



AKADEMIE VĚD  
ČESKÉ REPUBLIKY

Centrum pro inovace a transfer technologií



Lasery, fotonika  
a jemná mechanika

## Sborník příspěvků multioborové konference LASER54



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



© 2014, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

ISBN 978-80-87441-13-8

Zámecký hotel Třešť, 29. října - 31. října 2014



Sborník příspěvků multioborové konference

**LASER54**

Zámecký hotel Třešť, 29. října – 31. října 2014

© 2014, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

ISBN 978-80-87441-13-8

# ÚVODNÍ SLOVO

Od registrace světového patentu na první funkční přístroj vydávající koncentrovaný svazek červeného světla – tehdy pouze v pulzním režimu – uběhlo již více než půl století. Akronym anglického *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* se stal elegantním názvem nového vynálezu, který jako *LASER* známe dodnes. Jméno je ale také tím jediným, co se od zrodu této technologie nezměnilo: Věda a výzkum zkrátka stagnaci nemají v lásce. Rozmanitost využití a široká škála výkonnosti, které se za zkratkou *LASER* skrývají i čtyřiapadesát let po jejím narození, poukazují na úspěšný vědecký vývoj a nemalý význam laserových technologií pro společnost. Záběr laserů je doopravdy široký. Jejich paprsky tak protínají nejen akademickou půdu, ale i podnikatelskou sféru, a svou cestu si urputně propálily do nejrůznějších oborů lidské činnosti.

Plejáda profesionálů z České republiky i ze zahraničí, která se letos účastní konference LASER54, jen potvrzuje tuto rozmanitost a zároveň vůli ke spolupráci a navázání inspirativních profesních či osobních vztahů.

Děkujeme za vaši podporu.

V Brně dne 16. října 2014

Bohdan Růžička  
za organizační tým



Lasery, fotonika a jemná mechanika



### Pi-MAX 4 emICCD

První kamera na světě, která kombinuje ICCD kameru s EMCCD senzorem.

Princeton Instruments



### Posuvy XMS

Řada ultrapřesných posuvů s lineárním motorem, minimální krok až 1nm.

Newport



### Picomotor

Délka dráhy až 50 mm, krok < 30 nm.

New Focus



### Optické filtry

Nejkvalitnější optické filtry s nejstrmějšími hranami.

Semrock



### BeamTrack

Měření výkonu, polohy a průměru laserového svazku současně pomocí jednoho přístroje.

Ophir / Spiricon



### QUASAR

Hybridní vláknový laser. Frekvence 0 – 1MHz, průměrný výkon 60W @ 355 nm a 75W @ 532nm.

Spectra-Physics

KOMPLETNÍ ŘEŠENÍ PRO PRŮMYSL A VĚDU

**OBSAH**

VÝVOJ A OPTIMALIZACE LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ VE VCSVT	9
DETEKCE STŘEDU INTERFERENCE PROUŽKU V INTERFEROMETRII NÍZKÉ KOHERENCE	10
ELEKTRONIKA PRO REDUKCI ŠUMU LASEROVÉ DIODY S VYUŽITÍM NEVYVÁŽENÉHO VLÁKNOVÉHO INTERFEROMETRU	12
NOVÉ CENTRUM, NOVÉ MOŽNOSTI	14
STUDIUM CHOVÁNÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU PŘES DÉLKOVÝ ŠUM PŘI INTERFEROMETRICKÉM MĚŘENÍ	16
ŠIROCE LADITELNÝ GENERÁTOR PRO SPEKTROSKOPII VE STŘEDNÍ INFRAČERVENÉ OBLASTI (3100-3600NM)	18
LASEROVÉ STANDARDY PRO INTERFEROMETRII A PŘENOS PŘESNÝCH KMITOČTŮ	20
ELEKTRONIKA PRO STABILIZACI OPTICKÝCH FREKVENČNÍCH HŘEBENŮ	22
FIBER LASER WITH INTELLIGENT ADDITIONAL FUNCTIONS	24
SPECIÁLNÍ OPTICKÁ VLÁKNA – SRDCE THULIOVÝCH A HOLMIOVÝCH VLÁKNOVÝCH LASERŮ A ZESILOVAČŮ	27
SPECIFIC FORMS OF USERS INTERACTION WITH HOLOGRAPHIC OPTICAL TWEEZERS CONTROLLED BY LEAP MOTION	29
FÁZOVÉ MASKY VYROBENÉ ELEKTRONOVOU LITOGRAFIÍ A IONTOVÝM LEPTÁNÍM PRO PŘÍPRAVU VLÁKEN S BRAGGOVÝMI MŘÍŽKAMI	27
OPTICKÁ KOMUNIKACE VOLNÝM PROSTOREM NA PLNĚ FOTONICKÉ BÁZI	33
APLIKACE LASERU PŘI VÝROBĚ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	35
50-LETÉ VÝROČÍ HE-NE LASERŮ V ČESKOSLOVENSKU	37
VYUŽITÍ TERMOGRAFIE PŘI SVAŘOVÁNÍ LASEREM	39
INTERFEROMETRICKÝ SYSTÉM PRO SOUŘADNICOVÉ ODMĚŘOVÁNÍ	42
THE FIRST BORANE LASER	44
ULTRAFAST PLASMAS AT WORK: FROM POSTIONIZATION TO THZ WAVEMIXING	45
OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY PRO MĚŘENÍ DÉLKY, TLAKU, TAHU, TEPLoty A VIBRACÍ	46
ULTRARYCHLÝ LASER INSIGHT DS	48
DIAGNOSTIKA MODOVÉ STRUKTURY LASEROVÉHO SVAZKU	49
DEFORMOVATELNÉ ZRCADLO PRO VÝKONOVÉ TECHNOLOGICKÉ LASERY	50
METODA VYHODNOCENÍ INTERFERENCE POLE PŘI MĚŘENÍ TVARU OPTICKÝCH PLOCH S VYUŽITÍM KORELACE	52
SESTAVA PRO LIDT TESTY OPTICKÝCH KOMPONENTŮ PŘI KRYOGENNÍCH TEPLotÁCH	54
VLÁKNOVÉ OPTICKÉ SOUČÁSTKY PRO VLÁKNOVÉ LASERY V „EYE-SAFE“ SPEKTRÁLNÍ OBLASTI V OKOLÍ 2 MIKROMETRŮ	56
PŘELADITELNÁ LASEROVÁ DIODA NA VLNOVÉ DÉLCE 633NM PRO PŘESNÁ MĚŘENÍ DÉLKY A SPEKTROSKOPII	57
RAMAN TWEEZERS IN MICROFLUIDIC SYSTEM FOR AUTOMATIC ANALYSIS AND SORTING OF LIVING CELLS	59
ANALÝZA OPTICKÉHO DVOU-ZRCADLOVÉHO SKENERU S ČOČKOU PROMĚNNÉ OHNISKOVÉ VZDÁLENOSTI	60
NÁSOBENÍ OPAKOVACÍ FREKVENCE ERBIUM DOPOVANÉHO VLÁKNOVÉHO PULZNÍHO LASERU	62
INTERFEROMETRICKÝ ODMĚŘOVACÍ SYSTÉM PRO ELEKTRONOVÝ LITOGRAF	64
HILASE – NOVÉ LASERY PRO PRŮMYSL A VÝZKUM	66

---

HODNOCENÍ KVALITY KYTAR POMOCÍ HOLOGRAFICKÉ INTERFEROMETRIE	68
DETEKCE ZÁZNĚJŮ V SUBHARMONICKÉM SYNCHRONNĚ VNITROREZONÁTOROVĚ ČERPANÉM OPO	70
OD POUHÉHO TLAČENÍ PO TŘÍDĚNÍ MIKROČÁSTIC A SKLÁDÁNÍ MIKROROBOTKŮ SVĚTLEM	72
JMENNÝ REJSTŘÍK	75
PARTNEŘI A SPONZOŘI KONFERENCE	77

---

## VÝVOJ A OPTIMALIZACE LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ VE VCSVTT

**Jan Brajer**

**VCSVTT, Fakulta strojní, ČVUT v Praze**

Horská 3, 128 00 Praha 2; tel: 224 359 224;

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

tel.: 736 288 646

web: www.rcmt.cvut.cz

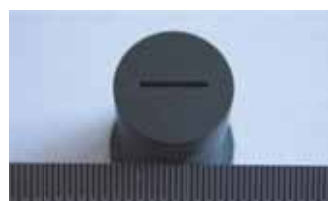
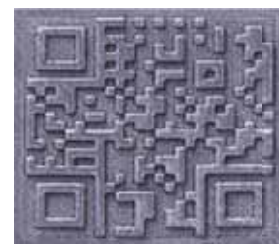
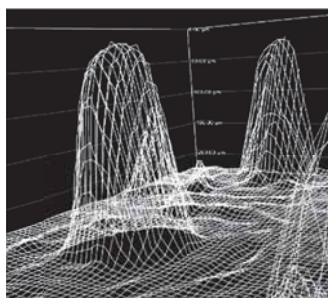
**Obor:** Výzkum, vývoj a aplikace laserových technologií

VCSVTT - Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii bylo založeno v roce 2000. Je samostatným pracovištěm Fakulty strojní ČVUT v Praze a je podporováno z prostředků MŠMT ČR. Hlavním cílem VCSVTT je vytvářet profesionální a dobře vybavené výzkumné, vzdělávací a školicí pracoviště. Další důležité cíle jsou výzkum nových řešení a perspektivních technologií, které jsou následně uplatnitelné v průmyslové sféře, a výchova mladých profesionálních odborníků. Ti jsou schopni konzultovat technické problémy a pomáhají průmyslu vyvinout novou generaci výrobků pro tuzemský i zahraniční trh.

Skupina Laserových technologií ve VCSVTT se zabývá výzkumem, vývojem a praktickým uplatněním laserových technologií pro konkrétní strojírenské aplikace.

Jedná se zejména o následující technologie:

- 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
- tepelné zpracování slitin železa a hliníku
- povlakování laserem - tvrdonávary



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

Zájemcům z průmyslu dále nabízíme služby metalografické laboratoře, měření tvrdosti a mikrotvrdosti a zkoušky opotřebení třením v tribologické laboratoři.



## DETEKCE STŘEDU INTERFERENČNÍHO PROUŽKU V INTERFEROMETRII NÍZKÉ KOHERENCE

**Tomáš Pikálek, Tomáš Fořt, Zdeněk Buchta**

Akademie věd České republiky, Ústav přístrojové techniky

Královopolská 147, 612 64 Brno, tel. 541514526, e-mail: buchta@isibrno.cz,

WWW: <http://www.isibrno.cz>

**Obor:** interferometrie

Interferometrie nízké koherence je moderní diagnostická metoda využívaná např. k bezkontaktní analýze profilu povrchů, měření tloušťky tenkých vrstev nebo i ke kalibraci koncových měrek. [1, 2] Základní úlohou v interferometrii nízké koherence je při použití Michelsonova interferometru najít takovou polohu měřicího zrcadla, při které jsou optické dráhy v obou větvích interferometru stejné, tedy nalézt střed bílého interferenčního proužku. Při použití pole fotodetektorů na výstupu interferometru je pak tímto způsobem možné získat informaci o struktuře analyzovaného povrchu. Článek se zaměřuje na metody, které analyzují intenzitu na výstupu interferometru v závislosti na poloze měřicího zrcadla. Tyto metody je možné obecně rozdělit na metody detekující v interferenčním signálu maximum a metody detekující maximum obálky signálu. [3, 4]

*Metoda těžiště proužku* [5] počítá střed bílého interferenčního proužku jako vážený průměr poloh maxim (minim) interferenčního signálu, přičemž vahou je jejich intenzita. Do výpočtu může být zahrnut buď daný počet maxim v okolí globálního maxima, popř. maxima s danou minimální intenzitou. Protože je do výpočtu obvykle zahrnut jen malý počet bodů interferenčního signálu, je tato metoda velmi málo odolná vůči šumu.

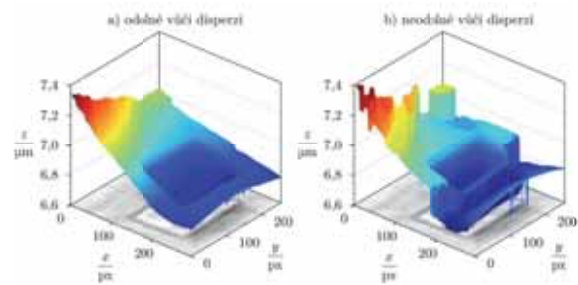
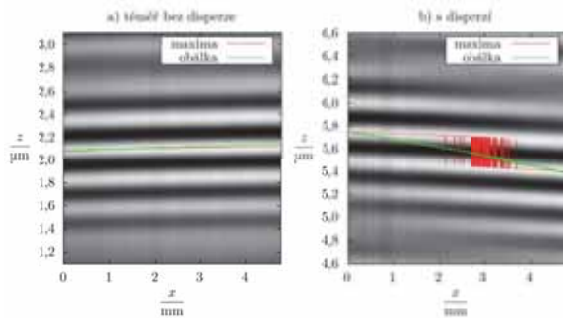
*Korelační metoda* [5] je založená na porovnání naměřeného signálu a signálu modelového se známou polohou středu bílého interferenčního proužku. Poloha středu v naměřeném signálu odpovídá poloze maxima vzájemné korelace obou signálů. Pro použití korelační metody je nutné vytvořit vhodný model bílého interferenčního proužku, jehož volba do značné míry ovlivňuje přesnost detekce.

*Metoda fitování proužku* [3] uvažuje bílý interferenční proužek v okolí jeho středu jako kosinus modulovaný polynomem. Za střed bílého interferenčního proužku pak můžeme označit buď maximum fitované polynomiální obálky nebo maximum kosinu, které je maximum obálky nejbližší. Výhodou metody je rychlost a odolnost vůči šumu. Nevýhodou je nutnost zjištění vlnové délky interferenčního signálu, jejíž volba ovlivňuje přesnost detekce. Dále také nutnost přibližného nalezení středu bílého interferenčního proužku (jehož okolí fitujeme) pomocí jiné metody (např. jako polohu maxima intenzity).

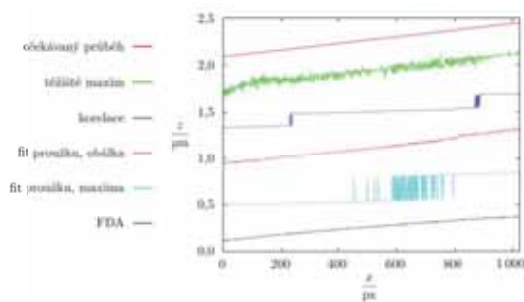
*Analýza ve frekvenční oblasti (FDA)* [4] využívá skutečnosti, že v ideálním interferometru korigovaném na disperzi platí pro závislost fáze interferenčního signálu  $\varphi$  na vlnovém čísle  $k$  vztah  $d\varphi/dk|_{k=k_0} = z$ , kde  $z$  je rozdíl optických drah a  $k_0$  je vlnové číslo odpovídající střední vlnové délce zdroje. Závislost  $\varphi(k)$  získáme jako argument Fourierovy transformace interferenčního signálu. Směrnice této závislosti v bodě  $k_0$  pak udává polohu středu bílého interferenčního proužku v naměřeném signálu. Výhodou metody je odolnost vůči šumu, nevýhodou výpočetní náročnost a, je-li použito FFT, pak i nutnost, aby se měřicí zrcadlo interferometru pohybovalo konstantní rychlostí.

Měření pro ověření a srovnání metod byla provedena na Michelsonově interferometru s klínovým děličem svazku a kompenzační deskou. Je-li interferometr optimálně kompenzovaný na disperzi (jedná se o případ, kdy rozdíl optických drah v jeho větvích

nezávisí na vlnové délce), pak je bílý interferenční proužek symetrický. Vlivem disperze (např. při neoptimálním nastavení kompenzační desky, nedokonalosti optických komponent nebo jsou-li materiály zrcadel ve větvích interferometru různé) dochází ke změně tvaru bílého interferenčního proužku, tento se stává asymetrickým, a v důsledku této změny je pak maximum obálky signálu je různé od maxima intenzity. Různé metody pak mohou za střed bílého interferenčního proužku označit jeho různou část. Metody detekující maximum obálky tedy v případě neoptimálně nastavené klínové kompenzační desky detekují rovinný povrch jako nakloněnou rovinu, metody detekující v signálu maximum pak rovinný povrch detekují jako schody (viz obr. 1 a 2). Z provedených analýz [6] vyplývá, že vhodný výběr detekční techniky může výsledky měření ovlivnit stejně, jako například nedokonalé nastavení experimentální sestavy.



Obr. 1 Metody detekující maximum obálky mohou detekovat rovinný povrch jako skloněnou rovinu, metody detekující v signálu maximum pak jako povrch se schody.



Obr. 2 Zpracování rovinného povrchu v článku uvedenými metodami při neoptimálním nastavení klínové kompenzační desky v interferometru (pro cílené dosažení nezanedbatelné disperze měřící sestavy).

Práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR, projekt číslo 14-36681G, Technologické agentury ČR, projekt číslo TA03010663, Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, projekt číslo LO1212 a CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a Akademie věd ČR, projekt RVO: 68081731.

## Literatura:

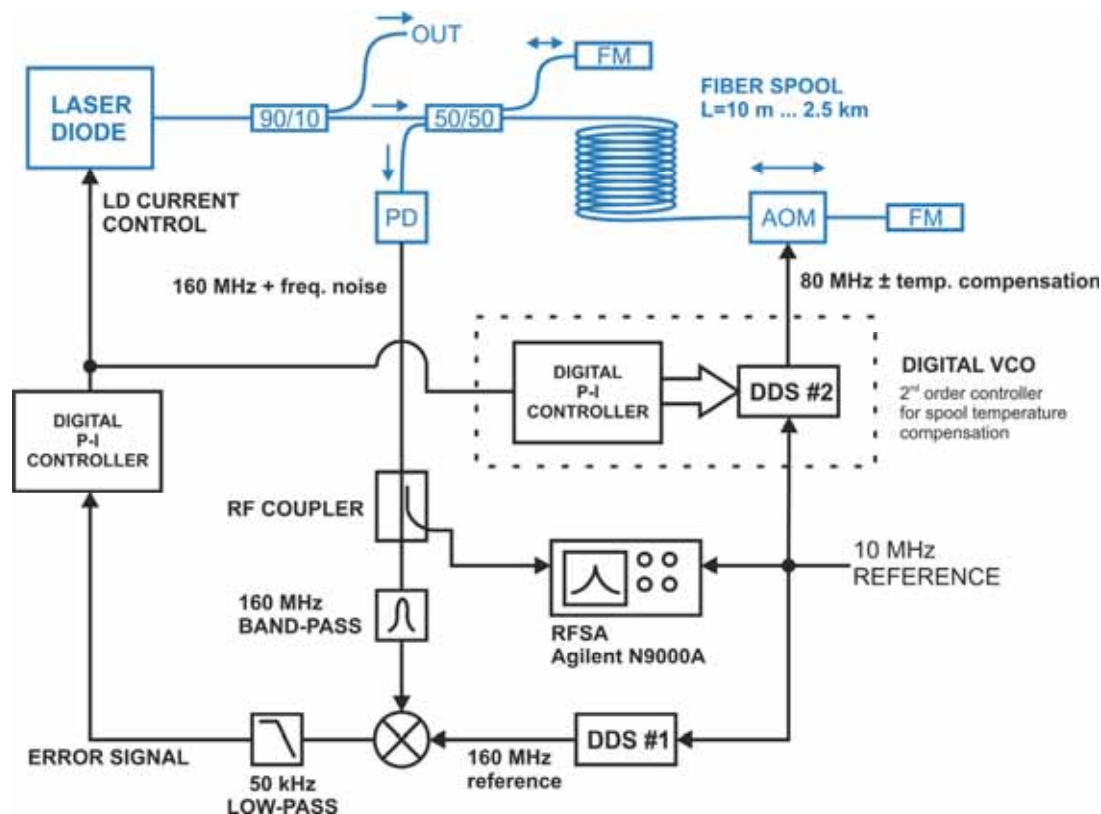
1. Buchta Z, Řeřucha Š, Mikel B, Čížek M, Lazar J, Číp O 2012 Novel Principle of Contactless Gauge Block Calibration Sensors 12 3350–3358
2. Buchta Z, Mikel B, Lazar J, Číp O 2011 White-light fringe detection based on a novel light source and colour CCD camera Measurement Science and Technology 22 094031
3. Park M, Kim S 2000 Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms Optical Engineering 39 952–959
4. de Groot P, Deck L 1995 Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain Journal of Modern Optics 42 389–401
5. Ailing T, Chunhui W, Zhuangde J, Hongjun W, Bingcai L 2008 Study on key algorithm for scanning white-light interferometry Proceedings of SPIE 7155 71552N
6. Pikálek T 2014 Analýza profilu povrchů pomocí interferometrie nízké koherence, <http://hdl.handle.net/11012/31734>

## ELEKTRONIKA PRO REDUKCI ŠUMU LASEROVÉ DIODY S VYUŽITÍM NEVYVÁŽENÉHO VLÁKNOVÉHO INTERFEROMETRU

**Martin Čížek**, Radek Šmíd, Ondřej Číp  
 ÚPT AV ČR, v.v.i., oddělení koherenční optiky  
 Královopolská 147, Brno, 612 64  
 +420 541 514 527  
 cizek@isibrno.cz

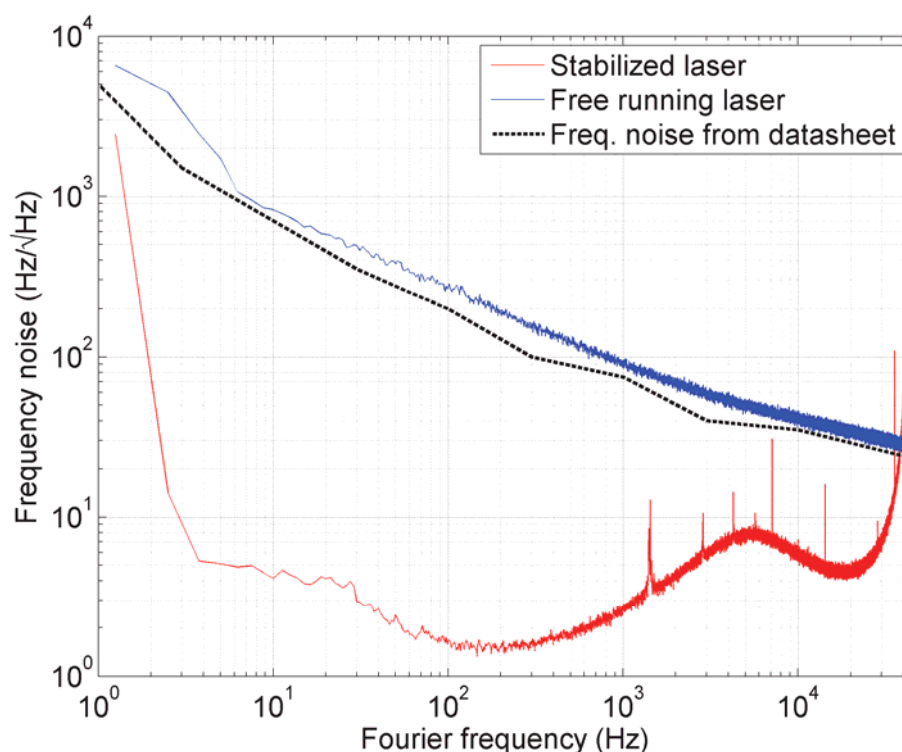
**Obor:** Interferometrie, vláknová optika, analogová a digitální elektronika, zpracování RF signálů, vlivy prostředí

Měření délkových změn optických rezonátorů zpravidla vyžaduje použití laserů s úzkou spektrální šířkou. Pro sledování celého rozsahu délkových změn je zapotřebí laser s velkou přeladitelností. Zdroje laserového záření založené na DFB laserových diodách disponují velkým rozsahem přeladění, jejich nevýhodou je však šířka čáry v řádu až jednotek MHz. Obvyklý způsob zužování čáry laserové diody spočívá v elektronické stabilizaci její vlnové délky podle etalonové rezonátorové kavity např. metodou PDH. Tím však ztrácíme přeladitelnost. Řešení nabízí metoda redukce frekvenčního šumu laserové diody znázorněná na obr. 1 využívající jako etalon nevyvážený vláknový Michelsonův interferometr. Referenční rameno interferometru je tvořeno krátkým úsekem optického vlákna zakončeného Faradayovým zrcadlem. Měřicí rameno interferometru je tvořeno cívkou optického vlákna, jejíž délka je zvolena na základě počáteční šířky čáry nestabilizované laserové diody, a Faradayovým zrcadlem.



**Obr. 1:** Blokové schéma sestavy pro zužování spektrální čáry laserové diody s využitím nevyváženého vláknového Michelsonova interferometru.

Délka ramen je neměnná a interferometr je využíván ke zjišťování změn optické frekvence laseru. V sestavě interferometru je využívána heterodynní detekce, proto je mezi cívku a Faradayovo zrcadlo vřazen akusto-optický modulátor (AOM). Za předpokladu časově konstantní délky ramen interferometru získáváme po směšování interferenčního signálu z fotodetektoru (PD) s referenčním harmonickým signálem a následné filtraci signál, jehož okamžitá amplituda odpovídá změně optické frekvence laserové diody v čase. Využije-li se tento signál jako regulační odchylka pro P-I regulátor řídící prostřednictvím pracovního proudu optickou frekvenci diody, dochází pak potlačení jejího frekvenčního šumu. K regulaci proudu je použit kontroler založený na digitálním signálovém procesoru s šířkou pásma zpracovávaného signálu 50 kHz. Stejný kontroler je použit i pro jemné řízení zdvihu modulační frekvence AOM, která je generována obvodem pro přímou digitální syntézu signálu (DDS). Tím je řešena kompenzace pomalých teplotních driftů délky ramen interferometru.



**Obr. 2:** Výsledky potlačení šumu laserového modulu RIO. Šum nestabilizované diody (modře) je porovnáván s katalogovými hodnotami (černě) a šumem stabilizované diody (červeně).

Na obr. 2 jsou vyobrazeny průběhy frekvenčního šumu laserového modulu RIO pracujícího na vlnové délce 1540 nm naměřené při experimentálním ověření metody. Pro Fourierovské frekvence do cca 30 kHz došlo k potlačení postranních šumových pásem měřených spektrální analýzou signálu za fotodetektorem až o 60 dB. Jelikož interferometrická metoda redukce šumu laseru nestabilizuje jeho optickou laseru na konkrétní hodnotu danou např. rozměry etalonu, ale pouze udržuje změnu frekvence v čase nulovou, jedná se o vhodný prostředek pro konstrukci široce přeladitelných nízkošumových zdrojů laserového záření.

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce: Digitální zpracování signálů, vývoj softwaru v C/C++/C# a Matlab, mikroprocesorová technika, laserová interferometrie

**Poděkování:** Tato práce je podporována projekty GAČR č. GPP102/12/P962 a GAČR č. GAP102/10/1813. Výzkum je rovněž podpořen formou institucionální podpory z projektu č. RVO:68081731 a projekty Evropské komise a MŠMT CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a L01212.

## NOVÉ CENTRUM, NOVÉ MOŽNOSTI

### Libor Dvořák

VÚTS, a.s., Laserové aplikační centrum

Svárovská 619, Liberec 1, 460 01, www.vuts.cz, libor.dvorak@vuts.cz, tel.:+420 485 302 768

**Obor:** Aplikační technolog v Laserovém aplikačním centru

Moderní doba si žádá moderní technologie. Za moderní technologie v oblasti strojírenství lze bezpochyby považovat laserové obrábění, svařování a tepelné zpracování. Oproti konvenčním metodám opracování materiálu mají tyto nové metody několik nesporných předností. Umožňují zhotovovat finální produkty rychle při vysoké přesnosti za současného ekonomického využití zdrojů. Pomocí laseru lze rovněž vyrábět výrobky, jejichž produkce konvenčními metodami by byla velmi náročná nebo zcela nemožná.

Výše uvedené výhody předurčují laserové technologie zpracování materiálu za „technologie blízké budoucnosti“, a proto jim řada výzkumných institucí i strojírenských firem věnuje zvýšenou pozornost. Jednou z těchto institucí je i VÚTS, a. s. (CRSV), který si pro účely výzkumu založil vlastní Laserové aplikační centrum (LAC).

Laserové aplikační centrum VÚTS, a. s. vzniklo za přispění programu OPPI (Operační program podnikání a inovace) a podprogramu Potenciál II (Založení a rozvoj vývojových center ve firmách) jako součást nově budovaného komplexu VÚTS, a. s. v průmyslové zóně Liberec Sever. V rámci projektu FR-TI1/604 (Variabilní koncepty přesných laserových obráběcích strojů), který VÚTS, a. s. řešil v letech 2009 – 2011, vyvinulo a vyrobilo LAC dva funkční prototypy laserových obráběcích stanic, které mají v následujících letech sloužit jako demonstrační vzory pro potenciální zákazníky a dále k pokračujícímu VaV. Cílem tohoto centra je dodávat na trh vlastní laserové stanice, jež zákazníkům nabídnou možnost využití širokého potenciálu, který laserové aplikace nabízejí.

#### ▪ Strojní vybavení LAC

Stanice LM05/05P.W vznikla jako výsledek výzkumné a vývojové práce firmy VÚTS, a.s. Stanice LM05/05P.W byla navržena na základě simulací a výpočtů, které byly následně prakticky otestovány a potvrzeny. Pro získání vysokých provozních parametrů stanice bylo nezbytné zajistit dostatečnou tuhost celé konstrukce, což se podařilo díky instalaci nosného rámu a granitového stolu. Zvolené konstrukční řešení umožnilo dosáhnout nadprůměr nových technických parametrů stroje. Z pohledu potenciálního zákazníka se jedná především o vysokou přesnost polohování. Díky sofistikovaně řešené konstrukci je možné laserovou stanicí LM05/05P.W podle přání potenciálního zákazníka velmi snadno integrovat do vyšších výrobních celků (výrobní linky apod.). Laserová stanice dále umožňuje bez výraznějších zásahů do konstrukce stroje připojení nejrůznějších periferních zařízení – od podávacích a zakládacích systémů, přes systémy paletizační až po propojení s průmyslovým robotem. Stanice LM05/05P.W je schopna pracovat jak s CO<sub>2</sub> lasery, tak s Nd:YAG nebo diodovými lasery.



