

**10**  
**2007**

# JMO

## JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA FINE MECHANICS AND OPTICS

Český metrologický institut



Okružní 31, 638 00 Brno





**AQUASTYL**®  
SLOVAKIA, s.r.o.



MUK-F 300 PC



V 10K/AQ



IL 100R/2000



RB-1 PC/AQ



HPO 3000 K/AQ



HPO 250 K/AQ



*Výroba, obchod, servis,  
kalibrácie a predaj  
meracej techniky v odboroch:*

- » geometrické tvary
- » tvrdosti materiálov
- » vibrácie ložísk

AQUASTYL SLOVAKIA, s.r.o.  
Orlové 277, 017 01 Považská Bystrica  
Slovensko

Tel.: +421/42/432 9901  
Fax: +421/42/432 6106  
E-mail: [aquastyl@aquastyl.sk](mailto:aquastyl@aquastyl.sk)  
[www.aquastyl.sk](http://www.aquastyl.sk)

## REDAKČNÍ RADA

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

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

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

## JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

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

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

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

**Šéfredaktor:** dipl. tech. Jaroslav NEVŘALA

**Adresa redakce v Olomouci** (předplatné, nakladatelské služby):

SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc,  
tel.: 585 631 576, fax: 585 631 531, e-mail: eva.pelclova@upol.cz

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

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

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

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

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

**V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá:**

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

**Tiskne** TYPOservis Holešov, Masarykova 650, 769 01 Holešov,

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

**Inzerce:** redakce, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov,

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

Odborné články jsou lektorovány.

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2007

# JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS  
ROČNÍK 52

10/2007

## OBSAH

**Analyza povrchovej morfológie LED štruktúr na báze In(AlGa)P/InGaP/GaP pomocou metód AFM a NSOM** (S. Ďatko, J. Kováč, D. Haško, A. Šatka, S. Hasenöhrl) ..... 275

**Artefakty v rastrovací optické mikroskopii v blízkom poli** (P. Klapetek, J. Buršík) ..... 279

**Analyza povrchovej morfológie tenkých vrstiev ZnO pripravených RF naprašovaním pomocou atómovej silovej mikroskopie** (D. Haško, J. Kováč, I. Novotný a Ľ. Jánoš) ..... 281

**Studium fotodynamického efektu na nádorových bunčných liniách pomocou mikroskopie atomárných sil** (K. Tománková, H. Kolářová, R. Bajgar, M. Vůjtek, H. Dušková) .... 285

**Submikrometrová analýza dislokácií v polovodičoch a dielektrikách** (Š. Lányi, V. Nádaždy, M. Hruškovic, J. Hribík) ..... 290

**Testování solárního regulátoru v malém fotovoltaickém systému** (J. Mareš, M. Libra) ..... 292

**AQUASTYL SLOVAKIA s meracou technikou v európskej špičke** (M. Vychodil, J. Nevřala) ..... 295

**RNDr. Jaroslav PECHAR – výročí narodení** (J. Eigl) ..... 297

**Význam fyziky pre súčasnú spoločnosť** (J. Krempaský).... 297

**Mimoosové priblížení Fresnelovy difrakce** (M. Miler, M. Hradil, J. Pala, I. Aubrecht) ..... 300

**Laboratoř fyzikální energetiky otevřena** (J. Blahovec).... 303

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, s.r.o., Přerov (Czech Rep.)  
**Members:** Ján BARTL - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Zdeněk BOUCHAL - Palacky Univ. (Czech Rep.), Igor BREZINA - Bratislava (Slovak Rep.), Pavol HORNÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav HRABOVSKÝ - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP - Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRABÍK - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch KRŠÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Bohumila LENCOVÁ - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric. Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠTÁK - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), František MÁČA, Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Ing. Monika MÍČHALOVÁ, PHILIPS Slovakia s.r.o., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav MILER - Inst. of Photonics and Electronics of Academy of Sciences, v.v.i., Praha (Czech Rep.) Jan PEŘINA - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jaromír PIŠTORA - Tech. Univ., Ostrava (Czech Rep.), Jaroslav POSPÍŠIL - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Dagmar SENDERÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Petr SCHOVÁNEK - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Karel STUDENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

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

## FINE MECHANICS AND OPTICS

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

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

**Editor:** Miroslav HRABOVSKÝ

**Managing Editor:** Jaroslav NEVŘALA

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

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

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

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

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

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

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

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

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2007

# FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL  
VOLUME 52 10/2007

## CONTENTS

**Surface morphology analysis of LED structures based on In(AlGa)P/InGaP/GaP by means of AFM and NSOM methods** (S. Ďatko, J. Kováč, D. Haško, A. Šatka, S. Hasenöhrl) ..... 275

**Artefacts in near-field scanning optical microscopy** (P. Klapetek, J. Buršík)..... 279

**Surface morphology analysis of ZnO thin films deposited by RF sputtering using an atom force microscopy** (D. Haško, J. Kováč, I. Novotný a L. Jánoš) ..... 281

**Study of photo-dynamic effect on tumour cell lines using an atom force microscopy** (K. Tománková, H. Koldářová, R. Bajgar, M. Vůjtek, H. Dušková) ..... 285

**Sub-micrometre-scale analysis of defects in semiconductors and dielectrics** (Š. Lányi, V. Nádaždy, M. Hruškovic, J. Hribík) ..... 290

**Testing of solar controller in a small photo-voltaic systém** (J. Mareš, M. Libra)..... 292

**Aquastyl Slovakia - top European measurement technique** (M. Vychodil, J. Nevřala)..... 295

**RNDr. Jaroslav Pechar – birth anniversary of** (J. Eigl)..... 297

**Value of physics for modern civilisation** (J. Krempaský) .....297

**Off-axis Fresnel diffraction approximation** (M. Miler, M. Hradil, J. Pala, I. Aubrecht) ..... 300

**Laboratory of physical electronics is opened** (J. Blahovec) ..... 303

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



# Analýza povrchovej morfológie LED štruktúr na báze In(AlGa)P/InGaP/GaP pomocou metód AFM a NSOM

V práci sú vyšetrované štrukturálne vlastnosti povrchu vzorky GaP/In<sub>0→0,76</sub>Ga<sub>1→0,24</sub>P/In<sub>0,76</sub>(AlGa)<sub>0,24</sub>P, v ktorej aktívnu oblasť LED štruktúry tvorí P-N priechod v kvaternárnom materiáli In(AlGa)P. Povrchová morfológia bola skúmaná pomocou metódy AFM v kontaktnom a semikontaktnom režime. Namerané výsledky boli porovnané s výsledkami merania optickej priepustnosti pomocou NSOM, ktorý pracoval v „shear force“ režime a umožňoval meranie transmisie využitím zahroteneho optického vlákna. Cieľom práce je porovnanie výsledkov meraní povrchovej morfológie LED štruktúr mriežkovo neprispôsobených k podložke, získané použitím rôznych metód SPM.

## ÚVOD

V súčasnosti jednou z aktuálnych oblastí výskumu sú diódy emitujúce optické žiarenie (LED). Vývoj je zameraný na rôzne materiály, ktoré sú využívané u LED štruktúr ako sú AlGaAs, AlInGaP a InGaP v aktívnej vrstve pripravené na GaAs substráte s možnosťou mriežkového prispôsobenia rastených vrstiev. Nevýhodou tohto substrátu je jeho nepriepustnosť pre viditeľné optické žiarenie. Na vyriešenie tohto problému sa využívajú zložité technológie vytvárania Braggových zrkadiel, alebo technika „wafer bonding“, kde GaAs je nahradený GaP substrátom [1]. Na základe týchto skutočností sa stali predmetom záujmu LED štruktúry priamo pripravené na podložke GaP, ktorá je pre viditeľné optické žiarenie priepustná. Indium gálium fosfid (In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>P) reprezentuje ternárnu zlúčeninu vhodnú pre LED aplikácie s možnosťou priameho rastu na GaP. Vysoko účinná žiarivá rekombinácia sa dá dosiahnuť v materiáli s priamou štruktúrou energetického pásu. Pre zlúčeninu In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>P priama pásová štruktúra začína pre  $x < 0,71$ , avšak mriežková konštanta tejto zlúčeniny je o 2,2% väčšia oproti mriežkovej konštante GaP podložky. Ak zoberieme tento fakt do úvahy, tak problematickú časť pri technike epitaxného rastu reprezentuje veľký mriežkový nesúlad medzi GaP a rôznym zložením In<sub>1-x</sub>(AlGa)<sub>x</sub>P epitaxných vrstiev, tento problém je riešený rastom gradovaných vrstiev. V dôsledku veľkého mriežkového neprispôsobenia vzniká v epitaxných štruktúrach napätie, ktoré relaxuje prostredníctvom siete misfit dislokácií. Ich prítomnosť sa na povrchu prejavuje vo forme typickej, tzv. „cross-hatch“ štruktúry.

## EXPERIMENT

Na obrázku 1 je znázornená reálna štruktúra In<sub>0,76</sub>(AlGa)<sub>0,24</sub>P LED overená niekoľkými analyzačnými metódami. Vrstvy In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>P boli narastené na AIXTRON AIX 200 (low-pressure RF-heated LP MOVPE) zariadení na substráte GaP dopovanom sírou. Skokovo gradovaná medzivrstva pozostáva z 300nm GaP vrstvy a ôsmich 300nm hrubých In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>P individuálnych vrstiev so zmenou kompozície  $x$  s rozdielom medzi krokmi  $\Delta x = 0,04$ . Vrchné vrstvy LED pozostávajú z 1000nm Si dopovanej In<sub>0,76</sub>(AlGa)<sub>0,24</sub>P a z 1000nm Zn dopovanej In<sub>0,76</sub>(AlGa)<sub>0,24</sub>P vrstvy. Ohmický kontakt na  $n$ -strane (Ni/Au/Ge) a na  $p$ -strane (Pd/Be/Pd) LED štruktúry bol naparený a zažíhaný vo formovacom plyne H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> (20% / 80%).

<b>p – kontakt</b>	
$p - \text{In}(\text{AlGa})\text{P}$	In <sub>1-x</sub> (AlGa) <sub>x</sub> P:Zn, (1-x) = 0,24, 1000 nm
$n - \text{In}(\text{AlGa})\text{P}$	In <sub>1-x</sub> (AlGa) <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,24, 1000 nm
$n - \text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ gradovaná vrstva 8 x 300 nm	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,24, 300 nm
	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,21, 300 nm
	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,18, 300 nm
	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,15, 300 nm
	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,12, 300 nm
	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,09, 300 nm
	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,06, 300 nm
	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P:Si, (1-x) = 0,03, 300 nm
$n - \text{GaP}$ substrát	GaP:Si buffer 290 nm
<b>n – kontakt</b>	

Obr. 1 Znázornenie reálnej štruktúry In(AlGa)P LED priamo narastenej na GaP

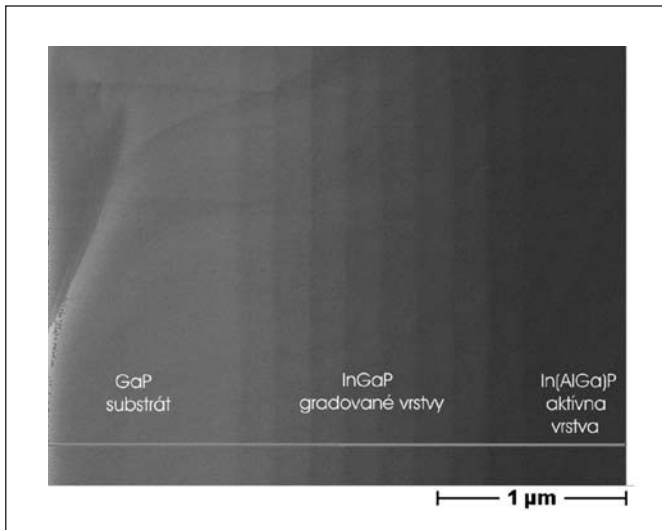
## VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na obrázku 2 je SEM snímka priečného lomu In<sub>1-x</sub>(AlGa)<sub>x</sub>P/In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>P/GaP štruktúry nasnímaná v režime SE. Je na ňom viditeľné rozhranie s GaP substrátom (vľavo), gradované medzivrstvy In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>P a rozhranie s In<sub>1-x</sub>(AlGa)<sub>x</sub>P vrstvou vpravo.

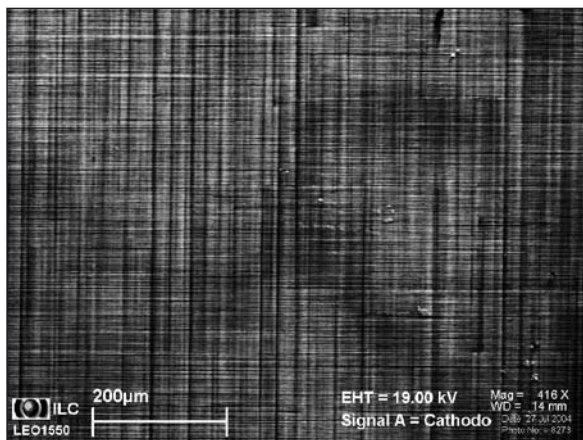
Obraz povrchu vzorky získaný SEM v režime katódy -luminiscencie je na obr. 3. V dôsledku veľkého mriežkového neprispôsobenia a napätia v štruktúre vrstiev vznikajú tzv. „crosshatch“ defekty, keďže mriežkové neprispôsobenie je 2,2% medzi GaP substrátom a vrchnou In<sub>0,76</sub>(AlGa)<sub>0,24</sub>P vrstvou.

Zariadenia AFM a NSOM, pomocou ktorých boli získané údaje o morfológii povrchu vzorky, sú na obrázku 4.

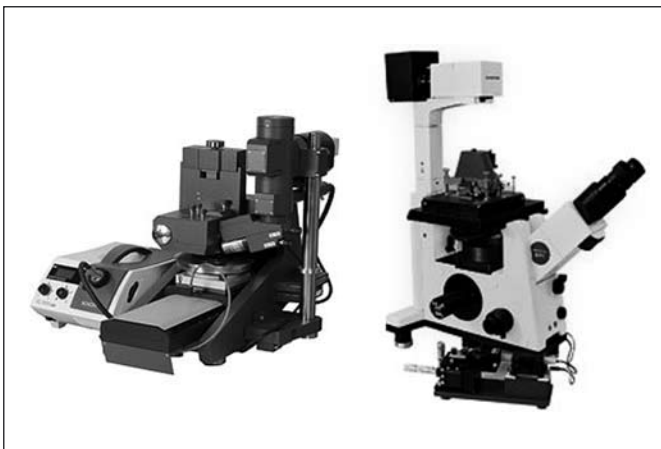
AFM zariadenie SOLVER LS umožňuje merať vzorky s maximálnou veľkosťou do 300 mm (priemer vzorky) a hrúbkou vzorky do 15 mm.



Obr. 2 SEM snímka priečneho lomu  $\text{In}_{1-x}(\text{AlGa})_x\text{P}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}/\text{GaP}$  štruktúry



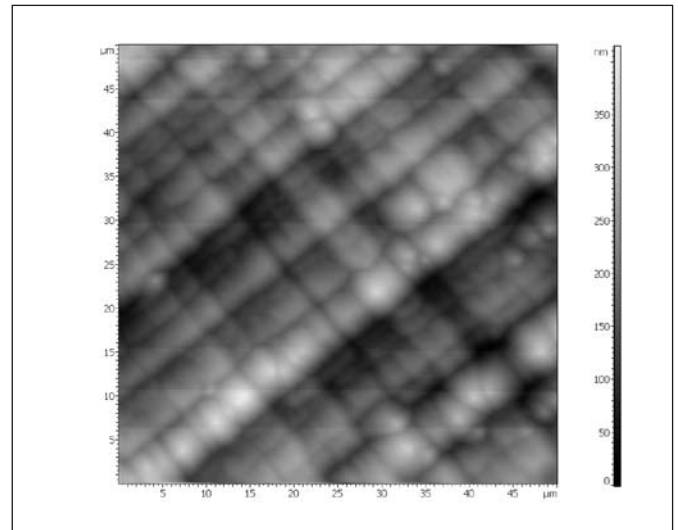
Obr. 3 Katódo - luminiscenčné zobrazenie vrchnej časti  $p$ -typu  $\text{In}_{0,76}(\text{AlGa})_{0,24}\text{P}$



Obr. 4 Fotografia AFM – SOLVER LS (naľavo) a NSOM zariadenia (napravo)

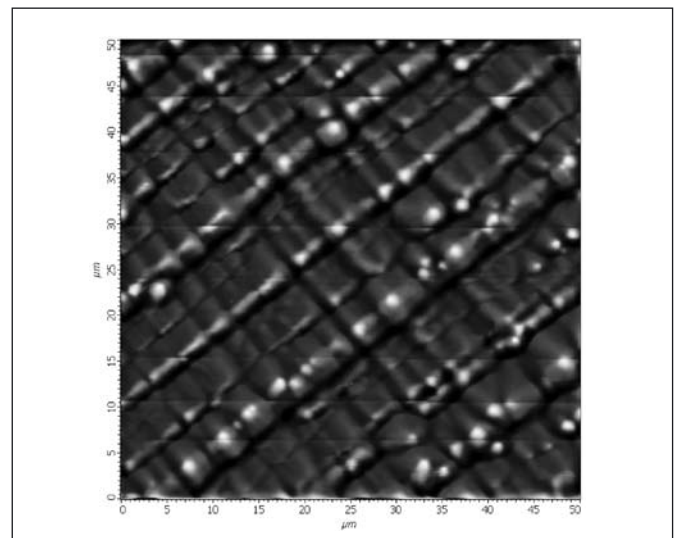
Pomocou NSOM zariadenia zobrazeného na obr. 4 je možné snímanie povrchu vzorky pomocou priepustného a odrazového režimu optického žiarenia. Rozsah snímania je  $80 \times 80 \times 4$  mm s rozlíšením lepším ako 100 nm. NSOM zariadenie je dodávané spolu s invertovaným optickým mikroskopom Olympus IX-70 (IX-50), alebo Biolam-P.

Obrázok 5 bol získaný pomocou AFM v kontaktnom režime [2,3]. Znáznomené je 2D zobrazenie, kde je vidieť štruktúru tzv. „crosshatch“ defektov. Výška jednotlivých oblastí je znázornená pomocou mierky na pravej strane obrázka.



Obr. 5 2D zobrazenie povrchu vzorky pomocou AFM pracujúceho v kontaktnom režime

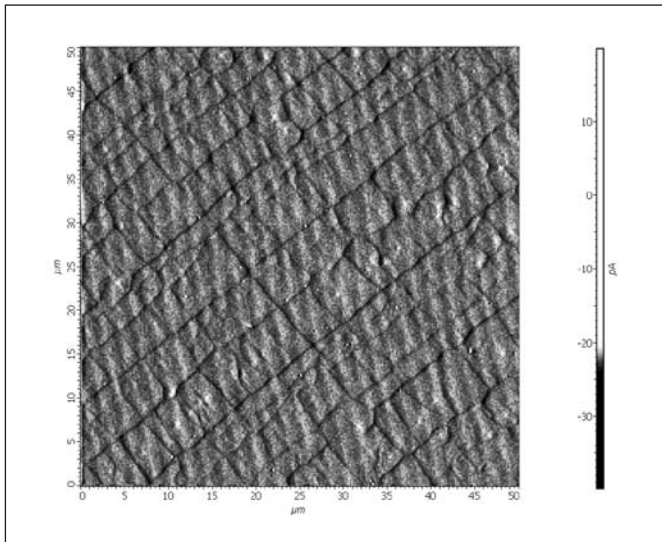
Vhodnou korekciou obrázku 5 pomocou softvéru je možné modifikovať detailnejšie zobrazenie povrchovej morfológie vzorky, ako je to znázornené na obrázku 6.



Obr. 6 2D zobrazenie povrchu vzorky pomocou AFM pracujúceho v kontaktnom režime s využitím softvérovej korekcie

Pomocou „Spreading Resistance“ metódy AFM pracujúcej v kontaktnom režime bolo možné zobraziť moduláciu vodivosti (resp. odpor) jednotlivých oblastí na povrchu vzorky. Aplikáciou napätia medzi hrotom sondy, ktorý sa pohyboval naprieč povrchom vzorky a samotnou vzorkou, ktorá bola pripojená na nulový potenciál, je možné merať prúd, ktorého veľkosť závisí od lokálnej hodnoty odporu jednotlivých oblastí vzorky. Na obrázku 7 je 2D obraz povrchu vzorky získaný pomocou metódy „Spreading Resistance“.

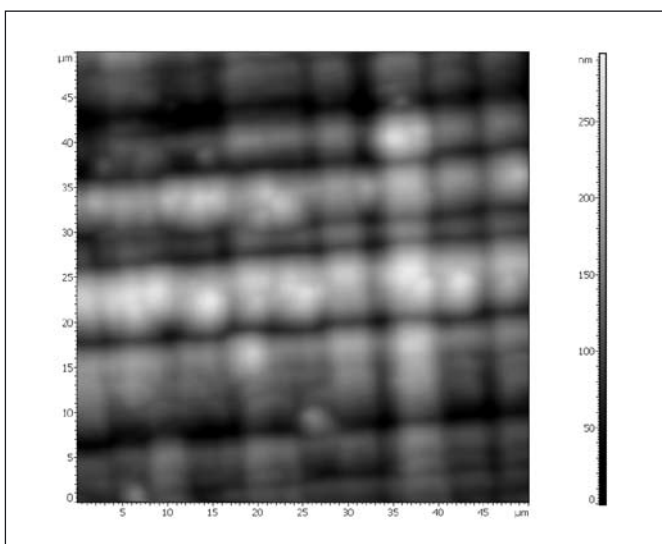
Oblasti na obrázku 7 znázornené tmavšou farbou reprezentujú oblasti s nižšou vodivosťou (resp. vyšším odporom). Hodnota prúdu sa pohybovala rádovo v pA pri aplikovaní napätia  $U = 10$  V medzi hrotom a povrchom vzorky.



Obr. 7 2D zobrazenie povrchu vzorky pomocou AFM pracujúceho v kontaktnom režime s využitím módu „Spreading Resistance“

Na obrázku 7 je možné pozorovať oblasti s rozdielnou vodivosťou, ktorej veľkosť závisí od povrchovej morfológie na rozhraniach „crosshatch“ defektov.

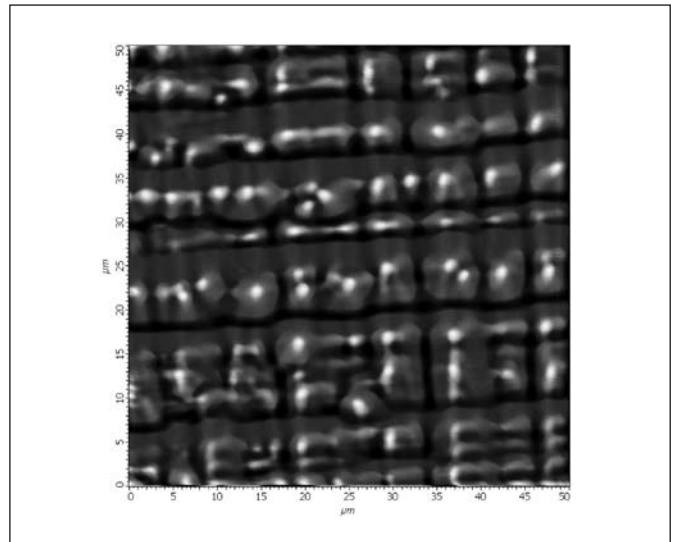
Zobrazenie povrchovej morfológie získané pomocou AFM v semikontaktom režime je na obrázku 8.



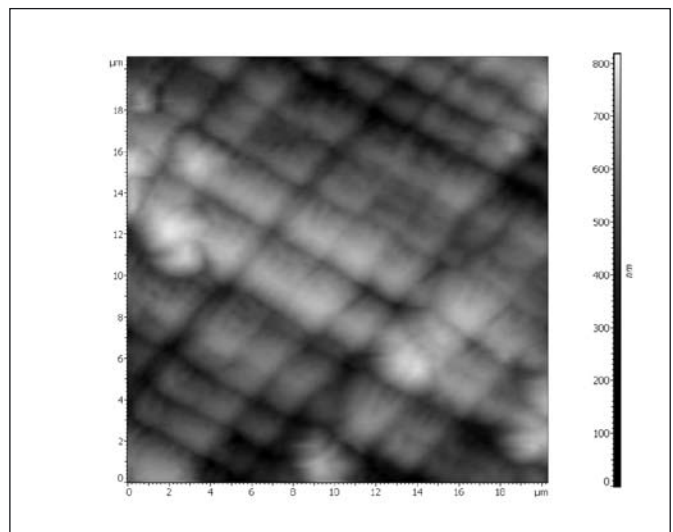
Obr. 8 2D zobrazenie povrchu vzorky pomocou AFM pracujúceho v semikontaktom režime

Podobne, ako v kontaktnom režime u metódy AFM, sú pozorovateľné tzv. „crosshatch“ defekty na povrchu vzorky. Oblasť, ktoré sú znázornené tmavšou farbou, sú oblasti dosahujúce menšiu výšku objektov nachádzajúcich sa na povrchu vzorky. Pomocou softwarovej korekcie obrázku 8 je možné detailnejšie zobrazenie povrchu vzorky, ako je to znázornené na obrázku 9.

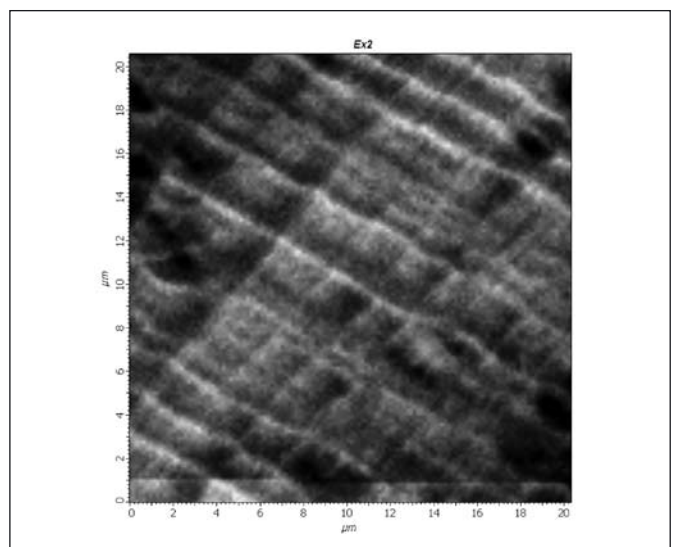
Ďalšou metódou, pomocou ktorej bola zisťovaná povrchová morfológia vzorky, je NSOM, ktorá pracuje v tzv. „shear force“ režime so súčasným meraním optickej priepustnosti [4, 5, 6, 7]. V režime „shear force“, ktorého princíp činnosti je založený na zisťovaní zmeny interakčných síl pôsobiacich medzi hrotom a povrchom vzorky (hrot nie je v priamom kontakte s povrchom vzorky), je možné zobrazenie povrchovej morfológie vzorky, ako je to znázornené na obrázku 10.



