



E-sborník příspěvků multioborové konference

LASER59

Hotel Skalský dvůr, 23. – 25. října 2019



E-sborník příspěvků multioborové konference

LASER59

Hotel Skalský dvůr, 23. – 25. říjen 2019

© 2019, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

ISBN 978-80-87441-27-5

ÚVODNÍ SLOVO

Vážení čtenáři,

svět se točí a neustále mění jako excitované elektrony v aktivním prostředí laseru. Pokud chceme, aby naše životy zářily a měly také daleký dosah, musíme toto aktivní prostředí našeho života stimulovat. To však asi nemusím moc vysvětlovat, neboť Vy, kteří s lasery pracujete, víte, jak to funguje.

Věřím, že i naše setkání na konferenci LASER59 může být jedním z takových životabudičů. Nechejte se inspirovat.

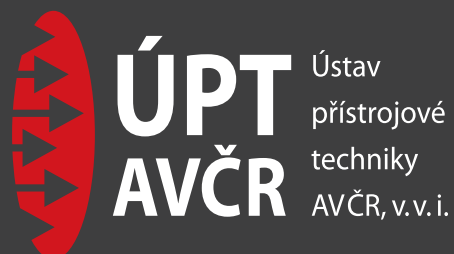
V Brně dne 18. října 2019

Bohdan Růžička
za organizační tým

OBSAH

Čech	Pavel	MĚŘENÍ PRAHU ABLACE TENKÝCH VRSTEV S PIKSEKUNDOVÝMI IMPULZY	9
Čučka	Milan	NÁVRH KONEKTOROVÉHO SPOJE PRO INTELIGENTNÍ TEXTILIE	11
Helán	Radek	TESTOVÁNÍ RADIAČNÍ ODOLNOSTI BRAGGOVÝCH VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK	13
Horník	Petr	MĚŘENÍ A SIMULACE ZPĚTNĚ ODRAŽENÉHO ZÁŘENÍ PŘI PENETRAČNÍM LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ	15
Kamrádek	Michal	HOLMIEM DOPOVANÉ VLÁKNOVÉ LASERY	17
Kašík	Ivan	OD TELEKOMUNIKAČNÍCH OPTICKÝCH VLÁKEN K VLÁKNOVÝM LASERŮM ZA 40 LET	19
Klečka	Martin	PULSNÍ LASEROVÁ DEPOZICE S IN SITU MONITOROVÁNÍM RŮSTU VRSTEV	21
Kolka	Zdeněk	ANALÝZA SIGNÁLU POLOVODIČOVÉHO FOTONÁSOBIČE PRO DETEKCI VELMI SLABÝCH LASEROVÝCH PULZŮ	23
Kuboš	David	VIZUALIZAČNÍ SYSTÉMY PRO LASEROVÉ APLIKACE	25
Lelek	Jakub	MĚŘENÍ FÁZOVÉ RETARDACE V OPTOMECHANICKÝCH SOUSTAVÁCH	27
Moser	Martin	MIT – LASERY, FOTONIKA A JEMNÁ MECHANIKA	29
Novotný	Vít	OPTOVLÁKNOVÝ SENZOR MECHANICKÝCH VIBRACÍ	31
Oulehla	Jindřich	VLIV TEPLoty NA SPEKTRÁLNÍ VLASTNOSTI OPTICKÝCH TENKÝCH VRSTEV V LASEROVÉ SPEKTROSKOPII S ABSORPČNÍMI KYVETAMI	35
Pokorný	Petr	VÝPOČET CHODU OBECNÉHO PAPRSKU ROTAČNĚ SYMETRICKÝMI ASFÉRIKÝMI PLOCHAMI	37
Smrž	Martin	PIKSEKUNDOVÝ TENKODISKOVÝ LASER PERLA PRO PRŮMYSLOVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ	39
Šebestová	Hana	TEPLOTNÍ GRADIENTY PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ	41
Vanda	Jan	PŘENOS LASEROVÝCH PULZŮ SE ŠPIČKOVÝM VÝKONEM >100 MW OPTICKÝMI VLÁKNY ČESKÝ OPTICKÝ KLASTR	43

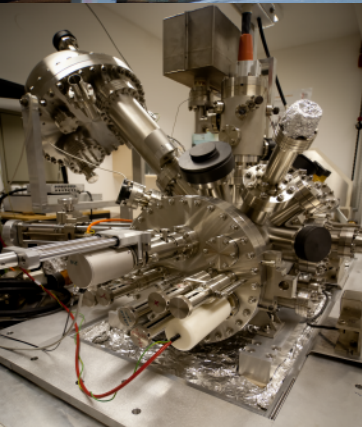
PARTNEŘI A SPONZOŘI KONFERENCE



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



Aplikační laboratoře
mikrotechnologií
a nanotechnologií



Laserové svazky zaostřené do makrosvěta i mikrosvěta

Speciální technologie

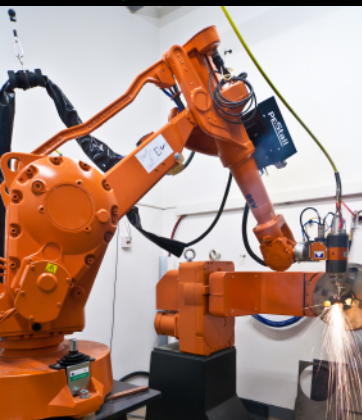
Elektronová mikroskopie



Kryogenika a supravodivost

Lasery pro měření a metrologii

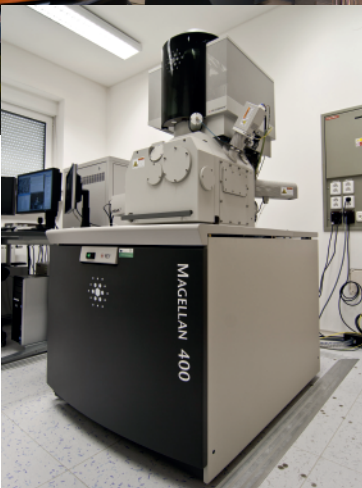
Elektronová litografie



Pokročilé výkonové laserové technologie

Měření a zpracování signálů v medicíně - MediSIG

Jaderná magnetická rezonance



MĚŘENÍ PRAHU ABLACE TENKÝCH VRSTEV S PIKOSEKUNDOVÝMI IMPULZY

Pavel Čech

HiLASE centrum, Fyzikální ústav Akademie věd České Republiky
Za Radnicí 828
252 41 Dolní Břežany
pavel.cech@hilase.cz

Obor: interakce laseru s hmotou

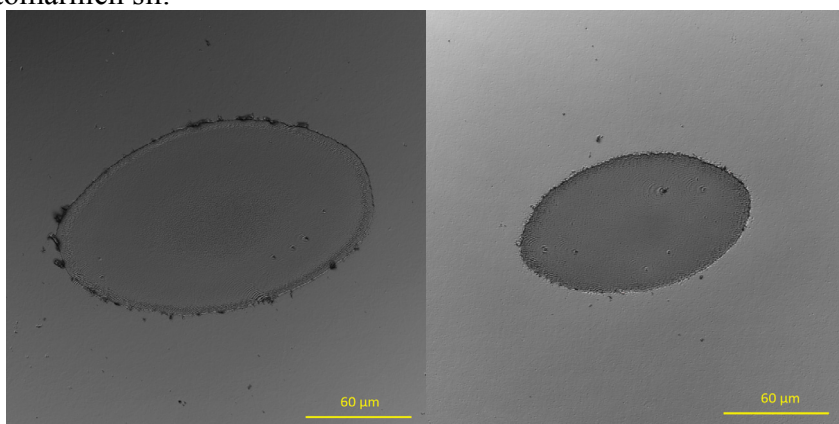
Úvod

Ablace po většinu času byla a nejspíše i nadále bude nejpopulárnější z interakcí laser-látka. V průmyslu, v medicíně, ve spektroskopii, tam všude hraje laserová ablace zásadní roli. Spektroskopie jí využívá při sondách do materiálu, který potom lze identifikovat podle plazmatu, který na krátkou dobu vzniká. V medicíně umožňuje laserová ablace díky své přesnosti zákroky, které klasická medicína řešit nemůže. A v neposlední řadě v průmyslu se svařování, povrchové kalení a zejména řezání všeho druhu již nedá vynahradit. I přes to zůstává ablace ne zcela uzavřeným tématem, co se týče teoretického modelu, hlavně kvůli velkému množství lineárních i nelineárních jevů, které mohou mít přímo či nepřímo vliv.

Experiment

Pro zkoumání laserové ablace byly vybrány dva vzorky s různými tenkými vrstvami. První vzorek je pokrytý periodickou strukturou ze střídajících se vrstev oxidu titaničitého a oxidu křemičitého. Tyto vrstvy tvoří vysokoodrazivé zrcadlo s reflektivitou $R = 0,9921$ na vlnové délce 1030 nm a při úhlu dopadu 45° . Druhý vzorek je také zrcadlo, ale s vrstvami z oxidu tantaličného a oxidu křemičitého. Reflektivitu má $R = 0,9916$ na vlnové délce 1030 nm a při úhlu dopadu 45° . K experimentu byl zvolen laserový systém PERLA B v laserovém centru Hilase. Jedná se o pikosekundový diodově čerpaný tenkodiskový laser s aktivním médiem z Yb:YAG slabů. Délka impulzu činila 1,8 ps, což je na vytvoření čisté ablace dostačující. Další parametry tohoto laserového systému jsou: vlnová délka 1030 nm, opakovací frekvence 1 kHz, energie v impulzu až 6,5 mJ, Gaussovský tvar výstupního svazku s průměrem 16 mm.

Každý vzorek byl vystaven jednotlivým laserovým impulzům o různých energiích. Po otestování všech testovaných energií byl vzorek naskenován laserovým mikroskopem s 5x objektivem. Každá ablovaná oblast byla poté naskenována 50x objektivem. Vzorky byly poté odeslány Fyzikální ústav Akademie věd, kde byly některé ablované oblasti naskenovány mikroskopii atomárních sil.



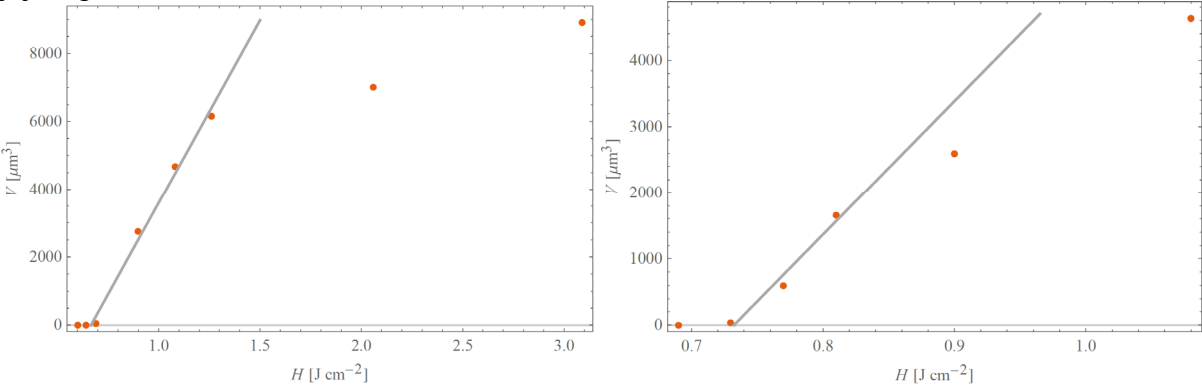
Obr. 1: Ukázka kráterů na testovacích vzorcích. Vlevo: TiO_2 , vpravo: Ta_2O_5 .

Výsledky

Ablovaný objem byl změřen pomocí laserového mikroskopu a mikroskopie atomových sil. Mikroskopie atomových sil se dá dobře použít pouze na malé oblasti, jejichž velikost laserem zanechané krátery značně překonávaly. Touto metodou byly tedy naskenovány pouze hrany kráterů a výsledky byly použity pro kontrolu správnosti měření laserovým skenovacím mikroskopem. Výsledky ablovaného objemu v závislosti na fluenci jsou znázorněny na obrázku 2.

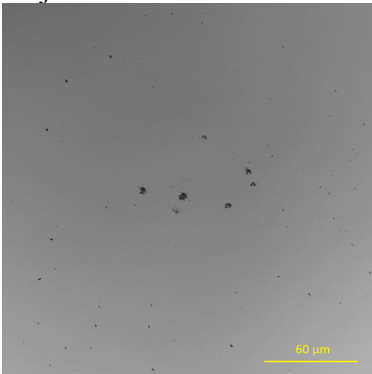
Materiál	S_q [nm]	H_{max} [J cm ⁻²]	H_a [J cm ⁻²]
TiO ₂	0,617	0,58	0,67
Ta ₂ O ₅	0,403	0,70	0,73

Tab. 1: Tabulka obsahující testované vzorky a zjištěné veličiny - S_q je q-parametr drsnosti určující standardní deviaci výšek, H_{max} je jejich práh laserem vyvolaného poškození zjištěný metodou 1-on-1, vyjádřený jako maximální bezpečná plošná hustota energie a H_a je jejich práh laserové ablace.



Obr. 2: Graf závislosti ablovaného objemu na plošné hustotě energie dopadajícího záření. Vlevo: TiO₂, vpravo: Ta₂O₅.

Zajímavé je porovnání prahu poškození a prahu ablace. Intuitivně by se mohlo zdát, že půjde o víceméně stejné, či odpovídající hodnoty. Při pohledu do tabulky 1 je ale ihned zřejmé, že to tak alespoň v některých případech nebude. Rozdíl je v definici ablace a poškození. V ideálním případě a při dostatečně krátkých impulzech by tyto termíny z hlediska definice pro určování prahu splynuly. Ovšem pokud je vzorek znečištěný, obsahuje defekty, nebo je jinak snížen jeho práh poškození, může dojít k poškození na defektech při energiích nižších, než postačuje pro ablaci. Defekty způsobené poškození je sice spojováno spíše s nanosekundovými a delšími impulzy, zde ovšem vidíme, že i v pikosekundovém režimu mohou mít defekty vliv. Konkrétně pro naše dva vzorky znamená větší mezera mezi prahem poškození a prahem ablace u vzorku TiO₂, že byl jeho povrch v horším stavu a stačilo to na inicializaci poškození. Vzorek Ta₂O₅ byl naproti tomu kvalitnější, nebo lépe připravený na experiment. Příklad takového poškození je na obrázku \ref{fig:dmgpodabl}. Nic na tomto poškození neodpovídá ablačnímu jevu, poškození která na oblasti vznikla jsou nejspíš pouze laserem rozšířené defekty, které jsou na snímku vidět i okolo.



