependence of the group birefringence of a given uniaxial crystal can be measured directly and it can be compared with theory. Moreover, this contribution shows that values of the path differences adjusted in the interferometer are in accordance with the theory linearly dependent on the group birefringence of the calcite crystal and the slope of the linear dependence gives thickness of the birefringent crystal with a high precision.

Technological development, applications and long term light characteristic of LEDs (J. Truhlář, K. Studenovský) 200
This paper reports on several important aspects of Light Emitting Diodes technology and design development since their first introduction in the early 1960s. General information on material systems, basic technologies and chip shape design is provided. One chapter is devoted to a brief overview of major application areas of LEDs including also short discussion of their basic properties as well as their comparison to the traditional light sources. Last part describes our research of light output changes in time of several types of LEDs available on the market and it further brings several considerations of the consequences resulting from data obtained.

SPIE/CS - Society of optics informs 204

ANOTACE

Srovnání výsledků optického a RTG měření 88 polyetylenových náhrad kyčelního kloubu typu ABG 1
(J. Gallo, V. Havránek, A. V. Florschutz) 185
Článek se zabývá vzájemnými vztahy mezi hodnotami lineárního opotřebení polyetylenových jamek totálních náhrad kyčelního kloubu měřených různými metodami. Opotřebení jsou měřena jednak manuálně RTG metodami (Livermore, Charnley a Door) in vivo a dále in vitro naší metodou pomocí univerzálního měřicího mikroskopu. Srovnávanou hodnotou je rychlost lineárního posunu kloubní hlavičky. Statistickými metodami jsou rozebrány přesnosti jednotlivých metod z hlediska náhodných a systematických chyb s cílem stanovit eventuální systematické chyby jednotlivých metod, nebo regresní závislost. Analýza stanovila jako nejpřesnější Livermore metodu, kterou následuje Charnleyho metoda, nejméně přesná je Dorrova metoda.

SPIE/CS – společnost optiků informuje

Nabízíme k prodeji následující sborník SPIE:
Proceedings of SPIE
XV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers
Chair/Editor: Jarmila Kodymová
Organized by: Institute of Physics of Academy of Sciences (Czech Republic) with the participation of Institute of Plasma Physics of Academy of Sciences (Czech Republic)
30 August-3 September 2004, Prague, Czech Republic
Vol. 5777, Part One of Two Parts

Cena: pro členy SPIE/ CS - 2 400,- Kč/ks + poštovné
pro ostatní - 2 900,- Kč/ks + poštovné

Sborník lze objednat u pí Kučerové v knihovně SPIE/CS na adrese: SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 504, 585 631 535, e-mail: kucerova@optnw.upol.cz

Prodej sborníku proběhne do vyčerpání zásob v pořadí dle došlých žádostí.