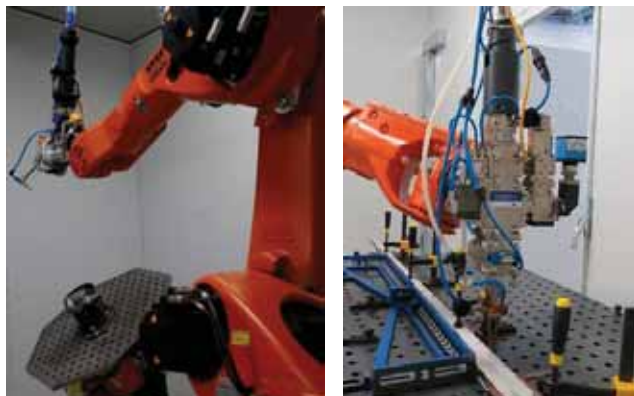
#### ▪ Laserová stanice LM08/10C.W

Laserová stanice LM08/10C.W je navržena k přesnému gravírování, řezání a svařování. Od stanice LM05/05P.W se odlišuje silnějším zdrojem o výkonu 2 kW a větším pracovním prostorem. Řídicím systémem stanice, který ovládá nejen vlastní stroj, ale i připojené periferie, je CNC – SINUMERIK 840D.

#### ▪ 6-ti osý robot pro laserové aplikace

LAC také disponuje 6-ti osým robotem KUKA KR60HA, řízeným systémem KR C4. Tento robot je přizpůsoben pro nesení laserové svařovací hlavy Precitec YW52, která může být modifikována adaptérem YK52 pro řezání. Robot využívá dva laserové zdroje Laserline LDF 4000 s výkonem 4 kw,

nebo Nd:YAG IPG-YLS-2000-S2T o výkonu 2 kW. Celá robotická stanice je dále vybavena polohovacím sto-lem KUKA DKP 400, podavačem navařovacího prášku GTV PF2/1.



#### ▪ Cíle a hlavní činnosti LAC

Hlavním cílem LAC je další rozvoj laserových aplikací, zejména v oblasti obrábění a tepelného zpracování kovových materiálů. Centrum se zaměřuje na realizaci VaV prací v dané oblasti a následný návrh a konstruování strojů pro laserové aplikace

podle konkrétních požadavků potenciálního zákazníka. Svým zákazníkům může LAC kromě konstrukce vlastní laserové stanice nabídnout vývoj a od-zkoušení (příp. zhotovení malé série výrobků) některých průmyslových laserových aplikací. Jedná se o řezání, gravírování a přesné obrábění laserem, dále pak o laserové povrchové kalení, svařování a navařování. LAC je rovněž schopno navrhnout svým zákazníkům optimální technologické postupy pro konkrétní strojirenské operace, dodat pro ně strojní vybavení a zajistit jeho servis. V neposlední řadě LAC spolupracuje s celou řadou firem (např. SITEC) i vysokých škol (např. Technická univerzita v Liberci) za účelem dalšího rozvoje teoretických i praktických poznatků.

#### ▪ Zkušenosti a nabídka možné spolupráce s LAC v Liberci

Důkazem nabitých zkušeností je pestrost zakázek v naší firmě, respektive na oddělení LAC – od kalení přes svařování různorodých materiálů až po navařování vrstev. Problematika konvenčního používání laserových aplikací je závislá na zkušenostech odpovědných pracovníků, kteří je získávají postupně s přibývajícím zakázkami.

##### ▪ Laserové kalení

Laserem kalené díly vykazují rovnoměrnou tvrdost i hloubku vrstvy. Regulace výkonu diodového zdroje je přes teplotu, která je měřena integrovaným pyrometrem. Hlavní výhodou oproti indukčnímu způsobu kalení je v rychlosti celého procesu, další výhodou je, absence chladících periférií. Velká část poptávek laserového kalení pochází od výrobců nástrojů. Např. střížné, lisovací, ohraňovací apod. nástroje.



##### ▪ Laserové navařování

V současné době je moderním trendem nanášet vrstvy na hotové výrobky, pomocí prášků, které mají specifické vlastnosti. Po navaření prášku dojde k předání požadovaných vlastností povrchu základního materiálu. Díky tomu lze snížit náklady na výrobu. Druhým důvodem používání technologie je doplnění materiálu nebo oprava vrubu po opotřebením namáhané součásti. Tyto opotřebením vznikají kvůli otěru nebo korozi. Laserové navařování se stává trendem. Tato oblast má i několik úskalí.



##### ▪ Laserové svařování

Následně hojně používaná laserová aplikace je svařování různorodých kovů, ale také polymerních materiálů. Tato technologie má vysoké uplatnění především díky své provozní hospodárnosti.



# STUDIUM CHOVÁNÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU PŘES DÉLKOVÝ ŠUM PŘI INTERFEROMETRICKÉM MĚŘENÍ

**Miroslava Holá**

Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i

Královopolská 147 Brno 612 64, tel.: +420 541 514 127, e-mail: hola@isibrno.cz,

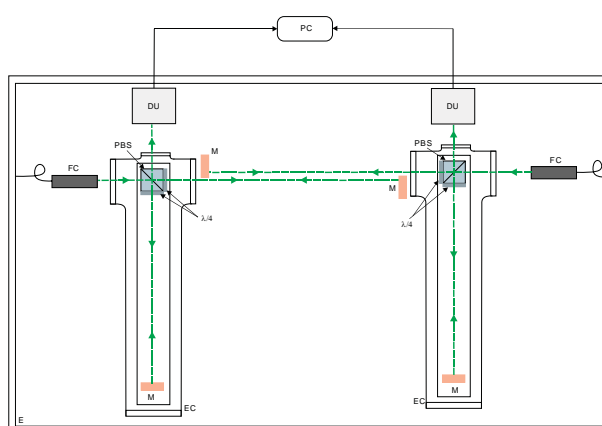
www.isibrno.cz

**Obor:** Koherenční optika - Koherentní lasery a interferometrie

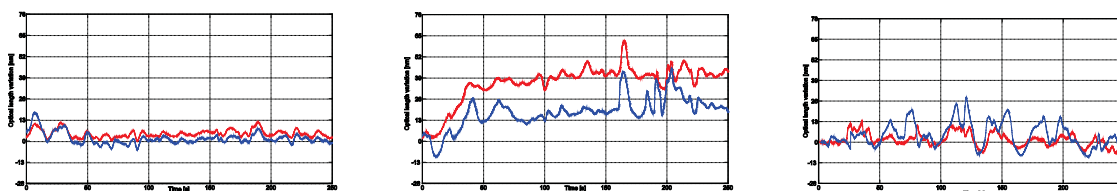
Měřit s nanometrovou přesností je v posledních deseti letech klíčová výzva, které se objevila v oblasti metrologie délky. Mezinárodní projekt s názvem „NANOTRACE“, který sdružují renomované laboratoře EU, se snažil prolomit limity rozlišení v laserové interferometrii. Metody, které byly zkoumané, prokázaly, že lze dosáhnout významného zlepšení v rozlišení laserové interferometrie. Navrhované nanometrologické systémy si kladou za cíl zvýšit rozlišení a najít cesty, jak potlačit zdroje nejistot v měření a to do subnanometrové oblasti.

Za předpokladu měření v atmosféře patří fluktuace indexu lomu vzduchu mezi největší zdroje nejistot při interferometrickém měření. Měření polohy v omezeném rozsahu je typické pro souřadnicové měřicí systémy. V nanometrologii je takovým standardem mikroskop skenující sondou s přesným odměřováním polohy. Proto jsme se rozhodli rozšířit koncept kompenzace fluktuací indexu lomu vzduchu přes sledování optické délky uvnitř měřícího rozsahu interferometru měřícího vzdálenost.

Námi navržený systém je kombinací refraktometru spolu s interferometrem kde v prvním případě vyhodnocujeme úroveň nejistoty délkového šumu dvou měřících svazků, který představuje fluktuace indexu lomu vzduchu. A v druhém případě jsme se zabývali změnami indexu lomu (dédkového šumu) v závislosti na změně měřícího ramene. První experimentální sestava (obr. 1) se skládá ze dvou Michelsonových interferometrů s referenčním ramenem umístěným v evakuované kyvetě. Naměřené záznamy (obr. 2) ukazují, že korelace mezi dvěma svazky se s rostoucí vzdáleností snižuje.

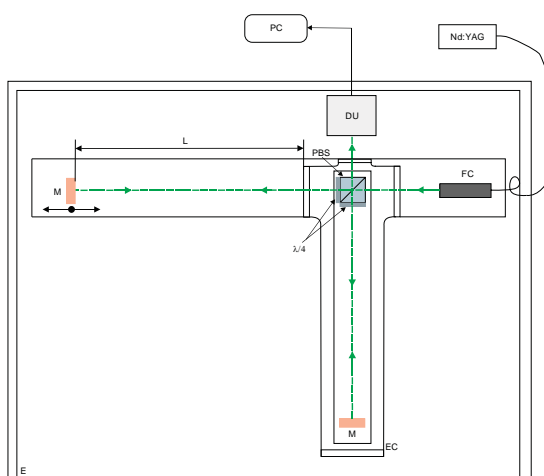


Obr. 1. Experimentální sestava interferometru. DU: detekční jednotka, PBS: dělič svazku, M: zrcadlo,  $\lambda/4$ : retardační deska, EC: evakuovaná kyveta, FC: optické vlákno s kolimátorem.

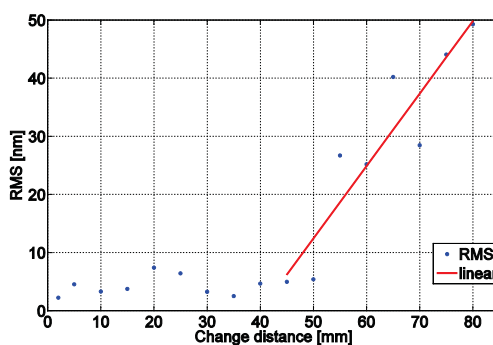


Obr. 2. Záznamy změny optické délky dvou souběžně měřených svazků oddělených 7mm, 25mm a 50mm.

V druhém případě jsme se zaměřili na vyhodnocení chování indexu lomu (délkového šumu) v závislosti na změně délky měřícího ramene Michelsonova interferometru od 2mm do 80mm po kroku 5mm. Každá poloha byla měřena po dobu 20 min. Referenční rameno bylo v evakuované kyvetě (obr. 3). Z naměřených hodnot jsme stanovili efektivní hodnotu RMS (root mean square) (obr. 4). Ze záznamu je patrné, že závislost není lineární a tedy vzduch se nechová proporcionálně v různě velkém prostoru. Do vzdálenosti 50mm můžeme změny indexu lomu považovat za dostatečně nízké až zanedbatelné.



Obr. 3. Experimentální sestava interferometru. DU: detekční jednotka, PBS: dělič svazku, M: zrcadlo,  $\lambda/4$ : retardační deska, EC: evakuovaná kyveta, FC: optické vlákno s kolimátorem.



Obr. 4. Výsledné hodnoty RSM délkového šumu s ohledem na délku měřícího ramene. Červená čára: přibližně lineární nárůst šumu s měřenou vzdáleností.

### Poděkování

Tento výzkum je podpořen granty GA ČR, projekt GA14-36681G, EURAMET, EMRP projekt IND58 6DoF, TA ČR, projekty: TA02010711, TA0101995, TE01020233. Infrastruktura projektu byla podpořena MŠMT, projekty LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a AV ČR, projektem RVO:68081731.



## ŠIROCE LADITELNÝ GENERÁTOR PRO SPEKTROSKOPII VE STŘEDNÍ INFRAČERVENÉ OBLASTI (3100-3600NM)

**Pavel Honzátko, Yauhen Baravets, Filip Todorov, Petar Gladkov**

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i.

Chaberská 57, 182 51 Praha 8

Kontakt: honzatk@ufe.cz, 266 773 431, www.ufe.cz

**Obor:** Laserová fyzika



*Obr. 1: Fotografie generátoru*

Vyvinuli jsme úzkopásmový kontinuální široce laditelný generátor, který generuje záření ve střední infračervené spektrální oblasti v rozsahu 3100-3620nm.

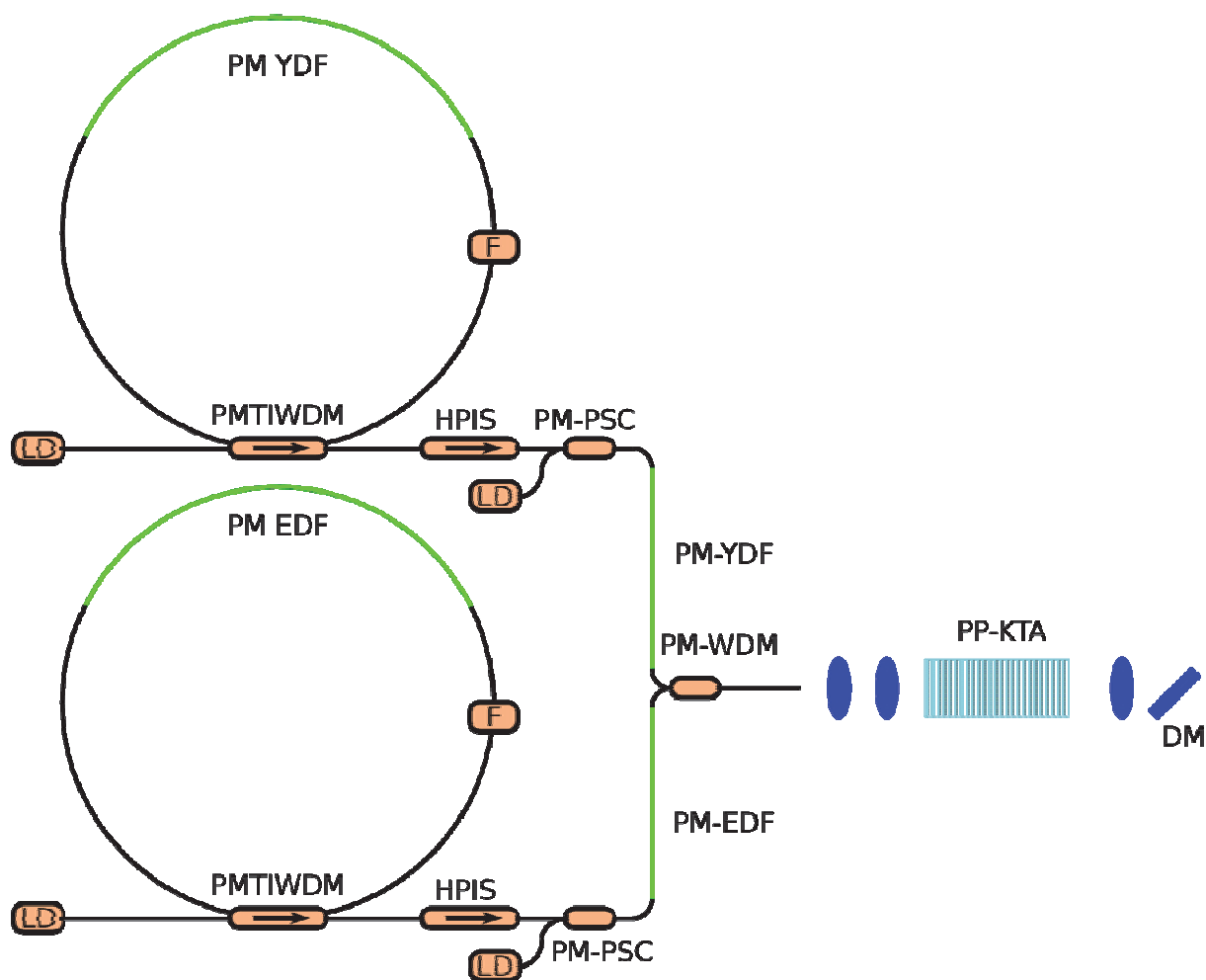
Generátor je založený na směšování signálu z ytterbiového (1040-1090nm) a z erbiového laseru (1540-1590nm) v nelineárním periodicky pólovaném krystalu KTA [1].

Laserové zdroje pracující ve střední infračervené oblasti otevírají cestu k ultracitlivé laserové spektroskopii vysokého rozlišení. Ve střední infračervené oblasti jsou absorpční čáry o několik řádů silnější, než jejich harmonické v blízké nebo viditelné oblasti. Mohou sloužit k chemické analýze stopových množství příměsí v pevných látkách, kapalinách či plynech. Předností laserové absorpční spektroskopie je velký dynamický rozsah ve srovnání s konvenční FTIR spektroskopií a vysoké spektrální rozlišení, které je dané úzkou čarou laserového zdroje. Vysoké rozlišení se uplatňuje zejména při chemické analýze plynů za sníženého tlaku, kdy je kolizní rozšíření absorpčních čar srovnatelné s dopplerovským.

Laserová absorpční spektroskopie nachází využití v lékařských diagnostických metodách, kde slouží k analýze stopových množství těkavých látek, které se uvolňují z krve do vydechaného vzduchu. Umožňuje rychlou a bezbolestnou diagnostiku žaludečních vředů, ledvinových onemocnění, astmatu, některých druhů rakoviny či stanovení toxikologického nálezu. Uplatňuje se též při dynamickém řízení průmyslových procesů, kdy může monitorovat průběh leptání, depozice, hoření apod. Důležité jsou i bezpečnostní aplikace, jako včasné monitorování úniků nebezpečných chemických látek.

Schéma laditelného generátoru záření pro střední infračervenou oblast je na obr. 2. Generátor se skládá ze dvou kruhových vláknových laserů. Jejich vlnová délka je definovaná počítačově řízenými filtry. Filtry se nastavují pro každý krystal výpočtem podle zákonů zachování a disperzních relací krystalu tak, aby byla zajištěna nejvyšší účinnost procesu generování rozdílového kmitočtu. Za každým z laserů následuje výkonový zesilovač. Signál z ytterbiového laseru se zesiluje na úroveň 3W, signál z erbiového laseru na úroveň 1W. Oba signály jsou sloučeny ve výkonovém vlnovém multiplexoru do výstupního vlákna. Následuje achromatický kolimátor a achromatický dublet, kterým jsou oba signály fokusovány do nelineárního periodicky pólovaného krystalu.

Podmínkou pro účinnou generaci rozdílového kmitočtu v nelineárním krystalu je fázová synchronizace. Periodicky pólované krystaly umožňují splnění podmínky fázového synchronismu i v krystalech, v nichž by to jinak nebylo možné. Navíc umožňují



Obr. 2: Schéma generátoru záření. PM YDF a PM EDF-ytterbiem, resp. erbiem dopované vlákno zachovávající polarizaci, F-laditelný filtr, LD-čepací laserové diody, PMTIWDM-hybridní vlnový polarizaci zachovávající multiplexor pro sloučení čerpání a signálu, kombinovaný s izolátorem a výstupním vazebním členem, HPMS-výkonový izolátor, PM-PSC-slučovač čerpání a signálu, PP-KTA-periodicky pólovaný krystal KTA, DM-dichroické zrcadlo.

v anizotropních krystalech využití největší komponenty nelineárního koeficientu. Periodické pólování jsme prováděli pomocí vlastní technologie. V generátoru jsme testovali krystaly KTP a KTA. KTA krystaly jsou vhodnější pro široce laditelný zdroj, protože s ohledem na své disperzní vlastnosti vyžadují, aby se vlnová délka jednoho laseru snižovala, zatímco vlnová délka druhého laseru roste. Při použití KTP krystalu se ladí oba lasery souběžně ve stejném směru a rozdíl jejich kmitočtů se proto mění mnohem méně. S krystalem KTA jsme dosáhli přeladitelnosti ve spektrálním rozsahu 3100-3620nm a výkon kolem 100uW. Vyzkoušeli jsme celou řadu konceptů, které umožňují kontrolu šířky spektrální čáry generovaného záření v rozsahu stovek MHz až jednotek GHz.

Hledáme partnery pro využití tohoto generátoru pro spektroskopické a metrologické aplikace.

Projekt je řešen ve spolupráci se spol. Optokon, a.s. za laskavé podpory TA ČR prostřednictvím grantu TA02010825.

### Reference

- [1] P. Honzatko, Y. Baravets, F. Todorov, P. Gladkov, "Tunable narrow-band CW MIR generator based on the difference frequency generation in KTP crystal," Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and devices, We-C-5, conference digest p. 125 (2014).

## LASEROVÉ STANDARDY PRO INTERFEROMETRII A PŘENOS PŘESNÝCH FREKVENCÍ

**Jan Hrabina**

ÚPT AV ČR, v.v.i., Oddělení koherenční optiky

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

www.isibrno.cz

**Obor:** frekvenční stabilizace laserů, laserové standardy, interferometrické odměřovací systémy, reference optických kmitočtů – absorpční kyvety

Reference optických kmitočtů – absorpční kyvety – představují unikátní nástroj k frekvenční stabilizaci laserů. V kombinaci s vhodně zvolenými detekčními metodami dovolují dosažení ultimátních vlastností laserových systémů a proto jsou pomocí laserové spektroskopie ve vybraných plynech definovány a realizovány laserové normály délky pracující na řadě vybraných optických kmitočtech. Při použití takto stabilizovaného laseru pro přesné měření vzdáleností (laserová interferometrie) je tak zaručena přímá metrologická návaznost měření na základní normál.

S výrobou absorpčních kyvet má ÚPT AV ČR bohaté zkušenosti. Díky mnohaletému vývoji technologie přípravy a plnění superčistých absorpčních plynů patří toto pracoviště na první místo ve světové špičce tohoto oboru. Kyvety plněné nejrůznějšími absorpčními médii ( $I_2$ , Cs, Rb,  $^{13}C_2H_2$ , vzácné prvky a další) dodáváme do metrologických institucí po celém světě.

Klíčovými parametry absorpčních kyvet jsou spektrální vlastnosti použitého absorpčního plynu. Šířka a intenzita absorpčních přechodů zásadně ovlivňují dosažitelnou stabilitu a přesnost optické frekvence realizovaného laserového standardu. Jedním z nejvíce používaných absorpčních plynů je molekulární jód, jehož velmi silné a úzké přechody v oblasti vlnových délek okolo 532 nm dovolují realizaci laserových standardů s relativní přesností optické frekvence na úrovni lepší než  $10^{-14}$  – Nd:YAG laser se zdvojnásobením optické frekvence a stabilizací pomocí jodových par tvoří nejpřesnější konvenční laserový standard.

Jódem plněné kyvety jsou obvykle provozovány v režimu nasycených par. Znamená to, že část jódu se v kyvetě nachází v pevné fázi, část molekul je v plynné. Regulací teploty pevné fáze pak přesně regulujeme tlak plynné fáze, které následně interaguje s laserovým zářením. V aplikacích, kde není požadována ultimátní stabilita (například interferometrické odměřování v atmosférických podmínkách – vliv indexu lomu vzduchu je zde hlavním příspěvkem k nejistotě měření), je možno kyvety vyrobit levnějším a jednodušším způsobem. Jedná se o náhradu normálně používaného křemenného skla sklem borosilikátovým a rovněž naplnění kyvety absorpčním médiem na tzv. saturační tlak. Pokud je kyveta provozována nad určitou hraniční teplotou (saturační bod), nachází se všechny molekuly jódu v plynném stavu a přibližně konstantním tlaku. V tomto případě pak odpadá nutnost externí kontroly tlaku pomocí chladicího článku.

Dalším velmi významným absorpčním plynem je acetylen, používaný pro vlnové délky v telekomunikačním pásmu. Laserový standard na bázi acetyleny neslouží pouze jako kalibrační prostředek v optovláknové technice, ale nachází uplatnění i v rostoucím oboru distribuce velmi přesných kmitočtů po optických kabelech.

Spektrální vlastnosti absorpčního média závisí na jeho chemické čistotě. Přítomnost nečistot způsobuje jeho degradaci (rozšíření spektrálních čar a posuvy absorpčních spekter), proto je nutné čistotu absorpčního plynu kontrolovat. V případě molekulárního jódu (nejčastěji používané médium ve viditelné a blízké IR oblasti vlnových délek) se k ověřování kvality vyrobené kyvety používá metoda laserem indukované fluorescence (LIF) a metoda měření spektrálních posuvů. Obě tyto metody však mají své limity. U metody LIF je to především nutnost dokonalého zamezení vniku rozptýleného a odraženého světla do detekčních prvků (fotonásobiče), relativně raritní vlnová délka budicího laseru ( $\lambda=502$  nm) a limit rozlišení metody při měření velmi čistých kyvet. K širokému nasazení metody měření spektrálních posuvů zase brání její velká přístrojová náročnost a složitost.

K odstranění těchto problémů jsme vyvinuli novou metodu založenou na měření spektrálních profilů vybraných hyperjemných komponent. Metoda je založena na principu rozšíření absorpčních přechodů způsobené srážkami mezi molekulami absorpčního plynu a molekulami nečistot. Realizované experimenty ukazují nejen na možné snadné srovnání čistoty jóduvých kyvet s různým designem, ale především potvrzují velmi vysokou citlivost metody na přítomnost cizích látek. Hledání závislostí mezi tradičními metodami laserem indukované fluorescence, měření absolutních frekvenčních posuvů a vyvinutou metodou je předmětem aktuálního výzkumu.

Velmi zajímavou alternativou ke konvenčním skleněným absorpčním trubicím/kyvetám je použití fotonických vláken s dutým jádrem. Tato speciální optická vlákna obsahují ve svém jádře dutiny, které jsou potenciálně naplnitelné absorpčními plyny. V případě realizace takové reference by došlo k významné redukci její hmotnosti a velikosti při současném zachování dostatečné interakční délky mezi laserovým svazkem a absorpčním plynem. Výzkum metod plnění a přípravy těchto vláknových referencí optických kmitočtů je jednou z dalších aktuálně realizovaných prací.

### **Poděkování**

Tento výzkum je podpořen granty GA ČR, projekt GA14-36681G, EURAMET, EMRP projekt IND58 6DoF, TA ČR, projekty: TA02010711, TA0101995, TE01020233 a MŠMT spolu s MAEDI/MENESR, projekt: 7AMB14FR040/31175QB. Infrastruktura projektu byla podpořena MŠMT, projekty LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a AV ČR, projektem RVO:68081731.

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

- Výroba absorpčních kyvet plněných izotopicky čistými plyny
- Frekvenční stabilizace laserů – laserové standardy
- Laserová interferometrie – multidimensionální systémy
- Laserová spektroskopie

## ELEKTRONIKA PRO STABILIZACI OPTICKÝCH FREKVENČNÍCH HŘEBENŮ

Václav Hucl, Martin Čížek, Radek Šmíd, Josef Lazar a Ondřej Číp

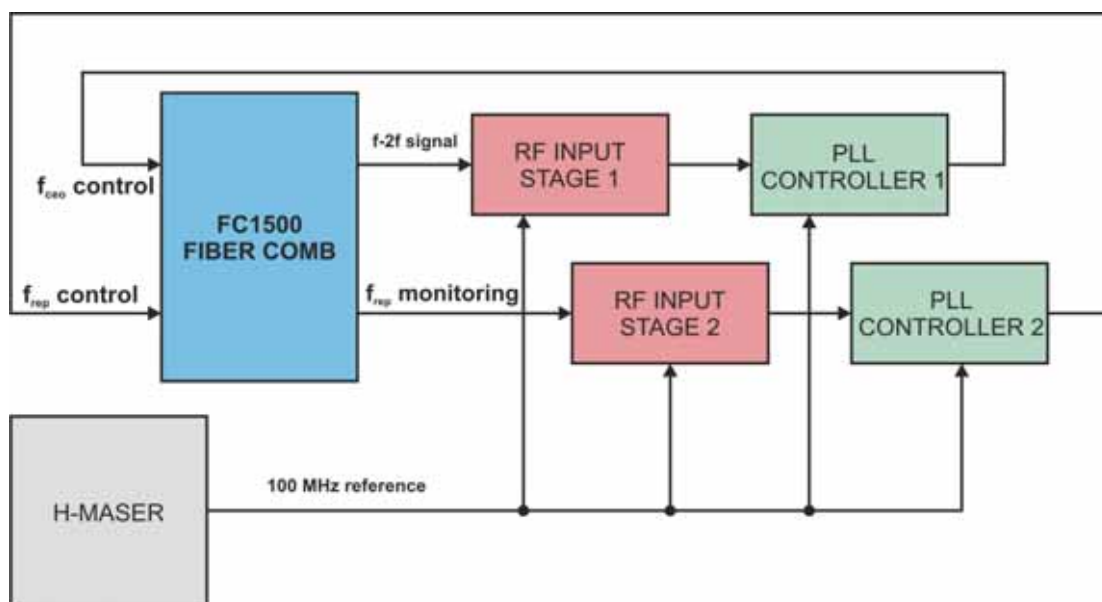
Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Koherenční optika

Královopolská 147, 612 64 Brno, +420 541 514 529, tweak@isibrno.cz, www.isibrno.cz

**Obor:** Analogová a digitální elektronika, zpracování signálů, femtosekundové lasery

Většina experimentů využívajících optický hřeben (komb) vyžaduje frekvenční a fázové zavěšení repetiční frekvence  $f_{rep}$  a offsetové frekvence  $f_{CEO}$  na stabilní RF referenční signál generovaný z vysoce přesného oscilátoru (H-maser, GPSDO...). K zabránění tepelnému a mechanickému ovlivňování experimentálních sestav a optického hřebene při dlouhodobých experimentech je zároveň nanejvýš žádoucí v maximální možné míře omezit dobu pobytu osob v laboratoři. Tyto důvody nás vedly ke zkonstruování dálkově ovládaného systému pro dálkově pro dlouhodobou stabilizaci optického frekvenčního hřebene.