Obr. 3: Poškozená oblast na vzorku TiO₂ vystavená hustotě energie nižší, než je práh ablace.

NÁVRH KONEKTOROVÉHO SPOJE PRO INTELIGENTNÍ TEXTILIE

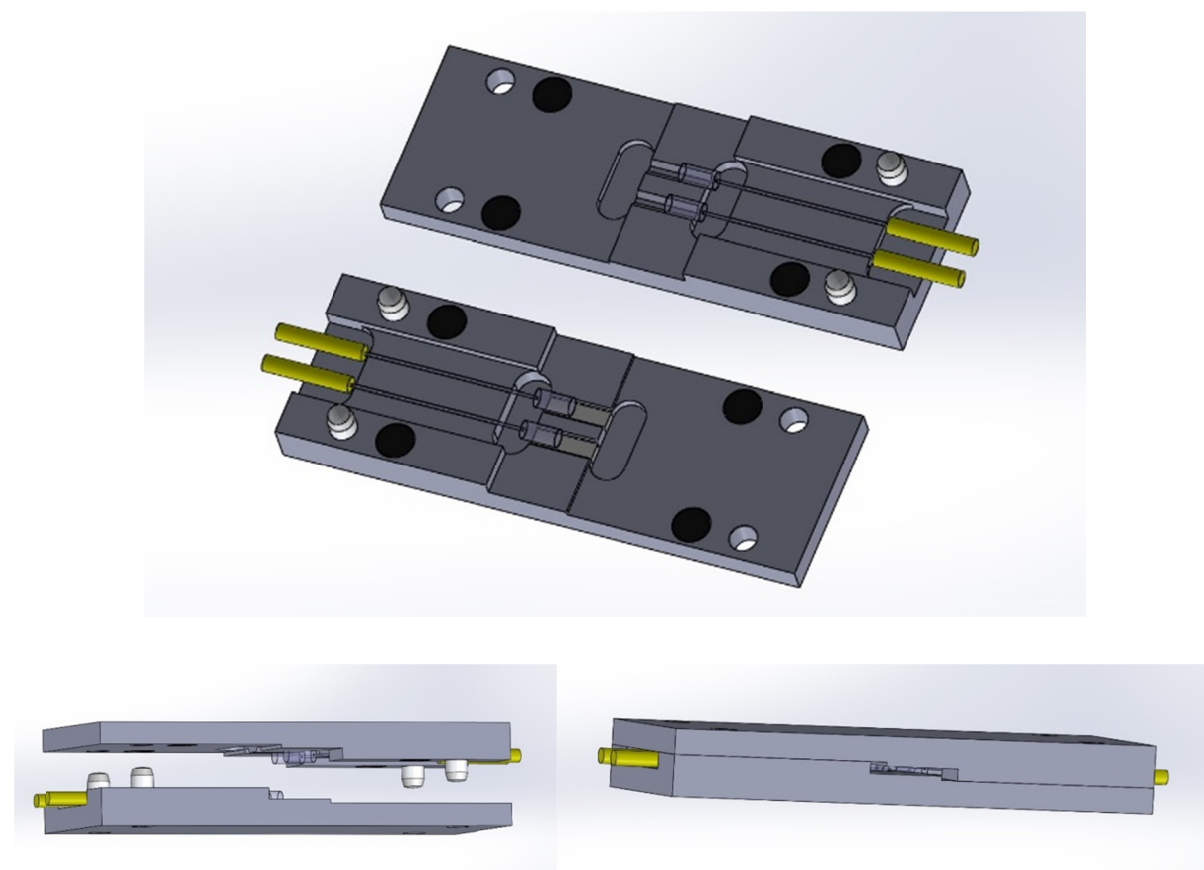
Milan Čučka¹, Radek Helán¹, František Urban¹, Jakub Somer¹, Petr Münster²

¹PROFIcomms s.r.o.

²Vysoké učení technické v Brně

Obor: Výzkum a vývoj optických prvků a senzorických systémů

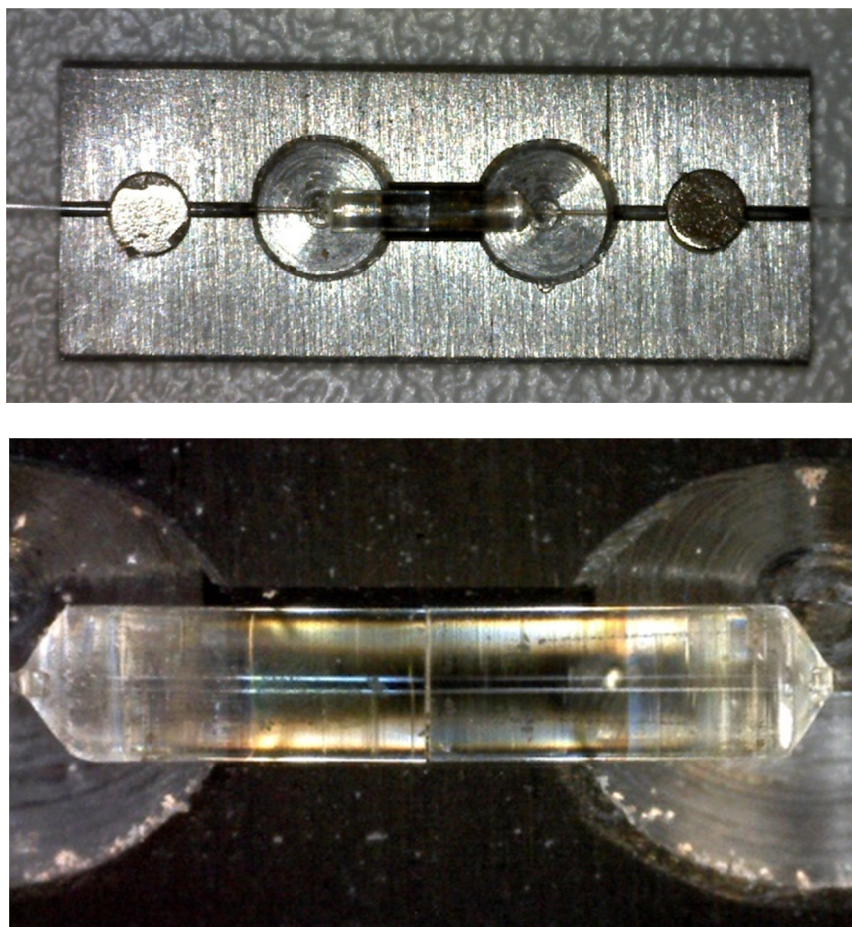
Výzkumně-vývojové pracoviště společnosti PROFIcomms má v řešení několik projektů z oblasti optických senzorických systémů. Jedním z nich jsou inteligentní technické textilie pro zvýšení bezpečnosti kritických infrastruktur. Jedná se o využití senzorických prvků pro snímání a měření fyzikálních veličin jako jsou tlak, teplota a mechanické deformace. Při okamžité detekci stavu je možné zamezit například havárii v energetice či chemickém průmyslu. Jedním z cílů projektu je návrh a realizace konektorového spoje pro spojování jednotlivých měřicích segmentů inteligentních textilií, u kterých nelze použít standardní telekomunikační konektorové spojení z důvodu požadavku na velikost a provedení. Navržený konektorový spoj je velmi plochý s možností snadného rozložení a integrací do okrajů textilií. Další výhodou navržené konstrukce je možnost spojení pouhým přiložením obou konců (kdy není zapotřebí zasunutí konektoru), čímž bude umožněna jeho integrace do suchého zipu na rozhraní textilie. Důležitým požadavkem je možnost opakovaného rozpojení a spojení konektoru. Návrh plochého konektorového spoje je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1: Návrh plochého konektorového spoje

Optické spojení konců vláken uvnitř konektoru je realizováno pomocí čoček s gradientním indexem lomu (GRIN). Ty jsou využity ke kolimaci při vyvázání a zpětném navázání

optického svazku. Spojení optického vlákna a GRIN čočky je realizováno pomocí pokročilého zařízení pro zpracování optických vláken, LDS 2.5 od výrobce 3SAE. Při sestavování konektorového spoje s využitím GRIN čoček je klíčové dodržení minimální radiální a především úhlové odchylky. Axiální odchylka je přípustná a příliš neovlivňuje kvalitu spoje. Při realizaci spoje je navržena mezera mezi GRIN čočkami kolem 0,5 mm. Radiální a úhlové nepřesnosti při sesazení GRIN čoček vedou ke vzniku vložného útlumu na spoji. Z tohoto důvodu je sesazení GRIN čoček realizováno uložením do společné V-drážky a následným plošným přitlačením z protilehlé strany. Vzhledem k tomu, že kvalita V-drážek určuje kvalitu celého spoje, požadavek na jejich výrobní přesnost je vysoká. V navržené konstrukci jsou V-drážky realizovány s využitím vysoce přesné mikroobráběcí stanice s femtosekundovým laserem na pracovišti společnosti NETWORK GROUP. Realizace spoje s GRIN čočkami ve zkušebním přípravku s přesnou V-drážkou je zobrazena na Obr. 2.



Obr. 2: Sesazení GRIN čoček, nahoře – celkový pohled na realizovaný spoj, dole – detail na GRIN čočky s optickými vlákny

Spojení konektoru je velmi rychlé a přesné díky aretačnímu kolíku a magnetům, jak je patrné z návrhu mechanické konstrukce na Obr. 1. Díky vytvořeným drážkám a magnetickému spojení dojde k požadovanému přitlaku GRIN čoček do V-drážek a jejich přesnému usazení. Konstrukce je navržena s ohledem na jednoduché opakované spojení při zachování nízkého profilu spoje. Při testování spoje na zkušebním přípravku bylo docíleno nízkého vložného útlumu. Ověření na funkčním vzorku konektoru bude provedeno po dokončení mechanických částí konektoru, které jsou v této chvíli ve výrobě.

Popsané výzkumné aktivity jsou podpořené grantovým projektem VI20172020067.

TESTOVÁNÍ RADIČNÍ ODOLNOSTI BRAGGOVÝCH VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK

Radek Helán¹, František Urban¹, Petr Vomáčka², Antonín Šik²

¹NETWORK GROUP, s.r.o.

²ÚJV Řež, a.s.

r.helan@nwg.cz

Obor: Výzkum a vývoj optických prvků a senzorických systémů

Jednou z oblastí, kterou se společnost NETWORK GROUP zabývá, jsou optické senzory pro využití v aplikacích jaderné energetiky. Jedná se především o senzory teploty a mechanického napětí založené na principu Braggových vláknových mřížek (FBG). Jedním z klíčových předpokladů pro implementaci optických senzorů v prostředí s radiací je znalost chování senzorických prvků při expozici ionizujícím zářením. Z tohoto důvodu byly provedeny testy ozařování úseků vláken se senzorickými FBG a byly sledovány změny jejich optických vlastností v závislosti na dávce záření γ .

Vzorky byly testovány v ozařovně na pracovišti ÚJV Řež s využitím ozařovacího zdroje Cobalt-60 (^{60}Co). Přibližný dávkový výkon zdroje byl 0,5 kGy/h, emitované záření γ na dvou charakteristických přechodech s energiemi 1,1732 a 1,3325 MeV. 3ks vzorků 100 m dlouhých úseků vlákna G.657.A2 s FBG zapsanou na jednom z konců vlákna byly uloženy do ozařovací komory v optimální výšce a vzdálenosti vzhledem ke zdroji záření, viz Obr. 1.



Obr. 1: Ozařovací komora s vloženými senzorickými vlákny

Před uložením vzorků do komory byly změřeny výchozí parametry. Ozáření proběhlo celkem ve třech fázích. První, úvodní fáze trvala 4 hodiny, kdy vzorky obdržely celkovou dávku 2,5 kGy. Po první fázi byla senzorická vlákna vyjmuta, na konce vláken byly navařeny pigtaily s konektory a bylo provedeno kontrolní měření.

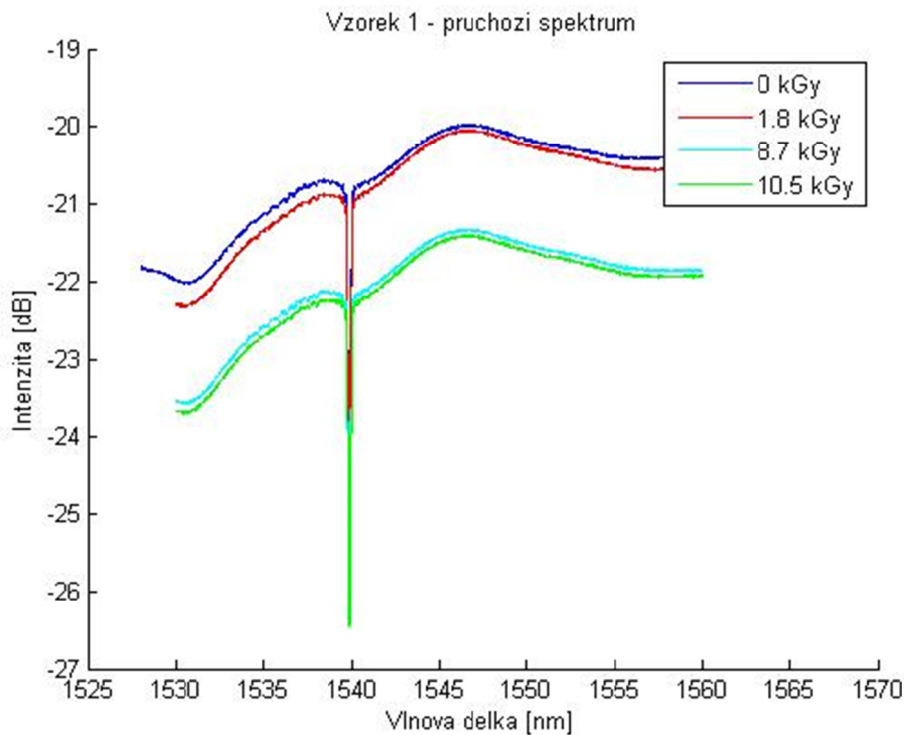
Po měření byly vzorky umístěny zpět do komory a po přestávce v délce cca 4 hod. pokračovala druhá fáze ozařování. Délka druhé fáze ozařování trvala 15 hodin, kumulativní dávka (po celkem 19ti hodinách ozařování) činila 11,7 kGy. Po druhé fázi proběhlo opět měření parametrů senzorických vláken, třetí fáze ozařování byla započata bezprostředně po

měření parametrů vláken (cca 1:45 hod.). Délka třetí, závěrečné, fáze byla 4h, kumulativní dávka po celkem 23 hodinách ozařování činila 14,2 kGy.