Obr. 9 2D zobrazenie povrchu vzorky pomocou AFM pracujúceho v semikontaktom režime s využitím korekcie pomocou vhodného softwaru



Obr. 10 2D zobrazenie povrchu vzorky pomocou NSOM pracujúceho v „shear force“ režime



Obr. 11 2D zobrazenie povrchu vzorky pomocou NSOM pracujúceho v priepustnom režime



Priepustný režim, ktorého princíp činnosti sa zakladá na detekcii lokálnej zmeny prestupu a absorpcie optického žiarenia prechádzajúceho vzorkou, je znázornený na obrázku 11. Tmavšie oblasti na obrázku 11 sú oblasti s vyššou absorpciou optického žiarenia. Údaje, ktoré boli získané v priepustnom režime, boli merané pomocou laserovej diódy s optickým výkonom 25 mW emitujúcej na vlnovej dĺžke 635 nm s kolimovaným zväzkom.

V tabuľke 1 sú zhrnuté údaje charakterizujúce povrchovú morfológiu vzorky.

Tab. 1 Porovnanie údajov o morfológii povrchu vzorky

	režim	Maximálna výška	Priemerná výška	Priemerná drsnosť
AFM	kontaktný	~ 590 nm	~ 200 nm	~ 60 nm
	semikontaktný	~ 290 nm	~ 120 nm	~ 40 nm
NSOM	„shear force“	~ 230 nm	~ 90 nm	~ 30 nm
	priepustný	-	-	-

Ako je vidieť z porovnania výsledkov, najvyššia hodnota priemernej drsnosti povrchu bola nameraná metódou AFM pracujúcej v kontaktnom režime, kde pri tomto režime činnosti je hrot neustále v priamom kontakte s povrchom vzorky. Oproti tomu najnižšia hodnota priemernej drsnosti bola nameraná u metódy NSOM pracujúcej v režime „shear force“ z dôvodu, že hrot nie je v priamom kontakte s povrchom vzorky a zobrazenie morfológie povrchu je závislé od veľkosti a zmeny síl pôsobiacich medzi hrotom a povrchom vzorky.

Následne v tabuľke 2 sú porovnané údaje o veľkosti bezdefektných zŕn na povrchu vzorky.

Tab. 2 Porovnanie údajov o morfológii vzorky

	režim	Minimálna veľkosť zrna	Maximálna veľkosť zrna
AFM	kontaktný	~ 6 x 3 $\mu\text{m}$	6 x 7 $\mu\text{m}$
	semikontaktný	~ 3 x 4 $\mu\text{m}$	~ 7 x 8 $\mu\text{m}$
NSOM	„shear force“	~ 2 x 5 $\mu\text{m}$	~ 7 x 5 $\mu\text{m}$
	priepustný	~ 8 x 3 $\mu\text{m}$	~ 9 x 8 $\mu\text{m}$

Z tabuľky 2 je zrejmé, že nameraná maximálna veľkosť bezdefektných zŕn povrchu vzorky je veľmi podobná. Určité väčšie rozdiely v zistenej minimálnej veľkosti zŕn sú pozorovateľné hlavne u metódy NSOM, ktorá pracovala v „shear force“ režime.

## ZÁVER

V tejto práci sú získané výsledky povrchovej morfológie vzorky In(AlGa)P/InGaP/GaP, ako aj optické a elektrické vlastnosti štruktúry vzorky. Ak vyhodnotíme vzorku z hľadiska jej elektrických, optických a morfológických vlastností, tak je zrejmé, že vplyvom mriežkového neprispôsobenia substrátu GaP a In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>P gradovaných vrstiev vznikajú tzv. „crosshatch“ defekty, ktoré nepriaznivo vplyvajú na elektrické a optické vlastnosti. V miestach „crosshatch“ defektov dochádza k zvyšovaniu odporu a taktiež aj k zvyšovaniu absorpcie optického žiarenia.

## Podakovanie

Projekt je podporovaný projektami VEGA 1/3108/06, 1/3076/06 a APVT.

## Literatúra

- [1] J. Kováč, L. Peternai, J. Jakabovič, A. Šatka, S. Hasenöhr, J. Novák, V. Gottschalch and B. Rheinlaender, Electroluminescence Conference 2004, 236-239
- [2] Franz Giessibl, Advances in Atomic Force Microscopy, Reviews of Modern Physics 75 (3), 949-983 (2003)
- [3] Morris, V. J., Kirby, A. R., Gunning, AP Atomic Force Microscopy for Biologists. (Book) (December 1999) Imperial College Press
- [4] [http://www.ntmdt.ru/SPM-Techniquea/Principles/SNOM\\_mode22.html](http://www.ntmdt.ru/SPM-Techniquea/Principles/SNOM_mode22.html)
- [5] M. A. Paesler, and P. J. Moyer, Near-Field Optics: Theory, Instrumentation, and Applications, New York: Wiley-Interscience (1996)
- [6] [http://www.ntmdt.ru/SPM-Techniquea/Principles/SNOM/Shear\\_Force\\_Microscopy\\_mode23.html](http://www.ntmdt.ru/SPM-Techniquea/Principles/SNOM/Shear_Force_Microscopy_mode23.html)
- [7] [http://www.ntmdt.ru/SPM-Techniquea/Principles/SNOM/Transmission\\_mode\\_mode24.html](http://www.ntmdt.ru/SPM-Techniquea/Principles/SNOM/Transmission_mode_mode24.html)

Stanislav Ďatko<sup>1</sup>, Jaroslav Kováč<sup>1,2</sup>, Daniel Haško<sup>2</sup>, Alexander Šatka<sup>1,2</sup>, Stanislav Hasenöhr<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Katedra mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, SR

<sup>2</sup> Medzinárodné Laserové Centrum, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, SR

<sup>3</sup> Elektrotechnický ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 814 04 Bratislava, SR



## Artefakty v rastrovací optické mikroskopii v blízkém poli

### ÚVOD

Kvantitativní analýza v rámci rastrovací optické mikroskopie v blízkém poli (NSOM), resp. teoretické i praktické kroky vedoucí k takové analýze, jsou v současnosti velmi rychle se vyvíjejícím oborem optiky blízkého pole [1]. Základním problémem při této analýze je správný popis geometrie systému hrot-povrch a elektromagnetického pole, které se v tomto systému šíří [2,3]. V tomto článku jsou uvedeny výsledky charakterizace hrotů pomocí rastrovací elektronové mikroskopie a modelování pole v rastrovacím optickém mikroskopu. Tyto výsledky jsou porovnány s praktickými měřeními na jednoduchých strukturách.

### CHARAKTERIZACE HROTŮ V NSOM

Tvar hrotů používaných při měření pomocí NSOM není při konkrétním měření znám a neexistuje ani způsob, jak jej v průběhu měření určit. Z experimentů je přitom zřejmé, že výsledný obraz je tvarem hrotu významně ovlivněn.

Obecně je možné pro charakterizaci hrotů používaných při NSOM měřeních použít některou z metod obvyklých pro ostatní metody rastrovací mikroskopie:

- Měření na vzorku určeném pro zjištění tvaru hrotu. Pro tyto účely používáme vzorek NT-MDT (tip „characterizer sample“), který je tvořen ostrými jehlami s velmi malým poloměrem špičky hrotu (méně než 5 nm). Existují i další typy vzorků, například mřížky s kolmými stěnami, které mohou být spolu s vhodnými algoritmy použity alespoň pro částečnou rekonstrukci tvaru hrotu.
- Měření na vhodném povrchu (například náhodně drsném) a následná aplikace algoritmu slepého odhadu tvaru hrotu [4].
- Použití rastrovací elektronové mikroskopie.

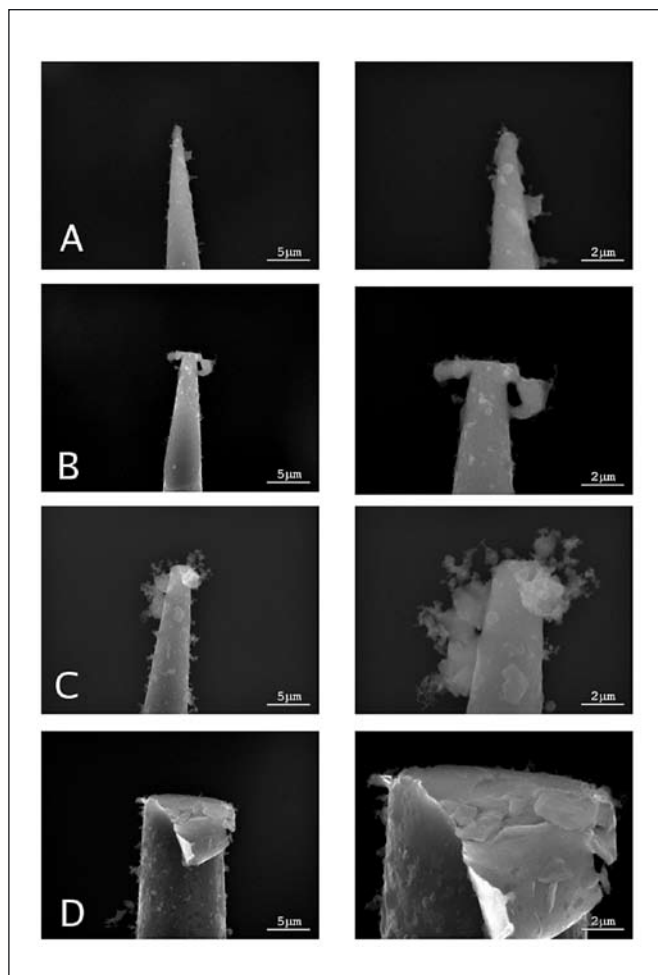
Nevýhodou prvních dvou metod je fakt, že je třeba použít speciálních vzorků, které nejsou svou podstatou pro NSOM měření ideální. Zpětná vazba u rastrovacího optického mikroskopu je ve většině případů zajišťována pomocí tzv. ladičky (tuning fork), tedy pomocí buzeného piezoelementu, u něž je snímán posun rezonanční frekvence. Na rozdíl od bezkontaktního měření u AFM, v tomto případě hrot osciluje nad povrchem v horizontálním směru (nikoliv vertikálně). Mechanismy vedoucí k posunu rezonanční frekvence a teoretická rychlost zpětné vazby přitom jsou stále předmětem odborného studia (přestože jsou mikroskopy již mnoho let úspěšně provozovány) a jak experimentálně tak teoreticky je zřejmé, že vlastnosti zpětné vazby nedosahují parametrů pozorovaných u bezkontaktního AFM.

Není proto vhodné používat pro rutinní kontrolu hrotu NSOM vzorky, které by mohly vést k jeho vlastní destrukci.

Pro charakterizaci hrotů jsme použili rastrovací elektronový mikroskop. Je zřejmé, že se nejedná o metodu pro běžné použití (ve smyslu rutinní kontroly kvality hrotu), na druhé straně je velmi přesná, zcela nedestruktivní a je proto možné ji využít k získání přehledu o možných geometriích sond.

Pro měření na rastrovacím elektronovém mikroskopu jsme vybrali celkem osm sond, z čehož dvě sondy byly nepoužité (podle výrobce s nominální aperturou 50 - 80 nm), ostatní byly jednou či vícekrát použité, přitom u některých bylo během měření pozorováno, že se jejich geometrie pravděpodobně změnila vlivem nárazu na nepředvídaný objekt (tedy nedokonalým nastavením zpětné vazby).

Snímky jednotlivých sond jsou uvedeny na obrázku 1. Na snímcích a, b jsou znázorněny „dokonalé“ sondy, jak je dodává vý-



Obr. 1a-d Snímky sond NSOM získané pomocí rastrovací elektronové mikroskopie

robce (Veeco), na dalších obrázcích jsou na sondách zřetelně vidět defekty způsobené kolizemi při měření. Je třeba zdůraznit, že zjevné kolize byly v průběhu měření zaznamenány (na základě prudkého nárůstu intenzity vyzařování) jen u dvou nejvíce poškozených sond. U ostatních sond se jedná o běžné opotřebení, které uživatel nemůže zaznamenat bez použití speciálního vzorku pro určení aktuálního rozlišení. Všechny „opotřebované“ sondy uvedené na obrázku 1 byly používány poměrně dlouhou dobu a byly jimi měřeny nejružnější struktury. Je tedy možné předpokládat, že při běžném postupu měření – použití nové sondy pro jeden konkrétní typ (sadu) vzorků, k tak zásadnímu opotřebení nedochází. Na druhé straně, vzhledem k tomu, že opotřebení srovnatelné např. s obrázkem 1c není při měření pozorovatelné, není možné je úplně vyloučit.

Na obrázcích hrotů, které prošly kolizí, je možné vidět jevy, které by bylo možné popsat jako „ohyb sondy“ nebo „rozšípnutí sondy“. Vzhledem k tomu, že je naším záměrem studovat vliv tvaru sondy na výsledná optická data, je pro nás důležité znát přesný charakter této geometrie. Proto jsme prováděli také měření výskytu

chemických prvků pomocí mikroanalýzy. Cílem bylo především stanovit, zda jsou artefakty, které se na hrotu po kolizi vytvoří, tvořeny celým materiálem sondy (optické vlákno pokryté hliníkem), nebo jen některou jeho částí. Z mikroanalýzy je zřejmé, že v případě „rozštípnutí“ sondy nemůžeme potvrdit, že by došlo k odchlípení hliníkového povlaku a ztrátě jádra (tvořeného zúžením optickým vláknem); také v případě ohybu sondy je materiálový poměr nezměněn (s ohledem na poměr kovů k jádru v zúžujícím se vlákně). Je samozřejmě velmi zjednodušující z měření na několika sondách vyvozovat, jak se sondy v praxi chovají. Je však zřejmé, na jaké typy artefaktů musíme při dalších numerických i experimentálních studiích v budoucnosti brát zřetel.

## MODELOVÁNÍ ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ

Pro účely modelování šíření elektromagnetického pole v oblasti blízkého pole jsme využili metodu FDTD (Finite Difference in Time Domain) [5, 6]. Jedná se o iterativní numerickou metodu, podobnou metodě konečných prvků, používanou např. ve strojírenství.

Při výpočtu rozložení elektromagnetického pole v 3D geometrii (v izotropním prostředí) využíváme šest trojrozměrných polí reprezentujících komponenty vektorů elektrické a magnetické intenzity. Prostorové rozměry jednotlivých buněk musí být z důvodu numerické stability algoritmu menší nebo rovny desetina vlnové délky elektromagnetického záření, pro které výpočet provádíme.

K výše uvedeným vektorovým polím kromě toho přidáváme dvě další pole s lokálními hodnotami permitivity a permeability.

Komponenty obou vektorových polí počítáme pomocí Maxwellových rovnic, přičemž postupujeme střídavě - v jednom kroku z hodnot pole elektrické intenzity spočítáme nové pole magnetické intenzity; v druhém kroku spočítáme z nového pole magnetické intenzity nové pole elektrické intenzity.

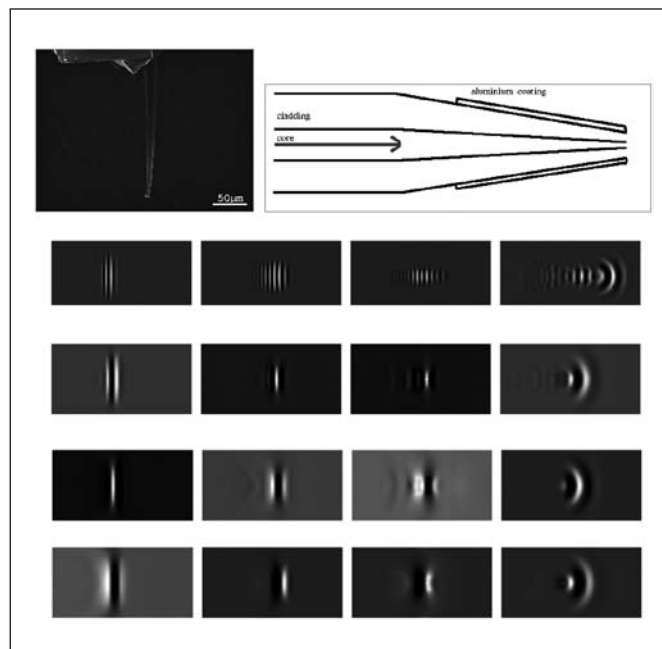
V rámci modelování šíření elektromagnetického vlnění metodou FDTD byly dále využity následující algoritmy:

- dokonale přilnutá vrstva: při výpočtu je obecně problematické simulovat volné šíření do prostoru mimo výpočetní oblast (o hraně několika vlnových délek). Řešením je aplikovat některou z absorpčních okrajových podmínek (ABC – absorbing boundary condition). Ta musí absorbovat záření dopadající pod různými úhly a s různými vlnovými délkami.
- zdroj rovinných vln založený na simulaci a odečtu celkového pole (total field/scattered field).
- zdroj rovinných vln založený na simulaci rozptýleného pole (pure scattered field).
- systém pro automatický posuv simulované oblasti: pro výpočet šíření vlny v optickém vlákně a podobných strukturách s jedním rozměrem významně přesahujícím dva zbývající, byl využit automatický posuv výpočetního pole zachovávající maximum intenzity signálu uprostřed pole.

## VÝSLEDKY A JEJICH DISKUSE

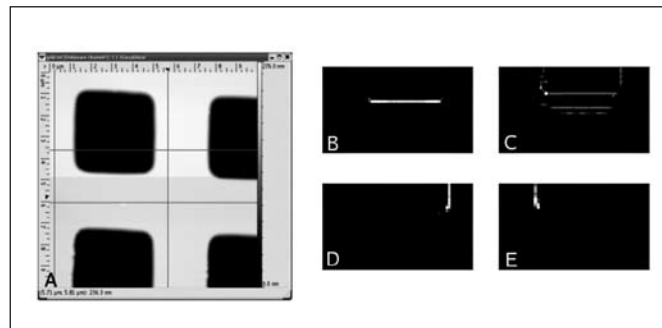
Pro analýzu rozložení elektromagnetického pole v rastrovací optické mikroskopii (v blízkém poli) byly implementované metody použity pro studium následujících systémů:

- hrot NSOM: jednomódové a vícemódové optické vlákno (viz obrázek 2). Pro tuto analýzu byla využita geometrie hrotu získaná pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (a bylo modelováno šíření optického pulsu s danou vlnovou délkou v hrotu,
- kompletní systém hrot – povrch v 3D. Pro tuto analýzu byla opět využita geometrie hrotu získaná pomocí rastrovací elektronové mikroskopie – viz předchozí aplikace, a geometrie povrchu získaná pomocí mikroskopie atomové síly. Všechny vstupní parametry jsou tedy reálné a nedochází ke geometrickým zjednodušením. V průběhu výpočtu potom vzájemným posunem sondy a povrchu simulujeme reálné měření a v každém bodě zaznamenáváme hodnoty intenzity elektromagnetického pole v oblasti vzdáleného pole.

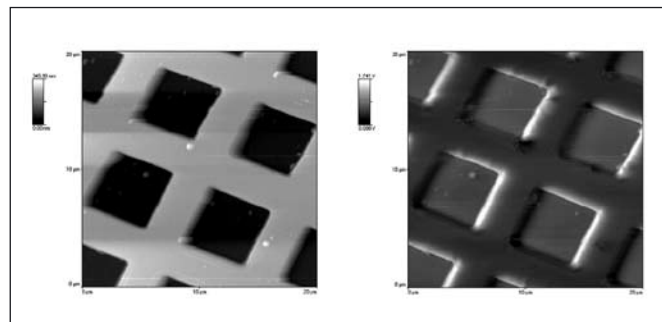


Obr. 2 SEM snímek hrotu rastrovacího optického mikroskopu v blízkém poli a jeho model (řez), (dole): sada výsledků simulace šíření optického pulsu vláknem tvořícím hrot, postupně zleva: válcová oblast, zúžení, zúžení s vrstvou hliníku, apertura. Shora je možno pozorovat závislost jednotlivých stádií šíření vlny na vlnové délce (při zachování geometrie vlákna)

Pro kompletní systém hrot-povrch byla analyzována část mřížky používané pro kalibraci AFM. Simulovali jsme reálný signál s využitím dat z AFM (tvar povrchu) za předpokladu, že data z AFM reprezentují povrch s mnohem větší přesností, než topografická data z NSOM (vzhledem ke konvoluci hrotu). Část mřížky, která byla při výpočtu použita, je znázorněna na obrázku 3a, výsledné modelované snímky NSOM jsou uvedeny na obrázcích 3b-e.



Obr. 3 topografie kalibrační mřížky a výsledky modelování vyznačené oblasti pro čtyři různé polohy detektoru ve vzdáleném poli



Obr. 4 topografie (vlevo) a reflexní optický obrázek kalibrační mřížky

Na obrázku 4 je pro srovnání uveden NSOM snímek kalibrační mřížky, získaný v reflexním režimu. Ze snímku je patrné, že metodou FDTD byly úspěšně simulovány typické artefakty pozorovatelné v reflexním režimu – zvýraznění, či potlačení intenzity při měření na velkých sklonech závisující na poloze detektoru.

## ZÁVĚR

Pomocí metody FDTD je možné simulovat profily, či 2D data získaná pomocí rastrovací optické mikroskopie v blízkém poli. Oproti reálnému systému při modelování pomocí FDTD přesto nacházíme některé odlišnosti:

- oblast blízkého pole, ze které je výpočet prováděn, je omezená. Je třeba obezřetně volit rozměry a tvary simulovaných struktur, neboť je nezbytné předpokládat, že rozptyl pole na strukturách vzdálených o více než několik vlnových délek od hrotu je zanedbatelný. Pro zde uvedené struktury byl tento předpoklad numericky potvrzen, jedná se však o poměrně jednoduché objekty.
- geometrie apertury hrotu sondy není známa, resp. může být pouze vyhodnocena z měření pomocí rastrovací elektronové mikroskopie. Navíc, vnitřní struktura sondy nemůže být určena ani tímto postupem.

- materiálové vlastnosti použitých struktur jsou tabulkové, není provedena korekce na případné nečistoty, nativní vrstvy a podobné v praxi se vyskytující jevy.

## Literatura

- [1] M. A. Paesler, P. J. Moyer, Near-Field Optics, Theory, Instrumentation and Applications, John Wiley & Sons (1996)
- [2] B. Hecht, B. Sick, U. P. Wild, V. Deckert, R. Zenobi, O. J. Martin, D. W. Pohl, J. Chem. Phys. 112 (2000)
- [3] B. Hecht, H. Bielefeldt, Y. Inouye, D. W. Pohl, J. Appl. Phys. 81 (1997)
- [4] J. S. Villarubia: J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 102 (1997) 425.
- [5] S. H. Simpson, S. Hanna, Optics Communications 256 (2005) 476
- [6] J. T. Krug, E. J. Sanchez, X. Sunney Xie, J. Chem. Phys., 116 (2002) 10895

Ing. Petr Klapetek, Český metrologický institut, Okružní 31, 638 00, Brno, tel.: 545 555 337  
Jiří Buršík, Ústav fyziky materiálu, Žižkova 22, 616 62, Brno

Daniel HAŠKO<sup>1</sup>, Jaroslav KOVÁČ<sup>1,2</sup>, Ivan NOVOTNÝ<sup>2</sup> a Ľubomír JÁNOŠ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Medzinárodné Laserové Centrum, Bratislava, Slovenská republika

<sup>2</sup>Slovenská Technická Univerzita, Fakulta Elektrotechniky a Informatiky, Katedra Mikroelektroniky, Bratislava, Slovenská republika

# Analýza povrchovej morfológie tenkých vrstiev ZnO pripravených RF naprašovaním pomocou atómovej silovej mikroskopie

*Príspevok sa zaoberá povrchovou analýzou tenkých vrstiev polykrystalického ZnO, ktoré boli pripravené rádiovým frekvenčným diódovým naprašovaním v  $Ar^+$  a  $Ar^+ + N_2$  atmosfére na substrátoch  $SiO_2/Si$  a skle. Metódou atómovej silovej mikroskopie bola zisťovaná povrchová štruktúra polykrystalického ZnO s hrúbkou naprašovaných vrstiev  $\sim 500$  nm a po ich následnom zažíhaní metódou rýchleho tepelného žihania pri teplotách 500 - 600 °C v atmosfére  $N_2$  a  $H_2 + N_2$  formovacím plyne. Na meraných vzorkách boli vyhodnotené parametre drsnosti a zrnitosti povrchu. Dosiahnuté výsledky potvrdili, že podmienky naprašovania a následné žihanie vplyva na štruktúrne vlastnosti polykrystalických vrstiev ZnO.*

## I. ÚVOD

Nanoštruktúry, tenké vrstvy a prvky na báze ZnO sú perspektívnymi pre aplikácie v optoelektronike. ZnO je možné vďaka jeho jedinečným elektrickým, optickým, piezoelektrickým a mechanickým vlastnostiam využiť na prípravu UV/modrých elektroluminiscenčných diód (LED) [1], laserových diód (LD), detektorov (MSM, Schottky), priesvitných tranzistorov (TFET - transparent field-effect transistor) [2], biosenzorov, plynových senzorov, solárnych článkov, feroelektrických pamätí, piezoelektrických prvkov a prvkov využívajúcich povrchové akustické vlny (SAW) [3]. Tento priamy II-IV polovodič má hexagonálnu štruktúru, veľkú šírku zakázaného pásma ( $E_g = 3,3$  eV pri izbovej teplote) a veľkú excitačnú väzobnú energiu (60 meV). Na rozdiel od iných polovodičov, napr. GaN, SiC, môže rásť pri nižších teplotách, má vyššiu stabilitu excitónov, čo umožňuje vybudenie excitónov a stimulovanú emisiu aj pri izbových teplotách [4]. Vzhľadom na

veľkú väzobnú silu (indikovanú kohéznu energiou a vysokou teplotou tavenia) nedochádza k degradácii materiálu, spôsobeného poruchami v štruktúre prvku. Čistý ZnO je transparentný najmä pre vlnové dĺžky 400 - 700 nm a vodivý, čo umožňuje vytvárať priehľadné kontakty a nahradiť ITO (indium thin oxide) napr. v solárnych článkoch. Vďaka kompatibiliti s GaN (malý rozdiel mriežkových konštánt) sa môže stať ZnO vhodným substrátom pre prvky na báze GaN v optoelektronike [5]. Nedopované ZnO vykazuje  $n$ -typ vodivosti ( $10^{16} - 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>), kvôli prirodzeným defektom (uloženie Zn a kyslíkových vakancií v medzipolohách). Pre praktické využitie ZnO v optoelektronických prvkoch je preto potrebné pripraviť nízkoodporové vrstvy  $p$ -typu. Dodatočný proces žihania ZnO v ochrannej atmosfére umožňuje modifikovať jeho elektrickú vodivosť, pri súčasnom zachovaní transparentnosti vo viditeľnej oblasti spektra žiarenia [6].



