



**Elektronický sborník příspěvků multioborové
konference LASER56**

Zámecký hotel Třešť, 19. října - 21. října 2016



Elektronický sborník příspěvků multioborové
konference

LASER56

Zámecký hotel Třešť, 19. října – 21. října 2016

© 2016, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

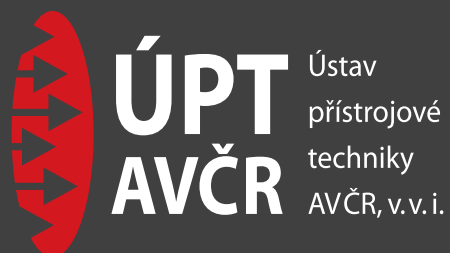
ISBN 978-80-87441-19-0

ÚVODNÍ SLOVO

Již po šesté má široká plejáda odborníků, kteří mají blízko k laserům, možnost potkat se v jednom čase i místě. Podzimní, předdušičková nálada, pomůže zklidnit mysl, bilancovat uplynulý rok a rozvíjet plány do budoucna. Odezvy z minulých ročníků potvrzují, že takové komunitní setkání je užitečné pro oprášení dávných přátelství a navazování nových. Všem Vám, kteří svojí účastí a laskavým přístupem k ostatním přispíváte k vytvoření produktivní atmosféry, velice děkuji.

V Brně dne 19. října 2016

Bohdan Růžička
a organizační tým



**ÚPT
AVČR** Ústav
přístrojové
techniky
AVČR, v.v.i.



alisi Aplikační laboratoře
mikrotechnologií
a nanotechnologií



Laserové svazky zaostřené do makrosvěta i mikrosvěta

Speciální technologie

Elektronová mikroskopie

Kryogenika a supravodivost

Lasery pro měření a metrologii

Elektronová litografie

Pokročilé výkonové laserové technologie

Měření a zpracování signálů v medicíně - MediSIG

Jaderná magnetická rezonance



OBSAH

PANORAMATICKÁ LASEROVÁ ABSORPČNÍ SPEKTROSKOPIE	8
LASEROVÉ TECHNOLOGIE NA ČVUT V PRAZE	10
KDYŽ SE MĚŘENÍ NEDAŘÍ - VIBRACE PROSTŘEDÍ, TRENDY A ŘEŠENÍ	12
NANOSTRUCTURED OPTICS: FROM GRADIENT INDEX COMPONENTS TO FIBERS	14
AUTOMATICKÝ SYSTÉM PRO KALIBRACI KONCOVÝCH MĚREK OPTIMALIZOVANÝ PRO LEGÁLNÍ DÉLKOVOU METROLOGII	15
APLIKACE UKP LASERU V PRŮMYSLOVÉ PRAXI	17
LASEROVÉ CHLAZENÍ ZACHYCENÝCH IONTŮ PRO METROLOGII FREKVENCE A ČASU	19
FÁZOVĚ KOHERENTNÍ PŘENOS STABILNÍ OPTICKÉ FREKVENCE PRO SENZORICKÉ SÍTĚ	21
FOTONICKÁ INFRASTRUKTURA A TESTBED	23
MOŽNOSTI MONITOROVÁNÍ LASEROVÉHO SVAŘOVACÍHO PROCESU	25
REFERENCE OPTICKÝCH KMITOČTŮ	27
DVOJICE FÁZOVĚ SYNCHRONIZOVANÝCH POLOVODIČOVÝCH LASERŮ PRO DÉLKOVOU METROLOGII	29
VYSOKOFREKVENČNÍ REZONÁTOR PRO NAPÁJENÍ IONTOVÉ PASTI	31
OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY A SVAŘOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN	33
LASER A FYLOTAXE	35
VYUŽITÍ TERMOGRAFIE PŘI APLIKACÍCH R&D	37
OD GENERÁCIE PRELADITEĽNÉHO THZ ŽIARENIA K THZ-FWM V PEVNÝCH LÁTKÁCH	39
MĚŘENÍ TEPLOT V NANOSEKUNDÁCH PŘI PŮSOBENÍ LASERU NA MATERIÁL	41
OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY A JEJICH VYUŽITÍ PRO MĚŘENÍ V JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH	43

LASEROVÉ SYSTÉMY SPITFIRE	45
SCHLIEROVÁ ANALÝZA PROUDĚNÍ PLYNŮ PŘI LASEROVÉM OBRÁBĚNÍ	46
NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ POMOCÍ AKTIVNÍ TERMOGRAFIE	48
DETEKCE FREKVENČNÍHO ŠUMU POLOVODIČOVÉHO LASERU PRACUJÍCÍHO NA VLNOVÉ DÉLCE 729 NM	49
MĚŘENÍ INDEXU LOMU VZDUCHU POMOCÍ INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE	51
VLIV VLASTNÍHO PRŮHYBU TESTOVANÝCH SFÉRICKÝCH OPTICKÝCH PRVKŮ NA PŘESNOST INTERFEROMETRICKÝCH MĚŘENÍ	53
OPTICKÝ REZONÁTOR S NÍZKOU DISPERZÍ PRO ÚČELY DÉLKOVÉHO SENZORY VYUŽÍVAJÍCÍ OPTICKÝ FREKVENČNÍ HŘEBEN	55
ÚČINNÝ PRIEREZ DVOJFOTÓNOVEJ ABSORPCIA NOVÝCH DERIVÁTOV BENZOTIAZOLU V INFRAČERVENEJ OBLASTI	57
FREKVENČNĚ STABILIZOVANÝ POLOVODIČOVÝ LASEROVÝ ZDROJ PRO INTERFEROMETRII S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM	59
OPTICKÁ CHARAKTERIZÁCIA POLYTIOFÉNOV PRE PRÍPRAVU SOLÁRNYCH ČLANKOV	61
TROJFREKVENČNÁ ZOSTAVA PRE EXPERIMENT S OPTICKÝM ČERPANÍM A THZ SONDOVANÍM	63
KOMPAKTNÍ VYHODNOCOvací JEDNOTKA PRO FBG SENZORY	65
ADAPTIVNÍ PŘÍJÍMAČ PRO PLNĚ FOTONICKÝ SPOJ	67
SYNCHRONNĚ ČERPANÉ OPO PRO VNITROREZONÁTOROVOU INTERFEROMETRII	69
SPONZOŘI A PARTNEŘI	

PANORAMATICKÁ LASEROVÁ ABSORPČNÍ SPEKTROSKOPIE

Yauhen Baravets, Pavel Honzátko, Filip Todorov a Ondřej Moravec

Ústav fotoniky a elektroniky, Akademie věd ČR, v.v.i.

Chaberská 57, 18251, Praha 8 - Kobylisy, Česká republika

+420 266 773 505, baravets@ufe.cz, www.ufe.cz

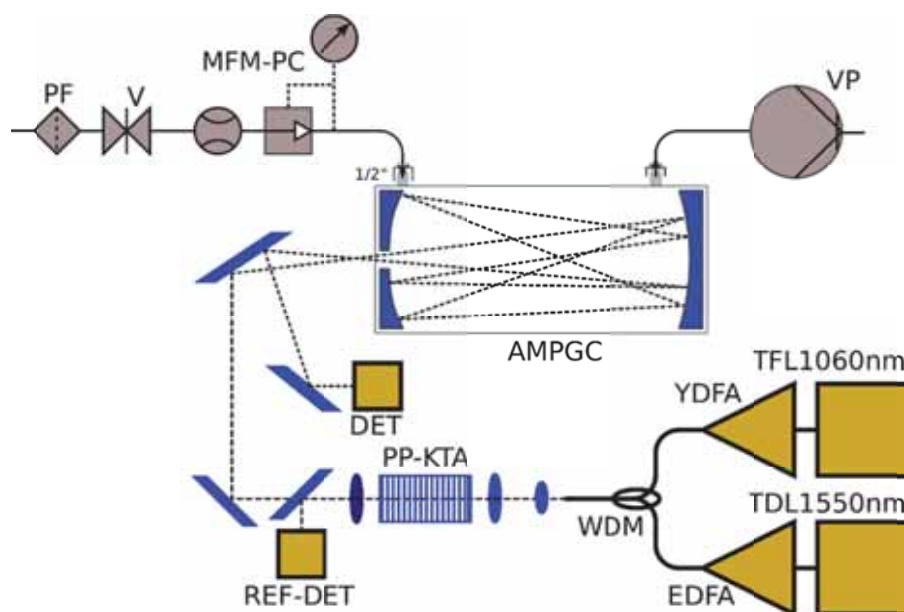
Obor: laditelné zdroje ve střední infračervené spektrální oblasti, vláknové lasery, periodicky pólované nelineární optické krystaly, spektroskopie

Laditelné úzkopásmové generátory záření pracující v kontinuálním režimu ve střední infračervené spektrální oblasti (mid-infrared, MIR) nacházejí uplatnění v aplikacích molekulární spektroskopie s vysokým rozlišením. Základní rotačně-vibrační absorpční pásma mnoho molekul se nacházejí právě v MIR oblasti [1], kde jsou absorpční linie výraznější, než ve viditelné či blízké infračervené spektrální oblasti. Díky tomu lze v MIR oblasti dosáhnout citlivější spektroskopické detekce.

Na pracovišti ÚFE AV ČR, v. v. i. byla ke generaci signálu v MIR oblasti použita metoda generace rozdílového kmitočtu (difference frequency generation, DFG) v periodicky pólovaných (PP) krystalech KTP (potassium titanyl phosphate) a KTA (potassium titanyl arsenate). Zesílené záření z ytterbiem a erbiem dopovaných vláknových laserů posloužilo jako zdroj základních signálů pro nelineární směšování [2]. Tyto vysokovýkonové úzkopásmové vláknové lasery vlastní konstrukce emitují záření v oblasti vlnových délek 1060 nm, resp. 1550 nm. Bylo použito několika technik k ovládání šířky spektrálních čar laserů, které umožnily jejich zúžení o řád v rámci přeladitelného vlnového pásma [3].

Podmínka fázové rovnováhy nutná k efektivní generaci rozdílového kmitočtu byla dosažena současným laděním jak čerpacího, tak i signálového vláknového laseru. Byly porovnány oba typy PP krystalů z hlediska jejich laditelnosti. Výsledný MIR generátor na bázi PP-KTA krystalu pokrývá spektrální oblast od 3100 do 3620 nm a má dvojnásobnou šířku spektrálního pásma v porovnání s generátorem na bázi PP-KTP krystalu. Široká laditelnost PP-KTA generátoru mohla být dosažena díky disperzním vlastnostem KTA krystalu, které umožnily současné ladění Yb- a Er- dopovaných vláknových laserů při zachování fázového synchronizmu. Schéma MIR generátoru je na Obr. 1.

Vyvinutý přístroj, jehož součástí je MIR generátor na bázi PP-KTA krystalu, je určený především pro laserovou absorpční spektroskopii (LAS) ve střední infračervené oblasti [4]. LAS umožňuje rychlé měření jak koncentraci různých plynů v atmosféře, tak i monitorování kvality plynů, sledování procesů hoření, detekci a kvantifikaci úniku plynů, monitorování vedlejších produktů při řízení výrobních procesů v petrochemickém průmyslu, nebo také lékařskou diagnostiku vydechaného vzduchu u pacientů. LAS dále umožňuje určit teplotu, tlak, rychlost a hmotnostní tok testovaného plynu.



Obr. 1. Schéma MIR systému pro spektroskopii.

Legenda: PF – filtrace, V - ventil, MFM-PC – regulace tlaku, VP – vývěva, AMPGC – astigmatická víceprůchodová plynová cela, DET – detektor, REF-DET – referenční detektor, PP-KTA - periodicky pólovaný krystal KTA, WDM - vlnový multiplexer, YDFA – Yb-dopovaný vláknový zesilovač, EDFA – Er-dopovaný vláknový zesilovač, TFL1060nm – Yb vláknový laser, TDL1550nm – Er vláknový laser.

Při provedených testech neoptimalizovaného systému byla dosažena detekovatelnost toluenu na úrovni 10 ppm.

Poděkování:

Výzkum byl podpořen Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky projektem LD14112 v rámci programu COST MP1204.

Literatura:

- [1] R.F. Curl, and F.K.Tittel, **Tunable infrared laser spectroscopy**. Annu. Rep. Prog. Chem. Sect. C 98, 219–272 (2002).
- [2] Honzatko, P., Baravets, Y., Todorov, F., and Gladkov, P., **Comparison of widely tunable narrow-band CW MIR generators based on the difference frequency generation in KTP and KTA crystals**, Advanced Solid State Lasers, ATH2A.36, Optical Society of America (2014).
- [3] Baravets, Y., Honzatko, P., Todorov, F., Gladkov, P., **Narrowband widely tunable CW mid-infrared generator based on difference frequency generation in periodically poled KTP and KTA crystals**, Optical And Quantum Electronics 48 (5), 286 (2016).
- [4] P. Honzatko, Y. Baravets, S. Mondal, P. Peterka, and F. Todorov, **Coherent Sources for Mid-Infrared Laser Spectroscopy**, Proc. SPIE SCPOC2016 digest (2016).

LASEROVÉ TECHNOLOGIE NA ČVUT V PRAZE

Jan Brajer, Pavel Zeman, Jiří Stuchlík

RCMT

Fakulta strojní, ČVUT v Praze

Technická 4, Praha 6 - Dejvice, PSČ 166 07;

e-mail: J.Brajer@rcmt.cvut.cz;

tel.: 736 288 646

Obor: Výzkum, vývoj a aplikace laserových technologií

1. Úvod

RCMT - Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii bylo založeno v roce 2000. Je samostatným pracovištěm Fakulty strojní ČVUT v Praze. Hlavním cílem působení RCMT jsou výzkumné a vývojové aktivity v oblasti výrobních strojů a technologií. Jedná se o vlastní aplikovaný výzkum, a dále o přímou komerční nebo projektovou spolupráci s průmyslovými partnery. Z tohoto důvodu je nezbytné být profesionálním a dobře vybaveným výzkumným, vzdělávacím a školicím pracovištěm. K dalším cílům pracoviště patří také výchova mladých odborníků pro praxi, kteří jsou schopni konzultovat technické problémy a pomáhají průmyslu vyvinout novou generaci výrobků pro tuzemský i zahraniční trh.

Díky širokému záběru Výzkumného centra v oblasti strojírenské výrobní techniky a technologie je možné řešit komplexní úlohy od návrhu řešení až po jeho samotnou realizaci.

Výzkum a vývoj v oboru výrobních strojů, je řešen konkrétně v oblastech:

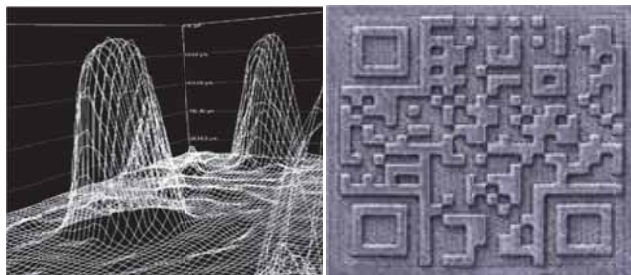
- optimalizace řezného procesu a technologie víceosého obrábění,
- pokročilé simulační modely,
- virtuální prototypování a virtuální testování,
- nové metody řízení pohonů a tlumení vibrací,
- nekonvenční materiály a struktury,
- sledování stavu a diagnostika obráběcích strojů,
- kompenzace teplotních chyb strojů a návrh přídavných odměřování,
- minimalizace dopadů provozu stroje na životní prostředí.

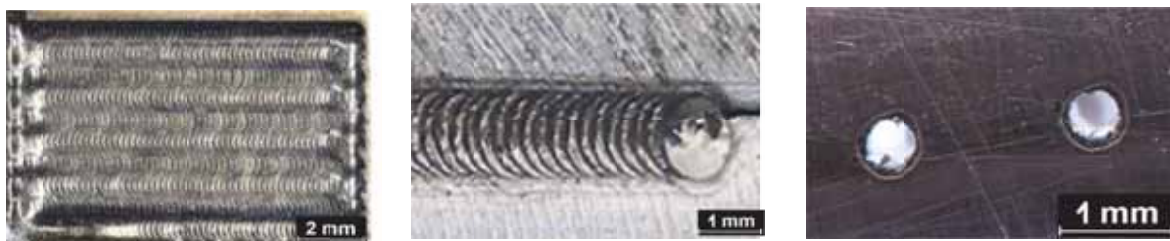
2. Výzkum a vývoj laserových technologií

V rámci aktivit spojených s technologiemi obrábění jsou předmětem výzkumu i laserové technologie. Skupina laserových technologií se v RCMT zabývá výzkumem, vývojem a praktickým uplatněním řešení pro konkrétní strojírenské aplikace. Na našich laserech lze zkoumat a vyvíjet většinu průmyslově dostupných aplikací.

Řešené laserové technologie jsou:

- popisování - kovy, plasty, sklo, keramika,
- mikrofrézování, gravírování a leštění, povrchu kovů a keramiky,
- řezání přesných tvarů a dílů,
- vrtání malých otvorů,
- svařování ocelí, vybraných druhů plastů a obtížně svařitelných materiálů,





Navařená vrstva z tvrdokovu, svařování různorodých materiálů a vrtání korozivzdorné oceli.

Pracovníci RCMT mají pro výše uvedené technologie ve svých laboratořích k dispozici dva pevnolátkové Nd:YAG pulzní lasery s maximálními výstupními výkony 50 W a 550 W.

V poslední době se intenzivně zabýváme i vytvářením 3D struktur z konstrukční a korozivzdorné oceli, a to vlastní navařovací hlavou s bočním podíváním drátu.



Navařená 3D struktura drátem za pomoci laseru, „vytištěný“ výrobek, příčný řez návarem

Dále se intenzivně zabýváme gravírováním a strukturováním povrchů. Vhodnou aplikací jsou například řezné nástroje z tvrdých a super-tvrdých materiálů, jako jsou slinuté karbidy, řezná keramika nebo diamant. Hlavním přínosem je zde zlepšení jejich užitých vlastností. Aktuální je ale i řešení dalších strojírenských aplikací, jako je čištění dílců nebo popis a identifikace výrobků.



Gravírované struktury na karbidových nástrojích, svařování plastových dílců.

Za zmínku stojí také několik projektů zaměřených na měření laserem, v rámci kterých vznikly funkční prototypy měřicích zařízení. Jedním příkladem je vývoj laserové „pušky“, schopné měření a následné kompenzace deformace velkých obráběcích strojů, a to pro zajištění větších přesností obrábění rozměrných dílců.

3. Zhodnocení a nabídka spolupráce

RCMT může spolupracovat v představených oblastech výzkumu, kde na řadu aplikací již má navázané průmyslové partnery.

Do příštích let plánujeme dále rozvíjet představená témata v oblasti laserových technologií více i prostřednictvím národních a i mezinárodních grantových projektů.

Příspěvek byl vytvořen s podporou z projektu TA04011000 z Programu na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje „ALFA“, TA ČR.

KDYŽ SE MĚŘENÍ NEDAŘÍ - VIBRACE PROSTŘEDÍ, TRENDY A ŘEŠENÍ

Petr Březina

OptiXs, s.r.o.

Křivoklátská 37, 199 00 Praha 9 Tel.: +420 607 014 278

E-mail: klecka@optixs.cz



Obor: Optická koherentní tomografie s bílým laserem

Společnost OptiXs, s.r.o. se zabývá komplexními dodávkami přístrojové techniky pro vysoce přesnou metrologii a výzkum od předních světových výrobců. Díky odborným znalostem našich pracovníků je schopna poskytnout služby začínající formou poradenství, dodáním systému a končící dlouhodobou údržbou zařízení a aplikační podporou.

Technologické požadavky moderního světa jsou neustále se zvyšující přesnost a miniaturizace se souběžně se zvyšující se efektivitou a kvalitou práce, nanometr je dnes běžně používaná míra.

Přesně proti tomu ale jde vývoj okolního prostředí, kdy se aglomerace zahušťuje, výroba a laboratoře jsou často provozovány ve starých budovách, bývalých kancelářích ve vyšších patrech či halách v jejichž blízkosti je silná silniční nebo železniční doprava. Oddělení přesného měření sousedí s těžkou výrobou.

Čím víc přístrojů a zařízení na jednom místě, tím více mechanického a elektromagnetického rušení vzniká.

Pracoviště, která ještě nedávno vyhovovala, se čím dál častěji potýkají s nežádoucím rušením, které zpomaluje nebo dokonce znemožňuje jejich práci.

Jako ukázka je představena vibrační analýza jednoho pracoviště, rozbor a hodnocení naměřených dat a následně technický popis možného řešení v podobě aktivního piezoelektrického antivibračního systému.



TMC - Severoamerický specialista poskytující řešení v oblasti tlumení nežádoucích vibrací a působení elektromagnetického pole.

WHEN THE MEASUREMENT FAILS - VIBRATIONS IN ENVIRONMENT, TRENDS AND SOLUTIONS

The technological demand of the modern world is constantly increasing precision and miniaturization with higher efficiency and quality of work. A nanometer is now commonly used scale.

Unfortunately, changes in our environment are going against this demand. Agglomeration is more and more dense. Production and laboratories very often operate in buildings of former offices, on the upper floors, or close to heavy traffic.

Departments of precise measurement are near to heavy production machinery. The more devices and equipment are in one place, the more mechanical and electromagnetic interference like noise and vibrations arises. The workplaces, that have recently fitted, are facing to the increasing interferences, which thwarts their work.

As an example, the vibration measurement is presented, including analysis and data evaluation leading to the technical description of a possible solution in the form of active piezoelectric vibration isolating system.



Model 20-561 Active Table isolates Optical Microscope at Rice University Bioscience Research Collaborative.

NANOSTRUCTURED OPTICS: FROM GRADIENT INDEX COMPONENTS TO FIBERS

**Ryszard Buczynski^{1,2,3}, Rafał Kasztelanic¹, Adam Filipkowski¹,
Dariusz Pysz¹, Mariusz Klimczak¹, Andrew Waddie²,
Mohammad R. Taghizadeh², and Ryszard Stepień¹**

¹ Institute of Electronic Materials Technology, Wolczynska 133, 01-919 Warsaw, Poland

² University of Warsaw, Faculty of Physics, Pasteura 7, 02-093 Warsaw, Poland

³ Institute of Photonics and Quantum Sciences, School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, Scotland, UK (+48 22 5546857, rbuczyns@igf.fuw.edu.pl, www.itme.edu.pl)

Keywords: effective medium theory, nanostructured fibers, gradient index optics

Nanostructured gradient index (nGRIN) elements are planar-surface micro-optical elements with internal discrete structure. Its feature size is much smaller than wavelength. An effective gradient index profile with any arbitrary refractive index distribution can be developed with internal nanostructure of the core composed of two glasses. The effective medium Maxwell-Garnett theory is applied to design internal nanostructure of medium, where the effective refractive index is determined by a spatial average of the individual refractive indices of the constituent nanorods. It can be used to create a wide range of nanostructured gradient index micro-optical components as microlenses, axicons and polarization-sensitive components. The nGRIN components are an attractive approach for compact optical systems as they can be easily integrated with other micro-optical components as optical fibers.

A low-cost modified stack-and-draw technology commonly used for photonic crystal fibers development is used for development of nanostructured components.

With the same method fibers nanostructured core can be developed (Fig. 1). This approach allows control of the modal properties and dispersion profile similarly to photonic crystal fibers. However in this case an internal structure of the core determines the fiber properties. As proof-of-concept, fibers made of two soft glasses with a parabolic gradient index profile are developed.

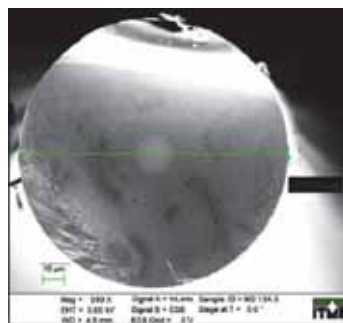


Fig. 1. SEM images of the fiber with nanostructured core

Acknowledgments. This work was supported by the National Science Centre in Poland project HARMONIA UMO-2013/10/M/ST3/00708, TANGO TANGO1/269956/NCBR/2015 and TECH TEAM project operated within the Foundation for Polish Science Team Programme co-financed by the European Regional Development Fund under Smart Growth Operational Programme.

AUTOMATICKÝ SYSTÉM PRO KALIBRACI KONCOVÝCH MĚREK OPTIMALIZOVANÝ PRO LEGÁLNÍ DÉLKOVOU METROLOGII

**Zdeněk Buchta¹, Martin Šarbort¹, Martin Čížek¹, Václav Hucl¹,
Šimon Řeřucha¹, Tomáš Pikálek¹, Štěpánka Dvořáčková², František
Dvořáček³, Jan Kůr⁴, Pavel Konečný⁴, Josef Lazar¹ a Ondřej Číp¹**

¹Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i.

Královopolská 147, Brno (+420 541 514 526, buchta@isibrno.cz, www.isibrno.cz)

²Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojního inženýrství, Technická univerzita v Liberci
Studentská 2, Liberec

³Regionální inspektorát Liberec, Český metrologický institut
Slunečná 23, Liberec

⁴MESING Brno a.s.

Šámalova 60a, Brno

Obor: laserová interferometrie, interferometrie nízké koherence, koncová měrka, metrologie

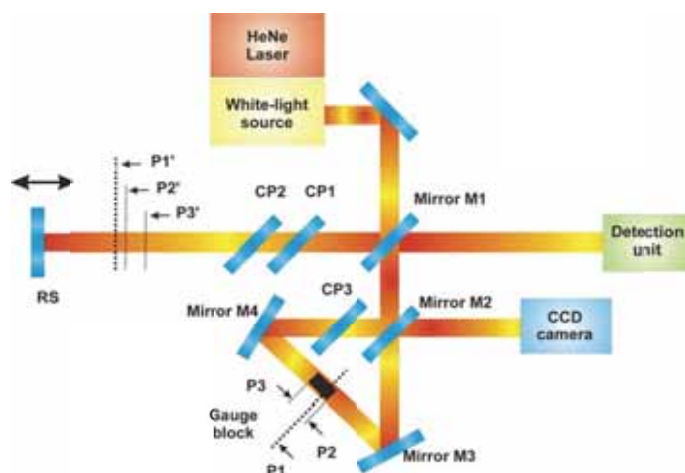
V metrologii délky představuje tzv. koncová měrka (KM) mechanický etalon délky, využívaný pro kalibraci délkových měřidel, běžně používaných ve výrobním procesu.

Týmem vědeckých pracovníků a techniků z ÚPT AVČR v.v.i. a brněnské firmy MESING Brno a.s. byl navržen a sestaven systém pro bezkontaktní kalibraci koncových měrek. Tento, dnes již patentově chráněný, princip kalibrace délky koncové měrky využívá vlastností základní vlastnosti laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence [1]. Optická sestava, jak je zachycena na obr. 1, kombinuje Michelsonův a Dowelův interferometr tak, aby bylo možné měřit délku koncové měrky bezkontaktně, v jediném měřicím kroku a s přímou návazností na primární etalon délky. Díky důmyslnému systému pro manipulaci s koncovými měrkami je měření plně automatické.

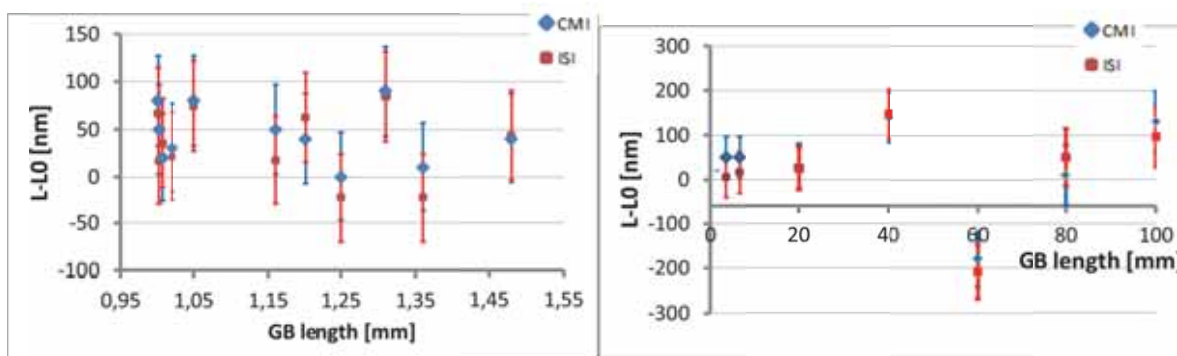
V rámci spolupráce čtyř shora uvedených pracovišť proběhla optimalizace původního systému s cílem implementovat navržený způsob měření do běžné metrologické praxe. Pozornost byla soustředěna na manipulaci s koncovou měrkou, kdy byl původní systém doplněn o optický snímač polohy koncové měrky na unašeči, transportujícím KM ze zásobníku do optické sestavy, a byl navržen a implementován systém pro aktivní stabilizaci polohy KM vůči měřicímu svazku [2]. Nemalá pozornost byla věnována i zpracování interferenčních signálů [3,4].