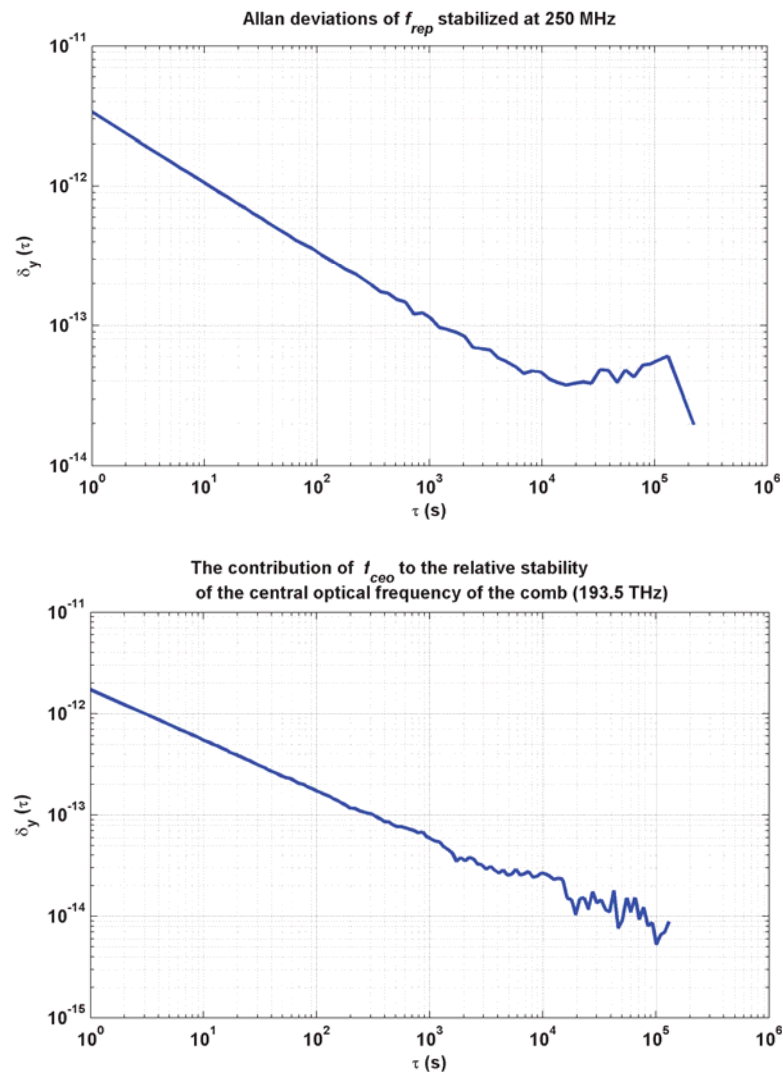
Na obr. 1 je blokové schéma celé sestavy. V našem případě jsme stabilizovali optovláknový komb FC1500 od firmy Menlo Systems. Stabilizace probíhá ve dvou nezávislých smyčkách fázového závěsu.



**Obrázek 1:** Blokové schéma celé sestavy

V první smyčce dochází k regulaci repetiční frekvence  $f_s$  laseru, kde využíváme výstupní signál fotodetektoru monitorujícího výstup  $f_s$  laseru jako zpětnou vazbu. V druhé smyčce regulujeme offsetovou frekvenci na základě zpětné vazby zprostředkované výstupním signálem  $f-2f$  interferometru.

Regulace je realizována ve dvou řádech. První řád tvořený rychlým regulátorem s obvodem AD9956 s omezeným rozsahem přeladění je doplněn pomalejším regulátorem druhého řádu s velkým výstupním dynamickým rozsahem realizovaným s využitím digitálního signálového procesoru. Elektronika je připojena na komunikační sběrnici CAN, což umožňuje vzdáleně ovládat celé zařízení z prostředí LabView.



**Obrázek 2:** Graf Allanových odchylek pro repetiční a offsetovou frekvenci. Pozn.: Allanovy odchylky offsetové frekvence jsou vztaženy k centrální optické frekvenci hřebene 193,5 THz.

Na obr. 2 jsou průběhy Allanových odchylek repetiční a offsetové frekvence vypočtené z dat naměřených při dlouhodobém experimentálním ověřování. Výsledná krátkodobá relativní stabilita optického hřebene je v řádu  $10^{-12}$  a dlouhodobá stabilita optického hřebene je v řádu  $10^{-14}$ .

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

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

### Poděkování

Tato práce je podporována projekty GAČR č. GPP102/12/P962 a GAČR č. GAP102/10/1813. Výzkum je rovněž podpořen formou institucionální podpory z projektu č. RVO:68081731 a projekty Evropské komise a MŠMT CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a LO1212.

## FIBER LASER WITH INTELLIGENT ADDITIONAL FUNCTIONS

**Josef Chromý, Oliver Hergt**

Bystronic Czech Republic s.r.o.

Tuřanka 115/1222

PSČ 627 00 Brno

Česká republika

www.bystronic.com

**Obor:** vláknové lasery, řezání laserem

**Bystronic increases the cutting speed of the fiber laser and expands the technology with intelligent additional functions. This provides users with decisive competitive advantages.**

Fiber laser technology is an important topic for sheet metal processing companies and will remain so in the foreseeable future. Fiber laser cutting systems from Bystronic permit excellent cutting results to be achieved, not only in thin sheet metal but also in the medium thickness range. This can be a decisive competitive advantage. Because companies that can cut fast and also with high quality are able to increase the parts output of their production plant and hence produce more successfully.



Fast cutting speeds: Bystronic equips the BySprint Fiber with a powerful 6kW laser source.

(BySprint\_Fiber\_022\_Press\_6622)

In order to achieve the performance required for fast and high quality laser cuts, Bystronic equips its BySprint Fiber laser cutting system with a 6 kilowatt laser source. The powerful laser source considerably increases the BySprint Fiber's cutting speed. For example, by up to 70 percent compared to the 4 kilowatt fiber laser when cutting 3 millimeter thick stainless steel. The speed advantage is even more pronounced when compared to the 6 kilowatt CO<sub>2</sub> laser: In 3 millimeter thick stainless steel, the 6 kilowatt fiber laser cuts three times faster.

### Reliable processes with Cut Control

With the fiber laser's high cutting speed, process reliability becomes more important than ever. Hence, Bystronic provides intelligent additional functions for its laser cutting systems. In future, these functions will enable users to perform their cutting processes even more reliably and, as far as possible, error-free.

One of these additional functions is Cut Control. This function monitors the entire cutting process on the BySprint Fiber and thus reduces the risk of miscuts. In the event of poor cutting results or cutting tears, Cut Control automatically stops the cutting process. Subsequently, the cutting head reverses and repeats the cut.

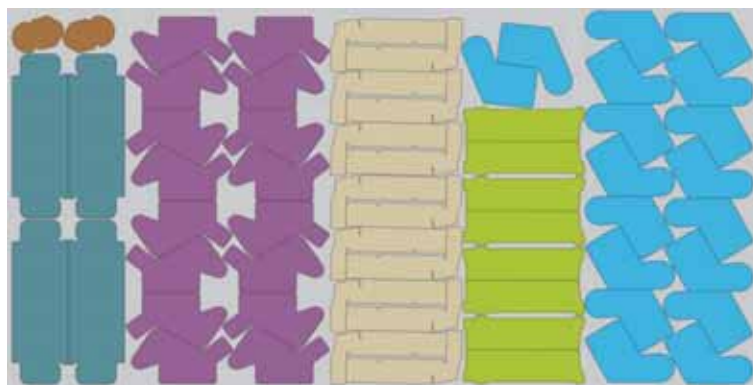


Process reliability: Cut Control monitors the cutting process. (Tech\_Emotions\_Laser\_038\_Press\_6380)

### Maximally optimized cutting plans

However, fast cutting speeds are only one aspect of competitiveness. Making optimal use of the raw materials is also a decisive factor. Even before the laser starts cutting the metal sheet, it is important to position the parts to be cut on the metal sheet as efficiently as possible. Until now this task required a great deal of know-how and time.

With the ByOptimizer, Bystronic is now offering an unique online service that generates optimized cutting plans in the twinkle of an eye. The time-consuming tasks of programming and manually positioning the parts to be cut on the metal sheet are a thing of the past.



Online service: ByOptimizer provides maximally optimized cutting plans. (Cutting plan ByOptimizer)

ByOptimizer is based on a newly developed cluster technology, which automatically groups parts to be cut on the metal sheet. So closely that the gaps, which represent raw material



waste, are reduced to a minimum. Placing the parts so closely together reduces the cutting paths required to subsequently cut the parts out of the metal sheet. The new online service can be used with both fiber lasers and CO<sub>2</sub> lasers from Bystronic.

### **Automation increases material flow**

Automation is a feature that is in line with the trend towards fast laser cutting. Because if you cut quickly, you need to increase the material flow around the laser cutting system. This works most efficiently with a suitable automation solution that support the user in handling material. One of Bystronic's solutions in this field is the ByTrans Extended system. This automation unit handles the entire loading and unloading process on the shuttle table of laser cutting systems. This enables users to speed up the material flow throughout all the processes associated with laser cutting to a maximum.



Automation: ByTrans Extended speeds up the material flow throughout all the processes associated with laser cutting. (Automation\_041\_Press\_5701)

### **Fiber laser and CO<sub>2</sub> laser**

Bystronic focuses on both fiber laser and CO<sub>2</sub> laser technology, because depending on the range of applications, both processes have their advantages. The fiber laser's special characteristics predestine it for applications in the thin to medium range of sheet metal thicknesses. For users who want to cut the entire spectrum of sheet thicknesses, the tried and tested CO<sub>2</sub> laser cutting process continues to be the best choice.

More information at: [www.bystronic.com](http://www.bystronic.com)



## SPECIÁLNÍ OPTICKÁ VLÁKNA – SRDCE THULIOVÝCH A HOLMIOVÝCH VLÁKNOVÝCH LASERŮ A ZESILOVAČŮ

**I. Kašík & P. Peterka, P. Honzátko, J. Mrázek, O. Podrazký, J. Aubrecht, J. Proboštová, J. Cajzl**

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 18251 Praha 8 – Kobylisy

tel: 266 773 527

e-mail: kasik@ufe.cz

www.ufe.cz

**Obor:** technologie optických vláken, vláknové lasery 2,0

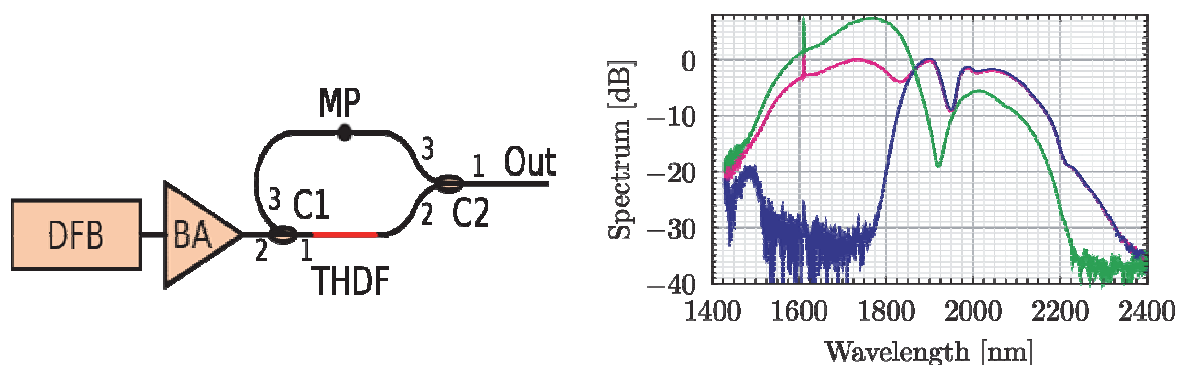
Vláknové lasery a zesilovače jsou dnes rozvíjeny jako úspěšná alternativa klasických pevnolátkových nebo plynových laserů, která má své významné přednosti při uplatnění od aplikací spíše nízkovýkonových např. v metrologii či medicíně až po aplikace vysokovýkonové např. při průmyslovém svařování, řezání, navařování apod. Jejich podstatnou výhodou je, že energii záření snadno dopraví tímtež vláknem v podstatě kamkoliv, což není tak snadné v případě výstupního svazku pevnolátkových laserů s vysokým výkonem.

Základem vláknových laserů jsou optická vlákna - z křemenného skla nebo z měkkých optických skel. Významnou předností křemenných vláken jsou jejich nízké optické ztráty v širokém transmisním okně, dobrá stabilita a teplotní odolnost. Nevýhodou je naopak vysoká fononová energie a malá rozpustnost vzácných zemin. To vede již při nízkých koncentracích vzácných zemin ve skelné matici k fázové separaci a tím také k nežádoucímu vysokému základnímu útlumu vláken. Proto je nutné složení jádra vláken modifikovat nebo ionty vzácných zemin zapouzdřit do nanočástic. Speciální vlákna se táhnou z preforem – tyček, připravovaných metodou Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD), rozšířenou o postup dopování z roztoku, tzv. solution-doping.

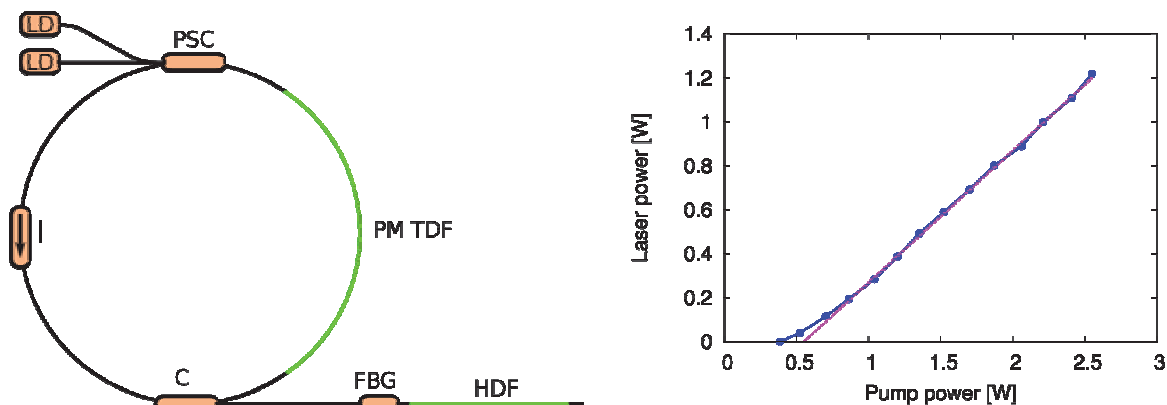
Typickými výstupy materiálového výzkumu ÚFE AV ČR jsou jednovidová optická vlákna s jádrem dopovaným ionty holmia nebo thulia (případně jinými vzácnými zeminami jako  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ) nebo dopovaným core-shell nanočásticemi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ho/Tm}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ,  $(\text{Ho/Tm}_x\text{Y}_{1-x})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  ve skelné matici binárních či ternárních skel ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  -  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{P}_2\text{O}_5$  -  $\text{SiO}_2$ ). Optická jádra těchto vláken mají typický průměr 5-12  $\mu\text{m}$ , obvyklou numerickou aperturu od 0,1 do 0,2, koncentraci  $\text{Al}_2\text{O}_3$  do 10-12 mol%, koncentraci  $\text{P}_2\text{O}_5$  do 10-14 mol% a koncentraci vzácných zemin od stovek po desetitisíce ppm. Dlouhodobým technologickým výzkumem bylo dosaženo minimálních optických ztrát na úrovni několika desítek dB/km. Vlákna jsou tažena v typické kruhové jednovidové struktuře, nebo jako dvouplášťové struktury o hranolovém nebo hexagonálním průřezu s plastovým pláštěm z fluorovaných akrylátů o nízkém indexu lomu.

Vyvinuté optické vlákno dopované holmiem a thuliem jsme využili v širokospektrálním zdroji zesílené spontánní emise. Thulium má ze všech vzácných zemin vůbec nejširší pás, pokrývající vlnové délky 1550-2050nm, holmium vlnové délky 1950-2250nm. Vlákno vykazuje silnou emisi ve zpětném směru (obr. 1b, zelená křivka) a slabší emisi v dopředném směru (obr. 1b, modrá křivka), která je díky reabsorbci signálu posunuta k delším vlnovým délkám. Originálním zapojením generátoru jsme sloučili obě emise do rekordně širokého emisního pásu širokého 800nm v rozmezí 1540 až 2340nm [1]. Generátor má uplatnění při spektroskopické charakterizaci optických komponent.

Příklad využití speciálních vláken v holmiovém laseru čerpaném kruhovým vláknovým laserem dopovaným thuliem je na obr. 2. Výstupní výkon holmiového laseru přesáhl 1W na vlnové délce 2100nm.

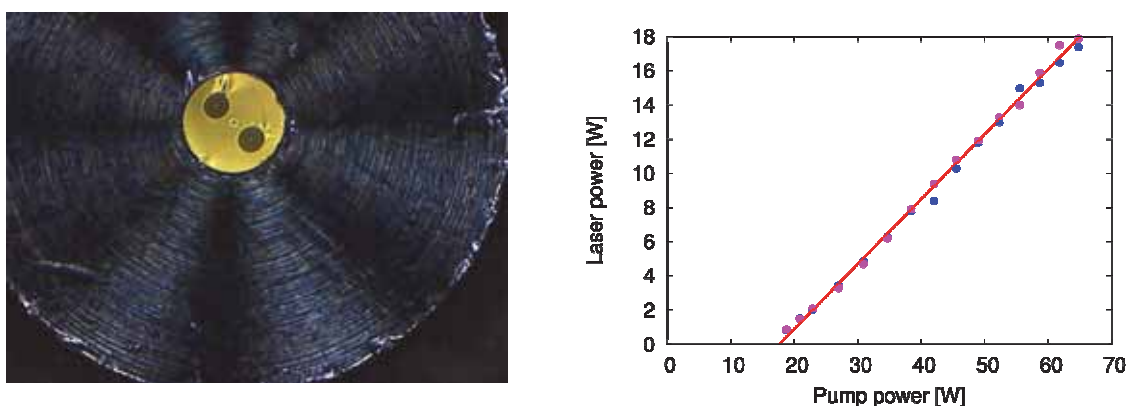


Obr. 1. Širokospektrální zdroj signálu založený na vlákně dopovaném thuliem a holmiem.



Obr. 2. Vláknový holmiový laser čerpaný z thuliového kruhového vláknového laseru.

V laserech využíváme kromě vlastních vláken i vlákna komerční. S vláknem dopovaným thuliem s dvojitým pláštěm a s velkou stopou pole jsme dosáhli výkonu téměř 20W na vlnové délce 2030nm (obr. 3). Jako čerpání jsme použili dvojici mnohovydových laserových diod pracujících na vlnové délce 793nm. Podobné lasery jsou vhodné pro řezání a sváření plastů. Podmínkou je, aby zmíněný plast absorboval záření na vlnové délce 2030nm.



Obr. 3. Fotografie polarizaci zachovávajícího thuliového vlákna s velkou stopou pole a výstupní výkon laseru, který byl s tímto vláknem sestaven.

Autoři by rádi poděkovali za finanční podporu tohoto výzkumu GAČR (14-35256S, 13-37368P), MPO (TIP-FR-T14/734), MŠMT (FILA, scan4surf) a AV (M100671202) a firmám SQS vláknová optika, Safibra, LAO a Optokon za dlouhodobou spolupráci.

#### Literatura

[1] P. Honzatko, Y. Baravets, I. Kasik, O. Podrazky, Opt. Lett. 39, 3650-3653 (2014)

## SPECIFIC FORMS OF USERS INTERACTION WITH HOLOGRAPHIC OPTICAL TWEEZERS CONTROLLED BY LEAP MOTION®

**Peter Keša<sup>a,c</sup>, Zoltan Tomori<sup>a</sup>, Jan Kanka<sup>b</sup>, Petr Jakl<sup>b</sup>, Mojmir Sery<sup>b</sup>,  
Silvie Bernatova<sup>b</sup>, Marian Antalík<sup>a,c</sup>, Pavel Zemanek<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>Dept. Biophysics, Institute of Experimental Physics SAS, Watsonova 47, Kosice, Slovakia

<sup>b</sup>Institute of Scientific Instruments of the ASCR v.v.i., Královopolská 147, Brno, Czech Republic

<sup>c</sup>Dept. Biochemistry, P. J. Safarik University, Srobarova 2, Kosice, Slovakia

**Obor: micromanipulation, optical trapping, Leap Motion®**

Optical tweezers allows contactless three-dimensional manipulation with electrically neutral objects of sizes from tens of nanometers to tens of micrometers. Mouse or joystick are the traditional devices to control the positions of trapping beams in holographic optical tweezers that provide optical manipulation with microobjects. Our approach is based on a modern 3D depth sensors (Creative Interactive Gesture Camera and Leap Motion) combined with gestures and speech recognition software. The human operator controls the position of one trapping beam by a traditional pointing device like mouse or joystick. However, manipulation with more objects needs control of corresponding number of independent trapping beams generated by a spatial light modulator. We upgraded own NUI software which processes signals from sensors and sends the control commands to holographic Raman tweezers which subsequently controls the positions of trapping microparticles and the acquisition system of Raman spectra [2].

Leap Motion® is a precise sensor especially designed to capture hands with elbows resting on the table and precisely calculate position of individual fingertips and joints. Our system utilizing virtual tools concretely tweezers to microparticles capture. Voice detector watches the acoustic signal of microphones. If a continuous signal appears that can be interpreted as a voice command, it is acquired and sent to speech recognition module. The program compares the voice sample with templates in dictionary and returns a text string of the most similar word.

For all our experiments we used the system utilizing SLM Hamamatsu X10468-03 (Hamamatsu, Japan), trapping fiber laser IPG YLM-10-LP-SC (IPG Photonics, Japan) with maximal output power 10W at wavelength 1070 nm for holographic optical tweezers, spectrometer Shamrock SR-303i and low-noise camera Andor Newton DU970P (Andor, England) using 532 nm laser torus 532 + mpc 3000 (Laser Quantum, England) for Raman spectra acquisition and also Mad City Labs micropositioning stage (Nano-view) for three-dimensional positioning of the sample in the optical microscope of own design. Both, optical tweezers and NUI devices are controlled by PC (Intel Processor, 8GB RAM) based on the Windows7 operating system.

We used for trapping a water suspension of polystyrene latex microparticles (2,5 % v/v, 4,5 µm diameter) dispersed in distilled water (100 x diluted). The microparticles were captured by means of two focused laser beams of total power 2,2 W. To manipulation and motion of microbeads was applied Leap Motion sensor. Microparticles can be substitution by others microspheres such as droplets of liquid crystals dispersed in water, alternatively.

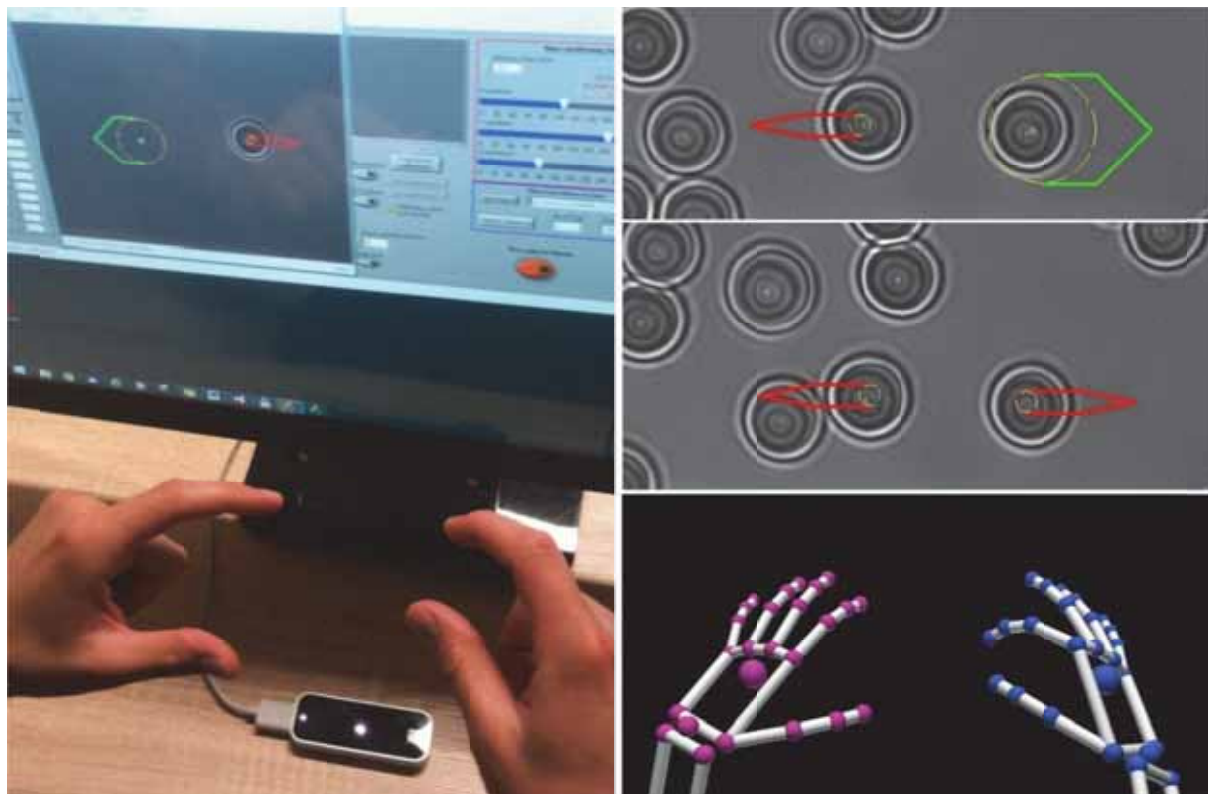


Fig. 1 Holographic optical tweezers controlled by fingers positions using Leap Motion sensor. Left: Leap motion (on the table) acquires fingers coordinates in 3D and transforms them into virtual tools (on the screen). Right: details of open and closed “tweezers” virtual tools and visualization of handscaptured by Leap Motion.

The main improvement of our experiments was to incorporate individual NUI approaches and software packages into own program “NUI\_Tweezers”. It was created under Windows 7/8 system using Microsoft Visual Studio 2012 and C++ compiler.

Demonstration of our practical experiments can be auxiliary for advancement of some optical analytical techniques especially Whispering Gallery Modes [3], which find applications in many scientific areas.

#### **Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

3D image analysis and stereology

Computer Vision (3D reconstruction and visualization in biomedicine)

Microscope image analysis

#### **References:**

- [1] K. C. Neuman and S. M. Block, (2004). Optical trapping. In *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No. 9, p. 2787-2809.
- [2] Tomori, Z., Antalík, M., Kesa, P., Kanka, J., Jakl, P., Sery, M., Bernatova, S. and Zemanek, P., (2013). Holographic Raman Tweezers Controlled by Hand Gestures and Voice Commands. In *Optics and Photonics Journal*, Vol.3 No.2B, p. 331-336.
- [3] F. Vollmer and S. Arnold, (2008). Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules. In *Nature Methods*, Vol.5, No. 7, p. 591 - 596.

The authors wish to thank Slovak Grant Agency for support through VEGA grant No. 2/0025/12, APVV grants No. APVV-0526-11, APVV-0171-10 and the European Structural Funds under ITMS code 26220220061, 26220120021, 26220120033 and 26220120001 and specially Czech project ALISI - MSMT LO1212.

## FÁZOVÉ MASKY VYROBENÉ ELEKTRONOVOU LITOGRAFIÍ A IONTOVÝM LEPTÁNÍM PRO PŘÍPRAVU VLÁKEN S BRAGGOVÝMI MŘÍŽKAMI

**Stanislav Krátký, Michal Urbánek, Vladimír Kolařík, Miroslav Horáček, Jana Chlumská, Milan Matějka, Mojmír Šerý, Břetislav Mikel**

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

Královopolská 147, 612 64 Brno, kratky@isibrno.cz, www.isibrno.cz, 541.514.525

**Obor:** Elektronová litografie a průmyslová holografie

Braggovská vláknová mřížka je založena na principu lokální změny indexu lomu ve vlákně optického vlákna. Má širokou aplikační oblast, používá se např. pro různé typy filtrů v komunikacích, může se též použít v oblasti snímačů mechanického namáhání [1]. Pro přípravu tohoto typu mřížek lze použít různé technologie. Například, index lomu je možné modifikovat přímo při výrobě optického vlákna. Dále, mřížka může být exponována bod po bodu laserovým svazkem. Nejefektivnějším způsobem je expozice přes fázovou masku, neboť jednu masku lze použít pro výrobu stovek mřížek (i když kvalita masky se při expozicích postupně snižuje, ačkoliv je připravena v křemenném skle) [1].

Tento příspěvek se zabývá různými přístupy pro přípravu fázových masek z pohledu vlivu na kvalitu exponovaných Braggovských mřížek. Mřížková fázová maska je definována zejména dvěma parametry; periodou a hloubkou (předpokládáme střihu 1:1 mezi výstupky a prohlubněmi mřížky). Perioda fázové mřížky  $A_{PG}$  se dle [1] určí z následujícího vztahu:

$$A_{PG} = \frac{\lambda_B}{2n_e} ,$$

kde  $\lambda_B$  je Braggova vlnová délka (odpovídající požadované odezvě na zvolený vstup) a  $n_e$  je efektivní index lomu mřížky jádra vlákna. Hloubka této fázové mřížky  $D_{PG}$  je definována (dle [1]):

$$D_{PG} = \frac{\lambda_{UV}}{2(n_{UV} - 1)} ,$$

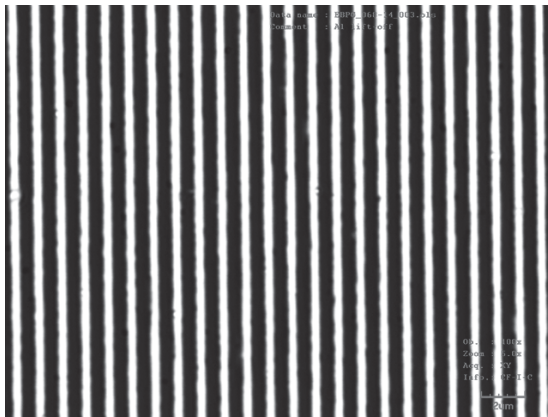
kde  $\lambda_{UV}$  je vlnová délka laseru použitého pro expozici a  $n_{UV}$  je index lomu podložky s fázovou mřížkou. Požadované Braggovy vlnové délky (1540; 1545; 1550; 1555; 1560 nm) odpovídají vypočteným mřížkovým periodám 1 061.2; 1 064.7; 1 068.2; 1071.7 a 1 075.2 nm.