Metóda atómovej silovej mikroskopie (AFM) bola použitá na analýzu drsnosti a zrnitosti povrchu tenkých vrstiev polykryštalického ZnO pripravených rádio-frekvenčným (RF) diódovým naprašovaním v  $\text{Ar}^+$  a  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosfére na substrátoch  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  a skle. Časť vzoriek bola následne žihaná metódou rýchleho tepelného žiňania (RTA) pri teplotách 500 - 600 °C v atmosfére  $\text{N}_2$  a  $\text{H}_2 + \text{N}_2$  formovacom plyne a analyzovaný vplyv žiňania na povrchovú morfológiu ZnO.

## II. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI A PRÍPRAVA TENKÝCH VRSTIEV ZNO

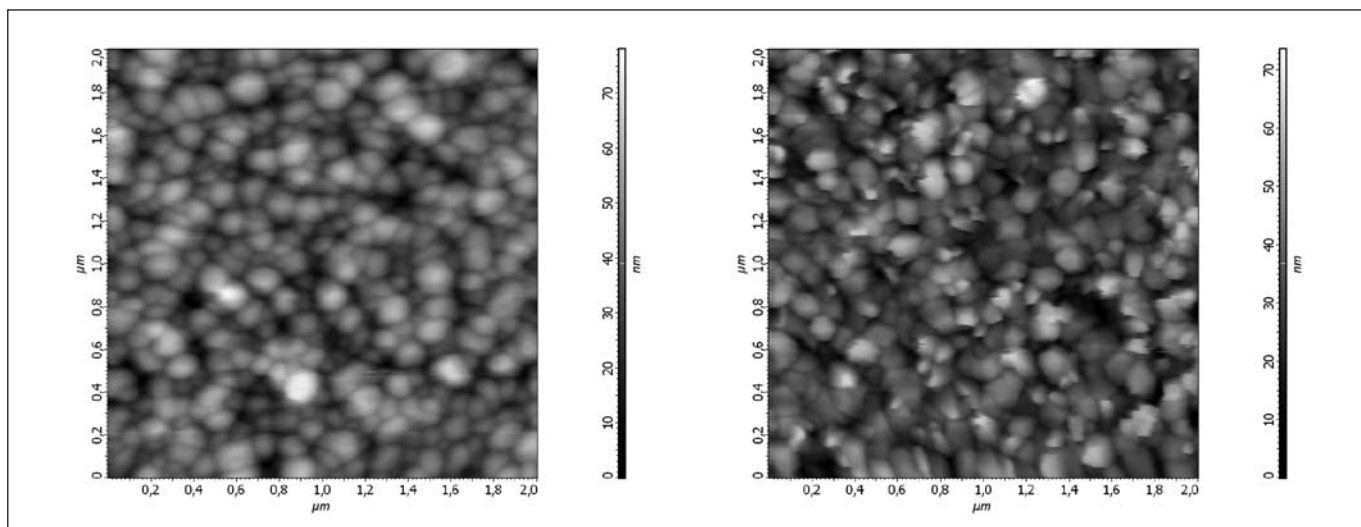
ZnO kryštalizuje vo wurtzitovej štruktúre s hexagonálnou symetriou, ktorej mriežkové konštanty sú  $a = 0,325 \text{ nm}$ ,  $c = 0,523 \text{ nm}$  a jeho teplota tavenia je 1974 °C. Hallovska pohyblivosť elektrónov pri 300 K dosahuje  $200 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $m_e^* = 0,24$ ) a dier 5 - 50  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $m_h^* = 0,59$ ). Index lomu ZnO je v rozmedzí 2,008 ~ 2,029 [7]. Príprava vrstiev ZnO nevyžaduje drahé substráty, vhodný je napr. Si aj sklo. Na prípravu tenkých vrstiev je možné použiť rôzne techniky rastu, ako napr. RF (diódové) magnetronové naprašovanie, naparovanie, nanášanie pomocou koloidných roztokov, pulznú laserovú depozíciu (PLD), plynnú epitaxiu z organokovových zlúčenín (MOCVD), molekulárnu zväzkovú epitaxiu (MBE), ako aj plazmou indukovanú chemickú plynnú depozíciu (PE CVD). Výhodou RF naprašovania ZnO je možnosť vytvárania homogénnych povrchov

v ochrannej atmosfére  $\text{Ar}^+$ , ktorá neovplyvňuje jeho dopáciu, ako aj v atmosfére  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  pri ktorých dochádza k modifikácii dopácie.

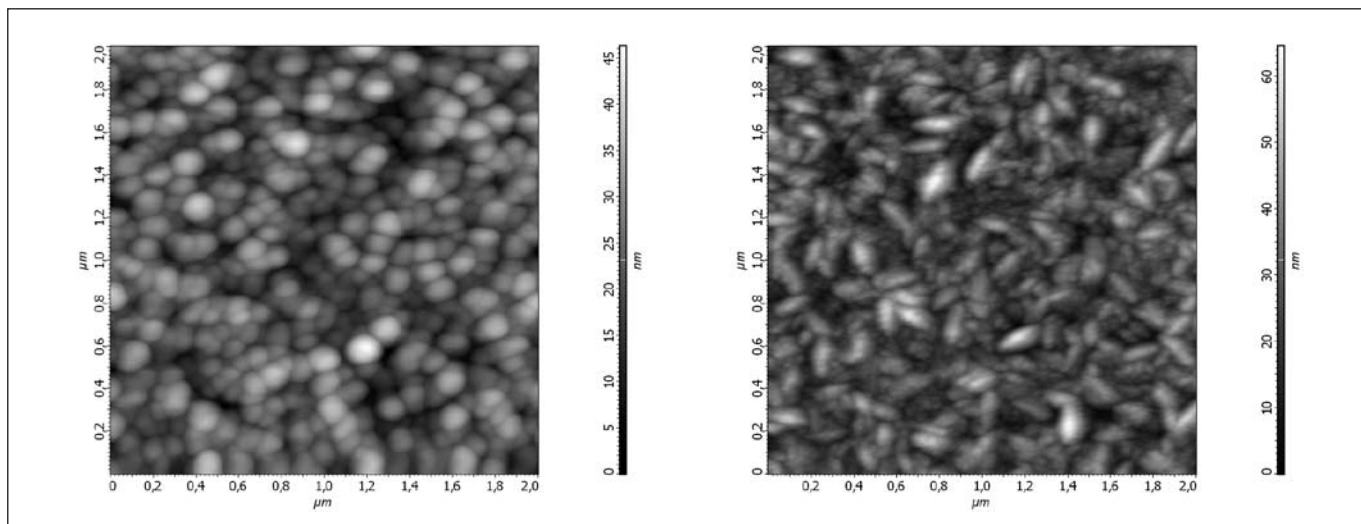
Tenké vrstvy polykryštalického ZnO boli pripravené v planárnom RF diódovom naprašovacom reaktore Perkin Elmer 2400/8L v  $\text{Ar}^+$  a  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosfére na  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substrátoch a skle (CG 7059) z keramikového ZnO terča (priemer 20 cm, čistota 99,99 %). Pred naprašovaním bol terč 10 minút čistený a celá komora vyčerpaná na tlak  $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ . Tlak  $\text{Ar}^+$  a  $\text{N}_2$  plynov bol počas procesu naprašovania konštantný, na úrovni 1,33 Pa. Pre prípravu ZnO vrstvy v  $\text{Ar}^+$  atmosfére bol použitý výkon 650 W a v  $\text{N}_2$  atmosfére výkon 500 W. Naprašovanie trvalo približne 30 minút a hrúbka narastených vrstiev ~ 500 nm bola určená Talystepom. Na zistenie povrchovej morfológie bol využitý rastrovací sondový mikroskop (SPM) firmy NT-MDT Solver PRO. Drsnosť a zrnitosť povrchu pripravených vrstiev bez žiňania a po následnom zažíhaní metódou RTA pri teplotách 500 - 600 °C v atmosfére  $\text{N}_2$  a  $\text{H}_2 + \text{N}_2$  formovacom plyne bola určovaná metódou AFM.

## III. ANALÝZA MORFOLOGIE NARASTENÝCH VRSTIEV ZNO VYUŽITÍM AFM

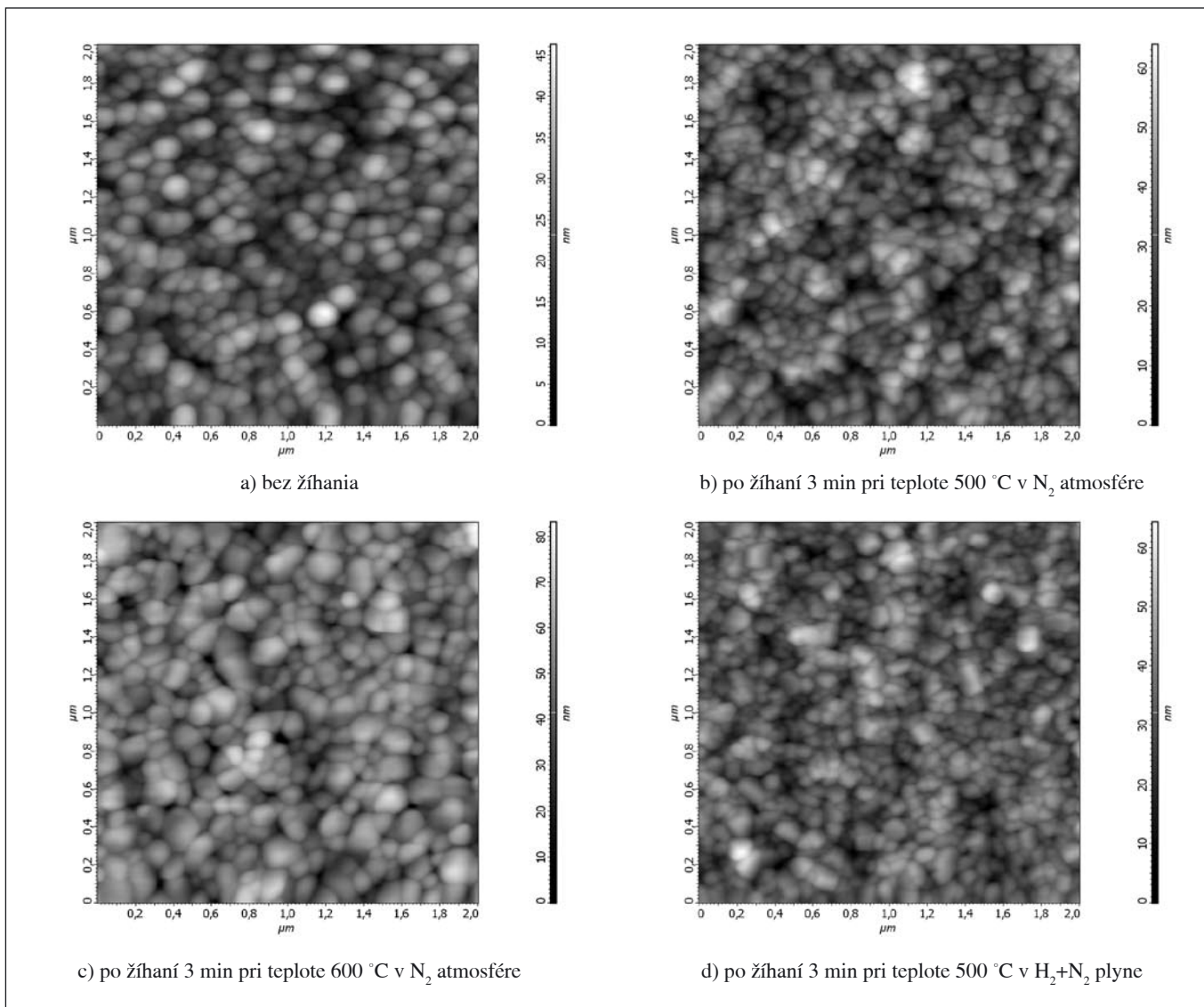
Morfológia povrchu naprašovaných tenkých vrstiev ZnO bola meraná v kontaktnom móde AFM mikroskopu. Na vzorkách bola vyhodnotená priemerná drsnosť, RMS drsnosti a veľkosť zrn na



Obr. 1 Povrchová morfológia naprašenej tenkej vrstvy ZnO v  $\text{Ar}^+$  atmosfére na:  
a)  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substráte b) na skle



Obr. 2 Povrchová morfológia naprašenej tenkej vrstvy ZnO v  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosfére na:  
a)  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substráte b) na skle



Obr. 3 Povrchová morfológia naprašných tenkých vrstiev ZnO v  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosfére na  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substráte

vybraných miestach vzoriek s plochou  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ . Drsnosť bola vypočítaná podľa normy ISO 4287/1 a identifikácia zŕn bola analyzovaná pomocou modifikovaného „watershed“ algoritmu [8]. Na obr. 1 sú AFM 2D zobrazenia povrchu vzoriek ZnO v  $\text{Ar}^+$  atmosfére pripravených na  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  a na skle.

Vypočítané hodnoty priemernej drsnosti  $S_a = 8,8 \text{ nm}$ , RMS drsnosti  $S_q = 10,9 \text{ nm}$  a priemernej veľkosti zŕn  $71 \text{ nm}$  pre vzorku ZnO pripravenú v  $\text{Ar}^+$  atmosfére na  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  sú väčšie v porovnaní s vrstvou ZnO pripravenou na skle, kde boli určené hodnoty  $S_a = 8,2 \text{ nm}$ ,  $S_q = 10,2 \text{ nm}$  a priemerná veľkosť zŕn  $64 \text{ nm}$ . Z obr. 1 a, b vyplýva, že použitý substrát ovplyvňuje štruktúrne vlastnosti polykrystalickej vrstvy ZnO.

AFM 2D zobrazenie morfológie polykrystalickej vrstvy ZnO pripravenej v atmosfére  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  na substráte  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  a skle je na obr. 2 a, b. Vzorka ZnO na substráte  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  dosahuje nižšie hodnoty priemernej drsnosti  $S_a = 5,2 \text{ nm}$  a RMS drsnosti  $S_q = 6,5 \text{ nm}$ , ako vzorka pripravená na skle, kde boli určené hodnoty  $S_a = 7,2 \text{ nm}$  a  $S_q = 9,0 \text{ nm}$ . Priemerná veľkosť zŕn  $66 \text{ nm}$  vrstvy ZnO na  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  je však väčšia ako priemerná veľkosť zŕn  $46 \text{ nm}$  pripravenej na skle. Z uvedených výsledkov tiež vyplýva, že tvar aj veľkosť polykrystalických zŕn sú závislé na použitom substráte.

Z porovnania vzoriek pripravenej v rôznej atmosfére ( $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$ ) na oboch typoch substrátov ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$  a sklo) je možné

určiť ich vplyv na tvar a veľkosť vytvorených zŕn ZnO, ako aj na povrchovú drsnosť vrstiev.

Časť vzoriek s vrstvami ZnO pripravených na  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substráte v atmosfére  $\text{Ar}^+$  aj  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  bola následne 3 minúty žiahaná pri teplote  $500$  a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  v  $\text{N}_2$  atmosfére a pri teplote  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  v  $\text{H}_2 + \text{N}_2$  formovacom plyne metódou RTA. Na žiahaných vzorkách bola vyhodnotená priemerná drsnosť, RMS drsnosti a veľkosť zŕn na vybraných miestach s plochou  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ . Príklad AFM 2D zobrazenia povrchu vzoriek ZnO pripravených v  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosfére na  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  substráte pred a pri rôznych podmienkach zažihania je na obr. 3. Vypočítané priemerné hodnoty drsnosti a zrnitosti ZnO vrstiev pripravenej v  $\text{Ar}^+$  a  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosfére sú zhrnuté v tab. 1.

Z výsledkov analýz povrchovej morfológie vzoriek ZnO pripravenej v  $\text{Ar}^+$  a  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosfére na substrátoch  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  (viď. obr. 3 a tab. 1) vyplýva, že následným procesom žihania pri rôznych podmienkach dochádza k modifikácii povrchovej drsnosti a zrnitosti, ako aj celkovej morfológie povrchu naprašných vrstiev. Modifikácia povrchu ZnO vrstiev zodpovedá výsledkom publikovaným v literatúre [9, 10].

#### IV. ZHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

Tenké vrstvy ZnO s hrúbkami  $\sim 500 \text{ nm}$  boli pripravené RF diódovým naprašovaním v  $\text{Ar}^+$  a  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosfére na substrátoch

Tab. 1 Vypočítané hodnoty drsnosti a zrnitosti povrchov ZnO na substráte SiO<sub>2</sub>/Si

ZnO naprášené v Ar <sup>+</sup> atmosfére na SiO <sub>2</sub> /Si sub.	Priemerná drsnosť S <sub>a</sub> [nm]	RMS drsnosti S <sub>q</sub> [nm]	Priemerná veľkosť zŕn [nm]	ZnO naprášené v Ar <sup>+</sup> + N <sub>2</sub> atm. na SiO <sub>2</sub> /Si sub.	Priemerná drsnosť S <sub>a</sub> [nm]	RMS drsnosti S <sub>q</sub> [nm]	Priemerná veľkosť zŕn [nm]
nežíhaná	8,8	10,9	71	nežíhaná	5,2	6,5	66
500 °C, 3', N <sub>2</sub>	9,1	11,4	69	500 °C, 3', N <sub>2</sub>	7,1	8,9	64
600 °C, 3', N <sub>2</sub>	7,9	9,7	79	600 °C, 3', N <sub>2</sub>	8,4	10,6	76
500 °C, 3', H <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	8,7	10,8	73	500 °C, 3', H <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	6,1	7,9	61

SiO<sub>2</sub>/Si a skle. Metódou AFM bola zisťovaná povrchová morfológia tenkých vrstiev polykryštalického ZnO po depozícii a následnom zažíhaní pri teplotách 500 - 600 °C v atmosfére N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> formovacím plyne. Povrchová štruktúra ZnO vrstiev na rôznych typoch substrátov vykazuje rôznu priemernú drsnosť a zrnitosť a zároveň bol potvrdený vplyv žihania v atmosfére N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> na kvalitu takto modifikovaných vrstiev. Detailná analýza vplyvu procesu depozície, substrátu a následného žihania tenkých vrstiev ZnO umožní ďalšiu optimalizáciu povrchovej štruktúry a spolu s optimalizáciou elektrických a optických vlastností umožní ich aplikáciu pre prípravu mikroelektronických a optoelektronických prvkov.

#### Podakovanie

Práca v Medzinárodnom Laserovom Centre a na Katedre Mikroelektroniky Slovenskej Technickej Univerzity bola podporená projektami VEGA č. 1/3076/06 a č. 1/3108/06, APVV č. RPEU-0005-06 a MŠMT ČR 1M06031.

#### Literatúra

- [1] J. - H Lim, et al.: UV electroluminescence emission from ZnO light-emitting diodes grown by high-temperature radiofrequency sputtering, *Advanced Materials* 18, **2006**, pp. 2720 - 2724.
- [2] K. Nomura, et al.: Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors, *Nature* 432, **2004**, pp. 488 - 492.
- [3] N. W. Emanetoglu, et al: Epitaxial ZnO piezoelectric thin films for SAW filters, *Materials Science in Semiconductor Processing* 2, **1999**, pp. 247 - 252.
- [4] G. Tobin, et al.: Ultraviolet stimulated emission from bulk and polycrystalline ZnO thin films varying grain sizes, *Physica B* 340, **2003**, pp. 245 - 249.
- [5] S. J. Pearton, et al.: Recent progress in processing and properties of ZnO, *Superlattices and Microstructures* 34, **2003**, pp. 3 - 32.
- [6] H. S. Kang, et al.: Variation of light emitting properties of ZnO thin films depending on post-annealing temperature, *Materials Science and Engineering B* 102, **2003**, pp. 313 - 316.
- [7] D. W. Palmer: Semiconductor informations on <http://www.semiconductors.co.uk/>
- [8] P. Klapetek, et al.: Atomic force microscopy characterization of ZnTe epitaxial films, *Acta Physica Slovaca* 53, **2003**, pp. 223 - 230.
- [9] L. P. Schuler, et al.: The effect of substrate material and postannealing on the photoluminescence and piezo properties of DC-sputtered ZnO, *Journal of Electronic Materials*, **2007**, special issue paper, 12 pages.
- [10] X. Q. Wei, et al.: Annealing effect on the microstructure and photoluminescence of ZnO thin films, *Materials Chemistry and Physics* 101, **2007**, pp. 285 - 290.

Ing. Daniel Haško, PhD., Medzinárodné Laserové Centrum, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, e-mail: hasko@ilc.sk  
 Prof. Ing. Jaroslav Kováč, PhD., Slovenská Technická Univerzita, Fakulta Elektrotechniky a Informatiky, Katedra Mikroelektroniky, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, e-mail: jaroslav.kovac@stuba.sk  
 Ing. Ivan Novotný, PhD., Slovenská Technická Univerzita, Fakulta Elektrotechniky a Informatiky, Katedra Mikroelektroniky, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, e-mail: ivan.novotny@stuba.sk  
 Ing. Lubomír Jánoš, Slovenská Technická Univerzita, Fakulta Elektrotechniky a Informatiky, Katedra Mikroelektroniky, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, e-mail: lubomir.janos@stuba.sk



## Studium fotodynamického efektu na nádorových buněčných liniích pomocí mikroskopie atomárních sil

*Mikroskopii atomárních sil (AFM) užíváme k zobrazení morfologie nádorových buněčných linií a procesů provázejících léčbu pomocí fotodynamické terapie. Základem získání kvalitního skenu je vhodná fixace preparátu, bez porušení morfologie celých buněk i jednotlivých buněčných struktur. Nové trendy v mikroskopii dávají možnost skenovat v různých prostředích, jako jsou například kapaliny. K získávání skenů užíváme 100mikrometrový suchý skener a nekontaktní mód. Jako biologický materiál jsme studovali buněčné linie A549 (bronchogenní karcinom) a G361 (kožní melanom). Skenování buněk je limitováno konstrukcí aparatury, proto užíváme kombinaci AFM a inverzního optického mikroskopu. Cílem práce je studium fotodynamického efektu na uvedených nádorových buněčných liniích pomocí mikroskopie atomárních sil. K navození fotodynamického jevu užíváme sensitizery CIAIPcS<sub>2</sub> a zdrojem světla jsou LED diody vlnových délek 640 nm. Účinnost fotodynamické terapie detekujeme pomocí Synergy HT fluorescenčního readeru spolu s fluorescenční značkou CM-H<sub>2</sub>DCFDA. Měříme tak kinetiku produkce volných radikálů (ROS) a produkci ROS po dosažení dávky 15 Jcm<sup>-2</sup>. Zobrazujeme buňky před a po fotodynamické terapii (PDT) ve dvou typech zobrazení: topografie a fázové zobrazení. Z výsledků plyne zjištění, že před PDT mají buňky hladký jemný povrch bez větších nerovností a po PDT jsou buňky rozpraskané a je možné pozorovat projevy apoptózy.*

### ÚVOD

Mikroskopie atomárních sil je jedna z mála mikroskopických metod schopná zobrazovat biologické vzorky v jejich nejjemnějších detailech spolu s dynamickými vlastnostmi různých biologických procesů v přirozených podmínkách [1, 2]. Od roku 1986 je AFM všestranný nástroj na poli biologických věd [3]. Pomocí mikroskopie atomárních sil můžeme zobrazovat nejrůznější biologické preparáty, jako jsou nukleové kyseliny, biomolekuly, biomembrány obsahující proteiny a lipidy atd. [4, 5]. Skenování je podmíněno konstrukcí měřicí aparatury. Pro lepší přehlednost vzorku přidáváme k AFM mikroskopu ještě inverzní optický mikroskop, poté můžeme najít přesně tu buňku, kterou máme zájem studovat a hrot AFM umístit přímo nad ni. Pro získání kvalitního skenu je potřeba buňky dobře zafixovat. Nekvalitně provedená fixace způsobuje utržení preparátu ze substrátu a následné smýkání po povrchu. Může tak dojít i k poškození hrotu vzorkem. Důležitá je i velikost sil mezi hrotem a vzorkem. Minimalizací těchto sil je možné předejít zničení vzorku hrotem [6]. Avšak interakce mezi hrotem a povrchem vzorku jsou tak komplexní, že není vždy jednoduché tyto síly eliminovat a zabránit tak poškození preparátu [7, 8]. Zobrazování biologických preparátů je vhodné k rozvoji mikroskopie atomárních sil. Biologické materiály jsou měkké a síly aplikované v AFM snadno mohou vzorek deformovat. Tyto materiály slabě adheřují k substrátu a mohou být snadno posunuty nebo zničeny laterálními silami objevujícími se během kontaktu hrotu se vzorkem. Z těchto důvodů ke skenování používáme nekontaktní mód, vhodný pro biologické preparáty. NC-AFM je vhodné pro vizualizaci křehkých vzorků na vzduchu nebo v kapalných prostředích. V tomto režimu nedochází ke kontaktu hrotu se vzorkem a minimalizují se tak destruktivní laterální síly [9]. Jakmile dojde k nalezení vhodných podmínek nekontaktního režimu, topografický signál může podávat informace o základním uspořádání membránového cytoskeletu. Můžeme tak sledovat topografické změny v reorganizaci membránového cytoskeletu živých a mrtvých buněk a otevřít tak nové pole aplikací AFM [10].

Fotodynamická terapie je minimálně invazivní léčebná terapie a představuje velkou naději k léčbě povrchových nádorů jako jsou kožní melanomy, gynekologické nádory, nádory prsu, močového ústrojí a plicní nádory metodou šetrnější k pacientovi [11]. Fotodynamická terapie je založena na lokální nebo systémové aplikaci fotosensitivní látky neboli fotosensitizeru (nejčastěji porfyrin a jeho deriváty), který je aktivován ozářením viditelným světlem. V důsledku procesu přenosu energie jsou v tkáni aktivovány molekuly kyslíku. Tvoří se především tzv. singletový kyslík [12]. Tyto molekuly jsou velice reaktivní a alterují oxidativními reakcemi některé složky buněk či nádorového stromatu (bílkoviny, nukleové kyseliny, lipidy) a modifikují tak jejich funkční vlastnosti, což vede k zániku nádoru. V důsledku preferenčního zachycování fotosensitizeru nádorovými buňkami je docíleno specifické destrukce nádoru, zatímco okolní tkáň zůstává neporušena. Fotosensitivní látka se přednostně akumuluje v lipofilních buněčných organelách zahrnujících mitochondrie, endoplazmatické retikulum, jádro a lysosomální membrány. Světelná aktivace sensitizeru vyvolává vznik reaktivních forem kyslíku (ROS). Meziprodukty jsou schopny vyvolat buněčnou smrt – apoptózu nebo nekrózu. Mechanismy iniciace a regulace apoptózy jsou velice komplexní a složité [13, 14].