Měřeny byly dvě sady parametrů. Prvním byl útlum vlastního vlákna (měřením na vlnové délce mimo Braggovu rezonanční vlnovou délku FBG) za pomoci měření přímou metodou, tedy vložením měřené trasy mezi optický zdroj a detektor. Druhou sadu parametrů představovalo měření vlastností FBG zapsaných v ozařovaných vláknech. Měřeny byly odrazná a propustná spektra FBG, vyhodnocovány byly parametry a jejich změna v závislosti na ozáření - centrální vlnová délka, FWHM šířka mřížky, odstup signál-šum, odrazivost. Závislosti útlumu vlákna v jednotlivých fázích ozařování a relaxace útlumu 6 dnů po ozařování jsou uvedeny v Tab. 1, průchozí spektra FBG jednoho ze vzorků v průběhu ozařování jsou zobrazeny v grafu na Obr. 2.

Tab. 1: Naměřené hodnoty útlumu v závislosti na dávce záření, vztaženo ke stavu před ozářením

Dávka [kGy]	Útlum [dB]		
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
0	0,00	0,00	0,00
2,5	-1,58	-1,54	-1,62
11,7	-2,95	-2,55	-2,86
14,2	-3,16	-2,71	-3,03
Relaxace, 6 dnů po ozáření	-1,93	-2,22	-2,43



Obr. 2: Průchozí spektra FBG v průběhu ozařování

Závěrem lze konstatovat, že v důsledku ozáření dochází ke zvýšení měrného útlumu vlákna, který po ukončení ozáření pozvolně relaxuje. Ozáření nemá vliv na samotné FBG, během testů se neprokázala znatelná změna spektrálních charakteristik FBG v důsledku ozáření.

Popsané výzkumné aktivity jsou podpořené grantovým projektem VI20172020099.

MĚŘENÍ A SIMULACE ZPĚTNĚ ODRAŽENÉHO ZÁŘENÍ PŘI PENETRAČNÍM LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ

Petr Horník, Libor Mrňa, Martin Šarbort, Hana Šebestová

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

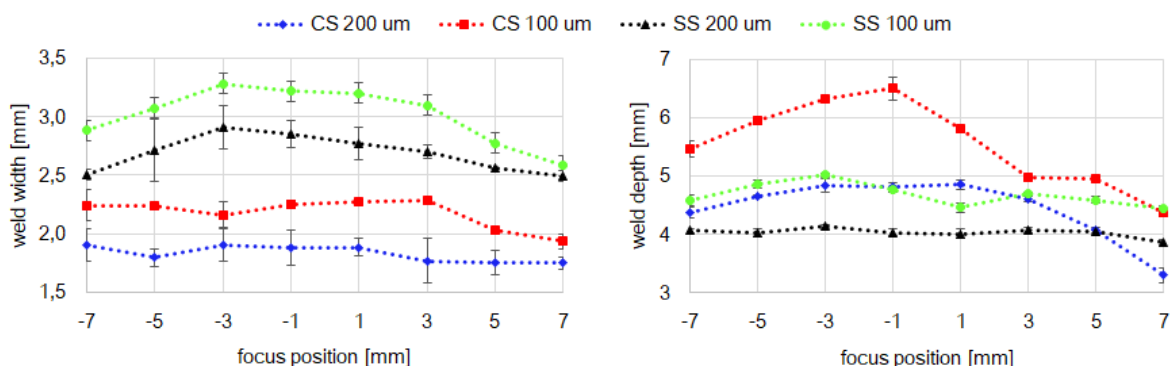
Královopolská 147/62, 612 00 Brno - Královo Pole

tel.: 541 514 214, e-mail: hornik@isibrno.cz, www.isibrno.cz

Obor: výkonové laserové technologie

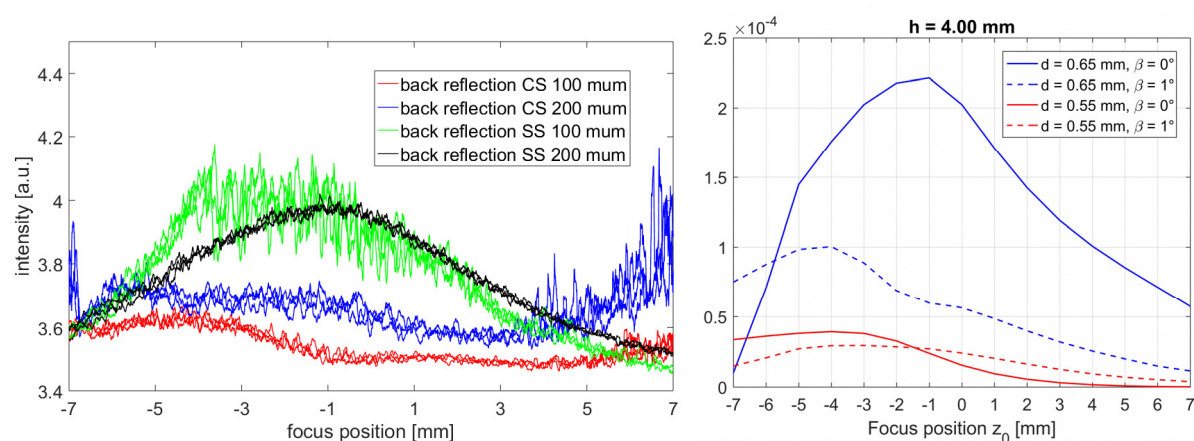
Laserový svařovací proces je doprovázen množstvím záření, jak ve viditelné části spektra, tak tepelné záření svarové lázně a v neposlední řadě i vlastní laserové záření. Při laserovém svařování se často používá penetrační režim, při kterém se tvoří paroplynový kanál – keyhole. Většina laserového záření je vícenásobným odrazem pohlcena uvnitř keyhole, avšak malá část se odráží zpět a prochází optickou soustavou svařovací hlavy a dopravním vláknem. Zpětně odražené laserové záření je také monitorováno přímo v laseru z důvodu ochrany rezonátoru a dalších optických komponent. Signál je snadno přístupný a takto získaných dat se dá využít i během svařovacího procesu. Proto byl navržen experiment, při kterém byla zjišťována souvislost mezi rozměry svaru, polohou ohniska a zpětně odraženým laserovým zářením. Dále pak byly výsledky měření porovnány se simulací.

Poloha ohniska byla měněna v rozsahu od -7 do +7 mm. Výkon 2000 W a posuvná rychlost $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ byly konstantní pro všechny svary. Experimenty byly provedeny pro oceli s odlišnými vlastnostmi – korozivzdornou (1.4301) a uhlíkovou (1.0038) ocel a pro dvě dopravní vlákna s průměrem jádra 100 μm a 200 μm . Byl použit laser IPG YLS-2000 pracující na vlnové délce $1070 \pm 10 \text{ nm}$ a svařovací hlava Precitec YW30. Hloubka a šířka svaru byly zjištěny z průměru tří metalografických výbrusů, viz obr. 1.



Obr. 1: Šířka a hloubka svaru pro uhlíkovou (CS) a korozivzdornou (SS) ocel a průměr dopravního vlákna 100 μm a 200 μm .

Simulace šíření zpětně odraženého laserového záření skrze optickou soustavu byla řešena v prostředí MATLAB pomocí ray tracingu. Stěny keyhole lze chápat jako neustále se měnící odraznou plochu. Jedním ze zjednodušení, ke kterým jsme přistoupili je aproximace keyhole kuželovou dutinou s různými hodnotami hloubky a šířky. Jejím náklonem o úhel β byl zohledněn také vliv posuvné rychlosti. Část dopadajícího laserového záření je po vícenásobném odrazu odražena zpět skrze fokusační a kolimační čočku procesní hlavy. Šíření skrze vlákno je zanedbáno a jsou započítány pouze paprsky, které projdou aperturou čoček a dopadnou na konec optického vlákna. Naměřené průběhy zpětně odraženého laserového záření při změně ohniska byly porovnány simulovanými, viz obr. 2.



Obr. 2: (a) Naměřený průběh zpětně odraženého laserového záření pro uhlíkovou (CS) a korozivzdornou (SS) ocel a průměr dopravního vlákna 100 μm a 200 μm . (b) Průběh simulovaného zpětně odraženého laserového záření pro hloubku kužele keyhole $h = 4$ mm, jeho průměr d a náklon β .

Je vidět, že oba materiály se chovají odlišně jak z pohledu rozměru svaru, tak z hlediska průběhu zpětně odraženého laserového záření. Z grafů rozměrů svaru obr. 1 vyplývá, že při použití užšího vlákna a tedy větší hustoty výkonu dostáváme větší šířku i hloubku svaru. Dále svary v korozivzdorné oceli jsou širší, což je způsobeno její horší tepelnou vodivostí. Výsledky simulace pro keyhole o průměru 0,65 mm více odpovídají intenzitě zpětného odrazu pro korozivzdornou ocel, zatímco menší průměr keyhole 0,55 mm je odpovídá více uhlíkové oceli. Rozměry svarů a naměřená intenzita odraženého laserového záření v závislosti na poloze ohniska byly porovnány pomocí korelačních koeficientů. Korelace je prokazatelná pro šířku svaru korozivzdorné oceli, avšak mezi hloubkou a intenzitou zpětně odraženého laserového záření není lineární vztah. Hloubka průvaru u korozivzdorné oceli při použití 200 μm vlákna je nezávislá na poloze ohniska, což může být zapříčiněno značnou Rayleigho délkou 6.66 mm. Výsledky simulace intensity zpětně odraženého laserového záření jsou ve shodě s pozorovaným zpětně odraženým laserovým zářením, nicméně použitý model keyhole je citlivý na změny a měl by být zobecněn.

Autoři děkují za podporu Technologické agentury ČR projekty TG03010046-12 a TH04010366.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

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

HOLMIEM DOPOVANÉ VLÁKNOVÉ LASERY

M. Kamrádek*, I. Kašík, J. Aubrecht, J. Mrázek, O. Podrazký, J. Cajzl, P. Vařák, P. Peterka, P. Honzátko

*kamradek@ufe.cz

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

Chaberská 1014/57

182 51 Praha 8 - Kobylisy

Česká republika

www.ufe.cz

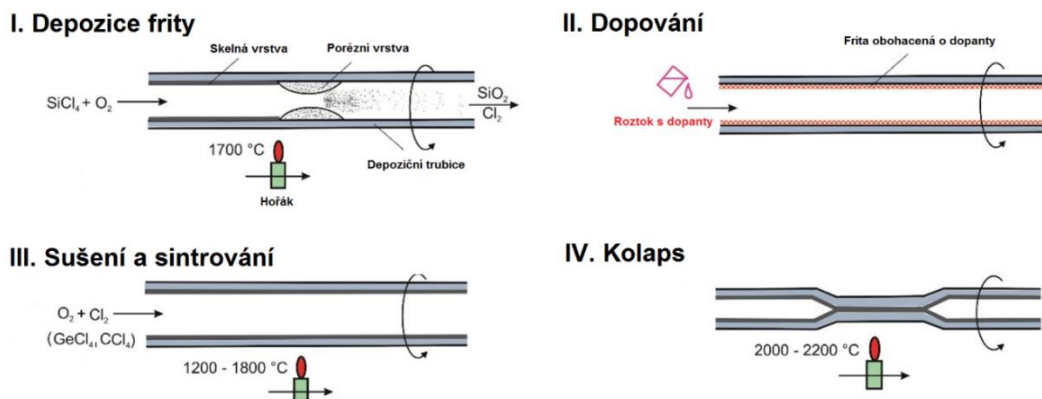
Obor: vláknové lasery

Mezi přednosti vláknových laserů patří vysoký jas výstupního záření, excelentní kvalita laserového svazku, účinné chlazení, flexibilita a kompaktní provedení. Díky těmto parametrům nalézají vláknové lasery uplatnění v oborech, jakými jsou telekomunikace, medicína, spektroskopie či zpracování materiálů.

Základní součástí vláknových laserů jsou aktivní optická vlákna. Jako aktivní prvky se ve většině případů používají ionty prvků vzácných zemin. V případě optických vláken na bázi křemenného skla dopovaných thuliem či holmiem je v poslední době využívána především jejich emise v oblasti okolo 2 μm .

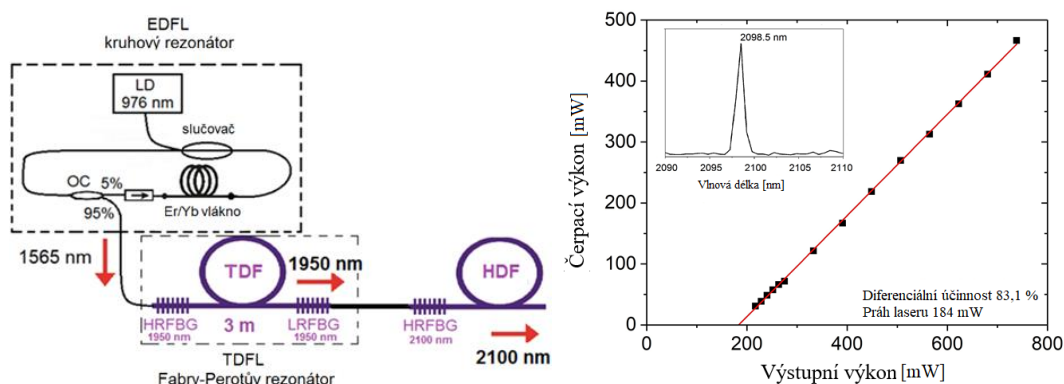
Příprava optických vláken klade vysoké nároky zejména na čistotu připravovaných materiálů a geometrickou přesnost přípravy vláken. Z těchto důvodů jsou nejrozšířenějšími metodami přípravy optických vláken metody využívající depozici z plynné fáze. Prvním krokem během depozice z plynné fáze je příprava tzv. optické preformy – skleněné tyče, ze které se vytáhne optické vlákno. V současné době patří mezi nejrozšířenější metody modifikovaná depozice z plynné fáze (*Modified Chemical Vapor Deposition* – MCVD), během níž preforma vzniká chemickou depozicí skelných vrstev do vnitřního prostoru skleněné trubice. Tato technologie je instalována na Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR a byla využita pro přípravu níže popisovaných vláken.