Takto přesné struktury lze připravit pomocí elektronové litografie [2], [3]. Rezist PMMA používaný pro expozici (elektrony) nelze použít pro hluboké reaktivní iontové leptání (DRIE) vzhledem k jeho špatné selektivitě pro křemenné sklo (materiál finální fázové masky). Proto jsme vyzkoušeli tři modifikace techniky *lift-off* [4] pro přípravu kovové leptací masky, a to jednovrstvý *lift-off*, dvouvrstvý *lift-off* a *lift-off* s vícenásobnou násobnou expozicí (obrázek 1). Pro přípravu fázové masky pak bylo použito leptání DRIE se směsí plynů CF<sub>4</sub> a CHF<sub>3</sub> (obrázek 2).

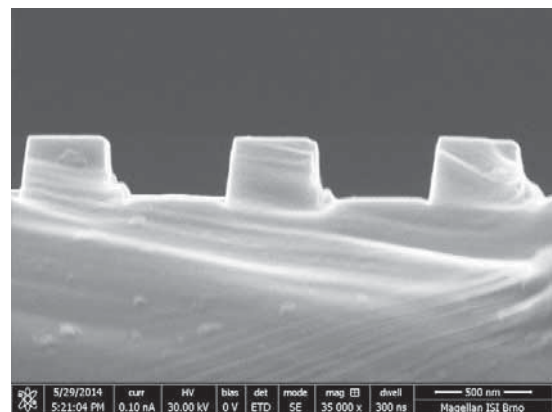
Pro UV expozici jádra vlákna (germaniem dopovaný křemík) byl použit excimerový laser s vlnovou délkou 248 nm. Dále byla změřena spektrální odezva na širokopásmový zdroj (obrázek 3). Na základě těchto experimentů byla vybrána nejlepší metoda pro přípravu fázových masek.

## Reference:

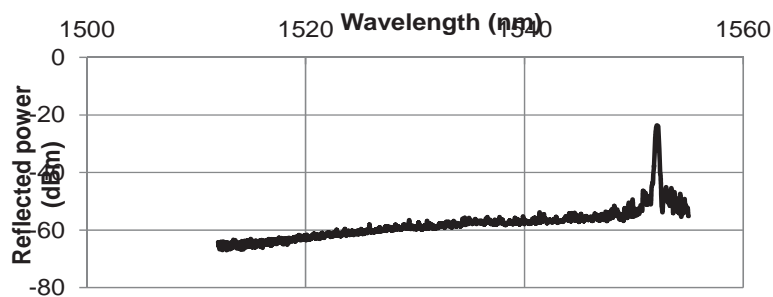
- [1] R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. London: Elsevier, 2010. 611 pages. ISBN 978-0-12-372579-0.
- [2] P. Rai-Choudhury. *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication. Volume 1: Microlithography*. Washington: SPIE, 1997. 768 pages. ISBN 0-85296-906-6.
- [3] S. Kratky, et al. Comparison of Ultimate Resolution Achieved by E-beam Writers with Shaped Beam and With Gaussian beam. In *Proceedings of the 5th International Conference NANOCON 2013*. Ostrava: Tanger Ltd. 2013. ISBN 978-80-87294-44-4.
- [4] J. Chlumská, et al. Lift-off Technique Using Different E-beam Writers. In *Proceedings of the 5th International Conference NANOCON 2013*. Ostrava: Tanger Ltd. 2013. ISBN 978-80-87294-44-4.



Obrázek 1. Hliníková maska pro leptání křemenného skla pomocí DRIE



Obrázek 2. Fázová maska v křemenném skle



Obrázek 3. Spektrální odezva (odražený výkon) pro Braggovu vlnovou délku 1555 nm.

Poděkování patří Radku Holanovi za UV expozice a měření spektrální odezvy (včetně obrázku 3) a částečnému financování z různých zdrojů: MŠMT (LO1212) spolu s ES (ALISI č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017), TAČR TE01020233, TAČR TE01020118 a institucionální podpora RVO: 68081731.

## OPTICKÁ KOMUNIKACE VOLNÝM PROSTOREM NA PLNĚ FOTONICKÉ BÁZI

**Zdeněk Kolka, Otakar Wilfert, Viera Biolková, Peter Barčík**

Vysoké učení technické v Brně, FEKT, UREL

Technická 12, 616 00 Brno (tel.: 541146554, e-mail: {kolka|wilfert|biolkova}@feec.vutbr.cz, xbarci00@stud.feec.vutbr.cz, <http://www.feec.vutbr.cz/UREL>)

**Obor:** Optické komunikace

Free-Space Optics (FSO) je bezdrátová technologie pro spojení na přímou viditelnost, která přenáší data pomocí úzkého svazku modulovaného světla ve vzduchu jako přenosovém médiu. Technologie FSO dosahuje vysokých přenosových kapacit, které jsou srovnatelné s vláknovými systémy a dokonce umožňuje použít techniky WDM.

Systémy FSO, které byly původně vyvinuty pro vojenské použití, se začaly objevovat ve veřejném sektoru na počátku devadesátých let minulého století. V současnosti jsou již běžně dostupné spoje typu bod-bod s přímou viditelností s rychlostí 1 Gb/s nebo 10 Gb/s (Ethernet) pro nasazení v městských sítích k překlenutí vzdáleností do několika kilometrů. Prakticky výhradně jsou používány vlnové délky 850 nm nebo 1550 nm, přičemž vysílaný úzký optický svazek je generován polovodičovým laserem, tj. v přenosové cestě dochází k několikeré elektro-optické (E/O) konverzi signálu. Z hlediska omezení cenou dostupných laserových zdrojů, fyzikou atmosféry a hygienickými normami na ochranu zraku, dosáhla klasická konstrukce zařízení FSO s E/O převodem svého limitu.

Celosvětový vývoj vysokokapacitních komunikačních sítí nyní směřuje k plné fotonizaci. Proto se v současné době výzkumný tým na UREL FEKT VUT v Brně věnuje vývoji plně fotonického systému FSO, jehož hlavní výhoda spočívá v eliminaci elektro-optické konverze z komunikačního kanálu. Koncept fotonické sítě nabízí nový pohled na technologii FSO. Nyní se jedná o jedinou bezdrátovou technologii, která je schopna poskytnout fotonické služby.

Optický spoj je rozdělen na vnitřní jednotku (FSO-IDU) a vnější jednotku FSO-ODU. Vnější jednotka je koncipovaná jako opticky transparentní. Obsahuje pouze elektroniku pro směrování a případné ovládání adaptivní optiky. Vysílaný a přijímaný signál je veden optickými vlákny do vnitřní jednotky, která může být koncipována jako opticky průchozí nebo jako E/O převodník pro napojení na klasickou síť.



Experimentální FSO-IDU



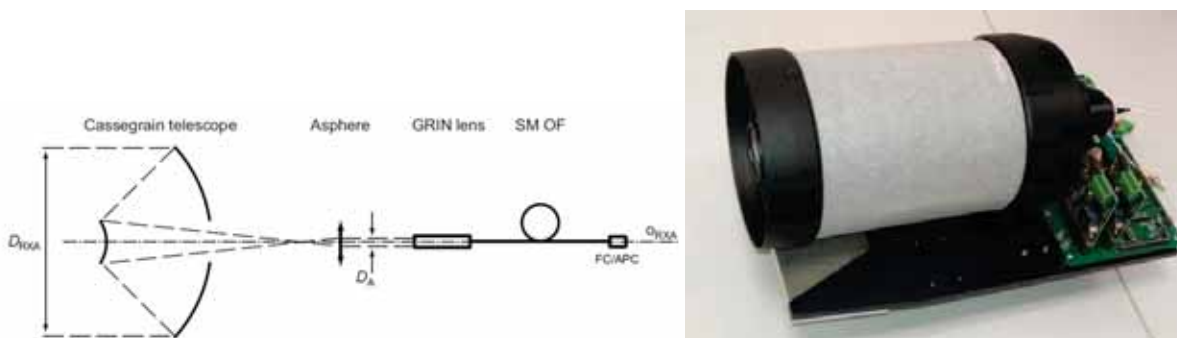
Instalace na MENDELU

V současné době je vytvořena experimentální jednotka FSO-IDU s E/O převodem, která obsahuje gigabitový budič na vlnové délce 1550 nm, optovlákonový zesilovač (EDFA) s výkonem 100 mW a detektor na bázi lavinové fotodiody.



Experimentální jednotka FSO-ODU pracuje prozatím v simplexním režimu. Mechanická konstrukce optické hlavice umožňuje dosměrování s krokem 50  $\mu$ rad. Spoj je instalován mezi budovou VUT Technická 12 (přijímač) a budovu Mendelovy univerzity Zemědělská 3 (vysílač). Délka linky je 3,5 km.

Vývoj optického přijímače v současné době stále probíhá. Navržené řešení je založeno na zrcadlové soustavě typu Cassegrain, která se vyznačuje menší sférickou vadou ve srovnání s cenově odpovídajícím čočkovým objektivem stejné velikosti. Vnitřní člen umístěný v ohnisku využívá asférickou čočku pro navázání světla do vláknového kolimátoru GRIN. Vývojové práce jsou zaměřeny na minimalizaci vazebního útlumu. Jedná se o problematiku, kde řešitelský tým uvítá případnou spolupráci.



Optický přijímač – vnitřní uspořádání a experimentální realizace (objektiv na polohovací platformě).

Popsané výzkumné aktivity jsou podpořené mj. grantovými projekty MPO č. FR-TI4/148 - *Hybridní bezdrátová technologie pro municipální síť*, TA ČR č. TA02030845- *Inteligentní infrastruktura pro moderní město* a MŠMT č. LD12067 - *Modelování šíření optických vln v atmosféře* v rámci akce COST IC1101.

#### Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Modelování průchodu optického svazku atmosférou, analýza rozptylu, turbulence a časové disperze u atmosférických optických spojů.
- Vývoj plně fotonické technologie FSO.
- Soustavy pro optimální realizaci optického přijímače s výstupem do jednomodového vlákna včetně využití adaptivní optiky.
- Generování negaussovských svazků, řešení otázek difrakce.
- Měření, klasifikování a potlačení vlivu atmosférické turbulence na kvalitu přenosu atmosférickým optickým spojením.
- Praktický vývoj atmosférických optických spojů pro experimentální účely.

## APLIKACE LASERU PŘI VÝROBĚ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

### Adam Čermák

ZČU Plzeň, Katedra technologie obrábění  
Univerzitní 22, 306 14 Plzeň  
cermi89@kto.zcu.cz; www.kto.zcu.cz

### Pavel Kožmín; Petr Šracha; Jiří Syrovátka

HOFMEISTER s.r.o., výroba řezných nástrojů  
Daimlerova 9, 301 00 Plzeň  
kozmin@hofmeister.cz; sracha@hofmeister.cz; syrovatka@hofmeister.cz

www.hofmeister.cz

**Obor:** mikroobrábění laserem; ps pulzní režim; úprava geometrie řezných nástrojů včetně prototypových vzorů

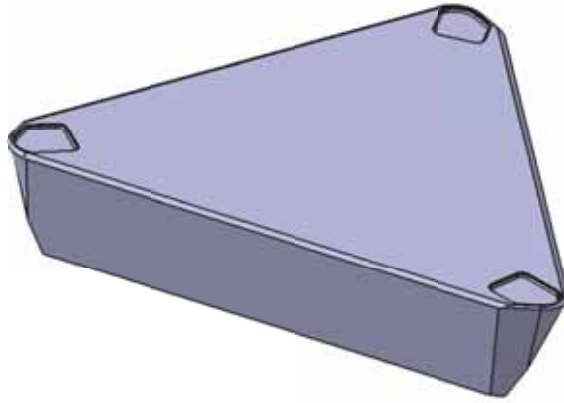
Příspěvek pojednává o možnostech využití pulzních laserů ve výrobě řezných nástrojů. Tyto experimenty byly provedeny ve spolupráci s katedrou technologie obrábění v Plzni a s firmou HOFMEISTER s.r.o., kde probíhala realizace a vyhodnocení úprav provedených na břitech řezných nástrojů.

V tomto příspěvku jsou specifikovány různé druhy geometrie břitů, které lze laserovým paprskem modifikovat. Tyto geometrie břítu lze rozdělit na makrogeometrii břítu (základní úhly řezného nástroje; utvařeče třísek; různé typy fasetek) a mikrogeometrii břítu (zaoblení břítu; dosažení požadované drsnosti).



Obrázek 1 Řezné nástroje firmy HOFMEISTER

Práce poukazuje na současné problémy a na slabá místa používání laserů v tomto odvětví. Tyto nedostatky vyplývají z nároků na výsledná provedení úprav břítu řezného nástroje. Precizní zpracování břítu laserovou technologií je pro samotný řezný proces stěžejní, proto bylo zadána několika světovým výrobcům laserových obráběcích výroba požadované entity, tzv. utvařeče třísek na vyměnitelné břitové destičce, která je součástí řezného nástroje – viz obr.1.



Obrázek 2 Vyměnitelná břitová destička se třemi utvařeči třísek

Konkrétní utvařeč třísky na obr.2 dosahuje hloubky 0,1mm včetně předepsané kvality povrchu, která byla stanovena parametrem drsnosti  $Ra < 0,4\mu\text{m}$ . Druhá polovina příspěvku zahrnuje možnosti řízení procesu mikroobrábění z pohledu laserového zdroje a vedení laserového paprsku – viz obr.3, kde jsou charakterizovány procesní parametry laserového zdroje tak, aby bylo možné dosáhnout požadovaných geometrických tvarů.



Obrázek 3 Rozdílná interakce laserového paprsku s materiálem při změně skenovací rychlosti

V závěru práce jsou shrnuty poznatky, které jsou pro úspěšné zvládnutí laserového mikroobrábění na řezných nástrojích důležité.

### Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu SGS-2013-031: Výzkum a vývoj pro inovace v oboru strojírenská technologie-technologie obrábění.

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

- 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)

## 50-LETÉ VÝROČÍ HE-NE LASERŮ V ČESKOSLOVENSKU

### Jiří Kršek

ÚPT AV ČR, v.v.i., oddělení koherenční optiky  
Královopolská 147, Brno, 612 64  
+420 541 514 127  
jikr@isibrno.cz

**Obor:** Lasery

Příspěvek je věnován všem účastníkům prvního laserového setkání v březnu roku 1963 na zámku ČSAV v Liblicích, jmenovitě zakladateli tohoto oboru v Československu dr. Karlu Pátkovi a hlavně všem pracovníkům oddělení kvantových generátorů světla Ústavu přístrojové techniky ČSAV v Brně, jmenovitě in memoriam vedoucímu projektu Františkovi Petřů, kolegům Vlastislavu Bočkovi a Bohumíru Popelovi a také Zdeňku Knittlovi z ÚVOJM Meopta, Přerov, kteří se zasloužili o rychlou realizaci prvního plynového He-Ne laseru v Československu již téhož roku, vybuzením stimulované emise koherentního laserového záření dne 16. října 1963.

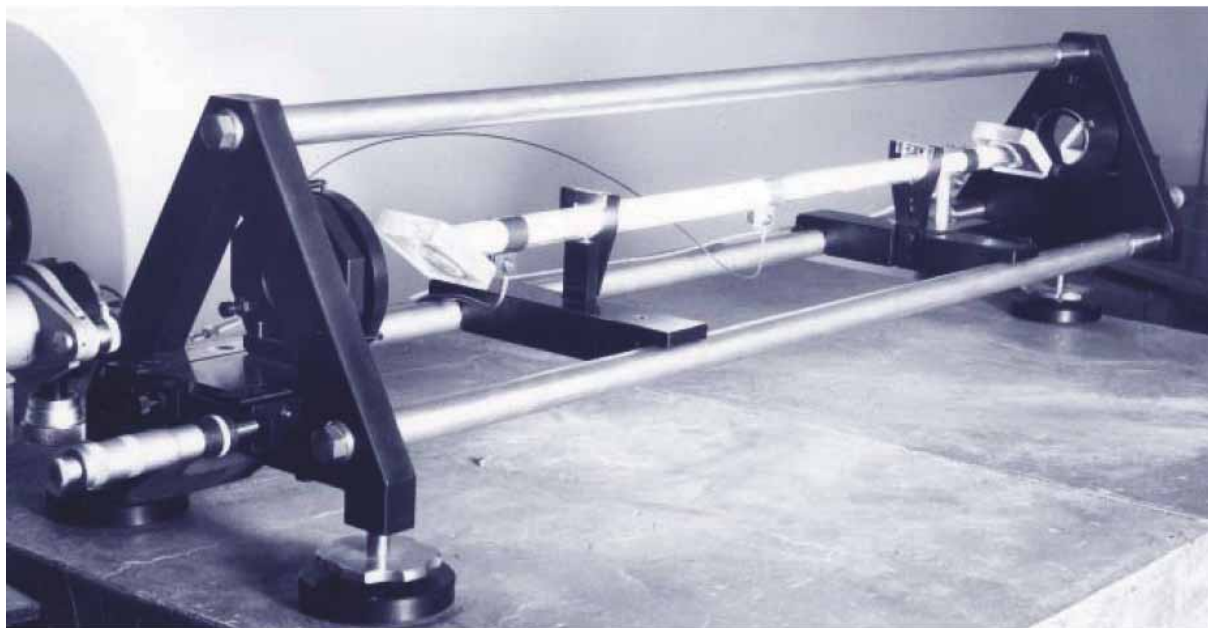


**Obr. 1:** První laserový seminář na zámku Liblicích pořádaný ve dnech 11. – 16. 3. 1963

Z pověření kolegia fyziky svolal Ústav přístrojové techniky na 16. dubna 1963 do ÚRE ČSAV koordinační poradou o laserech za přítomnosti pracovníků AsÚ, FzÚ, ÚPT, ÚRE, VÚVET, VÚST, VÚ 011, ÚVOJM, ČVUT. Bylo dohodnuto, že ÚPT a VÚVET budou zajišťovat laserovou přístrojovou techniku.

Karel Pátek, vynikající a dodnes citovaný český badatel v oboru optických vlastností pevných látek, v roce 1963 na půdě tehdejšího Fyzikálního ústavu ČSAV zprovoznil **první prototyp laseru** v Československu. Pátek si pro svůj laser zvolil aktivní prostředí neodymového skla. Ve stejném roce, na podzim 16. října 1963, byl vyvinut další laser, jehož aktivním prostředím byla plynná směs helia a neonu. Tento He-Ne laser sestavil v brněnském **Ústavu přístrojové techniky** kolektiv Františka Petřů za účasti Vlastislava Bočka, Bohumíra

Popely a Jiřího Krška. Tento laser pracoval v blízké IČ oblasti na vlnové délce 1152,3nm a hned příští rok 8. dubna 1964 byl spuštěn He-Ne laser na 632,8nm ve viditelné oblasti spektra.



**Obr. 2:** Detail laboratorní konstrukce prvního He-Ne laseru v ČR uvedeného do provozu 16. 10. 1963 v ÚPT.



**Obr. 3:** První He-Ne laser v ČR s částí vývojového týmu, zleva: Ing. V. Boček, Ing. F. Petru, Ing. J. Kršek, Ing. B. Popela.

V roce 1964 byly předány výsledky výzkumu a vývoje do n.p. Meopta, Přerov. Již v roce 1964 byly tyto lasery vystaveny na MSV v Brně a Meopta těchto laserů vyrobila asi 100 kusů, než jejich výrobu v roce 1968 zastavila.

Lasery se pomalu dostávaly do různých oblastí výzkumu a průmyslu a tento trend pokračuje i dnešních časech. Na následujících obrázcích jsou ukázky komerčních produktů, které vznikly transferem znalostí z výzkumu do praxe.



**Obr. 4:** Ukázka dvou generací laserových hlavic, jejichž frekvence byla stabilizována saturevanou absorpcí v parách jodu.



**Obr. 5:** Použití laserového měřiče délky ve Vítkovcích na frézce. Laserová hlavice je pevně spojená s dělicí optikou, měřící svazek se šířil ke koutovému odražeči, který byl připevněn k odměřovanému vzorku. Tento výrobek byl v roce 1971 oceněn zlatou medailí na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně.

## VYUŽITÍ TERMOGRAFIE PŘI SVAŘOVÁNÍ LASEREM

### 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

### Termografie

Všechny předměty s teplotou vyšší než absolutní nula (0°K) emitují infračervené záření. Takové záření je pak detekováno termografickými kamerami s různými typy detektorů citlivými na různé vlnové délky IČ záření. Při správném zadání parametrů určujících vlastnosti měřeného objektu a popisujících prostředí mezi detektorem kamery a měřeným objektem je možné rovněž kvantifikovat (vyhodnotit) hodnoty teplot objektů. Termografie je tedy zobrazování teplotních polí nejen povrchů měřených objektů a jejich kvantifikace. V dnešní době je možné již zcela zřetelně rozdělit termografii na *Pasivní* a *Aktivní (Lock-in)*.

#### *Pasivní termografie*

Předmětem pasivní (konvenční) termografie je zobrazování a měření převážně povrchových teplot objektů. Termografický systém detekuje teplotu v závislosti na infračerveném záření emitovaného měřeným objektem. Použitím tzv. pasivní termografie tedy můžeme bezkontaktně získat informace o povrchu měřeného objektu. Díky termografickým systémům s vysokým rozlišením a teplotní citlivostí můžeme v dnešní době detekovat teplotní rozdíly až 10mK. S vhodnými typy kamer a adekvátními spektrálními filtry je pak možné zobrazovat teplotní pole skrze některé materiály.

#### *Aktivní termografie*

Metody měření aktivní termografie jsou založeny na vyhodnocování tepelného toku v testovaném objektu předem vygenerovaného excitačním signálem a jeho následné odezvy skrytých vad. Tepelný tok je generován tepelným pulsem nebo sinusovou modulací. Výsledky jsou pak prezentovány termografickou kamerou s následnou matematickou analýzou naměřené sekvence pro správnou interpretaci skrytých defektů uvnitř měřeného objektu. Termografická kamera musí být dostatečně teplotně citlivá, s vysokou záznamovou frekvencí, krátkým integračním časem detektoru a s možností synchronizace s externím excitačním zdrojem.

#### *Lock-in termografie*

Lock-in termografie je metoda, která významně navyšuje poměr signálu vůči šumu pro aplikace aktivní termografie. Tímto je analyzován tepelný tok a zobrazovaná je časová prodleva tohoto toku, čímž se detekují důležité materiálové vlastnosti nebo vady. Touto metodou je možné zvýšit teplotní citlivost celé sestavy na jednotky mK.

#### *Excitační metody pro aktivní termografii*

Následující seznam metod je již velice osvědčený pro oblast nedestruktivního testování:

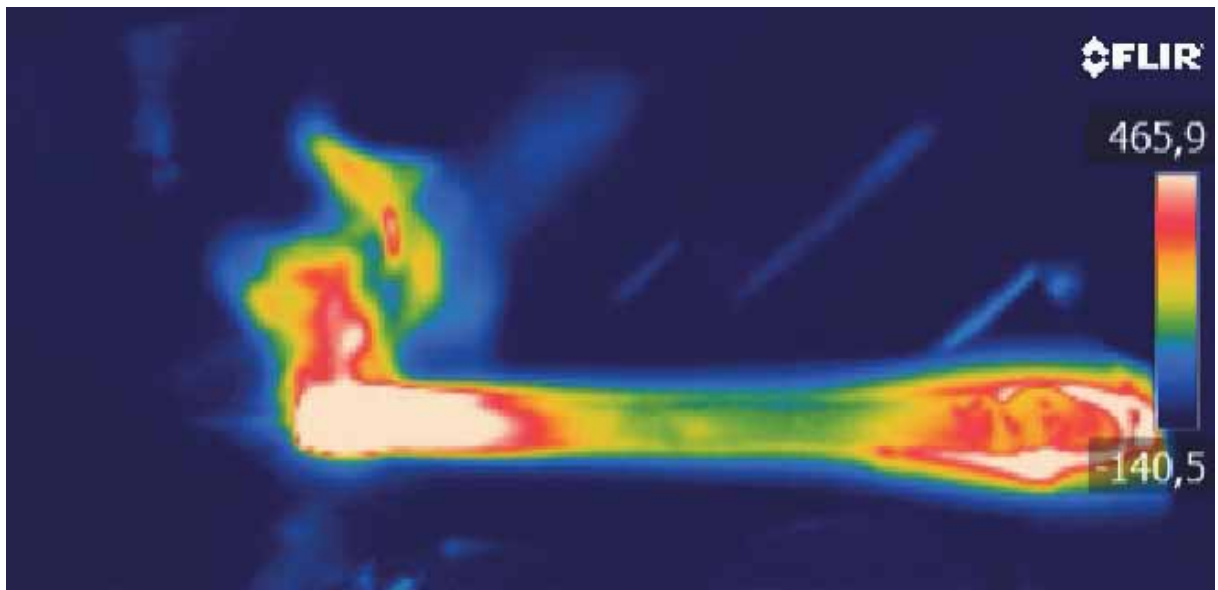
- Optická lock-in termografie

- Pulzní termografie
- **Laserová termografie**
- Indukční termografie
- Ultrazvuková termografie (vibrotermografie)

### **Termografie a její aplikace v oblasti svařování laserem**

Laserové svařování patří k **moderním metodám** nevratného spojování různých typů materiálů. Laserová metoda je využívána zejména pro svařování těch dílů, u nichž je kladen důraz na vysoké svařovací rychlosti, přesný, kvalitní svár bez trhlin, nečistot a pórů a nízké tepelné deformace okolního materiálu. Požadavky bývají hlavně vysoká procesní rychlost, stabilita a možnost kontroly kvality výsledného sváru.

Současnou termografií lze všechny zmíněné potřeby a nároky velice věrně kontrolovat, a to jak v průběhu samotného svařovacího procesu, tak i po provedeném svařování. První důležitou vlastností je záznamová rychlost termokamer v korelaci s možností nastavení integračního času a s ohledem na teplotní rozsah měřeného objektu. Další důležitou vlastností je velmi vysoká teplotní citlivost a široký teplotní rozsah systému, díky kterým je možné analyzovat teplotní pole nejen v okolí sváru, tedy analyzovat případné teplotní deformace materiálu. Nejdůležitější je však možnost kontroly kvality výsledného sváru tzv. aktivní termografií, která je v krátkosti popsána níže.

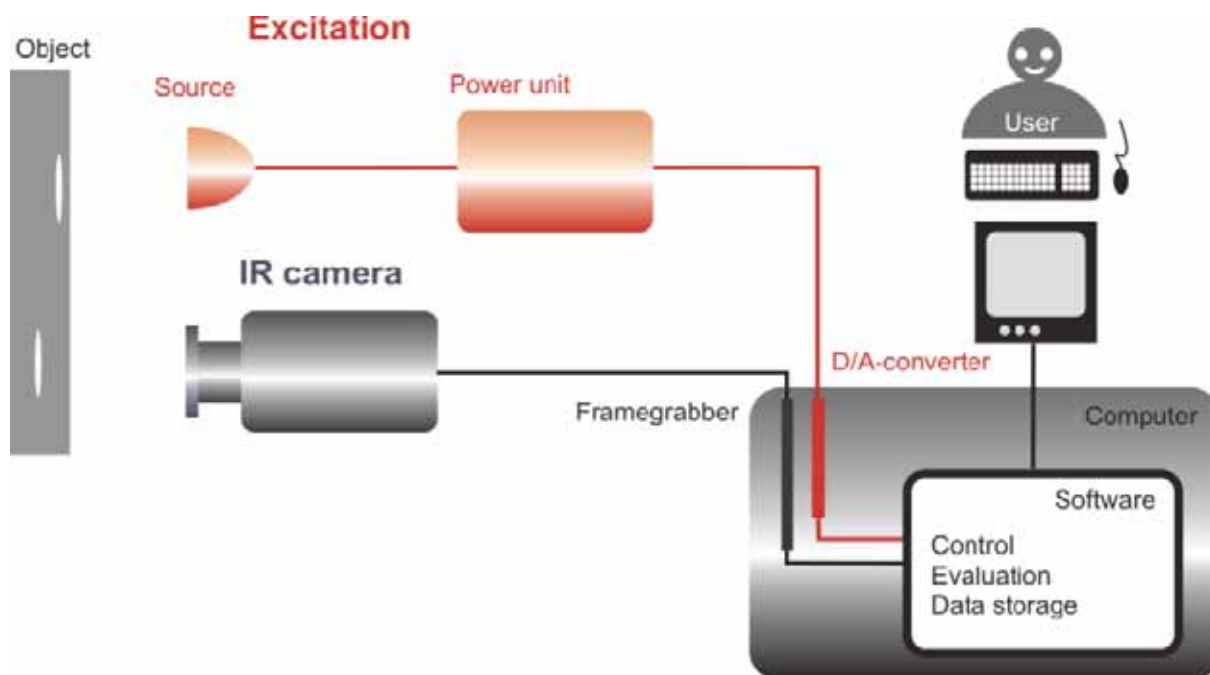


*Termografický záznam průběhu svařování laserem*

Další aplikace využití laseru různých výkonů je například řezání, gravírování/strukturování materiálu apod., kde je rovněž možné využít termografické metody pro analýzu provedených dějů a procesů, včetně jejich vlivu na samotný materiál.



## Aktivní termografie pro nedestruktivní testování



*Sestava nedestruktivního testovacího systému založeného na aktivní termografii*

### **Laserová aktivní termografie**

Aktivní termografie využívající excitaci laserem je bezkontaktní testovací metoda, která je ideální pro charakteristiku různých spojů, svárů, tenkých vrstev a povlaků. Velice krátký testovací čas a vysoká citlivost dělá laserovou termografii extrémně účinným nástrojem pro nedestruktivní testování materiálů. Technika Fourierova vyhodnocování umožňuje precizní určování vlastností materiálů, jako například tloušťka, pórovitost nebo tepelná vodivost. Kromě toho mohou být potlačeny různé vlivy proměnlivých vlastností povrchů nebo teplotních nehomogenit. Interpretace a dokumentace výsledků testů jsou velmi jednoduché. Nejběžnější aplikace jsou testování svárů, lepených spojů, nedestruktivní testování povrchů, testování vrstev a povlaků, apod.