### MATERIÁL A METODY

#### Materiál

V našem experimentu jsme užívali buněčné linie A549 (bronchogenní karcinom) a G361 (kožní melanom) jako biologické materiály. Jako chemikálie to byly: živné médium (DMEM), sensitizérem CIAIPcS<sub>2</sub> fosfátový pufr (PBS), glutaraldehyd (GA), poly-L-lysine (PLL), 5-(and-6)-chloromethyl-2',7'-dichlorodihydrofluorescein diacetate CM-H<sub>2</sub>DCFDA (DCF), DMSO, glukóza. Užívali jsme AFM Explorer s příkladačím hlavou (Veeco, USA) a inverzní fluorescenční optický mikroskop Olympus IX70. Na detekci volných radikálů jsme používali multi-detection microplate reader Synergy HT (BioTek, USA). Dále sterilní plastová sklíčka ThermoFisher jako substrát pro buněčné vzorky o průměru 35 mm.

## Fotodynamická terapie

330 000 buněk bylo kultivováno na 35 milimetrových Petriho miskách. Buňky byly inkubovány ve 2 ml DMEM médiu při 37 °C a 5 % CO<sub>2</sub> po dobu 24 hodin s fotosensitizerem 1, 10 a 100 μM CIAIPcS<sub>2</sub> dalších 24 hodin. Před započítáním experimentu jsme vyměnili DMEM médium za PBS s 5 mM glukózy a přidali 20 μl 500 mM DCF rozpuštěného v DMSO. Dvě misky byly jako kontroly bez senzitizeru a dalších šest s koncentracemi 1, 10 a 100 μM CIAIPcS<sub>2</sub>. Všechny připravené vzorky byly ozářeny LED diodami s vlnovou délkou 640 nm. Snímali jsme kinetickou produkci ROS během PDT a produkci ROS po ukončení PDT.

Užívali jsme dva typy ozařovačů. Pro první měření kinetické produkce ROS byl použit vnitřní ozařovač vložený do Synergy HT se světelným tokem 0,1 mWcm<sup>-2</sup> a druhý externí ozařovač se světelným tokem 10 mWcm<sup>-2</sup> byl použit na doozáření do dávky 15 J cm<sup>-2</sup>.

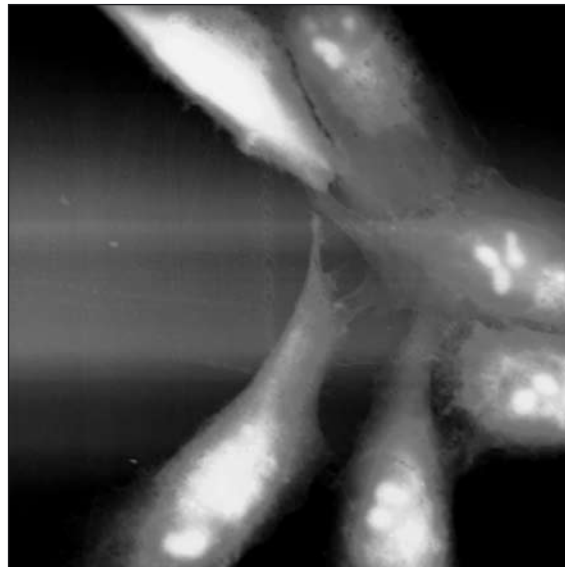
## Mikroskopie atomárních sil a příprava vzorku

Pro zobrazování buněk jsme užívali sklíčka Thermanox pokrytá poly-L-lysinem. Příprava vzorku spočívala v inkubaci sklíček v 0,1 % roztoku PLL po dobu jedné hodiny. Poté se nechalo sklíčko usušit přes noc na rohu filtračního papíru [15]. Na modifikované sklíčko jsme nanесли 20 μl suspenze buněk a pipetou se rozprostřela na 5 - 7 mm. Vzorek jsme nechali 10 minut až 20 hodin inkubovat v DMEM médiu při 37 °C a 5 % CO<sub>2</sub>. Před začátkem skenování jsme odstranili médium a optickým mikroskopem jsme našli vhodnou buňku nebo shluk buněk ke skenování na vzduchu [16]. Dále jsme použili fixaci 1 % glutaraldehydem v PBS po dobu 20 minut. Skenování bylo prováděno po 5 - 10 minutách sušení vzorku při pokojové teplotě [17]. Hrot byl čištěn destilovanou vodou nebo ethanolem. Pokud se hrot kontamoval biologickým materiálem, použili jsme nový čistý hrot. Buňky jsme zobrazovali pomocí suchého skeneru s rozsahem 100 × 100 μm [15]. Všechny experimenty byly prováděny mikroskopem AFM Explorer s příkládací hlavou. Užívali jsme nekontaktní hrot z křemíku dopovaného antimonem s délkou 125 μm, šířkou 30 μm, výškou 10 μm - 15 μm a konstantou tuhosti 42 Nm<sup>-1</sup>. Resonanční frekvence byla 320 kHz (Veeco, USA) [18]. Poloměr křivosti byl do 20 nm. Všechny skeny jsme prováděli v nekontaktním módu a topografickém režimu pro studium výšek povrchů a ve fázovém zobrazení pro studium jemných detailů buněčné morfologie [19]. Jeden sken 100 × 100 μm s rozlišením 300 pixelů trval 5 až 10 minut při skenovací rychlosti 0,4 - 1 linka/s. Pro optimální zobrazení byl nastaven „set point“ na 50 % laterálního rozlišení [20]. Skeny byly zpracovány programem SPMLab a WSxM 4.0 SPMAGE07 [28].

## Výsledky a diskuze

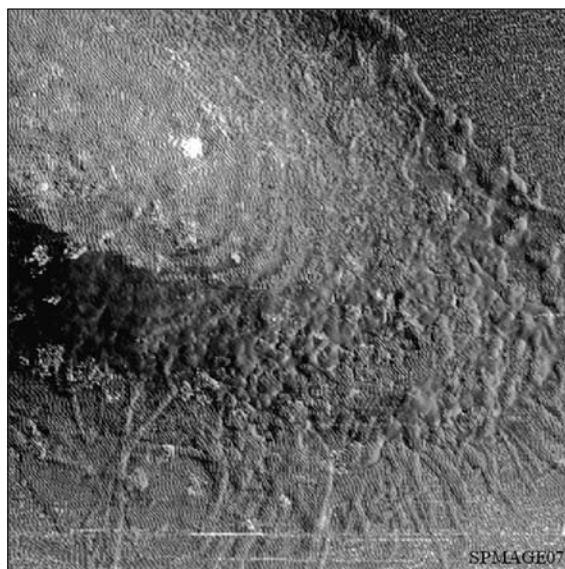
Skeny získané metodou zobrazování za sucha nám ukazují morfologii buněk v situaci, v jaké byly těsně před vysušením. To znamená, že protáhlé buňky na skenu jsou ve chvíli skenování mrtvé (živné médium je vysušeno, dochází k buněčné smrti vysušením média), avšak těsně před vysušením byly živé. Naopak kulatý tvar buňky charakterizuje mrtvou buňku již před vysušením (buněčná smrt nastala již před vysušením). Proto v dalším textu se podle tvaru a charakteristiky buňky bude používat označení „živá“ buňka pro buňky, které jsou sice v dané situaci mrtvé, avšak na skenu se jeví být živými. V zobrazování v kapalině je situace jiná. Zde je živá buňka opravdu buňkou živou, a to jak před skenováním, tak při něm. Tvar buněk přímo souvisí se stavem, v jakém se buňka nachází. Podlouhlé buňky jsou zafixované v živém stavu. Naopak mrtvé buňky jsou zafixované v kulatém tvaru. Živé buňky linie A549 můžeme vidět na obr. 1. Jedná se o shluk buněk s malými výběžky invadopodií sloužících k mezibuněčné komunikaci. Invadopodie jsou charakteristické pro nádorové buněčné linie, avšak G361 má tyto struktury protáhlejší a užší. Často přesahují délku 100 μm [20]. U linie A549 byla pozorována invadopodie s délkou maximálně 30 μm, a to často vyrůstající jen z jedné nebo naopak ze tří stran buňky. Také šířka invadopodie u A549 je alespoň dvakrát širší než u G361. U linie G361 vyrůstají invadopodie téměř vždy ze dvou

stran buněk. Invadopodie pozorujeme jen u živých buněk; pokud je buňka mrtvá, má kulatý tvar bez výběžků ze základního kulového tvaru. Různé práce se zmiňují o invadopodiích jako o univerzálních útvarech, které se přímo podílejí na invazi nádorových buněk bez ohledu na typ nádorových buněk.



Obr. 1 Zobrazena je buněčná linie G361 živých buněk, topografie, velikost skenu 100 × 100 μm, skenovací rychlost 80 μms<sup>-1</sup>. Substrát nebyl modifikován a fixace proběhla vysušením živného média

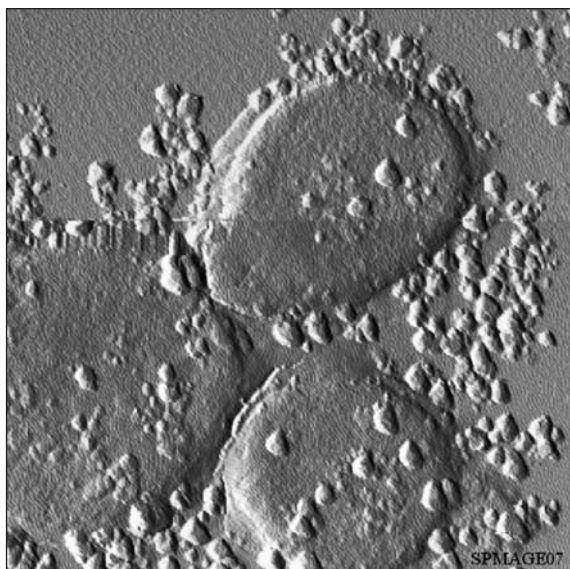
Pokud srovnáme tyto dvě buněčné kultury, vidíme, že buňky G361 jsou protáhlejší a tvoří jakoby propletenou síť pomocí invadopodií rostoucích z jednotlivých konců buněk. Naopak buňky z linie A549 jsou většinou kratší a širší než A549. V topografickém obraze lze pozorovat výškové rozdíly, které jsou charakterizovány světlými a tmavými částmi v obraze [21]. Čím je světlejší oblast, tím má vzorek v tomto místě větší výšku. Obr. 1 je výškově rozdělen do intervalu 0 - 1,67 μm, kde nejvyšší místo je zobrazeno bílou barvou. Rychlost skenování je v biologických aplikacích rozhodující pro výslednou kvalitu skenu. V zásadě platí, že čím je rychlost skenování pomalejší, tím čistější a přehlednější snímek



Obr. 2 Detail buněčné linie A549, jedná se o fázové zobrazení adherované buňky k povrchu, velikost skenu je 20 × 20 μm, skenovací rychlost 20 μms<sup>-1</sup>



bez artefaktů získáme. V reálném případě sken 100 x 100 μm trvá cca 5 minut v závislosti na nastavení rychlosti skenu. Při rychlosti 100 μms<sup>-1</sup> trvá jeden sken 300 s, pokud máme nastaveno rozlišení 300 × 300 dpi. Pokud chceme sledovat dynamické vlastnosti buněk, je vhodné zvýšit skenovanou rychlost alespoň na 200 μms<sup>-1</sup>, abychom získali data, která věrně popisují specifické vlastnosti v určitých časových intervalech [24]. Tím narážíme na jeden z problémů kvality snímku. V takovémto případě musíme rozhodnout, zda upřednostníme kvalitu snímku před kvantitou a sérií dynamického procesu, či opačně. Pro získání kvalitního skenu je třeba užívat substráty čerstvě připravené. Na *obrázku 2* můžeme vidět detail uchycení buněk k substrátu. Substrát je modifikovaný poly-L-lysinem [22] a konečná fixace je prováděna GA. Při srovnání obrázků 2, 3 a 4 je vidět, že fázové zobrazení je oproti výškovému zobrazení bohatější na detaily. Domníváme se, že čím větší detail skenujeme, tím kvalitnější sken získáme užitím fázového zobrazení. Topografické zobrazení není tak přehledné v detailech právě díky různým výškovým přechodům s relativně malými změnami ve škále barev na obr. 4. Naopak při větších objektech bez jemných detailů je vhodné použít raději topografii než fázové zobrazení, viz obr. 5. Tyto skeny jsou vysokého rozlišení s viditelnými jemnými detaily, a proto se řadí mezi nejkvalitnější skeny, které byly metodou AFM při studiu získány.



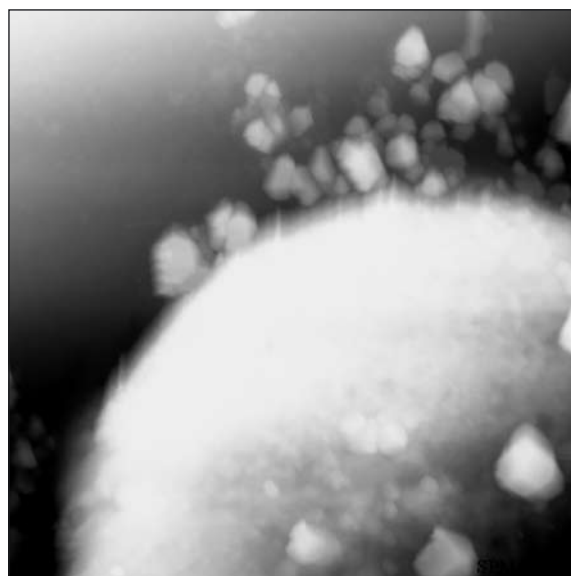
Obr. 3 Buněčná linie G361, jedná se o fázové zobrazení buňky s krystaly CIAIPcS<sub>2</sub>, velikost skenu je 46 × 46 μm, skenovací rychlost 40 μms<sup>-1</sup>

Na *obr. 3* je prezentována buněčná linie G361 spolu se sensitizerem 20 μM CIAIPcS<sub>2</sub>. PDT ale nebyla uskutečněna a obrázky byly pořízeny po vysušení neozářeného vzorku. Na obrázku vidíme tři mrtvé buňky. Předpokládáme, že drobné útvary kolem buněk jsou vykrystalizovaný sensitizer, který se akumuluje kolem jednotlivých objektů. Tento jev se vyskytoval téměř vždy při použití ftalocyaninu při studiu za sucha.

Jemné čáry v obraze jsou typem artefaktů způsobených hrotem, který zachytil špatně uchycené drobné objekty a táhl je po celé délce skenu. Tyto čáry se dají odstranit pomocí softwarového zpracování, avšak pokud je ve skenu čar velké množství, tento krok není vhodný z důvodu celkové změny obrazu.

Detail okraje mrtvé buňky spolu s krystaly ftalocyaninu je na *obr. 4*. Zobrazena je topografie ve výškovém intervalu 0 – 1,66 μm. Tento sken je bez větších viditelných artefaktů i přes skutečnost, že velikost skenu je pouze 7 × 7 μm.

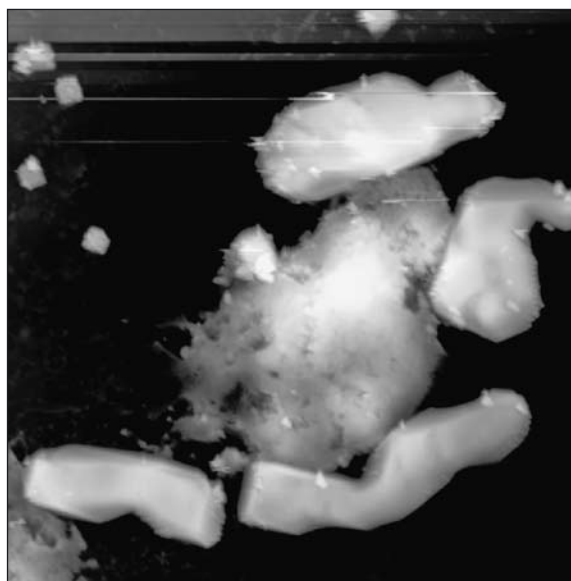
Na *obr. 5 a 6* je zobrazena buněčná linie A549 po PDT s využitím CIAIPcS<sub>2</sub>. Výsledkem této terapie je smrt buněk apoptózou.



Obr. 4 Detail buňky buněčné linie G361, zobrazena je topografie, velikost skenu je 6,94 × 6,94 μm, skenovací rychlost 6 μms<sup>-1</sup>

Průkazem tohoto jevu jsou jasně viditelná apoptotická tělíska lokalizovaná v těsné blízkosti buněk. Apoptóza se v konečné fázi projevuje morfologickými změnami (smrštění buněk, kondenzace jaderného chromatinu, tvorba apoptotických tělísek) a fragmentací DNA, která nastává nejméně 4 hodiny před zánikem buňky [26]. Skeny byly prováděny po 20 hodinách od ozáření červeným světlem pomocí LED diod. Substrát byl modifikován pomocí poly-L-lysinu a buňky byly zafixovány pomocí 1% GA v PBS. Skenování bylo prováděno za sucha.

Zde se již nejedná přímo o buňku, ale o její zbytek, který je rozdělen na několik částí. Zbytek buňky je nepravidelného tvaru, na rozdíl od apoptotických tělísek, která mají tvar pravidelný a stranově i výškově ohraničený. V horní části obrazu je artefakt vzniklý kontaktem hrotu s malým objektem umístěným v této oblasti. Vznikl tak světlejší pruh široký několik mikrometrů. Posléze se rezonance hrotu ustálila a zbytek skenu je již ve vysoké kvalitě.

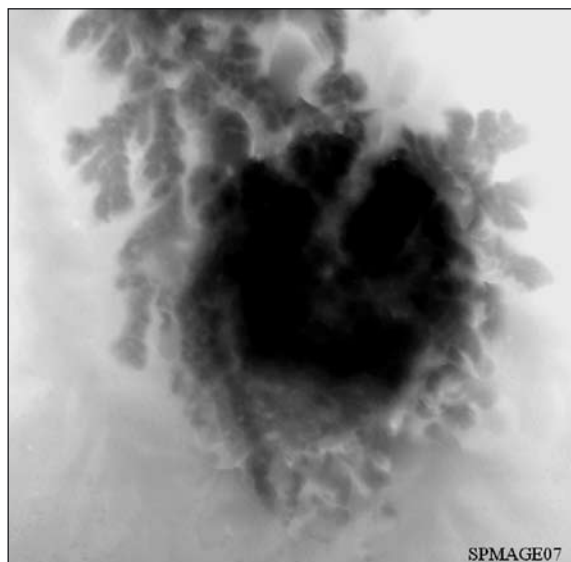


Obr. 5 Buněčné linie A549, zobrazena je topografie buněk s jejich apoptotickými tělísky, velikost skenu je 33 × 33 μm, skenovací rychlost 30 μms<sup>-1</sup>





Obr. 6 Buněčné linie A549, jedná se o fázové zobrazení zbytku buňky s apoptotickými tělísky, velikost skenu je  $10 \times 10 \mu\text{m}$ , skenovací rychlost  $9 \mu\text{ms}^{-1}$



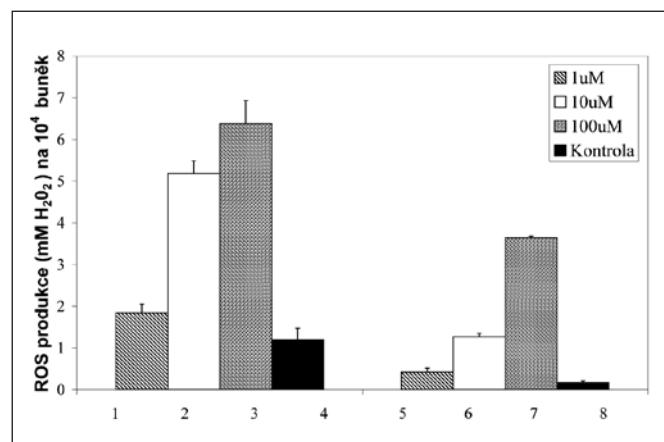
Obr. 7 Buněčné linie G361, zobrazena je topografie mrtvé buňky, velikost skenu je  $47 \times 47 \mu\text{m}$ , skenovací rychlost  $40 \mu\text{ms}^{-1}$

Detail zbytku buňky a dvou apoptotických tělísek je na obr. č. 6. Jedná se o fázové zobrazení a 3D topografii. Tělíska zde vykazují hladkou strukturu a hranatý tvar. Naopak zbylá část buňky má zvrásnělý povrch a vykazuje asi polovinu výšky tělísek. Fázové zobrazení nám poskytuje informaci o jemných detailech povrchu a topografické zobrazení o výškové struktuře objektů. Nastavením nízké skenovací rychlosti jsme získali skeny ve vysokém rozlišení a bez artefaktů [27].

Na obrázku 7 je zobrazen detail spodní buňky v inverzním zobrazení. To znamená, že výškové změny jsou zobrazeny v opačném škálování. Nejvyšší části jsou černé, nejnižší bílé. Výška je v intervalu  $0 - 2 \mu\text{m}$ . Rychlost skenování je  $40 \mu\text{ms}^{-1}$ . Pokud se zaměříme na zpracování skenu pomocí řádkové analýzy, zjistíme, že povrch buňky není hladký, jak je tomu např. na skenu č. 1, ale je zvrásnělý a výškové skoky v linii jsou větší, řádově  $200 \text{ nm}$  a větší. Výškové rozdíly nám v tomto případě naznačují stupeň poškození buněčné membrány a skeletu buňky. Domníváme se že nastala nekróza, neboli zánik buňky v důsledku poškození buněčné membrány. K nekróze dochází důsledkem extrémních vnějších

fyzikálních podmínek (např. extrémní teplota, tlak, osmolarita, pH) nebo silného poškození buněk, které je vyvoláno chemickými látkami. Nekróza je obecně doprovázena ztrátou membránové integrity a metabolické homeostáze, což je způsobeno bezprostředním a neřízeným rozpadem buňky. Pasivní zánik buněk je charakterizován morfologickými změnami, jako je otok a protržení membrány (poškození cytoplazmy a karyolýza).

Produkce ROS po dávce  $15 \text{ Jcm}^{-2}$  je shrnuta v grafu 1. Jsou zde uvedeny testované koncentrace použitého sensitizeru a výsledný poměr produkce ROS u linií G361 a A549. Vzorek 1 – 4 představuje G361 buněčnou linii koncentracemi CIAIPCS<sub>2</sub> 1, 10 a  $100 \mu\text{M}$  a kontrolu, ve které nebyl přidán sensitizer. Vzorek 5 – 8 představuje A549 buněčnou linii ve stejných koncentracích a kontrolu. Výsledná produkce ROS naznačuje, že G361 buněčná linie je citlivější k PDT než A549. Největší produkce ROS ukazují u obou vzorků koncentrace  $100 \mu\text{M}$ . Naopak nejnižší  $1 \mu\text{M}$ , která koresponduje s produkcí v kontrole.



Graf 1 Produkce ROS po fotodynamické terapii se sensitizerem CIAIPCS<sub>2</sub> v koncentracích 1, 10 a  $100 \mu\text{M}$  a dávce  $15 \text{ Jcm}^{-2}$ . Vzorek 1 – 4 je linie G361, vzorek 5 – 8 je linie A549

## Poděkování

Tento projekt byl řešen za podpory výzkumného záměru MSM 6198959216.

## Literatura

- [1] Langer MG, Koitschev A, Haas H, Rexhausen U, Hörber JKH, Ruppertsberg JP. 2000. Mechanical stimulation of individual stereocilia of living cochlear hair cells by atomic force microscopy. *Ultramicroscopy* **82**: 269 - 278.
- [2] Madl J, Rhode S, Stangl H, Stockinger H, Hinterdorfer P, Schütz GJ, Kada G. 2006. A combined optical and atomic force microscope for live cell investigations. *Ultramicroscopy* **106**: 645-651.
- [3] Fotiadis D, Scheuring S, Müller SA, Engel A, Müller D. J. Imaging and manipulation of biological structures with the AFM. 2002. *Micron* **33**: 385 - 397.
- [4] Fujita M, Mizutani W, Gad M, Shigekawa H, Tokumoto H. 2002. Patterning DNA on  $\mu\text{m}$  scale on mica. *Ultramicroscopy* **91**: 281 - 285.
- [5] Kienberger F, Stroh C, Kada G, Moser R, Baumgartner W, Pastushenko V, Rankl C, Schmidt U, Müller H, Orlova E, LeGrimellec C, Drenckhahn D, Blaa D, Hinterdorfer P. 2003. Dynamic force microscopy imaging of native membranes. *Ultramicroscopy* **97**: 229 - 237.
- [6] Dufrène YF, Boonaert ChJP, van der Mei HC, Busscher HJ, Rouxhet PG. Probing molecular interactions and mechanical properties of microbial cell surfaces by atomic force microscopy. 2001. *Ultramicroscopy* **86**: 113 - 120.