Vybrané koncové měrky byly podrobeny detailní analýze povrchu na konfokálním laserovém mikroskopu Olympus LEXT OLS 3000. Tato analýza potvrdila, že navržený způsob kalibrace a manipulace s KM nemá negativní vliv na kvalitu povrchu KM.

Ověření shody měřených hodnot délky KM proběhlo prostřednictvím srovnávacího měření sady KM pomocí optimalizovaného systému a standartního systému pro kalibraci KM TESA-UPC a TESA NPL A.G.I. 300 (Obr. 2).



Obr. 1. Schéma optické sestavy pro kalibraci koncových měrek. CP1, CP2 a CP3 jsou kompenzační desky a RS je polohovatelné zrcadlo interferometru.



Obr. 2. Výsledky srovnávacího měření prezentující optimalizovaného systému pro kalibraci koncových měrek (červená) a standartního systému TESA-UPC (modrá), používaného v laboratořích ČMI.

REFERENCE

- [1] Buchta, Z., Rerucha, S., Mikel, B., Cizek, M., Lazar, J. and Cip, O., “Novel principle of contactless gauge block calibration,” *Sensors* 12, 3350–3358 (2012).
- [2] Buchta, Z., Rerucha, S., Hucl, V., Cizek, M., Sarbort, M., Lazar, J. and Cip, O., “Active angular alignment of gauge blocks in double-ended interferometers,” *Sensors* 13, 13090–13098 (2013)
- [3] T. Pikálek, T. Fořt, Z. Buchta, “Detection techniques in lowcoherence interferometry and their impact on overall measurement accuracy,” *Applied Optics*, vol. 53, pp. 8463–8470 (2014).
- [4] Rerucha, S., Buchta, Z., Sarbort, M., Lazar, J. and Cip, O., “Detection of Interference Phase by Digital Computation of Quadruple Signals in Homodyne Laser Interferometry,” *Sensors* 12(10), 14095-14112 (2012).

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum financovaný Technologickou agenturou České republiky, projekt č. TA03010663. Výzkumná infrastruktura financovaná Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, projekty LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017, a Akademií věd české republiky, projekt RVO: 68081731.

APLIKACE UKP LASERU V PRŮMYSLOVÉ PRAXI

Adam Čermák

ZČU Plzeň, Katedra technologie obrábění

Univerzitní 22, 306 14 Plzeň

cermi89@kto.zcu.cz; www.kto.zcu.cz

Petr Šrachta; Pavel Kožmín

HOFMEISTER s.r.o., vývojové oddělení

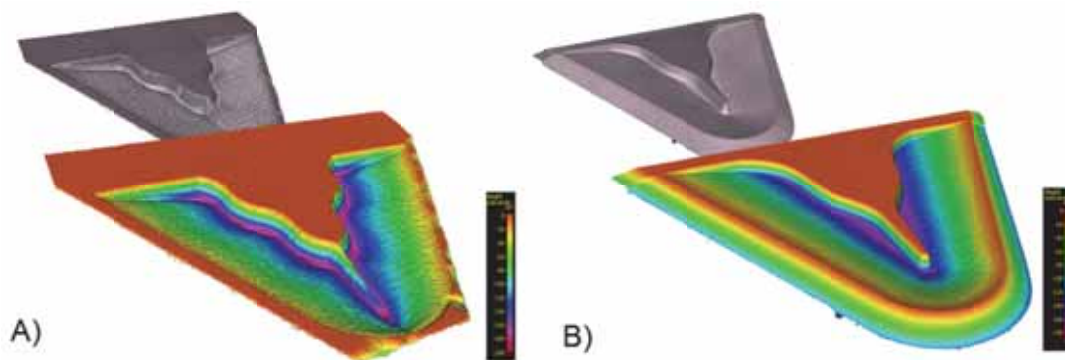
Daimlerova 9, 301 00 Plzeň

srachta@hofmeister.cz; kozmin@hofmeister.cz; www.hofmeister.cz

Obor: mikroobrábění, mikrořezání, mikrostrukturování povrchů, úprava geometrie řezných nástrojů včetně prototypových vzorů

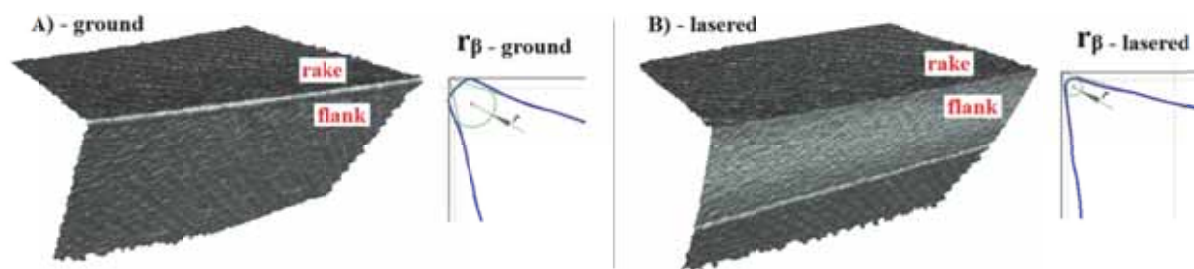
Tento příspěvek pojednává o možnostech laserového mikroobrábění, mikrořezání a mikrostrukturování povrchů řezných nástrojů. Zvyšující se nároky na řezný proces nutí výrobce řezných nástrojů implementovat nové, zejména nekonvenční technologie, které se stávají nezaměnitelným prvkem v řetězci výroby nástrojů. V případě zvyšování řezivosti, trvanlivosti nástroje, snižování frikčního koeficientu povrchu nástroje a tím i jeho redukci řezných sil během řezného procesu lze úpravu břitů řezných nástrojů pomocí laserového mikroobrábění považovat jako nejvhodnější volbu.

Technologie mikroobrábění je v nástrojovém průmyslu využívána pro tvorbu utvařečů třísek. Při použití této technologie je kladen důraz na co nejlepší tvarovou přesnost požadované geometrické entity a především na výslednou drsnost získaného povrchu, která ovlivňuje tření mezi odcházející třískou a čelem nástroje.



Obrázek 1 A) výchozí stav od zákazníka - výrazně horší povrchový reliéf; B) vzorek vytvořen UKP laserem

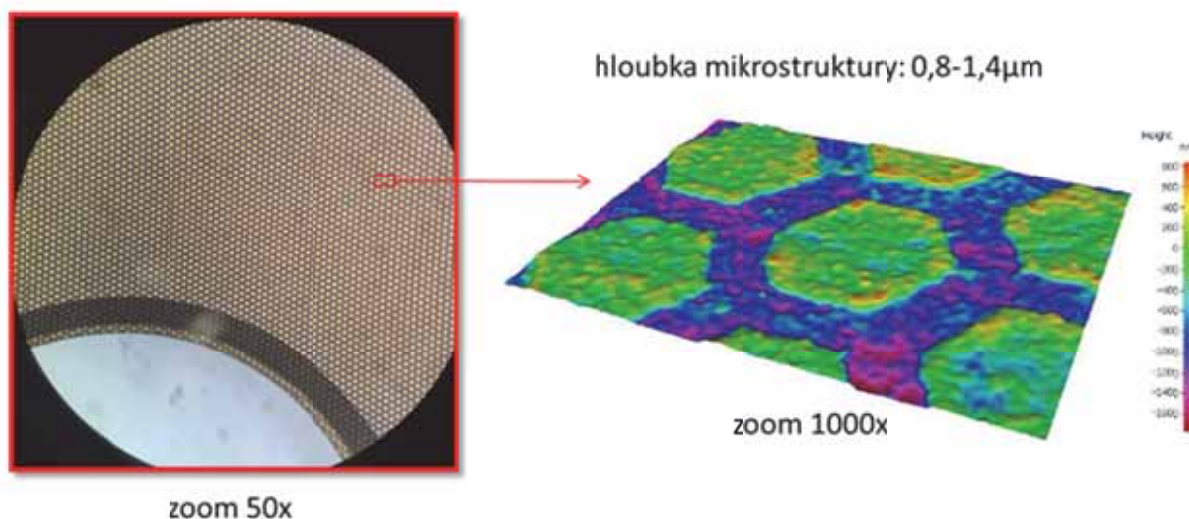
Technologie mikrořezání je opět prezentována na řezném nástroji. Vyšetřením přesné trajektorie šroubovice se u monolitních řezných nástrojů otevírají nové možnosti nekonvenčních modifikací. Např. možnosti přestřžení břitů, kde lze docílit kvalitativně lepších hodnot poloměru zaoblení ostří r_β , než je tomu u samotného broušení, kde je výsledná hodnota r_β limitována velikostí WC zrna broušeného substrátu. V případě upraveného břitu za pomoci zanalyzování šroubovice může hodnota r_β dosahovat $< 2\mu\text{m}$ (fig. 6 – $r_{\beta\text{-lasered}}$), kde parametr drsnosti R_a vzniklé hřbetní fazety laserem dosahuje $< 0,2\mu\text{m}$. Touto nekonvenční technologií lze docílit významného zlepšení parametrů břitu nástroje.



Obrázek 2 Rozdíl mezi broušeným (A) a laserovaným (B) ostřím: zvětšení 500x

Laserové mikrořezání se poslední dobou uplatňuje i v elektrotechnickém průmyslu, kde jsou využívány výhody minimálního tepelného ovlivnění UKP laserem.

Laserové mikrostrukturování je používáno na úpravy tenkých vrstev, jejichž tloušťky dosahují v řádech jednotek μm . Výsledkem takové úpravy je markantní navýšení životnosti řezného nástroje následkem odlehčení styčné plochy mezi třískou a nástrojem; lepšího chlazení a mazání procesní kapalinou. Velikost mikrostruktur je v tomto případě omezena možnostmi fokusační optiky a vhodnou volbou laserových parametrů, kde jsou použity malé hustoty energie laserového svazku.

Obrázek 3 Mikrostrukturování tenké vrstvy o tl. $3\mu\text{m}$

Poděkování

Tento článek vznikl za finanční podpory projektu "Regionální technologický institut", registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0093 a projektu SGS-2016-005

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Orientujeme se i do ostatních oblastí průmyslu: elektroprůmysl, medicínská sféra
- Mikroobrábění pomocí laseru tvarově složitých ploch u různých druhů materiálů (odladění laserového procesu s ohledem na geometrickou a tvarovou přesnost mikroobrábění)
- Měření mikroobrobených entit nebo malých dílců (v řádech mm) s tvorbou metodiky měření a vyhodnocení velmi malých detailů (pod 1mm)
- příprava a realizace řešení konkrétní technologie na míru

LASEROVÉ CHLAZENÍ ZACHYČENÝCH IONTŮ PRO METROLOGII FREKVENCE A ČASU

**Ondřej Číp, Tuan Minh Pham, Martin Čížek, Adam Lešundák,
Václav Hucl, Jan Hrabina, Šimon Řeřucha, Petr Jedlička a Josef Lazar**

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Oddělení koherenční optiky
Královopolská 147, Brno, 612 64, +420 541 514 254, ocip@isibrno.cz

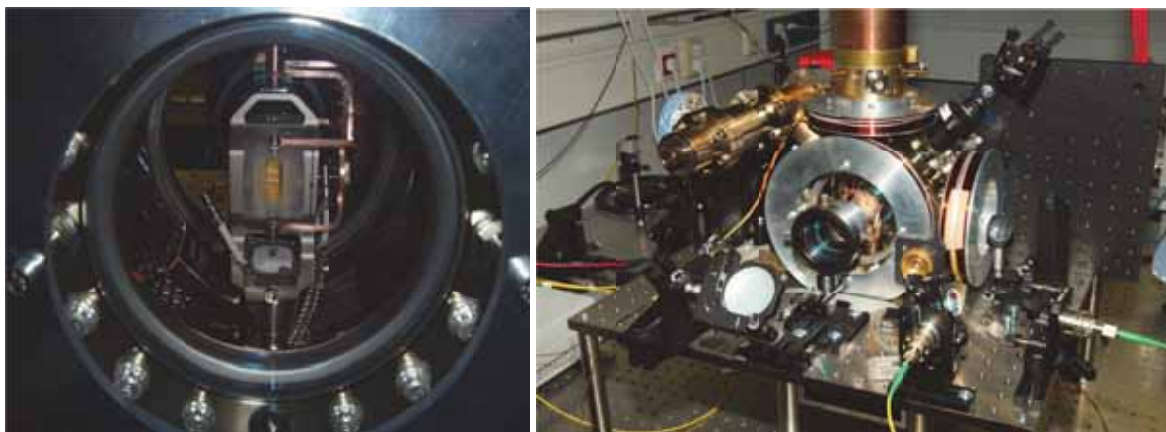
Lukáš Slodička, Petr Obšil a Radim Filip

Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra optiky
17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc

Obor: Laserová spektroskopie, laserové chlazení atomů, metrologie

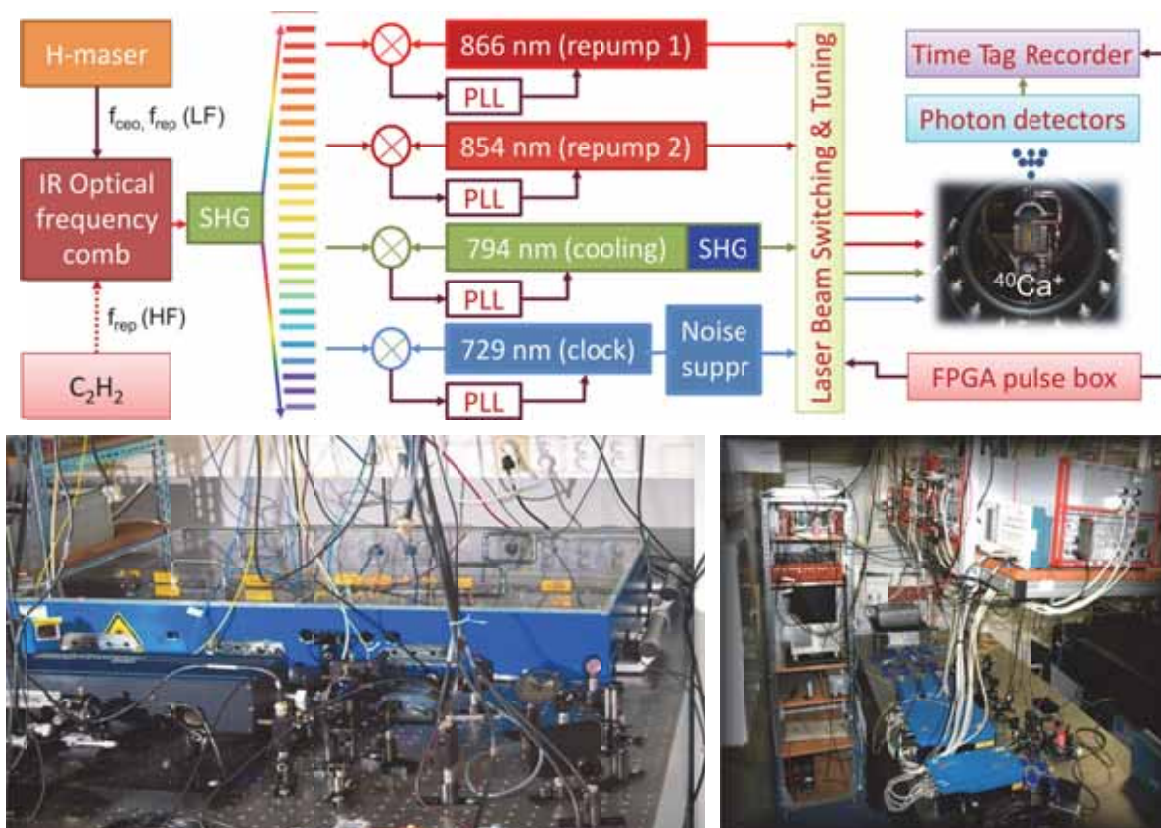
Potřeba přesného času a přesného kmotočtu provází lidstvo po tisíce let. Rozdělení dne do dvou dvanáctihodinových period, sluneční hodiny následované přesýpacími hodinami, hodinami s vodou či svíčkami patří k prvním důležitým aktivitám člověka v oboru pozorování a měření času. Současná metrologie času je založena na fyzikálních jevech absorpce a emise světla atomy či molekulami. Platná definice jednotky SI "jedna sekunda" se tak vztahuje k 9192631770 periodám elektromagnetického záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami hyperjemné struktury atomu Cesia ve svém základním stavu při teplotě 0 K [1]. Současný výzkum v oboru laserového chlazení zachycených iontů vede k získání izolovaných iontů v základním pohybovém stavu, který může pracovat jako kvantově atomový absorbér. Excitace jediného Dopplerovsky zchlazeného iontu na jeho kvadrupólový přechod elektronické struktury s následnou detekcí takto excitovaného stavu dává příležitost ke stabilizaci vysoce koherentních laserů na optické frekvenci řádu stovek THz. Takto stabilizovaný laser vykazuje zcela bezprecedentní relativní stabilitu, která sahá až na úroveň 10^{-16} . Tímto způsobem lze definovat nový standard času či optické frekvence zvaný "Optické atomové hodiny" [2].

Současný trend v oboru základních normálů optické frekvence orientovaný na spektroskopii laserem zchlazených atomů vedl v roce 2014 k založení společné laboratoře v České republice, kde by byl realizován výzkum kvantových mechanických interakcí zachycených iontů s vysoce koherentním laserovým světlem. Ústav přístrojové techniky v Brně a Katedra optiky Univerzity Palackého v Olomouci tak v současnosti realizují unikátní výzkumnou infrastrukturu pro laserové chlazení $^{40}\text{Ca}^+$ iontů a následné experimenty kvantové mechaniky a spektroskopie ve společné laboratoři v Brně, viz Obr. 1.



Obr. 1: Pohled na sestavenou vakuovou komoru obsahující Paulovu past pro zachytávání $^{40}\text{Ca}^+$ iontů a pro jejich následné laserové chlazení a detekci fluorescence.

Důležitou součástí infrastruktury je také sestava vysoce koherentních laserů, které zajišťují excitaci elektronické struktury iontu na příslušné hladiny či vlastní detekci vybuzeného stavu iontu. Sestava laserů je založena na polovodičových laserech s externími rezonátory, které jsou fázově zavěšeny na příslušné komponenty hřebene optických frekvencí, který je provozován ve frekvenční laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR, viz Obr. 2.



Obr. 2: Schéma laserové části infrastruktury pro chlazení $^{40}\text{Ca}^+$ iontů (nahoře), pohled na sestavu optického frekvenčního hřebene (vlevo dole), na který jsou navázány excitační lasery pro chlazení iontů (vpravo dole).

V současnosti rutinně generujeme a zachytáváme $^{40}\text{Ca}^+$ ionty, provádíme jejich Dopplerovské chlazení prostřednictvím dipólového přechodu na vlnové délce 397 nm, provádíme detekci a spektroskopii elektronické struktury iontu a výskyt jeho temných rezonancí. Připravujeme excitaci kvadrupólového přechodu iontu na vlnové délce 729 nm, který má umožnit stabilizaci optické frekvence tohoto laseru s rozlišením na desetiny Hz a otevření cesty k optickým atomovým hodinám. Jde o klíčový krok v rozvoji kvantových technologií v České republice, který Ústav přístrojové techniky AV ČR a Katedra optiky Univerzity Palackého společně podnikli. Jsou plánovány i experimenty v oboru fundamentálních jevů kvantové mechaniky a optiky, které mohou objasnit chování izolovaných částic v tzv. základním pohybovém stavu.

Literatura:

- [1] Bauch A., Achkar J et al. Metrologia, 43, (1), 109-120 (2006)
- [2] Ludlow A.D., Boyd M.M., Ye J., Peik E., and Schmidt P. O., Rev. Mod. Phys. 87, 637 (2015)

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:
Spektroskopie vysokého rozlišení

Poděkování

Tento metodologický výzkum je podporován Grantovou agenturou ČR, projekt č. GB14-36681G. Výzkumná infrastruktura byla podpořena s přispěním Evropské komise a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, projekty č. LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a dále Akademií věd České republiky, projektem RVO:68081731

FÁZOVĚ KOHERENTNÍ PŘENOS STABILNÍ OPTICKÉ FREKVENCE PRO SENZORICKÉ SÍTĚ

**Martin Čížek, Lenka Pravdová, Václav Hucl, Šimon Řeřucha, Jan Hrabina,
Břetislav Mikel, Josef Lazar a Ondřej Číp**

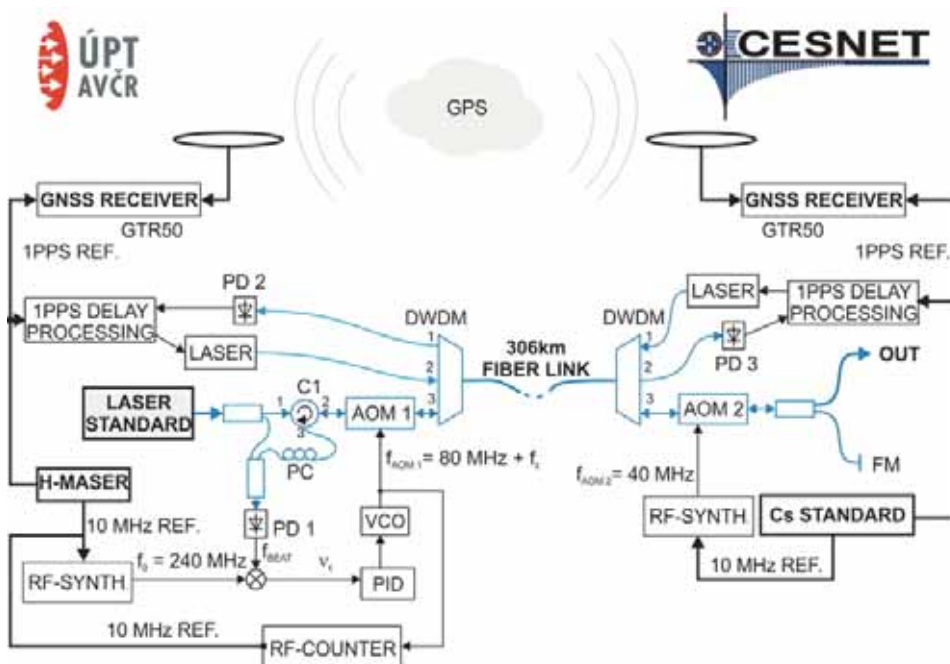
Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i., Královopolská 147, 612 64 Brno (cizek@isibrno.cz)

Vladimír Smotlacha a Josef Vojtěch

CESNET, z. s. p. o., Žitkova 4, 160 00 Praha 6

Obor: Měření a metrologie, fotonické sítě, normály času a frekvence, měření stability transportního zpoždění

Využití optických vláken pro fázově koherentní přenosy vysoce stabilních optických frekvencí na velké vzdálenosti je testováno světovými metrologickými laboratořemi již řadu let [1]. Současný rozmach moderních optovláknových senzorů v průmyslových aplikacích vytváří poptávku po transferu technologie fázově koherentních přenosů z laboratoří do průmyslové praxe. Příkladem může být dálková kalibrace tenzometrů pracujících na principu Braggových vláknových mřížek [2]. V našem příspěvku prezentujeme 306 km dlouhou obousměrnou experimentální optickou trasu pro fázově koherentní přenosy z pracoviště oddělení Koherentní optiky na ÚPT AVČR v Brně do laboratoře sdružení CESNET v Praze. Linka využívá telekomunikační vlákno s vyhrazeným DWDM oknem 1540-1546 nm. V tomto okně probíhá stabilizovaný fázově koherentní přenos laserového normálu pracujícího na vlnové délce 1540,5 nm a obousměrný přenos časových značek 1PPS z časových normálů na obou koncích trasy.

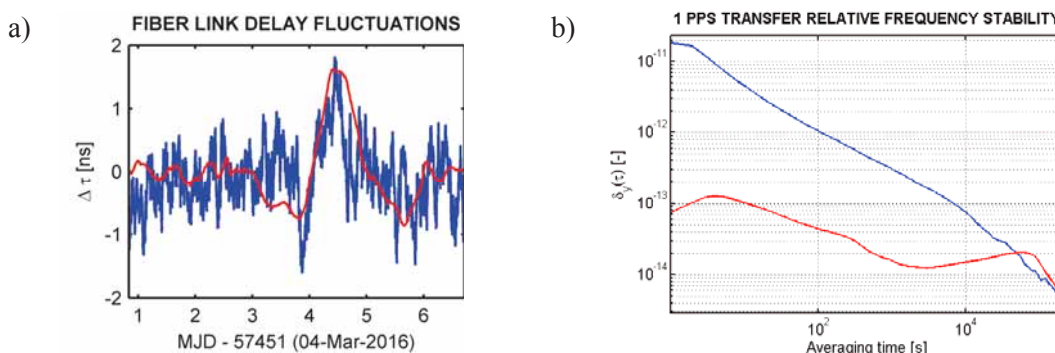


Obř. 1: Celkové schéma 306 km dlouhé obousměrné testovací linky pro fázově koherentní přenosy stabilních optických frekvencí, kde PD1, PD2, PD3 jsou fotodetektory, C1 je optický cirkulátor, AOM1, AOM2 jsou akustooptické modulátory, DWDM jsou multiplexor a demultiplexor systému hustého multiplexu vlnových délek, PID je regulátor, VCO je napětím řízený oscilátor, FM je Faradayovo zrcadlo a PC je vláknový polarizační kontrolér.

Při fázově koherentním přenosu je použita metoda kompenzace Dopplerova posuvu indukovaného v přenosovém optickém vlákně. Akustooptický modulátor (AOM1 na Obr. 1) pracující jako akční člen smyčky fázového závěsu posouvá frekvenci vysílané koherentní vlny přesně opačným směrem než Dopplerův jev. Pro účely vyhodnocení činnosti této regulační smyčky je do sestavy doplněn

frekvenční čítač s nulovou ztrátovou dobou měření, který je připojen na výstup napětím řízeného oscilátoru generujícího modulační frekvenci pro AOM 1. Integrujeme-li v čase rozdíl okamžité modulační frekvence od její klidové hodnoty 80 MHz, jsme schopni spočítat změnu dopravního zpoždění optického vlákna vlivem Dopplerova jevu. Pro ověření změn transportního zpoždění získaných touto metodou je do sestavy zařazen i systém pro měření dopravního zpoždění metodou vzájemného porovnávání pulsních časových značek 1PPS pomocí speciálních transceiverů CESNET [3]. Protože je toto měření zatíženo nejistotou radiofrekvenčních normálů Cs přístrojových atomových hodin a H-maseru, paralelně probíhá sledování stability těchto obou zdrojů pomocí GNSS přijímačů GTR50 a naměřené hodnoty transportního zpoždění jsou následně očištěny od vzájemných fluktuací těchto RF normálů.

Na Obr. 2 a) jsou vyobrazeny průběhy změny dopravního zpoždění pro sedmidenní interval měření v březnu 2016 měřené oběma metodami. Červená křivka vyjadřuje změnu hodnoty zpoždění zjištěnou při reálném fázově koherentním přenosu stabilní optické frekvence normálového laseru 1540,5 nm z uzlu ÚPT Brno do uzlu CESNET Praha. Modrá křivka pak vyjadřuje fluktuaci dopravního zpoždění zjištěnou metodou obousměrného přenosu 1PPS signálu. Jak je patrné z uvedených záznamů, maximální změna dopravního zpoždění linky je v řádu nanosekund pro dané sledované období a rozdíl mezi průběhy změřenými oběma metodami nepřesahuje řád jedné nanosekundy. Modrá křivka však vykazuje velkou míru fázového šumu, což je dáno fluktuacemi signálu GPS procházejícího přes atmosféru. Na Obr. 2 b) je pak uveden graf relativní frekvenční stability nekompenzované optické trasy měřený metodou obousměrného přenosu 1PPS signálů (modrá křivka) a měřený na základě regulačního zásahu fázově koherentního přenosu optické frekvence normálového laseru (červená křivka). Modrá křivka vykazuje nižší hodnoty relativní frekvenční stability pro integrační doby do 10^4 sekund, neboť je měření v tomto časovém intervalu značně ovlivněno fluktuací signálů GPS přijímaných GNSS přijímači GTR50.