Principem laserové termografie je ohřev povrchu sledovaného objektu v určité oblasti výkonovým laserem. Tepelný tok způsobený laserovou excitací hraje v laserové termografii základní roli. Tepelné bariéry (proměnlivá tloušťka nebo materiálové defekty) mění tepelný tok projevující se na povrchu měřeného objektu - teplotní rozdíly tvořené na povrchu jsou poté monitorovány vysokorychlostní termografickou kamerou. Citlivost této metody může být dále zvýšena tzv. lock-in technikou. Intenzita distribuce povrchové teploty je zde spektrálně analyzována a rozložena na fázový a amplitudový obraz Fourierovou transformací. Z fázového termogramu je možné získat kvantitativní analýzu určitých materiálových vlastností.



*Ukázka detekce anomálií CFRP po externí excitaci*

# INTERFEROMETRICKÝ SYSTÉM PRO SOUŘADNICOVÉ ODMĚŘOVÁNÍ

Josef Lazar<sup>a</sup>, Miroslava Holá<sup>a</sup>, Jan Hrabina<sup>a</sup>, Jindřich Oulehla<sup>a</sup>, Ondřej Číp<sup>a</sup>, Miloslav Vychodil<sup>b</sup>, Petr Sedlár<sup>b</sup>, Milan Provazník<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i  
Královopolská 147 Brno 612 64, tel.: +420 541 514 127, e-mail: joe@isibrno.cz,  
www.isibrno.cz

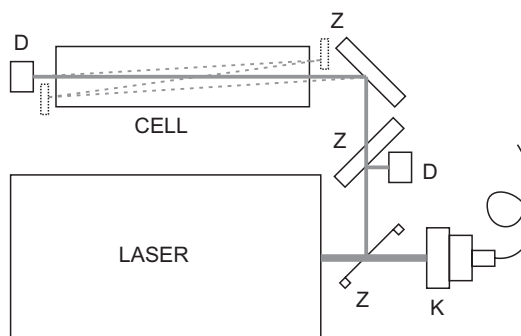
<sup>b</sup>Meopta – optika, s.r.o.  
Kabelíkova 1, 750 01 Přerov

**Obor:** Koherentní lasery a interferometrie

Interferometrické měřicí systémy představují nejpřesnější nástroj pro měření geometrických veličin a to nejen z pohledu komerční dostupnosti na trhu, ale z pohledu základní metrologie, fyzikálních principů a limitů a současně platné definice délky. Nalézají uplatnění všude, kde přesnost, rozlišení a také rozsah a dynamika měření představuje nejvyšší prioritu.

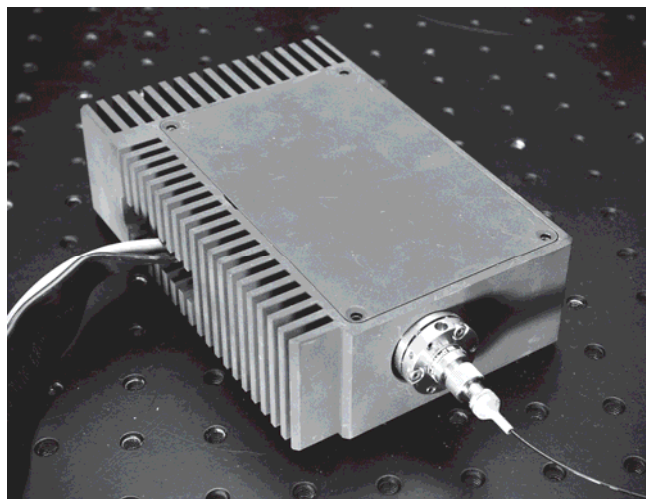
Základní konfigurace laserového interferometru pro měření délek představuje laserový zdroj záření s vysokou koherencí se stabilizací frekvence, optika interferometru s polarizační separací svazků v měřicí a referenční dráze, detekční systém, elektronika a software pro zpracování a vyhodnocení signálů a systém pro kompenzaci vlivu indexu lomu prostředí.

Konstrukce vlastního laserového zdroje vycházela z použitého laseru – Nd:YAG laseru se zdvojnásobením optické frekvence. Výstup z laseru je dělen na malou část využitou ke stabilizaci a většina je vyvedena do kolimátoru s příslušným počtem stupňů volnosti pro justáž vyvážání do optického vlákna. Kyveta z borosilikátového skla je součástí skříně. Její délka postačí díky silným absorpčním čarám na této vlnové délce malá. Má 10 cm a je ve skříně z prostorových důvodů umístěna rovnoběžně s laserem. Optická konfigurace je na obr. 1 a fotografie laseru na obr. 2



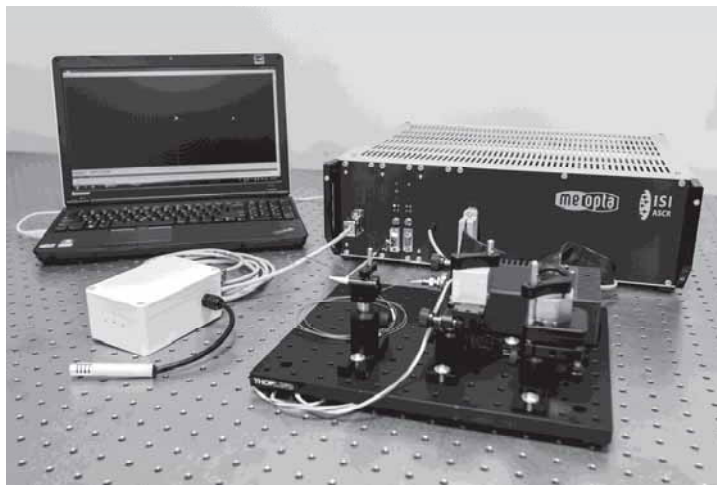
Obr. 1: Optické schéma stabilizovaného laseru. D – fotodetektory, Z – zrcadla, K – kolimátor do optického vlákna. Čárkovaně je naznačena alternativní dráha svazku pro víceprůchodové uspořádání.

Detekce absorpčních čar je realizována formou lineární absorpční spektroskopie. Navržené řešení využívá techniku pomalého ladění v okolí maxima absorpce s reverzací směru ladění v okamžiku poklesu detekované absorpce.



*Obr. 2: Fotografie celého stabilizovaného laseru s optovláknovým výstupem.*

Funkčnost základního uspořádání sestavy interferometrického měřicího systému byla ověřována na sestavě složené z části z komerčních optických komponentů. Sestavení funkčního interferometru obsahujícího všechny základní prvky, včetně stabilizovaného laseru, optiky a elektroniky bylo mimo jiné motivováno účastí spoluřešitele – firmy Meopta - optika, s.r.o. na veletrhu LASER 2013 v Mnichově. Jedná se o velmi prestižní událost v oboru optiky a laserové techniky a považovali jsme za žádoucí připravovaný interferometrický systém na výstavě prezentovat ve stánku Meopta - optika, s.r.o. (obr. 3).



*Obr. 3: Celkový pohled na prototyp*

### **Poděkování**

Autoři děkují za podporu projektům RVO:68081731, a TAČR: TA02010711 a TE01020233, EC a MŠMT (projekt č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

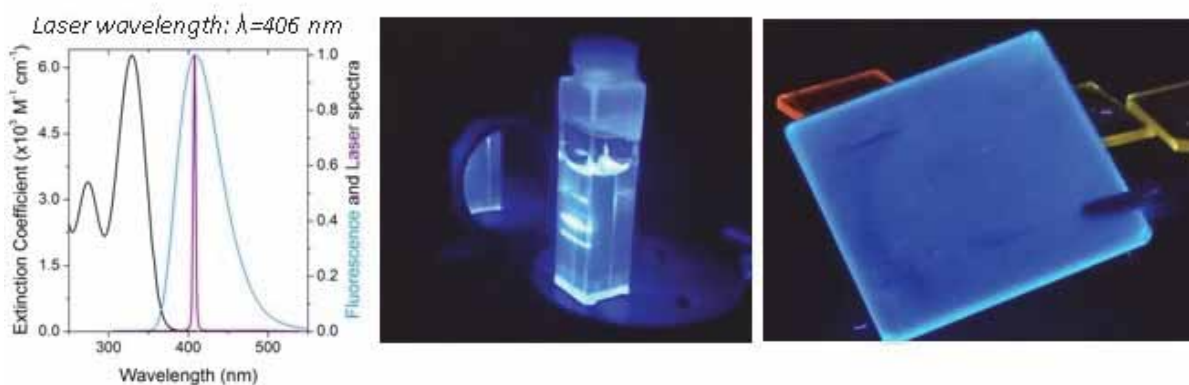
## THE FIRST BORANE LASER

**Michael G.S. Londesborough**

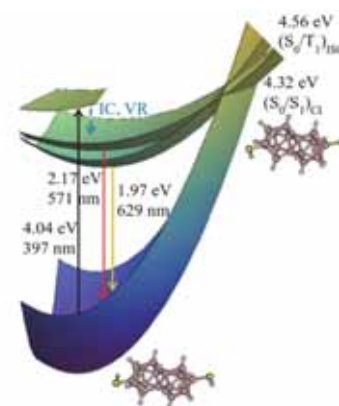
Institute of Inorganic Chemistry of the AS CR, v.v.i.,  
250 68 Husinec-Řež,  
Czech Republic

**Obor:** laser, laser materials, borane

Emission from electronically excited species forms the basis for an important class of light sources, that of lasers. Most commercially available solution-processed laser materials are based on conjugated carbon-based (organic) compounds. These materials have, however, several significant limitations, including low solubility, low chemical- and photo-stability, and uncompetitive prices. Here we report a novel and competitive alternative to these existing laser materials that is based on the boron hydrides; inorganic cluster compounds with a rich and diverse chemistry. We demonstrate<sup>1,2</sup> that solutions of the borane *anti*-B<sub>18</sub>H<sub>22</sub> show, under pulsed excitation, blue laser emission at 406 nm with efficiency (ratio of output/ input energies) of 9.5 % and a photostability superior to the commercial laser dye diphenylstilbene (DPS) that has overlapping absorption and emission bands with *anti*- B<sub>18</sub>H<sub>22</sub>. This demonstration opens the doors to a new class of laser materials based on a previously untapped resource for laser technology – the boranes.



In addition, the seminar will mention how the photophysical properties of the highly fluorescent boron hydride cluster *anti*-B<sub>18</sub>H<sub>22</sub>, can be tuned by straight-forward chemical substitution to produce, for example, 4,4'-(HS)<sub>2</sub>-*anti*-B<sub>18</sub>H<sub>20</sub>, which facilitates intersystem crossing from excited singlet states to a triplet manifold.<sup>3</sup> This subsequently enhances O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>) singlet oxygen production from a quantum yield of Φ<sub>Δ</sub> ~ 0.008 in *anti*-B<sub>18</sub>H<sub>22</sub> to 0.59 in 4,4'-(HS)<sub>2</sub>-*anti*-B<sub>18</sub>H<sub>20</sub>.<sup>3</sup>



<sup>1</sup> M. G. S. Londesborough, D. Hnyk, J. Bould, L. Serrano-Andres, V. Sauri, J. M. Oliva, P. Kubat, K. Lang, Distinct Photophysics of the Isomers of B<sub>18</sub>H<sub>22</sub> Explained, *Inorg. Chem.* **51**, 1471-1479 (2012).

<sup>2</sup> L. Cerdán, J. Braborec, I. Garcia-Moreno, A. Costela, M. G. S. Londesborough, A Borane Laser, *Nature Commun.*, submitted, (2014).

<sup>3</sup> V. Sauri, J. M. Oliva, D. Hnyk, J. Bould, J. Braborec, M. Merchán, I. Cisarova, P. Kubat, K. Lang, and M.G.S. Londesborough, *Inorg. Chem.*, **52**, 9266-9274 (2013).

## ULTRAFASST PLASMAS AT WORK: FROM POSTIONIZATION TO THZ WAVEMIXING

**Dušan Lorenc<sup>1,3\*</sup>, L. Haizer,<sup>1,2</sup> M. Jerigova,<sup>1,3,4</sup> M. Stupavska<sup>5</sup> and D. Velic<sup>1,3,4</sup>**

<sup>1</sup>International Laser Centre, Ilkovicova 3, 84104 Bratislava, Slovak Republic

<sup>2</sup>Faculty of Mathematics, Physics and Computer Science, Comenius University, Bratislava, Slovak Republic

<sup>3</sup>Ruprecht A. Institute of Technology, 81109 Bratislava, Slovak Republic

<sup>4</sup>Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Mlynska dolina, 842 15 Bratislava, Slovak Republic

<sup>5</sup>Department of Physical Electronics, Masaryk University, 61137 Brno, Czech Republic

\*email: lorenc@ilc.sk

**Obor:** OPA pumped tunable source, ultrashort laser pulses

An overview is presented of the recent progress in the area of ultrafast filamentation and corresponding applications achieved within the International Laser Centre.

The concept of multicolor THz generation in laser plasmas is briefly introduced along with the first steps taken at the Photonics Institute Vienna that eventually led to the first successful demonstration of incommensurate wave-mixing based THz source. The OPA pumped tunable THz source delivers broadband ultrafast THz pulses with a spectral bandwidth exceeding 40 THz.

Second part of the talk focuses on the preionization and postionization experiments performed using an amplified ultrafast laser system and a Secondary Ion Mass spectrometer. It is shown that the yield of specific fragments in the mass spectra can be enhanced and/or suppressed depending upon careful tuning of the experimental degrees of freedom.

Finally, a brief overview is given of the experimental work on laser filamentation in High Pressure Gass Cell (HPGC) which seems to be a promising approach to spectral broadening and recompression of high energy ultrafast pulses.

*This research is sponsored by NATO's Public Diplomacy Division in the framework of "Science for Peace," project Nr. Sfp984698. Work of DL was in part co-sponsored by the Lise Meitner Fellowship and the work of MS was supported by CEPLANT CZ.1.05/2.1.00/03.0086.*

## OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY PRO MĚŘENÍ DÉLKY, TLAKU, TAHU, TEPLoty A VIBRACÍ

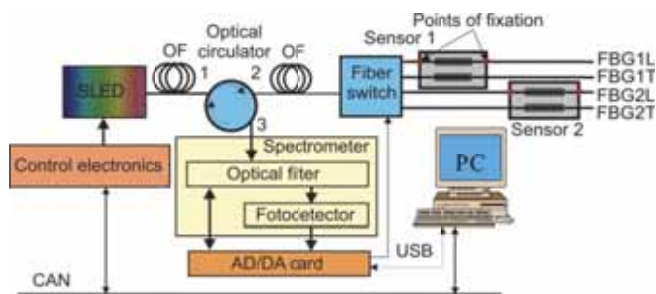
**Břetislav Mikel**

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 závislé 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 mj. řešíme několik projektů, které se zabývají vývojem optovláknových senzorů s Braggovými mřížkami pro měření vibrací, délky, teploty a tvarových změn betonových staveb. Největší potenciální aplikací tohoto směru vývoje je projekt na měření tvarových změn kontejnmentu v JE Temelín. Náš výzkum v této oblasti je směřován k vývoji senzorů, které bude možné aplikovat do již postavených staveb, mostů apod. Pro takový případ vyvíjíme konstrukci senzoru, který bude možné připevnit na stavbu zvenku a ve kterém bude možné kompenzovat změny teploty a tlaku, které nesouvisí se změnou měřeného objektu. Dalším typem senzoru je např. senzor vibrací, kde využíváme zúžené optické vlákno, ve kterém je zapsána vláknová Braggova mřížka. Změnu úhlu konce vlákna s mřížkou lze pak měřit pouze optickým měřidlem výkonu a není nutné používat optický spektrometr.

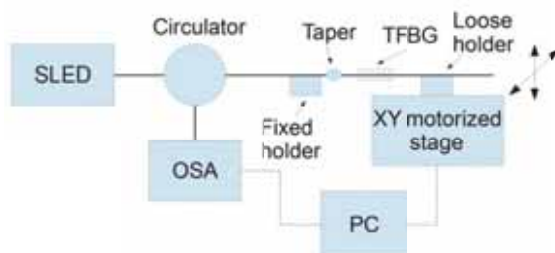


a)

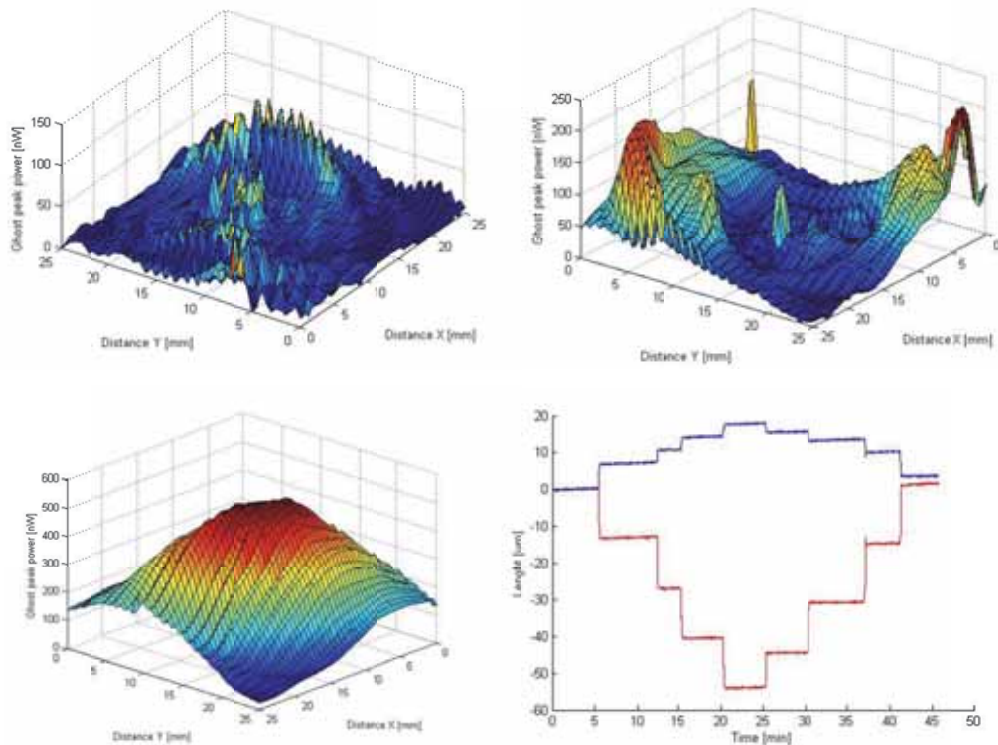


b)

Obrázek 1. Vlevo - Principiální schéma testovacího měření systému pro měření tvarových změn kontejnmentu, vpravo - fotografie z testovacího měření systému pro měření tvarových změn kontejnmentu.



Obrázek 2. Vlevo - Principiální schéma testovacího systému pro měření uhlových změn, vpravo - fotografie měřicího systému.



Obrázek 3. Meřené senzory – a) vlevo nahoře – dlouhý adiabatický taper – 6,2mm, b) vpravo nahoře – středně dlouhý taper – 4,2mm, c) vlevo dole – velmi krátký taper – 460 $\mu$ m, d) vpravo dole – záznam protažení senzorů na zkušební lavici, na měřené lavici byla vyvíjena síla 0–20 kN v krocích po 5 kN.

Ve spolupráci s firmou NETWORKGROUP s.r.o. jsme vyvinuli řídicí systémy pro všechny vyvíjené typy senzorů. Pro měření tvarových změn kontejnmentu jsme vyvinuli mj. optický spektrometr s optickým filtrem, který obsahuje dlouhodobou kompenzaci nelinearity piezometru a teplotních změn.

Na obrázcích 1 a 2 jsou uvedeny principiální schémata měření uvedených typů senzorů spolu s fotografiemi těchto experimentů. Obrázky 3 a), b) a c) znázorňují závislost optického výkonu odraženého od vláknové mřížky v závislosti na ohnutí optického vlákna v osách x a y. Jednotlivé závislosti se liší délkou zúžení/taperu optického vlákna. Je zřejmé, že pro měření je nejvhodnější zúžení optického vlákna v délce 460  $\mu$ m. Na obrázku 3 d) je pak časová závislost délky senzorů pro měření délky, která byla měřena na testovacím nosníku, který byl prohýbán silou 0–20–0 kN v krocích po 5 kN.

**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 laserových a optických zdrojů je podpořen z projektu Technologické agentury ČR TA01010995. Výzkum v oblasti vibračních senzorů je podporován z projektu Technologické agentury ČR TA03010835. Výzkum vláknových senzorů pro monitorování stavu kontejnmentu je podporován projektem MV ČR VG20132015124.

## ULTRARYCHLÝ LASER INSIGHT DS



### Martin Moser

MIT s.r.o.

Klánova 56, 147 00 Praha 4

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

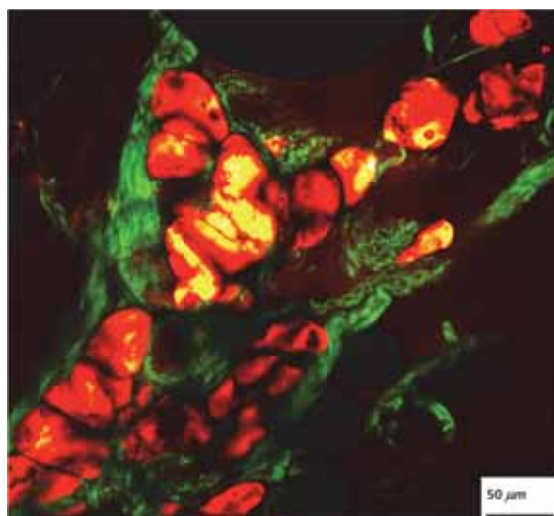
### Obor: Lasery, fotonika a jemná mechanika

Laser InSight DS byl nedávno představen ve vylepšené verzi InSight DS+, která kromě jiného dosahuje oproti dosud prodávanému laseru InSight DS vyššího garantovaného průměrného výkonu.

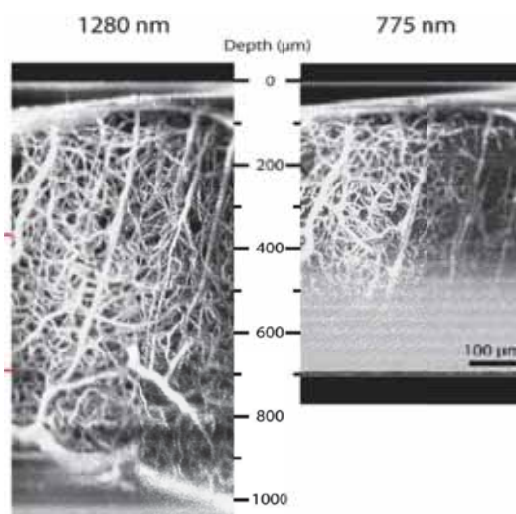
Společnost Spectra-Physics (divize Newport) představila v roce 2011 u příležitosti 50. výročí svého založení skutečně revoluční novinku - mimořádný ultrarychlý laserový systém InSight™ DeepSee™, který stanovil nové limity pro hloubku multifotonového zobrazování. Laser InSight DS přináší téměř dvojnásobný rozsah ladění vlnových délek oproti stávajícím ultrarychlým systémům a poskytuje tak snadný přístup k dlouhým infračerveným vlnovým délkám pro nejhlubší „in vivo“ zobrazování, a to bezprecedentních 680 nm až 1300 nm. Navíc laser obsahuje integrovaný DeepSee™ modul pro kompenzaci optické disperze.

Plynulé a velmi rychlé přeladování vlnových délek, 100 fs pulsy, nejvyšší špičkový výkon v infračervené oblasti, kde je zobrazovací hloubka maximální - to jsou klíčové parametry tohoto systému. Laser InSight DS+ má také výjimečnou stabilitu v pozici svazku, jeho kvalitu a stabilitu výstupního výkonu, což je ideální pro mikroskopii. Firma Spectra Physics dokonce nabízí druhý výstupní paprsek, který doplňuje hlavní laditelný, a je k dispozici pro pokročilé zobrazovací techniky jako např. CARS.

Ultrarychlý laser InSight DS+ lze vedle multifotonové mikroskopie použít i pro časově rozlišenou fotoluminiscenci, nelineární spektroskopii, THz zobrazování či metrologii polovodičů. Nečekané parametry má tento systém především v dlouhé infračervené oblasti. Garantovaný průměrný výkon svazku vyšší než 500 mW na vlnové délce 1300 nm, opakovací frekvence 80 MHz, délka pulzů nepřekračuje 120 fs, stabilita 1 %, velikost svazku 1,2 mm, to vše jsou parametry, které umožňují s pomocí mikroskopu zobrazování živých tkání do ještě donedávna nepředstavitelných hloubek při zaručené, dostatečně silné fluorescenci.



Svalová tkáň zobrazená pomocí metody CARS



Srovnání hloubky zobrazení vaskulárního systému mozku při vlnové délce 1280 nm a 775 nm

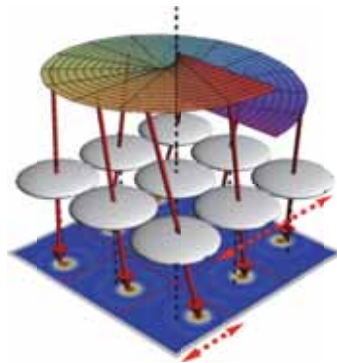


## DIAGNOSTIKA MODOVÉ STRUKTURY LASEROVÉHO SVAZKU

Libor Mot'ka, Bohumil Stoklasa, Jaroslav Řeháček, Zdeněk Hradil

katedra optiky, Univerzita Palackého, 17. listopadu 12, 77146

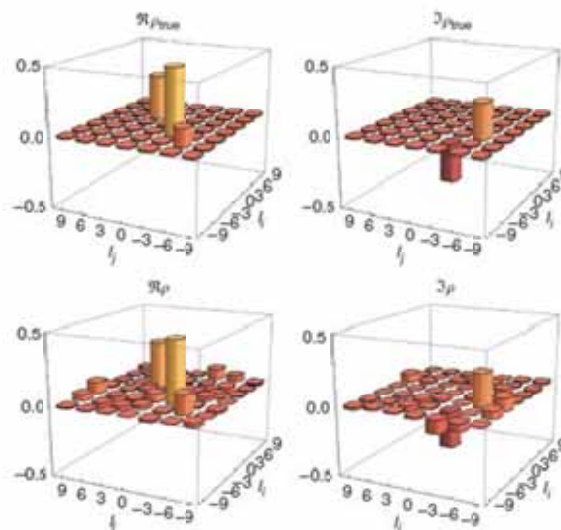
**Obor:** Shack-Hartmannův senzor je zařízení složené ze CCD kamery, před kterou je umístěna matice mikročoček. Na rozdíl od běžných intenzitních detektorů lze měřením na tomto senzoru získat informaci o fázových vlastnostech světla, tzn. v případě koherentního světla rekonstruovat vlnoplochu. V poslední době dochází k širokému využití toho senzoru v průmyslu, například při testování kvality optických systémů. Činnost senzoru je dobře definovaná pro koherentní světlo, avšak pro prostorově nekoherentní světlo klasické rekonstrukční algoritmy selhávají. V přednášce bude prezentován způsob, jak pomocí Shack-Hartmannova senzoru rekonstruovat stav světla, které je dáno nekoherentní superpozicí malého počtu modů. Tímto způsobem lze například popsat výstupní stav částečně koherentního světla laseru.



Experimentálně jsme tento princip demonstrovali při rekonstrukci stavu světla, které bylo připraveno nekoherentní superpozicí dvou vortexových módů:

$$|V_4 + V_{-4}\rangle\langle V_4 + V_{-4}| + k |V_0\rangle\langle V_0|.$$

Jednotlivé mody jsme připravili nezávisle pomocí prostorového modulátoru a následně promíchali na děliči světla.



Na obrázku je znázorněna reálná a imaginární část koherenční matice (popisující takovéto stavy světla) pro stav  $\rho_{true}$  (nahore) a jeho rekonstrukci  $\rho$  (dole). Koherenční matice je reprezentována v bázi vortexových módů.

# DEFORMOVATELNÉ ZRCADLO PRO VÝKONOVÉ TECHNOLOGICKÉ LASERY

**Libor Mrňa**

Ústav přístrojové techniky AV ČR v.v.i  
Královopolská 147, 612 64 Brno – Královo Pole  
mrna@isibrno.cz, 731 462 192

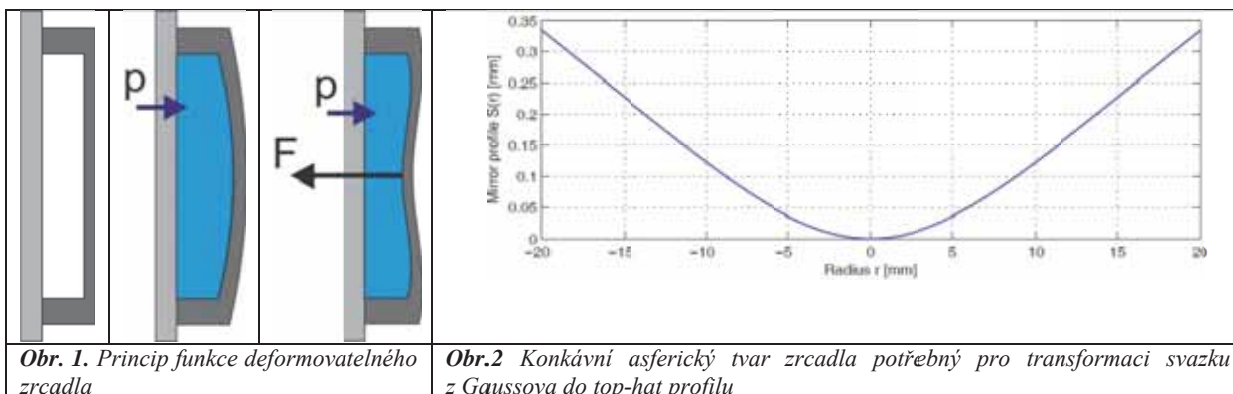
**Obor:** Výkonové laserové technologie

## 1. Úvod

Přibližně 30 let dominoval v oblasti strojírenských technologií CO<sub>2</sub> laser. Vzhledem ke konstrukci a uspořádání rezonátoru poskytoval tento laser výstupní svazek se směsným modem, blížícím se rozložením tzv. „top-hat“ nebo „doughnut“. V současné době se začínají rozšiřovat pevnolátkové lasery s rezonátorem ve formě optického vlákna nebo ve formě disku. Tyto lasery poskytují výstupní svazek s Gaussovským profilem. Pro některé technologické aplikace by však bylo výhodné mít rozložení energie ve svazku podobné výše uvedeným profilům. V současnosti existují optické elementy umožňující tzv. beam reshaping. Mají však řadu omezení, hlavně z hlediska malé výkonové hustoty. Ideální by byla možnost použití variabilního optického elementu, umožňující nastavení rozložení energie svazku přesně dle aplikace.