- [7] You HX, Lau JM, Zhang S, Yu L. 2000. Atomic force microscopy imaging of living cells: a preliminary study of the disruptive effect of the cantilever tip on cell morphology. *Ultramicroscopy* **82**: 297 - 305.
- [8] Lehenkari PP, Charras GT, Nykänen A, Horton MA. 2000. Adapting atomic force microscopy for cell biology. *Ultramicroscopy* **82**: 289 - 295.
- [9] Tamaro J, Humphris ADL, Owe RJ, Milej MJ. 2001. High-Q dynamic force microscopy in liquid and its application to living cells. *Biophysical J.* **81**: 526 – 537.
- [10] Vié V, Giocondi MC, Lesniewska E, Finot E, Goudonnet JP, Le Grimellec C. 2000. Tapping-mode atomic force microscopy on intact cells: optimal adjustment of tapping conditions by using the deflection signal. *Ultramicroscopy* **82**: 279-288.
- [11] Bolshakova AV, Kiselyova OI, Filonov AS, Frolova O, Lyubchenko YL, Yaminsky IV. 2001. Comparative studies of bacteria with an atomic force microscopy operating in different modes. *Ultramicroscopy* **86**: 121 - 128.
- [12] Kessel D. 2004. Photodynamic therapy: from the beginning. *Photodiag. Photodyn. Ther.* **1**: 3-7.
- [13] Wu Y, Xing D, Luo S, Tang Y, Chen Q. 2006. Detection of caspase-3 activation in single cells by fluorescence resonance energy transfer during photodynamic therapy induced apoptosis. *Cancer Letters* **235**: 239-247.
- [14] Dougherty TJ. 1993. Photodynamic therapy. *J. Photochem. Photobiol.* **58**: 895 - 900.
- [15] Doktycz MJ, Sullivan CJ, Hoyt PR, Pelletier DA, Wu S, Allison DP. 2003 AFM imaging of bacteria in liquid media immobilized on gelatin coated mica surfaces *Ultramicroscopy* **97**: 209 - 216.
- [16] Nowakowski R, Luckham P, Winlove P. 2001. Imaging erythrocytes under physiological conditions by atomic force microscopy. *Biochim. Biophys. Acta* **514**: 170 - 176.
- [17] O'Reilly MO, McDonnell L, Mullane JO. 2001. Quantification of red blood cells using atomic force microscopy. *Ultramicroscopy* **86**: 107 - 112.
- [18] Spatz JP, Sheiko SS, Möller M. 1998. Shape and quality control of modified scanning force microscopy tips. *Ultramicroscopy* **75**: 1 - 4.
- [19] Santos NC, Castanho M. 2004. An overview of the biophysical applications of atomic force microscopy. *Biophys. Chem.* **107**: 133 - 149.
- [20] Chasiotis I, Fillmore HL, Gillies GT. 2003. Atomic force microscopy observation of tumour cell invadopodia: novel cellular nanomorphologies on collagen substrates. *Nanotechnology* **14**: 557 - 561.
- [21] Lee JWM, Mash-Lee N. 2004. A nano-view of West Nile virus-induced cellular changes during infection. *Journal of Nanobiotechnology* **2**: 1-7.
- [22] Richert L, Arntz Y, Schaaf P, Voegel JC, Picart C. 2004. pH dependent growth of poly(L-lysine)/poly(L-glutamic) acid multilayer films and their cell adhesion properties. *Surface Science* **570**: 13-29.
- [23] Chen ZH, Chen B, Lu ZX, Pang DW, Song Y. 2005 Assembling zwitterionic, water-soluble porphyrin and its biological studies. *Wuhan University J. Sciences* **10**: 587-590.
- [24] Méndez-Vilas A, Corbacho I, González-Martin ML, Nuevo MJ. 2004. Direct surface probing of cell wall-defective mutants of *Saccharomyces cerevisiae* by atomic force microscopy. *Appl. Surf. Sci.* **238**: 51 - 63.
- [25] Baugh SDP, Yang Z, Leung DK, Wilson DM, Breslow R. 2001. Cyclodextrin dimers as cleavable carriers of photodynamic sensitizers. *J. Am. Chem. Soc.* **123**: 12488-12494.
- [26] Sadzuka Y, Tokutomi K, Iwasaki F, Sugiyama I, Hirano T, Konno H, Oku N, Sonobe T. 2006. The phototoxicity of photofrin was enhanced by PEGylated liposome in vitro. *Cancer Letters* **241**: 42-48.
- [27] Moloney M, McDonnell L, O'Shea H. 2002. Immobilisation of Semliki forest virus for atomic force microscopy. *Ultramicroscopy* **91**: 275 - 279.
- [28] Horcas L., Fernandez R., Gomez-Rodriguez J. M., Colchero J., Gomez-Herrero J., and A. M. Baro, *Rev. Sci. Instrum.* **78**, 013705 (2007)

# Sub-micrometre-scale analysis of defects in semiconductors and dielectrics

*The capacitance- and charge-based Deep Level Transient Spectroscopy are well established methods of analysis of defects in semiconductors, and in both semiconductors and dielectrics, respectively. Their sensitivity can be increased to a level sufficient for application in scanning probe microscopy. The paper presents a comparison of the two methods, their advantages and limits, as well as examples of isothermal charge-transient spectra obtained on pentacene thin film.*

## 1. INTRODUCTION

Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS), invented by D. Lang [1], has become in the last three decades the probably most successful method of analysis of deep defects in semiconductor structures. The attribute "deep" denotes defects, which create in the gap of the material energy levels deep enough to be neutral under normal conditions but if ionised, can trap charge carriers for shorter or longer time. They may be intrinsic property of the material, like the EL2 level in GaAs, may be introduced intentionally, e.g. by Au doping to reduce the lifetime of minority carriers in fast switching Si diodes or, in most cases, unwanted impurities or structural defects.

In DLTS a depletion layer is created in the investigated MOS capacitor, Schottky barrier or *pn* junction. Then the energy levels that cross the Fermi level become ionised. Voltage pulses superimposed on the bias voltage force the structure towards accumulation, resulting in charge trapping at these levels. After return to depletion the non-equilibrium charges are emitted at a temperature-dependent rate. The relaxation of the depletion layer yields the information on the kind and concentration of defects.

The original version of DLTS used the high-frequency capacitance to monitor the relaxation of the investigated structure. An alternative, comparably sensitive method is based on direct measurement of the transient charge [2]. Its advantage is that it can be applied also to low-conductivity samples. In conventional DLTS the emission rate of charges trapped in the defects is changed by heating, e.g. from LNT to room temperature and above. Such approach is impracticable in microscopy, where data from many points must be collected, which would pose extreme requirements on the instrument's stability in temperature and time. An acceptable solution is to make relaxation-time (Isothermal Capacitance- or Charge-Transient Spectroscopy) or frequency scans in selected locations, at a few constant temperatures [3].

A challenging task is the application of Isothermal Capacitance-Transient Spectroscopy (ICTS) or Isothermal Charge-Transient Spectroscopy (IQTS) to very small capacitors. This requires an orders of magnitude increased sensitivity. The problem has been solved recently by applying the excitation pulses to the gate and measuring the drain current [4] or channel conductance [5] of small field-effect transistor structure. Such benefit is not available in simple thin films.

Few attempts have been undertaken to apply capacitance-based analytical methods, widely used on macroscopic scale, locally. Capacitance transients obtained by means of a commercial microscope on iron-doped Si [6] were extremely small but measurable. More successful was the ICTS analysis of boron-doped Si [7]. The higher

sensitivity was achieved by means of a sharp needle-shaped probe instead of conductive cantilevers used in commercial microscopes, the large stray capacitance of which increase the noise [8,9]. The IQTS method has been first applied to small gate area thin-film transistors in capacitor arrangement [10,11]. Three defect types with energies 0.3, 0.4 and 0.5 eV have been detected.

In the present paper we demonstrate the possibility to perform the IQTS analysis on thin films in non-contact, i.e. metal-insulator-semiconductor (MIS) arrangement, where the insulator was ambient air. To our knowledge this is the first attempt to apply the method to a thin film locally.

## 2. IQTS SENSITIVITY

The resolution of capacitance microscopes can achieve values on the order of  $3 \times 10^{-19}$  F/V in 1 kHz bandwidth [8]. This is sufficient to resolve the charge of a single electron.

A charge-transient spectrometer integrates the transient current following after the excitation pulse. A simplified circuit diagram of an integrator is shown in Fig. 1. The current may be, in principle, first amplified and then integrated. Then the sensitivity is determined by the noise of the preamplifier. The signal-to-noise-spectral-density of a current-to-voltage amplifier, assuming a high source impedance, can be expressed as [12]

$$U_2/u_{\text{nsd}} = I_1 / \left[ e_n^2 (1/R + 1/X_i)^2 + i_n^2 + 4kT/R \right]^{1/2}, \quad (1)$$

where  $I_1$  is the input current,  $R$  the feedback resistor,  $X_i$  the input reactance,  $e_n$  the voltage noise spectral density and  $i_n$  the current noise spectral density of the operational amplifier. For a fast JFET opamp (OPA656 from Burr-Brown), 3.5 pF input capacitance and 100 MΩ resistor, the largest allowing a 100 kHz bandwidth,  $U_2/u_{\text{nsd}} = I_1/3 \times 10^{-14}$  result at 100 kHz, i.e. the noise corresponds to  $1.9 \times 10^5$  electrons/ $\sqrt{\text{Hz}}$  or 3  $\mu\text{V}$  at the output.

Other option is integration already in the first stage. High sensitivity requires the use of small integrating capacitors. To achieve a wide relaxation time range, the integration should cover a wide time span, first of all at short times. This dictates the use of fast JFET-type operational amplifiers, which have non-negligible bias currents, typically about 1 pA. The bias current, if not correctly compensated, is also integrated and may saturate the integrator.

Another important component is the switch that periodically zeroes the integrator. In any MOS switch charge injection takes place, the smallest on the order of  $\sim 0.5$  pC. It is an enormous charge, about  $3 \times 10^6$  electrons. Besides the smallest possible injected charge a small leakage of the switch is important.



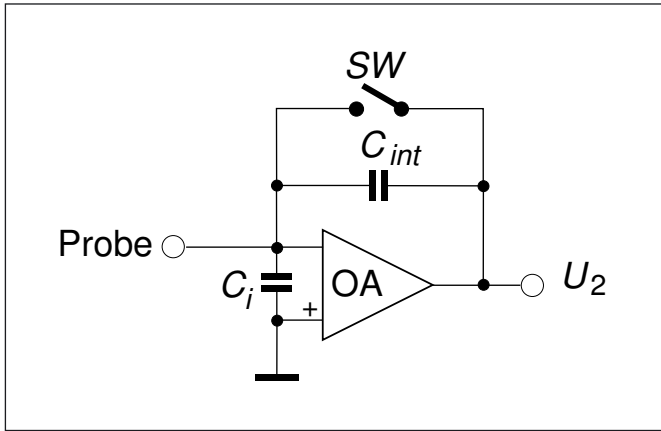


Fig. 1 Simplified schematic of switched integrator. The main sources of noise are besides the operational amplifier also the channel of the switch. The opamp voltage noise is amplified by the ratio  $C_i/C_{int}$

From the point of view of the smallest detectable charge the integrator noise becomes important. For a circuit from Fig. 1 the output noise spectral density, ignoring the noise and assuming infinitely high off-resistance of the switch, can be derived using the expression (1) and omitting  $R_2$  (assumed to be infinity)

$$u_{nsd} = e_n C_i / C_{int}, \quad (2)$$

where  $C_{int}$  is the integrator capacitance and  $C_i$  is the opamp input capacitance. The noise current of the amplifier has a negligible effect at high frequencies but may be responsible, together with the  $1/f$  noise, for increased noise below 10 kHz. The output voltage of the integrator is

$$U_2 = \int i(t) dt / C_{int}. \quad (3)$$

Since the output voltage is also inversely proportional to the integrator capacitance, the achievable resolution depends on the voltage noise spectral density and the input capacitance, plus any parallelly connected parasitic capacitance. Thus the signal-to-noise ratio will be

$$U_2 / u_{nsd} = Q / e_n C_i. \quad (4)$$

For the same operational amplifier  $e_n = 7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ . With  $C_{int} = 50 \text{ fF}$ ,  $u_{nsd} = 490 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  results.

The current noise of the opamp is declared to be  $1.3 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ . It would produce an output voltage  $42 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 100 kHz and  $4.2 \text{ }\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 1 kHz. The leakage current of the switch in off-state should be less than 10 pA. This would produce a shot noise [13]  $i_{sn} = (2qI)^{1/2} = 1.8 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ , resulting in output noise voltage  $57 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  and  $5.7 \text{ }\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ , at 100 kHz and 1 kHz, respectively.  $q$  stands for the charge of electron and  $I$  is the  $dc$  current. The resulting noise from all contributions would be  $495 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  and  $7.08 \text{ }\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 100 kHz and 1 kHz, respectively. The measured noise of the integrator was  $4 \text{ }\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 100 kHz, which corresponds to approximately 1.25 electrons/ $\sqrt{\text{Hz}}$  or 40 electrons in 1 kHz bandwidth at 100 kHz. At 1 kHz it was about five times larger. This is more than four orders of magnitude better than using a current preamplifier but still two orders of magnitude less than can be achieved with a good capacitance sensor.

### 3. EXPERIMENTAL

Samples of 380 nm thick pentacene film, deposited on  $p+$  Si wafer, serving as the back contact, have been investigated.

The bias voltage and the excitation pulses have been applied to the backside of the sample. As the probe a cut  $80 \text{ }\mu\text{m}$  tungsten wire, with 4 mm unshielded length, placed approximately perpendicu-

larly to the surface has been used. Its distance has been defined by setting a few pA tunnelling current. The true shape and effective area of the probe have not been investigated, thus the present data cannot be converted to the defect concentration.

The output of the integrator has been sampled and digitised in  $2 \text{ }\mu\text{s}$  steps by means of a 16 b A/D card. The transients have been converted into spectrum combining data taken at time instants  $t_1$  from  $2 \text{ }\mu\text{s}$  to 9.75 ms and its multiples at  $2t_1$  and  $4t_1$ , using the formula  $\Delta Q = Q(t_1) - 1.5 Q(2t_1) + 0.5 Q(4t_1)$  [14]. The rate window defined by this filter is  $1/t_1$ . It yields higher selectivity than the standard double boxcar processing and completely removes the linear component of the response, which can be caused by a constant current appearing at the converter input.

### 4. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2 shows a series of IQTS spectra of a pentacene film. They show the effect of illumination that causes an increase of the IQTS peak height and its shift to shorter relaxation time. The data are preliminary, taken with a poorly defined tip, therefore a quantification of the defect concentration has not been attempted.

The spectra are raw data. In spite of that their scatter is lower than of mean filtered data obtained with an earlier setup on thin-film transistors [10,11]. The equidistant sampling produces progressively increasing amount of data points at low frequencies, at which the signal/noise ratio is less satisfactory, thus compensating this drawback.

The results suggest that local IQTS analysis of thin films with resolution of tens of aF is possible. Conversion of charge resolution to spatial resolution depends on the properties of scrutinised sample.

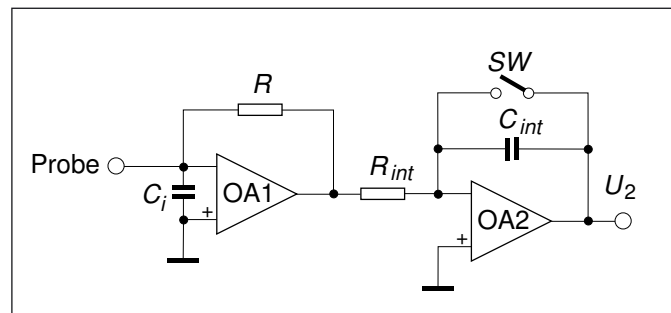


Fig. 2 Current amplifier followed by switched integrator. The integrator capacitance can be chosen arbitrarily, thus the effect of its input capacitance on noise can be reduced. The signal-to-noise ratio is determined by the preamplifier

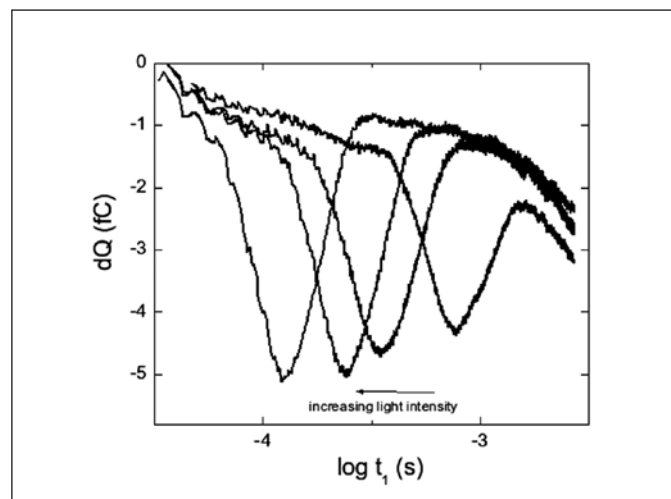


Fig. 3 Isothermal charge-transient spectrum of pentacene thin film prepared by thermal evaporation. Thickness 380 nm. The bias voltage and excitation pulses were 3V and -3V with respect to the probe, pulse width 10 ms

At low defect concentration their average separation may be tens of nm and the achieved resolution may be at the best hundreds of nm, whereas at high concentration it might attain tens of nm.

#### ACKNOWLEDGEMENT

Samples of pentacene thin film were supplied by J. Puigdollers from Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. The work was partly supported by Research and Development Support Agency (Project No. APVT-51-013904) and VEGA Grant Agency (Projects No. 2/5097/25 and 2/4100/04).

#### References

- [1] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.* **45**, 3023 (1974).  
 [2] K. I. Kirov, K. B. Radev, *Phys. Stat. Sol. (a)* **63**, 711 (1981).  
 [3] G. Ferenczi, J. Boda and T. Pavelka, *Phys. Stat. Solidi (a)* **94**, K119 (1986).  
 [4] M. Exarchos, F. Dieudonne, J. Jomaah, G. J. Papaioannou and F. Balestra, *Microelectron. Reliab.* **44**, 1643 (2004).  
 [5] P. V. Kolev and M. J. Deen, *J. Appl. Phys.* **83**, 820 (1998).  
 [6] A. L. Tóth, L. Dózsá, J. Gyulai, F. Giannazzo and V. Rainieri, *Mat. Sci. Semicond. Process.* **4**, 89 (2001).  
 [7] C. K. Kim, I. T. Yoon, Y. Kuk and H. Lim, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 613 (2001).  
 [8] Š. Lányi, *Acta Phys. Slovaca*, **52**, 55 (2002).  
 [9] M. LeFevre, cited in: D. T. Lee, J. P. Pelz and B. Bhushan, *Rev. Sci. Instrum.*, **73**, 3525 (2002).  
 [10] V. Nádaždy, V. Rana, R. Ishihara, Š. Lányi, R. Durný, J. W. Metselaar and C.I.M. Beenakker, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **910**, 0910-A19-02, Materials Research Society 2006,  
 [11] Š. Lányi and V. Nádaždy, *Ultramicroscopy*, in press.  
 [12] Š. Lányi, *Meas. Sci. Technol.* **12**, 1456 (2001).  
 [13] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, Cambridge University Press 1985.  
 [14] I. Thurzo, K. Gmucová, *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 2244 (1994).

Ing. Štefan Lányi, DrSc., Institute of Physics, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia, tel. 59410 511  
 Ing. Vojtech Nádaždy, CSc., Institute of Physics, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia, tel. 59410 542  
 doc. Ing. Miloslav Hruškovič, PhD., Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia, tel. 421 260 291 592  
 doc. Ing. Ján Hrbík, PhD., Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia, tel. 421 260 291 353

Jan MAREŠ, Martin LIBRA, Česká zemědělská univerzita v Praze

## Testování solárního regulátoru v malém fotovoltaickém systému

### ÚVOD

V současné době je význam malých ostrovních fotovoltaických (PV) systémů především v napájení různorodých aplikací na odlehklých místech vzdálených od elektrorozvodné sítě. Ať již v soukromém sektoru, kde jsou typickými aplikacemi rekreační chaty na samotě, karavany, lodě apod., nebo v průmyslovém sektoru, kde se PV systémy využívají například k napájení monitorovacích stanic produktovodů, nouzových dálničních pojítek, meteorologických stanic (viz obr. 1) apod.



Obr. 1 Meteorologická stanice, Alpy

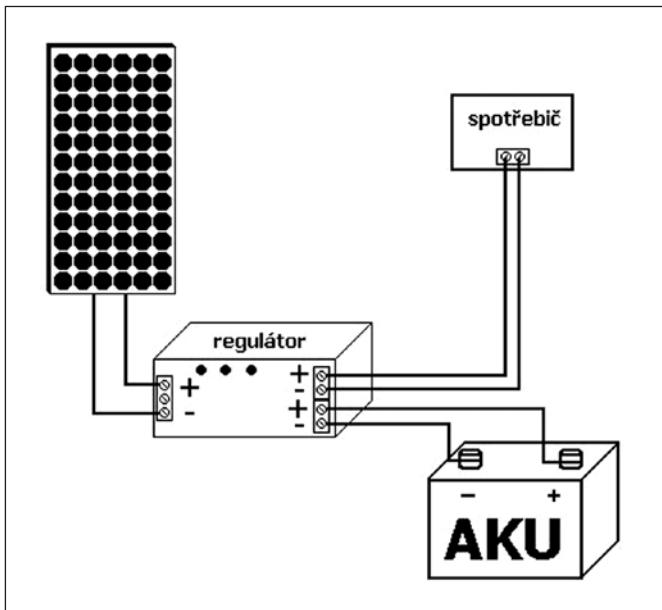
Na Technické fakultě ČZU v Praze v Laboratoři fyzikální energetiky katedry fyziky se zabýváme konstrukcí a testováním PV systémů a výsledky jsme již vícekrát publikovali i v časopisu *Jemná mechanika a optika* [1]. Mimo jiné zde nyní probíhá dlouhodobé měření malého ostrovního (nepřipojeného k síti) fotovoltaického systému. Tento systém obsahuje níže popsany solární regulátor nabíjejí akumulátor v režimu „nabíjení na konstantní napětí“ [1] a obsahující ochranu proti hlubokému vybití akumulátoru. Systém simuluje aplikaci s malým trvalým proudovým odběrem s konstantní hodnotou vybíjecího proudu 0,5 A. Denní odběr je tedy 12 Ah (trvalý odběr je z tohoto hlediska adekvátní k občasnému zatížení se střední denní hodnotou 12 Ah). Parametry systému jsou uvedeny v tab. 1. Cílem našeho studia je nejprve simulace celoročního provozu tohoto systému a poté následně i porovnání se systémem obsahujícím sledovač slunce a automatický pohyblivý stojan PV panelu [2].

Tab. 1 Parametry testovací soustavy

PV panel	na bázi monokrystalického křemíku 12 V ( $U_{oc} = 26$ V)/100 W
akumulátor	Dynalite 12 V, 44 Ah, olověný startovací
zátěž	elektronická regulovatelná, $I = 500$ mA
regulátor	na principu nabíjecí charakteristiky $U$ (na konst. napětí), integrovaná ochrana proti hlubokému vybití

## EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Blokové schéma zapojení ostrovního PV systému je na *obr. 2*. Jeho hlavními částmi jsou: PV panel, resp. pole PV panelů, regulátor, akumulátor elektrické energie a spotřebič. PV panel či panely bývají voleny podle požadavků napájené aplikace na jmenovité napětí a výkon. Podle druhu provozu jsou voleny i typy PV panelů. Pro aplikace s malým či občasným odběrem to mohou být PV panely na bázi tenkých vrstev amorfního křemíku. Ty vykazují menší účinnost fotovoltaické přeměny energie, tj. menší výkon  $P_{el}$  na jednotku plochy panelu v porovnání s PV panely na bázi monokrystalického či polykrystalického křemíku. Účinnost PV panelů na bázi tenkých vrstev amorfního křemíku je cca 8 - 12%, na bázi polykrystalického či monokrystalického křemíku cca 16 - 20%. Navíc účinnost PV panelů na bázi amorfního křemíku klesá s časem mnohem rychleji než účinnost PV panelů na bázi krystalického křemíku. Jejich výhodou je ale nižší pořizovací cena. Další výhodou panelů na bázi amorfního křemíku je vyšší napětí při nízkých intenzitách osvětlení, což může být příznivé pro aplikace s malým odběrem energie. Panely na bázi polykrystalického či monokrystalického křemíku mají vyšší účinnost fotovoltaické přeměny energie, zabírají tedy menší plochu při stejném výkonu a jsou vhodnější pro aplikace s větším odběrem energie. Jejich cena je však vyšší.

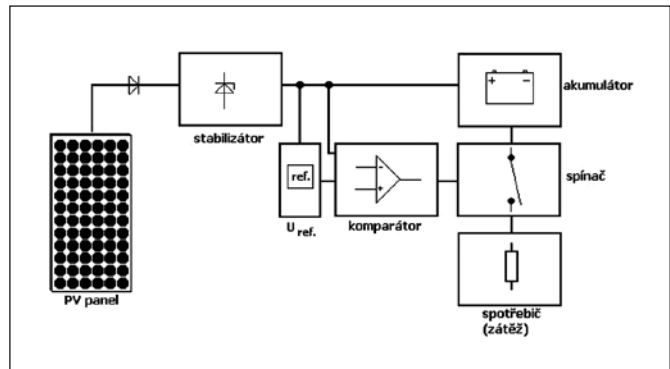


Obr. 2 Schéma zapojení ostrovního PV systému

Funkcí našeho malého ostrovního PV systému je akumulace energie pro potřeby napájení spotřebiče v období s nízkou intenzitou slunečního záření, např. v noci, v oblačných dnech apod. Akumulace elektrické energie do elektrochemických akumulátorů je sice nejméně efektivní, ale je jednoduchá a operativní. Obvykle se používá olovený staniční akumulátor, neboť ten je k režimu nabíjení a vybíjení probíhajícímu v ostrovním PV systému nejvhodnější. Pro sezónní aplikace lze s přihlédnutím k ceně použít i startovací olovený akumulátor. Při nízkých příkonech v řádu jednotek wattů lze využít i akumulátory NiCd, NiMH a Li-ion. Obzvláště akumulátory Li-ion se v současné době začínají vyrábět i pro větší výkony. Lze proto předpokládat, že pro své vlastnosti se časem stanou alternativou k dnes nejběžnějším oloveným akumulátorům.

Významným prvkem ostrovního PV systému je regulátor. V jednodušším případě se jedná pouze o nabíječku akumulátoru. V současnosti jsou však již standardem regulátory s funkcemi chránícími akumulátor proti hlubokému vybití, s inteligentním nabíjením, resp. nabíječkou s využitím MPP (metoda Maximum Power Point). Pro systémy s malým či příležitostným odběrem, jako např. nouzová

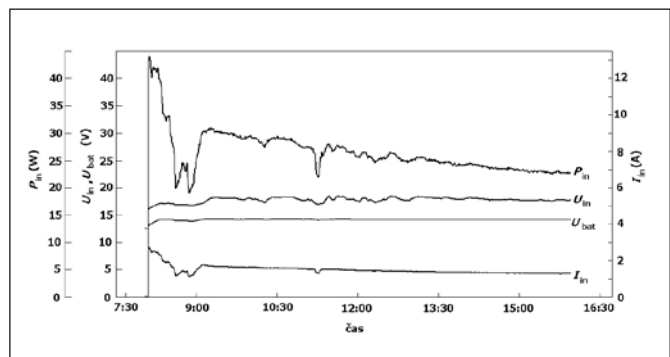
dálniční pojítka či malé monitorovací stanice, jsou vhodné analogové nabíječky pracující podle nabíjecí charakteristiky „ $U^*$ “ (nabíjení na konstantní napětí) se stabilizátorem napětí. Výstupní napětí je stabilizováno na hodnotu napětí plně nabitého akumulátoru, popř. na hodnotu o trochu nižší. Toto napětí bývá udáváno v katalogových listech výrobce, např. pro olovený akumulátor jmenovitého napětí 12 V je tato hodnota 14,4 V. Při nabíjení podle charakteristiky „ $U^*$ “ lze ponechat akumulátor trvale připojen k regulátoru nabíjení (nabíječce), což je nutná podmínka pro samostatný provoz PV systému. Další podmínkou je ochrana akumulátoru proti hlubokému vybití, která zamezí nevratnému poškození akumulátoru. Ochrana proti hlubokému vybití je konstruována tak, že porovnává napětí akumulátoru vůči referenčnímu napětí. Při poklesu napětí akumulátoru pod nastavenou mez je zátěž odpojena. Tato mez je zvolena rovněž podle údajů výrobce akumulátoru. S určitou hysterezí dojde opět k připojení zátěže po nárůstu napětí nabitého akumulátoru nad tuto hodnotu. Blokované schéma analogové nabíječky s použitím stabilizátoru napětí a ochrany akumulátoru proti hlubokému vybití je na *obr. 3*.