Pro přípravu aktivních vláken dopovaných prvky, pro něž neexistují použitelné kapalně prekurzory byly vyvinuty metody využívající roztoky rozpustných solí (dopování z roztoku, *solution doping* – SD) či disperze nanočástic (dopování nanočásticemi, *nanoparticle doping* – NP). Metoda přípravy optických vláken s využitím dopování nanočásticemi byla v roce 2007 vyvinuta na Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR. Schematicky je proces přípravy optické preformy znázorněn na Obr. 1.



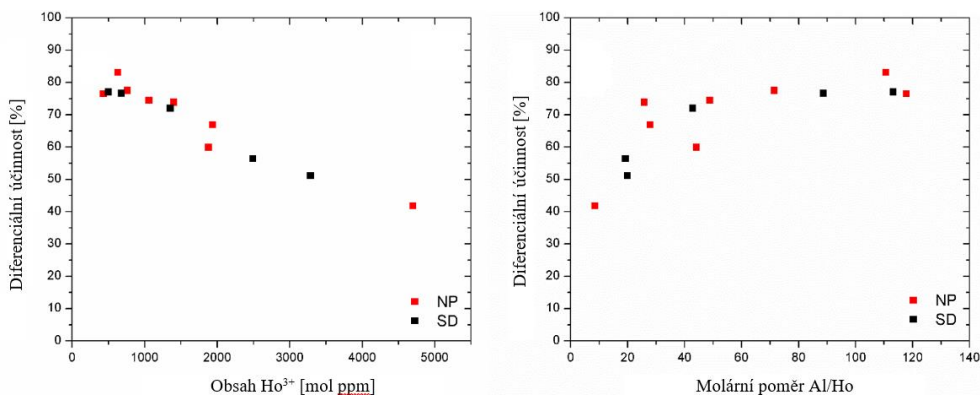
Obr. 1 Schéma přípravy optické preformy

Na přípravu preformy navazuje tažení optického vlákna. Charakterizace vláken zahrnují především měření základního útlumu, koncentraci vzácné zeminy a obsah OH^- skupin. Všechny uvedené vlastnosti jsou měřeny spektroskopickými metodami z charakteristických absorpčních pásů (OH^- 1386 nm, Ho^{3+} 1950 nm), respektive z absorpčního minima v oblasti 1300 nm v případě základního útlumu. Charakterizace vláken dále zahrnují měření fluorescenční doby života a charakterizaci v rezonátoru laseru – stanovení prahu laseru a diferenciální účinnosti (strmosti závislosti výstupního výkonu na výkonu čerpacím). Maximální dosažitelný výkon, (~ 500 mW) je omezen výkonem čerpacího laseru. Vláka jsou charakterizována v uspořádání Fabryova-Perotova rezonátoru dle Obr. 2 a). Na Obr. 2 b) je znázorněna závislost výstupního výkonu holmiového laseru na výkonu čerpacího laseru a ve výřezu spektrum laserového záření. Zdrojem čerpacího záření pro holmiem dopované vlákno (HDF) je vlákno dopované thuliem (TDF), které je čerpáno erbiem dopovaným vláknovým laserem (EDFL). Jako odrazných prvků je využito Braggovských mřížek (LRFBG, HRFBG).



Obr. 2 a) Schéma laserového uspořádání pro charakterizaci holmiových vláken
b) Závislost výstupního výkonu holmiového laseru na čerpacím výkonu a spektrum laseru

Pro nalezení optimálního složení vlákna byla připravena řada vláken, jak metodou dopováním z roztoku, tak dopováním nanočásticemi, s proměnnými obsahy dopantů – vlákna byla dopována holmiem a hliníkem v podobě oxidů. Závislost diferenciální účinnosti na obsahu dopantů lze nalézt na Obr. 3.



Obr. 3 Závislost diferenciální účinnosti laseru na obsahu Ho^{3+} a na molárním poměru Al/Ho

Závěrem lze říci, že nejlepších charakteristik bylo dosaženo s vlákny s nízkou koncentrací Ho^{3+} , do 1000 ppm, a vysokým poměrem Al/Ho. Maximální účinnost 83 % dosahuje téměř 90 % hodnoty teoretické, vyšší hodnota byla publikována zatím pouze jednou. Bylo dosaženo nízkých hodnot prahu laseru, pod 200 mW, a rekordní hodnoty fluorescenční doby života – 1,35 ms. Nebyl pozorován vliv způsobu přípravy optických vláken na sledované fluorescenční a laserové charakteristiky. Přehledný souhrn výsledků lze nalézt v publikaci M. Kamrádek et al., "Nanoparticle and Solution Doping for Efficient Holmium Fiber Lasers," *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 5, pp. 1-10, 2019. doi: 10.1109/JPHOT.2019.2940747

OD TELEKOMUNIKAČNÍCH OPTICKÝCH VLÁKEN K VLÁKNOVÝM LASERŮM ZA 40 LET

Ivan Kašík

Ústav fotoniky a elektroniky AVČR

Praha 8, Chaberská 57, 182 51, 266 773 558, kasik@ufe.cz

Obor: Vláknové lasery

Optická vlákna jsou jedním ze základních prostředků rozvoje moderní společnosti. V poslední dekádě je s nimi spjata udělení dokonce dvou Nobelových cen za fyziku. V roce 2009 Ch. K. Kaovi [1], který svůj výzkum prováděl v těsné spolupráci s E. Spitzem [2], a v roce 2018 G. Mourouovi a D. Stricklandové [3]. Laboratoř optických vláken Ústavu fotoniky a elektroniky AVČR letos slaví 40 let existence výzkumného programu optických vláken a je jediným pracovištěm v ČR vybaveným technologií přípravy křemenných optických vláken. Ta se skládá ze zařízení MCVD pro přípravu preforem (tyček), tažicího zařízení (tažičky optických vláken), rozsáhlé infrastruktury a zázemí charakterizačních přístrojů. Celý výzkum se ale samozřejmě neobejde bez široké spolupráce, zahrnující zahraniční univerzity a v ČR ústavy Akademie věd (FzÚ, ÚPT, ÚCHP, ÚEB), vysoké školy (FJFI ČVUT, FEL ČVUT, VŠCHT) a komerční subjekty (Safibra, SQS vláknová optika, Optokon, Optovit, Matex aj.).

V počátečním období osmdesátých let se výzkum soustředil především na optická vlákna pro telekomunikace. Byla vybudována první experimentální zařízení, připraveny první vzorky prakticky použitelných optických vláken typu Polymer-Clad-Silica, gradientních mnohavidových vláken a jedovídných vláken pro vlnové délky 850 nm, 1300 nm a 1550 nm. Na základě získaných zkušeností pak byla zakoupena zahraniční zařízení a na nich byly vypracovány technologie přípravy gradientních a jedovídných vláken o parametrech srovnatelných se světovou produkcí. Tyto technologie byly následně předány do výroby, která tehdy v letech 1988-1990 probíhala ve VÚSU Teplice, později Glaverbelu. Tento příkladný transfer technologií skončil likvidací provozu a prodejem všeho turecké firmě Hesfibel, kde podle sdělení servisních pracovníků výroba probíhá dodnes.

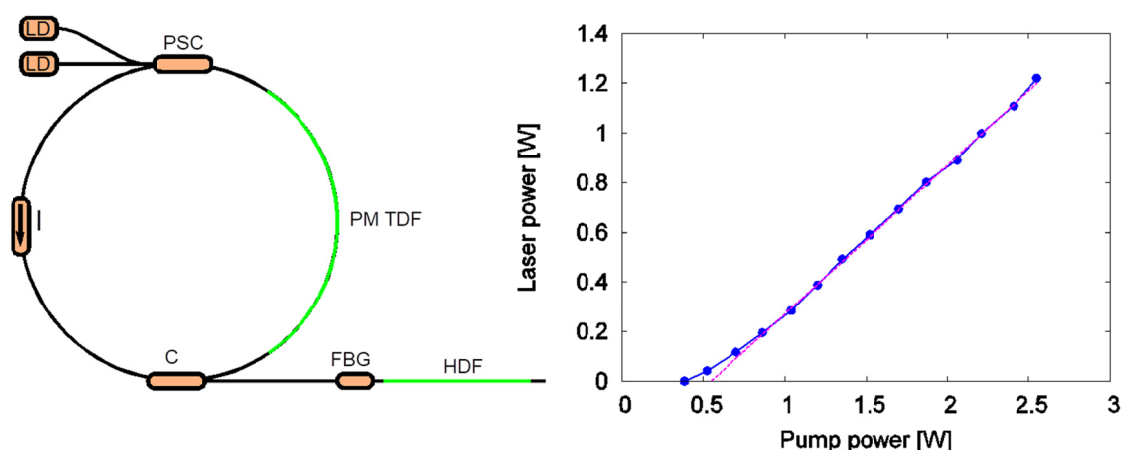
Pro české hospodářství tento ekonomický zázrak tedy nepřinesl žádný užitek, avšak počáteční vysoké investice do technologií umožnily akademickému týmu pokračovat ve výzkumu, dokonce i po zrušení samotného mateřského ústavu. Výzkum se v nových podmínkách nejprve soustředil na vláknově-optické sensory a vláknové zesilovače. Byla vyvíjena speciální optická vlákna pro sensory tlaku nebo teploty a také pro detekci chemických látek. Příkladem může být evanescentní sensor pro detekci uhlovodíků, jehož komerční implementací se zabývá firma Deno, nebo fluorescenční vláknově-optický pH-metr, jehož výrobou se dnes zabývá firma Safibra. Tento přístroj je unikátní vyvinutými vláknovými sondami o průměru 3-20 μm , což umožňuje detekci vzorků o objemu do 5 μl – tedy jednotlivých kapek případně buněk. [4, 5].

Vláknové zesilovače byly zkoumány nejprve s ohledem na optické zesilování v telekomunikacích a byla pro to použita vlákna dopovaná ionty erbia [6]. Pro jejich vznik ale bylo nutné nejprve vyvinout zcela nové technologické postupy. Získané zkušenosti pak byly zúročeny při přípravě thuliem dopovaných vláken, jejichž pomocí bylo dosaženo optického zisku v S-pásmu v oblasti okolo 1470 nm [7].

Od vláknových zesilovačů je už jen malý krok k vláknovým laserům, které v současné době procházejí obdobím bouřlivého rozvoje, přestože první erbiový vláknový laser byl demonstrován již v roce 1964 [8]. Aktuálně probíhá intenzivní výzkum zaměřený na rozšíření spektra dostupných vlnových délek, zvýšení účinnosti a výkonů. Po erbiových vláknových laserech byla pozornost zaměřena na yterbiové lasery generující záření na vlnové délce okolo 1064 nm a na thuliové nebo holmiové vláknové lasery s pracovní vlnovou délkou okolo 1900-

2100 nm. Postupně byly hledány vhodné skelné matrice pro zasazení iontů vzácných zemin do struktury skla - tak aby nedocházelo k fázové separaci materiálu a k degradaci optických vlastností vláken. Pro ytterbiové vláknové lasery se ukázal jako ideální kodopant oxid fosforečný - P_2O_5 , pro thuliové a holmiové vláknové lasery oxid hlinitý - Al_2O_3 . K získání všech těchto materiálů bylo zapotřebí soustavně rozvíjet technologické postupy i teoretické modelování [9]. Jednou z vyvinutých technologických metod je originální dopování preforem (vláken) pomocí nanočástic [10-11]. Umožňuje dosažení vyšších koncentrací dopantů v jádře vlákna, vede k prodloužení jejich fluorescenční doby života, celkově pozitivně ovlivňuje vlastnosti thuliových a holmiových vláknových laserů a usnadňuje celý postup přípravy vláken.

Z thuliem dopovaných vláken byl sestaven např. monolitický thuliový laser pracující na vlnové délce 1951 nm [12] a vláknový laser pracující na vlnové délce 2039 nm s výkonem 60 W a kvalitou svazku $M^2 \leq 1,76$, vhodný pro terapeutické zákroky. Z holmiiem dopovaných vláken byl sestaven holmiový vláknový laser (Obr. 1) vhodný pro medicínské aplikace [13-15]. Vlákná dopovaná současně thuliem a holmiem byla použita pro vývoj ASE zdroje s velmi širokou emisí 1550-2050 nm [16]. Vyvíjená optická vlákna a vláknově-optické komponenty a zdroje slouží primárně k dalšímu navazujícímu výzkumu a členům týmu bude potěšením, když se tento výzkum rozšíří i o další spolupracující subjekty.



Obr. 1 Holmiový vláknový laser s výkonem přes 1W čerpaný thuliovým vláknovým laserem

Závěrem lze konstatovat, že vynález optických vláken lze považovat za myšlenku mimořádně životaschopnou, aktuální a stále perspektivní. Výzkum v této oblasti je celosvětově prestižní záležitostí poukazující na vyspělost ekonomiky a je potěšující, že v České republice z tohoto pohledu nezaostává.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce: speciální optická vlákna

Reference

- [1] K. C. Kao, G.A. Hockham, *Proc. IEE, Part J. Optoelectronics* 113, 1151-1158, 1966.
- [2] A. Werts, *L'Onde Electrique* 46, 967-980, 1966.
- [3] D. Strickland, G. Mourou, *Opt. Commun.* 56, 219, 1985.
- [4] I. Kašík, J. Mrázek, T. Martan, M. Pospíšilová *et al.*, *Anal. Bioanal. Chem.* 398, 1883-1889, 2010.
- [5] O. Podrazký, P. Peterka, I. Kašík, S. Vytykáčová, *et al.*, *J. Biophotonics*, e201800397, 2019.
- [6] P. Peterka, J. Zavadil, *Jemná mechanika a optika*, 60, 200-203, 2015.
- [7] W. Blanc, P. Peterka, B. Faure, B. Dussardier, G. Monnom, I. Kašík *et al.*, *Proc. SPIE* 6180, 61800V, 2006.
- [8] C.J. Koester, E. Snitzer, *Appl. Opt.*, 3, 1182-1186, 1964.
- [9] P. Peterka, I. Kašík, A. Dhar, B. Dussardier, W. Blanc, *Op.Ex.* 19, 2773-2781, 2011.
- [10] O. Podrazký, I. Kašík, M. Pospíšilová, V. Matějček, *Proc. IEEE Leos Annual Meeting* 1-2, 246-247, 2007.
- [11] I. Kašík, M. Kamrádek, J. Aubrecht, P. Peterka *et al.*, *Bull. Polish Acad. Sci., Tech. Sci.*, in print
- [12] P. Peterka, P. Honzátko, M. Becker, F. Todorov *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 25, 1623-1625, 2013
- [13] J. Aubrecht, P. Peterka, P. Koška, O. Podrazký, F. Todorov, P. Honzátko, I. Kašík, *Op. Ex.*, 25, 4120, 2017.
- [14] J. Sotor, M. Pawliszewska, G. Sobon, P. Kaczmarek, A. Przewolka *et al.*, *Opt. Lett.*, 41, 2592-259, 2016.
- [15] M. Kamrádek, I. Kašík, J. Aubrecht, J. Mrázek, O. Podrazký, J. Cajzl *et al.*, *IEEE Photonics J.*, in print.
- [16] P. Honzátko, Y. Baravets, I. Kašík, O. Podrazký, *Opt. Lett.*, 39, 3650-3653, 2014.