Obr. 2: Měření stability 306 km dlouhé nekompenzované optické trasy: a) fluktuace transportního zpoždění, b) relativní frekvenční stabilita přenosu 1 PPS signálu. Modře – měřeno metodou obousměrného přenosu 1PPS signálu, červeně – měřeno na základě regulačního zásahu fázově koherentního přenosu.

Na základě výsledků měření změny dopravního zpoždění na fotonické trase Brno – Praha lze konstatovat, že optické vlákno samotné je schopno přenášet stabilní optické frekvence bez kompenzace Dopplerova posuvu vlákna až do řádu 10^{-14} a dobu měření 10^5 sekund. V případě požadavku na přenos stabilnější optické frekvence je nezbytné použít techniku fázově koherentního přenosu s kompenzačním akustooptickým modulátorem.

REFERENCE

- [1] C. E. Calosso, E. Bertacco, D. Calonico, C. Clivati, G. A. Costanzo, M. Frittelli, F. Levi, A. Mura, and A. Godone, "Frequency transfer via a two-way optical phase comparison on a multiplexed fiber network," *Opt. Lett.* 39, 1177-1180 (2014)
- [2] A. Cusano et al., *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation*, ISBN: 978-1-60805-343-8 (2011)
- [3] Smotlacha V., Kuna A., "Two-Way Optical Time and Frequency Transfer between IPE and BEV," *EUROPEAN FREQUENCY AND TIME FORUM 2012 Proceedings*, pp 375-378 (2012).

PODĚKOVÁNÍ

Autoři vyjadřují tímto poděkování za podporu projektu Fondu rozvoje CESNET, č. 500/2013. Metodologický výzkum je podporován Grantovou agenturou ČR, projekt č. GB14-36681G. Výzkumná infrastruktura byla podpořena s přispěním Evropské komise a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, projekty č. LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017, projektem TA ČR TH01011254 a dále Akademii věd České republiky, projektem RVO:68081731.

FOTONICKÁ INFRASTRUKTURA A TESTBED

Ondřej Havliš*, Josef Vojtěch

CESNET, z. s. p. o.

Oddělení optických sítí

Zikova 4

160 00 Praha 6

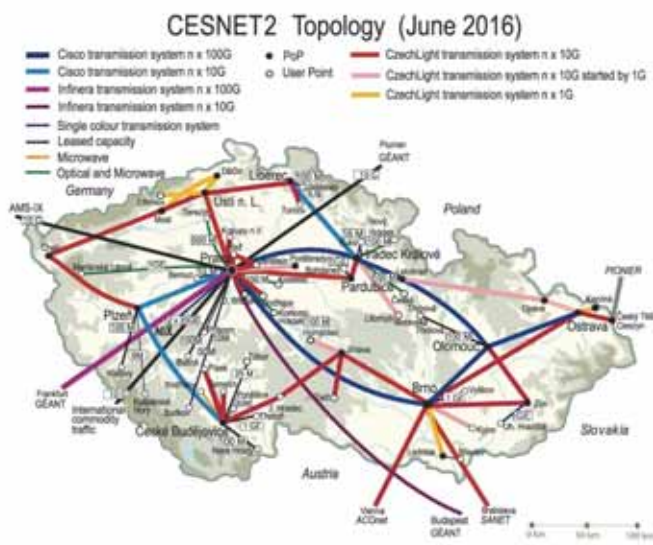
+420 724 062 185

photonic@cesnet.cz, *ondrej.havlis@cesnet.cz

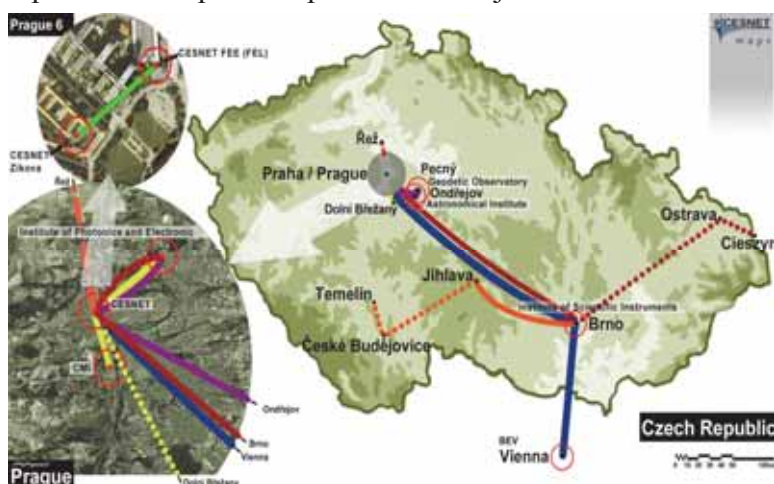
<https://phonics.cesnet.cz/>, <https://czechlight.cesnet.cz/>

Obor: Speciální aplikace v optických komunikacích

Sdružení CESNET provozuje národní e-infrastrukturu pro vědu, výzkum a vzdělávání. Její zásadní částí je fotonická síť, která je provozována na více než 6100 km vláknových tras. Ta umožňuje vytváření vyhrazených **fotonických propojů**, které vynikají zejména stabilitou a minimální latencí. Ty jsou s výhodou pak využity například jak pro interaktivní přenosy s vysokým rozlišením 4K a 8K, včetně stereoskopických, distribuované koncerty, unikátní operace. Využívají je také metrologické a senzorické aplikace dalekého dosahu.



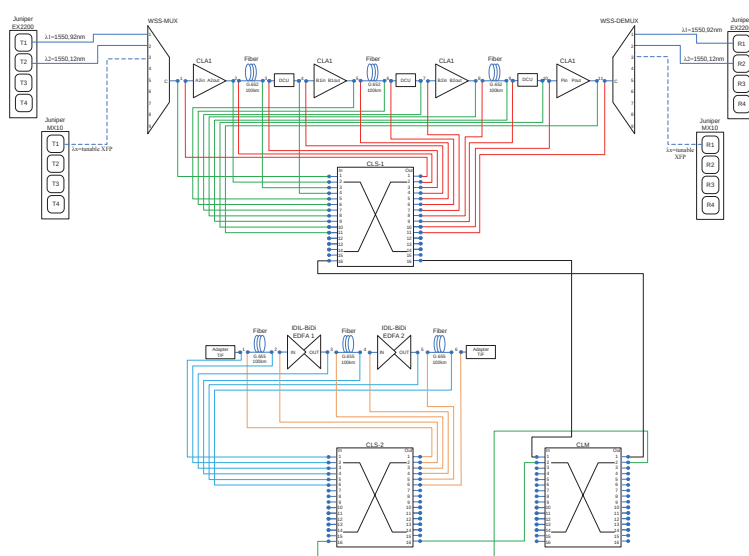
Budovaná infrastruktura pro přenos a distribuci přesného času a stabilní frekvence poskytuje přenosové trasy o souhrnné délce cca 1700 km, z nichž v současné době je více než 900 km v provozu. Při přenosu přesného času je dosahována stabilita řádu 10 ps (TDEV).



Nové aplikace s výhodou testujeme v testovacím prostředí **Testbedu**, kde se počítá s možným nepředvídatelným chováním optických prvků, zařízení a ostatních využitých technologií. Velkou výhodou tohoto prostředí je, že případný kolaps experimentu nebo testovaného systému nezpůsobí žádné škody. Prezentovaný Testbed je mimo jiné inspirován v mezinárodním měřítku například testbedy Aurora a Aurora 2 v síti Janet (UK), 100G SDN Testbed v síti ESnet (USA), Geni (USA), GÉANT Testbed Service a mnohé další.

Prezentovaný Testbed má více částí, první „dlouhodobosahová“ se skládá z celkem 3000 km vláken. Útlum je kompenzován celkem 30 zesilovači EDFA. Druhá dynamická část umožňuje

sdílení zdrojů jakožto optických vláken, de/mux, zesilovačů, optických přepínačů a dalších optických zařízení na fotonické vrstvě. Představuje flexibilní, snadno a rychle rekonfigurovatelnou reálnou optickou infrastrukturu, která poskytuje služby uživatelům a experimentátorům. Dynamický fotonický testbed je vytvořen z dvou nezávislých tras různých typů vláken: G.652 @ 300 km včetně kompenzátorů disperze určené pro přenos dat a G.655 @ 300 km určené pro testování přenosu přesného času a stabilní frekvence. Pro účely strojového rozvrhování byl vytvořen všeobecný popis fyzických komponent pomocí pseudokódu. Mezi nejdůležitějšími prvky, které umožňují dynamiku tohoto testbedu jsou CLS Czech Light optický přepínač, který slouží jako centrální bod pro připojení nebo odpojení optických komponent (de/mux, optických vláken, zesilovačů a kompenzátorů) a CLM Czech Light optický multicastový přepínač, který slouží jako „univerzální monitorovací port“ pro duplikaci optický signálů a připojení měřicí techniky. Celá rodina DWDM zařízení Czech Light zařízení je průběžně vylepšována.



V polovině roku 2016 jsme také vybudovali dva distribuované uzly OpenFlow infrastruktury v Praze a Brně. Pražský uzel je propojen do uzlu GÉANT Testbed Service GTS. V současné době je možné vytvářet okruhy a virtuální stroje WM, přičemž OpenFlow prostředky se připravují a dále probíhá testování vyvíjeného Multi-Domain protokolu v řídicím softwaru. Cílem je, aby si uživatel mohl rezervovat přímo i prostředky z panevropské infrastruktury GÉANT popřípadě i jiné infrastruktury.

Oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Náročné přenosy na kapacitu, stabilitu, opakovatelnost
 - o Přenosy přesného času a stabilní frekvence
 - o Další metrologické přenosy
 - o Quantum Key Distribution
 - o Distributed/Remote Sensing
 - o 4/8K interaktivní video
 - o Vzdálené ovládání unikátních přístrojů
 - o Atd.
- Dynamické optické přepínání a směrování (SDN) těchto přenosů
- Vytvoření fotonického frameworku pro koncepci vícevrstvého prostředí
- Stabilní a úzkopásmové lasery
- Optické hřebeny
- Čistě optické konverze a regenerace
- Mnohé další, zejména z vláknové optiky

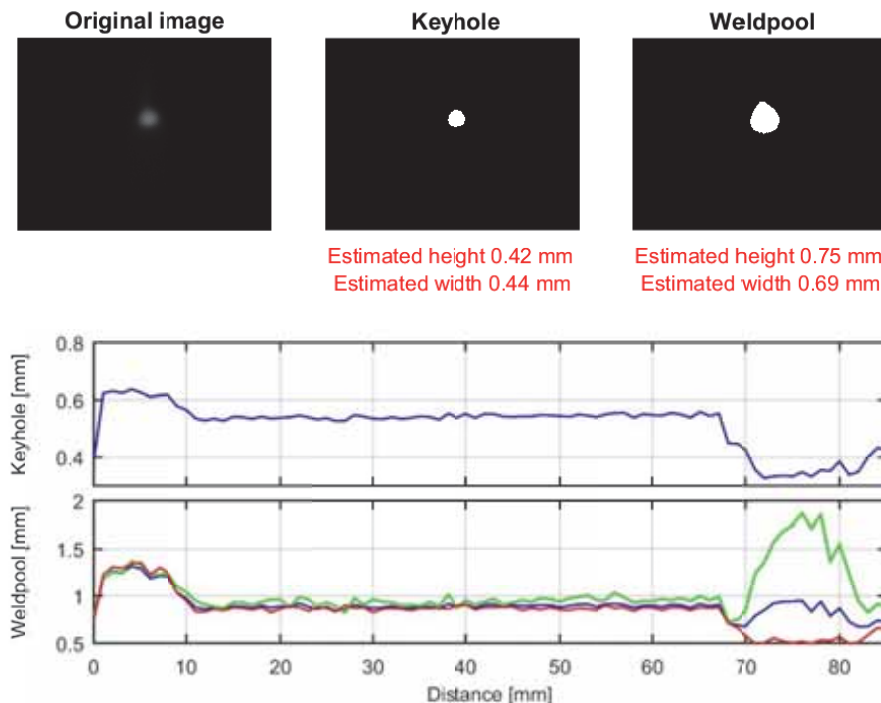
MOŽNOSTI MONITOROVÁNÍ LASEROVÉHO SVAŘOVACÍHO PROCESU

Petr Horník, Libor Mrňa

Ústav přístrojové techniky AV ČR v. v. i
Královopolská 147, 612 64 Brno – Královo Pole
hornik@isibrno.cz.

Obor: laserové svařování, laserové řezání

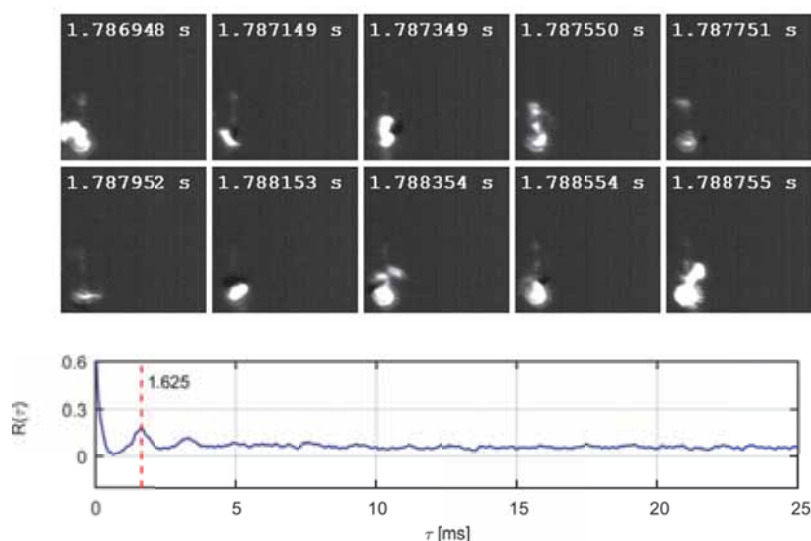
Laserové svařování je rozšířenou nekonvenční metodou svařování. S rostoucími nároky na kvalitu svarů je samozřejmostí využití strojního vedení a s tím souvisí také potřeba monitorování svařovacího procesu. O výsledné kvalitě svaru (geometrie svaru, pórovitost) rozhoduje z velké části chování keyhole, její přímé pozorování je však velmi komplikované a je nutno použít metody nepřímé. Na ÚPT jsou rozvíjeny optické metody sledování procesu. Nejvíce je rozpracována analýza záření laserem indukovaného obláčku plazmatu tvořícího se v keyhole, kde jsou sledovány změny frekvence plasmových výtrysků, které jsou snímány fotodiodou a následně vyhodnoceny pomocí Fourierovy a autokorelační analýzy. Dalším řešením, svojí konstrukcí vhodné pro průmysl, je využití koaxiální kamery zabudované ve svařovací hlavě, která se používá pro polohování robota do svařované spáry. Její použití k pozorování vstupní části keyhole se přímo nabízí. Pro potlačení vlivu plazmového obláčku byl použit 850 nm long-pass filtr a následně metodami počítačového vidění byly odhadnuty rozměry keyhole a svarové lázně. Tímto způsobem získáme informaci především o šířce svaru a výskytu propalů, nikoliv však o hloubce průvaru a výskytu vnitřních defektů.



Obr. 1. Odhadované rozměry keyhole a svarové lázně v průběhu svařovacího procesu

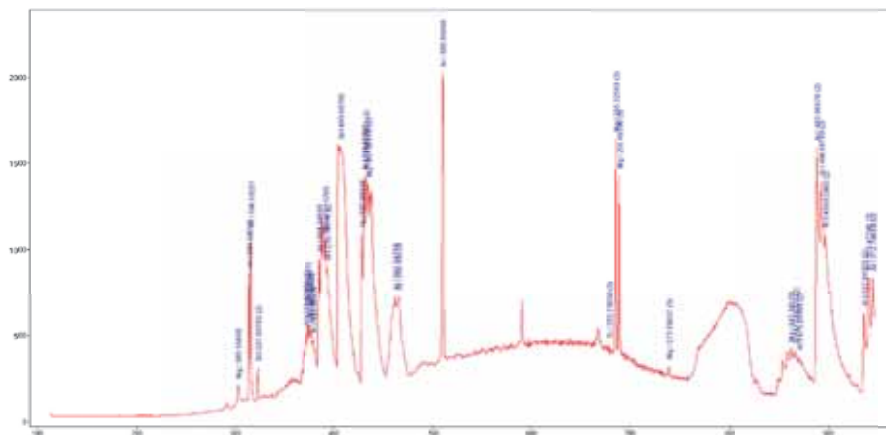
Pro pochopení dynamiky obláčku plazmatu je vhodnější použít boční vysokorychlostní kameru. Na obr. 2 vidíme laserem indukované plazma nad svarovou lázní. Plazma není vždy přítomno na následujících snímcích, což potvrzuje, že vychází z keyhole v jednotlivých výtryscích.

Optickou spektroskopií obláčku pak lze studovat jeho složení a excitaci jednotlivých prvků v materiálu. Ačkoli je znalost emisního spektra cennou informací, prozatím se ji nepodařilo využít ke sledování procesu přímo a spektrum je využíváno k návrhu filtrů pro kameru a fotodiodu.



Obr 2. Záznam plazmových výtrysků z vysokorychlostní kamery a autokorelační funkce s jejich periodou

Svar je proti oxidaci chráněn inertním plynem, většinou argonem, jehož index lomu je velmi podobný vzduchu. I přes to může být jeho proudění zviditelněno pomocí schlierové metody a ověřeno, zda ochranná atmosféra kryje svar dostatečně.



Obr 3. Emisní spektrum plazmatu hliníkové slitiny

Poděkování:

Autoři děkují za podporu MŠMT projekty CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a LO1212 a Technologické agentuře ČR projektem č. TA04020456 - Vývoj nových typů solárních absorberů.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Smluvní výzkum v oblasti laserového svařování a dělení materiálů
- Laserové kalení a popisování
- Diagnostika laserového svařovacího procesu

REFERENCE OPTICKÝCH KMITOČTŮ

Jan Hrabina

ÚPT AV ČR, v.v.i.

Královopolská 147, 61264 Brno, email: hrabina@isibrno.cz, tel. +420 541 514 127

Obor: laserové standardy, laserová spektroskopie

Reference optických kmitočtů založené na absorpčních kyvetách plněných absorpčními plyny představují účinný a nepostradatelný nástroj k realizaci a frekvenční stabilizaci laserových standardů. Jedním z nejčastěji používaných absorpčních médií je molekulární jód $^{127}\text{I}_2$, který nabízí velmi bohatý atlas frekvenčně úzkých a zároveň dostatečně silných absorpčních přechodů pokrývajících celý vlnový rozsah viditelné části optického spektra. Reference optických kmitočtů jsou nejčastěji realizovány ve formě skleněných trubic – absorpčních kyvet, v poslední době se pak rozšiřuje trend plnění absorpčních plynů do dutých fotonických optických vláken typu HC-PCF (Hollow-core photonics crystal fibers). Tyto vláknové reference dovolují dosáhnout podstatně delších interačních délek laserového světla s absorbérem, redukuje rozměry a hmotnost reference a přináší i větší uživatelský komfort (instalace reference pouhým připojením optického konektoru do optické sestavy). Hlavním problémem použití molekulárního jodu jako absorpčního média je jeho extrémní citlivost na přítomnost příměsí – ty způsobují deformaci absorpčních spekter, spektrální rozšiřování absorpčních čar a tím i snižování maximální dosažitelné frekvenční stability realizovaného laserového standardu. Kvalitu a chemickou čistotu referencí je proto nutno pečlivě sledovat a kontrolovat. Optomechanický design a kvalita referencí mohou být značně rozlišné, účinné testování kyvet tak obvykle musí zahrnovat použití více měřicích metod najednou.

Tradiční metodou ověřování kvality jodových kyvet je měření úrovně laserem indukované fluorescence v závislosti na tlaku jodových par a vyhodnocení výsledků pomocí Sternovy-Volmerovy formule. Metoda je založena na relaxačním efektu tzv. srážkového zhášení, kdy je doba života excitovaných jodových molekul zkracována srážkami a následnými nezářivými přechody mezi molekulami jodu a atomy a molekulami nečistot. Nevýhodou metody je její nízká citlivost (zvláště pro kyvety s vysokou kvalitou), nutnost použití málo rozšířeného argon-iontového laseru s vlnovou délkou 502 nm (vybraný přechod s nejlepší citlivostí na srážkové zhášení) a nutnost použití vysokocitlivých fotonásobičů pro detekci fluorescence (riziko nežádoucí detekce rozptýleného světla na pozadí).

Kvalitu jodových referencí je možno detekovat i měřením absolutních frekvenčních posuvů laserových standardů. Přítomnost nečistot v absorpčním médiu způsobuje nežádoucí změny absorpčních spekter od teoretických hodnot. Nevýhodami této metody jsou: relativně vysoká přístrojová náročnost, složitá justáž experimentální sestavy, nízká citlivost a nutnost kontroly jen obtížně ovlivnitelných parametrů.

K odstranění výše uvedených nedostatků tradičních metod pro měření kvality jodových absorpčních kyvet a HC-PCF referencí jsme navrhli techniku měření šířky hyperjemných spektrálních čar. Ta je založena na efektu spektrálního rozšíření absorpční čáry v přítomnosti nečistot. Metoda využívá přesné skenování hyperjemného spektra měřené reference pomocí digitálně řízeného akusto-optického modulátoru a metody saturevané absorpční spektroskopie s detekcí na 3. harmonické (tzv. 3f technika) a následné zpracování zaznamenaného spektra inverzním 3f algoritmem. Měření probíhá opakovaně pro různé intenzity budícího záření, tlaky jodových par a hloubku modulace laseru a z naměřených dat je tedy pak možno

dopočítat Lorenzovský profil absorpčního přechodu. Hlavní výhodou této metody je její výborné citlivost na přítomnost i malých koncentrací nečistot v absorpčním médiu, dobrá reprodukovatelnost, a v neposlední řadě i možnost jejího využití v technologii referencí optických kmitočtů na bázi fotonických vláken. Zde pak slouží nejen k měření čistoty absorpčního média, ale ukazuje i na celkové spektrální vlastnosti reference. Ze zaznamenaného hyperjemného profilu spektra lze skrze výpočet poměru signál/šum přímo usuzovat na předpokládanou dosažitelnou frekvenční stabilitu laserového standardu. Srovnání měřicích metod je shrnuto v tabulce Tab.1:

	Metoda laserem indukované fluorescence	Měření spektrálních šířek absorpčních přechodů	Měření absolutních frekvenčních posuvů
Výhody	Jednoduchý experimentální setup, rychlé měření	Velmi vysoká citlivost, možnost využití stávající sestavy laserového standardu	Možnost využití stávající sestavy laserového standardu
Nevýhody	Raritní vlnová délka (502 nm), nízká citlivost v případě kvalitních kyvet, nemožnost měření HC-PCF referencí, problémy s rozptýleným světlem (omezení designu měřených kyvet)	Nevhodné k měření vysoce kontaminovaných referencí (degradace poměru signál/šum)	Nevhodné k měření vysoce kontaminovaných referencí (degradace poměru signál/šum), nízká citlivost v případě vysoce čistých referencí, ovlivnění těžko kontrolovatelnými parametry, potřebuje referenční zdroj optického kmitočtu s absolutní přesností, nevhodné k měření HC-PCF referencí
Doporučeno k testování	Středně až silně kontaminované reference	Reference vysoké až střední kvality, optovláknové reference na bázi HC-PCF	Reference průměrné kvality

Srovnáním parametrů a vlastností jmenovaných metod vyplývá, že k pokrytí celé škály designů a kvality referencí optických kmitočtů plněných molekulárním jodem lze využít kombinace metod měření šířek spektrálních čar a měření laserem indukované fluorescence.

Poděkování

Realizovaný výzkum byl podpořen grantem GAČR: GA15-18430S. Infrastruktura výzkumu byla podpořena projekty MŠMT: LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a AV ČR: RVO:68081731.

DVOJICE FÁZOVĚ SYNCHRONIZOVANÝCH POLOVODIČOVÝCH LASERŮ PRO DÉLKOVOU METROLOGII

Václav Hucl, Miroslava Holá, Martin Čížek, Šimon Řeřucha,
Tuan Minh Pham, Lenka Pravdová, Josef Lazar a Ondřej Číp

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., oddělení koherenční optiky

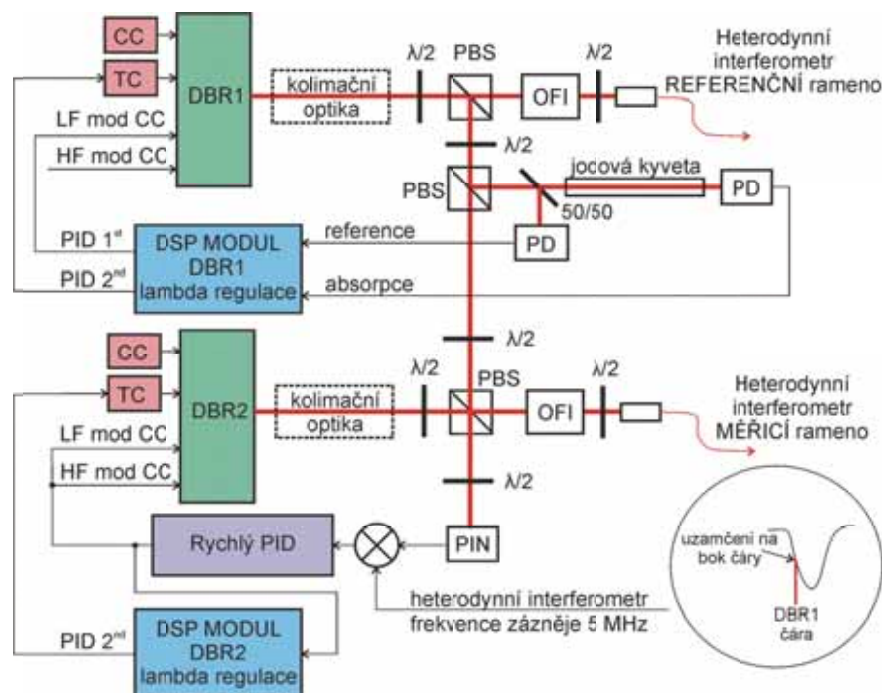
Královopolská 147, Brno, 612 64

+420 541 514 529

treak@isibrno.cz

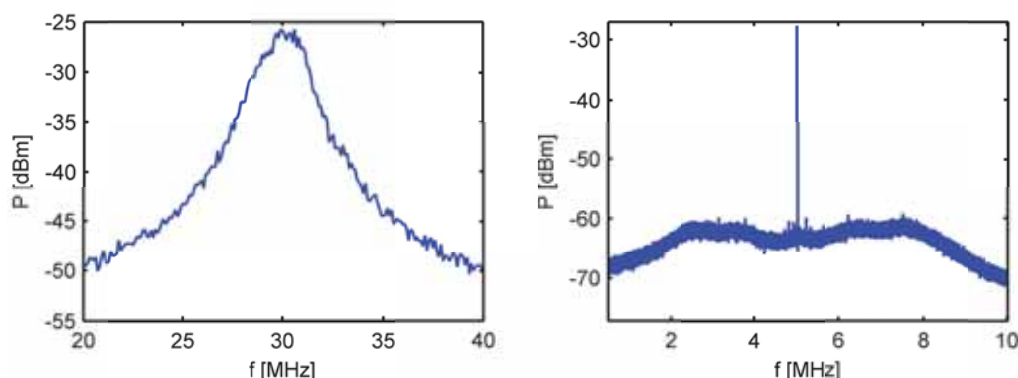
Obor: Interferometrie, analogová a digitální elektronika, zpracování RF signálů

Polovodičové lasery nacházejí stále širší uplatnění v oblastech, kde dominují prozatím plynové He-Ne lasery. Jednou z takových oblastí je i délková metrologie, kde He-Ne laser pracující na vlnové délce 633 nm je stále tradičním zdrojem koherentního světla pro laserový interferometr odměřující vzdálenost. Díky dostupnosti pokročilých polovodičových struktur se však nyní daří vyvíjet laserové diody, které pracují v jednofrekvenčním režimu, avšak oproti He-Ne laserům mají řádově větší optický výkon a výrazně širší rozsah přeladění vlnové délky bez modových přeskoků. Další výhodou je frekvenční modulace vlnové délky laserové diody přímou změnou hodnoty injekčního proudu. Zmíněné výhody předurčují takové laserové diody pro realizaci dvoufrekvenčních laserových zdrojů pro tzv. heterodynní interferometrii [1]. V tomto případě je optická frekvence jedné laserové diody fázově zavěšena na optickou frekvenci laserové diody druhé a zároveň jsou optické frekvence obou laserů vzájemně odladěny o požadovanou hodnotu, např. v řádu MHz. V našem příspěvku představujeme využití laserových diod s vnitřní strukturou s Braggovskou mřížkou pro realizaci dvoufrekvenčního laserového zdroje, který je určen pro délkovou laserovou interferometrii s heterodynní detekcí. Jádrem zdroje je dvojice jednofrekvenčních laserových diod EYP-DBR-0633 firmy EagleYard, SRN [2] a jejich zapojení v optické a elektronické soustavě je vyobrazeno na Obr.1.