Obr. 3 Blokované schéma nabíječky se stabilizátorem napětí

## VÝSLEDKY

*Obr. 4* ukazuje závislost vybraných veličin na čase během nabíjení oloveného startovacího akumulátoru v ostrovním PV systému s naší vyvinutou a testovanou analogovou nabíječkou se stabilizátorem napětí. Součástí systému je i regulovatelná zátěž nastavená v tomto případě na konstantní odběr proudu 500 mA, která simuluje spotřebič s malým odběrem. Na grafu je patrný počátek nabíjení, kdy napětí akumulátoru  $U_{bat}$  stoupne k hodnotě 14,4 V a tam je nadále udržováno stabilizátorem, nezávisle na větším kolísajícím vstupním napětí  $U_{in}$ . Patrný je rovněž výrazný pokles nabíjecího proudu  $I_{in}$  v počátku nabíjení. Ten je způsoben poklesem intenzity osvětlení důsledkem oblačnosti. Nabíjecí proud se s nabíjecím časem dále snižuje s téměř lineárním trendem průběhu v závislosti na stupni nabití akumulátoru. V delším časovém průběhu postupně poklesne proud k velmi malým hodnotám až k tzv. udržovacím



Obr. 4 Závislost vybraných veličin na čase během nabíjení oloveného startovacího akumulátoru v ostrovním PV systému



proudu, který kompenzuje samovybití akumulátoru. Akumulátor tak nemůže být přebíjen a může být k tomuto typu nabíječky připojen libovolně dlouho. Právě toto je hlavní výhodou nabíjení na konstantní napětí a předurčuje tuto nabíjecí charakteristiku do systémů s dlouhodobým provozem.

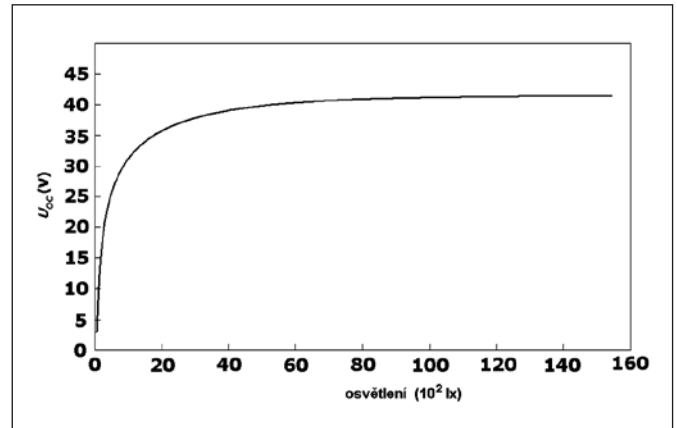
Výhodou nabíjecí charakteristiky „ $U$ “ je dodání většiny náboje vybitému akumulátoru především v první fázi nabíjení. Podle voltampérové charakteristiky PV panelu je napětí dané zatížením PV panelu. V počáteční fázi nabíjení je napětí vlivem velkého nabíjecího proudu zpravidla menší než nastavená hodnota výstupního napětí stabilizátoru v regulátoru. Stabilizátor musí být proto schopen pracovat i při nižších napětích bez rizika zakmitávání. Celkově ale  $U$ - $I$  charakteristika PV panelu odpovídá potřebám pro nabíjení dle charakteristiky „ $U$ “ [1]. Navíc se v této fázi nabíjení pohybuje pracovní bod v blízkosti bodu maximálního výkonu. V dalších fázích nabíjecí proud postupně klesá, což je patrné z grafu. Tím se prodlužuje doba potřebná pro dosažení plně nabitého akumulátoru. Regulátor nabíjecí na konstantní napětí je tak vhodný do systémů pracujících s malým odběrem, avšak nejvhodnější je do systémů s občasným odběrem. Tam je schopný v první fázi nabíjení nabíjet vybitý akumulátor zprvu větším proudem a postupně akumulátor snižujícím se proudem plně nabít a udržovat ho v tomto stavu pro další odběr elektrické energie po libovolně dlouhou dobu s vysokou spolehlivostí.

Tento způsob nabíjení není vhodný pro systémy s velkým a častým odběrem el. energie. Tam se uplatňují spíše metody nabíjení na konstantní proud, nebo metody kombinující nabíjení na konstantní proud v počáteční fázi nabíjení a na konstantní napětí v konečné fázi nabíjení. V současnosti jsou časté rovněž metody nabíjení využívající metody MPP (Maximum Power Point). Tato metoda zohledňuje aktuální stav PV panelů a pomocí DC/DC měničů upravuje nabíjecí proud tak, aby pracovní bod PV panelu byl stále shodný s bodem maximálního výkonu.

Námi vyvinutý a testovaný způsob nabíjení na konstantní napětí patří mezi jednodušší způsoby a na rozdíl od solárních regulátorů pracujících na principu MMP je elektrický výkon dodaný k nabíjení velmi závislý na osvětlení PV panelů. To není vhodné zejména v případě nabíjení vybitého akumulátoru, protože elektrický výkon PV panelů je především závislý na proudu (v souboru dat z obr. 4 je korelační koeficient mezi nabíjecím výkonem a nabíjecím proudem 0,99) a proud roste téměř lineárně s intenzitou osvětlení. Naopak napětí PV panelu je na osvětlení závislé přibližně logaritmicky a jeho kolísání v závislosti na proměnné intenzitě osvětlení je menší (korelační koeficient vstupního napětí PV panelu a nabíjecího elektrického výkonu je v souboru dat z obr. 4 cca 0,483). Příznivější situace je v případě nabíjení malým proudem v konečných fázích nabíjení, kdy je nutné především dostatečně velké napětí na vstupu regulátoru (min. napětí akumulátoru plus úbytek napětí na obvodech regulátoru).

Na obr. 5 je typická závislost napětí otevřeného obvodu PV panelu  $U_{oc}$  (napětí naprázdno) na intenzitě osvětlení. Jak je vidět, dosahuje napětí otevřeného obvodu PV panelu již při poměrně nízkých intenzitách osvětlení téměř maximální jmenovité napětí. Napětí zatíženého PV panelu je při nabíjení podle  $U$ - $I$  charakteristiky panelu závislé na proudu (napětí klesá při rostoucím proudu). V konečné fázi nabíjení a při tzv. udržovacím proudu je velikost proudu malá a napětí PV panelu se blíží napětí otevřeného obvodu (napětí naprázdno). Tedy udržovací dobíjení může probíhat i při nízkých intenzitách osvětlení a umožňuje tak udržovat akumulátor v plně nabitém stavu i při horších slunečních podmínkách.

Nevýhodou nabíjení na konstantní napětí je rovněž poměrně velká výkonová ztráta v obvodech regulátoru. Ta jednak zvyšuje cenu a rozměry regulátoru, neboť je potřebné chlazení aktivního prvku. Dále se tím snižuje účinnost regulátoru na cca 70 %. Tato ztráta je logicky největší právě při nabíjení vybitého akumulátoru, kdy jsou i největší požadavky na dodávaný výkon. Naopak při udržovacím nabíjení je tato ztráta akceptovatelná. Vyšší účinnosti dosahují regulátory pracující ve spínaném režimu, jejichž účinnost je v celém průběhu nabíjení nad 95%.



Obr. 5 Typická závislost napětí naprázdno PV panelu na intenzitě osvětlení

## ZÁVĚR

Dosavadní teoretické a praktické výsledky ukazují, že analogový solární regulátor se stabilizátorem napětí je vhodný pro ostrovní PV systémy s elektrochemickým akumulátorem s malým odběrem či příležitostným odběrem. Zde se uplatňuje výhoda nabíjecí charakteristiky „ $U$ “, která je schopná rychlého dodání většiny náboje vybitému akumulátoru a dále velmi šetrnému nabíjení. Akumulátor může být v tomto systému udržován ve stavu plného nabití i za horších slunečních podmínek. Mezi hlavní výhody patří především spolehlivost, jednoduchá konstrukce tohoto regulátoru a nízké pořizovací náklady.

Naopak pro systémy s větším a trvalým odběrem elektrické energie je tento způsob pro svou malou účinnost nevhodný. Zde se uplatňují regulátory s PWM (Pulse Wide Modulation – pulsně šířková modulace) řízením nabíjecího proudu a regulátory využívající algoritmus nabíjení MPP. Tyto regulátory jsou rovněž testovány na Technické fakultě v Laboratoři fyzikální energetiky v rámci simulace malých ostrovních PV systémů.

Práce probíhá v rámci řešení výzkumného záměru MSM 6046070905.

## Literatura

- [1] Mareš, J., Libra, M., *Dobíjení akumulátorů elektrické energie v ostrovních fotovoltaických solárních systémech*, Jemná mechanika a optika, 51, 10, (2006), str. 274-276
- [2] Libra, M., Poulek, V., *Solární energie, fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*, kniha-monografie, vydala Česká zemědělská univerzita v Praze, (2006), 149 stran, ISBN 80-213-1488-5

# AQUASTYL SLOVAKIA s meracou technikou v európskej špičke

Na 49. medzinárodnom strojárskom veľtrhu v Brne sme navštívili spoločnosť Aquastyl Slovakia, s.r.o. Oslovili sme zakladateľa a jedného z dvoch konateľov pána Petra Harváňka.

**Pán Harvánek, v oblasti meracej techniky podnikáte na Českom a Slovenskom trhu 16 rokov a na 49. strojárskom veľtrhu v Brne oslavujete 10. výročie vystavovania, čo bolo prvým impulzom podnikat' v oblasti meracej techniky?**

Pred 16 rokmi som pracoval v Považských strojárňach (PS). V období transformácie nášho priemyslu zrušili v podniku aj výrobu meracej techniky a ja som rozmýšľal ako ďalej. Začal som sa venovať výrobe súčiastok pre automobilový priemysel. Úspory, ktoré mali slúžiť rodine, som po dohode s manželkou investoval do podnikania, pričom návrat k meracej technike bol stále v centre môjho rozhodovania. Recesia strojárskej a ložiskovej výroby v Česku a na Slovensku spôsobila, že podniky prepustili veľa ľudí. Strojné zariadenia a meracie prístroje zostali. Do roku 1994 sme robili len drobné zásahy a opravovali prístroje vyrobené v PS. Ing. Jan Kůra sa zaoberal meracou technikou v novozaloženej českej firme Mesing v Brne. V tom čase ma upozornil na skutočnosť, že sa pomaly končí recesia meracej techniky, aby som sa jej začal venovať naplno vrátane investovania. Bola to veľmi dôležitá informácia a zlomové obdobie v mojom podnikaní. Okrem iného ma veľa naučil o meracej technike, meraní, meracích prístrojoch ale tiež o víne. Za to patrí Ing. Kůrovi moja veľká vďaka.



IL 100R/2000

**Dnes je spoločnosť Aquastyl už pojmom na trhu – ako vznikol trochu nezvyčajný názov pre firmu, ktorá sa zaoberá meracou technikou?**

V rokoch 1991 - 1994 sme spolupracovali s firmou AQUASTYL Prostějov s pánom Smékalom, opravovali sme čerpadlá, budovali malé vodné elektrárne, čistiarne odpadových vôd a podobne. Môj otec bol slovenský zástupca v tejto firme, ja jeho nasledovník. Odtiaľ názov firmy. Peniaze, ktoré sme zarobili, putovali do vývoja vlastných technológií a do aktivít v oblasti meracej techniky.

**... a to bol ďalší zlom vo vašej činnosti...**

Áno. Začal som investovať prostriedky do vývoja programov a technológií. Stal som sa členom Kalibračného združenia a neskôr Slovenskej metrologickej spoločnosti. Na pôde týchto organizácií



MUK 300PC

som presviedčal metroológov podnikov, ktoré vlastnili meracie prístroje vyrobené v PS, aby sa obracali na našu firmu, ktorá im poskytne odborný servis. Postupne sme rozširovali svoju činnosť. Bolo to len dočasné riešenie, pretože prístroje sa opotrebovávali a ja som si uvedomoval, že jediná cesta ako ďalej je - začať vyrábať. V 1997 roku sa naša firma prvýkrát zúčastnila na MSV v Brne v spoločnom stánku s Mesing Brno, kde sme vystavili náš prvý výrobok - kruhomer. Bol to prístroj s našou elektronikou, programom a PC. V spolupráci s firmou Mesing Brno a s pomocou Ing. Kůra, ktorý bol jeho tvorcom, sme prístroj inovovali a dostávali na vyššiu úroveň. S prvým našim prístrojom sme zaznamenali úspech, ktorý nás posunul ďalej. Začali sme robiť vo veľkom modernizácie meracej techniky a hlavne meracích prístrojov pre meranie kruhovitosti. Do dnešného dňa máme na trhu do 170 zariadení – približne 50 % zmodernizovaných a 50 % nových. Zarobené financie sme posúvali do vývoja nových technológií a rozširovania sortimentu. V roku 1997 prišiel do firmy Ing. Jozef Pobijak. Naše služby a výrobky sme rozšírili do oblasti merania tvrdosti. Pomerne rýchlo sme sa etablovali na slovenskom trhu a vytvorili tri odbory - geometrické tvary, vibrácie ložísk a tvrdosti materiálov. Začali sme s modernizáciou prístroja RB - 1. Tento prístroj sa dostal medzi európsku špičku. Prostredníctvom zastúpenia v Nemecku ho predávame do západnej Európy. Podobne je to s ďalšími prístrojmi.

**Tento rok oslavujete 10. výročie vystavovania na MSV Brno...**

Tak ako som už uviedol, v roku 1997 sme sa prvýkrát zúčastnili na MSV v Brne v spoločnom stánku so spoločnosťou Mesing Brno. Tento rok vystavujeme jedenásťkrát bez prerušenia, čo je zároveň dôvod na oslavy. Za tieto roky sme našu činnosť nasmerovali a uspeli v mnohých podnikoch zo Slovenska, Českej republiky, Európskej únie a USA, ktoré dnes patria medzi našich významných partnerov.

**Aby ste sa presadili na európskom trhu, museli ste sa akreditovať...**

Intenzívne sme začali pracovať na systéme kvality. Naša snaha o dosiahnutie vysokého stupňa kvality v metrologii sa naplnila v októbri 2005 preukázaním spôsobilosti a plnením požiadaviek normy ISO/IEC 17025:2005 získaním Osvedčenia o akreditácii.

### Aj ekonomické výsledky sa vyvíjali zaujímavo...

Do roku 2002 sme vyrábali deväť druhov meracích prístrojov a približne toľko sme aj modernizovali. Český trh bol iný ako slovenský a bolo to cítiť aj v našom obraze. V SR činil zhruba 30 % (aj keď sme obsluhovali 300 až 400 podnikov, v Českej republike asi 200). ČR zachytila trend zahraničného investovania podstatne skôr, čo u nás predstavovalo 70% obrat. Na Slovensku sa tento trend u nás prejavil po roku 2002, pričom spôsobil výraznú zmenu v percentách. Objem prostriedkov z Česka zostal zachovaný. Na Slovensku sme zaznamenali 200% nárast, čo tvorilo približne 70 % nášho obratu.

### Firma Aquastyl Slovakia prešla aj transformáciou. Právna subjektivita sa zmenila z fyzickej osoby na právnickú, a dnes ste spoločnosť s ručením obmedzeným. Došlo aj k iným zmenám?

Áno, spoluzakladateľom a druhým konateľom sa stal môj kolega Ing. Jozef Pobijak. Máme 10 pracovníkov a pre ďalších pripravujeme podmienky. Stratégiou firmy je nielen prístroje predávať, ale sa o ne aj starať. Ceny sa snažíme prispôbovať podmienkam ekonomického prostredia. Prioritami pri výbere nových zamestnancov sú odbornosť a charakterové vlastnosti, ktoré musia ísť ruka v ruku. Bez nich sa meracia technika robiť nedá. Vytýčili sme si určité ciele aj v sociálnej oblasti. Naším želaním je, aby si každý pracovník realizovaním sa v práci vytvoril dostatočné podmienky pre svoj súkromný život, ako napríklad slušné bývanie, oddych, dovolenky a podobne.

### Činnosť firmy ste za tie roky rozšírili aj smerom k vzdelávacím aktivitám, a veľmi cielene...

V roku 2004 sme podpísali spoluprácu so Strojníckou fakultou Žilinskej univerzity v oblasti zabezpečenia špecializačných kurzov a prednášok a tiež o vytvorení spoločného výskumno–realizačného pracoviska pre riešenie technických úloh. Gestorom tejto pomerne náročnej spolupráce za strojnícku fakultu je doc. Ing. Stanislav Turek, PhD., terajší prodekan fakulty, ktorý sa spoločnej úlohe venuje s profesionálnym prístupom a maximálnou zodpovednosťou. Dôležitým prínosom pre našu spoločnosť je aj spolupráca vo vývoji meracej techniky v oblasti valivých ložísk. Výsledkom týchto aktivít je spoločné školiace stredisko na pôde našej spoločnosti. Za necelé tri roky tejto spolupráce sa zúčastnilo špecializačných kurzov a prednášok cez 300 odborníkov.

Pre našu spoločnosť je taktiež dôležitá spolupráca s Politechnikou Świętokrzyską v Kielcach (Poľsko), najmä s pánom prof. dr hab. inž. Stanislavom Adamčákom dr h.c. a dr hab. inž. Dariuszom Janeckim, prof. PŠK, ktorých vedecké práce uplatňujeme v praxi v oblasti merania geometrických tvarov.

Naším cieľom je robiť prácu v oblasti meracej techniky komplexne, od myšlienky k vývoju, výrobe, predaju a servisu, až po vzdelávanie.

### Za pätnásť rokov ste dosiahli niekoľko mét. Jednoduchá otázka znie – ako ďalej?

Zatiaľ sme v podnájme, máme dobré podmienky a zmluvu do roku 2020. Chceme mať však svoje. Do 10 rokov by sme si chceli vybudovať vlastné priestory pre firmu. Našou snahou je vychovať aj nové riadiace kádre a pretransformovať sa na akciovú spoločnosť. Máme v pláne vybudovať servisné stredisko a otvoriť malý obchod s náradím pre našich klientov. Snahou je neustúpiť z pozícií, ktoré sme si za tých 16 rokov vybudovali. V stredo európskom regióne máme pomerne silné postavenie a veľmi dôležité je udržať si ho. To je podstatne náročnejšie. Špičkové konkurenčné firmy nás motivujú. Stane sa, že z času na čas máme oči pre plač, keď sa konkurencia dostane o krok pred nás. Našou odpoveďou je snaha o prekonanie.

A ako ďalej? Na začiatku som si vytýčil cieľ - vytvorím firmu s desiatimi ľuďmi, dosiahnuť určitý obrat a podobne. Obrat, o ktorom som kedysi sníval, sme prekročili. Dospel som k názoru, že v podnikaní je nutné, aby si človek stanovil taký cieľ, ktorý sa nedá



ROCKWELL RB-1E/AQ



V10K/AQ

dosiahnuť, pretože potom nedochádza k sebauspokojovaniu a stagnácii. Podnikatelia, ktorí to myslia zodpovedne, sú v určitom slova zmysle workoholici. Hodnotím to podľa seba. Celé roky pracujem aj počas víkendov, na čo z tej druhej strany doplatila moja manželka a rodina, ktorej som sa minimálne venoval aj napriek tomu, že som ju slušne finančne zabezpečoval. Môj syn a dcéra vyrastali akosi mimo mňa. Dnes mám však radosť z dcéry, zaťa a dvoch vnúčikov. Teší ma aj skutočnosť, že syn ide v mojich šľapajach. Je zamestnaný vo firme, začína ako každý iný od základu, a ak bude mať záujem, dvere hore sú otvorené, tie schody si však musí poctivo vyšliapať sám, podobne ako jeho dedo aj otec.

Miloslav Vychodil  
Jaroslav Nevřala  
Foto rtl, archív firmy Aquastyl



## RNDr. Jaroslav PECHAR - výročí narození

Před sto lety, 2. listopadu 1907, se narodil významný český optik Jaroslav PECHAR. Po studiu fyziky na Karlově univerzitě zůstal na fakultě jako asistent, obhájil disertaci a dosáhl hodnosti doktora přírodních věd. V r. 1935 odešel do Přerova a patřil spolu s Bedřichem Havelkou k zakladatelům optické továrny, jež dostala později jméno Optikotechna. Vybudoval a vedl její výzkumně vývojové laboratoře. Po válce se vrátil do Prahy, pracoval několik let v Ústavu technické optiky ČVUT a pak ve Filmovém ústavu Čs. filmu, ze kterého vznikl v r. 1953 Výzkumný ústav zvukové, obrazové a reprodukční techniky. Novému institutu vtiskl Pechar koncepci rozvoje aplikované optiky a příbuzných oborů obrazové techniky, stal se jeho vedoucím vědeckým pracovníkem, šéfem fyzikální sekce a dlouholetým vedoucím jeho optického oddělení. Jeho práce ve VÚZORTu zahrnovala široký okruh témat přístrojové optiky, fotometrie, senzitometrie, kolorimetrie a jiných disciplín se zaměřením na dosažení optimální kvality obrazu v zařízeních a procesech užívaných v kinematografii a později v televizi a zasahovala i do jiných vědních a technických oblastí. Namnoze vyžadovala hlubší teoretický přístup k problému, nicméně ústila vždy do návrhů a realizací výrobních a měřicích metod a optických systémů a zařízení. Pechar cíleně spojoval svou práci



v ústavu s činností v národních i mezinárodních zájmových organizacích a v poradních orgánech jiných výzkumných pracovišť. Sem patří jeho dlouhodobá aktivita v CIE, z níž vzešla řada doporučení a norem, a jeho činnost v oblasti scénografie: spolu s Josefem Svobodou stál u zrodu Polyekranu a Laterny Magiky. Dnešní multimedia vděčí za své počátky před půl stoletím i Pecharovým nápadům. Rozsáhlé bylo rovněž pedagogické působení dr. Pechara. Byl školitelem vědeckých aspirantů, mnoho let přednášel optiku na elektrotechnické fakultě ČVUT a na filmové a televizní fakultě AMU. Přednášel na vědeckých setkáních, psal výzkumné zprávy a jiné publikace, byl majitelem dlouhé řady patentů. Pechar měl komplexní fyzikální vzdělání, mnohostranné technické a technologické zkušenosti, ale především vynikající vědeckou intuici, která mu dovoľovala bezchybně třídit a posuzovat poznatky a věci. Byl nejen uznávaným odborníkem ve své profesi, trpělivým učitelem a vychovatelem, nýbrž i myslitelem. Opřen o křesťanství a se znalostí východních nauk šel životem s porozuměním a chápajícím vztahem ke svému okolí a přátelstvím s blízkými lidmi. Ve svých sedmdesáti letech se vzdal šéfovského postu a ve svých sedmasedmdesáti zemřel. V paměti těch, kdož ho znali, je stále přítomen.

Jan Eigl

Július KREMPASKÝ, Katedra fyziky, FEI STU, Bratislava

## Význam fyziky pre súčasnú spoločnosť

### ÚVOD

V príspevku sa dokumentuje, že aj keď sa to explicitne nikde nezdôrazňuje, fyzika je rozhodujúcim faktorom rozvoja i stability súčasnej spoločnosti a v podstate determinuje aj jej osud do budúcnosti. Vychádza sa z toho, že rozhodujúci krok k naštartovaniu nebývalého rozkvetu ľudskej spoločnosti sa odohral pred vyše 300 rokmi, keď zásluhou fyziky a fyzikov sa začala formulovať a rozvíjať kvantitatívna prírodná veda, ktorá bazírovala na objavených univerzálnych prírodných zákonoch a podmienila ich využívanie v praxi. Všetky spoločenské zoskupenia, ktoré zachytili tento trend – už či hneď na začiatku alebo sa neskôr k tomu pripojili – dosiahli vysoký stupeň ekonomického rozvoja a zabezpečili si aj primerané podmienky pre jeho udržanie. Iné zoskupenia, ktoré tento moderný a progresívny trend ignorovali, dostali sa do pozície charakterizovanej ich závislosťou od toho, čo im poskytnú (a dovoľia) najvyspelejšie krajiny. Vyrvíjajú enormné úsilie o dosiahnutie ich úrovne rozvoja, avšak tento proces je nesmierne náročný v tom, že výskum – opäť najmä vďaka fyzike – nezastaviteľne napreduje a prináša nové poznatky vo sférach, ktoré sú pre menej vyspelé krajiny už takmer nedostupné. Aj naďalej bude preto platiť, že dominanciu vo svete si aj v budúcnosti udržia tie krajiny, ktoré investovali a stále dostatočne investujú do rozvoja fyziky.

### HISTORICKÉ REMINISCENCIE

Fyzika sa síce pestovala už aj v staroveku, ale nemala veľký dosah na prax, pretože jej chýbalo poznanie základných „pák“, ktoré zabezpečujú dynamiku v našom vesmíre. Paradoxne štart

ku poznaniu tohto kľúčového materiálneho problému znamenala výzva generovaná na pôde teológie. Ľudia sa vtedy viac zamýšľali nad riešením problému, „Akými prostriedkami riadi Boh dynamiku všetkých objektov v našom vesmíre“. V tejto súvislosti bol známy fyzik Isac Newton priamo vyzvaný anglickou vládou, aby vyriešil problém pohybu nebeských telies. A Newton tento problém geniálne vyriešil tak, že našiel pravdivú odpoveď na vyššie položenú otázku: Boh riadi dynamiku vesmíru prostredníctvom univerzálnych zákonov, ktoré na počiatku do hmoty vložil. On sám objavil dva z nich: zákon sily a gravitačný zákon.