PULSNÍ LASEROVÁ DEPOZICE S IN SITU MONITOROVÁNÍM RŮSTU VRSTEV

Martin Klečka, Richard Schuster

OptiXs, s.r.o.

Křivoklátská 37

199 00 Praha, Česká republika

klecka@optixs.cz

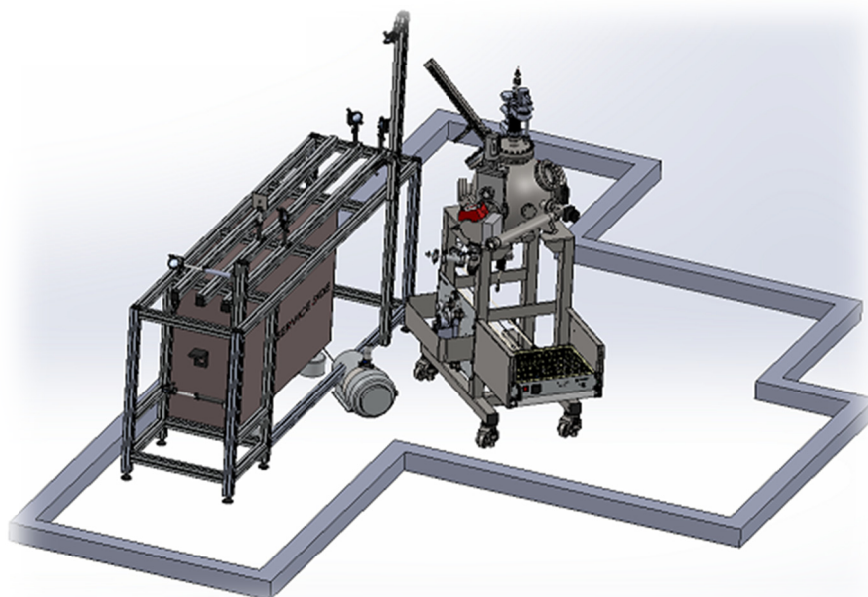
OptiXs

Obor: Pulsní laserová depozice s *in situ* monitorováním růstu vrstev

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

Rádi bychom představili jednu z metod vytváření tenkých vrstev, a to **Pulsní Laserovou Depozici (PLD)**. Zde nabízíme komplexní řešení zahrnující jak vlastní depoziční komoru s řídicím systémem, tak laserový zdroj a také přístroje pro vlastní měření růstu a kontrolu vlastností tenkých vrstev, a to jak v průběhu růstu, tak i po dokončení depozice.

Náš příspěvek je tedy zaměřen na zákaznická řešení **PLD komor** a real-time charakterizaci depozice vrstev s důrazem na ***in situ* elipsometrii** a její využití pro kontrolu tloušťky a optických vlastností vrstev přímo v průběhu jejich růstu v depozičních komorách.



Obrázek 1 Návrh PLD komory

Jako zdroje pro PLD aplikace nabízíme výkonné **excimerové lasery**, které poskytují všechny důležité požadavky pro vlastní depozici – krátkou vlnovou délku v UV oblasti (193 nm či 248 nm), vysokou hustotu energie, flat-top profil svazku a velmi dobrou stabilitu pulsu. Díky tomu lze vytvářet vrstvy z vodivých oxidů (ZnO, ITO), polovodičů (GaN), polymerů, oxidů

kovů, ochranné povlaky na bázi diamantu/uhlíku, supravodiče s vysokou teplotou, např. YBCO a další.

V oblasti měření tenkých vrstev spolupracujeme s americkým výrobcem J.A. Woollam, jenž se za 30 let svého působení stal světovou špičkou v oblasti spektroskopické elipsometrie. Díky neustálému vývoji a inovativním přístupům se portfolio spektroskopických elipsometrů J.A. Woollam neustále rozrůstá jak o úzce specializované přístroje, tak o vysoce modulární, variabilní systémy s volitelným spektrálním rozsahem. Kompletní nabídka pokrývá spektrální rozsah od 140 nm po 33 μm + THz oblast. Unikátní technologie vyvinuté J.A. Woollam jsou chráněny více než 200 patenty.

Mezi specializované přístroje patří například rychlý *in situ* elipsometr iSE pro monitorování vlastností tenkých vrstev v reálném čase během depozice. Měření růstu vrstev i multi-vrstev během samotné depozice skýtá mnohé výhody oproti klasickému *ex situ* měření.



ANALÝZA SIGNÁLU POLOVODIČOVÉHO FOTONÁSOCIČE PRO DETEKCI VELMI SLABÝCH LASEROVÝCH PULZŮ

Zdeněk Kolka, Viera Biolková, Otakar Wilfert, Michal Kubíček, Peter Barcík

Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav radioelektroniky

Technická 12, 616 00 Brno, Telefon: +420 54114 6554

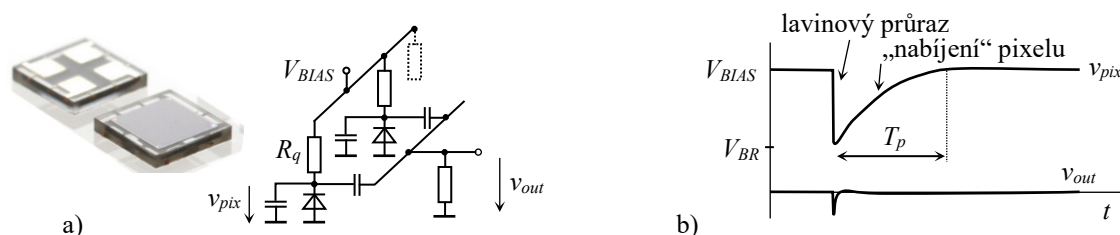
E-mail: kolka@feec.vutbr.cz

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

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

Obor: detekce slabých laserových pulzů, dálkoměry, zpracování signálu a elektronika

Polovodičový fotonásobič je relativně nový prvek pro detekci slabých optických pulzů. Jeho základem je matice lavinových fotodiod, které pracují v režimu jednofotonové detekce, tj. jejich závěrné napětí je nastaveno tak, že dopadající foton vyvolá lavinový průraz. Na obr. 1 je znázorněno principiální schéma. V sérii s každou fotodiodou je integrovaný zhášecí rezistor R_q , díky kterému dojde k následnému poklesu napětí na diodě a zániku průrazu. Pak se v intervalu řádu desítek nanosekund napětí na fotodiodě obnoví a pixel je schopen další detekce. Ve srovnání s jednoduchou lavinovou fotodiodou, která poskytuje pouze binární výstup, je odezva fotonásobiče v poměrně širokém rozsahu lineární díky sčítání impulzů z více pixelů. Další předností je poměrně nízké pracovní napětí V_{BIAS} v řádu desítek voltů, což velmi zjednodušuje konstrukci přístrojů napájených z baterie.



Obr. 1 a) Struktura a b) princip funkce polovodičového fotonásobiče.

(V_{BR} - průrazné napětí, V_{BIAS} - napájecí napětí, v_{pix} - napětí pixelu, v_{out} - výstupní napětí, T_p - doba trvání pulsu)

Ve spolupráci s průmyslovým partnerem řešíme aplikaci fotonásobiče v dálkoměru, kde detektor pracuje s nezanedbatelným zářením pozadí. Obvykle se výstupní signál fotonásobiče snímá jako proud procházející napájecí svorkou V_{BIAS} . Struktura na obr. 1 je nový typ fotonásobiče s kapacitní vazbou pixelů, který vyvinula firma SensL (nyní ON Semiconductor). Výstupní signál je odebrán na svorce v_{out} . Pro tento typ detektoru bylo nutné najít statistický model, ze kterého vyplývají fyzikální limity detekce a podmínky optimálního příjmu.

Označme impuls výstupního napětí vyvolaný průrazem jedné fotodiody jako $v_p(t)$. Ačkoli se jedná o časově neohrazený přechodný děj, uvažujme „technicky“ konečnou dobu jeho trvání T_p . Pro pulz můžeme definovat funkce plochy (q_p) a energie (e_p) jako

$$q_p(t) = \int_0^t v_p(\tau) d\tau \quad \text{a} \quad e_p(t) = \int_0^t v_p^2(\tau) d\tau \quad (1, 2)$$

Vzhledem ke kapacitní vazbě výstupu, můžeme uvažovat $q_p(T_p) \approx 0$ a celková energie jednoho pulzu bude $E_p \approx e_p(T_p)$.

Lavinové průrazy se v matici fotonásobiče objevují náhodně a můžeme je reprezentovat Poissonovským procesem, který je definován středním kmitočtem pulzů. Označme jako f_B

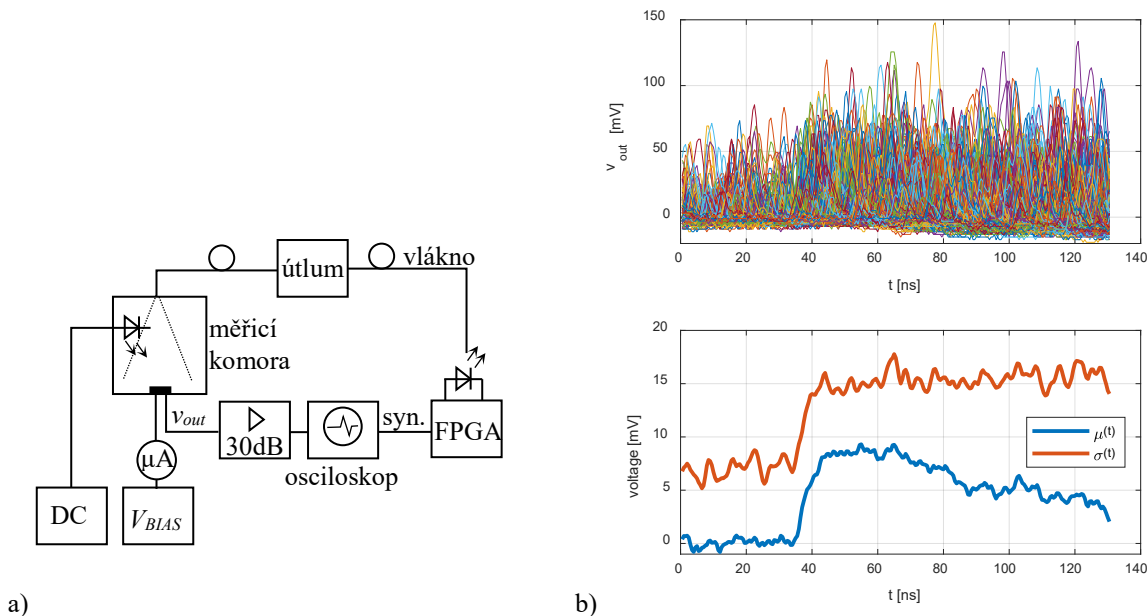
průměrnou frekvenci pulzů při ozáření aktivní plochy konstantním optickým výkonem (záření pozadí). V případě, že výstupní napětí vzorkujeme, tak získaný diskretní náhodný signál je stacionární a jeho střední hodnota μ_B a směrodatná odchylka σ_B jsou

$$\mu_B = f_B q_p (T_p) \approx 0 \text{ a } \sigma_B = \sqrt{f_B E_p} . \quad (3, 4)$$

Dopadají-li na fotonásobič periodické optické impulzy a synchronizujeme-li vzorkování s vysílačem těchto pulzů, pak je navzorkovaný diskretní signál nestacionární a pro jeho časově závislé parametry μ_R a σ_R platí

$$\mu_R(t_s) = f_P q_p(t_s) \text{ a } \sigma_R(t_s) = \sqrt{f_B E_p + f_P e_p(t_s)} , \quad (5, 6)$$

kde f_P je průměrná frekvence průrazů odpovídající špičkovému výkonu pulzů a t_s je čas od začátku dopadu fotonů pulzu na detektor. Frekvence f_B a f_P je možné stanovit na základě průměrného počtu fotonů dopadajících na detektor a známé pravděpodobnosti detekce.



Obr. 2 a) Experimentální sestava, b) výsledek měření výstupního signálu za přítomnosti záření pozadí.

Teoretické výsledky byly ověřeny pomocí sestavy na obr. 2a). Fotonásobič je umístěn v komoře, kde je pomocí vícemodového vlákna osvětlován optickým pulzním signálem buzeným obvodem FPGA, který zároveň synchronizuje osciloskop. Pomocí stejnosměrně napájené LED je simulováno záření pozadí. Na obr. 2b) je vidět 500 úseků signálu v_{out} zobrazených přes sebe, tj. 500 realizací náhodného procesu. V čase cca 35ns dopadá čelo periodických optických impulzů, které mají délku 100 ns a periodu 500 ns. Statistické vlastnosti snímaného nestacionárního signálu se mění ve shodě s modelem podle vztahů (3) - (6). Jedním ze základních závěrů je, že existuje jistá optimální délka laserového impulsu (zde cca 10ns). Při jeho dalším prodlužování již střední hodnota výstupního signálu neroste, ale zvyšuje se pouze celková energie optického pulzu, což může mít vliv např. na splnění hygienických limitů.

Popsané výzkumné aktivity jsou podpořené projektem Ministerstva vnitra VI20192022173 a dílčím projektem Centra elektronové a fotonové optiky TA ČR NCK1, č. TN01000008.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Dálkoměrné aplikace a detekce velmi slabých optických pulzů.
- Pokročilé metody zpracování signálu.
- Vývoj elektroniky, programování FPGA a mikroprocesorů.