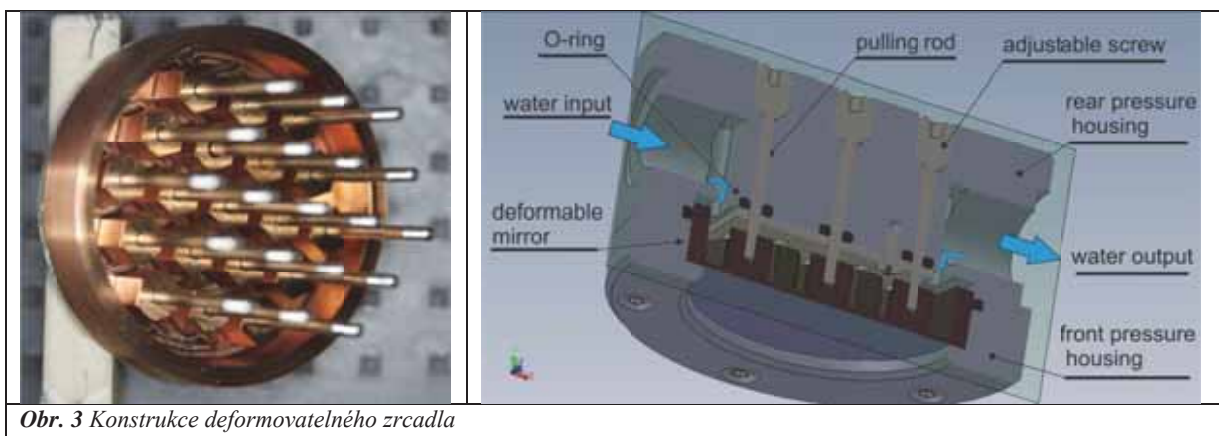
## 2. Deformovatelné zrcadlo

Navrhované řešení využívá tzv. membránové zrcadlo, vyznačující se malou konstrukční tloušťkou odrazné plochy. Pokud na zadní stranu zrcadla působíme tlakovou chladicí kapalinou, dojde k jeho vydutí. Jestliže na zadní stranu zrcadla působíme protisilou realizovanou sadou táhel, můžeme v určitém rozmezí měnit tvar zrcadla od vydutého po vypuklé. Chladicí kapalina zajišťuje dokonalé chlazení povrchu zrcadla. Princip je na obr. 1.



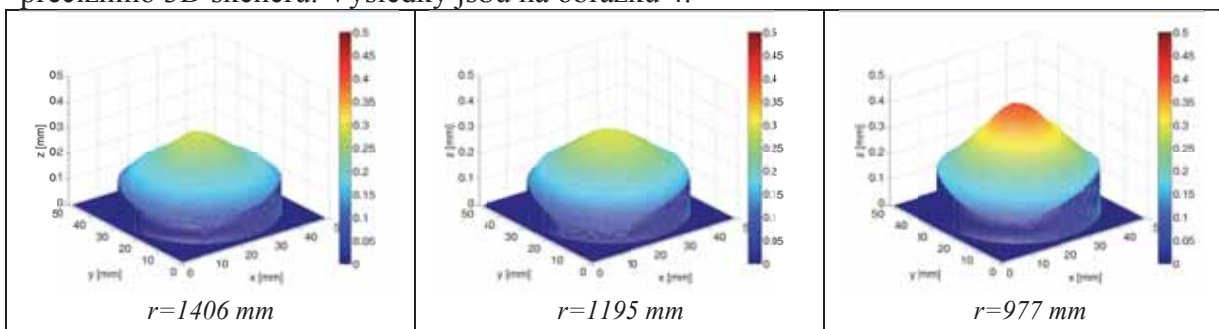
Díky tomuto principu je možné vytvořit potřebný asferický konkávní tvar zrcadla potřebný pro transformaci svazku z Gaussova profilu do profilu top-hat, viz obr. 2.

Z konstrukčního hlediska je samozřejmě nutné zajistit těsnost jednotlivých táhel proti úniku chladicí kapaliny, pohyb táhel je zajištěn šrouby s jemným stoupáním. Konstrukce je uvedena na obrázku 3. Samotné zrcadlo je vytvořeno ze standardního zrcadla pro výkonové aplikace tloušťky 10 mm, jehož zadní strana byla frézováním ztenčena na tloušťku 1 mm a byla v něm vytvořena soustava šestiúhelníkových sloupců se závitem pro uchycení táhel. Vlastní těleso je tvořeno duralovým válcem, ve kterém je uloženo deformovatelné zrcadlo, sada o-kroužků těsnící jednotlivá táhla a dutiny pro justážní šrouby táhel. Dále jsou zde otvory pro přívod a odvod tlakového chladicího média. Celek je utěsněn čelní přírubou. Při zkouškách tlakovým vzduchem byla ověřena dobrá těsnost celého systému.



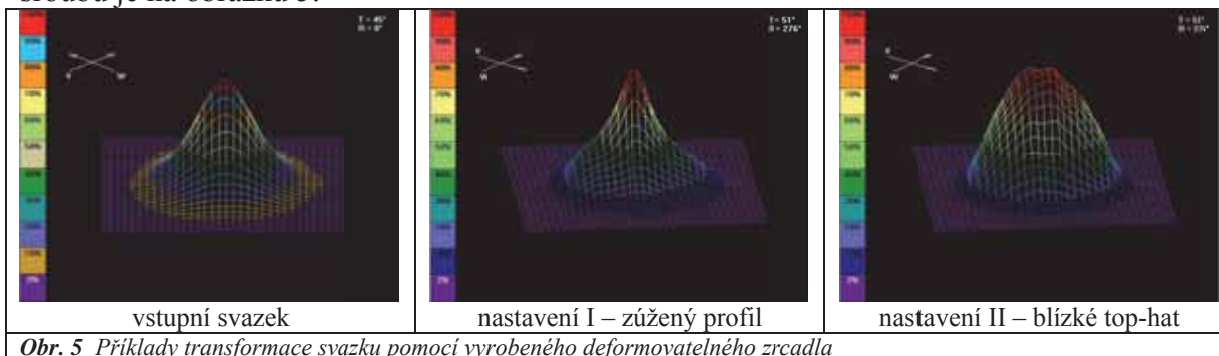
Obr. 3 Konstrukce deformovatelného zrcadla

Měření tvaru povrchu zrcadla proběhlo pro tři různá nastavení justážních šroubů pomocí precizního 3D skeneru. Výsledky jsou na obrázku 4.



Obr. 4 Výsledky měření povrchu zrcadla 3D skenerem, výsledky jsou vertikálně invertovány. Aproximované rádiusy křivosti

Poté bylo deformovatelné zrcadlo testováno pomocí nízkovýkonového laseru, který měl Gaussův profil. Výsledný profil po odrazu od zrcadla pro dvě různá nastavení justážních šroubů je na obrázku 5.



Obr. 5 Příklady transformace svazku pomocí vyrobeného deformovatelného zrcadla

### 3. Závěr

Bylo navrženo deformovatelné zrcadlo pro transformaci profilu výkonového laserového svazku v multikilowatové oblasti. Prvotní měření prokázala, že ho lze použít pro transformaci Gaussovského svazku na profil blízký top-hat.

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

- Smluvní výzkum v oblasti laserového svařování a dělení materiálů
- Měření spektrální absorpce (vrstvy pro solární absorbéry)
- Využití adaptivního zrcadla v laserových technologiích
- Diagnostika laserového svařovacího procesu

**Poděkování:** Toto pracoviště vzniklo za podpory Evropské komise a MŠMT České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) a NPU I (LO1212)

# METODA VYHODNOCENÍ INTERFERENČNÍHO POLE PŘI MĚŘENÍ TVARU OPTICKÝCH PLOCH S VYUŽITÍM KORELACE

**Jiří Novák, Pavel Novák, Petr Pokorný, Antonín Mikš**

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky

Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel.224357918, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz,

WWW: <http://departments.fsv.cvut.cz/aog/>

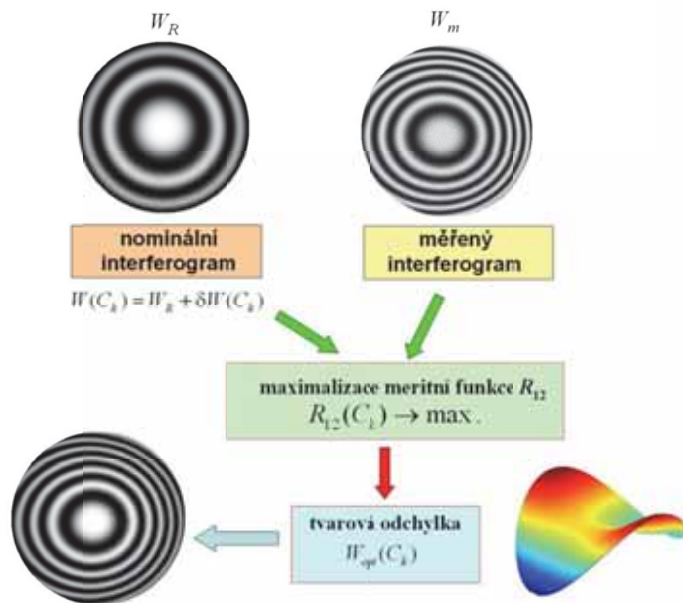
**Obor:** optická metrologie, interferometrie

Zcela zásadním prvkem všech interferometrických metod pro kontrolu tvaru optických ploch je proces vyhodnocení interferenčního pole a získání dráhového rozdílu, který odpovídá odchylkám tvaru kontrolované plochy od plochy referenční či nominální. Nejčastěji se v praxi používají metody fázového posuvu (angl. phase shifting) v časové nebo prostorové oblasti a metody vyhodnocení ve spektrální oblasti [1,2]. Všechny tyto metody poskytují nespojitě fázové hodnoty v intervalu  $[-\pi, \pi]$ , které je nutno následně pospojovat pomocí sofistikovaných matematických algoritmů (angl. phase unwrapping) [1,2]. Dále též metody fázového posuvu potřebují speciální prvky pro řízenou změnu fáze (např. piezoelektrický posuv, apod.), kterými musí být interferometr vybaven, což přináší samozřejmě i vyšší finanční nároky.

V rámci výzkumu byla navržena a analyzována metoda pro kvantitativní analýzu interferenčního pole, která odstraňuje některé nedostatky výše zmíněných metod. Cílem bylo získat metodu umožňující vyhodnotit odchylku tvaru testované plochy s využitím pouze jednoho snímku interferenčního pole, která by neprováděla detailní analýzu interferenčního pole a nepotřebovala žádné specializované metody odstranění fázových hodnot tak, jak je to běžné u většiny současných metod. Metoda využívá korelační koeficient jako měřítko podobnosti virtuálního (nominálního) interferogramu, jenž odpovídá nominální hodnotě tvaru plochy, která má být vyráběna a kontrolována a interferogramu, který odpovídá skutečně vyrobené optické ploše, jež je interferometricky testována. Předpokládejme, že dráhový rozdíl odpovídající měřené ploše je  $W_m$ . Na základě znalosti nominálního tvaru testované plochy (rovinné, sférické či asférické) a konstrukce interferometru lze počítačově modelovat optický dráhový rozdíl  $W_R(x, y)$  v jednotlivých bodech interferenčního pole  $(x, y)$  a následně i intenzitu interferenčního pole (nominální interferogram). Za předpokladu, že dráhový rozdíl  $(W_m - W_R)$  je malý, lze použít navrženou metodu pro kvantitativní vyhodnocování odchylek tvaru testovaných optických ploch od plochy nominální. Při měření je vzhled interferenčního pole (tvar a počet interferenčních proužků) přibližně nastaven tak, aby odpovídal modelovanému vzhledu nominálního interferogramu testované plochy. Tím je zajištěno, že odchylky jsou dostatečně malé. Úkolem metody je nyní nalézt takovou hodnotu dráhového rozdílu  $W = W_R + \delta W$ , pro nějž by modelovaný interferogram

$$I_R(x, y) = P_R(x, y) \left( 1 + K_R(x, y) \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} [W_R(x, y) + \delta W(x, y)] \right] \right), \quad (1)$$

kde  $P_R(x, y)$  je intenzita pozadí a  $K_R(x, y)$  je kontrast referenčního (nominálního) interferenčního pole, byl prakticky totožný s interferogramem měřené plochy  $I_m(x, y)$ . Potom platí, že dráhový rozdíl u obou interferogramů se rovná, tj.  $W_m = W_R + \delta W$ .



Takovýmto způsobem lze tedy získat kvantitativně určené odchylky tvaru od nominální plochy (viz. obrázek). Dráhový rozdíl  $\delta W$ , který je přidáván k původnímu dráhovému rozdílu nominálního interferogramu  $W_R$ , je modelován jako funkce parametrů  $C_k$ . Úlohou navržené metody je nalézt neznámé parametry  $C_k$  tak, aby interferogramy měly totožný tvar interferenčních proužků. Meritní funkcí tohoto optimalizačního problému byl zvolen korelační koeficient mezi oběma interferogramy. Použitím vhodných numerických optimalizačních metod lze získat neznámé parametry  $C_k$ , které vyjadřují

jak vzájemnou polohu referenční a testované plochy, tak i případnou odchylku tvaru porovnávaných optických ploch. Algoritmus uvedené metody byl naprogramován a ověřen na několika modelových případech s použitím různých optimalizačních procedur. Přesnost vyhodnocení pomocí uvedené metody je dosti vysoká (v řádu  $10^{-3}\lambda$  P-V,  $10^{-4}\lambda$  rms) a lze ji tedy použít k přesnému vyhodnocení tvaru kontrolovaných optických ploch. Funkčnost metody byla ověřena jak na simulovaných interferogramech, tak na reálných měřeních odchylek tvaru optických ploch. Výsledky prokázaly možnost použití této metody při interferometrické kontrole tvaru optických ploch.

*Práce byla vypracována v rámci projektu FR-TI3/023 Ministerstva průmyslu a obchodu ČR a grantu SGS14/110/OHK1/2T/11.*

### Literatura:

1. Malacara, D., Servin, M. and Malacara, Z.: Interferogram Analysis for Optical Testing, CRC Press, Boca Raton (2005).
2. Malacara, D.: Optical Shop Testing, 3 ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, New York (2007).

### Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- měření asférických ploch v optice, aplikace adaptivní a aktivní optiky v měřicích a zobrazovacích systémech, metody vyhodnocování fáze v optice s využitím koherentního i nekoherentního optického záření, měření kvality zobrazení optických soustav

## STANICE PRO LIDT TESTY OPTICKÝCH KOMPONENTŮ PŘI KRYOGENNÍCH TEPLOTÁCH

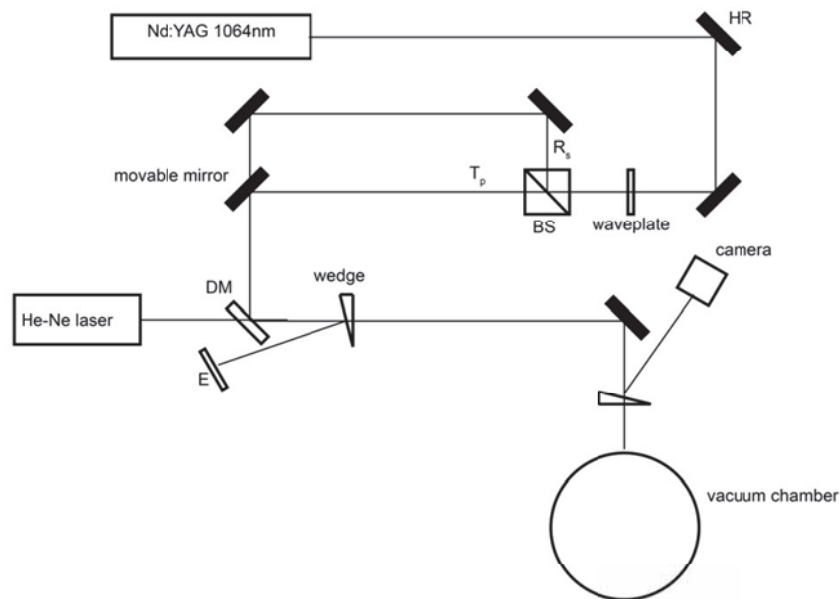
**Jindřich Oulehla**

Ústav přístrojové techniky AV ČR v.v.i.

Královopolská 147, 612 64, Brno, oulehla@isibrno.cz

**Obor:** Optika tenkých vrstev

Na Ústavu přístrojové techniky jsme se začali zabývat přípravou vrstev, které mohou být použity na optických komponentech ve vysokovýkonových laserových zařízeních. V takovýchto zařízeních jsou instalovány diodami čerpané pevnolátkové pulsní lasery (DPSSL) vyžadující použití různých optických komponentů schopných odolat poměrně vysokým hodnotám plošné hustoty energie. Při provozu takovýchto laserů vzniká velké množství odpadního tepla a je tedy nutné použít kryogenní chlazení. Cílem naší snahy je zkompletování experimentální sestavy schopné testovat různé typy vzorků jak za pokojové, tak za kryogenní teploty.



Pro tyto účely je v současné době kompletována experimentální sestava s vakuovou komorou, uvnitř které je umístěn testovaný vzorek a je tak chráněn před kontaminací. Jako zdroj laserového záření používáme Nd:YAG laser o vlnové délce 1064nm a maximální energii v pulsu cca 650mJ.

Tyto experimenty jsou doplňkem k naší hlavní činnosti, již jsou návrh a výroba optických filtrů pomocí vakuového napařování interferenčních vrstev. Jsme schopni deponovat různé materiály v závislosti na aplikaci. Nejběžnější kombinací je  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ , dále používáme například  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$  a jiné. Aplikacemi jsou interferenční filtry pro viditelnou, blízkou UV a blízkou IR oblast světelného spektra. Jako příklady námi navrstvených filtrů lze uvést antireflexní vrstvy, barevné (dichroické) filtry, hradící a pásmové filtry, děliče světla, tepelné filtry, polarizátory, nepolarizující děliče, apod.

Disponujeme zcela novou napařovací aparaturou od firmy Leybold Optics, která značně rozšířila naše stávající výrobní možnosti. Aparatura je vybavena dvěma elektronovými děly a dále pak iontovým zdrojem pro Plasma Ion Assisted Deposition. Díky této technologii jsme schopni deponovat například zrcadla s řízenou dispersí, monochromatické filtry nebo hradící filtry s velmi ostrou hranou.

#### Poděkování:

Tento výzkum je podporován projektem Aplikační a vývojové laboratoře pokročilých mikrotechnologií a nanotechnologií (ALISI), reg. číslo: CZ.1.05/2.1.00/01.0017. Autor dále děkuje za podporu projektům TA ČR: TE01020233 a TA02010711

#### **Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:**

- Návrhy systémů interferenčních vrstev
- Depozice na různé substráty dle aplikace
- Testy vrstev na LIDT

## VLÁKNOVÉ OPTICKÉ SOUČÁSTKY PRO VLÁKNOVÉ LASERY V „EYE-SAFE“ SPEKTRÁLNÍ OBLASTI V OKOLÍ 2 MIKROMETRŮ

**Pavel Peterka,<sup>1</sup> Pavel Honzátka,<sup>1</sup> Ivan Kašík,<sup>1</sup> Filip Todorov,<sup>1</sup>  
Pavel Koška,<sup>1</sup> Ondřej Podrazký<sup>1</sup> a Michael Písařík<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 18251 Praha 8 – Kobylisy  
tel: 266 773 527

e-mail: peterka@ufe.cz

www.ufe.cz

<sup>2</sup>SQS Vláknová optika, a. s., Komenského 304, 509 01 Nová Paka

www.SQS-fiber.cz

**Obor:** vláknové lasery, optická vlákna

Vláknové lasery pracující ve spektrální oblasti v okolí 2 mikrometrů jsou atraktivním zdrojem záření pro zpracování materiálů (zejména plastů), systémy LIDAR pro monitorování znečištění ovzduší, čerpání pevnolátkových laserů (ať už krystalů dopovaných úprvků vzácných zemin nebo holmiem dopovaných vláken), spektroskopii a generování širokopásmových zdrojů záření zasahujícím až do střední infračervené (mid-infrared) oblasti. Na vlnových délkách v okolí 2 mikrometrů dochází k poškození sítnice lidského oka až při více než o čtyři řády vyšších intenzit záření než je tomu u nyní běžně používaných vláknových laserů v okolí 1 mikrometru, jedná se o tzv. „eye-safe“ spektrální oblast.

V našem příspěvku popíšeme návrh, výrobu a charakterizaci vláknových optických součástek typu vlnový multiplexer (1,6/2 mikrometry), a širokopásmový vazební člen a odbočnice na vlnové délce 2 mikrometry. Ukážeme jejich využití pro kompaktní "monolitické" thuliem dopované vláknové lasery. Dále ukážeme přípravu vláknových mřížek s dlouhou periodou a slučovačů čerpání a signálu a jejich aplikaci ve vláknových laserech. Výzkum byl podpořen Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR v rámci programu TIP, projektem č. FR-TI4/734.



## PŘELADITELNÁ LASEROVÁ DIODA NA VLNOVÉ DÉLCE 633NM PRO PŘESNÁ MĚŘENÍ DÉLKY A SPEKTROSKOPII

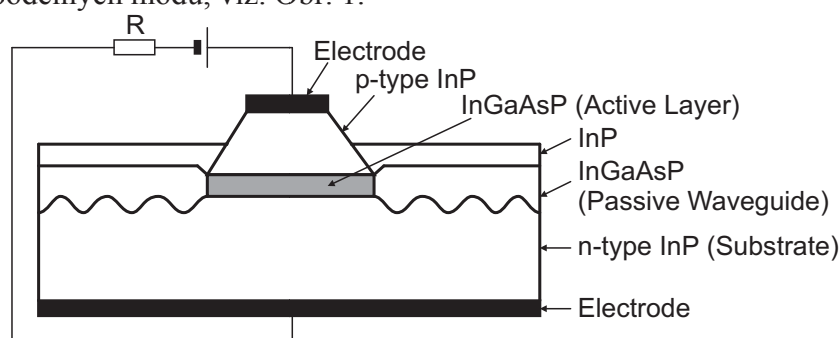
**Minh Tuan Pham, Břetislav Mikel, Jan Hrabina, Josef Lazar a Ondřej Číp**

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Koherenční optika

Královopolská 147, 612 64 Brno, 541514253, tuan@isibrno.cz, www.isibrno.cz

**Obor:** Polovodičové lasery

Polovodičové lasery si našly pevné místo v řadě oborů lidské činnosti zejména díky své miniaturní velikosti, nízké ceně a vysoké energetické účinnosti. Nalezneme je jako zdroje koherentního záření ve fotonických sítích, slouží pro diagnostiku a terapii v medicíně, jsou běžné v pomůckách pro stavebnictví pro vytyčování budov či stanovení jejich rozměrů. Současné metody pro nejpřesnější měření délek v průmyslové praxi využívají principy laserové interferometrie, které jsou založeny na laserech pracujících ve viditelné oblasti spektra. Je-li laserový svazek viditelný pouhým okem, pro obsluhu odměřovacího systému jde o velkou výhodu, neboť v takovém případě lze provést justáž optické soustavy snadno. Tradičním laserem pro tyto účely je již mnoho desetiletí plynový laser HeNe, který je znám pro svoji vynikající koherenční délku. V minulosti proto byla provedena řada experimentů s nahrazením tohoto laseru za typ polovodičový. Nevýhodou klasických, běžně dostupných hranově emitujících polovodičových laserů s Fabryovým-Perotovým rezonátorem, je však jejich nízká koherenční délka. Snahou výrobců bylo proto opatřit aktivní prostředí polovodiče pasivním selektivním prvkem, který zvýší jakost vlastního rezonátoru a zároveň omezí vznik jeho vyšších podélných módů, viz. Obr. 1.

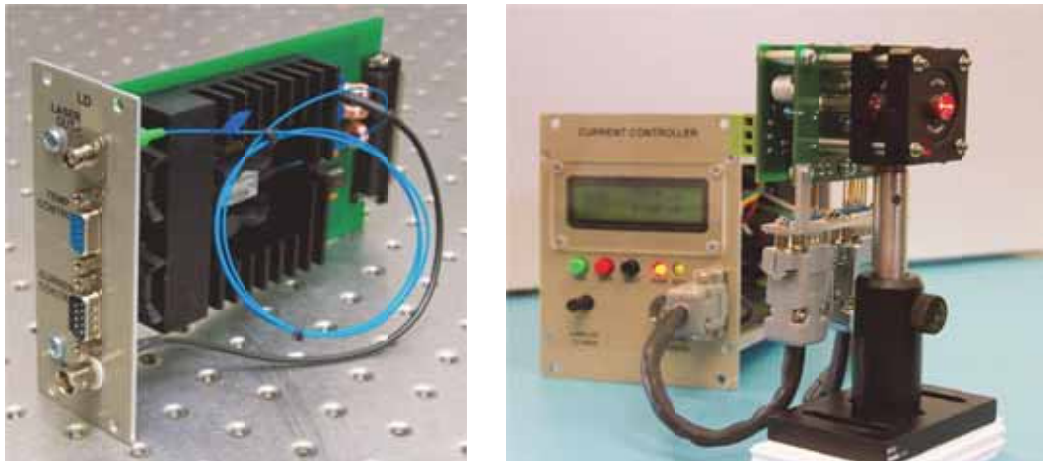


Obr. 1. Příklad struktury polovodičového laseru typu DBR (Distributed Bragg Reflector): aktivní vrstva je opatřena dodatečným vlnovodem – pasivní mřížkou vytvořenou v substrátu.

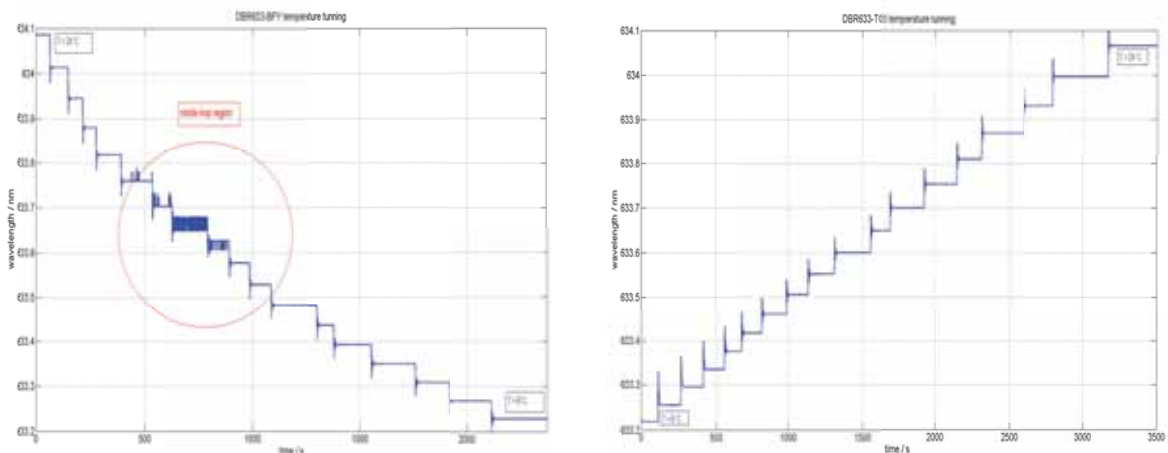
Struktura DBR se používá pro polovodičové lasery v blízké infračervené oblasti. Se zkracující se vlnovou délkou je vytvoření DBR struktury čím dál obtížnější, neboť perioda pasivní mřížky se taktéž zkracuje. S rozvojem specializovaných postupů při výrobě laserových diod však tento problém vyřešila firma Eagleyard Photonics, SRN, která představila v roce 2013 sérii DBR diod EYP-DBR-0633 pracujících na vlnové délce 633 nm.

V naší práci jsme se zaměřili na charakterizaci základních parametrů tohoto typu laserové diody. Naším cílem bylo vyhodnotit možnost použití této diody pro rozvoj metod přesného měření délek a pro laserovou spektroskopii se superčistými absorpčními plyny. Otestovali jsme zmíněnou laserovou diodu zapouzdřenou v provedení „butterfly“ vyvázanou do jednomodového optického vlákna a dále diodu v pouzdře TO-3, která má optický výstup přes frontální okno do volného prostoru. V obou případech jsou diody vybaveny Peltierovým článkem a teplotním čidlem pro snadnou kontrolu teploty polovodiče a dále monitorovací fotodiodou, pro průběžné měření intenzity generovaného záření. Obě verze laserové diody

jsme opatřili nezbytnou elektronikou, tj. nízkošumovým zdrojem konstantního proudu a digitálním termostatem, viz Obr. 2.



Obr. 2. Pohled na zabudované laserové diody EYP-DBR-0633: vlevo verze v pouzdře „butterfly“ s vyvázáním do vlákna, vpravo v pouzdře TO-3 včetně nezbytné kolimační optiky.