Obr. 1: Schéma sestavy se dvěma polovodičovými lasery. CC – proudový kontroler; TC – teplotní kontroler; PBS – polarizovaný dělič paprsku; PD – fotodetektor; PID – PID regulátor; OFI – optický izolátor; PIN – rychlý fotodetektor; $\lambda/2$ – $\lambda/2$ deska; LF mod CC – nízkofrekvenční modulace proudu diodou; HF mod CC – vysokofrekvenční modulace proudu diodou; DBR – polovodičová laserová dioda (Distributed Bragg Reflector)

Každá z laserových diod je vybavena kontrolérem pro stabilizaci teploty a kontrolérem injekčního proudu polovodičového čipu diody. První dioda DBR1 má optickou frekvenci zachycenu na vybranou absorpční čáru molekulárního jódu metodou uzamčení na bok absorpční čáry. Změny optické frekvence a odchylky způsobené frekvenčním šumem diody DBR1, jsou tak detekovány změnou míry absorpce procházejícího záření přes absorpční kyvetu a dopadající na detektor PD. Výstupní signál z detektoru je následně zpracován signálovým procesorem obsahujícím algoritmus PID regulace. Vyšší frekvenční spektrální složky šumu diody DBR1 se potlačují pomocí změny injekčního proudu, pomalé fluktuační změny teploty diody regulátorem druhého řádu. Díky této metodě stabilizace optické frekvence diody DBR1 navíc dochází k zúžení její šířky spektrální čáry z 1,8 MHz na 1,4 MHz. Optická frekvence diody DBR2 je fázově zavěšena na optickou frekvenci diody DBR1 s frekvenčním odstupem 5 MHz. Laserové svazky obou diod jsou opticky směřovány pomocí detektoru PIN a výsledná záznamová frekvence je dále elektricky směřována s požadovanou frekvencí odstupu (zázněje) heterodynního interferometru. Signál fázové odchylky je z výstupu směšovače přiveden na rychlý analogový PID regulátor s šířkou pásma v řádu desítek MHz. Výstup PID regulátoru následně provádí rychlé změny injekčního proudu diodou. Pro pomalé změny je opět zaveden druhý řád regulace pomocí změny teploty diody DBR2. Tímto způsobem dochází kromě frekvenční stabilizace diody DBR2 také k potlačení její šířky spektrální čáry. Část intenzity laserových svazků obou laserových diod je po průchodech optickými izolátory kolimována do optických vláken vedoucích do vlastního heterodynního interferometru.



Obr. 2: Příklad záznamového signálu mezi laserovými diodami DBR1 a DBR2: bez fázového závěsu (vlevo), s fázovým závěsem optické frekvence diody DBR2 na diodu DBR1 s frekvenčním odstupem 5 MHz (vpravo).

Celková sestava dle Obr. 1 byla zrealizována a i v rámci mezinárodní spolupráce otestována na heterodynním interferometru v PTB Braunschweig, SRN, který slouží jako nejpřesnější délkový odměřovací systém (nanokomparátor), určený pro kalibrace stupnic délkových měřidel v SRN [3, 4].

Literatura:

- [1] Bobroff N 1993 Recent advances in displacement measuring interferometry Meas. Sci. Technol. 4 907-926.
- [2] Firemní literatura EagleYards, <http://www.eagleyard.com/>
- [3] Weichert Ch, Köchert P, Köning R, Flügge J, Andreas B, Kuetgens U, Yacoot A 2012 A heterodyne interferometer with periodic nonlinearities smaller than ± 10 pm Meas. Sci. Technol. 23 094005 (7pp).
- [4] Köchert P, Flügge J, Weichert Ch, Köning R, Manske E 2012 Phase measurement of various commercial heterodyne He–Ne-laser interferometers with stability in the picometer regime Meas. Sci. Technol. 23 074005 (6pp).

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

Návrh a konstrukce elektroniky pro zpracování signálů, programování mikrokontrolérů a signálových procesorů, přesné měření délek pomocí laserů

Poděkování

Tento metodologický výzkum je podporován Grantovou agenturou ČR, projekt č. GB14-36681G. Výzkumná infrastruktura byla podpořena s přispěním Evropské komise a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, projekty č. LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a dále Akademií věd České republiky, projektem RVO:68081731

VYSOKOFREKVENČNÍ REZONÁTOR PRO NAPÁJENÍ IONTOVÉ PASTI

Petr Jedlička, Tuan Minh Pham, Martin Čížek, Jan Pavelka, Adam Lešundák, Václav Hucl, Jan Hrabina, Šimon Řeřucha, Josef Lazar a Ondřej Číp

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Oddělení koherenční optiky
Královopolská 147, Brno, 612 64, +420 541 514 254, jedla@isibrno.cz

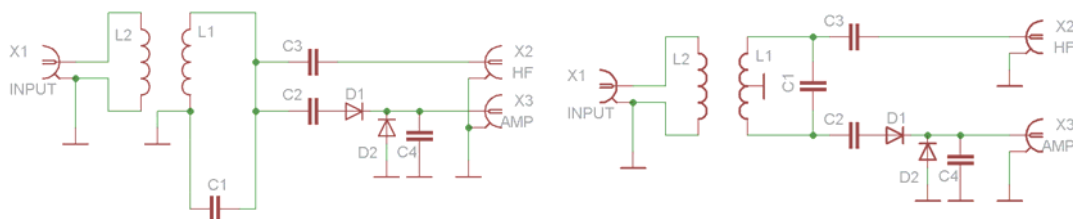
Lukáš Slodička, Petr Obšil a Radim Filip

Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra optiky
17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc

Obor: Vysokofrekvenční technika, laserová spektroskopie, laserové chlazení atomů, metrologie

Iontová past je klíčovou částí tzv. optických atomových hodin. Umožňuje zachytit jediný iont, pomocí laserových svazků jej zchladit a následně přivést do excitovaného stavu. Takový iont pak lze použít pro stabilizaci vysoce koherentních laserů a touto technikou lze dosáhnout stability až 10^{-16} . Zachycení se děje kombinací elektrostatické (Pauliho) pasti a pasti laserové.

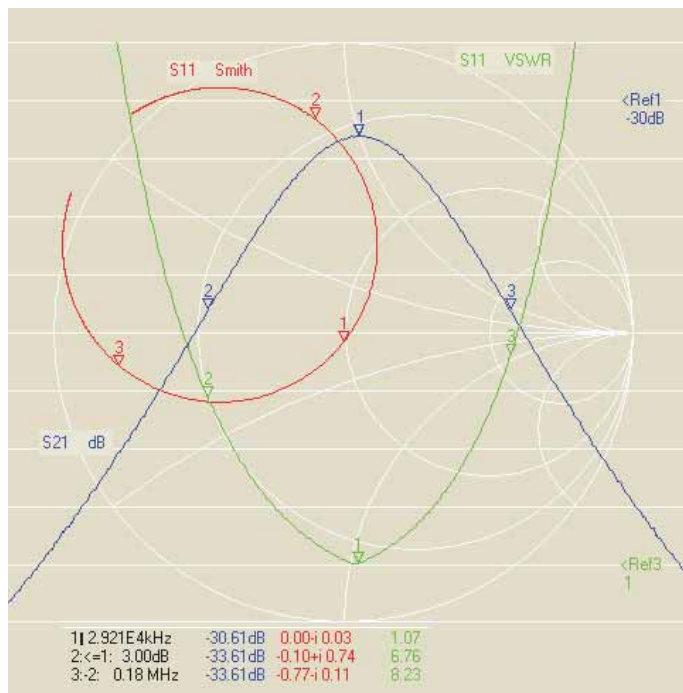
Pauliho past je tvořena čtyřmi lineárními elektrodami, na kterých je napětí v řádu až stovek voltů a kmitočtu desítek MHz. Reaktance pasti je výrazně kapacitní a tato kapacita je natolik velká, že je nezbytné ji kompenzovat pomocí indukčnosti. Ta pak spolu s vazební indukčností slouží současně jako transformátor impedance. Vznikne paralelní rezonanční obvod tvořený indukčností rezonátoru a kapacitou pasti. Vysoký činitel jakosti tohoto rezonančního obvodu umožňuje dosáhnout velkého napětí na kapacitě při relativně malém napájecím výkonu a současně dochází k filtraci signálu, pokud by došlo k jeho zkreslení výkonovými zesilovači. Pro naše potřeby jsme navrhli a otestovali rezonátor se spirálovou cívkou ve dvou variantách – nesymetrický a symetrický. Energie je v obou případech dodávána pomocí vazební cívky. Velikost vazby je plynule stavitelná změnou její vzdálenosti od rezonanční cívky.



Obr. 1: Elektrické schéma nesymetrické (vlevo) i symetrické (vpravo) verze rezonátoru. C1 představuje kapacitu pasti, L1 je rezonanční indukčnost, L2 vazební indukčnost. C3 a C3 jsou vazební kapacity tvořené elektrodou v blízkosti „živého“ konce rezonátoru.

Sestavu rezonátoru jsme doplnili výstupy pro monitoring vysokofrekvenčního napětí na pasti, což umožňuje rezonátor přesně naladit, měřit jeho parametry a za provozu monitorovat dosažené napětí na elektrodách. Jeden z nich je přímý výstup, druhý je doplněn diodovým detektorem. Oba jsou na rezonanční obvod vázány přes velmi malé kapacity a rezonátor tak není negativně ovlivňován. Obě verze rezonátoru byly sestaveny, naladěny a změřeny na mechanicky kompletně sestavené pasti. Hlavní parametry jsou u obou verzí podobné.

Pomocí změny počtu závitů vazební cívky a velikosti vazby je možno dosáhnout prakticky ideálního přizpůsobení (lepší než 1:1,1). Činitel jakosti se pohyboval v rozsahu 200 až 400. Symetrická verze se vyznačovala menším parazitním vyzařováním na pracovním kmitočtu.



Obr. 2: Naměřené parametry rezonátoru (vlevo) a fotografie mechanického provedení při sejmutém stínícím krytu (vpravo).

Z důvodu porovnání s předchozími výsledky byla zvolena pro první etapu provozu systému verze nesymetrická. V praktickém provozu se rezonátor ukázal jako stabilní a bezproblémový, což je třeba přičíst stabilní mechanické konstrukci. Porovnání obou variant je jedním z plánovaných měření do budoucna.

Literatura:

- [1] J.D.Siverns, L.R. Simkins, : On the application of radio frequency voltages to ion traps via helical resonators. Appl Phys B (2012)

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:
Spektroskopie vysokého rozlišení

Poděkování

Tento metodologický výzkum je podporován Grantovou agenturou ČR, projekt č. GB14-36681G. Výzkumná infrastruktura byla podpořena s přispěním Evropské komise a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, projekty č. LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a dále Akademií věd České republiky, projektem RVO:68081731

OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY A SVAŘOVÁNÍ OPTICKÝCH VLÁKEN

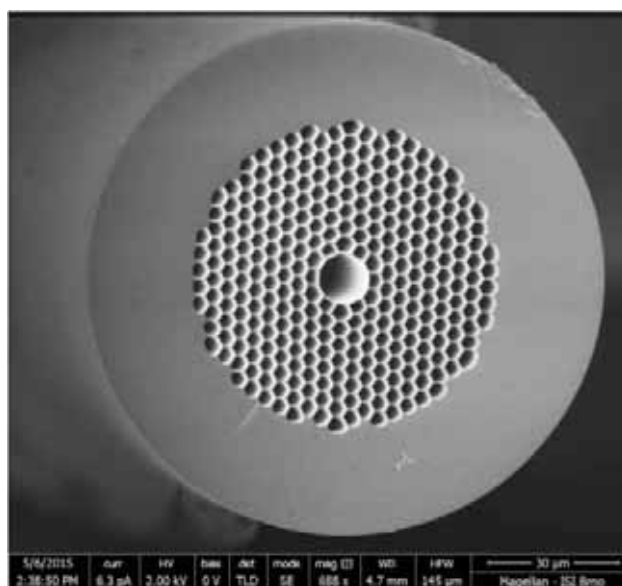
Michal Jelínek a Břetislav Mikel

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i. Královopolská 147, 612 64 Brno, Česká Republika. Tel.: +420 541 514 342, email: jelinmi@isibrno.cz.

Obor: optické vláknové senzory, vláknové svařování.

Optické vláknové senzory se v posledních 20 letech začaly velmi rozšiřovat. Mezi nejužívanější optické senzory patří v současnosti senzory s Braggovou mřížkou. Jejich užití je v mnoha oblastech průmyslu od telekomunikačního, automobilového, leteckého až po jaderné elektrárny.

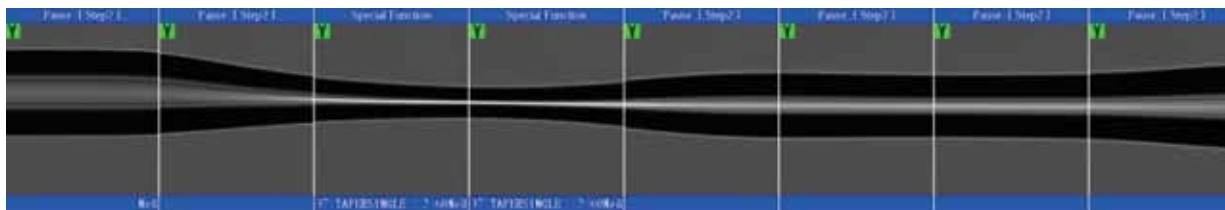
V oddělení Koherenční optiky ÚPT AV ČR v. v. i. ve spolupráci s firmou NETWORK GROUP s. r. o. byly vyvinuty vláknové optické senzory s Braggovou mřížkou pro měření délkové roztažnosti, teploty, vibrací [1] a tvarových změn. Vláknové Braggovy mřížky jsme aplikovali na kontrolní měření roztažnosti kontejnmentu JE Temelín v rámci projektu VG20132015124 Nová metoda měření odezvy konstrukce ochranné obálky pro zajištění bezpečnosti JE i v případě těžkých havárií [2], [3].



Obrázek 1: Mikrostrukturní optické vlákno HC 1550.

Další pokračování výzkumu optických vláknových senzorů je směřováno k senzorům se speciálními optickými vlákny např. PM vlákny a mikrostrukturními vlákny s pevným nebo dutým jádrem. Fotografie mikrostrukturního vlákna HC 1550 s dutým jádrem z elektronového mikroskopu je na obrázku 1. Tyto senzory umožňují měřit koncentraci nebo čistotu kapalin a plynů. Implementací vláknových Braggových mřížek do mikrostrukturních vláken lze oblast měření senzoru zpřesnit a dále rozšířit o měření změn délky, teploty, vibrací atd.

S oblastí senzorové techniky také souvisí svařování optických vláken. Na pracovišti ÚPT používáme optický svařovací automat Fujikura FSM 100P fusion splicer. V rámci posledních let jsme navrhli speciální programy pro tuto optickou svářečku a jsme schopni realizovat sváry SM vláken, SM vláken s PM vlákny s útlumem spoje pod 0.6 dB a PM vláken[4]. Dále jsme schopni realizovat svár SM vláken s různými průměry. Další oblastí zájmu je tvarování



Obrázek 2: Zúžené (taperované) standardní optické vlákno.

optického vlákna – vytváření dlouhých a krátkých taperů (obrázek č. 2) a tvoření čoček na konci optického vlákna. Novými směry v budoucnosti jsou svařování optických mikrostrukturálních vláken, napojování mikrostrukturálních vláken na SM vlákna a mj. uzavírání mikrostruktur s plynem pro použití v laserové technice a senzorce.

- [1] Helán R., at al.: *"Preparation and measurement of TFBG based vibration sensor"*, Proceedings of SPIE 9450(2015).
- [2] Mikel B., at al.: *"First setup of the optical fiber measuring system to monitoring structure health of nuclear power plant"*, Proceedings of SPIE 9286(2014).
- [3] Jelínek M., *"Design of the method to increasing of accuracy of the tunable optical filter optical spectral measurement"*, Master's thesis, Faculty of electrical engineering and communication department of microelectronics (2016)
- [4] Hlavatý V., *"Splicing of special optical fibers"*, Bachelor's thesis, Faculty of electrical engineering and communication department of microelectronics (2013)

Poděkování

Výzkum v oblasti senzorů je podporován z projektu Technologické agentury ČR TA03010835 a z projektu Grantové agentury České republiky GA15-18430S.

LASER A FYLOTAXE

**Vladimír Kolařík, Miroslav Horáček, Stanislav Krátký, Petr Meluzín,
Jana Chlumská, Milan Matějka, Stanislav Král**

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Královopolská 147, Brno
541 514 525, vladimir.kolarik@isibrno.cz, www.isibrno.cz, ebl.isibrno.cz

Obor: elektronová litografie, fotošablony

Tým elektronové litografie na Ústavu přístrojové techniky se zabývá metodikou vytváření planárních mikro a nano struktur na křemíkových nebo skleněných podložkách. V rámci konference Laser jsme v posledních letech prezentovali výsledky související s laserovou technikou, zejména v těchto oblastech: počítačem generované hologramy [1], fázové masky vyrobené elektronovou litografií a iontovým leptáním pro přípravu vláken s Braggovými mřížkami [2] a amplitudově fázová fotošablona pro formování vortexových svazků [3].

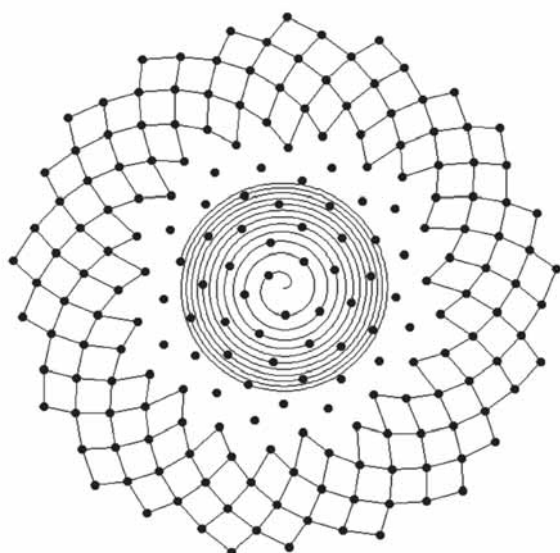
Fylotaxe se zabývá studiem uspořádání částí rostlin (listy na stonku, okvětní lístky v okvěti, uspořádání jader v úboru apod.), viz např. Vogelův model [4]. Zajímavé je využití tohoto modelu (Obr. 1) pro vizuální referenční srovnávání kvality provedení expozice na zapisovači s elektronovým svazkem prezentované v [5], kde bylo popsáno i vytvoření difrakčního obrazce (Obr. 2) fylotaktického modelu. Tento obrazec je pozorovatelný, pokud je síť prvků fylotaktického modelu dostatečně hustá a rozsáhlá.

Při přípravě fylotaktického opticky variabilního zařízení je možné využít trojrozměrného modelu pro určení pozic k optických elementů v cylindrických nebo sférických souřadnicích (například uspořádání na povrchu válce nebo kužele, kulové plochy nebo obecně uživatelsky modifikovaného tělesa) v kombinaci s jádrovým modelem jednotlivých elementů (například optické elementy ve tvaru válce, jehlanu, hranolu apod.). Trojrozměrné uspořádání se promítne do zvolené roviny (obecně odlišné od základních rovin výchozího modelu), ve které je možné oba zmíněné modely dále modifikovat. V posledním kroku se provede realizace planární reliéfní struktury litografickými technikami. Zmíněné uspořádání má řadu zajímavých matematických i fyzikálních vlastností.

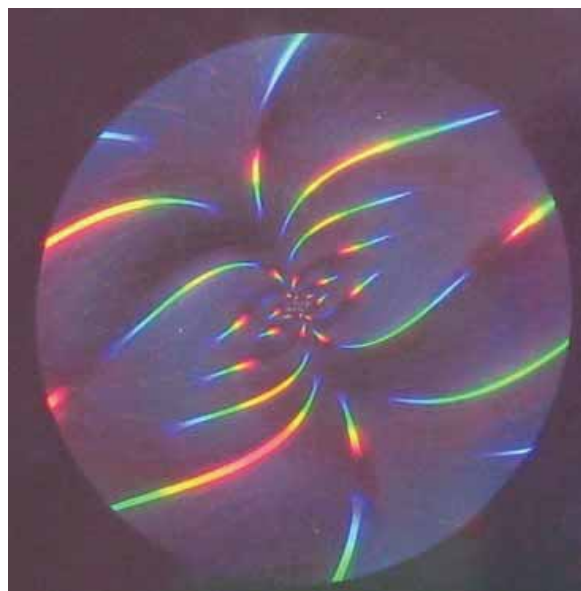
Jedno z výhodných uspořádání, a to vnoření dvou typů modelů odlišné hrubosti, je znázorněno na Obr. 3. Fylotaktické uspořádání by mohlo být dále využito například pro dělič laserového svazku, navázání laserového svazku na speciálně uspořádanou sadu optických vláken nebo využití přibližné soběpodobnosti tohoto modelu při analýze obrazu.

Další oblasti zájmu:

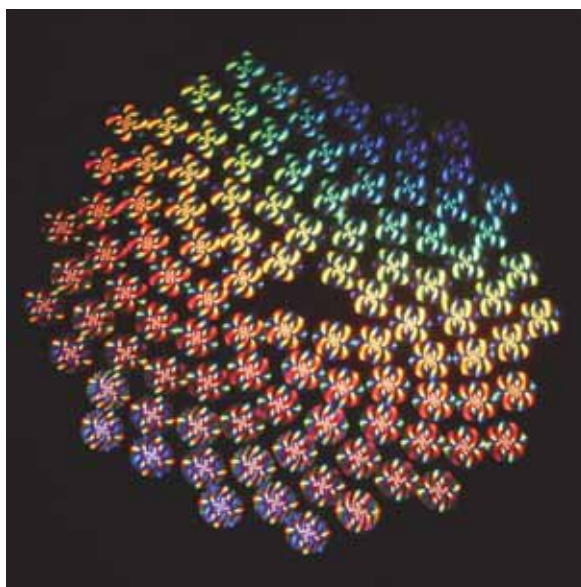
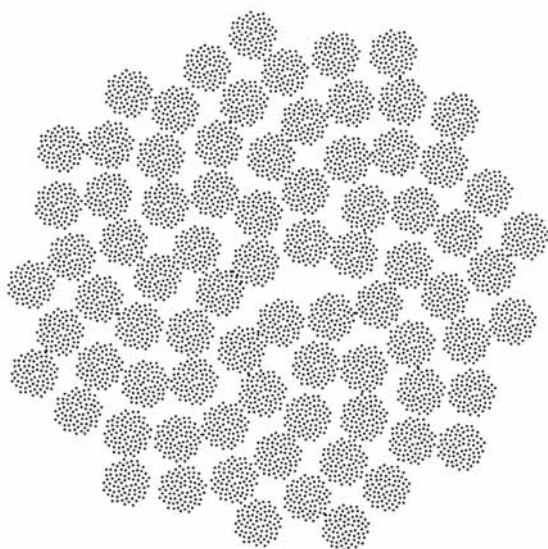
- planární mikro a nano struktury na nitridových membránách; realizace mikro šterbin a tvarovaných clon;
- difrakční fresnelovská optika; planární optické mikrostruktury pro fokusaci světla;
- difrakční opticky variabilní obrazová zařízení; tvarování laserového svazku — počítačem generované hologramy; mikrofluidní systémy; mikrosnímače připravené přímou elektronovou litografií, biosensory;
- fotošablony pro optickou a UV litografii; fotošablony pro přípravu vláken s Braggovými mřížkami; kombinované amplitudově fázové masky, například pro vortexové svazky; speciální fotošablony, například pro seismologii;
- kalibrační vzorky a metrická měřítka pro kontrolu metriky mikroskopů; standardy testů rozlišení pro optickou mikroskopii, například USAF 1951.



Obr.1 Fylotaktický model: pozice jader, základní a odvozené spirály.



Obr. 2 Charakteristický obrazec fylotaktického modelu.



Obr. 3 Hnízdění dvou fylotaktických modelů: schéma (vlevo); implementace (vpravo).

Reference:

- [1] V. Kolařík, M. Matějka. Počítačem generované hologramy – CGH. *Sborník konference LASER52*, 2012, str. 31, ISBN 978–80–87441–08–4.
- [2] S. Krátký *a kol.* Fázové masky vyrobené elektronovou litografií a iontovým leptáním pro přípravu vláken s Braggovými mřížkami. *Sborník konference LASER54*, 2014, str. 31–32, ISBN 978–80–87441–13–8.
- [3] S. Krátký *a kol.* Amplitudově fázová vortexová maska. *Sborník konference LASER55*, 2015, str. 32–33, ISBN 978–80–87441–16–9.
- [4] H. Vogel. A Better Way to Construct the Sunflower Head. *Mathematical Biosciences* 44 (1979), pp. 179–189.
- [5] P. Meluzin *et al.* Some Other Gratings: Benchmarks for Large-Area E-Beam Nanopatterning. *NANOCON 2014: 6th Int'l Conference Proc's*, 2014. pp. 246–251, ISBN 978-80-87294-55-0.

Poděkování:

Práce byla finančně částečně podpořena z těchto zdrojů: projekt ALISI – MŠMT (LO1212) spolu s ES (č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017), projekt AMISPEC – TAČR TE01020233 a institucionální podpora RVO:68081731.

VYUŽITÍ TERMOGRAFIE PŘI APLIKACÍCH R&D

David Kuboš

“TMV SS“ spol. s r. o.
Studánková 395
149 00 Praha 4 – Újezd
+420 272 942 720
david.kubos@tmvss.cz
www.tmvss.cz



Obor: technik specialista termografie

Vědci, vývojáři a pracovníci výzkumných center používají v současné době termografické systémy pro nalezení řešení různých výzev, které jsou ostatními prostředky neřešitelné nebo pro nalezení správného řešení velice obtížné. Každodenním používání infračervené techniky dochází ke zdokonalení výzkumných výsledků a obrovské úspoře drahocenného času potřebného k různým fázím výzkumu.

Univerzitní výzkum, výzkumná a vývojová centra, akademie věd

Biologický výzkum

Termografie je velmi přesná, vyhodnotitelná, bezkontaktní diagnostická metoda využívaná pro vizualizaci a kvantifikaci povrchových teplotních změn. Aplikace zahrnují cévní vyšetřování, stav tkání, posuzování svalového pnutí nebo detekce míst podkožních krvácení.

Studie rychlých pohybů

Infračervené vysokorychlostní zobrazování díky mikrosekundovým expozičním časům detektorů dokážou zastavit zdánlivý pohyb dynamické scény a zachytit snímek mnohonásobně převyšující rychlost 10.000 snímků za sekundu. Takovéto požadavky vyplývají z výzkumných aplikací v oblastech balistiky, supersonických projektilů, výbušnin, procesu spalování, laserů apod.

Infračervená mikroskopie

Termografická kamera v kombinaci s mikroskopem se stává teplotním zobrazovacím mikroskopem se schopností přesného teplotního měření objektů velikosti až 3μm. Vývojoví pracovníci využívají termografický mikroskop pro bezkontaktní výzkum teplotních projevů komponentů a polovodičů.