VIZUALIZAČNÍ SYSTÉMY PRO LASEROVÉ APLIKACE

Ing. David Kuboš

“TMV SS“ spol. s r. o.

Na Podvolání 3292, 738 01 Frýdek - Místek

david.kubos@tmvss.cz +420 606 654 780

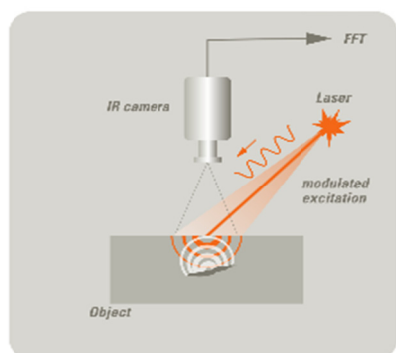
Obor: Vizualizace laserových procesů v průmyslu i R&D

Vizualizační systémy jsou obecně určeny a používány pro zobrazování dějů, událostí a procesů, které je nutné podrobit další analýze pro správné pochopení děje, příp. nastavení chodu a procesu události. V roce 1960, kdy byl představen první laser, si nikdo nedokázal představit, jak se bude tato technologie dále vyvíjet a v dnešní době již snad není jediná oblast průmyslu, vědy a výzkumu, která by laser nevyužívala. V závislosti na požadavcích se nové aplikace objevují téměř denně a rovněž vznikají sofistikovanější laserové systémy. Mnoho těchto nových systémů pracuje s velmi vysokou intenzitou laseru, což vyžaduje dokonalejší kontrolu tepelných procesů. Termografické i vizuální systémy, včetně jejich kombinací jsou pro tuto oblast vhodné díky bezkontaktnímu měření teplot, možností rychlého záznamu a zároveň poskytují potřebnou vizualizaci.

Výzkumné centra i společnosti v leteckém a automobilovém průmyslu, jakož i ve zdravotnictví si začaly uvědomovat přidanou hodnotu tzv. additive manufacturing (3D tisk) díky nižším nákladům, úsporou času, možností produkce velmi komplexních dílů, zvýšení odolnosti dílů apod. (např. v leteckém průmyslu výroba lehčích dílů bez obětování robustnosti a pevnosti). Nejdůležitějším parametrem je v tomto oboru laser, resp. výkon laseru, který přenáší energii do materiálu. Následnou tavnou lázeň je nutné detailně sledovat a analyzovat vhodnými vizualizačními prostředky. S ohledem na vlnovou délku laseru (např. YAG laser 1064nm) se využívají tzv. krátkovlnné (SWIR) kamery.

Své opodstatnění v laserových aplikacích (např. řezání laserem) nacházejí i reálné vysokorychlostní digitální videokamery, které proces zachytí se všemi detaily a v každém časovém úseku.

V oblasti postanalýzy a detekce vad přichází na řadu tzv. aktivní termografie, která jako externí zdroj může využívat i laser. Princip aktivní termografie je založen na vyhodnocení externě excitovaného tepelného toku v testovaném objektu (materiál) a jeho narušení skrytými vadami, defekty a prasklinami. Vysoce citlivé a rychlé termografické systémy, které jsou synchronizovány v celé sestavě aktivní termografie s následnou matematickou analýzou, zvyšují schopnost a spolehlivost detekce informací o vadách. Je to účinná bezkontaktní a nedestruktivní metoda pro rychlou inspekci rozlehlých oblastí testovaných objektů.



Laserová lock-in termografie LTvis



Termokamera InfraTec ImageIR 10300

MĚŘENÍ FÁZOVÉ RETARDACE V OPTOMECHANICKÝCH SOUSTAVÁCH

Jakub Lelek

Meopta – optika, s.r.o., Oddělení vývoje měřicích metod

Kabelíkova 1, Přerov, 750 02, Česká republika

T: +420 581 243 410 | M: +420 733 591 774 | Jakub.Lelek@meopta.com

www.meopta.com | www.meoptasportoptics.com | [Facebook](#)



A BETTER VIEW OF THE WORLD

Obor: Kontrola a justáž optomechanických soustav

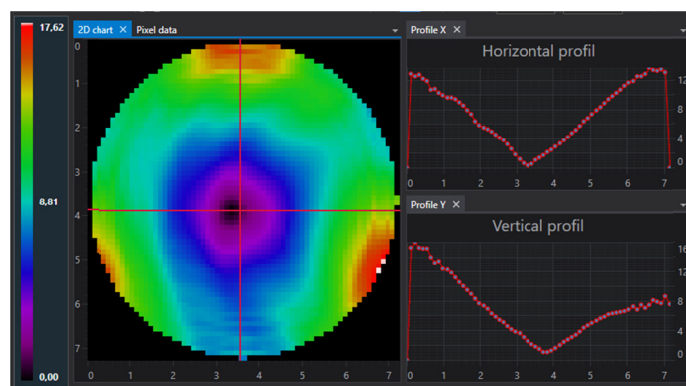
Firma Meopta - Optika, s.r.o. nabízí široké portfolium produktů, od sportovní přes vojenskou až po průmyslovou optiku. V rámci R&D poskytujeme kompletní vývoj a návrh optomechanických soustav. Součástí vývoje je porozumění požadavkům zákazníka, tvorba optického a mechanického designu (včetně provázání např. prostřednictvím FEM analýz) a návrh měřicího zázemí pro kontrolu vyvíjeného designu. To ve většině případů zahrnuje měřicí stanici včetně softwaru, která poskytuje zpětnou vazbu pro nastavení měřené soustavy. Samozřejmostí je pak výroba jak optických, tak mechanických komponent.

Vzhledem k tomu, že čím dál větší část naší produkce tvoří průmyslová optika (především optomechanické systémy využívané při výrobě a kontrole integrovaných spojů a displejů), setkáváme se s laserovými zdroji v UV oblasti. Využíváme laserové diody v oblasti vlnových délek kolem 400 nm, pevnolátkové lasery pro 266 nm, ArF excimerový laser pro 193 nm a další. Samozřejmostí je ale i široké zázemí zdrojů ve viditelné a blízké infračervené oblasti (typicky He-Ne lasery, pevnolátkové lasery nebo superkontinuální lasery). V poslední době rozšiřujeme naše zázemí i o oblasti infračervených vlnových délek, např. laserovými diodami na 2 um. Ve většině případů se zmíněné zdroje využívají v měřicích či kontrolních aplikacích - jedná se tak o zdroje se spíše nižšími výkony.

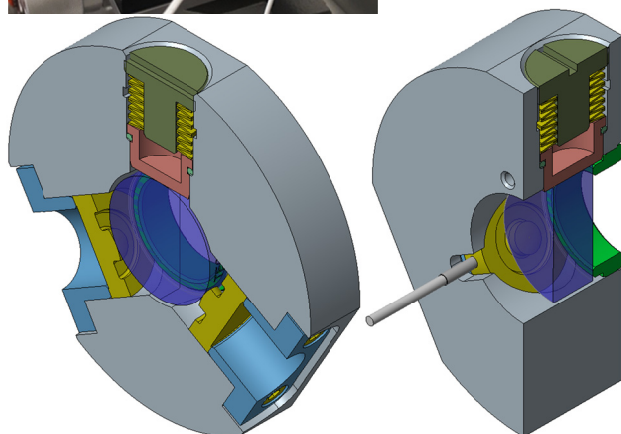
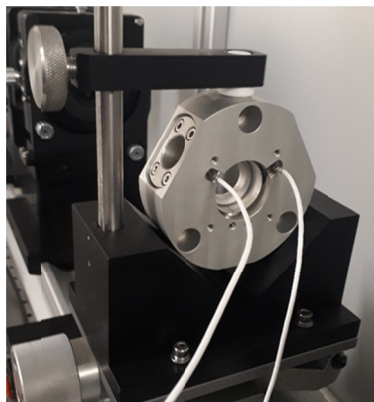
V průmyslové optice se často využívá polarizovaného světla, jakožto prostředku zkoumání kvality povrchu, resp. kontroly nečistot a především defektů na zkoumaném vzorku (typicky křemíkový wafer nebo displej). V případě optomechanických sestav fungujících v takovýchto systémech je proto jednou z klíčových vlastností minimální pnutí, které přímo souvisí se změnou polarizace průchozího světla.

Pnutí může vznikat během fixace optiky v mechanice, ať už mechanicky nebo lepidlem. Zároveň může docházet k jeho vzniku i v důsledku přesného polohování v rámci justáže optomechanické sestavy. Jednotlivé optické prvky je tak třeba fixovat minimální silou a zároveň vhodně voleným designem mechaniky.

Zbytkové pnutí ve skle vyvolává indukovanou anizotropii. Materiál se pak lokálně chová jako obecný fázový retardér, a tedy mění stav polarizace světla v závislosti na jeho orientaci vůči dopadajícímu svazku. Jedná se navíc o lokální efekt, který se napříč materiálem mění. Je tak zřejmé, že pnutí výrazně ovlivňuje polarizační stav světla, a je proto v aplikacích, kde se s polarizací světla pracuje, důležité mít ho pod kontrolou.



Obrázek 1 Příklad naměřené fázové retardace (škála je ve stupních)



Obrázek 2 Vzorek pro srovnání/vyhodnocení přesnosti metody

Metod pro vyhodnocení pnutí existuje větší množství (interferometrické, holografické,...) nicméně nejrozšířenější a jedinou i komerčně užívanou metodou vyhodnocení je polarimetrie. V naší produkci využíváme různých úrovní kontroly. Typicky se jedná o měření tzv. extinkčního poměru, který udává poměr intenzity v hlavních osách polarizace po průchodu testovanou soustavou, kde na vstupu je lineární polarizace (v zásadě je žádoucí mít tento poměr vysoký, tedy aby testovaná soustava minimálně modifikovala prošlou polarizaci). Toto je měřeno pomocí dvou lineárních polarizérů, kde první slouží k vydefinování lineární polarizace a druhý k projekci intenzity v paralelní a kolmé orientaci. Intenzita se pak měří fotodiodou. S rostoucími požadavky zákazníků přibývá měření v několika bodech apertury, popřípadě měření s využitím kamery, k zachycení celé apertury. Tyto metody se typicky využívají pro kontrolu fázové optiky (půlvlnné destičky), tenkých vrstev (zavádějící minimální fázovou retardaci) a optomechanických soustav (kontrola pnutí).

Vzhledem k neúplnosti informace při výše uvedeném měření v rámci grantového projektu TH02010264 Implementace multifyzikálních numerických analýz do procesu vývoje optomechanických soustav aktuálně vyvíjíme polarimetrické metody umožňující přímé vyhodnocení fázové retardace. Ty mohou být využity při kontrole jak volné optiky (kvůli zbytkové anizotropii v materiálu), tak i optomechanických sestav a podsestav (kvůli pnutí vzniklému lepením a mechanickým uchycením optiky). Metoda využívá kruhové polarizace na vstupu a analýzy prošlé polarizace na výstupu pomocí lineárního polarizéru. Signál je zaznamenáván na kameru.

V současné chvíli testujeme využití dvou různých zdrojů. Vzhledem ke zmíněným aplikacím v DUV oblasti používáme pevnolátkové lasery na 266 nm od firem CryLaS GmbH a Teem Photonics. Při testování ve viditelné oblasti používáme především He-Ne lasery od společnosti SIOS Meßtechnik GmbH.

Pro ověření přesnosti a opakovatelnosti metody jsme vytvořili vzorek, který v reálném čase umožňuje měřit aplikované síly na optickém prvku. Pro tento vzorek a dané síly pak provádíme FEM simulace, prostřednictvím kterých jsme schopni dopočítat rozložení fázové retardace. Zároveň bychom tento vzorek rádi využili ke srovnávacím měřením na jiných nezávislých pracovištích.

Cílem je dosáhnout měření s nepřesností $< 0,5^\circ$ fázové retardace. Porovnání by mělo probíhat na vlnové délce 633 nm. Na vzorku pozorujeme kruhovou oblast o průměru zhruba 15 mm a dosahujeme prostorového rozlišení okolo 0,22 mm. Za případnou spolupráci budeme rádi.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Kvalitativní měření optických a optomechanických soustav (interferometrie, senzory vlnoplochy, MTF, PSF,...)
- Vývoj optomechanických soustav včetně designu, výroby a kontroly

MIT – LASERY, FOTONIKA A JEMNÁ MECHANIKA

Martin Moser

MIT s.r.o.

Klánova 56, 147 00 Praha 4

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



Lasery, fotonika
a jemná mechanika

Obor: Obchodní, poradenská a servisní činnost v oblasti laserové techniky, fotoniky a jemné mechaniky

Firma MIT, s.r.o. se zabývá obchodem, poradenstvím a servisem v oblasti laserové techniky, fotoniky a jemné mechaniky. Dodáváme s následnou záruční a pozáruční podporou výrobky od největších a nejrenomovanějších světových výrobců. Náš program obsahuje:

- *Lasery téměř všech typů a velikostí pro vědecké a průmyslové aplikace*
- *Přístroje pro měření výkonu a diagnostiku svazku*
- *Zobrazovací a detekční systémy*
- *Monochromátory, solární simulátory, světelné zdroje, spektrometry, terahertzové systémy, atd.*
- *Optické stoly a antivibrační pracoviště*
- *Polohovací systémy pro polohování s přesností až několika nanometrů*
- *Optické filtry pro biologické i fyzikální laboratoře a pro průmysl*
- *Optomechanické a optické prvky*



Sestava optických stolů Newport RS2000 se systémem vyladěného tlumení vibrací. Celkové rozměry: 12,6 x 9,9 m (HiLASE)



Spojené optické stoly Newport SmartTable s elektronickým aktivním tlumením vibrací (Ústav přístrojové techniky))

OPTOVLÁKNOVÝ SENZOR MECHANICKÝCH VIBRACÍ

Vít Novotný a kol.