Obr. 3. Teplotní závislost vlnové délky: vlevo dioda v pouzdru „butterfly“, vpravo TO-3.

Pro obě verze testované laserové diody jsme provedli měření teplotní závislosti vlnové délky (Obr. 3), měření závislosti vlnové délky na injekčním proudu a měření krátkodobé stability optické frekvence. Pro požadovaná měření jsme použili vlnoměr HighFinesse jehož frekvenční rozlišení je 100 kHz. Pro teplotní rozsah od 6°C do 24°C (18°C rozdíl) jsme zjistili přeladění vlnové délky o 0,86 nm, což odpovídá změně o 650 GHz optické frekvence. Při teplotě čipu 15°C a injekčním proudu 145 mA jsme zjistili vlnovou délku 633,6 nm. Pro změnu injekčního proudu o 28 mA jsme zjistili změnu vlnové délky o 0,077 nm (57 GHz). Je tedy zřejmé, že tento typ laserové diody je z hlediska změny injekčního proudu citlivý výrazně méně než běžné diody bez mřížkové struktury. Pro časový interval 160 s jsme zjistili stabilitu generované optické frekvence pod 100 kHz, což dává předpoklad k možné aplikaci těchto diod pro metody přesného měření délky. Pilotním experimentem jsme také ověřili možnost laserové absorpční spektroskopie v parách čistého molekulárního jódu, kdy jsme pozorovali silné absorpční čáry při přeladování laserových diod v pásmu 633 nm.

Práce vznikla za podpory projektů GA ČR č. GAP102/10/1813 a EURAMET IND58-6DoF a MŠMT CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a LO1212.

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

- Přesné měření délek pomocí laserů

## **RAMAN TWEEZERS IN MICROFLUIDIC SYSTEM FOR AUTOMATIC ANALYSIS AND SORTING OF LIVING CELLS**

**Zdeněk Pilát**

Czech Academy of Sciences

Institute of Scientific Instruments

Group of Optical Micromanipulation Techniques OMITEC

Královopolská 147, 612 64 Brno, Czech Republic

pilat@isibrno.cz

**Obor:** Laser trapping, spectroscopy, biophysics, microfluidics

We have devised an automatic analytical and sorting system combining optical trapping with Raman spectroscopy in microfluidic environment, together with computerized real time image analysis, spectra processing and micromanipulation. This device serves to identify and sort biological objects, such as living cells of various prokaryotic and eukaryotic organisms based on their Raman spectral properties. This approach allowed us to collect information about the chemical composition of the objects, such as the presence and composition of lipids, proteins, or nucleic acids without using artificial chemical probes such as fluorescent markers. The non-destructive and non-contact nature of this optical analysis and manipulation allowed us to separate individual living cells of our interest in a sterile environment and provided the possibility to cultivate the selected cells for further experiments. The special microfluidic chip uses gravity to move the cells across the sorting area. Our system uses dedicated software to achieve fully automated spectral analysis and sorting. The devised system is a robust and universal platform for non-contact sorting of microobjects based on their chemical properties. It could find its use in many medical, biotechnological, and biological applications.

The authors acknowledge the support from the Technology Agency of the Czech Republic Czech Science Foundation (TA03010642), Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic (LO1212, LD14069) together with the European Commission (ALISI No. CZ.1.05/2.1.00/01.0017), Grant Agency of the Czech Republic (GAP205/11/1687), and Czech Academy of Science (RVO:68081731).

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

- Optical micromanipulations
- Microfluidics and optofluidics

## ANALÝZA OPTICKÉHO DVOU-ZRCADLOVÉHO SKENERU S ČOČKOU PROMĚNNÉ OHNISKOVÉ VZDÁLENOSTI

Petr Pokorný, Jiří Novák, Pavel Novák, Antonín Mikš

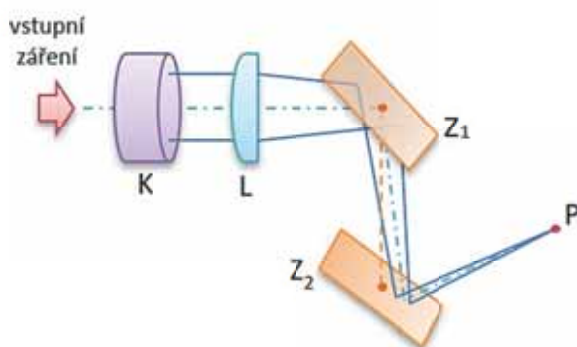
ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky

Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel.224357913, e-mail: petr.pokorny@fsv.cvut.cz

WWW: departments.fsv.cvut.cz/aog

**Obor:** laserové skenování, aktivní optické prvky

Optické skenery jsou zařízení pro bezkontaktní, velmi rychlé a přesné určení prostorových parametrů zkoumaných prvků nebo k provádění specifických operací v zadaném bodě trojrozměrného prostoru. Během posledních let se velmi rychle rozvíjí část optiky využívající čočky s proměnnou ohniskovou vzdáleností, které v systémech optických skenerů nachází značné uplatnění. Oblasti aplikací 3D skenerů můžeme charakterizovat jako a) zaměřování, prověřování nebo kontrolu stávajících prvků (např. stavebnictví, výstupní kontrola kvality nebo reverzní inženýrství), b) projekční technologie (divadla, videomapping, atp.) nebo c) laserové technologie ve výrobě (řezání, svařování, gravírování, povrchové zušlechťování, apod.). Optické soustavy těchto skenerů jsou konstruovány různými způsoby, např. jednozrcadlové, dvou-zrcadlové, polygonální, akustooptické nebo elektrooptické systémy.



**Obr. 1** Schéma dvou-zrcadlového skeneru

V naší studii se zabýváme dvou-zrcadlovým optickým systémem skeneru. Uvažujme situaci znázorněnou na **obr. 1**. Vstupní záření je optickou soustavou K transformováno na svazek rovnoběžných paprsků, který dále prochází čočkou L s proměnnou obrazovou ohniskovou vzdáleností  $f'$ . Díky tomu je adaptivně fokusován, a dále vstupuje do systému dvou zrcadel  $Z_1$  a  $Z_2$ . Po odrazech od těchto zrcadel, které jsou natáčeny ve směrech definovaných stálými osami rotací, je

paprsek odkláněn a pokračuje prostorem do bodu P v detekční rovině. Osazená čočka L fokusuje svazek do tohoto bodu, a tedy vytváří v dané pozici místo s maximální intenzitou záření. Toho lze využít například při velmi přesném vedení řezů ve výrobě, kde se laserové technologie uplatňují. Předpokládejme dále, že osazená čočka L bude plankonvexní, kde přední sférická plocha mění svůj tvar v závislosti na ohniskové vzdálenosti a zadní plocha svou polohu nemění a úplně tak definuje konfiguraci optického systému.

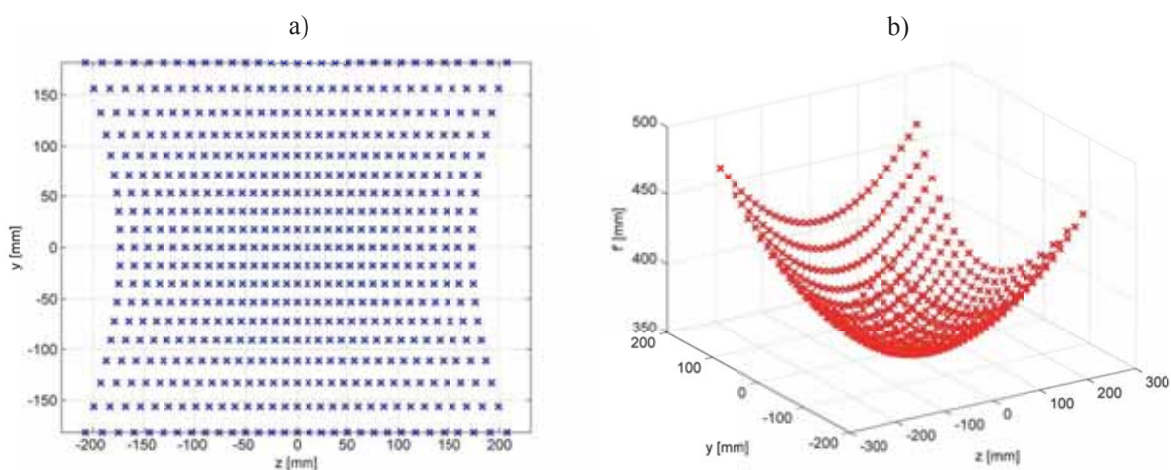
Jelikož je v naprosté většině praktických aplikací využíváno laseru, bude dopadová výška na přední plochu čočky L natolik malá, že se v bodě P paprskové aberace prakticky neprojeví. Poté lze bez újmy na obecnosti přejít k paraxiálnímu modelu zobrazení tohoto systému.

Z výše uvedených předpokladů můžeme pomocí vektorového počtu a znalostí geometrické optiky odvodit obecné vztahy pro trasování paprsků libovolných konfigurací optických systémů a pro zadané natočení zrcadel a danou vzdálenost detekční roviny určit polohu bodu P. Tyto formulace lze poté převést na inverzní problém, tedy známe-li polohu daného bodu, určíme úhly natočení zrcadel a potřebnou ohniskovou vzdálenost takovou, aby fokusovaná stopa svazku byla přesně, s požadovanou tolerancí, v požadované pozici. Schéma primární a inverzní úlohy je názorně ukázáno na **obr. 2**.



Obr. 2 Schéma primární a inverzní úloha

Na **obr. 3** je zobrazen ilustrační příklad některých výsledků analýzy. Jedná se o primární problém, kdy pro zadané úhly natočení zrcadel a prostorové parametry skeneru a detekční roviny jsou určeny polohy jednotlivých stop průsečíků paprsků s detekční rovinou a potřebné ohniskové vzdálenosti čočky takové, aby byl svazek v těchto bodech fokusován.



Obr. 3 a) Stopy svazku v detekční rovině a b) odpovídající ohniskové vzdálenosti

Práce byla vypracována v rámci řešení grantu GA ČR 13-31765S a grantu SGS14/110/OHK1/2T/11.

#### Reference:

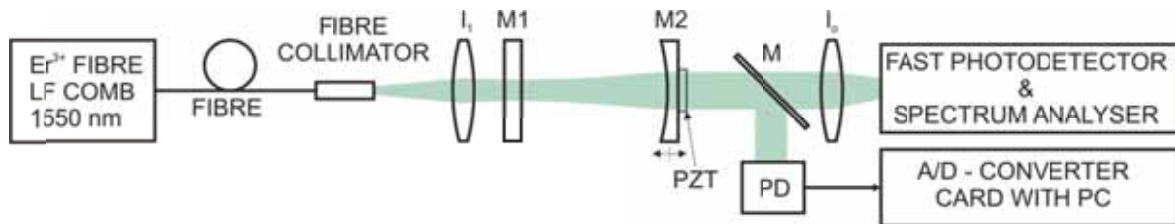
- [1] A. Mikš a P. Pokorný, "3D optické skenery," *Jemná mechanika a optika*, č. 5, 137-141 (2012).
- [2] P. Pokorný, "One-mirror and two-mirror three-dimensional optical scanners—position and accuracy of laser beam spot," *Appl. Opt.* **53**, 2730- (2014).
- [3] A. Mikš, J. Novák, and P. Novák, "Generalized refractive tunable-focus lens and its imaging characteristics," *Opt. Express* **18**, 9034-9047 (2010).
- [4] A. Mikš, J. Novák and P. Novák, "Algebraic and numerical analysis of imaging properties of thin tunable-focus fluidic membrane lenses with parabolic surfaces," *Appl. Opt.* **52**, 2136-2144 (2013).

## NÁSOBENÍ OPAKOVACÍ FREKVENCE ERBIUM DOPOVANÉHO VLÁKNOVÉHO PULZNÍHO LASERU

Radek Šmíd, Lenka Pravdová, Adam Lešundák a Ondřej Číp

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

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



Obrázek 1. Schéma experimentální sestavy s erbiem dopovaným optickým hřebem:  $l_1$  je vstupní čočka,  $M1$  a  $M2$  jsou zrcadla filtrovacího rezonátoru,  $l_2$  čočka před rychlým fotodetektorem,  $PZT$  je keramická trubice z piezomateriálu pro kontrolu délky rezonátoru,  $M$  je dělič svazku,  $PD$  fotodetektor,  $PC$  je osobní počítač.

Podstatou optického hřebene je fs pulzní laser, který vytváří spektrum přesných frekvencí, jejichž optickou frekvenci lze vyjádřit [1]:

$$\nu = f_0 + i \cdot f_r,$$

kde  $f_0$  je ofsetová a  $f_r$  je opakovací frekvence optického hřebene. Pevnolátkové lasery dosahují opakovacích frekvencí v řádu 1 GHz, ale mají velkou náročnost na čistotu a nastavení zrcadel a jsou citlivé na otřesy. Vláknové lasery naopak disponují mechanickou robustností a díky vláknovému rezonátoru nejsou citlivé na okolní nečistoty. Jejich opakovací frekvence ovšem dosahují obvykle řádově 100 MHz. V mnoha aplikacích, jakými jsou například zeměměřičství či spektroskopie, je vhodné mít opakovací frekvenci laseru co nejvyšší, při současném zachování koherence původního zdroje. Toho lze dosáhnout použitím externího optického rezonátoru.

Navrhli jsme a experimentálně ověřili sestavu s Erbiem dopovaným vláknovým stabilizovaným optickým hřebem na bázi fs laseru s opakovací frekvencí 250 MHz a centrální vlnovou délkou 1560 nm. Cílem naší práce bylo násobení opakovací frekvence fs laseru na hodnotu 1 GHz pomocí externího Fabryova-Perotova rezonátoru.

Zrcadla rezonátoru jsme navrhli a v oddělení speciálních technologií ÚPT následně opatřili vrstvami stříbra nanesenými na substráty z křemenného skla. Výhoda použití stříbrných zrcadel tkví ve velmi nízké disperzi s vlnovou délkou, která je naopak přítomná u běžně používaných zrcadel z dielektrického materiálu. Limitujícím faktorem je však propustnost kovové vrstvy. Tloušťka stříbrných vrstev nanesených na křemenné substráty je  $(40,2 \pm 0,9)$  nm. Tomu odpovídá i teoretická hodnota propustnosti zrcadel 3,5-4% [2], která umožňuje průchod přes první zrcadlo do rezonátoru. Odrazivost stříbrných vrstev na vlnové délce odpovídající centrální vlnové délce 1560 nm je tedy 98,4%, což odpovídá teoretické hodnotě finesy rezonátoru:

$$F = \frac{\pi}{2 \arcsin\left(\frac{1-R}{2\sqrt{R}}\right)} \approx \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \approx 195$$

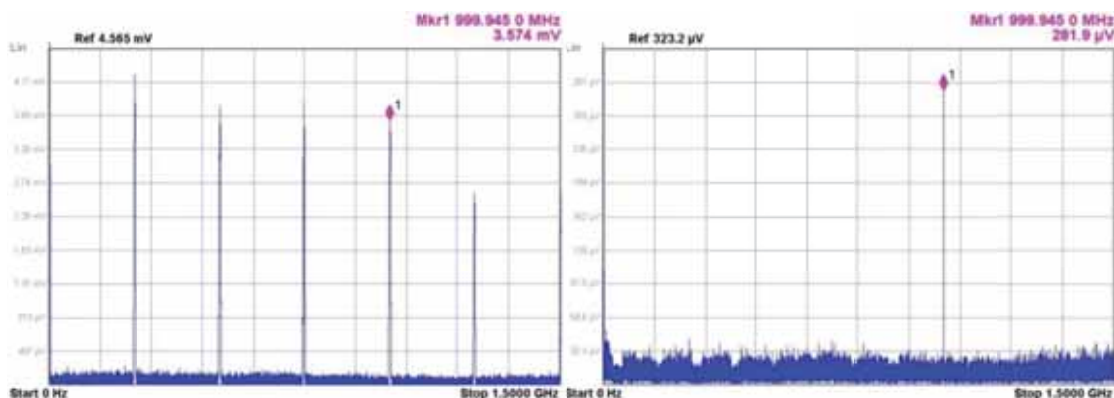
Výstup vláknového fs laseru je z FC/APC vlákna (viz obr. 1). Tento výstup je navázán do kolimátoru s čočkou o ohniskové vzdálenosti 8 mm a vytváří svazek, který nejdříve splňuje charakteristiky rezonátoru pro difrakci Gaussova svazku respektující vlastní podélný TEM<sub>00</sub> mód rezonátoru. Svazek nejdříve vstupuje do roviného zrcadla s průměrem svazku  $w_0=0.394$  mm a ve vzdálenosti  $L=150$  mm dopadá na zrcadlo o křivosti 800 mm s průměrem  $w_1=0.437$  mm [3].

Pokud je splněna podmínka:

$$FSR = x \cdot f_r$$

rezonátor propouští jen  $1/x$  módů. V našem případě se jedná o  $1/4$  módů. Délka rezonátoru je kontrolována pomocí zamknutí na prošlý mód na fotodetektoru pomocí derivační spektroskopické techniky. Výstup s rezonátoru je rozdělen na dva svazky, z nichž jeden je snímán na rychlém fotodetektoru. Detekované frekvence jsou patrné na Obr. 2. Vlevo je patrný záznam rf spektra optického hřebene před filtrací, kde pozorujeme původní opakovací frekvenci 250 MHz a její vyšší harmonické. V druhém případě pozorujeme filtrovanou frekvenci 1 GHz po uzamknutí délky rezonátoru na prošlý mód rezonátoru.

Prostřednictvím spektrálního měření signálu na rychlém fotodetektoru bylo prokázáno filtrování módů pomocí externího rezonátoru a tedy zvyšování opakovací pulzního fs laseru.



Obrázek 2. Záznam spekter získaných na fotodetektoru při zamčení délky Fabry-Perotova rezonátoru z rychlého fotodetektoru a vysokofrekvenčního analyzátoru. Vlevo: originální spektrum optického hřebene, vpravo: spektrum hřebene filtrované pomocí rezonátoru.

Tato práce byla vytvořena na základě podpory grantu GAČR GPP102/12/P962 a GAP102/10/1813. Autoři práce také děkují institucionální podpoře RVO:68081731 a podpoře MŠMT LO1212.

[1] S. T. Cundiff, J. Ye, and J. L. Hall, “Optical frequency synthesis on mode-locked lasers,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 72, pp. 3749–3751, (2001).

[2] <http://refractiveindex.info/>

[3] J. R. Lawall, “Fabry-Perot metrology for displacements up to 50 mm”, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 22 (2005).

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

- Přesné měření délek pomocí pulsních laserů
- Spektroskopie s fs lasery a optickými rezonátory

## INTERFEROMETRICKÝ ODMĚŘOVACÍ SYSTÉM PRO ELEKTRONOVÝ LITOGRAF

Šimon Řeřucha, Martin Šarbort, Josef Lazar, Ondřej Číp

Ústav přístrojové techniky AVČR, v. v. i,

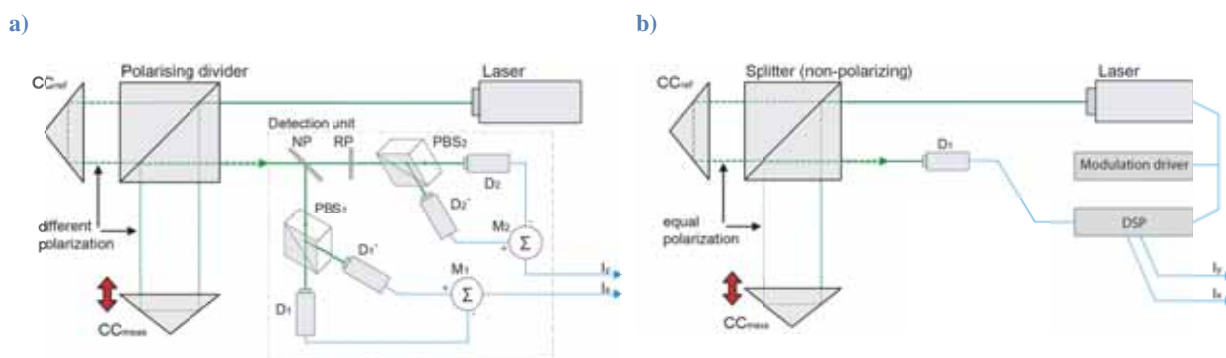
Královopolská 147 Brno 612 64, tel.: +420 541 514 127, e-mail: res@isibrno.cz,

www.isibrno.cz

**Obor:** Koherenční optika – Interferometrie, Nanometrologie

Spolehlivost zápisu rozsáhlých struktur pomocí elektronového litografu je do velké míry závislá na přesném řízení polohy posuvného stolku se substrátem. Typicky je pro tuto úlohu využíváno optického odměřování pomocí laserových interferometrů, které poskytuje požadovanou úroveň přesnosti. Této přesnosti dosahuje za cenu využití složité optické sestavy, která díky nárokům na přesnost a robustnost v důsledku představuje netriviální navýšení ceny elektronového litografu jako výsledného produktu.

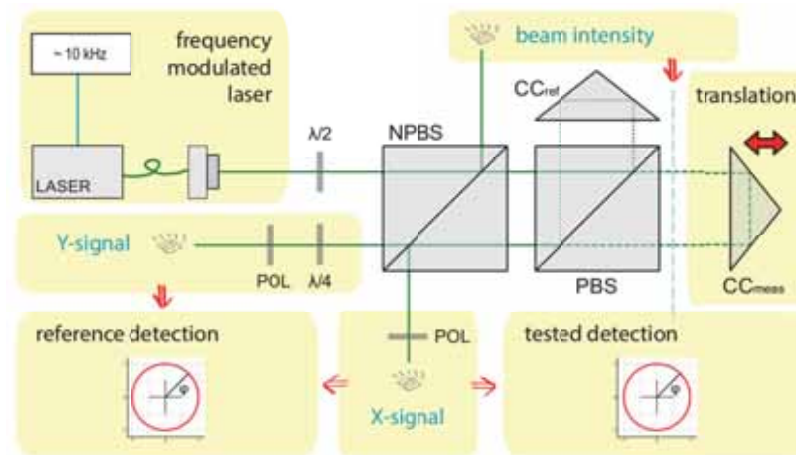
V rámci spolupráce jsme se zaměřili na návrh a ověření optimalizovaného měřicího systému, který poskytne srovnatelnou přesnost a zároveň bude robustnější a cenově efektivnější. Jádrem optimalizace je v zásadě přesun zpracování interferenčního signálu z optické oblasti do oblasti výpočetní. V našem případě se jedná zejména o využití alternativní interferometrické detekční techniky [1], která využívá kontinuálně frekvenčně modulovaný laserový zdroj v kombinaci se zjednodušeným optickým systémem (viz Obr. 1). Výstupem optické soustavy je v obou případech dvojice fázových signálů, které v kvadrurní formě reprezentují hodnotu interferenční fáze.



Obrázek 1: Schéma interferometru s homodynní detekcí (a) a s optimalizovanou detekční technikou (b).

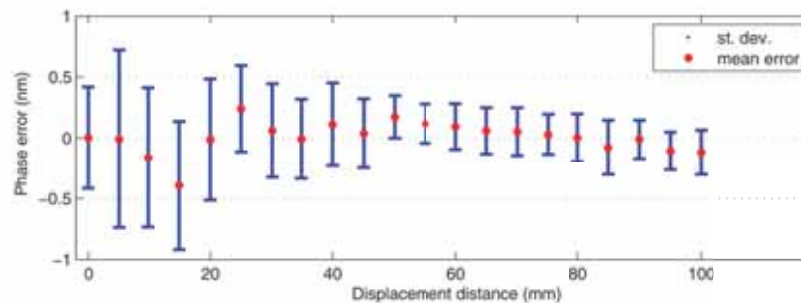
Požadavky na odměřovací systém jsou následující: nejistota měření menší než 2,5 nm, rozsah měření 100 mm, odezva systému 10 kHz. Navíc je vyžadováno využití jiné než viditelné vlnové délky z důvodů interference se scintilátory litografu. Pro účely ověření metody je použita optická sestava (viz Obr. 2). Jako zdroj je využit kompaktní laserový modul RIO Orion (Rio Redfern Integrated Optics Inc.), založený na stabilizované DFB diodě, frekvenčně modulovaný změnou čerpacího proudu. Výstup z interferometrické sestavy je snímán dvěma detekčními systémy: jedním je standardní homodynní detekce, druhým je nová testovaná metoda. Toto uspořádání umožňuje srovnat vyhodnocení různými detekčními technikami a přitom, díky sdílené optické trase, eliminovat vnější vlivy, které mohou mít na přesné vyhodnocení výrazný vliv.





Obrázek 2: Schéma experimentální sestavy.

Validační měření bylo provedeno v 21 diskretních bodech na dráze 100mm, kde v každém bodě bylo provedeno cca 5000 odečtení fáze oběma metodami. Z těchto dat byl vyhodnocen rozdíl mezi referenční a testovanou hodnotou interferenční fáze v závislosti na měřené vzdálenosti (viz Obr. 3). Celkový rozdíl vychází méně než 0.5 nanometru a směrodatná odchylka 0.75 nm.



Obrázek 3: Výsledek srovnávacího měření.

Experimentální ověření metody prokázalo vhodnost testované metody pro odměřovací systém v elektronovém litografu.

## Reference

- [1] Rerucha, S., Buchta, Z., Sarbort, M., Lazar, J., and Cip, O. „*Detection of Interference Phase by Digital Computation of Quadrature Signals in Homodyne Laser Interferometry*,“ Sensors 12(10), (2012).
- [2] Rerucha, S., Sarbort, M., Cizek, M., Hrabina, J., Lazar, J., and Cip, O. „*Interferometric measurement system for cost effective e-beam writer*,“ Proc. SPIE 8992 (2014).

## Poděkování

Tato práce byla vytvořena na základě podpory grantů TA ČR TE01020233, TA03010663 a TA02010711. Infrastruktura projektu byla podpořena MŠMT, projekty LO1212, CZ.1.05/2.1.00/01.0017 a CZ.1.07/2.3.00/30.0054; dále AV ČR, projektem RVO:68081731.

## HILASE – NOVÉ LASERY PRO PRŮMYSL A VÝZKUM

**Roman Švábek, Hana Turčičová, Akira Endo, Antonio Lucianetti, Danijela Rostohar a Tomáš Mocek**

Projekt HiLASE, Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.

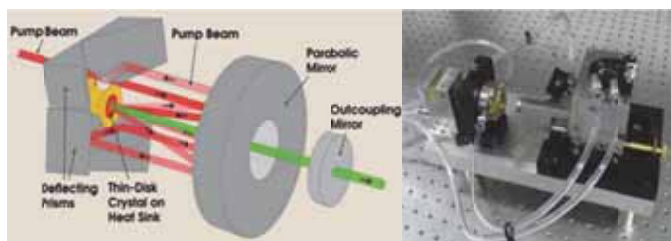
Za Radnicí 828, 252 41 Dolní Břežany; [svabek@fzu.cz](mailto:svabek@fzu.cz); [turcic@fzu.cz](mailto:turcic@fzu.cz); [www.hilase.cz](http://www.hilase.cz)



**Obor:** Vývoj pevnolátkových diodově čerpaných laserů s vysokou energií a vysokou opakovací frekvencí; aplikace laserových technologií.

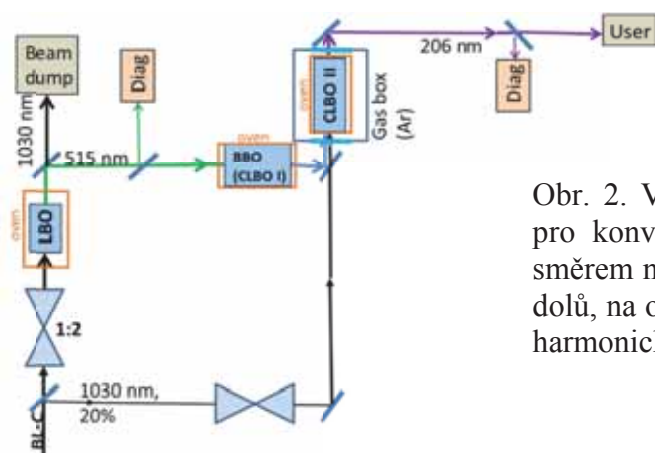
Projekt HiLASE se zabývá vývojem a aplikacemi pevnolátkových diodově čerpaných laserů s vysokou energií v pulzu a vysokou opakovací frekvencí. Díky tomu rozšiřuje současnou technologii pikosekundových a nanosekundových laserů do nového a dosud neprobádaného režimu vysokého průměrného výkonu na úrovni 1 kW. Lasery s těmito parametry nejsou v současné době komerčně dostupné, přitom však mají významný aplikační potenciál. HiLASE je odpovědí na tuto dlouhodobou celosvětovou poptávku a na posílení strategické pozice České republiky v tomto vysoce perspektivním oboru. Lasery HiLASE jsou vyvíjeny jako výkonnější, kompaktnější, stabilnější a snáze udržovatelná alternativa laserů založených na tradičním výbojkovém čerpání.

Vysoká opakovací frekvence laseru je umožněna diodovým čerpáním a k vysokému průměrnému výkonu podstatně přispívá využití laserového prostředí ve tvaru tenkých disků - monokrystal Yb:YAG, tloušťka 0.2 mm, připevněný na vodní chladič, viz obr. 1. V rezonátoru regenerativního zesilovače slouží tenký disk rovněž jako aktivní zrcadlo, takže přední plocha disku má antireflexní vrstvy pro signálové a čerpací záření a zadní plocha je pro obě záření odrazná.



Obr. 1. Schéma průchodů paprsků v tenkodiskové hlavici, napravo výrobek firmy Dausinger + Giesen, GmbH.

Zesilování pikosekundových pulzů dosáhne úrovně 5 mJ (svazek C) až 500 mJ (svazek B), je proto použita technika zesilování čerpaných pulzů (CPA). V pulzu svazku C byla dosažena stabilní úroveň energie 0,83 mJ při opakovací frekvenci 100 kHz. V současné době se pracuje na navýšení energie v pulzu, a to použitím intenzivnějšího čerpání, lepší kontrolou rozložení tepla na disku, a dále použitím kvalitnějších optických prvků v regenerativním zesilovači.