Analýza jevů širokých teplotních rozsahů

Měření teploty plasmy vyžaduje disponovat kamerou umožňující tzv. rolující integrační čas a dynamické rozšíření rozsahu v reálném čase. Jde tedy o možnosti zachycení teplotních jevů od nízkých po extrémně vysoké teploty.

Testování materiálů, NDT

Únavové zkoušky

TSA – Thermal Stress Analyzing jsou velice častými metodami při výzkumu materiálů, avšak poskytují limitované informace komplexních struktur materiálů. TSM – Thermal Stress Mapping poskytují zároveň tisíce informací únavových měření, dokonce i na geometricky

složitých komponentech. Ve srovnání s tenzometry poskytuje tento přístup mnohem rychlejší a ucelenější informace.

Testování kompozitů

Infračervená NDT může detekovat interní defekty vzorku díky externí excitaci a následnému pozorování teplotních změn na povrchu. Jde o cenný nástroj pro detekci dutin, delaminace nebo obsahu vody v kompozitním materiálu.

Měření fotovoltaických panelů

Solární panely mohou vykazovat defekty vedoucí k elektrickému zkratu. Po zatížení FV panelu je možné tyto defekty lokalizovat metodou Lock-in termografie. Provedena může být Lock-in fotoluminiscence kamerami NIR – near-infrared.

Detekce prasklin

Lock-in termografie částí náchylných k prasknutí se provádí pořizováním termogramů termokamerou synchronizovanou s frekvencí ultrasonické energie vstupující do měřeného objektu (ultrazvuková termografie). Tření na povrchů ploch prasklin vytváří teplo v místech jemných prasklin a zlomenin, které je možné zobrazit bez nutnosti aplikace barviv či penetrantů. Tato forma NDT umožňuje inspekci rozlehlých nebo komplexních částí objektů bez UV záření.

Měření mostů

I zde se využívá NDT multisenzorová metoda identifikující zhoršující se betonové oblasti a následně vypočítávající kvantitativní index, který určuje stupeň zhoršení každého rozpětí/pruhu mostu. Tato metoda napomáhá lépe predikovat vývoj poškozování mostního povrchu a odhadnout potřeby a náklady na opravu.

Měření elektronických komponentů a DPS

Testování elektronických komponentů a DPS termografickými kamerami je běžnou metodou zobrazování a identifikování anomálií velikosti bodů až 3.5μm. Díky vysokému rozlišení velikosti bodů několika mikronů je možné snížit čas testování a zdokonalit design během vývojového cyklu produktu.

Průmyslové R&D

Automobilový průmysl

Automobilový průmysl je rychle rostoucí odvětví, kde je cílem vyrábět účinnější, bezpečnější, spolehlivější a vysoce výkonné automobily. Termografické systémy napomáhají zdokonalovat design air-bag systémů, zlepšovat účinnosti vytápění a chlazení, kvantifikovat teplotní poměry pneumatik a brzdových systémů, provádět kontrolu kvality spojů a svárů apod.

Laboratorní testy v průmyslu

Klíčovým faktorem úspěchu je přinášet na trh nové produkty co nejrychleji. Nejvýhodnější je využívat termografii v rané fázi designového cyklu, při verifikaci teplotních modelů, analýze únavových zkoušek produktu atd.

OD GENERÁCIE PRELADITEĽNÉHO THZ ŽIARENIA K THZ-FWM V PEVNÝCH LÁTKKACH

Dušan Lorenc¹, Martin Koyš¹, Eva Noskovičová², Tadas Balčiūnas³, Stefan Haessler⁴ a Dušan Velič^{1,2}

¹International Laser Centre, Bratislava, www.ilc.sk, lorenc@ilc.sk, Slovakia

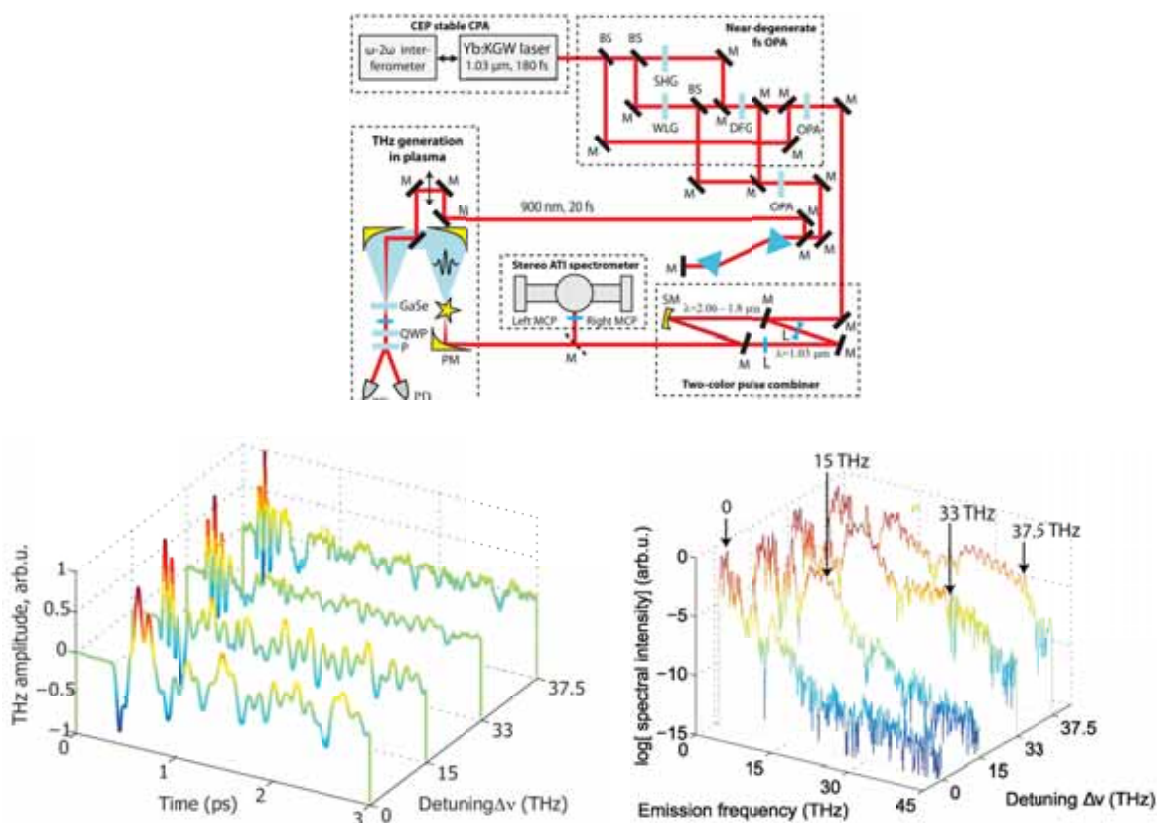
²Department of Physical and Theoretical Chemistry, Comenius University, Bratislava, Slovakia

³Photonics Institute, Vienna University of Technology, Vienna, Austria

⁴Laboratoire d'Optique Appliquée, ENSTA-Paristech – Ecole Polytechnique – CNRS – Université Paris-Saclay,

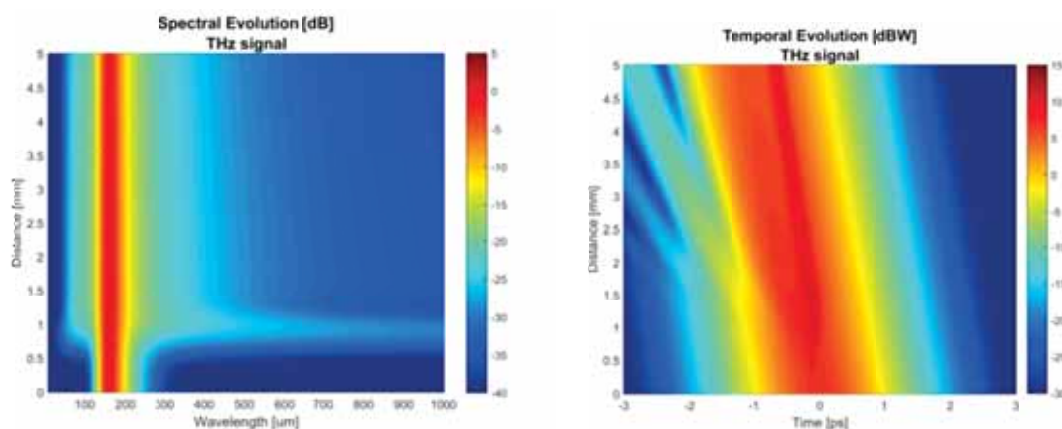
Obor: Generácia THz žiarenia

Bola demonštrovaná preladiateľná emisia THz žiarenia v plazme generovanej poľom syntetizovaným viacfrekvenčným CEP stabilizovaným optický parametrický zosilňovačom [1]. Použitím frekvencií, ktoré nie sú násobkom fundamentálnej frekvencie je možné THz emisiu plynule preladiť až do strednej IČ oblasti. Z plne kvantovomechanického priblíženia, ktoré kvantifikuje ionizáciu utrátkym poľom s časovou dĺžkou menšou ako jedna perióda nasledovanú prechodmi elektrónov kontinuum-kontinuum bol odvodený semiklasický model na báze prechodných prúdov v plazme.



Obr. 1 Použitá experimentálna zostava pre generáciu preladiateľného THz žiarenia (stred), časový priebeh THz poľa (vľavo) pre rozdielne rozladienie $\lambda_s = 2.06, 1.96, 1.84, 1.80 \mu\text{m}$ (pri $\lambda_p = 1.03 \mu\text{m}$) a zodpovedajúce spektrálne priebehy (vpravo).

Zvyšná časť prednášky bude venovaná prvotným krokom na ceste k tuholátkovému zdroju THz žiarenia na báze FWM. Numericky bola študovaná sústava zovšeobecnených Schrödingerových rovníc v disperznom $\chi(3)$ prostredí a bolo pozorované širokopásmové THz zosilnenie.



Obr. 2 Simulované zosilnenie vstupného THz impulzu v polyméri TOPAS pre prípad $\lambda_p = 0.8 \mu\text{m}$: spektrálny (vľavo) a časový (vpravo) priebeh THz poľa pri šírení čerpacích vln prostredím.

This research is sponsored by NATO's Emerging Security Challenges Division in the framework of the Science for Peace and Security Programme.

1. T. Balčiūnas et. al., *Opt. Express* **23**, 15278 (2015).

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Časovo rozlíšená femtosekundová spektroskopia v strednej IČ oblasti
- Generácia THz v exotických materiáloch
- THz pump-probe
- Laserová ionizácia/postionizácia
- 2- a 3- fotónovej absorpcia a hyperpolarizovateľnosť
- Femtosekundový Kerrov index lomu

MĚŘENÍ TEPLOT V NANOSEKUNDÁCH PŘI PŮSOBNÍ LASERU NA MATERIÁL

Jiří Martan, Martin Kučera

Nové technologie - výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň.

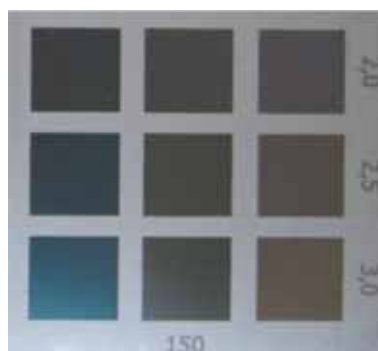
Tel.: +420 377 634 718, E-mail: jmartan@ntc.zcu.cz, www: <http://ntp.zcu.cz/>

Obor: Laserové zpracování materiálu, měření rychlých dějů

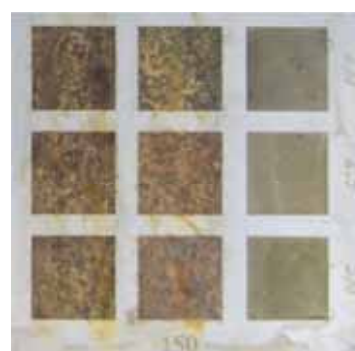
Laserové značení je technologie intenzivně používaná v průmyslu. Stále se však vyskytnou kombinace materiálů a požadavků, kde je potřeba zkoumat samotný proces značení. Například pasivační vrstva korozivzdorné oceli může být snadno narušena laserovým zpracováním a při dlouhodobém používání označeného dílu může nastat problém s malou korozní odolností jinak korozivzdorného materiálu. Z toho důvodu byla provedena studie teplot dosažených při použití různých parametrů laserového značení a jejich korelace s korozními testy na označených vzorcích. Značení bylo prováděno nanosekundovým pulzním vláknovým laserem s volitelnou délkou pulzu (9-200 ns), opakovací frekvencí a energií v pulzu. Obdobný vzhled značení byl dosažen za použití různých parametrů, korozní odolnost se však velmi lišila a je v korelaci s maximálními teplotami dosaženými v laserovém spotu. Zjištěné maximální teploty se pohybovaly v rozsahu méně než 1100°C a více než 1800°C. Z výsledků je možno udělat závěr, že kombinace dlouhých pulzů a vysoké opakovací frekvence je nejvhodnější pro zachování korozní odolnosti korozivzdorné oceli po laserovém značení.



Obr. 1. Laserové značení korozivzdorné oceli – různé parametry

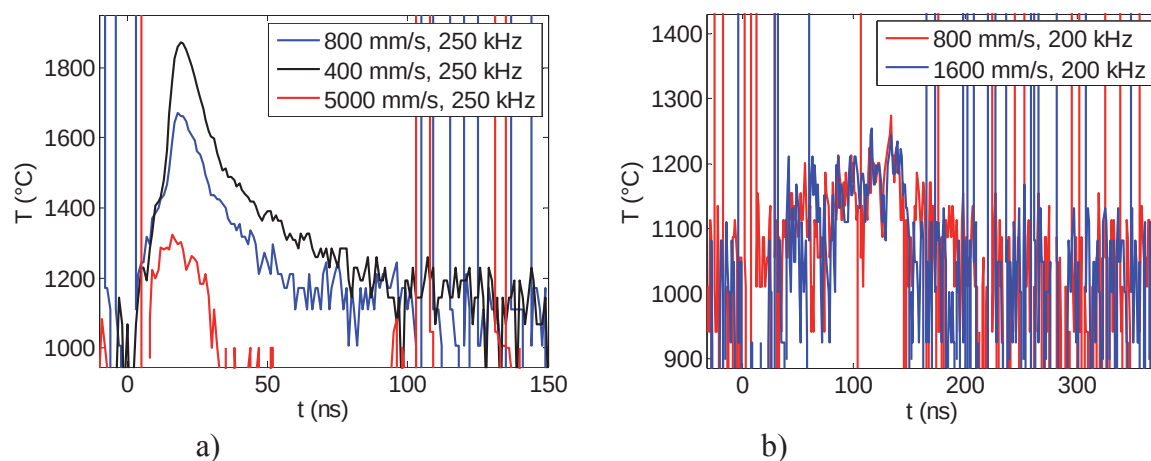


a)



b)

Obr. 2. Výsledky korozních testů laserově označených dílů: a) před testem, b) po testu



Obr. 3. Naměřené teploty pro proces laserového značení korozivzdorné oceli pro a) krátké pulzy (15 ns) a b) dlouhé pulzy (160 ns).

Autoři děkují za podporu MŠMT (CZ.1.05/2.1.00/03.0088, LO1402) a GAČR (14-18938S)

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Vývoj laserových technologií – mikroobrábění, svařování plastů, povlakování
- Měření optických vlastností za pokojové i vysoké teploty
- Vývoj měřicích metod a kontrola kvality pro průmyslové technologie
- Aktivní termografie a IR nedestruktivní testování

OPTOVĚKOVÉ SENZORY A JEJICH VYUŽITÍ PRO MĚŘENÍ V JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH

Břetislav Mikel

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Královopolská 147, 612 64 Brno, Česká republika
e-mail: mikel@isibrno.cz, tel: +420 541 514 252

Obor: Optické vláknové senzory, laserová interferometrie, vláknová optika.

V oddělení Koherenční optiky ÚPT AV ČR v.v.i. se v současnosti využívají optická vlákna ve většině experimentů. V těchto aplikacích optických vláken je obvykle nutné využívat vlákna se speciálními vlastnostmi např. polarizačně závislá nebo mikrostrukturní vlákna. Aktuálně vyžíváme optická vlákna singlemodová, multimodová, polarizačně závislá, mikrostrukturní a další speciální. Většina typů těchto optických vláken je využívána v rozsahu vlnových délek od 350 nm do 1600 nm.

V současnosti jsme dokončili ve spolupráci s firmou NETWORKGROUP s.r.o. systém pro měření roztažnosti kontejnmentu JE Temelín. Tento systém byl od června 2015 do září 2016 ve zkušebním provozu nainstalován v na prvním reaktorovém bloku. Systém vznikl v rámci projektu MVČR VG20132015124. Po celý rok probíhalo měření naším systémem v souběhu s měřením prostřednictvím aktuálních senzorů, které má náš systém nahradit.

Na základě tohoto měření lze již prohlásit, že náš systém vyhovuje požadované přesnosti měření a lze jím nahradit stávající systém měření. Fotografie z instalace měřicího systému jsou na obrázku 1.



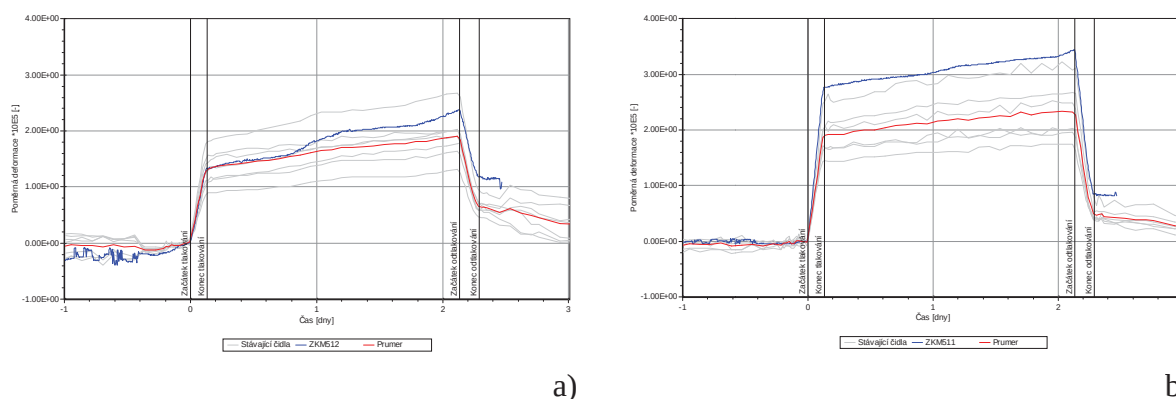
a)



b)

Obrázek 1. Fotografie z instalace měřicího systému v JE Temelín, a) Fotografie senzorů na kontejnmentu, b) fotografie měřicího systému.

Srovnání naměřených dat z našeho systému a stávajícího během odstavení reaktoru z důvodu výměny části paliva, během které proběhl i tlakový test těsnosti reaktoru PERZIK je na obrázku 2.



Obrázek 2. Záznam měření roztažnosti kontejnmenty JE Temelín během tlakového testu těsnosti reaktoru PERZIK. Modrá křivka znázorňuje průběh měření ze senzorů našeho systému, šedé křivky jsou záznamy měření původním systémem a červená křivka je průměr z hodnot ze senzorů původního systému. a) Měření ve svislém směru, b) Měření ve vodorovném směru.

Další výzkum v této oblasti byl zaměřen na radiační odolnost optických vláken s Braggovými mřížkami. Jednotlivé vzorky optických vláken a senzorů byly ozařovány radiační dávkou 0,3; 1; 3; 10 a 30 kGy. Uvedeným dávkám jsme podrobili stejné sady, které obsahovaly optická vlákna, optická vlákna s Braggovými mřížkami a optická vlákna se šikmými Braggovými mřížkami. Pro uvedené hodnoty ionizačního záření jsme nezaznamenali významnější odchylky v útlumu ani v posunu Braggovy vlnové délky jednotlivých Braggových mřížek.

Oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Optické měření délky.
- Optické měřicí systémy s vláknovými Braggovými optickými senzory pro měření teploty, tlaku, délky, vibrací atd.
- Monitorování délky, teploty atd. založené na principu laserového interferometru s optickými vlákny.
- Svařování polarizačně závislých, mikrostrukturních a dalších speciálních optických vláken.
- Tvarování optických vláken.

Poděkování

Tento výzkum je podpořen formou institucionální podpory z projektu č. RVO:68081731. Výzkum v oblasti senzorů je podporován z projektu Technologické agentury ČR TA03010835. Výzkum vláknových senzorů pro monitorování stavu kontejnmentu byl podporován projektem MV ČR VG20132015124.

LASEROVÉ SYSTÉMY SPITFIRE

Martin Moser

MIT s.r.o.

Klánova 56, 147 00 Praha 4

Kontakt: 241 712 548, moser@mit-laser.cz , www.mit-laser.cz



Obor: Lasery, fotonika a jemná mechanika, laserové obrábění

Firma Spectra-Physics pojmenovala svou velmi úspěšnou řadu ultrarychlých zesilovačů podle stejně nebezpečně rychlých letounů 2. světové války Spitfire. Před pár lety firma představila zcela inovovanou řadu zesilovačů Spitfire Ace, která přímo navazovala na původní systémy Spitfire Pro. Čím je řada Ace tak **specifická**?

Po akvizici firmy Spectra-Physics společností Newport začala Spectra-Physics vyvíjet revoluční technologii regenerativního laserového rezonátoru. Výsledkem kombinace vysoce stabilních optomechanických dílů a izolátorů společnosti Newport a patentovaných optických vrstev firmy Spectra-Physics vznikla technologie XPert, přinášející vynikající vlastnosti laserových rezonátorů - garantovaná stabilita v širokém teplotním rozsahu (nejméně 20°C), minimalizovaný šum, garantovaný průměrný výkon po dobu stovek hodin provozu - parametry, které stanovily novou třídu mezi ultrarychlými zesilovači.

Kombinací patentované technologie XPert a platformy Spitfire Pro vznikl unikátní ultrarychlý zesilovač Spitfire Ace, který si za dobu své existence vydobyl celosvětově vynikající renomé. Technické parametry tohoto zesilovače byly navíc již několikrát výrazně vylepšeny (k zatím poslední změně došlo zcela nedávno) a nyní jsou tedy parametry následující: Průměrný výkon - více než 8 W při kvalitě laserového svazku $M^2 < 1,3$ a délce pulsu < 120 fs. Zesilovač má k dispozici digitální elektroniku pro přesnou synchronizaci a volitelnou opakovací frekvenci od 1 do 10 kHz. Ve verzi 35F je délka pulsu 35 fs a laditelnost vlnových délek v rozsahu 780-820 nm. Laserový systém Spitfire Ace je ideálním řešením např. pro **pump-probe spektroskopii** na různých vlnových délkách, pro **kontrolu koherence**, **časově rozlišenou spektroskopii**, **terahertzové zobrazování**, **laserové mikroobrábění**, atd.



Zesilovač Spitfire Ace instalovaný v laboratoři Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích v roce 2014.

SCHLIEROVÁ ANALÝZA PROUDĚNÍ PLYNŮ PŘI LASEROVÉM OBRÁBĚNÍ

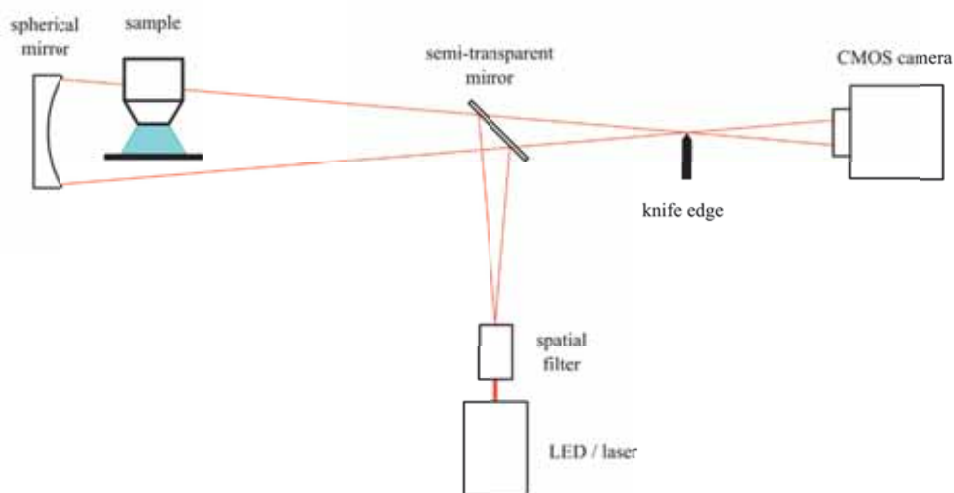
Jan Pavelka, Libor Mrňa, Petr Horník, Petr Jedlička

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.
Královopolská 147, 612 64 Brno

Obor: laserové řezání, laserové svařování

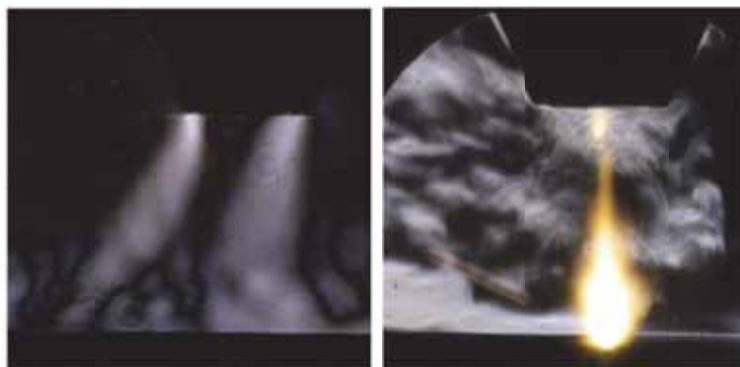
Laserové obráběcí procesy, svařování a řezání, využívají procesní plyny, jejichž proudění má zásadní vliv na kvalitu obrobků. Pro analýzu proudění se velmi dobře hodí schlierová metoda, která umožňuje zobrazení velmi malých změn indexu lomu transparentního prostředí, které jsou způsobeny jiným složením plynu nebo změnami hustoty vlivem termodynamických dějů. Světlo z bodového zdroje je po průchodu vzorkem fokusováno do ohniska, ve kterém se dá světlo odkloněné nehomogenitou snadno odstínit ostrým břitem. Tím vznikne kontrastní obraz vzorku odpovídající první derivaci indexu lomu.

Pro uvedené analýzy byla použita jednoosá schlierová aparatura (Obrázek 1) používající k fokusaci svazku jedno sférické zrcadlo s ohniskovou vzdáleností 625 mm. Souosost vstupního a výstupního paprsku je zajištěna polopropustným zrcadlem. Bodový zdroj světla je zajištěn 10W výkonovou bílou LED opatřenou clonou nebo RGB laserovým modulem s prostorovým filtrem o výkonu 0,5 W. Kontrastní schlierový obraz je vytvářen lineárním začerněným břitem umístěným v optickém středu sférického zrcadla.



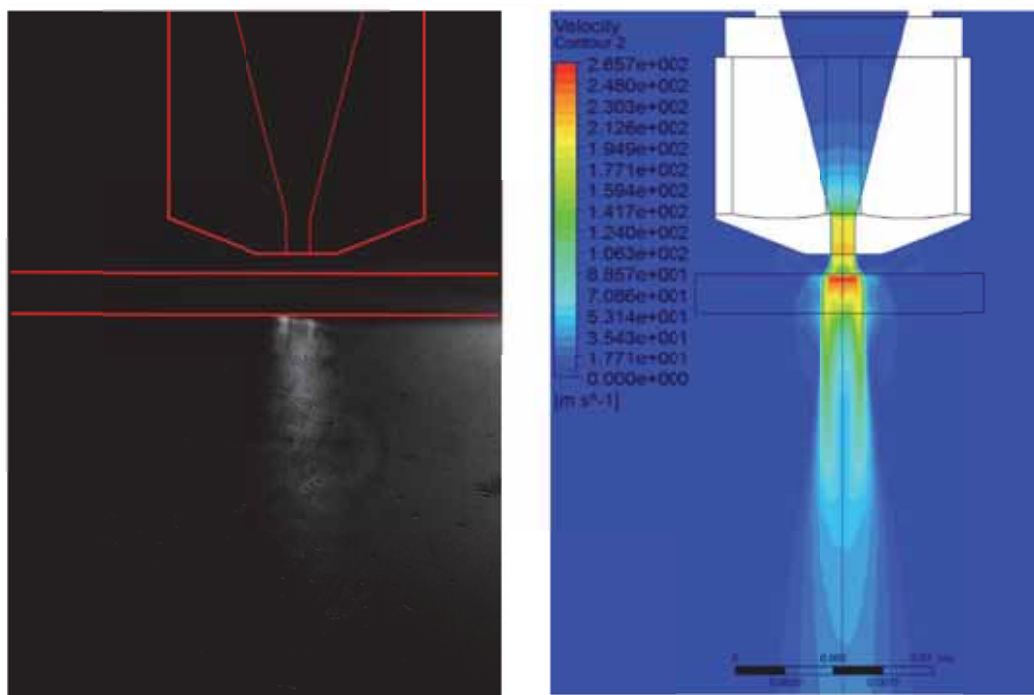
Obrázek 1: Jednoosá schlierová sestava se sférickým zrcadlem.