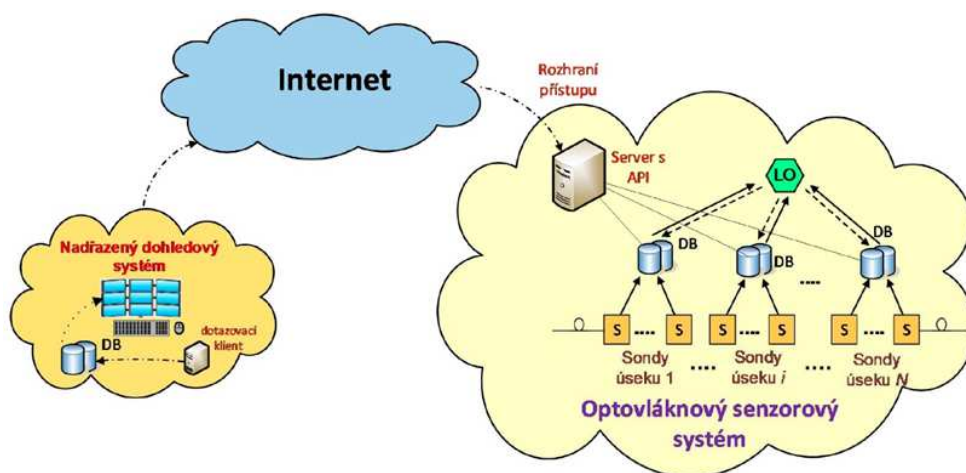
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, Ústav informatiky
Kolejní 2906/4, 612 00 Brno

Obor: optovláknové senzory

Náplní činnosti výzkumného týmu je využití laserů v oblasti optovláknové sensoriky, a to pro distribuované snímání mechanických vibrací s využitím standardního jednovidového telekomunikačního optického vlákna.

Celkový popis systému

Systém řešený v rámci výzkumného projektu představuje **prvek tzv. pasivní ochrany**, tj. zajišťuje sledování událostí, zpracování signálů jimi vygenerovaných a prezentuje zjištěné výsledky na centrálním dispečinku. Hlavním cílem a výstupem řešení projektu je vývoj hierarchického distribuovaného sensorického systému s modulární architekturou, a to ve dvou základních typech - jeden s kontinuálním **dosahem** jednotek až několika desítek km a druhý s velmi dlouhým dosahem až 250 km při použití jedné měřicí jednotky „**sondy**“ (při nasazení více snímacích jednotek i s dosahem tisíců km), umožňující **současnou vícenásobnou detekci** jevů (událostí) na jednom sledovaném úseku, a doplněný o funkci **lokalizace** s přesností na desítky metrů (v případě krátkého dosahu i jednotky metrů – nezbytná mírná modifikace stávajícího návrhu) a o funkci **identifikace** (klasifikace) zdrojů mechanických vibrací generovaných v blízkosti dohledované Systém **sleduje** (měří) **nepřetržitě** situaci v blízkém okolí podél celé trasy položení sensorického prvku – jednovidového optického vlákna. Architekturu celého hierarchického systému s možností napojení na bezpečnostní systém třetí strany (nadřazený systém) zachycuje obrázek 1.

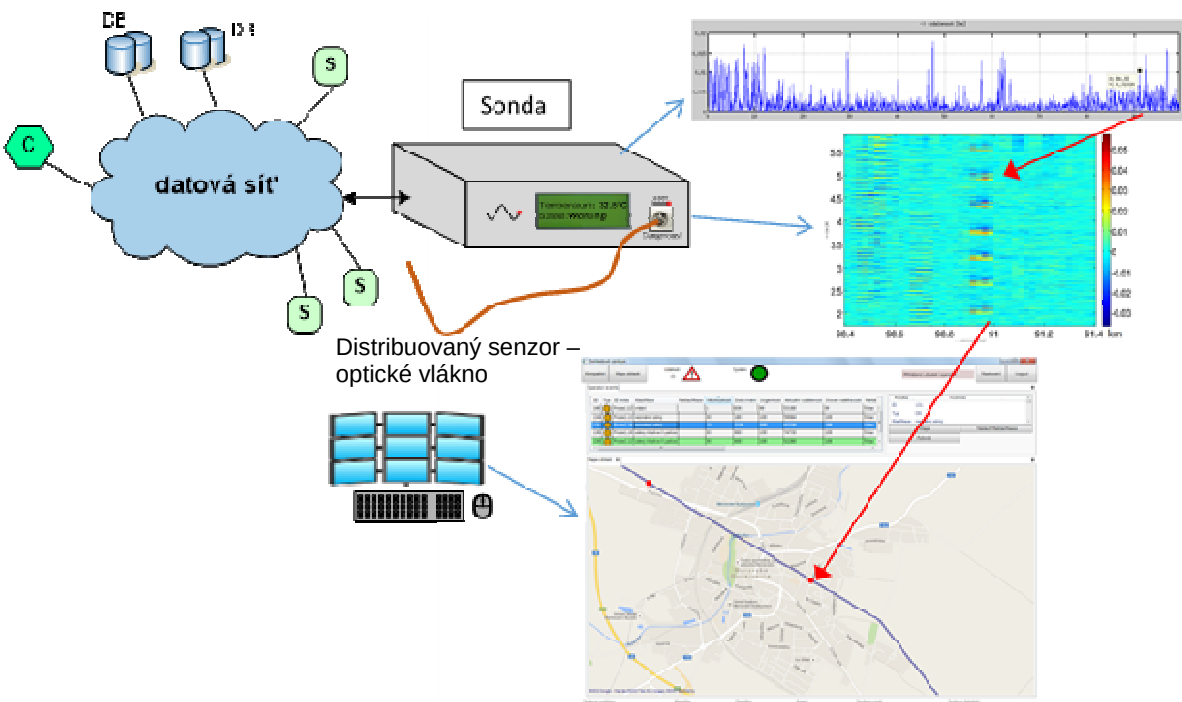


Obrázek 1: Architektura navrhovaného měřicího systému (S – sonda, DB – databáze, LO – místní obslužný systém)

Lokalizace událostí určená jako body na sensorickém prvku je pak přepočtena a přenesena na mapový podklad pro určení geografických souřadnic výskytu detekovaných jevů (událostí), viz obrázek 2.

Z hlediska technického principu měřicího systému jde o **optovláknový senzor mechanických vibrací** označovaný často zkratkou **DAS** (*Distributed Acoustic Sensor*), distribuovaně snímající jevy mechanické povahy (vibrací) v blízkém okolí senzoru –

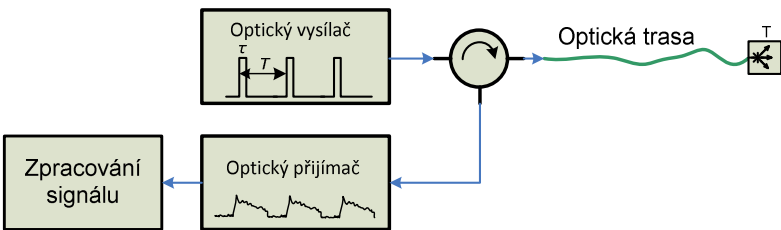
optického vlákna. Optickým vláknem prochází optický signál, jenž je při průchodu ovlivňován vnějšími jevy. Vyvíjený systém slouží k **detekci dynamických jevů** – mechanických vibrací, neslouží tedy k měření statické či dlouhodobě se vyvíjející tenze ve vlákně. Přijímací část sensorického systému tak vyhodnocuje změny v přijímaném signálu generované vibracemi mechanické povahy. Pro snímání mechanických vibrací musí být sensorické optické vlákno v dobrém akustickém kontaktu se zdrojem vibrací, tj. výsledek je do jisté míry závislý na prostředí, ve kterém se sensorické vlákno nachází.



Obrázek 2: Princip detekce a lokalizace s napojením na mapové podklady

Princip činnosti senzoru

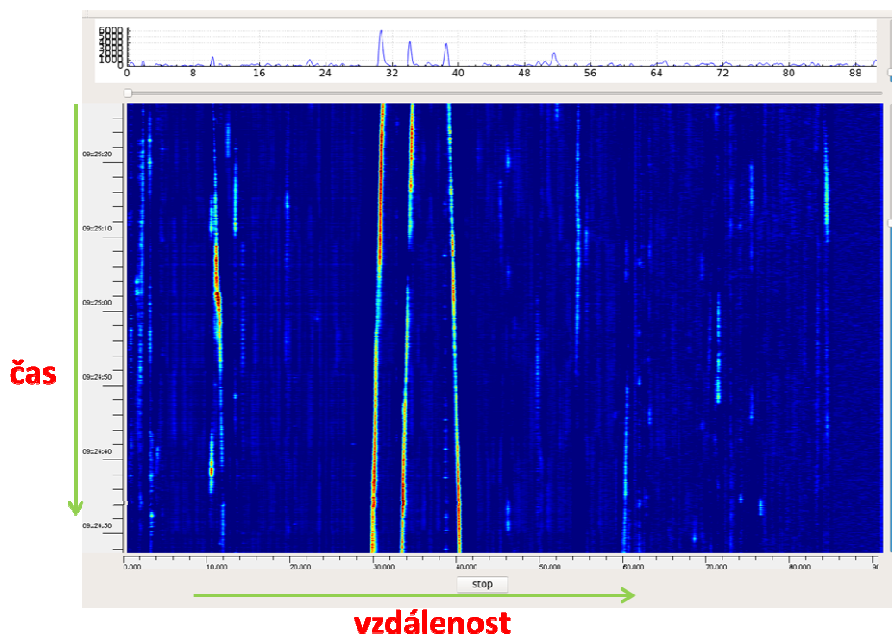
Jádrem systému je tzv. sonda sestávající z měřicího modulu a kontroléru. Princip činnosti je založen na periodickém vysílání úzkých optických pulzů a snímáním zpětně se šířícího signálu vzniklého na principu Rayleighova rozptylu a ovlivňovaného jevy v blízkosti položené sensorické trasy, viz obrázek 3, konkrétně na principu fázově citlivého OTDR.



Obrázek 3: Princip senzoru mechanických vibrací založených na Rayleighově rozptylu

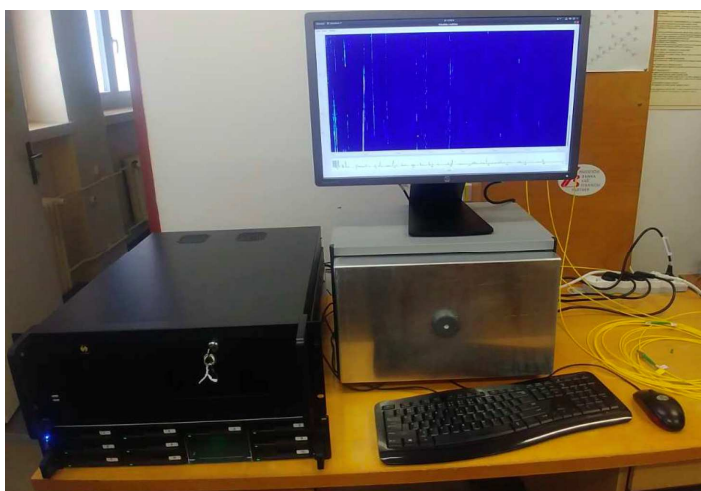
Základním prvkem systému je stabilní úzkopásmový laser, jehož signál je modulován sérií úzkých pulzů.

Na obrázek 4 je zachycena časoprostorová projekce výskytu událostí na vlákně o délce 88 km, kde barva vyjadřuje intenzitu vibrací v daný čas a v daném místě. Jedná se již o předzpracovaný signál s kompresí v čase, aby byla rychlost posunu watterfallu přiměřená.



Obrázek 4: Časoprostorová prezentace výskytu událostí, tzv. „waterfall“

Výsledkem vývoje je jednak hardware, kde hlavní část práce spočívala v návrhu, testování a konstrukci měřicího modulu, a jednak v oblasti software, kde se vyvíjelo několik modulů, a to modul pro ovládání měřicího modulu a realizaci vlastního měření, modul pro vyhodnocování naměřených dat (předzpracování, detekce, lokalizace a klasifikace) a modul místního dohledu (zobrazování a zpracování výsledků).



Obrázek 5: Funkční vzorek sondy s úložištěm naměřených dat

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Generování nanosekundových optických pulzů v C-pásmu, o výkonu stovek mW (až 30 dBm), nízkým optickým šumem ($\text{SNR} > 55 \text{ dB}$) a s $\text{ER} > 65 \text{ dB}$
- Snížení elektrického šumu optoelektrických převodníků
- Předzpracování signálu ze senzoru pomocí FPGA

Prohlášení:

Výzkumné a vývojové práce, jejichž výsledky jsou v článku prezentovány, i článek samotný byly podpořeny finančními prostředky z projektu MV ČR „Systém pro centralizovaný dohled nad komplexními a rozlehlými objekty kritické infrastruktury státu“, ID VI20172020078

VLIV TEPLoty NA SPEKTRÁLNÍ VLASTNOSTI OPTICKÝCH TENKÝCH VRSTEV V LASEROVÉ SPEKTROSKOPII S ABSORPČNÍMI KYVETAMI

Jindřich Oulehla, Pavel Pokorný, Jan Hrabina, Miroslava Holá, Ondřej Číp, Josef Lazar

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

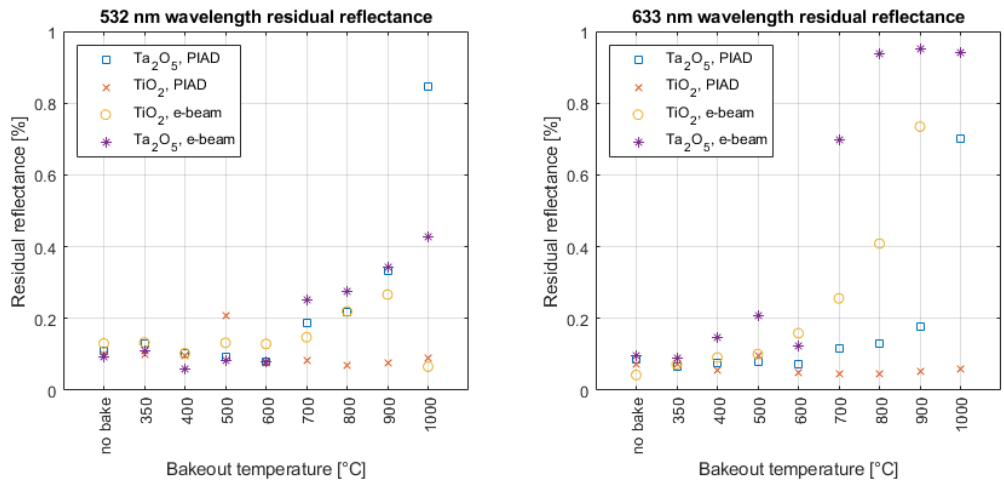
Obor: optika tenkých vrstev, laserová spektroskopie

Na Ústavu přístrojové techniky se zabýváme návrhem a depozicí optických tenkých vrstev pro různé aplikace metodou vakuového napařování elektronovým svazkem. Jsme schopni deponovat různé materiály v závislosti na aplikaci. Nejběžnější kombinací je $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, dále používáme například Ta_2O_5 , Al_2O_3 , 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.