Obr. 2. V současnosti se připravují optické trasy pro konverzi základní vlnové délky (1030 nm) směrem nahoru (optický parametrický zesilovač) i dolů, na obrázku je schéma pro generaci 2., 4. a 5. harmonické frekvence svazku C.

Mezi aplikace realizované v centru HiLASE patří např. testování odolnosti optických materiálů a komponent s vysokým prahem poškození, zpevňování povrchu materiálu rázovou vlnou generovanou laserem, kompaktní zdroje rentgenového záření pro litografii, řezání a vrtání speciálních materiálů a mikro-/nanostrukturování povrchů.

### Projekt HiLASE nabízí své služby zejména partnerům z následujících oblastí průmyslu i vědy a výzkumu:

- Výrobci laserových zdrojů, optických a optomechanických komponentů.
- Firmy působící v oblasti strojírenství, automobilového a leteckého průmyslu.
- Výrobci elektroniky a mikroelektroniky.
- Biomedicínské inženýrství.



Obr. 3. Experimentální sestava pro analýzu zakřivení povrchu tenkých laserových krystalů.

### Kompetence:

- Studie proveditelnosti.
- Optické komponenty a systémy: vizualizace, 3-D modely, konstrukce, výpočty, simulace, měření a testování.
- Optické vrstvy: měření a testování, zjišťování laserem indukovaného prahu poškození.
- Laserové svazky: měření a testování.
- Konstrukce laserových zdrojů a jejich optimalizace pro danou aplikaci.
- Expertní analýzy a odborný průzkum trhu v oblasti laserů, fotoniky a aplikací laserových technologií.
- Přímé laserové aplikace: obrábění, dělení materiálu, povrchové úpravy, svařování.
- Konzultace v oblasti vývoje elektronických součástí pracujících v laserových systémech a možnost jejich odzkoušení.

## HODNOCENÍ KVALITY KYTAR POMOCÍ HOLOGRAFICKÉ INTERFEROMETRIE

**Peter Barčík, Otakar Wilfert, 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>

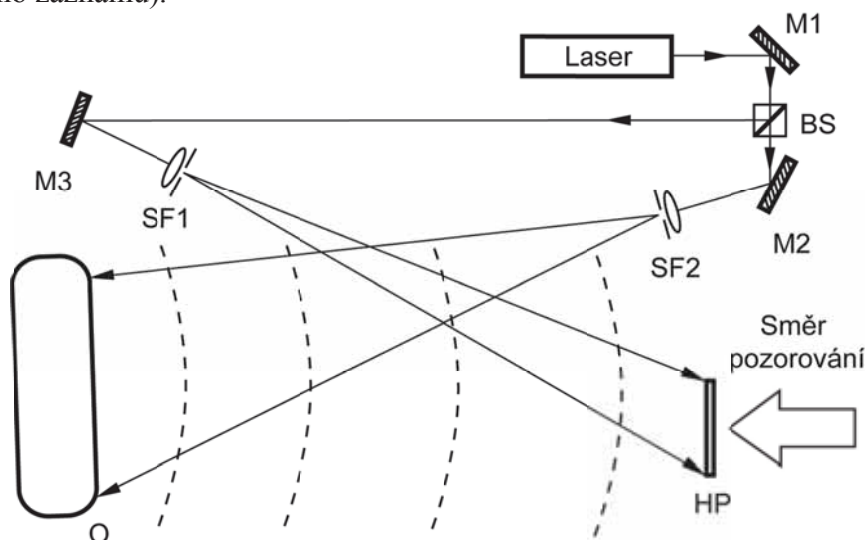
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

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

**Obor:** Optické komunikace, laserová technika, vlnová optika, holografie

Optická holografická interferometrie poskytuje interferenční obrazec vzniklý superpozicí dvou koherentních vln, z nichž alespoň jedna vzniká rekonstrukcí hologramu. Hologram uchovává informace o zobrazovaném objektu v určitém stavu, proto mohou být pomocí holografické interferometrie zjišťovány změny, které u povrchu předmětu nastaly v některém pozdějším okamžiku [1,2]. Hlavní výhodou holografické interferometrie je, že měření je bezkontaktní a neinvazivní a umožňuje studovat předměty s difúzním povrchem.

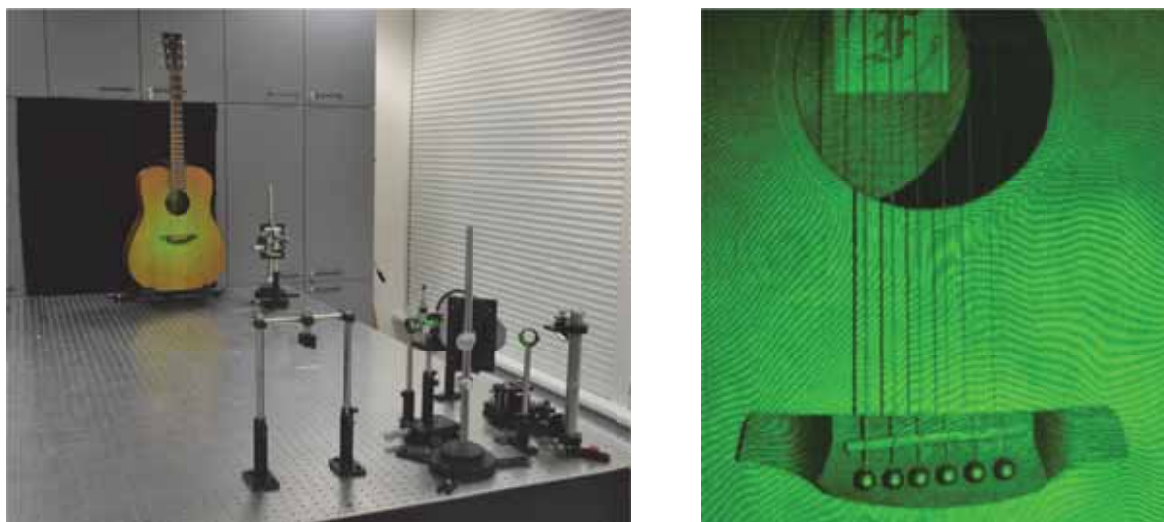
Díky vybavení naší laboratoře optických komunikací (stabilní optický stůl Newport, koherentní lasery, holografické optické prvky a stojánky s úchyty atd.) jsme byli požádáni firmou, která se zabývá výrobou kytar o pomoc při hodnocení kvality kytary aplikací holografické interferometrie. V současné etapě naší práce jde pouze o provedení hologramu a pozorování interferenčních proužků v reálném čase (nikoli o způsob vyhodnocení holografického záznamu).



Obr. 1. Uspořádání pracoviště pro holografickou interferometrii. M1-3 - zrcadla, BS –dělič svazku, SF1-2 – prostorové filtry, HP – holografická deska, O – objekt (kytara)

Pro konstrukci hologramů byly použity: polovodičový laser Photop DPGL-2100 s výstupním výkonem 100 mW a vlnovou délkou 532 nm, holografické desky Integraf LLC (63x63 mm) s rozlišením 3000 lines/mm a vyvolávací chemie JD-2 Integraf.

Kytara byla v této fázi prací ozvučována zcela náhodně (orientačně) a jednalo se pouze o zviditelnění interferenčních proužků, které při holografické interferometrii v reálném čase vznikají.



Obr. 2. Finální pracoviště pro zhotovování hologramů – vlevo, zaznamenané interferenční proužky na vrchní desce testované kytary – vpravo.

Při naší práci jsme dospěli k některým výsledkům:

- optický stůl Newport dodaný firmou MIT vykazuje pro holografii dostatečnou stabilitu
- použitý laser má požadovanou koherenci a lze pomocí něho hologram konstruovat i rekonstruovat
- optické prvky, které byly do konstrukce a rekonstrukce hologramu zařazeny, vyhovují svojí mechanickou i optickou kvalitou

Zároveň se ukázaly následující problémy:

- výkon použitého laseru je relativně velký (100 mW), ale vzhledem k velikosti ozařované plochy kytary je hustota výkonu na kytaře relativně malá
- citlivost použitých holografických desek pro délku vlny 532 nm není dostatečná a nedaří se nám obstarat citlivější desky
- expozice holografických desek je nepříjemně dlouhá (řádově desítky minut), což je zřejmě největší neúspěch dosavadního postupu
- při dělení vln pomocí polarizačně citlivého děliče je nutné řešit vzájemnou polarizaci referenční a předmětové vlny

### Literatura

- [1] Liška, M. Holografie a holografická interferometrie, Optické sešity. Brno: VUT v Brně, 2013
- [2] Pavelek, M., Janotková, E., Štětina, J. Vizualizační a optické měřicí metody. Brno: VUT v Brně, 2007

### Poděkování

Výzkumné aktivity jsou podpořené mj. projekty Ministerstva průmyslu a obchodu č. FR -TI4/148 a FR-TI2/705. Autoři za podporu děkují rovněž projektu COST LD12067.

**Další oblasti zájmu** s nabídkou spolupráce:

- Tvarování laserového svazku pro snížení vlivu turbulence atmosféry na fluktuaci přijatého optického výkonu
- Měření míry turbulence atmosféry pomocí turbulátoru
- Modelování vlivu intenzitního profilu svazku na fluktuaci optické intenzity v dané vzdálenosti od osy svazku

# DETEKCE ZÁZNĚJŮ V SUBHARMONICKÉM SYNCHRONNĚ VNITROREZONÁTOROVĚ ČERPANÉM OPO

**Alena Zavadilová, David Vyhliadal, Václav Kubeček, Jan Šulc**

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Břehová 7, 115 19 Praha 1

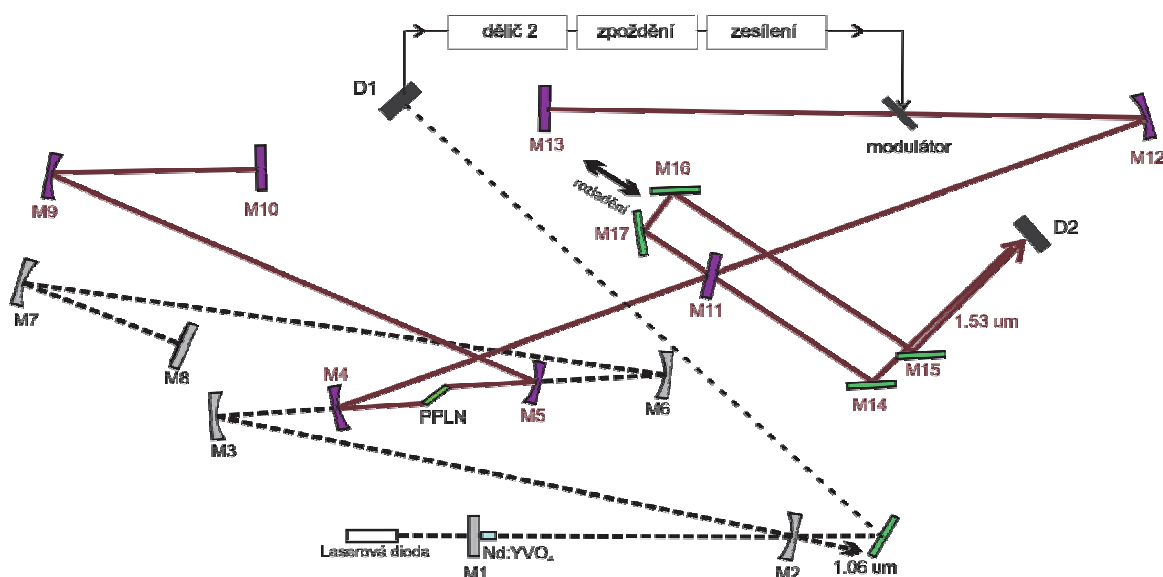
e-mail: alena.zavadilova@fjfi.cvut.cz

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

Obor: Hlavní profesní zaměření účastníka

Příspěvek navazuje na problematiku vývoje laserového systému vhodného pro vnitrorezonátorovou fázovou interferometrii (IPP), který by umožnil detekovat fázový posun v řádu 0,1  $\mu\text{rad}$ . Jeho činnost je založena na principu detekce zánějů mezi dvěma sledy impulsů, které jsou nezávislé, ale mají stejnou opakovací frekvenci a jsou generovány v jednom rezonátoru. Aplikace, které motivují tento výzkum, jsou senzory založené na IPI, kdy je možné měřenou fyzikální veličinu převést na fázový rozdíl těchto dvou sledů  $\Delta\phi$ . V rezonátoru s kruhovým uspořádáním je to např. rotace (Sagnacův jev) a vzduchové proudění (Fresnelův jev). Pro lineární rezonátor je to pak např. elektro-optický efekt, zrychlení, nano-posuvy, nelineární index lomu atd. Frekvence zánějů je pak možné vyjádřit jako  $\Delta\nu = 2\pi\Delta\phi/\tau_{RT}$  ( $\tau_{RT}$  je doba oběhu rezonátorem). Přesnost měření je omezena šířkou pásma zánějů.

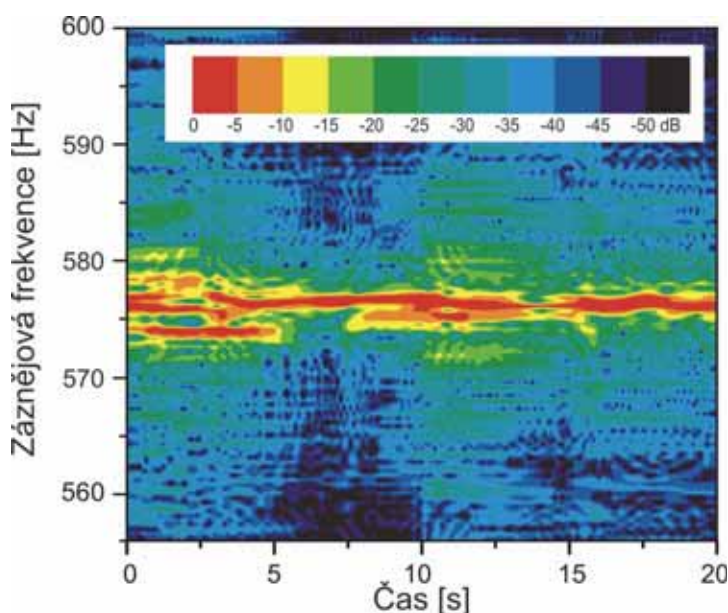
Námi navrhované řešení využívá vnitrorezonátorově synchronně čerpaného lineárního optického parametrického oscilátoru (OPO) s krystalem PPLN (periodicky pólovaný niobičnan lithný dopovaný MgO) jako nelineárním prvkem, (laditelný v rozmezí od 1,4 až do 1,6  $\mu\text{m}$ ). Jako čerpací laser byl použit SESAM-modelockovaný, pikosekundový, diodou buzený Nd:YVO<sub>4</sub> laser (1,06  $\mu\text{m}$ , 15 ps, 82,17 MHz). Schéma experimentálního uspořádání je uvedeno na obrázku 1.



Obr. 1. Schéma diodou buzeného modelockovaného Nd:YVO<sub>4</sub> laseru s OPO. M1 - rovinné zrcadlo, M2 - konkávní zrcadlo ( $r = 0,5 \text{ m}$ ), M3, M6, M7 - konkávní zrcadla ( $r = 0,3 \text{ m}$ ), všechny HR @ 1,06  $\mu\text{m}$ , M8 - polovodičový saturovatelný absorbér, PPLN, M4, M5 - konkávní zrcadla (HR @ 1,54  $\mu\text{m}$ , HT @ 1,06  $\mu\text{m}$ ,  $r = 0,15 \text{ m}$ ), M9, M12, - konkávní zrcadla ( $r = 3 \text{ m}$ , HR @ 1,54  $\mu\text{m}$ ), M10 - rovinné zrcadlo ( $T = 5\% @ 1,54 \mu\text{m}$ ), M11 - rovinné zrcadlo ( $T = 50\% @ 1,54 \mu\text{m}$ ), M13, M14, M15, M16, M17 - rovinná zrcadla (HR @ 1,54  $\mu\text{m}$ ), D1 - detektor budícího signálu, D2 - detektor zánějů.

Aby byla zajištěna dlouhodobá stabilita generování dvou nezávislých sledů OPO impulsů, má rezonátor OPO dvojnásobnou délku oproti budicímu laseru Nd:YVO<sub>4</sub>. Současně je čerpací laserový systém, obsahující PPLN krystal, nastaven tak, že parametrické zesílení uvnitř PPLN dosahuje prahu OPO generace pouze pro jeden směr šíření čerpací impulsů. Záření OPO bylo vyvázáno polopropustným zrcadlem M11, umístěným v blízkosti křížení impulsů OPO. K dosažení překryvu obou impulsů byla použita zpožďovací linka (M14, M15, M16, M17). Při vhodném zpoždění sledy interferovaly na pomalém InGaAs detektoru, kde byla detekována zázněj.

Za účelem ověření funkčnosti navrhovaného systému byl do OPO umístěn elektrooptický fázový modulátor. Aby docházelo k modulaci jen jednoho ze sledů, byl použit RF signál, jehož opakovací frekvence byla poloviční oproti frekvenci generovaných impulsů. Tento signál byl odvozený z čerpacích impulsů detekovaných rychlým InGaAs detektorem D1. Výstup detektoru D1 byl po zesílení přiveden na děličku tvořenou rychlým D-klopným obvodem, následně zesílen na požadovanou hodnotu. Výstupní napětí bylo možné nastavit v rozsahu 100 mV až 10 V. Tento signál byl pak přiveden na modulátor. Záznějový signál s frekvencí od 0,2 až do 20 kHz byl úspěšně měřen v závislosti na amplitudě RF signálu. Příklad spektrogramu zaznamenané zázněje je uveden na obrázku 2.



Obr. 2. Spektrogram 20 s záznějového signálu pro amplitudu modulačního RF signálu 250 mV

Závěrem je možné říci, že záznějový signál s frekvencí od 185 až do 20 kHz byl poprvé úspěšně měřen na kompaktním, diodou buzeném, laserovém systému. Šířka pásma pozorované zázněje byla menší než 1 Hz (FWHM), což odpovídá rozlišení měření fázovému posuvu na úrovni  $1,5 \times 10^{-7}$  rad.

#### Poděkování

Tento výzkum byl podporován GAČR, projekt číslo P102 /12 /P645.

- Konstrukce vláknového modulátoru a zesilovače a pro oblast 1 nebo 1.5  $\mu\text{m}$

## OD POUHÉHO TLAČENÍ PO TRŽDĚNÍ MIKROČÁSTIC A SKLÁDÁNÍ MIKROROBOTKŮ SVĚTLEM

**Pavel Zemánek, Alejandro V. Arzola, Oto Brzobohatý, Lukáš Chvátal, Petr Jákl, Jan Kaňka, Vítězslav Karásek, Mojmír Šerý, Martin Šiler**

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

Tel. +420 541 514 202

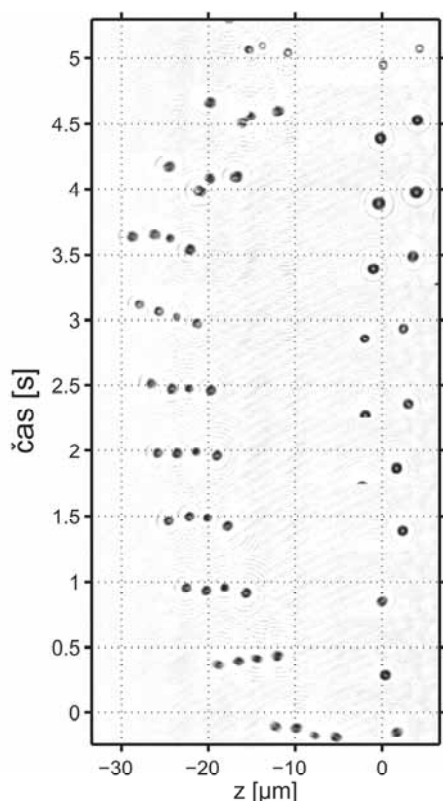
e-mail: zemaneko@isibrno.cz

www.isibrno.cz

www.isibrno.cz/omitec/

**Obor:** optické mikromanipulace

Již Johannes Kepler při pozorování komet vyvodil, že světlo může působit pozorovatelnou silou na mikročástice. Dnes je toto tlačení objektů světlem využíváno jako levný zdroj pohonu pro sluneční plachetnice. V mikrosvětě je téměř třicet let je znám nástroj zvaný optická pinzeta, který k zachycení a přemístění mikroobjektů využívá silně fokusovaného laserového svazku. Nicméně přitahování objektů světlem směrem ke zdroji záření patřilo dlouhá léta do říše sci-literatury. V posledních letech byla publikována řada teoretickým návrhů, jak tohoto efektu docílit, pouze zlomek z nich byl však demonstrován experimentálně a dva z nich v naší laboratoři. Jedná se o tzv. světelné tažné svazky, které umožňují transport mikroobjektů proti směru proudu fotonů. Podařilo se nám ukázat, že experimentální sestava umožňuje rovněž velmi efektivně separovat desítky mikročástic pouhým ozářením suspenze laserem. Vzájemná



interakce mezi více ozářenými částicemi vede k vytvoření vazby mezi nimi, která je zprostředkována rozptýlenými fotony. Tato optická vazba je velmi slabá, ale postačuje k samovolnému vytvoření mikrostruktur z jednotlivých původně volných mikročástic. Vytvořené mikrostruktury se ve světelném poli tažného svazku chovají zcela odlišně jednotlivé volné částice a mohou se i pohybovat opačným směrem. Osvícením suspenze částic vhodně rozloženým světelným polem je pak možné nejen samovolně sestavit mikrostruktury, ale též je cíleně dopravit na určité místo ozářené plochy – a to je již zárodek budoucích mikrorobotků sestavených a poháněných světlem.

Obr. 1. Ukázka formování a transport struktury (řetízku), která drží pohromadě optickými silami. Původně volné mikročástice (tlačené světlem doprava) samovolně vytvoří řetízek, který se začne pohybovat doleva ke kraji ozářené plochy (levý okraj). Zde v důsledku slabší intenzity svazku dochází k jejich rozpadu a postupnému návratu uvolněných částic k pravému okraji.

Autoři děkují za podporu projektům GAČR (GA14-16195S), MŠMT a EC (LH12018, CZ.1.05/2.1.00/01.0017, CZ.1.07/2.4.00/17.0032).





**JMENNÝ REJSTŘÍK**

<b>Brajer</b>	Jan	VÝVOJ A OPTIMALIZACE LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ VE VCSVT	9
<b>Buchta</b>	Zdeněk	DETEKCE STŘEDU INTERFERENCE PROUŽKU V INTERFEROMETRII NÍZKÉ KOHERENCE	10
<b>Čížek</b>	Martin	ELEKTRONIKA PRO REDUKCI ŠUMU LASEROVÉ DIODY S VYUŽITÍM NEVYVÁŽENÉHO VLÁKNOVÉHO INTERFEROMETRU	12
<b>Dvořák</b>	Libor	NOVÉ CENTRUM, NOVÉ MOŽNOSTI	14
<b>Holá</b>	Miroslava	STUDIUM CHOVÁNÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU PŘES DÉLKOVÝ ŠUM PŘI INTERFEROMETRICKÉM MĚŘENÍ	16
<b>Honzátko</b>	Pavel	ŠIROCE LADITELNÝ GENERÁTOR PRO SPEKTROSKOPII VE STŘEDNÍ INFRAČERVENÉ OBLASTI (3100-3600NM)	18
<b>Hrabina</b>	Jan	LASEROVÉ STANDARDY PRO INTERFEROMETRII A PŘENOS PŘESNÝCH KMITOČTŮ	20
<b>Hucl</b>	Václav	ELEKTRONIKA PRO STABILIZACI OPTICKÝCH FREKVENČNÍCH HŘEBENŮ	22
<b>Chromý</b>	Josef	FIBER LASER WITH INTELLIGENT ADDITIONAL FUNCTIONS	24
<b>Kašík</b>	Ivan	SPECIÁLNÍ OPTICKÁ VLÁKNA – SRDCE THULIOVÝCH A HOLMIOVÝCH VLÁKNOVÝCH LASERŮ A ZESILOVAČŮ	27
<b>Keša</b>	Petr	SPECIFIC FORMS OF USERS INTERACTION WITH HOLOGRAPHIC OPTICAL TWEEZERS CONTROLLED BY LEAP MOTION	29
<b>Kolařík</b>	Vladimír	FÁZOVÉ MASKY VYROBENÉ ELEKTRONOVOU LITOGRAFIÍ A IONTOVÝM LEPTÁNÍM PRO PŘÍPRAVU VLÁKEN S BRAGGOVÝMI MŘÍŽKAMI	31
<b>Kolka</b>	Zdeněk	OPTICKÁ KOMUNIKACE VOLNÝM PROSTOREM NA PLNĚ FOTONICKÉ BÁZI	33
<b>Kožmín</b>	Pavel	APLIKACE LASERU PŘI VÝROBĚ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	35
<b>Kršek</b>	Jiří	50-LETÉ VÝROČÍ HE-NE LASERŮ V ČESKOSLOVENSKU	37
<b>Kuboš</b>	David	VYUŽITÍ TERMOGRAFIE PŘI SVAŘOVÁNÍ LASEREM	39
<b>Lazar</b>	Josef	INTERFEROMETRICKÝ SYSTÉM PRO SOUŘADNICOVÉ ODMĚŘOVÁNÍ	42
<b>Londesborough</b>	Michael G.S.	THE FIRST BORANE LASER	44
<b>Lorenc</b>	Dušan	ULTRAFAST PLASMAS AT WORK: FROM POSTIONIZATION TO THZ WAVEMIXING	45
<b>Mikel</b>	Břetislav	OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY PRO MĚŘENÍ DÉLKY, TLAKU, TAHU, TEPLoty A VIBRACÍ	46
<b>Moser</b>	Martin	ULTRARYCHLÝ LASER INSIGHT DS	48
<b>Mořka</b>	Libor	DIAGNOSTIKA MODOVÉ STRUKTURY LASEROVÉHO SVAZKU	49
<b>Mrňa</b>	Libor	DEFORMOVATELNÉ ZRCADLO PRO VÝKONOVÉ TECHNOLOGICKÉ LASERY	50
<b>Novák</b>	Jiří	METODA VYHODNOCENÍ INTERFERENCE POLE PŘI MĚŘENÍ TVARU OPTICKÝCH PLOCH S VYUŽITÍM KORELACE	52
<b>Oulehla</b>	Jindřich	SESTAVA PRO LIDT TESTY OPTICKÝCH KOMPONENTŮ PŘI KRYOGENNÍCH TEPLotÁCH	54
<b>Peterka</b>	Pavel	VLÁKNOVÉ OPTICKÉ SOUČÁSTKY PRO VLÁKNOVÉ LASERY V „EYE-SAFE“ SPEKTRÁLNÍ OBLASTI V OKOLÍ 2 MIKROMETRŮ	56
<b>Pham</b>	Minh Tuan	PŘELADITELNÁ LASEROVÁ DIODA NA VLNOVÉ DÉLCE 633NM PRO PŘESNÁ MĚŘENÍ DÉLKY A SPEKTROSKOPII	57

<b>Pilát</b>	Zdeněk	RAMAN TWEEZERS IN MICROFLUIDIC SYSTEM FOR AUTOMATIC ANALYSIS AND SORTING OF LIVING CELLS	59
<b>Pokorný</b>	Petr	ANALÝZA OPTICKÉHO DVOU-ZRCADLOVÉHO SKENERU S ČOČKOU PROMĚNNÉ OHNISKOVÉ VZDÁLENOSTI	60
<b>Pravdová</b>	Lenka	NÁSOBENÍ OPAKOVACÍ FREKVENCE ERBIUM DOPOVANÉHO VLÁKNOVÉHO PULZNÍHO LASERU	62
<b>Řeřucha</b>	Šimon	INTERFEROMETRICKÝ ODMĚŘOVACÍ SYSTÉM PRO ELEKTRONOVÝ LITOGRAF	64
<b>Švábek</b>	Roman	HILASE – NOVÉ LASERY PRO PRŮMYSL A VÝZKUM	66
<b>Turčičová</b>	Hana	HILASE - NOVÉ LASERY PRO PRŮMYSL A VÝZKUM	62
<b>Wilfert</b>	Otakar	HODNOCENÍ KVALITY KYTAR POMOCÍ HOLOGRAFICKÉ INTERFEROMETRIE	68
<b>Zavadilová</b>	Alena	DETEKCE ZÁZNĚJŮ V SUBHARMONICKÉM SYNCHRONNĚ VNITROREZONÁTOROVĚ ČERPANÉM OPO	70
<b>Zemánek</b>	Pavel	OD POUHÉHO TLAČENÍ PO TŘÍDĚNÍ MIKROČÁSTIC A SKLÁDÁNÍ MIKROROBOTKŮ SVĚTLEM	72

## PARTNEŘI A SPONZOŘI KONFERENCE:



Lasery, fotonika  
a jemná mechanika

[WWW.MIT-LASER.CZ](http://WWW.MIT-LASER.CZ)



[WWW.LAO.CZ](http://WWW.LAO.CZ)



[WWW.MEOPTA.CZ](http://WWW.MEOPTA.CZ)



Best choice.

[WWW.BYSTRONIC.CZ](http://WWW.BYSTRONIC.CZ)



[WWW.NWG.CZ](http://WWW.NWG.CZ)



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



Aplikační laboratoře  
mikrotechnologií  
a nanotechnologií



Laserné 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





AKADEMIE VĚD  
ČESKÉ REPUBLIKY

Centrum pro inovace a transfer technologií



Lasery, fotonika  
a jemná mechanika



evropský  
sociální  
fond v ČR



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Název: Sborník příspěvků multioborové konference LASER54

Editor: Bohdan Růžička

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

Vydáno v roce: 2014

Vydání: první

Náklad: 85 ks

Za obsahovou a jazykovou úpravu odpovídají autoři příspěvků.

ISBN 978-80-87441-13-8