Při laserovém svařování byla schlierová metoda použita k zobrazení ochranné atmosféry, která proudí z trysky a zabraňuje oxidaci rozžhavené svarové lázně. Z Obrázku 2 je patrné, že ochranný plyn zcela kryje oblast svaru pod tryskou. Po zapnutí svářecího laseru je plyn zahříván svarovou lázní a plazmovými obláčky expandujícími z keyhole, čímž se vytváří velmi turbulentní proudění inertního plynu kryjící ještě větší svařovaného materiálu. Svařovací proces byl zaznamenán vysokorychlostní kamerou. Analýza rychlosti rozpínání bublin horkého plynu ukázala, že bubliny vytvořené interakcí krycí atmosféry s plazmovým obláčkem se rozpínají asi dvakrát rychleji, než bubliny vznikající jinými způsoby. Schlierovou metodu je tedy možné použít pro detekci a další zkoumání plazmových obláček a dějů v keyhole.



Obrázek 2: Proudění Ar pod svařovací tryskou (vlevo) a turbulentní Ar při svařování.

Dále bylo studováno proudění plynu při oxidačním dělení. Řezným plynem je kyslík, který pod malým tlakem proudí řeznou štěrbinou a reaguje s materiálem rozžhaveným laserem. Předpokládá se, že pro kvalitní řez je nutné, aby proudění v řezané oblasti bylo laminární. Pro ověření bylo nasnímáno proudění plynu řeznou štěrbinou (za studena), při kterém dojde ke zploštění proudu ve směru řezu. Tvar výstupního proudu se mění při změně tlaku plynu a tloušťce řezaného materiálu. Plyn se uvnitř štěrbiny výrazně zpomalí, což vede snížení kontrastu získaných snímků. Ty je nutné dále zpracovat diferenční metodou. Stejná konfigurace byla nasimulována v programu COMSOL. Výsledky simulace ukazují, že proudění ve štěrbině má velmi malé rychlosti a je laminární. Vzhledem k tomu, že simulace velmi dobře koresponduje s nasnímaným prouděním (Obrázek 3), lze předpokládat, že charakter reálného proudění uvnitř štěrbin odpovídá výsledkům získaným simulací.



Obrázek 3: Srovnání schlierového obrazu a simulace proudění plynu řeznou štěrbinou při tlaku 0,5 bar.

Schlierová metoda se osvědčila při analýze procesních plynů při laserovém obrábění a ukázalo se, že je vhodná pro zobrazování velmi pomalých proudění plynů s velmi malými rozdíly indexu lomu vůči okolí.

Poděkování: Příspěvek vznikl v rámci projektu TA ČR: „Vývoj nových typů solárních absorberů“ č. TA04020456.

NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ POMOCÍ AKTIVNÍ TERMOGRAFIE

Pavel Petráň, David Kuboš

“TMV SS“ spol. s r. o.

Studánková 395, 149 00 Praha 4 – Újezd

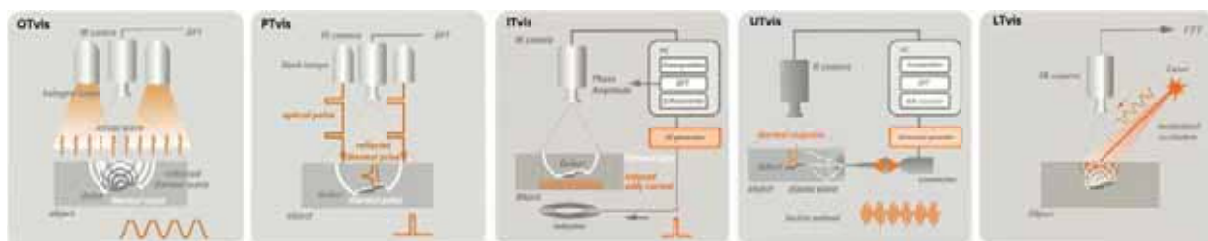
david.kubos@tmvss.cz +420 272 942 720

Obor: termografie pro oblast R&D a aktivní termografie

Princip aktivní termografie je založen na vyhodnocení externě excitovaného tepelného toku v testovaném objektu (material) a jeho narušení skrytými vadami, defekty a prasklinami. Vysoce citlivé a rychlé termografické systémy s následnou matematickou analýzou zvyšují schopnost a spolehlivost detekce informací o vadách. Je to účinná bezkontaktní a nedestruktivní metoda pro rychlou inspekci rozlehlých oblastí testovaných objektů.

Díky různým druhům excitačních metod je možné široké využití v různých aplikacích testování. Optická lock-in termografie umožňuje kontrolu velkých ploch komplexních struktur. Pulsní (fázová) lock-in termografie se charakterizuje extrémně krátkým testovacím časem a vysokou detekční citlivostí. Tyto metody jsou používány na testy CFRP v leteckém nebo automobilovém průmyslu. Indukční termografie se využívá pro vyhodnocení kvality spojů při výrobě i při údržbě. Zároveň je indukční termografie vhodná pro detekci prasklin a kontrolu svárů či pájených spojů. Ultrazvuková termografie je pak vhodnou metodou pro detekci prasklin bez ohledu na prostorové umístění v testovaném objektu, lepených nebo lisovaných spojů. A konečně laserová termografie je bezkontaktní testovací metoda ideální pro kontrolu spojů, svárů, tenkých filmů a povlaků. Technika Fourierovy vyhodnocovací metody umožňuje precizně stanovit tloušťky, pórovitosti či teplotní vodivosti.

Mnoho excitačních zdrojů aktivní termografie může být použito pro několik různých aplikací v korelaci s požadavky a potřebami daných aplikací. Často záleží na vhodné termografické kameře, jejím typu detektoru (technologie, citlivost, záznamová rychlost) a vhodném softwarovém modulu pro celý měřicí systém.



Obr.1 Metody aktivní termografie

DETEKCE FREKVENČNÍHO ŠUMU POLOVODIČOVÉHO LASERU PRACUJÍCÍHO NA VLNOVÉ DÉLCE 729 NM

Tuan Minh Pham, Martin Čížek, Václav Hucl, Josef Lazar, Jan Hrabina, Šimon Řeřucha, Adam Lešundák, Josef Lazar a Ondřej Číp

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Oddělení koherenční optiky
Královopolská 147, Brno, 612 64, +420 541 514 529, tuan@isibrno.cz

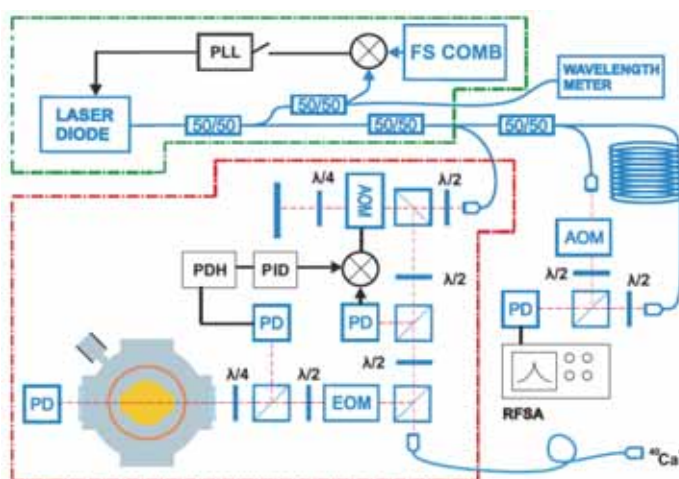
Lukáš Slodička, Petr Obšil a Radim Filip

Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra optiky
17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc

Obor: Laserová spektroskopie, laserové chlazení atomů, interferometrie

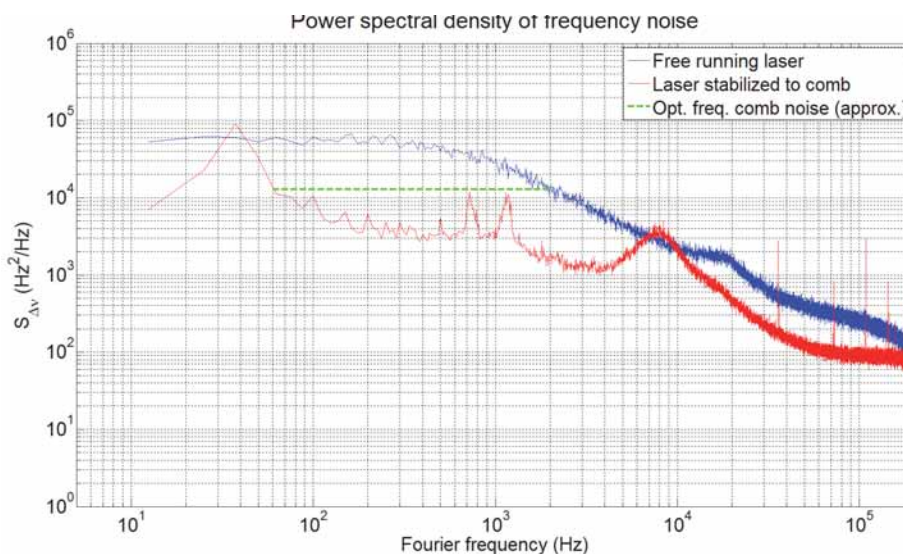
Spektroskopie s laserem chlazenými ionty je založena na excitaci jejich elektronických přechodů vysoce koherentními laserovými svazky s následnou detekcí fluorescence pomocí citlivých kamer či fotony čítajících detektorů. Na excitační lasery jsou kladeny velké nároky týkající se šířky spektrální emisní čáry, která musí vždy respektovat dobu života příslušného excitovaného přechodu. Je-li iont zachycen v elektrické pasti a následně Dopplerovsky zchlazen, je připraven na další chlazení technikou chlazení postranním pásmem (tzv. sideband cooling) pomocí excitace např. na kvadrupólový přechod [1]. Pro tuto techniku je nezbytný laser, jehož šířka emisní čáry je v řádu Hz, neboť doba života takového přechodu bývá nejméně v řádu sekund. V naší společné laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně a Katedry optiky Univerzity Palackého probíhá v současnosti realizace experimentální výzkumné infrastruktury pro laserové chlazení $^{40}\text{Ca}^+$ iontů. Pro excitaci a následnou detekci kvadrupólového přechodu iontu tohoto prvku je proto nezbytný vysoce koherentní laser pracující na vlnové délce 729 nm, který má excitovat přechod $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$.

V našem řešení jsme zvolili jako primární zdroj záření polovodičový diodový laser s externím rezonátorem, který dovoluje široké přeladění generované optické frekvence s šířkou spektrální čáry v řádu stovek kHz. Pro analýzu frekvenčního šumu a následnou techniku zúžení spektrální emisní čáry laseru jsme sestavili optickou sestavu dle Obr. 1.



Obr. 1: Schéma sestavy pro analýzu frekvenčního šumu polovodičového laseru pracujícího na vlnové délce 729 nm. Zeleně označená část zahrnuje vlastní laser a jeho fázový závěs na vybranou spektrální komponentu optického frekvenčního hřebene FS COMB, červeně označená část představuje druhý stupeň zúžení emisní čáry pomocí spektroskopie s vysoce jakostním optickým rezonátorem; 50/50 jsou vláknové děliče, $\lambda/2$ a $\lambda/4$ jsou fázové destičky, PD je fotodetektor, AOM je akustooptický modulátor, EOM je elektrooptický modulátor, PID je rychlý regulátor a PDH je modul pro detekční techniku Pound-Drever-Hall na principu FM spektroskopie, RFSA je spektrální analyzátor.

Detekce frekvenčního šumu laseru je založena na technice využívající nevyvážený Mach-Zehnderův interferometr, který má vloženou vláknovou cívku dostatečné délky do jeho referenčního ramene [2]. Měřicí větev interferometru je vybavena akustooptickým modulátorem AOM, který zajišťuje frekvenční posuv optického záření v této větvi o několik desítek MHz. Po demodulaci směřováním elektrického signálu z fotodetektoru s kmitočtem modulátoru AOM je získána informace o spektrálním frekvenčním šumu laseru, která je následně zpracována vysokofrekvenčním spektrálním analyzátozem. S ohledem na očekávanou šířku spektrální čáry laseru v řádu stovek kHz byla sestava připravena na fázový závěs optické frekvence laseru na vybranou komponentu optického frekvenčního řetězce. Na základě měření je známo, že spektrální šířka čáry hřebene Ústavu přístrojové techniky AV ČR je cca 80 kHz. Lze očekávat, že fázovým závěsem optické frekvence polovodičového laseru na optický hřeben dojde k zúžení spektrální šířky čáry lasery. Na základě schématu na Obr. 1 byla zamčena tato smyčka fázového závěsu laseru 729 nm a následně bylo proměřeno pomocí Mach-Zehnderova interferometru spektrum frekvenčního šumu, viz. Obr. 2.



Obr. 2: Průběh spektra frekvenčního šumu pro případ volně běžícího laseru 729 nm (modrá křivka) a fázově zamčeného na optický frekvenční hřeben (červená křivka).

Na základě analýzy naměřených průběhů frekvenčního šumu je patrné, že díky fázovému závěsu laseru 729 nm na optický frekvenční hřeben dochází k potlačení frekvenčního šumu laseru. Tento první stupeň zúžení původní šířky čáry je tak funkční. Nyní probíhají přípravy na realizaci druhého stupně potlačení šumu laseru pomocí vysoce jakostního optického rezonátoru. Očekává se, že díky šířce jeho rezonanční čáry, která je v řádu jednotek kHz, bude možné spektrální šířku emisní čáry laseru zúžit dále, až na úroveň jednotek Hz.

Literatura:

- [1] Ye, J., Blatt, S., Boyd, M. M., et al. "Precision measurement based on ultracold atoms and cold molecules", *International Journal of Modern Physics, D* 16 (12b), 2481 (2007)
- [2] Jiang, H., Kefelian, F., Lemonde, P.; Clairon, A., Santarelli, G. "An agile laser with ultra-low frequency noise and high sweep linearity", *Opt. Express* 2010, 18, 3284-3297.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

Spektroskopie vysokého rozlišení

Poděkování

Tento metodologický výzkum je podporován Grantovou agenturou ČR, projekt č. GB14-36681G. Výzkumná infrastruktura byla podpořena s přispěním Evropské komise a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, projekty č. LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a dále Akademií věd České republiky, projektem RVO:68081731

MĚŘENÍ INDEXU LOMU VZDUCHU POMOCÍ INTERFEROMETRIE NÍZKÉ KOHERENCE

Tomáš Pikálek, Zdeněk Buchta

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i., Královopolská 147, 612 64 Brno

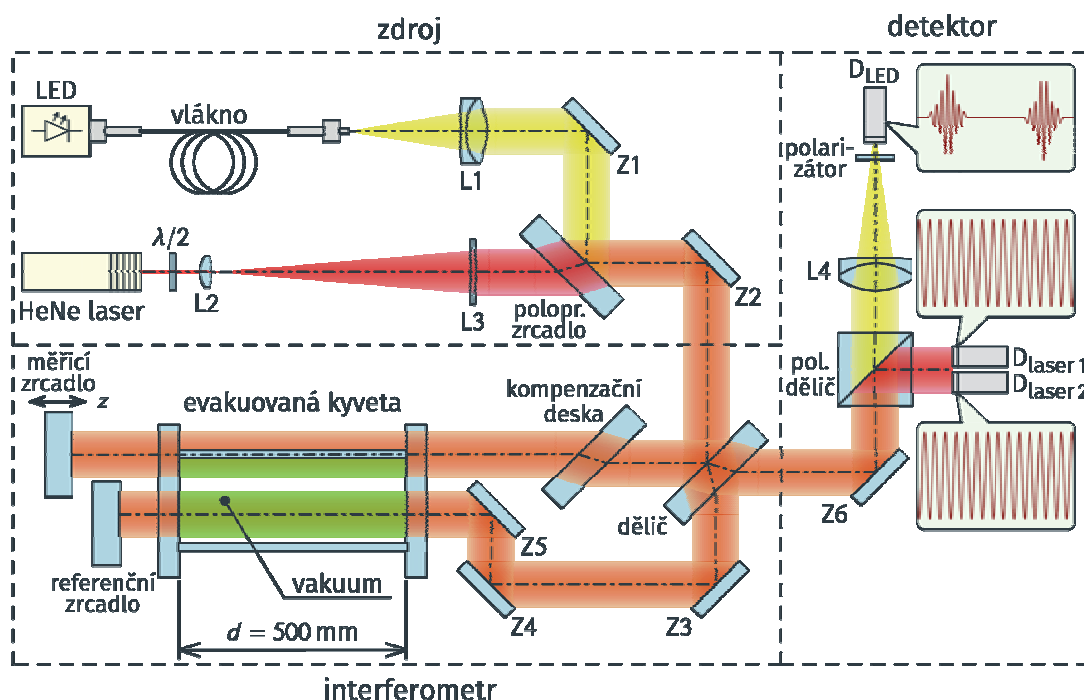
e-mail: tpikalek@isibrno.cz

Obor: index lomu vzduchu, laserová interferometrie, interferometrie nízké koherence

V laserové interferometrii je základním měřítkem délky vlnová délka použitého laseru. Příkladem může být helium-neonový laser používaný v metrologii, jehož vlnová délka ve vakuu je asi 633 nm. Vzhledem k tomu, že vzdálenosti pomocí laserového interferometru měříme v násobcích vlnové délky laseru, přesná znalost této veličiny je pro měření klíčová. Vlnovou délku laseru známe obvykle velmi přesně ve vakuu. Většina interferometrických měření však probíhá na vzduchu, kde je vlnová délka kratší. Poměr vlnové délky ve vakuu a ve vzduchu je dán indexem lomu vzduchu.

Chceme-li provádět přesná interferometrická měření na vzduchu, kromě frekvence laseru je tedy třeba znát i hodnotu indexu lomu vzduchu během měření. Existují dva odlišné přístupy k měření indexu lomu vzduchu. Vyšší přesnosti je možné dosáhnout pomocí přímých metod, jejichž principem je měření rozdílu optické dráhy mezi vzduchem a vakuem. V praxi častější, ale méně přesné, jsou nepřímé metody. Ty jsou založeny na měření atmosférických podmínek, tedy teploty a tlaku vzduchu, jeho relativní vlhkosti a někdy i koncentrace oxidu uhličitého. Z těchto podmínek a ze známé vlnové délky zdroje ve vakuu se pak hodnota indexu lomu vzduchu na základě známých závislostí (například Edlénovy rovnice) vypočítá.

Nově vyvinutá přímá metoda měření indexu lomu vzduchu je založena na měření rozdílu optických drah ve vzduchu a ve vakuu, a to pomocí kombinace laserové interferometrie a interferometrie nízké koherence. Základem je Michelsonův interferometr kombinující laser a bílé světlo (LED), jehož měřicí větev je příčně rozdělena trvale evakuovanou dvoukomorovou kyvetou na část procházející vzduchem a část procházející vakuem, viz obr. 1. Při měření probíhá odděleně detekce interference laserového záření a bílého světla.



Obr. 1: Schéma experimentální sestavy pro měření indexu lomu vzduchu.

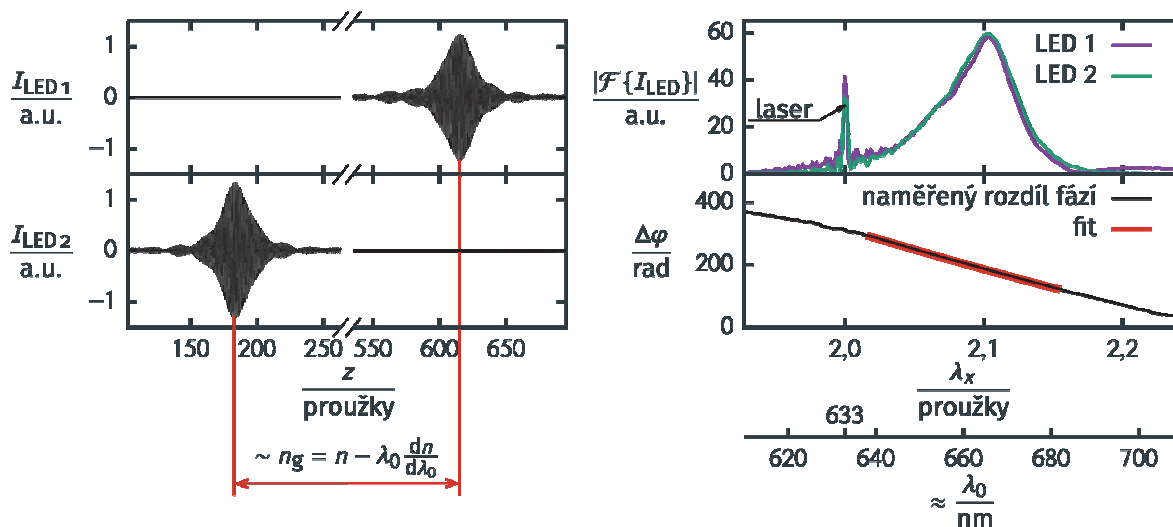
Rozdíl optických drah v měřicí větvi interferometru mezi částí svazku, která prochází vnějším prostorem kyvety (vzduchem), a částí, která prochází vnitřním prostorem kyvety (vakuum), obecně závisí na vlnové délce. Odpovídající fázový rozdíl je

$$\Delta\varphi(\lambda_0) = \frac{4\pi d}{\lambda_0} [n(\lambda_0) - 1], \quad (1)$$

kde d je délka kyvety a $n(\lambda_0)$ je index lomu vzduchu pro vlnovou délku ve vakuu λ_0 .

Z fázového rozdílu je tedy možné určit hodnotu indexu lomu vzduchu.

Fázový rozdíl mezi vzduchem a vakuem můžeme určit z laserových interferenčních signálů, avšak pouze modulo 2π . Pro zjištění skutečné hodnoty fázového rozdílu proto využijeme bílé interferenční signály, přičemž jeden z laserových interferenčních signálů využijeme pro určení polohy měřicího zrcadla z (jelikož zatím neznáme hodnotu indexu lomu vzduchu, a tedy ani vlnovou délku laseru, vyjádříme tuto polohu v interferenčních proužcích), viz obrázek 2 vlevo. Vypočítáme-li Fourierovu transformaci obou signálů a odečteme jejich fáze, dostaneme závislost fázového rozdílu na délce proužků λ_x , kterou můžeme díky znalosti vlnové délky laseru ve vakuu přepočítat na závislost na vlnové délce ve vakuu λ_0 , viz obrázek 2 vpravo. Tato závislost však může být vzhledem ke způsobu výpočtu posunuta o libovolný celočíselný násobek 2π . Pro zjištění posunutí využijeme teoretické závislosti dle rovnice (1), do které za $n(\lambda_0)$ dosadíme Edlénovy rovnice, tedy rovnice pro výpočet indexu lomu vzduchu z vlnové délky ve vakuu a atmosférických podmínek (ty však neznáme). Posunutí naměřené závislosti zjistíme fitováním. Hodnotu indexu lomu vzduchu pro vlnovou délku laseru pak z fázového rozdílu pro tuto vlnovou délku určíme dle rovnice (1).



Obr. 2: Bílé interferenční signály a rozdíl jejich fází určený z Fourierovy transformace.

Pro přesnější výpočet fázového rozdílu, a tedy i hodnoty indexu lomu vzduchu, využijeme nejen informaci o fázi bílých interferenčních signálů, ale i fázový rozdíl mezi oběma laserovými interferenčními signály.

Popisovaná metoda pro měření indexu lomu vzduchu byla experimentálně ověřena na vlnové délce 633 nm pomocí srovnání s jinou přímou a též s nepřímou metodou měření indexu lomu vzduchu. Při experimentech byla dosažena standardní nejistota $3 \cdot 10^{-8}$.

Autoři děkují za podporu projektům Akademie věd České republiky č. RVO:68081731, Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a LO1212 a Grantové agentury České republiky č. GB14-36681.

VLIV VLASTNÍHO PRŮHYBU TESTOVANÝCH SFÉRICKÝCH OPTICKÝCH PRVKŮ NA PŘESNOST INTERFEROMETRICKÝCH MĚŘENÍ

Petr Pokorný*, Filip Šmejkal, Pavel Kulmon, Antonín Mikš

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra fyziky

Thákurova 7, 166 29 Praha 6, *petr.pokorny@fsv.cvut.cz, aog.fsv.cvut.cz

Obor: interferometrie

V práci je studován vliv vlastního průhybu sférických čoček na deformaci jejich povrchu. Tento jev může být v určitých případech interferometrických měření nezanedbatelný. Je proto třeba problematiku analyzovat a určit, kdy nemusíme působení vlastní tíhy čoček uvažovat, nebo kdy je třeba zavádět korekce.

Vyjdeme-li z teorie pružnosti desek proměnných tloušťek a předpokládáme-li čočku kruhovou (nejčastější případ čoček), můžeme deformaci popsat pomocí rovnic [1-4]:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{D(r)} \frac{dD(r)}{dr} \right] \frac{d\varphi}{dr} + \left[\frac{\nu}{D(r)} \frac{dD(r)}{dr} - \frac{1}{r} \right] \frac{\varphi}{r} = \frac{Q(r)}{D(r)},$$

$$D(r) = \frac{Ed(r)^3}{12(1-\nu^2)}, \quad Q(r) = \frac{1}{r} \int_0^r q(r) r dr, \quad q(r) = d(r) \rho g,$$

$$\varphi = -\frac{dw}{dr}, \quad M_r = D(r) \left[\frac{d\varphi}{dr} + \nu \frac{\varphi}{r} \right],$$

kde $w = w(r)$ je průhyb desky (čočky), r vzdálenost od středu desky, ν Poissonovo číslo, E modul pružnosti v tahu, ρ objemová hustota materiálu desky, g gravitační zrychlení, $d(r)$ tloušťka desky ve vzdálenosti r od jejího středu, $\varphi = \varphi(r)$ sklon tečny ke střednici desky a $M_r = M_r(r)$ je radiální vnitřní moment. V případě volného uložení čočky na okraji mají okrajové podmínky tvar:

$$w(r)|_{r=a} = 0, \quad M(r)|_{r=a} = 0.$$

Pro čočku, která má obě plochy sférické, dále platí:

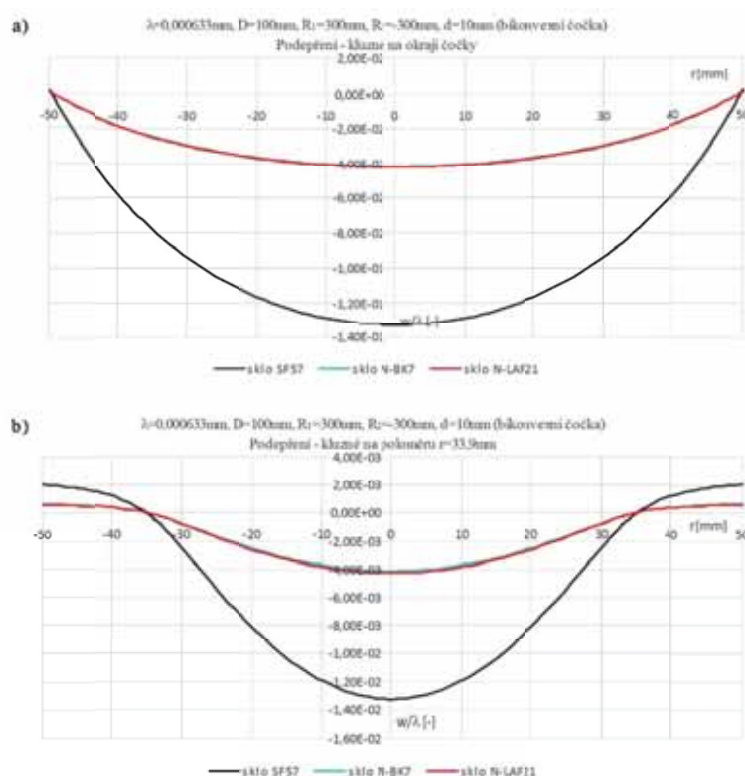
$$d(r) = d_0 - \left(R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2} - R_2 + \sqrt{R_2^2 - r^2} \right) \approx d_0 - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) r^2 = d_0 + K r^2.$$

Řešením výše uvedených rovnic můžeme analyzovat vliv průhybu sférické čočky způsobený její vlastní hmotnou. Další z možností je využití komerčního softwaru řešícího problematiku metodou konečných prvků, např. ANSYS nebo COMSOL.