Od tohto okamihu už nebolo potrebné veriť, že Boh má k dispozícii celé légie anjelov, ktorým sú zverené pohyby všetkých nebeských telies, ani už neboli potrebné nespočetné záznamy v tabuľkách na prognózy ich pohybu. To všetko sa už dalo vypočítať aplikovaním týchto dvoch zákonov, ktoré určovali nielen to, čo sa odohráva na „nebesiach“, ale aj to, čo sa odohrávalo a stále odohráva aj na Zemi. Doslova teda platí to, čo sa všeobecne o Newtonovi tvrdí, že totiž svojimi zákonmi spojil nebesia so Zemou.

Tak sa zrodila prvá ozajstná „kvantifikácia“ v prírodných vedách, ktorá bola založená na objektívne jestvujúcej kauzalite v našom materiálnom svete. Tento proces kvantifikácie začal Newtonom, ale zďaleka ním neskončil. Jeho nasledovníci, zo začiatku prakticky len v nábožensky profilovaných inštitúciách, objavili aj celý rad ďalších zákonov, takže postupne sa ľudstvo dozvedelo, čo určuje dynamiku megasveta, makrosveta aj mikrosveta. Poznanie týchto fundamentálnych zákonov umožnilo ľudstvu hľadať aj ich

pragmatické aplikácie a tak sa začala rozmáhať aj oblasť, ktorú všeobecne označujeme slovom „technika“. Tá je vo svojej podstate rozvinutou aplikáciou fyziky. Práve jej rozvoj priniesol ľudstvu nebývalý ekonomický štandard, ale súčasne aj umožnil tvorbu prostriedkov na jeho ochranu, totiž tvorbu vysokoúčinných zbraní. To umožnilo krajinám, ktoré do procesu rozvoja fyziky investovali enormné prostriedky, získať vo svete aj určitú politickú dominanciu. Nebudeme preto ďaleko od pravdy, keď budeme konštatovať, že aj politická situácia v našom svete je závislá od toho, ako intenzívne sa na tom-ktorom mieste v našom svete rozvíjala fyzika.

## SÚČASNÝ SVET A FYZIKA

Sekulárny svet odmeňuje od roku 1900 významné objavy a prínosy v technike Nobelovými cenami [1]. Štatistika doterajších nositeľov Nobelových cien veľmi dobre koreluje s vedeckou a technickou úrovňou národov, z ktorých pochádzajú. Percentuálne najvyšší podiel medzi nimi zaujímajú Izraelci, za nimi nasledujú Američania, Nemci, Angličania, Rusi a i., ale prekvapuje, že medzi nimi prakticky nenájdeme príslušníkov arabského sveta. Z fyzikov figuruje medzi nimi iba Pakistanec Abdus Salaam, ktorý dostal Nobelovu cenu pred 28 rokmi. To generuje niekoľko zaujímavých otázok a súčasne ponúka aj vysvetlenie niektorých faktov. Na priamu otázku, čo je toho príčinou, existuje priama odpoveď – arabský svet nezachytil newtonovský kvantifikujúci trend a nerozvíjal fyziku. Vysvetlenie tejto skutočnosti určite nie je v tom, že by Arabi neboli na zvládanie takého trendu disponovaní. Je predsa známe, že v stredoveku mala arabská civilizácia najvyššiu úroveň a len vďaka nej sa celá Európa oboznámila so starou rímskou a gréckou kultúrou. Dokonca je známe, že Arabi ešte v prednewtonovskom období úspešne rozvíjali optiku [2]. Prečo potom po Newtonovi na fyziku doslova rezignovali?

Jednu možnú odpoveď na túto otázku možno hľadať v islamskej filozofii. Podľa nej všemocný boh Allah riadi všetko „ad hoc“ a nepotrebuje k tomu nijaké obmedzujúce prírodné zákony, preto v prírode nejstovuje nijaká absolútna kauzalita, ktorá je základom každej kvantifikovateľnej vedy a preto ju Arabi ani nerozvíjali. Výsledok tohto postoja je pre arabský svet nie príliš lichotivý – sami prakticky ničím originálnym neprispeli k rozvoju prírodných vied ani techniky a celkom zákonite sa v tejto sfére stali pre ostatný vyspelý svet neschopný konkurencie, a to nielen v oblasti mierových ale aj v oblasti vojenských aktivít. Možno však konštatovať, že to do určitej miery podmieňuje aj súčasný – síce len veľmi krehký – ale predsa len určitú stabilitu.

Odlíšny scenár vývoja pozorujeme u iných starých civilizácií. Najskôr sa v tomto smere „zobudili“ Japonci a vďaka enormným investíciám do fyziky a techniky sa pomerne rýchlo dostali do svetovej elity. V posledných desaťročiach ich v tomto smere nasledovala Čína a takisto už aspiruje na postavenie svetovej veľmoci. Najnovšie sa rovnaký trend pozoruje aj v Indii.

Je zaujímavé, že arabský svet, podobne ako aj niektoré iné menšie krajiny (napr. Severná Kórea) sa usilujú svoj „handicap“ v zaostávaní prekonať orientáciou na atómové vyzbrojenie. Ako keby sa riadili heslom „Keď si sami vyrobíme atómovú bombu, automaticky sa zaradíme medzi svetové veľmoci“. Je to však pomýlená a ničím nepodložená filozofia. Vyspelý svet sa totiž už nezameriava na objavovanie nových a dokonalejších zbraní – podľa všeobecných odhadov ich majú už toľko, že by to stačilo na zlikvidovanie niekoľko stoviek zemegulí – a svoje výskumné aktivity orientujú na to, aby použitiu už existujúcich zbraní mohli zabrániť. Podľa už existujúcich kompetentných analýz by každý pokus menších krajín o použitie svojich vlastných atómových zbraní skončil ich absolútnym sebazničením. V nasledujúcej časti tohto príspevku sa pokúsime ukázať, že je to naozaj podložené varovanie.

## FYZIKA A BUDÚCNOSŤ

Naznačili sme už, že dobíhanie vyspelých štátov zaostalejšími nebude vôbec jednoduché a ľahké, pretože výskum v oblasti fyziky sa v rozvinutých krajinách nezastavil, práve naopak, jeho intenzita

ešte narastá a čo je pre ostatné krajiny ešte deprimujúcejšie, presúva sa do (zatiaľ) najnižších možných úrovní skúmania hmoty, a to už na úroveň samotných molekúl a atómov, ba najnovšie až na úroveň elementárnych častíc. Takýto výskum však už vyžaduje také vysoké finančné náklady, na aké si menšie krajiny nemôžu ani pomyslieť. Zdá sa preto, že rozdiel medzi najvyspelejšími a tými ostatnými krajinami sa perspektívne nebude zmenšovať, ale naopak prehľbovať. Čo teda môžeme od výskumu v oblasti fyziky v budúcnosti očakávať? Dotkneme sa najmä troch významných oblastí, a to oblasti komunikácií a automatizácie, oblasti energie a oblasti materiálov. Na záver si ešte pripomenieme aj niektoré „ideologické“ produkty fyzikálneho výskumu (Vhodné podklady sú napr. [3-6]).

Súčasná staršia generácia už zažila tri etapy rozvoja komunikačných a automatizačných zariadení: elektroniku, mikroelektroniku a v súčasnosti už aj nanoelektroniku. Prvá z nich pracovala s prvkami o rozmeroch rádu 1 cm, druhá s rozmermi rádu 1 desiatistícina cm a posledná s rozmermi rádu 1 desiatimilióntina cm. S tým súvisela neuveriteľná postupná miniaturizácia. To čo sa voľakedy dalo uložiť do prvých počítačov zaberajúcich celé jedno poschodie vo veľkej budove, v súčasnosti sa zmestí do objemu jednej zápalkovej krabičky. Ale proces miniaturizácie sa tým ešte zďaleka nekončí. Čaká nás ešte etapa, v ktorej sa budú využívať nielen vlastnosti malých komplexov molekúl či atómov, ale aj vlastnosti jedinej sólovej elementárnej častice, napr. spin elektrónov. Z kvantovej fyziky je známe, že keď sa častica môže nachádzať v dvoch dobre definovaných stavoch (spin „hore“ a spin „dolu“), potom sa môže vyskytovať aj v stavoch, ktorý je definovaný ľubovoľnou kombináciou týchto základných stavov a takých je nespočetne mnoho. Ide len o to, aby sme ich dokázali v praxi aj využiť. Na tom sa už usilovne pracuje. Rysujúca sa etapa založená na využívaní spinov (tzv. spintronika) posunie miniaturizáciu do takej úrovne, že – podľa prognózy známeho manažéra Kurzweila – do súčasného malého „písička“ sa budú môcť uložiť informácie o všetkých poznatkoch, ktoré ľudstvo doteraz dosiahlo včítane informácií o všetkých ľuďoch na celej zemeguli. Čo to bude znamenať pre médiá, pre osobnú „inteligentnú“ vybavenosť, pre automatizáciu všetkých procesov, ale aj pre sofistikáciu zbraní a ochrany proti nim, to si dnes nedokážeme ani len predstaviť.

Keď sme už pri zbraniach, nemôžeme nespomenúť, že sa už začína pracovať aj na technickom riešení odveky túžby človeka – túžby po zneviediteľnení. Riešenie spočíva vo výrobe látok, ktoré sú schopné pretransformovať fotóny na tzv. plazmony, čím sa zlikviduje odozva na osvetlenie. Rovnako fantasticky vyznieva aj ďalšia výskumná aktivita vedcov - do výroby nanoelektrických zariadení sa zapájajú vírusy. Táto tzv. virálna nanoelektronika sa už v súčasnosti uplatňuje pri výrobe elektrických nanovodičov, nanobaterií a materiálov pre displeje.

Napriek všetkým pesimistickým úvahám o zhoršujúcej sa situácii v zásobovaní energiou, čaká nás v tomto smere vďaka fyzike veľmi optimistická prognóza. Je známe, že najčistejším a najefektívnejším zdrojom elektrickej energie by mohli byť tzv. termojadrové elektrárne, ktoré spaľujú vodík na hélium. Aj keď po fyzikálnej stránke je problém už dávno vyriešený, zavedeniu do praxe bránia doteraz niektoré nevyriešené technické problémy. Nádej v tomto smere vzbudzujú dve nedávne zverejnené informácie v médiách. Podľa prvej z nich sa v Číne už spustila výroba elektrickej energie v prvej experimentálnej termojadrovej elektrárni a podľa druhej niektoré západoeurópske krajiny podpísali 8-ročný kontrakt na vývoj a postavenie takého zariadenia. Sú to optimistické indície, podľa ktorých sa budú môcť v budúcnosti (možno už nie príliš vzdialenej) nahradiť doterajšie všeobecne nenávidené atómové elektrárne spaľujúce urán ekologicky nezávadnými a navyše podstatne efektívnejšími termojadrovými elektrárnami.

Treba ešte pripomenúť, že vyspelý svet už reálne pomýšľa na využitie najefektívnejšieho zdroja energie vôbec – využitie tzv. anihilácie látky a antilátky. Antilátka sa od „normálnej“ látky líši len zámenou elektrických nábojov (páry elektrón – pozitron, protón – antiprotón a i.). Pri ich vzájomnom kontakte sa v súlade so slávnym Einsteinovým vzorcom  $E = mc^2$  celá látka „preme-

ní“ na energiu. Energia takto získaná z jedného kilogramu látky a antilátky by pokryla celoslovenskú spotrebu elektrickej energie na jeden rok. Voľná antilátka sa však (zrejme) nikde vo vesmíre nenachádza, avšak v laboratóriách ju už vieme vyrobiť, avšak zatiaľ len v zanedbateľných množstvách. Je však možné, že v budúcnosti sa aj tieto technické problémy podarí úspešne zvládnuť.

Vodík sa stáva pre nás veľkou nádejou nielen v súvislosti s progresívnymi elektrárnami, ale ešte viac v súvislosti s pohonmi. Zatiaľ sa svet trápi v tejto oblasti s ropou, ktorá stojí nemálo prostriedkov a navyše jej zásoby sa nezadržateľne znižujú. Keby sa našla náhrada za ňu, dostupná aj chudobnejším krajinám, vyriešilo by sa mnoho problémov, ktoré trápia ľudstvo. Reálnou víziou sa v tomto smere javí tzv. „H“ hospodárstvo, čiže vodíkové hospodárstvo. Nejde pritom len o využitie vodíka pri horení s kyslíkom, ale viac o čisto fyzikálny mechanizmus, pri ktorom sa vodík prechodom cez vhodné polymerné materiály zbavuje svojich elektrónov, tie sa odvádzajú do elektrických motorov umiestnených priamo v kolesách mobilných prostriedkov a zbytok (protóny) sa odvádzajú do prostredia s kyslíkom, v ktorom vytvárajú vodu a tá predstavuje jediný (čistý) odpad. Všetky technické problémy súvisiace s touto transformáciou vodíka sú už vyriešené, ba automobily tohto typu sa už aj vyrábajú. Čo teda bráni širokému využitiu v praxi? To, že čistý vodík treba z niečoho vyrobiť (do úvahy prichádza voda, zemný plyn a pod.) a treba ho vedieť v pohyblivých prostriedkoch v dostatočnom množstve aj uskladniť (na dráhu 300 míľ sa udáva spotreba asi 6kg). Do úvahy prichádza skvapalnenie (k čomu treba nízke teploty), stlačenie pod vysokým tlakom (k čomu treba vysokopevné materiály) a najnovšie sa uvažuje o tzv. uhlíkových nanorúrkach, ktoré ho jednoducho absorbujú až do hustôt porovnateľných so skvapalneným vodíkom. Treba ešte dodať, že pre masové rozšírenie tohto spôsobu pohonov bude potrebné vybudovať patričnú infraštruktúru. Napriek všetkým spievajúcim problémom sa ukazuje, že éra „H“ hospodárstva sa naplno rozvinie do 10 – 20 rokov.

Nemálo pozitívneho sľubuje fyzika v budúcnosti aj v oblasti nových materiálov. To, že sa fyzika už v súčasnosti dokáže orientovať v materiáloch na molekulárnej, ba až atómovej úrovni, jej umožňuje často produkovať materiály pre praktické aplikácie prakticky vo všetkých oblastiach ľudskej aktivity, a to takmer na želanie. Nejedná sa pritom len o také tradičné oblasti, akými sú strojárstvo a stavebníctvo, ale zaujímavými odberateľmi sa už stávajú aj biológia a medicína. Už v súčasnosti nie je problémom vyrobiť superpevné keramiky, materiály s extrémne nízkym oterom, materiály s prakticky spojitou zmenou elektrickej vodivosti od supravodičov až po izolanty, supravodiče nielen pre nízke ale už aj pre izbové teploty, ohybné či dokonca tekuté magnety, dokonalé náhrady pre ľudské orgány, atď. V tomto smere sú možnosti do budúcnosti takmer nevyčerpatelné. Podrobnejšie informácie sú napr. v článku [7].

Napokon sa ešte stručne dotkneme aj niektorých výstupov z fyzikálneho výskumu do oblasti humánnych vied. Možno začať ekonómiou, v rámci ktorej sa už etabluje nový odbor tzv. ekonofyzika, pokračovať medicínou, v ktorej sa nejedná už len o poskytovanie zariadení pre diagnózy a materiály ako náhrady pre ľudské orgány, ale napr. aj o výpomoc v pochopení priebehu niektorých chorôb (napr. leukémia a AIDS), v lepšom pochopení činnosti mozgu atď. a napokon možno sa zastaviť až vo filozofii a teológii. Možno konštatovať, že fyzika v súčasnosti generuje pre posledné menované disciplíny otázky, na ktoré sama nemá odpoveď a ktoré pre ne značia veľkú výzvu na riešenie. Explicitne možno vymenovať najmä nasledovné tri problémy:

1. problém vzniku a vývoja nášho vesmíru,
2. problém tzv. antropického princípu,
3. problém „Trinity“.

Fyzikálne a astrofyzikálne výskumy v posledných desiatkach rokov nezvratne dokázali, že náš vesmír v tej podobe v akej ho v súčasnosti vnímame, má svoj dobre definovaný začiatok. Stalo sa tak pred 13,68 miliardami rokov. V tejto súvislosti sa žiada riešiť problém, prečo a ako vznikol. Sama fyzika nemá na tieto otázky definitívnu a uspokojivú odpoveď.

Ešte závažnejšou sa javí otázka, prečo náš vesmír je práve taký aký je a nie nejaký inakší. Fyzika ukazuje, že keby bol čo len trochu inakší (s ohľadom na svoje riadiace konštanty), tak by v ňom nevznikol život ani človek. Treba preto riešiť problém, či náš svet je „cieľovo-orientovaný“ systém, alebo produkt náhody. Tieto otázky sa v súčasnosti kumulujú do problematiky okolo tzv. antropického princípu, ktorého nosnou myšlienkou je, že náš vesmír bol „projektovaný“ na príchod „inteligentného pozorovateľa“. V poslednom období sa výskum v teoretickej fyzike sústreďuje na vytváranie tzv. teórie všetkého, od ktorej sa očakáva odpoveď na veľmi závažnú otázku, prečo v samotných základoch našej matérie fungujú práve tri rodiny kvarkov a tri rodiny leptonov, keď by úplne stačila jedna rodina, a keď už reálne existujú tri, prečo nie viac. S týmto „trinity“ modulom sa stretávame aj v mnohých ďalších súvislostiach: náš svet je trojrozmerný, existujú tri energie determinujúce všetku dynamiku, tri základné symetrie, celý živý svet je kódovaný v trojkovom kóde a aj sám človek sa chápe ako jednota troch entít – tela, duše a ducha. To všetko sú zatiaľ záhady, na ktoré neexistujú uspokojivé odpovede a zostáva otvorená otázka, či aj v budúcnosti nájde veda na ne plauzibilnú odpoveď. Viac podrobností o tejto problematike možno onajst napr. v článku [8].

Nežiadúcim „by-produktom“ intenzívneho zasahovania fyziky do života spoločnosti je zhoršovanie kvality životného prostredia. Fyzika však neignoruje tento problém a vyvíja prostriedky na dôsledné monitorovanie životného prostredia a zabezpečovania jeho primeranej kvality. Bližšie o tom pozri napr. práce [9] a [10].

## ZÁVER

Pokúsili sme sa uviesť viacero vecných argumentov v prospech tvrdenia, že fyzika predstavuje jednu z najdôležitejších pák určujúcich osudy celej ľudskej spoločnosti. Je preto veľmi žiaduce, aby sa jej venovala aj tomu zodpovedajúca pozornosť.

## Literatúra

- [1] List of the Nobelprize Laureates. Nobel Commitees for Physics and Chemistry, Stockholm – Sweden, 1999
- [2] Khan, S. A.: „Medieval arab understanding of the rainbow formation“ článok v Europhysics news, Vol. 37, No 3 (2006)
- [3] Scientific American, Special issue sept. 2006, WWW.SCIAM.COM
- [4] Scientific American, sept. 2006, WWW.SCIAM.COM
- [5] Scientific American, july. 2005, WWW.SCIAM.COM
- [6] Scientific American, jan. 2005, WWW.SCIAM.COM
- [7] Krempaský, J.: „Súčasnosť a perspektíva materiálov a technológií“, ekt 47 (1994), 3
- [8] Polkinghorn, J.: „Physics and Metaphysics in trinitary perspective“, Technology and Science, Vol. 1. No 1 (2003)
- [9] Húšťava, Š.: „Systemy radiacionnogo kontrolja“. Zborník: II. Meždunarodnyj seminar – Ekologičeskie problemy demilitarizacii. Naroč. Belorussija, 1995.
- [10] Húšťava, Š.: „Design for Detection and Localisation of Radioactive Sources in Environment“. Acta Fac. Paed. Univ. Tyrnaviensys. Trnava, 2002



# Off-axis Fresnel diffraction approximation

*Diffraction is analyzed for oblique propagation of light beam under a large angle. Fresnel diffraction approximation is valid provided the beam is deflected into the direction of oblique propagation, the structure of the diffraction screen is projected onto the plane perpendicular to the propagation direction, and the diffraction pattern is observed in the plane perpendicular to the propagation. The task is illustrated by the diffraction due to a circular aperture.*

**Keywords:** wave optics, wave propagation, diffraction, Fresnel diffraction, Fraunhofer approximation, off-axis propagation

## 1. INTRODUCTION

In the scalar approximation the diffraction integrals of the Fresnel-Kirchhoff type are relatively simple but very useful tools for description of coherent light propagation. They make it possible to solve numbers of problems of contemporary optics. In contrast to direct numerical solving of Maxwell's equations they give us physical insight into problems under study. In particular, this is so provided a light beam is neither strongly convergent nor strongly divergent and not significantly deflected from straight propagation. One can speak about the on-axis diffraction problem then.

Recently, the paper of Kaizer et al. [1] has appeared, where the so-called "pseudo-paraxial Fresnel approximation" is discussed. The authors' main concern is simulation of systems with a dominant direction of propagation that can be quite arbitrary. They derive the so-called pseudo-paraxial Fresnel diffraction integral, in which the optical path function is expanded to the Taylor series with the dominant direction of propagation being oblique, non-axial. They do not give, however, conditions for validity of their approximation.

On the other hand, some attention has been paid to off-axis imaging. Zverev [2] considered image resolution for a focused off-axis beam in the small-angle approximation. Sheppard and Hegedus [3] extended this treatment to the highly converging beams, which is the case taking place in lithographic imaging systems. Sheppard [4], Gibson and Lanni [5], and Sheppard et al. [6] generalized the theory of Li and Wolf [7], Fresnel's theory proposed for focusing by a lens with a finite value of the Fresnel number, for off-axis illumination. Sheppard and Hrynevych [8] presented a different approach to the Fresnel diffraction, including off-axis illumination, and Sheppard and Cooper [9] re-examined the Fresnel approximation for off-axis illumination of a circular aperture in the scalar paraxial domain.

The aim of this paper is to extend the analysis by Kaiser et al. with the goal to correct the inaccurate and foggy term "pseudo-paraxial", to determine the conditions for validity of the Fresnel approximation in the off-axis case, and to characterize the point spread function of a lens in this case.

## 2. CONVENTIONAL FRESNEL DIFFRACTION

Traditionally the Fresnel approximation is restricted to predominantly straight propagation of a light beam after its passage through a diffraction screen. According to the Huygens-Fresnel principle, the diffraction field distribution  $U\{x', y', \zeta\}$  in the observation plane, which is situated perpendicularly to the dominant direction of propagation and in the distance  $\zeta$  from the diffraction screen, is expressed in the following form

$$U\{x', y', \zeta\} = -i \frac{k}{2\pi} \iint U\{\xi, \eta, 0\} \frac{\exp\{-ikl\}}{l} d\sigma. \quad (1)$$

Here  $l$  is the so-called light path function, which is the optical distance between a general point in the diffraction screen and a general point in the observation plane,  $k = 2\pi/\lambda$  is the angular wave number. A light field  $U\{\xi, \eta, 0\}$  immediately after the diffraction screen is given by the field immediately before the diffraction screen and the function of the screen.

For example the field before the screen can be a plane wave or a spherical wave, and the function of the screen can be an amplitude filter and/or a phase filter. In the Fresnel approximation  $l$  in the denominator of equation (1) is replaced by the distance  $\zeta$ , and in the argument of the function  $\exp$  is calculated by the Pythagorean theorem. The square root is then approximated by terms up to second order of the Taylor expansion,

$$l \approx \zeta + \frac{x'^2 + y'^2}{2\zeta} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2\zeta} - \frac{x'\xi + y'\eta}{\zeta}. \quad (2)$$

The general Fresnel diffraction problem can be simplified provided the square terms are negligibly small or compensated by a lens. The Fraunhofer diffraction takes place here. The most common diffraction screen is a circular aperture, which is utilized mainly in optical imaging. The Fraunhofer diffraction pattern of this aperture follows from the relation

$$\frac{I}{I_0} = \frac{4J_1^2\{k_\rho \rho_0\}}{(k_\rho \rho_0)^2}, \quad (3)$$

where  $J_1$  is Bessel function of the first order,  $k_\rho = k \sin\theta$  is projection of the angular wave number into the observation plane,  $\rho_0$  is the diameter of the aperture. This relation represents the so called point spread function characterizing quality of imaging.

## 3. OFF-AXIS FRESNEL DIFFRACTION PROBLEM

As the Fresnel approximation describes diffraction under small angles the vector nature of electromagnetic field can be omitted, so that it is the scalar problem. If diffraction under larger angles takes place, the vector nature, in general, must be taken into account. There exists, however, at least one case of diffraction under larger angles when the Fresnel approximation can be used. It is the case when the diffracted beam is spread only close to a dominant direction of propagation while the beam as a whole can be deflected under large angle. This case is analyzed here.

The main step for expression of diffraction is to determine the light path function. Fig. 1 shows off-axis beam propagation under the angle  $\alpha$  with respect to the vertical to the diffraction screen

- the coordinate axis  $\zeta$ . The vertical and the dominant direction of propagation of the beam define the meridional plane - the co-ordinate plane  $\xi\zeta$ . The diffraction screen determines the plane  $\xi\eta$ . The centre  $C$  of the observation plane  $x'y'$  that coincides with the centre of the diffraction pattern is placed in a distance  $L$  from the centre  $O$  of the diffraction screen. Then, the line segment  $OC$  coincides with the dominant propagation direction. The observation plane is oriented perpendicular to the meridional plane, and is tilted by the angle  $\beta$  around the axis  $y'$  that is perpendicular to the meridional plane. The observation plane is measured against the plane perpendicular to the line segment  $OC$ .

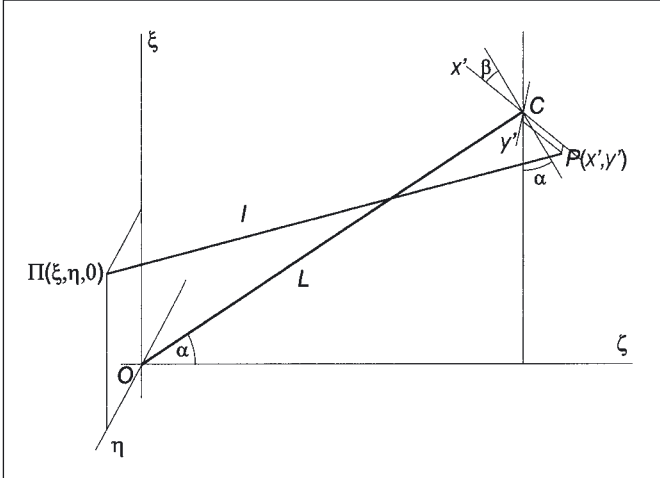


Fig. 1 Optical path function for off-axis Fresnel diffraction

The distance between an arbitrary point  $\Pi\{\xi, \eta, 0\}$  in the diffraction screen and an observation point  $P\{x', y'\}$  in the observation plane is the light path function  $l$ , and its value is

$$l = \sqrt{(L \sin \alpha - x' \cos \beta \cos \alpha - \xi)^2 + (y' - \eta)^2 + (L \cos \alpha + x' \cos \beta \sin \alpha)^2} \quad (4)$$

The approximation of the light path function up to the second order is

$$l \approx L + \frac{x'^2 \cos^2 \beta + y'^2}{2L} + \frac{\xi^2 \cos^2 \alpha + \eta^2}{2L} - \xi \sin \alpha - \frac{\xi x' \cos \beta \cos \alpha + y' \eta}{L} \quad (5)$$

As can be seen from comparison of equations (5) and (2) the light path functions differ in three features.