Uvažujme spojnou čočku, která má následující parametry: $R_1 = 300 \text{ mm}$, $R_2 = -300 \text{ mm}$, $d_0 = 10 \text{ mm}$ a průměr čočky je $D = 100 \text{ mm}$. Abychom mohli posoudit vliv různých mechanických parametrů optických skel, bude čočka zhotovena ze tří různých materiálů, jejichž mechanické parametry jsou uvedeny v Tabulce 1, kde E je modul pružnosti v tahu, ρ je objemová hustota skla a ν je Poissonovo číslo. Průhyb plochy čočky je pro různá uložení na obr. 1 uveden v násobcích vlnové délky $\lambda = 633 \text{ nm}$.

Tabulka 1. Mechanické parametry optických skel

sklo	E [GPa]	ρ [g/cm ³]	ν
SF57	54	5.51	0.248
N-BK7	82	2.51	0.206
N-LaF21	124	4.28	0.295



Obr. 1. Průhyb sférické čočky uložené a) na okraji, b) na kružnici poloměru $0.678 \cdot D$

Jak je z obr. 1 patrné, je v případě podepření čočky na okraji její maximální průhyb přibližně $w_{\max} \approx \lambda/7$ (sklo SF57), zatímco při uložení na kroužku o vnitřním průměru $0.678 \cdot D$ je její maximální průhyb pouze $w_{\max} \approx \lambda/75$ (sklo SF57). Pro ostatní dvě skla je průhyb menší. Jak je z těchto výsledků patrné, nemusíme při měření poloměrů této čočky přihlížet k deformaci jejich ploch vlivem vlastní hmotnosti, je-li čočka při měření uložena na kroužku o vnitřním průměru $0.678 \cdot D$. Z dalších analýz je možné ukázat, že pro čočky s průměrem menším nebo rovným 100 mm bude jejich průhyb v důsledku vlastní hmotnosti menší než $\lambda/50$.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze č. SGS15/125/OHK1/2T/11.

Literatura

1. S. P. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, McGraw Hill Higher Education, New York, 1964.
2. S. Volmir, *Flexible Plates and Shells* (in Russian), State Publishing House of Technical-Theoretical Literature, Moscow, 1956.
3. E. Ventsel, T. Krauthammer, *Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications*, Marcel Dekker, Inc. 2001.
4. R. Szilard, *Theories and Applications of Plate Analysis*, John Wiley & Sons 2004.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- studium a aplikace aktivních optických prvků
- optická metrologie (interferometrie, SHS, chromatické senzory)
- matematické modelování v Matlabu, tvorba uživatelských aplikací
- návrh optických soustav

OPTICKÝ REZONÁTOR S NÍZKOU DISPERZÍ PRO ÚČELY DÉLKOVÉHO SENZORU VYUŽÍVAJÍCÍ OPTICKÝ FREKVENČNÍ HŘEBEN

Lenka Pravdová, Václav Hucl, Adam Lešundák, Josef Lazar a Ondřej Číp

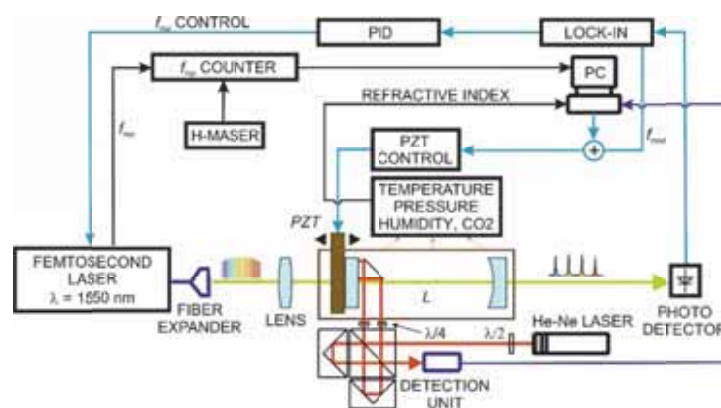
Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Královopolská 147, 61241 Brno, Česká Republika
email: lpravdova@isibrno.cz

Obor: Měření a metrologie, Fabryův-Perotův rezonátor, optické hřebeny, pulzní lasery

Ultra přesná měření délky jsou doménou laserových interferometrů. Konvenční inkrementální dvousvazkové interferometry dosahují subnanometrového rozlišení, avšak měřené údaje jsou zpravidla vztažené k výchozí pozici interferometru. Jiným typem interferometru je optický rezonátor, který kromě vysokého rozlišení měřené vzdálenosti navíc dovoluje měření v absolutní stupnici. Princip měření délky pomocí optického rezonátoru s jednofrekvenčním laserem se již používá řadu let pro potřeby fundamentální metrologie [1]. Laditelný laser sleduje optickou frekvenci vybraného modu rezonátoru, která odpovídá délce rezonátoru. Následně je optická frekvence takto vázaného laseru detekována záznejovým měřením s normálem optické frekvence. Nevýhodou tohoto uspořádání je obtížné stanovení řádu vybraného modu rezonátoru.

Na našem pracovišti jsme navrhli a experimentálně ověřili metodu měření s optickým rezonátorem, která využívá širokospektrálního záření optického frekvenčního hřebene [2]. Měřená délka, tj. délka rezonátoru, je pak převedena na hodnotu opakovací frekvence pulsního laseru se synchronizací modů optického frekvenčního hřebene, která je zjištěna frekvenčním čítačem [3]. Díky širokému spektru frekvencí zachycených optickým rezonátorem v jeden okamžik odpadá problém s nejednoznačností výběru módu, jako v případě metody [1]. Podmínkou správné funkcionality naší metody je nízká disperse rezonátoru, která zajistí stejný fázový posun pro všechny komponenty optického spektra hřebene frekvencí a tudíž dosažení konstruktivní interference pro většinu vln vstupujících do rezonátoru pro danou délku rezonátoru. Tento úkol jsme vyřešili použitím stříbrných nanopovlaků zrcadel.

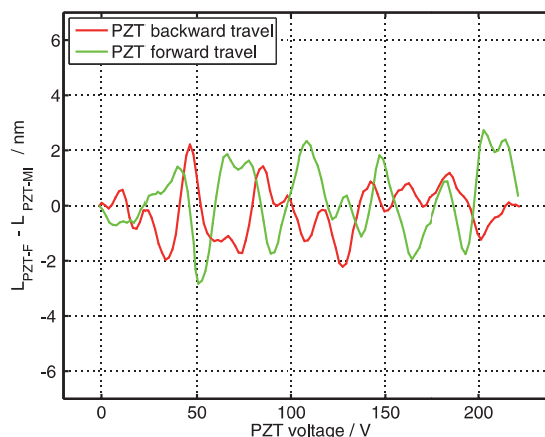
V našem příspěvku nyní představujeme porovnání absolutní stupnice optického rezonátoru se stupnicí inkrementálního interferometru. Uspořádání optické soustavy je uvedeno na Obr. 1



Obrázek 1. Schéma optické sestavy s optickým rezonátorem a inkrementálním interferometrem: L je délka rezonátoru, PZT je piezoelektrický akční člen, $\lambda/2$ a $\lambda/4$ jsou fázové destičky, PID je regulátor, f_{mod} je modulační frekvence derivační detekční techniky, f_{rep} je opakovací frekvence pulsního laseru a PC je řídicí počítač.

Laserový svazek vstupuje do optického rezonátoru tvořeného dvěma polopropustnými stříbrnými zrcadly. Měřicí rovinné zrcadlo s nízkou disperzí je vybaveno piezoelektrickým posuvem. Pro provedení požadované verifikace stupnice optického rezonátoru je do sestavy

implementován požadovaný inkrementální interferometr. Díky širokospektrálnímu stříbrnému nanopovlaku je měřicí zrcadlo rezonátoru s výhodou použito zároveň i jako zpětný odrazec testovacího dvousvazkového inkrementálního interferometru pracujícího na vlnové délce 633 nm. Opakovací frekvence pulsního laseru je zavěšena na délku optického rezonátoru pomocí techniky derivační spektroskopie. Hodnota opakovací frekvence je měřena frekvenčním čítačem. Piezoelektrický posuv je v sestavě zapojen jako akční člen, který je schopen v rozsahu několika set nanometrů měnit délku rezonátoru od střední hodnoty 150 mm, a tedy i posouvat společné měřicí zrcadlo obou interferometrů.



Obrázek 2. Délkový rozdíl mezi měřením pomocí optického rezonátoru a inkrementálním interferometrem

Po justáži sestavy bylo provedeno vzájemné porovnání stupnic obou interferometrů postupným cyklováním řídicího napětí na piezoelektrickém posuvu. Následně byl stanoven rozdíl mezi délkovými měřeními pomocí optického rezonátoru a inkrementálního interferometru, viz Obr. 2.

Standardní odchylka tohoto vzájemného porovnávacího měření byla vypočtena na 1,12 nm a jako markantní chybový signál se zde projevuje periodická nelinearita stupnice inkrementálního interferometru, která je způsobena amplitudovým a fázovým zkreslením výpočtu interferenční fáze z kvadraturních signálů interferometru. Je potřeba dále uvést, že naše metoda měření délky optickým rezonátorem má ultimátní hodnotu relativního rozlišení, neboť délka rezonátoru pro maximální zápornou výchylku piezoposuvu je 149,999 750 mm a pro maximální výchylku 150,000 250 mm, čemuž odpovídá rozsah polohování piezoposuvu 500 nm. Relativní rozlišení naší metody tak dosahuje hodnoty až 10^{-9} při zachování absolutní stupnice měření.

Poděkování

Metodologický výzkum byl podpořen GA ČR (projekt GB14-36681G). Další práce byly podporovány Akademií Věd ČR, projekt RVO: 68081731 a Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR (LO1212) spolu s Evropskou komisí (ALISI No. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

Literatura

- [1] O. Cip et al., Meas. Sci. Technol., 18:2005-2013, 2007
- [2] T. Udem et al., Topics in Applied Physics: Few-Cycle Pulse Generation and its Application, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 95: 295-316, 2004
- [3] L. Pravdova et al. SPIE MEASUREMENT SYSTEMS FOR INDUSTRIAL INSPECTION IX Book Series: Proceedings of SPIE Volume: 9525, 95254K, 2015

ÚČINNÝ PRIEREZ DVOJFOTÓNOVEJ ABSORPCIA NOVÝCH DERIVÁTOV BENZOTIAZOLU V INFRAČERVENEJ OBLASTI

Marek Pribus¹, Eva Noskovičová¹, Monika Jerigová^{1,2}, Lenka Slušná¹, Ivica Sigmundová¹, Peter Magdolen¹, Pavol Zahradník¹, Dušan Lorenc², Dušan Velič^{1,2}

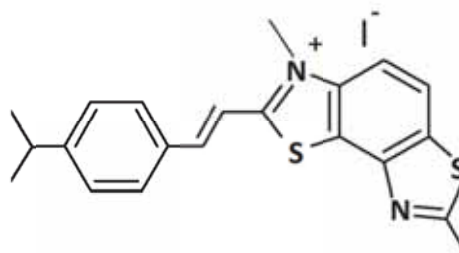
¹Katedra fyzikálnej a teoretickej chémie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Ilkovičova 6, 84215, Bratislava, Slovenská republika

²Medzinárodné laserové centrum, Ilkovičova 3, 84104, Bratislava, Slovenská republika
marek.pribus@gmail.com

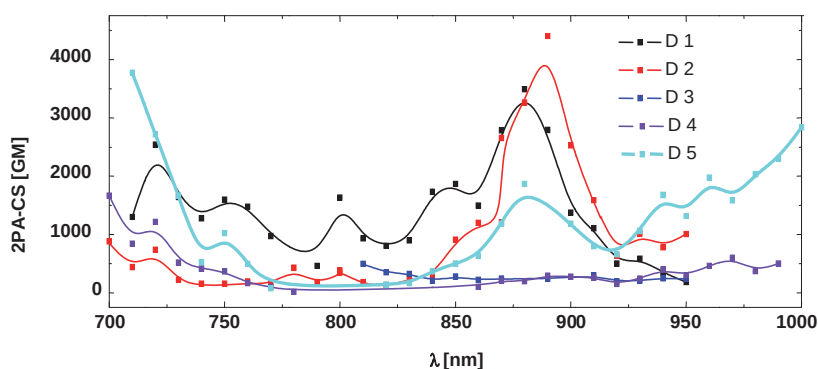
Obor: dvojfotónová absorpcia a nelineárna optika

Dvojfotónová absorpcia je využívaná najmä v biologických vedách pri fluorescenčnom zobrazovaní. V súčasnosti rastie dopyt po zlúčeninách, ktoré by sa dali použiť na fluorescenčné značenie,[1,2] a to najmä v rozsahu vlnových dĺžok od 800 nm do 900 nm, prevažne pre ultrarýchle systémy (Ti:zafír) pracujúce v tomto rozsahu. Medzi takéto zlúčeniny vhodné na fluorescenčné značenie patria aj deriváty benzotiazolov. Účinnosť dvojfotónovej absorpcie je možné stanoviť nepriamo pomocou fluorescenčnej metódy [3]. Laserové žiarenie vzbudí molekuly vzorky v roztoku a vznikajúci fluorescenčný signál je následne detegovaný spolu s referenčnou látkou. Fluorescenčné signály vzorky a štandardu sa porovnávajú a určí sa účinný prierez dvojfotónovej absorpcie (2PA-CS).

Indukovaná dvojfotónová fluorescencia derivátov benzotiazolu bola nameraná v toluénových roztokoch s koncentráciou $1 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, pritom štandard (rodamín B) bola nameraný v metanolovom roztoku s rovnakou koncentráciou. Vzorky boli vzbudené 150 fs pulzmi optického parametrického zosilňovača v rozsahu vlnových dĺžok od 700 do 1000 nm.



Obr. 1. Štruktúra derivátu benzotiazolu D3



Obr 2. Závislosť účinného prierezu dvojfotónovej absorpcie rôznych derivátov benzotiazolu (D1 – D5) od budiacej vlnovej dĺžky.

Deriváty benzotiazolov vykazujú vysokú hodnotu účinného prierezu dvojfotónovej absorpcie v rozsahu vlnových dĺžok od 800 – 900 nm a preto sú vhodné ako fluorescenčné značky vo fluorescenčnej mikroskopii a pri biozobrazovaní.

- [1] L. S. Chang, R. B. Cho, Two-photon probes for biomedical applications. BMB Rep. 2013; 46(4): 188–194. doi: 10.5483/BMBRep.2013.46.4.045.
 [2] G.S. He, L-S. Tan, Q. Zheng, P.N. Prasad, Multiphoton absorbing materials: Molecular designs, characterizations, and applications, Chem. Rev. 2008, 108, 1245-1330.
 [3] Ch. Xu, W.W. Webb, Measurement of two/photon excitation cross section of molecular fluorophores with date from 690 to 1050 nm. J. Opt. Soc. Am. 1996, 481-491.

This research is sponsored by NATO's Emerging Security Challenges Division in the framework of the Science for Peace and Security Programme.

Dalšie oblasti záujmu s ponukou spolupráce:

- Statická fluorescencia a časovo rozlíšená fluorescencia
- Časovo rozlíšená absorpcia
- Časovo rozlíšená femtosekundová spektroskopia v strednej IČ oblasti
- Generácia THz v exotických materiáloch
- Určovanie hyperpolarizovateľnosti a účinných prierezov 2- a 3- fotónovej absorpcie
- Určovanie Kerrovoho indexu lomu metódou Z-scan

FREKVENČNĚ STABILIZOVANÝ POLOVODIČOVÝ LASEROVÝ ZDROJ PRO INTERFEROMETRII S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM

Šimon Řeřucha*, Václav Hucl, Miroslava Holá, Martin Čížek, Tuan Minh Pham, Lenka Pravdová, Josef Lazar a Ondřej Číp

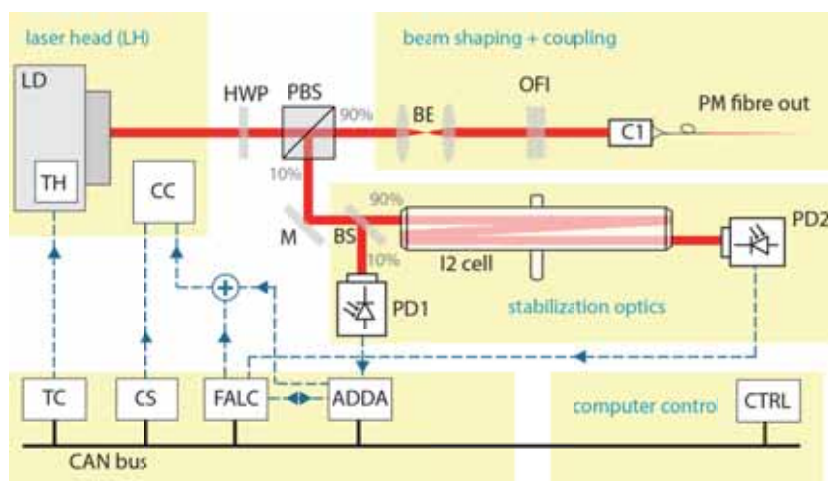
Ústav přístrojové techniky AV ČR, odd. Koherenční optika

Královopolská 147, 612 64 Brno, www.isibrno.cz

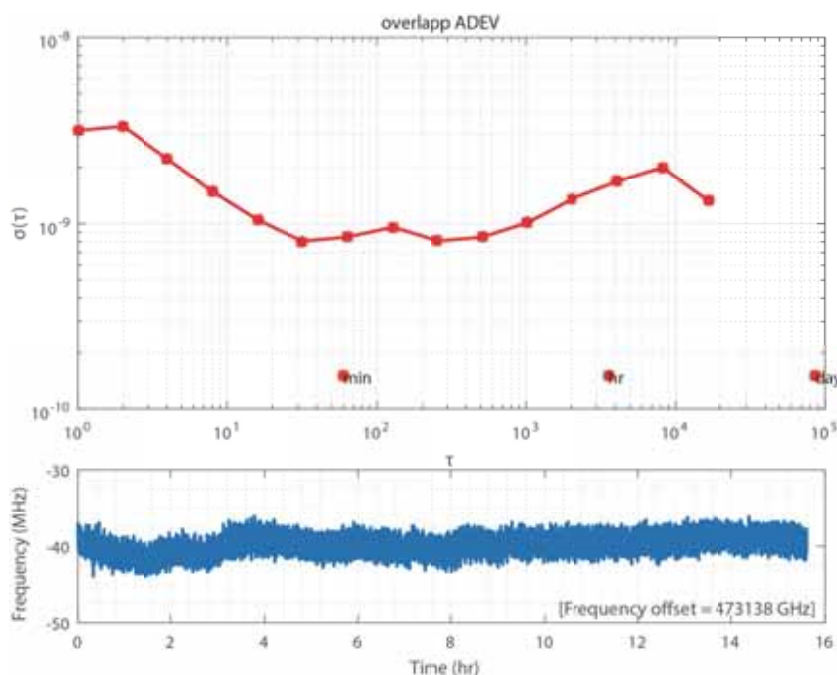
*res@isibrno.cz

Obor: laserová interferometrie, stabilizace diodových laserů, embedded systémy, architektura SW

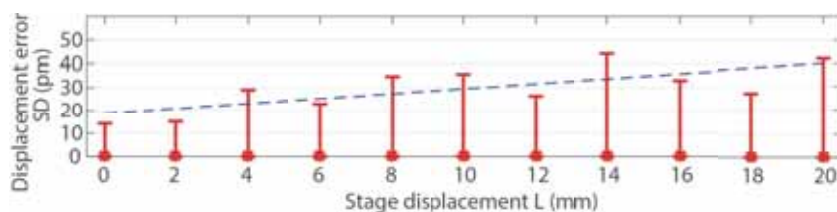
Sestavili jsme experimentální laserový systém, založený na laserové diodě typu DBR (Distributed Bragg Reflector), frekvenčně stabilizovaný na absorpční čáře v parách molekulárního jodu. Laserový systém operuje na vlnové délce ležící v blízkosti vlnové délky stabilizovaných helium-neonových (He-Ne) laserů (tj. 633 nm), které představují de-facto standardní laserový zdroj v oblasti metrologie délek. Cílem bylo ověřit, že parametry takového systému umožní jej využít jako náhradu právě He-Ne laserů, která navíc umožní větší rozsah a větší šířku pásma přeladění optické frekvence a vyšší výkon. Experimentálně jsme ověřili základní charakteristiky laserového zdroje, které jsme dále porovnali s charakteristikami typického frekvenčně stabilizovaného He-Ne laseru. K tomu jsme využili experimentální uspořádání blízké typickým využitím laserové interferometrie v metrologii délek. Výsledky prokazují, že laserový systém, založený na laserové diodě DBR představuje vhodný zdroj pro aplikace v (nano)metrologii délek tím, že zachovává fundamentální požadavky na laserový zdroj jako frekvenční stabilita a koherenční délka a zároveň umožňuje přeladění optické frekvence o více než 0.5 nm s šířkou pásma modulace až několik MHz, vyšší výkon v řádu několika mW a díky stabilizaci i fundamentální metrologickou návaznost.



Obrázek 1: Blokové schéma laserového systému: laserová hlava (LH) zahrnující laserovou diodu (LD) s integrovanými prvky pro řízení teploty čipu (TH) a proudový řadič (CC); řídicí elektronika zahrnuje regulátor teploty (TC), nízkošumový napájecí zdroj (PS), analogový PID kontrolér (FALC) a analogově-digitální / digitálně-analogový řídicí modul (ADDA); všechny tyto jsou ovládány prostřednictvím PC software (Ctrl). Optická soustava obsahuje beam-expander (BE), Faradayův izolátor (OFI), kolimátor (C1), půlvlnnou desku (HWP), polarizační dělič (PBS), zrcadlo (M), částečně transparentní zrcadlo (BS), fotodetektory (PD1, PD2) a jodovou kyvetu (I2 CELL)



Obrázek 2: Záznam průběhu optické frekvence laseru a odpovídající graf Allanových odchylek



Obrázek 3: Shoda měření dvojice protiběžných interferometrů pro $T = 60$ sekund s šířkou pásma 0–15 kHz. Přerušovaná čára naznačuje přírůstek šumu způsobený laserem se zvýšeným rozdílem optických drah

Poděkování

Tento metodologický výzkum je podporován Grantovou agenturou ČR, projekt č. GB14-36681G. Výzkumná infrastruktura byla podpořena s přispěním Evropské komise a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, projekty č. LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a dále Akademií věd České republiky, projektem RVO:68081731

Reference

- [1] Eagleyard Photonics, GmbH.. url: http://www.eagleyard.com/uploads/tx_tdropductstorage/EYP-DBR-0633-00010-2000-TOC03-0000.pdf, 2013. Accessed on 12 Jan 2015.
- [2] J. Lazar and O. Cip. Rev. Sci. Instrum., 68(10):3660-3665, 1997.
- [3] A. J. Wallard. J. Phys. E, 5(9):926, 1972
- [4] J. Lazar et al. Metrologia, 46(5):450, 2009..
- [5] A. Yacoot and M. J. Downs. Meas. Sci. Technol., 11(8):1126{1130, 2000.
- [6] J. Lazar, P. Klapetek et al. Meas. Sci. Technol., 20(8):084007, 2009.
- [7] B. Mikel, O. Cip, and J. Lazar. Phys. Scr., 2005(T118):41, 2005.

OPTICKÁ CHARAKTERIZÁCIA POLYTIOFÉNOV PRE PRÍPRAVU SOLÁRNYCH ČLANKOV

**Lenka Slušná¹, Eva Noskovičová¹, Dimitrij Bondarev³ Jaroslav Mosnáček³,
Dušan Lorenc², Dušan Velič^{1,2}**

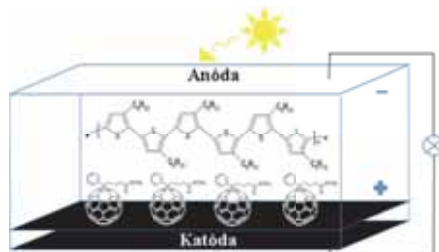
¹Katedra fyzikálnej a teoretickej chémie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Ilkovičova 6, 84215, Bratislava, Slovenská republika

²Medzinárodné laserové centrum, Ilkovičova 3, 84104, Bratislava, Slovenská republika

³Ústav Polymérov, Slovenská akadémia vied, Dúbravská cesta 9, 845 41 Bratislava 4
slusnal@gmail.com

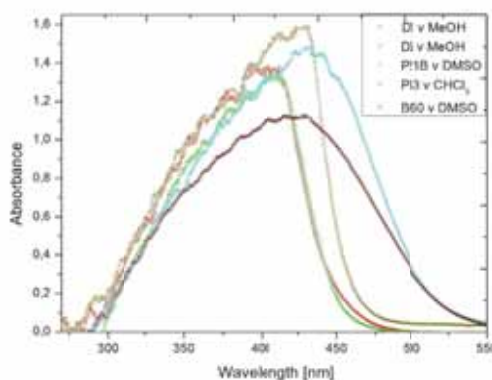
Obor: časovo rozlíšená fluorescencia a absorpcia

Organické solárne články sa skladajú z elektrónových donorov, zvyčajne polymérov, ktoré ako základnú stavebnú jednotku obsahujú polytiofény alebo iné heterocykly, a elektrónových akceptorov, napríklad fenylovaných fullerénov. Tieto polyméry sú vodivé vďaka veľkému systému konjugovaných π -väzieb, čo je podmienkou pre ich využitie v organických fotovoltických článkoch. Po ožiarení polyméru sa excituje elektrón, ktorý prechádza z polymérneho HOMO orbitálu (Highest Occupied Molecular Orbital) do fullerénového LUMO orbitálu (Lowest Unoccupied Molecular Orbital).

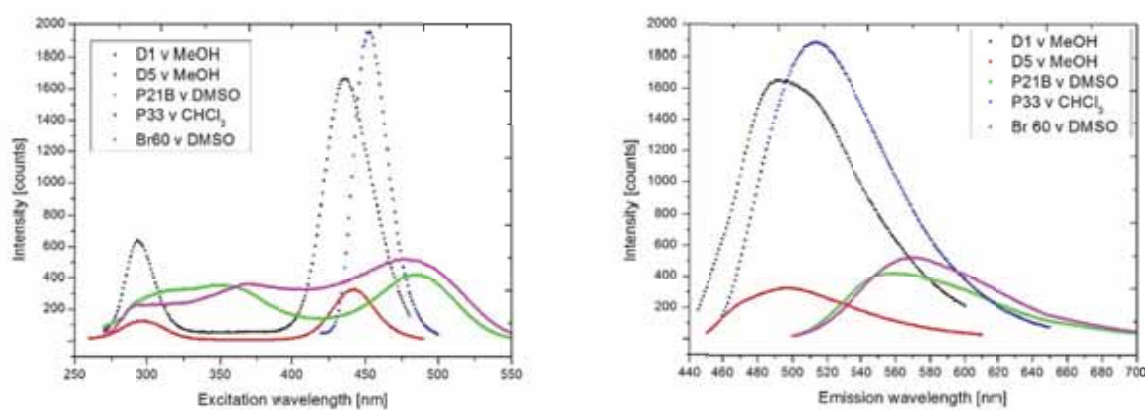


Obr. 3 Schéma organického fotovoltického článku

Účinnosť organických solárnych článkov sa v súčasnosti pohybuje v rozmedzí do 10 % [1, 2]. V predkladanom príspevku boli technikami statickej spektroskopie študované nové perspektívne triedy polytiofénov pripravené v rámci Ústavu polymérov, SAV v Bratislave. Namerané boli absorpčné spektrá v UV-VIS oblasti a excitačné a fluorescenčné spektrá. Navrhované systémy budú ďalej študované časovo rozlíšenou fluorescenčnou a absorpčnou spektroskopiou.