The first difference is the existence of the linear term  $-\xi \sin \alpha$  in the off-axis light path function. It must vanish if the Fresnel approximation should take place. This can be achieved by introducing a linear phase filter as e.g. a wedge or grating into the diffraction aperture. Holographic imaging as such has this property because mostly off-axis arrangements have been used for recording holograms to avoid the background due to reconstructing beam. The other possibility of elimination of this term is propagation of the illuminating beam before its passage through the diffraction screen in the direction of the connection line  $OC$ . This is the case when the diffraction screen is placed obliquely considering the light propagation direction.

Next, the difference is in "contraction" of the meridional  $\xi$ -coordinate of the diffraction screen by the factor  $\cos \alpha$ . This "contraction" means that the diffraction screen is projected onto the plane perpendicular to the connection line  $OC$ . For instance, a circular aperture transforms to an elliptic one with the ellipticity  $e = b/a = \cos \alpha$ . The "contracted" meridional co-ordinate  $\xi' = \xi \cos \alpha$ .

The last difference is "contraction" of the meridional  $x'$ -coordinate in the observation plane by the factor  $\cos \beta$ . This difference means that the diffraction pattern is also projected onto the plane perpendicular to the connection line  $OC$ . This plane is tangential to the sphere with radius  $L$  at the point  $C$ .

It can be concluded that propagation of the beam with a dominant direction of propagation under the angle  $\alpha$  and with its optical field immediately after the diffraction screen  $U(\xi, \eta, 0)$  can be described in terms of Fresnel diffraction from a fictive diffraction screen that is perpendicular to the dominant direction, with the observation plane being tangential to a sphere around the screen centre at the point of its intersection with that direction.

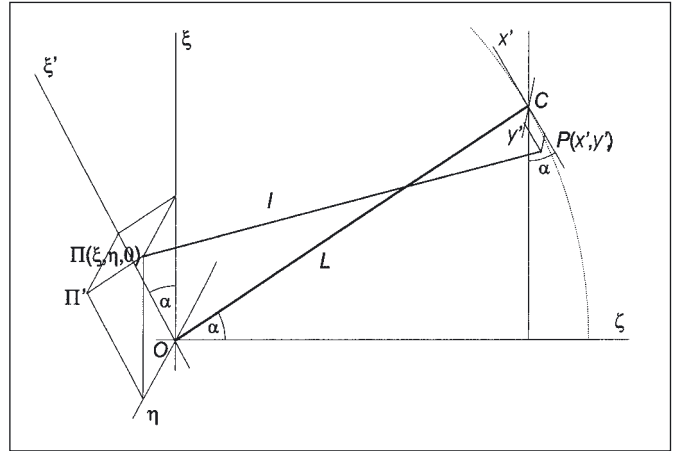


Fig. 2 Scheme of the diffraction screen and observation plane orientation of off-axis Fresnel diffraction

Fig. 2 illustrates the conditions for the off-axis Fresnel diffraction approximation. The diffraction screen structure is projected perpendicular to the plane tilted by the angle  $\alpha$  around the coordinate axis  $\eta$ , and the diffraction pattern is observed in a plane perpendicular to the connection line  $OC$ .

#### 4. OFF-AXIS FRAUNHOFER DIFFRACTION OF THE CIRCULAR APERTURE

As mentioned above, the circular aperture changes its shape to an elliptical aperture as a result of the off-axis Fresnel diffraction. The index of anamorphosis is given by the ellipticity of this aperture  $e = \cos \alpha$ . The Fresnel and Fraunhofer diffractions of the elliptical aperture were an object of study of number of papers [Kathuria [10] and papers cited there]. The tilted circular aperture in off-axis diffraction problem cannot be anything else but elliptical aperture as tilting may not play a role mainly in Fraunhofer diffraction.

It was shown by Born and Wolf [11] that a solution for the Fraunhofer diffraction pattern due to an elliptic aperture could be obtained from that due to a circular aperture, on the basis of the theorem concerning the modification of the diffraction pattern when the aperture is uniformly extended or contracted in one direction. The communication of Mondal [12] reported on a method for calculating the Fraunhofer diffraction from an elliptic annulus, based on a conformal-mapping technique that uses complex variables.

The intensity of the Fraunhofer diffraction pattern of the elliptical aperture is given by the intensity for the circular aperture with one coordinate contracted

$$\frac{I}{I_0} = \frac{4J_1^2 \{k\rho_0 \sin \theta_\varphi \sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}\}}{[k\rho_0 \sin \theta_\varphi \sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}]^2} \quad (6)$$

where  $J_1$  is the Bessel function of the first order,  $k = 2\pi/\lambda$  is the angular wave number,  $\varphi$  is the off-axis angle, and  $\alpha$  is the azimuthal

angle. The pattern for the off-axis angle  $\alpha = 60$  deg is plotted in Fig. 3, which shows an elliptical shape of the pattern. Its ellipticity equals the ellipticity of the proper aperture. However, the axes are exchanged: the longer axis in the pattern is in direction of the shorter axis in the diffraction screen and vice-versa.

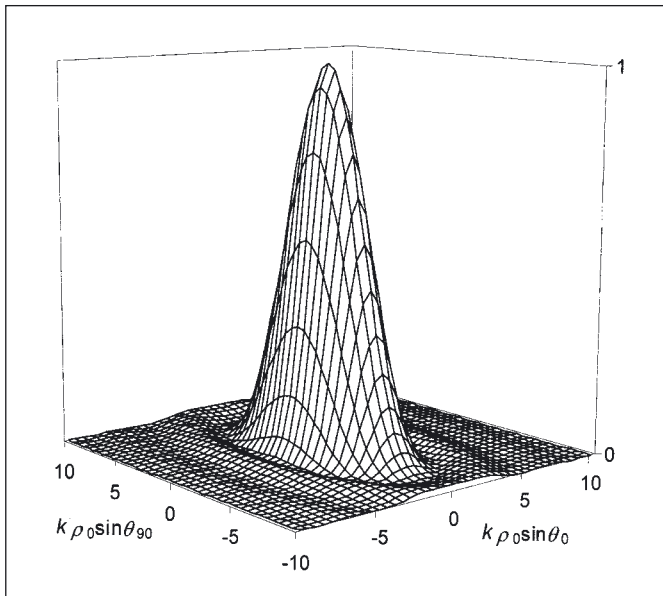


Fig. 3 Fraunhofer diffraction pattern of the circular aperture for off-axis propagation under the angle  $\alpha = 60$  deg

Naturally, the elliptical shape of the Fraunhofer diffraction pattern due to the elliptical aperture must result in astigmatism of the beam induced by diffraction. The astigmatic line segment parallel to the larger axis of the aperture ellipse is located before the Fraunhofer diffraction pattern, whereas the perpendicular astigmatic line segment is located behind it. The Fraunhofer diffraction pattern is then situated not in the circular cross section of the beam between the astigmatic line segments but little closer to the back astigmatic line segment.

## 5. CONCLUSION

Analysis of diffraction for the off-axis propagation of the diffracted light shows that the description of diffraction using the Fresnel approximation is possible when certain conditions are fulfilled. It is necessary to project the diffraction screen onto the plane

perpendicular to the dominant diffraction direction and the observation plane situated perpendicular to the dominant direction, too. Results of the analysis are useful for a holographic or microscopic imaging where oblique illumination is important. In both cases the modified point spread function must be taken into account.

This work has been supported by the Academy of Sciences under the Key Proposal K2067107.

## References

- [1] J. L. KAISER, E. QUERTEMONT, and R. CHEVALLIER: Light propagation in the pseudo-paraxial Fresnel approximation. *Opt. Comm.* **233**, pp. 261-269, 2004.
- [2] V. A. ZVEREV: Illumination distribution in the diffraction image of an off-axis point. *Sov. J. Opt. Technol.* **53**, pp. 451-454, 1986.
- [3] C. J. R. SHEPPARD, Z. HEGEDUS: Resolution for off axis illumination. *J. Opt. Soc. Am.* **A15**, pp. 622-624, 1998.
- [4] C. J. R. Sheppard: Imaging in optical systems of finite Fresnel number. *J. Opt. Soc. Am.* **A3**, pp. 1428-1432, 1986.
- [5] S. F. GIBSON, F. LANNI: Diffraction by a circular aperture as a model for three-dimensional optical microscopy. *J. Opt. Soc. Am.* **A6**, pp. 1357-1367, 1989.
- [6] C. J. R. SHEPPARD, P. P. ROBERTS, and M. GU: Fresnel approximation for off-axis illumination of a circular aperture. *J. Opt. Soc. Am.* **A10**, pp. 984-986, 1993.
- [7] Y. Li, E. WOLF: Three dimensional intensity distribution near the focus in systems of different Fresnel numbers: *J. Opt. Soc. Am.* **A1**, pp. 801-808, 1984.
- [8] C. J. R. SHEPPARD, M. HRYNEVYCH: Diffraction by a circular aperture: a generalization of Fresnel diffraction theory. *J. Opt. Soc. Am.* **A9**, pp. 274-281, 1992.
- [9] C. J. R. SHEPPARD, I. J. COOPER: Fresnel diffraction by a circular aperture with off-axis illumination and its use in deconvolution of microscope images. *J. Opt. Soc. Am.* **A21**, pp. 540-545, 2004.
- [10] Y. P. KATHURIA: Fresnel and far-field diffraction due to an elliptical aperture. *J. Opt. Soc. Am.* **A2**, pp. 852-857, 1985.
- [11] M. Born, E. Wolf: Principles of Optics, 5<sup>th</sup> ed. Pergamon, Oxford, 1975, Sec. 8.8.
- [12] P. K. MONDAL: Fraunhofer diffraction due to an elliptic annulus. *J. Opt. Soc. Am.* **65**, pp. 1154-1156, 1975.



## Laboratoř fyzikální energetiky otevřena

Od prvního ledna letošního roku zahájila činnost Laboratoř fyzikální energetiky (LFE) při katedře fyziky České zemědělské univerzity (ČZU) v Praze. Katedra je součástí Technické fakulty ČZU v Praze a v jejích prostorách jsou fyzicky umístěny její části zaměřené především na solární fotovoltaiku. LFE tak navazuje na předchozí aktivity současného vedoucího laboratoře doc. Ing. Martina Libry, CSc. Ten získal v letošním roce pro LFE grant ČEZ, a.s. v oblasti „Zelené energie“, který pokryl část nákladů na rekonstrukci experimentální solární elektrárny. Zbývající náklady pokryla spolupracující firma Poulek Solar, s.r.o. a ČZU v Praze.

Experimentální solární elektrárna LFE patří mezi unikátní zařízení v této oblasti. Její špičkový výkon 4 kW ji sice neřadí k rekordním zařízením, ale její podstatná část je tvořena otočnou soustavou, umožňující průběžné natáčení celého systému s cílem dosahovat v každé denní době maximálně dosažitelné hodnoty výkonu. Navíc toto zařízení umožňuje zkoušet kombinaci solárních fotovoltaických panelů a zrcadel uspořádaných do unikátní konfigurace s pohyblivým stojanem a tzv. hřebenovým koncentrátorem (viz obr. 1). V současné době je experimentální solární elektrárna před dokončením a připravují se programy pro hledání optimálních uspořádání a režimů a sběru dat při jejím provozu.

Z dalších programů LFE, které jsou v různém stádiu rozpracování, uvádíme:

- Optimalizace solárních panelů produkujících energii pro čerpací zařízení pro závlivkovou vodu.
- Optimalizace činnosti solárního panelu jako hlavního zdroje pro vzdálená dlouhodobá měření v terénu.
- Vliv teploty na účinnost transformace energie v solárním panelu.
- Vytváření podkladů pro efektivní chlazení solárních panelů.
- Sledování vlivu pulsního režimu a vnějších polí na celkovou účinnost transformace energie v solárních panelech.

S činností LFE je spojena výrazná ediční činnost. Ke „starším“ knižním titulům

- Libra, M., Poulek, V., *Solární energie, fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*, kniha-monografie vázaná, vydala Česká zemědělská univerzita v Praze, (2005), ISBN 80-213-1335-8,
- Poulek, V., Libra, M., *Solar energy, photovoltaics - promising trend for today and close future*, kniha vázaná, vydala Česká zemědělská univerzita v Praze, (2006), ISBN 80-213-1489-3, v letošním roce přibyl další titul:
- M. Libra, V. Poulek, *Zdroje a využití energie*, vydala Česká zemědělská univerzita v Praze, (2007), kniha vázaná, ISBN 978-80-213-1647-8,



Obr. 1 Solární fotovoltaický systém s pohyblivým stojanem a s hřebenovým koncentrátorem záření instalovaný na Technické fakultě ČZU v Praze

v němž je problematika energetických zdrojů pojednána mnohem podrobněji a s ohledem na aktuální situaci v daném oboru. Problematika přeměny energie a jejího využití je nejen aktuální, ale dotýká se přímo každého z nás. V knize je zmíněna historie využívání přírodních zdrojů energie, otázky obnovitelných a neobnovitelných zdrojů i globální důsledky stále rostoucí spotřeby energie pro životní prostředí. Názorné obrázky, grafy a schémata vhodně doplňují text a řada tabulek poskytuje čtenářům porovnání některých veličin či parametrů. Kniha má charakter populární encyklopedie energetiky a je zajímavá a srozumitelná i pro zájemce o tento obor, kteří ho zatím hlouběji nestudovali. Autoři se omezili jen na nejdůležitější matematické formulace a nezbytně nutná odvození. Náročnější jsou pouze kapitoly pojednávající o základech termodynamiky a jaderné fyziky a kapitola o fyzikální podstatě fotovoltaické transformace energie. V příloze jsou i přehledné tabulky důležitých fyzikálních veličin a konstant a barevné obrázky elektráren i jejich zařízení.

Rád bych popřál LFE po dobrém startu hodně úspěchů v jejích budoucích aktivitách které, jak věřím, budou přínosem pro každého z nás.

# CONTENTS

---

## Surface morphology analysis of LED structures based on In(AlGa)P/InGaP/GaP by means of AFM and NSOM methods

(S. Ďatko, J. Kováč, D. Haško, A. Šatka, S. Hasenöhrl) ..... 275

In this work there are examined the structural surface characteristics of the  $\text{P/In}_{0 \rightarrow 0.76}\text{Ga}_{1 \rightarrow 0.24}\text{P/In}_{0.76}(\text{AlGa})_{0.24}\text{P}$  sample with an active LED area created by a P-N transition in quaternary material In(AlGa)P. A surface morphology was treated using AFM method in contact and semicontact regimes. The obtained results were compared with measured results of optical transmission using NSOM in shear force regime provided transmission measurements utilizing a tipped optical fibre. The aim of the work is to compare measured results of surface morphology of LED structures not matched in grid to the substrate obtained by various SPM methods.

## Artefacts in near-field scanning optical microscopy

(P. Klapetek, J. Buršfk) ..... 279

A quantitative analysis and adequate theoretical and practical steps employing a near-field scanning optical microscope (NSOM) are currently quickly developing areas of near-field optics. The basic task of the analysis consists in the correct description of tip – surface system geometry together with an electromagnetic field propagation through the system. This article deals with the results characterising tips applied in a scanning electron microscope technique and modelling field in the scanning optical microscope. Results are compared with practical measurements obtained with simple structures.

## Surface morphology analysis of ZnO thin films deposited by RF sputtering using an atom force microscopy

(D. Haško, J. Kováč, I. Novotný a L. Jánoš) ..... 281

This article deals with a morphology analysis of polycrystalline ZnO thin films deposited by radio-frequency diode sputtering in  $\text{Ar}^+$  and  $\text{Ar}^+ + \text{N}_2$  atmosphere on the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  and glass substrates. The surface structure of polycrystalline ZnO sputtered films of about 500 nm thickness was revealed using an atom force microscopy method and then after their thermal annealing at temperature 500 °C - 600 °C in  $\text{N}_2$  and  $\text{H}_2 + \text{N}_2$  forming gas atmosphere. The surface roughness and granularity of tested samples were analysed. The obtained results confirmed that sputtering conditions together with annealing have an effect on polycrystalline ZnO film characteristics.

## Study of photo-dynamic effect on tumour cell lines using an atom force microscopy

(K. Tománková, H. Kolářová, R. Bajgar, M. Vůjtek, H. Dušková) ..... 285

An atomic force microscopy (AFM) is used to the morphology imaging of tumour cell lines and processes taking place in a photo-dynamic therapy. The basic condition for a high-quality scan is a proper fixation of microscopic slides with no morphology destruction of whole cells and cell structures. A new microscopy development allows scanning in various media, e.g. liquids. For this purpose we use 100  $\mu\text{m}$  dry scanner and noncontact mode. As a biological material under study we examined cell lines A549 (bronchogenic carcinoma) and G361 (dermal melanoma). A cell scanning is limited by the apparatus design and therefore we use a combination of AFM and an inverse optical microscope. The aim of this work is a study of photo-dynamic effects on tumour cell lines using an atomic force microscope. The photo-dynamic effect is initialised by  $\text{ClAlPcS}_2$  sensitizers, the light source is LED diode emitting the wavelength 640 nm. A therapeutic effectiveness is detected with Synergy HT fluorescent reader together

with a fluorescent marker  $\text{CM-H}_2\text{DCFDA}$ . Thus we measure the kinetics of free radicals (ROS) production and ROS production after sample exposure  $15 \text{ Jcm}^{-2}$ . Cells are imaged before and after photo-dynamic therapy (PDT) in two kind of picture: topography and phase imaging. From the results it can be concluded that before PDT the cells have smooth fine surfaces without pronounced roughness and after PDT the cells are cracked and it is possible to observe a manifestation of apoptosis.

## Testing of solar controller in a small photo-voltaic systém

(J. Mareš, M. Libra) ..... 292

## Aquastyl Slovakia - top European measurement technique

(M. Vychodil, J. Nevřala) ..... 295

## RNDr. Jaroslav Pechar – birth anniversary of (J. Eigl) ..... 297

## Value of physics for modern civilisation (J. Krempaský) ..... 297

## Laboratory of physical electronics is opened (J. Blahovec) ..... 303

---

# ANOTACE

---

## Submikrometrová analýza dislokací v polovodičích a dielektrikách (Š. Lanyí, V. Nádaždy, M. Hruškovič a J. Hribík) ..... 290

Kapacitně (nábojově) založená spektroskopie DTLs (Deep Level Transient Spectroscopy) patří mezi zavedené metody pro analýzu dislokací v polovodičích (v polovodičích nebo v dielektrikách). Citlivost metod lze zvýšit na úroveň dostatečnou pro použití v rastrovací tunelové mikroskopii. Článek porovnává tyto dvě metody, jejich výhody a omezení a také příklady spekter izotermických nábojových přechodů získaných v pentacenově tenké vrstvě.

## Mimoosové přiblížení Fresnelovy difrakce

(M. Miler, M. Hradil, J. Pala, I. Aubrecht) ..... 300

Je analyzována difrakce pro šikmé šíření světla pod velkým úhlem. Přiblížení Fresnelovou difrakcí je platné za předpokladu, že svazek je odchýlen do směru šikmého šíření, struktura difrakčního stínítka je promítnuta na rovinu kolmou ke směru šíření a difrakční obrazec je pozorován na rovině kolmé k šíření. Úloha je ilustrována difrakcí na kruhové apertuře.



# ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT

Český metrologický institut (ČMI) jako národní metrologický institut České republiky je odpovědný za udržování a rozvoj národních etalonů ČR, je odpovědný za zajišťování jejich návaznosti a přenosu jednotek SI do praxe. ČMI byl zřízen jako příspěvková organizace MPO ke dni 1. 1. 1993.

ČMI je státní institucí s plnou právní subjektivitou a plní funkce náležející do působnosti státní správy v oblasti metrologie svěřených ČMI zákonem č. 505/1999 Sb. v platném znění.

ČMI nabízí spolupráci a metrologické služby na nejvyšší technické úrovni pro všechny typy podniků, dodavatelů, laboratoří a zákazníků ve většině oborech vědy a průmyslu. Tyto služby jsou prováděny u nás v laboratořích nebo přímo na pracovištích u zákazníků. ČMI využívá pro své služby široký vozový park, který čítá dohromady cca 100 vozidel. Naše služby jsou založeny na právních podkladech a nabízíme v případě potřeby, dle dohody, zřízení naší mobilní laboratoře přímo v prostorách zákazníků, případně nabízíme možnost transportu etalonů do požadovaných prostor a provádět kalibrace nejenom u nás v laboratořích ale také přímo na pracovištích u zákazníka. Nové poskytované služby ČMI jsou odrazem požadavků zákazníků a provedením vlastního marketingového průzkumu.

ČMI nabízí své služby prostřednictvím svých Oblastních inspektorátů (svých laboratoří) které jsou ve většině významných regionálních center České republiky. Výhodou tohoto uspořádání je možnost specializace podle charakteru hospodářství regionu, blízkost k uživatelům služeb a tím i efektivnost.

ČMI má zastoupení v Praze, Brně, Českých Budějovicích, Plzni, Liberci, Mostě, Pardubicích, Jihlavě, Kroměříži, Opavě a Olomouci.

Laboratoře uchovávající státní etalony s celostátní působností jsou účelně soustředěny v Praze, v Brně a v Pardubicích. Kromě útvarů generálního ředitelství

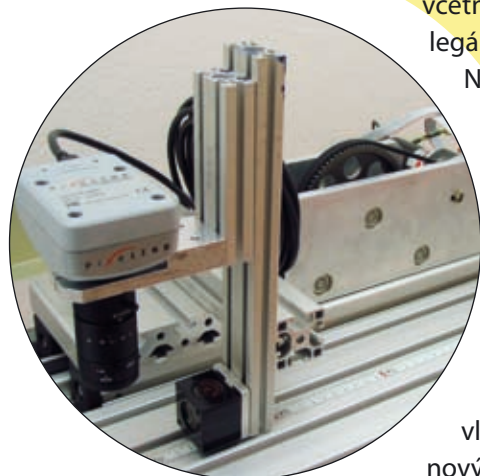
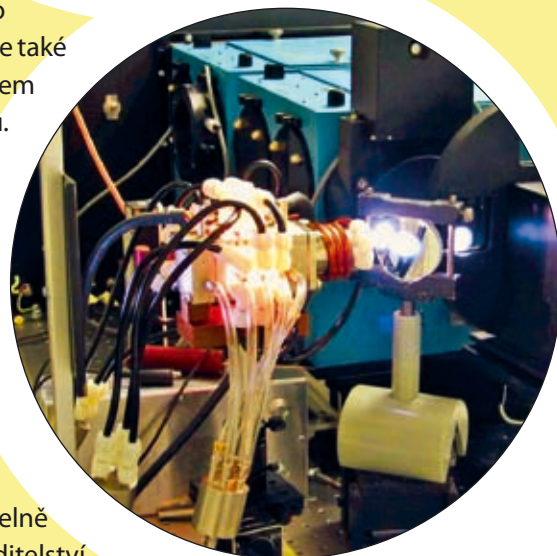
včetně úseku fundamentální metrologie a úseku

legální metrologie mají celostátní působnost také Laboratoře primární metrologie.

Některé obory měření nejsou zajišťovány všemi oblastními inspektoráty a určené oblastní inspektoráty mají v daném oboru měření celostátní působnost bez ohledu na umístění.

Z důvodu vysokého stupně pokrytí oblastí metrologie je ČMI schopný vyhovět zákazníkovi ve velice širokém spektru požadavků co do oblastí a do rozsahů potřebných metrologických úkonů.

ČMI pracuje na velice flexibilním přístupu potřeb a chování k zákazníkům jak ze sféry vědy, výzkumu a průmyslu a tento přístup je také podporován vlastním výzkumem a vývojem v oblasti metrologie a jejich implementací do nových metod a vybavení.





Brněnská firma MESING, která je zaměřena hlavně na zakázkovou měřicí a automatizační techniku, získala na MSV BRNO 2007 jednu z 10 udělených zlatých medailí za automat na povrchovou kontrolu defektů pláště pouzder vstřikovacích čerpadel (obr. 1), využívající detekci rozptýleného laserového světla. Návštěvníci měli možnost vidět ale i další aplikace této metody např. ke kontrole oběžných drah vnitřních kroužků vysokootáčkových ložisek (blíže např. JMO 5/2007, vývoj ve spolupráci s ÚM SAV Bratislavě).

Nově MESING referoval i o kontrole defektů závitů.

Velký zájem návštěvníků vzbudila víceparametrická stanice na kontrolu rozměrů, úchylek geometrického tvaru a polohy funkčních ploch těles hydraulických spojek těžkotonážních automobilů (obr. 2), která zapadá do základního programu zakázkových měřicích zařízení MESING na bázi indukčnostních délkových snímačů. Stanice byla zařazena mezi exponáty MESING na poslední chvíli po dohodě s odběratelem. Zejména zahraniční zákazníci uvalují v poslední době stále častěji informační embargo na speciální zakázkovou měřicí techniku MESING.

Novinkou v expozici MESING bylo také poloautomatické měřidlo MKM – 6 na kontrolu koncových měrek s výrazně mohutnějším litinovým stojanem a mechanizovaným posuvem etalonové i kontrolované koncové měrky v měřicím místě.

Z kalibračních měřidel vystavoval MESING ještě měřidlo MCU 30 PP na cejchování úchylkoměrů (ve spolupráci s ÚPT AV ČR a ČMI je ve vývoji vysoce přesné pracoviště ke kontrole délkových snímačů).

Vývoj nových měřicích metod pro svá zařízení zajišťuje MESING ve spolupráci s tuzemskými i zahraničními pracovišti, zejména vysokých škol a akademií věd, a to za účinné podpory grantů MPO FI – IM 3/97, FT – TA 3 / 133 a 2A – 1 TP1/127 – 2.

Daniel Smutný  
Ladislav Ošlejšek

# MESING OCENĚNĚN ZLATOU MEDAILÍ NA MSV BRNO 2007



Obr. 1 Automat na kontrolu pouzder vstřikovacích čerpadel



Obr. 2 Víceparametrická stanice na kontrolu rozměrů, úchylek tvaru a polohy