Obr. 2 Absorpčné spektrá v UV/VIS oblasti



Obr. 3 Excitačné a emisné spektrá

[1] Kingsley, James W., Adam Green, and David G. Lidzey. "Fabrication and optimization of P3HT: PCBM organic photovoltaic devices." *SPIE Photonic Devices Applications*. International Society for Optics and Photonics, 2009.

[2] Ntwaeaborwa, O. M., et al. "Post-fabrication annealing effects on the performance of P3HT: PCBM solar cells with/without ZnO nanoparticles." *Physica B: Condensed Matter* 407.10 (2012): 1631-1633.

This research is sponsored by NATO's Emerging Security Challenges Division in the framework of the Science for Peace and Security Programme.

Dalšie oblasti záujmu s ponukou spolupráce:

- Časovo rozlíšená fluorescencia a absorpcia
- Časovo rozlíšená femtosekundová spektroskopia v strednej IČ oblasti

TROJFREKVENČNÁ ZOSTAVA PRE EXPERIMENT S OPTICKÝM ČERPANÍM A THZ SONDOVANÍM

Eva Noskovičová¹, Vojtech Szöcs², Dušan Lorenc², Eduard Jáné³ a Dušan Velič^{1,2}

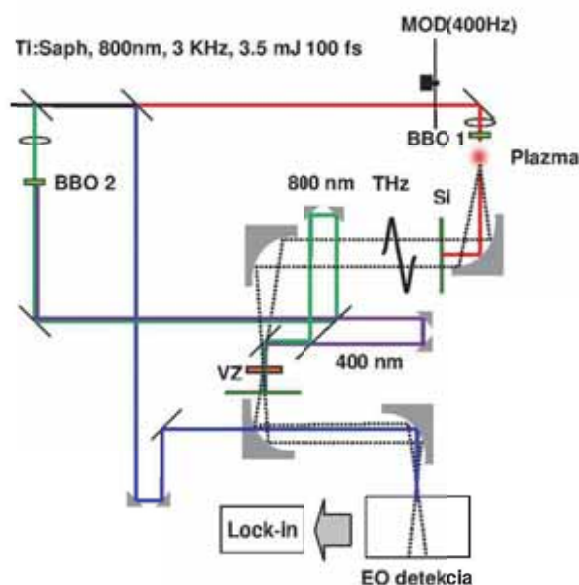
¹Katedra fyzikálnej a teoretickej chémie, Univerzita Komenského, Bratislava

²Medzinárodné laserové centrum, Bratislava, www.ilc.sk, velic@ilc.sk

³Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Slovenská technická univerzita, Bratislava

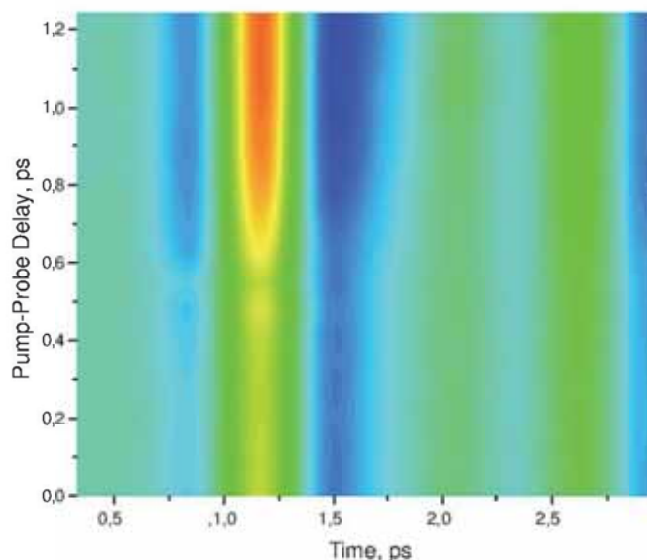
Obor: Generácia THz žiarenia, THz spektroskopia

V rámci Laboratória ultrarýchlej laserovej fotoniky (MLC, Bratislava) bolo vybudované pracovisko pre časovo rozlíšené experimenty v usporiadaní na prechod s optickým čerpaním a THz sondovaním. Optická excitácia umožňuje nezávislé použitie ultrakrátkych impulzov s časovou dĺžkou 100 fs a centrálnou vlnovou dĺžkou voliteľnou medzi 800 nm alebo 400 nm s energiou v impulze do 70 μ J, resp. do 10 μ J. THz sondovací impulz je budený dvojfrekvenčným mechanizmom v plazme [1]. Výstupný signál je detekovaný prostredníctvom elektrooptickej detekcie (obr.1).



Obr. 1 Experimentálna zostava pre časovo rozlíšený experiment s optickou excitáciou a THz sondovaním v usporiadaní na prechod.

Experimentálna zostava umožňuje štúdium ultrarýchlej dynamiky nosičov v tuhých látkach s perspektívnym využitím pre anorganické aj organické polovodiče. V rámci demonštračného experimentu bola študovaná dynamika nosičov náboja vo vzorke GaAs (obr.2) pričom bola zistená veľmi dobrá zhoda s publikovanými údajmi [2, 3]. Z obr.2 vyplýva, že pri vzájomnom časovom prekrytí čerpaceho a sondovacieho zväzku dochádza k rýchlemu poklesu transmitancie vo vzorke, ktorý súvisí s indukovanou zmenou vodivosti.



Obr. 2 Zmena transmitancie THz sondovacieho impulzu pri prechode vzorkou GaAs pre excitáciu vlnovou dĺžkou 800 nm.

1. M. Thomson et. al., Laser Photon Rev. 1, 349 (2007)
2. M.C. Beard et. al., Phys. Rev. B 62, 15764 (2000).
3. H.A. Hafez et. al., J. Opt. 18, 093004 (2016)

This research is sponsored by NATO's Emerging Security Challenges Division in the framework of the Science for Peace and Security Programme.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Časovo rozlišená femtosekundová spektroskopia v optickej a strednej IČ oblasti
- Generácia THz v exotických materiáloch
- Laserová ionizácia/postionizácia
- 2- a 3- fotónovej absorpcia a hyperpolarizovateľnosť
- Femtosekundový Kerrov index lomu

KOMPAKTNÍ VYHODNOCOVACÍ JEDNOTKA PRO FBG SENZORY

Radim Šifta, Radek Helán, Josef Eliáš, Lukáš Kočí, František Urban

NETWORK GROUP, s.r.o. – Special Fiber Optics

Olomoucká 91, 627 00 Brno

GSM: +420736625794

Mail: r.sifta@nwg.cz

Web: <http://sfo.nwg.cz>



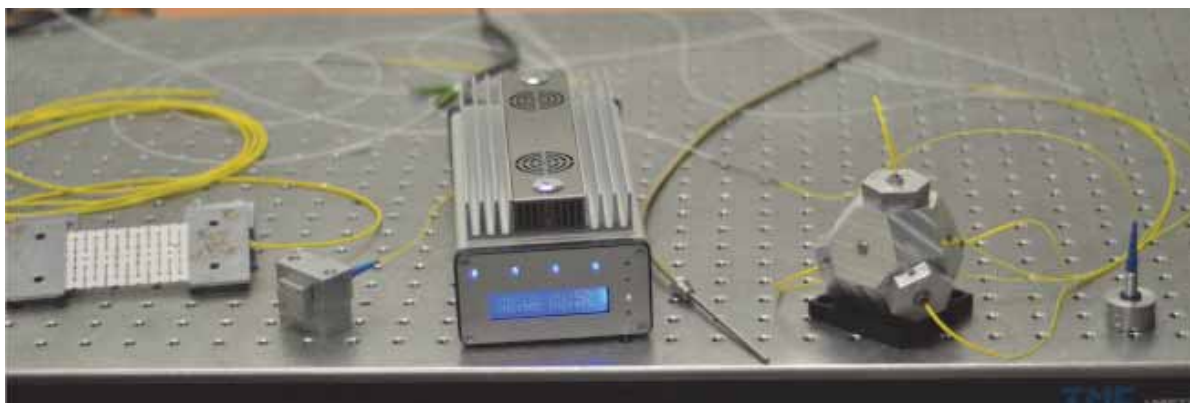
Obor: Výzkum a vývoj optických prvků a senzorických systémů

Společnost NETWORK GROUP, s.r.o. působí na trhu s komunikačními systémy již od roku 1995. Jedná se o malou společnost, která se dynamicky rozvíjí s ohledem na potřeby trhu. Svou činnost postupně rozvinula také do oblasti elektro-výroby, a posléze se také začala věnovat výzkumu a vývoji v oblasti speciální vláknové optiky. V současné době společnost disponuje pracovištěm pro výzkum, vývoj a výrobu pokročilých optických vláknových prvků, které jsou využívány k senzorickým účelům především do vyspělých průmyslových aplikací.

Stěžejní částí technologického zázemí ve společnosti NETWORK GROUP je pracoviště pro výrobu Braggových vláknových mřížek (FBG) a Fabry-Perotových rezonátorů, které nabízí především pro využití v senzorických systémech, ale i pro další oblasti kde je zapotřebí filtrace optického signálu, např. v oblasti telekomunikací.

Díky možnosti vlastní výroby těchto prvků vyvíjíme celou řadu senzorů neelektrických veličin, jako je např. teplota, tlak, tah, vibrace, náklon aj. Pro tyto senzorické prvky nabízíme také vlastní řadu vyhodnocovacích jednotek zaměřených dle konkrétní aplikace. Současně se věnujeme také vývoji laditelných optických filtrů založených na bázi FBG vláknových mřížek.

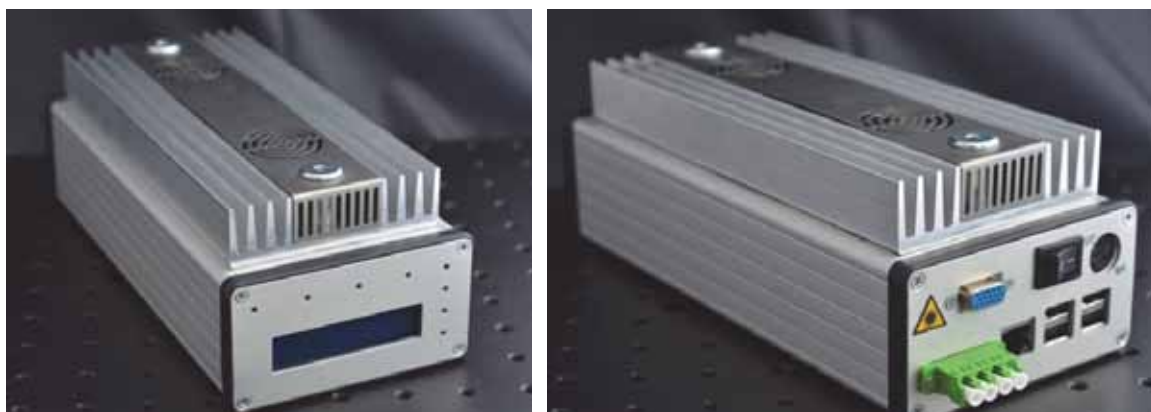
K našim senzorům nabízíme vlastní vyhodnocovací jednotky podle konkrétní aplikace. V současné době nabízíme vysoce modulární a přesnou vyhodnocovací jednotku, která je vhodná především pro větší počet vyhodnocovaných senzorů současně. Pomocí takovéto jednotky monitorujeme např. pohyb jaderných kontejnmentů v jaderné elektrárně Temelín.



Obr. 1: Vyhodnocovací jednotka s FBG senzory

Kromě komplexní modulární vyhodnocovací jednotky se vývojový tým zabývá také vývojem a výrobou vyhodnocovacích jednotek pro jednoúčelové aplikace, a to jak pro měření statických/pomalých tak i dynamických dějů. V současné době je dokončena kompaktní jednotka pro měření statických nebo pomalých dějů, např. pro vyhodnocování senzorů instalovaných na mostních konstrukcích, budovách apod. Mezi hlavní přednosti této jednotky patří bezkonkurenční cena a vysoká přesnost měření. Jednotka disponuje čtyřmi fyzickými

kanály, přičemž na každý kanál je možné připojit až čtyři senzory. Celkový spektrální rozsah je 7 nm při skenovací periodě 3,5 s. Na rozdíl od běžných vyhodnocovacích jednotek je zařízení s rozměry 220x100x80 mm opravdu kompaktní, přičemž umožňuje paralelní vyhodnocování až 16 FBG senzorů současně. S rozlišením 0,1 pm a absolutní přesností ± 1 pm je možné toto zařízení zařadit mezi nejpřesnější na trhu vyhodnocovacích jednotek. Na základě konkrétní aplikace senzorů je možné přizpůsobit software vyhodnocovací jednotky, což umožňuje měření různých veličin současně, např. teploty a tlaku. V jednotce je také implementován mikropočítač, díky kterému je možné nastavit např. posílání dat v daném formátu na ethernetový port, vytvoření webového rozhraní, funkcionality serveru, apod.



Obr. 2: Vyhodnocovací jednotka pro statické / pomalé děje

- Kompaktní měřicí platforma s unikátním hardwarovým řešením.
- Pro vyhodnocování statických/pomalých dějů.
- Výrazně nižší cena v porovnání s konkurenčními přístroji.

Parametry:

- Měřicí rozsah 7 nm; měřicí perioda 3,5 s.
- 4 fyzické kanály, 4 senzory / kanál.
- Rozlišení 0,1 pm; absolutní přesnost ± 1 pm.
- Vývoj software pro konkrétní aplikace.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Nabízíme spolupráci při vývoji a výrobě senzorů založených na vláknových mřížkách a systémů pro jejich vyhodnocování, kompletní senzorické systémy na míru.
- Nabízíme zakázkovou výrobu FBG mřížek.
- Nabízíme spolupráci ve vývoji aplikací využívající FBG.
- Nabízíme zakázkový vývoj FBG filtrů pro telekomunikační účely.
- Hledáme obchodního partnera pro rozšíření produktového portfolia do zahraničí.
- Hledáme partnera pro implementaci senzorických systémů.

ADAPTIVNÍ PŘIJÍMAČ PRO PLNĚ FOTONICKÝ SPOJ

Otakar Wilfert, Zdeněk Kolka, Peter Barčík, Viera Biolková

Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav radioelektroniky

Technická 12, 616 00 Brno, Telefon: +420 54114 6565

E-mail: wilfert@feec.vutbr.cz

<http://www.feec.vutbr.cz/UREL>

<http://www.urel.feec.vutbr.cz/OptaBro/>

Obor: Optické komunikace, laserová technika, vlnová optika

Na pracovišti VUT v Brně je již více než 20 let zkoumáno použití laseru v optické bezkabelové komunikaci (OBK). Motivací pro nasazení laseru v OBK byly výhody OBK související se základními vlastnostmi laserového záření. Laserový vysílač je schopen generovat svazek s divergencí v řádech μ rad. Optický svazek může obsahovat více optických kanálů, z nichž některý může mít funkci majáku sloužícího k přesnému zamíření laserového vysílače na optický přijímač. Kanály sloužící k přenosu signálu mohou pracovat s vysokou přenosovou rychlostí, až Tb/s.

Celosvětový vývoj vysokokapacitních komunikačních sítí nyní směřuje k plně fotonizaci, kdy dochází k postupnému odbourávání elektro-optické (E/O) konverze signálu na přenosové trase. Proto se v současné době výzkumný tým na UREL FEKT VUT v Brně věnuje vývoji plně fotonického systému OBK, který kromě přenosu standardních datových signálů může sloužit k i přenosu přesných optických kmitočtů a doplnit tak stávající vláknovou infrastrukturu.

Optický spoj je rozdělen na vnitřní jednotku a vnější jednotu. Vnější jednotka je koncipovaná jako opticky transparentní. Obsahuje pouze elektroniku pro hrubé a jemné směřování. Vysílaný a přijímaný signál je veden optickými vlákny do vnitřní jednotky, která může být provedena jako opticky transparentní nebo jako E/O převodník pro připojení na klasickou síť.



Experimentální vnitřní jednotka

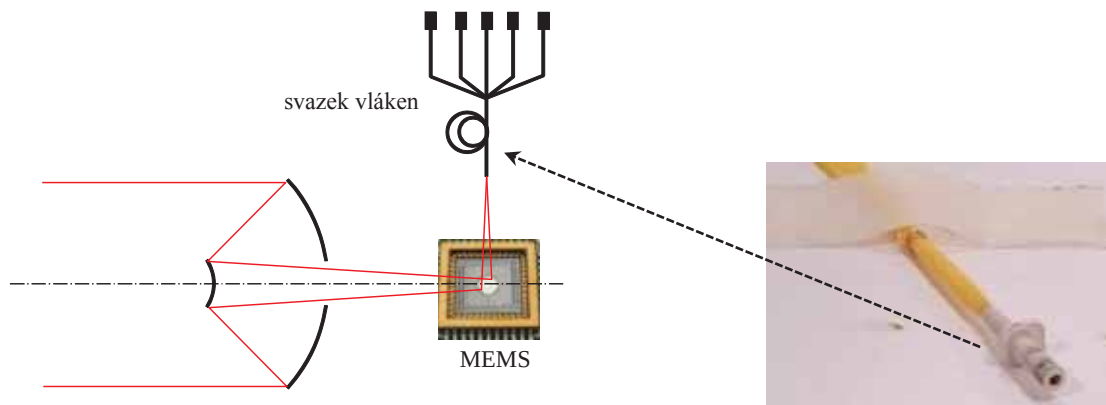


Experimentální vnější jednotka s optikou Cassegrain

V současné době probíhají finální experimenty týkající se vývoje adaptivního plně fotonického přijímače pro OBK. Pro příjem optického svazku byl zvolen teleskop Cassegrain – Schmidt s průměrem hlavního zrcadla 120 mm, který se vyznačuje menší sférickou vadou ve srovnání s cenově odpovídajícím čočkovým objektivem stejné velikosti.

V ohnisku optické soustavy je umístěno optické vlákno. Relativně malý průměr jádra klade extrémní nároky na směřování přijímače za podmínek atmosférické turbulence a otřesů

upevňovacích konzol. K hrubému směřování slouží platforma s krokovými motorky a k jemnému směřování pak zrcadlo upevněné na MEMS aktuátoru. Zpětnou vazbu poskytuje detektor se svazkem vláken. Optické vlákno umístěné uprostřed svazku slouží pro příjem optického signálu. Sledováním výkonu v okolních vláknech je možné získat informaci o poloze (či spíše těžišti) stopy svazku.



Princip adaptivního přijímače se svazkem vláken a prvkem MEMS.

Díky miniaturním rozměrům dosahuje použitý aktuátor MEMS šířky pásma 350Hz při maximálním zdvihu $\pm 1^\circ$. Vývojové práce jsou v současné době zaměřeny na minimalizaci vazebního útlumu a optimální koordinaci zásahů hrubého a jemného směřování. Jedná se o problematiku, kde řešitelský tým uvítá případnou spolupráci.

Popsané výzkumné aktivity jsou podpořené grantovým projektem TA ČR č. TH01011254 - *Soubor prvků pro fotonickou komunikaci*.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Simulace a měření vlivu nestacionární a nehomogenní turbulentní atmosféry na optický svazek.
- Generování negaussovských svazků, řešení otázek difrakce.
- Vývoj plně fotonické technologie OBK.
- Měření, klasifikování a potlačení vlivu atmosférické turbulence na kvalitu přenosu atmosférickým optickým kanálem.
- Praktický vývoj optických bezkabelových spojů pro experimentální účely.

SYNCHRONNĚ ČERPANÉ OPO PRO VNITROREZONÁTOROVOU INTERFEROMETRII

Alena Zavadilová, Václav Kubeček, Jan Šulc, David Vyhlídal

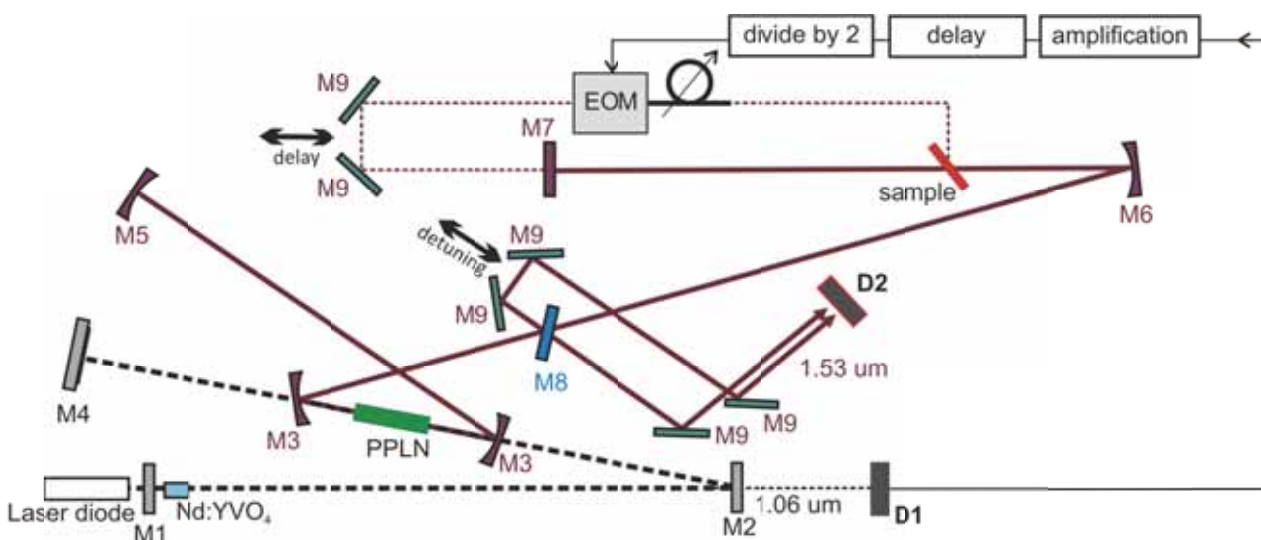
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Břehová 7, 115 19 Praha 1

e-mail: alena.zavadilova@fjfi.cvut.cz

http://www.fjfi.cvut.cz/

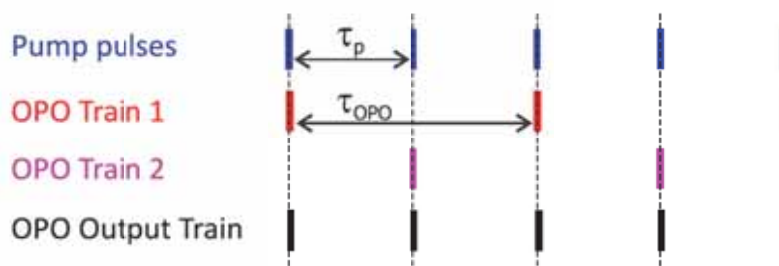
Obor: Laserová technika

Je zde prezentován laserový systém vhodný pro přesnou vnitrorezonátorovou fázovou interferometrii umožňující měření zánějů mezi dvěma nezávislými frekvenčními sledy impulsů obíhajícími v jednom rezonátoru. Aplikací by měly být senzory, kde měřená fyzikální veličina může být převedena na fázový rozdíl mezi těmito dvěma sledy. Systém sestává se SESAM modelovaného pikosekundového diodově čerpaného Nd:YVO₄ laseru pracujícím na vlnové délce 1.06 μm a přeladitelného lineárního vnitrorezonátorově čerpaného optického parametrického oscilátoru (OPO) založeném na vícemřížkovém MgO:PPLN krystalu. Přeladitelnost při pokojové teplotě je v rozsahu 1480-1620 nm, pro dosažení požadované vlnové délky 1534 nm je nastavena teplota 125°C. Zjednodušené schéma je uvedeno na Obr. 1, podrobnější popis systému je uveden například v [1].



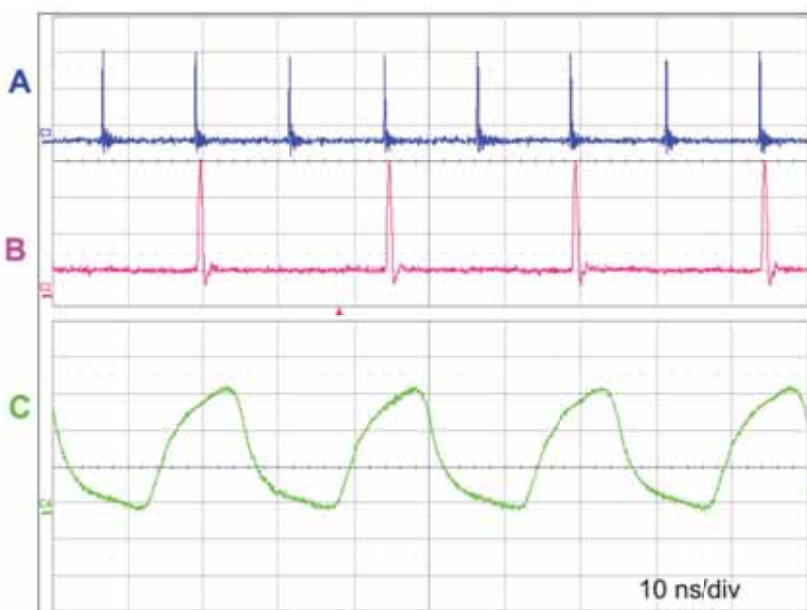
Obr. 1 Zjednodušené Schéma diodově čerpaného mode-lockovaného Nd:YVO₄ laseru s OPO. PPLN - MgO:PPLN krystal, EOM - elektrooptický modulátor, M4 – SESAM, D1 – detektor signálu čerpacího laseru, D2 – detektor pro měření zánějů.

Optická délka OPO rezonátoru byla nastavena na dvounásobnou délku než jakou má čerpací rezonátor. V této konfiguraci vnikají v OPO rezonátoru dva sledy sice se stejnou opakovací frekvencí, jakou má čerpací laser, ale tento OPO signál sestává ze dvou rozdílných sledů impulsů s frekvencí poloviční. Způsob generace je uveden na Obr. 2.



Obr. 2 Schéma SPOPO generace při kvazi-synchronním čerpání.

Pro účely pump-probe měření byl pro vyvolání optického Kerrova jevu v testovaném materiálu umístěném uvnitř OPO rezonátoru použit signál OPO, který byl synchronizován, vydělen dvěma a zesílen (RF- dělička, elektrooptický modulátor a vláknový zesilovač). Proces vytváření požadované poloviční, patřičně sfázované frekvence je zachycen na Obr. 3. Vliv tohoto svazku na vzorek je detekován sondovacím OPO sledem impulsů. Druhý sled OPO impulsů je použit jako referenční. Aby bylo možné změřit záznějovou frekvenci, jsou oba tyto svazky náležitě zpožděny a přivedeny na fotodetektor, kde dochází k jejich interferenci. Ze záznějové frekvence - fázové modulace již je možné určit požadovanou veličinu, tedy nelineární index lomu.



Obr. 3. A-Sled čerpacích impulsů, B-sled OPO po vydělení, C- sled obdélníkových impulsů odvozený od čerpacího laseru a vydělený dvěma.

Poděkování:

Výzkum byl podpořen GAČR P102 /13/8888.

Reference:

- [1] A. Zavadilová, D. Vyhlídal, V Kubeček, and Šulc. Subharmonic synchronously intracavity pumped picosecond optical parametric oscillator for intracavity phase interferometry. *Laser Physics Letters*, 11:125403, 2014

PARTNEŘI A SPONZOŘI KONFERENCE:



WWW.OPTIXS.CZ



WWW.MIT-LASER.CZ



WWW.NWG.CZ



Centrum pro inovace a transfer technologií



Lasery, fotonika
a jemná mechanika

OptiXs



Název: Elektronický sborník příspěvků multioborové konference
LASER56

Editor: Bohdan Růžička

Vydavatel: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

Vydáno v roce: 2016

Vydání: první

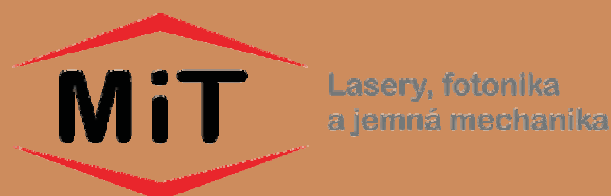
Náklad: 65 ks

Za obsahovou a jazykovou úpravu odpovídají autoři příspěvků.

ISBN 978-80-87441-19-0



Centrum pro inovace a transfer technologií



© 2016, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

ISBN 978-80-87441-19-0