Jednou z důležitých oblastí využití našich vrstev je výroba absorpčních kyvet využívaných pro stabilizaci laserů. Tyto kyvety jsou ve tvaru skleněných trubic plněných pracovním plynem (např. jód nebo acetylen), které jsou zakončeny okénky opatřenými antireflexními (AR) vrstvami pro minimalizaci optických ztrát při průchodu laserového svazku kyvetou. Vrstvy umístěné na vnitřní straně okének jsou jednak v kontaktu s pracovním plynem a jednak dochází k jejich částečnému ovlivnění vysokou teplotou při svařování kyvety. Toto přináší dva problémy:

1. Pronikání molekul pracovního plynu do struktury AR vrstvy mající za následek významné snížení propustnosti vrstvy
2. Teplem vyvolané posuny ve spektrální závislosti propustnosti

Následující obrázek ukazuje závislost hodnoty zbytkové odrazivosti AR vrstev na teplotě pro pracovní vlnové délky 532 nm a 633 nm. Byly porovnávány dvě kombinace napařovacích materiálů – $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ a $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ a dvě technologie – napařování elektronovým svazkem (e-beam) a napařování elektronovým svazkem za asistence iontů (PIAD).



Výše zmíněné problémy se v současné době snažíme zkoumat a řešit. Pronikání pracovního plynu do struktury vrstvy lze účinně bránit vyžháním AR vrstev před naplněním kyvety. Je však třeba volit takovou teplotu, která nemá za následek nežádoucí změny ve spektrální závislosti propustnosti.

Poděkování:

Tento výzkum je podporován projekty MŠMT: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008460, TA ČR: TG03010046 a TN01000008, Strategie AV21 a RVO: 68081731

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Návrhy systémů interferenčních vrstev
- Depozice na různé substráty dle aplikace
- Výroba kyvet plněných izotopicky čistými plyny

VÝPOČET CHODU OBECNÉHO PAPRSKU ROTAČNĚ SYMETRICKÝMI ASFÉRICKÝMI PLOCHAMI

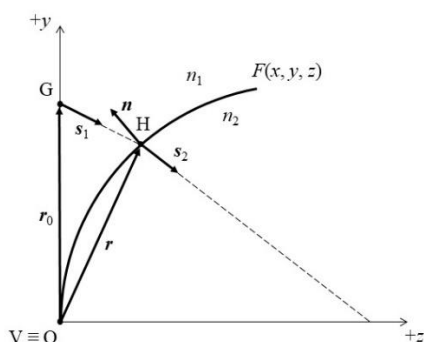
Petr Pokorný*, Filip Šmejkal, Pavel Novák, Jiří Novák, Antonín Mikš

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky

Thákurova 7, 166 29 Praha 6, *petr.pokorny@fsv.cvut.cz, aog.fsv.cvut.cz, +420224357906

Obor: asférické plochy, trasování paprsku

Práce se zabývá výpočtem chodu obecného paprsku, který prochází rotačně symetrickou asférickou plochou. Různá řešení lze nalézt např. v literatuře [1] nebo [2]. Zde je ukázán jiný postup výpočtu průsečíku paprsku a charakteristik jeho lomu, známe-li tvar asférické plochy a polohu a orientaci paprsku, který na plochu dopadá.



Obr. 1 Výpočet chodu obecného paprsku asférickou plochou

Předpokládejme situaci zobrazenou na *obr. 1*. Rotačně symetrická asférická plocha $z = f(x, y)$ nechť je ve tvaru sudé mocninné řady

$$z = \sum_{i=1}^N a_i (x^2 + y^2)^i, \quad (1)$$

kde a_i jsou asférické koeficienty, x , y a z značí kartézské souřadnice. Tvar asférické plochy můžeme popsat úpravou (1) v implicitním tvaru jako

$$F(x, y, z) = z - \sum_{i=1}^N a_i (x^2 + y^2)^i = 0. \quad (2)$$

Na *obr. 1* dále značí V vrchol asférické plochy, který je bez újmy na obecnosti totožný s počátkem soustavy souřadnic. Paprsek dopadající na asférickou plochu nechť je dán vektorem $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ – průsečíkem paprsku s rovinou (x, y) , a jednotkovým směrovým vektorem $\mathbf{s}_1 = (s_x, s_y, s_z)$. Průsečík H paprsku s asférickou plochou $F(x, y, z) = 0$ je dán polohovým vektorem $\mathbf{r} = (x, y, z)$. Dále $\mathbf{n}$ značí jednotkový normálový vektor k asférické ploše ve směru dopadajícího paprsku, $\mathbf{s}_2$ jednotkový normálový vektor lomeného paprsku, n_1 index lomu prostředí před asférickou plochou a n_2 index lomu prostředí za touto plochou.

Pro polohu průsečíku paprsku s asférickou plochou lze vektorově psát

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + t \mathbf{s}_1, \quad (3)$$

kde t je parametr, který je třeba určit. Dosazením vztahu (3) do rovnice asférické plochy (2) dostaneme pro parametr t rovnici $2N$ -tého stupně. Vyřešením této rovnice získáme hodnotu parametru t a po dosazení do vztahu (3) souřadnice průsečíku mimoběžného paprsku s asférickou plochou. Následně vypočítáme vektor normály k asférické ploše a pomocí zákona lomu určíme směr paprsku lomeného asférickou plochou.

V daném případě musí tedy parametr t splňovat rovnici

$$0 = z_0 + ts_z - \sum_{i=1}^N a_i (Kt^2 + Lt + M)^i, \quad (4)$$

kde jsme označili $K = s_x^2 + s_y^2$, $L = 2(x_0 s_x + y_0 s_y)$, $M = x_0^2 + y_0^2$. V řadě praktických aplikací postačuje, vzhledem k současným reálným možnostem výroby a kontroly asférických ploch, uvažovat rozvoj do pátého řádu. Volíme-li tedy $N = 5$, poté po úpravě dostáváme pro parametr t rovnici 10-tého stupně ve tvaru

$$\sum_{i=0}^{10} p_i t^i = 0, \quad (5)$$

kde

$$\begin{aligned} p_{10} &= K^5 a_5, \quad p_9 = 5K^4 L a_5, \quad p_8 = 5K^3 (2L^2 + KM) a_5 + K^4 a_4, \\ p_7 &= 10K^2 L (L^2 + 2KM) a_5 + 4K^3 L a_4, \\ p_6 &= 5K (2K^2 M^2 + 6KL^2 M + L^4) a_5 + 2K^2 (3L^2 + 2KM) a_4 + K^3 a_3, \\ p_5 &= L (30K^2 M^2 + 20KL^2 M + L^4) a_5 + 4KL (L^2 + 3KM) a_4 + 3K^2 L a_3, \\ p_4 &= 5M (2K^2 M^2 + 6KL^2 M + L^4) a_5 + (6K^2 M^2 + 12KL^2 M + L^4) a_4 + 3K (L^2 + KM) a_3 + K^2 a_2, \\ p_3 &= 10LM^2 (L^2 + 2KM) a_5 + 4LM (L^2 + 3KM) a_4 + L (L^2 + 6KM) a_3 + 2KL a_2, \\ p_2 &= 5M^3 (2L^2 + KM) a_5 + 2M^2 (3L^2 + 2KM) a_4 + 3M (L^2 + KM) a_3 + (L^2 + 2KM) a_2 + K a_1, \\ p_1 &= 5LM^4 a_5 + 4LM^3 a_4 + 3LM^2 a_3 + 2LM a_2 + L a_1 - s_z, \\ p_0 &= M^5 a_5 + M^4 a_4 + M^3 a_3 + M^2 a_2 + M a_1 - z_0. \end{aligned}$$

Pro jednotkový vektor $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ normály k asférické ploše ve směru dopadajícího paprsku (viz obr. 1) platí $\mathbf{n} = -\nabla F(x, y, z) / \|\nabla F(x, y, z)\|$. Po vyjádření gradientu $\nabla F(x, y, z)$ a úpravě dostáváme pro jeho jednotlivé složky vztahy

$$n_x = \frac{2 \sum_{i=1}^N a_i i x (x^2 + y^2)^{i-1}}{\|\nabla F(x, y, z)\|}, \quad n_y = \frac{2 \sum_{i=1}^N a_i i y (x^2 + y^2)^{i-1}}{\|\nabla F(x, y, z)\|}, \quad n_z = -\frac{1}{\|\nabla F(x, y, z)\|}, \quad (6)$$

$$\|\nabla F(x, y, z)\| = \sqrt{1 + 4 \left[\sum_{i=1}^N a_i i x (x^2 + y^2)^{i-1} \right]^2 + 4 \left[\sum_{i=1}^N a_i i y (x^2 + y^2)^{i-1} \right]^2}.$$

Jednotkový směrový vektor $\mathbf{s}_2$ lomeného paprsku poté získáme pomocí zákona lomu ve vektorovém tvaru dle vztahu

$$\mathbf{s}_2 = \frac{n_1}{n_2} \mathbf{s}_1 - \frac{1}{n_2} \mathbf{n} \left[\sqrt{n_2^2 - n_1^2 + n_1^2 (\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{n})^2} + n_1 (\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{n}) \right]. \quad (7)$$

Tím je problém určení parametrů paprsku po průchodu asférickou plochou řešen. Pro výpočet průsečíku paprsku s detekční rovinou dále postupujeme podle známých vztahů analytické geometrie.

Tato práce byla podpořena grantem SGS18/105/OHK1/2T/11 Českého vysokého učení technického v Praze.

Literatura: [1] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics*, Interscience, 1958. [2] D. P. Feder, "Differentiation of Ray-Tracing Equations with Respect to Construction Parameters of Rotationally Symmetric Optics," *J. Opt. Soc. Am.* **58**, 1494-1505 (1968).

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Aplikovaná optika, optická metrologie, matematické modelování v Matlabu

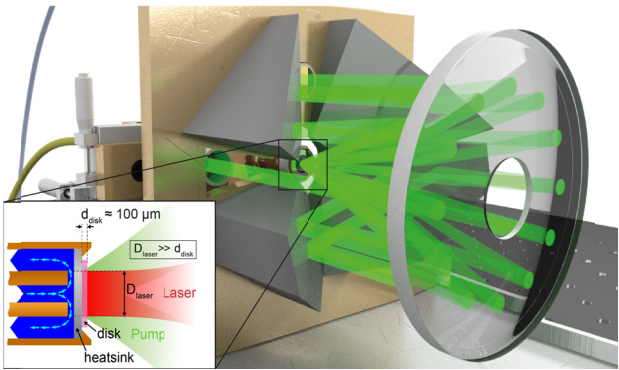
PIKOSEKUNDOVÝ TENKODISKOVÝ LASER PERLA PRO PRŮMYSLOVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ

Martin Smrž, Michal Chyla, Jiří Mužík, Hana Turčičová, Ondřej Novák, Tomáš Mocek

Centrum Hilase, Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i., Za radnicí 828, 252 41 Dolní Břežany
(martin.smrz@hilase.cz; www.hilase.cz)

Obor: vývoj pulsních pevnolátkových laserů, frekvenční konverze, laserové mikroobrábění

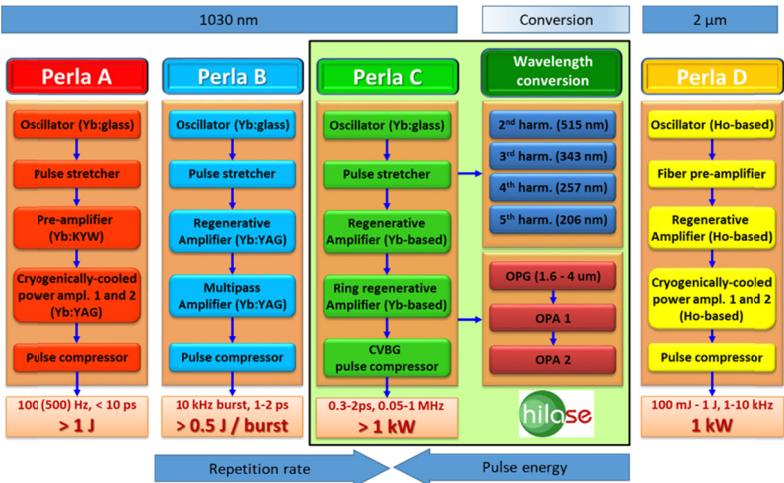
Technologie v oblasti generování pikosekundových laserových pulsů dospěla a pevnolátkové lasery obvykle založené na Yb:YAG aktivním prostředí dosahující středního výkonu $\gg 1$ kW se stávají běžným nástrojem v oblasti průmyslového vývoje a výroby. Funkcionalizace povrchů, vrtání vysoce přesných otvorů, obrábění uhlíkem vyztužených plastů, ale i generování EUV fotonů s vlnovou délkou 13,5 nm pro polovodičovou litografii, nebo rentgenových fotonů z plazmatu pro mikroskopii ve vodním okně jsou procesy těžko představitelné bez výkonných pikosekundových laserů. Centrum Hilase se zabývá vývojem tohoto typu laserů od roku 2012. Technologie je založena primárně na geometrii tenkého disku, kdy aktivní prostředí (obvykle Yb:YAG) tvoří aktivní zrcadlo tloušťky stovek mikrometrů o průměru > 10 mm, které je přes zadní stěnu povrstvenou vysoce reflexní dielektrickou vrstvou účinně chlazeno. Tenký disk (aktivní zrcadlo) je pro tyto účely spojen s vysoce tepelně vodivou podložkou, a to lepením, pájením, nebo difuzní vazbou. Podložka tvoří mechanickou podporu tenkého disku a rovněž zajišťuje axiální odvod tepla. Využití tenkého disku díky účinnému chlazení, prevenci tepelné čočky a minimalizaci nelineárních jevů (tloušťka stovek mikrometrů) je ideální pro stavbu kW laserů (obr.1).



Obrázek 1. Schéma optického systému pro buzení tenkodiskového laseru; průřez tenkodiskovým aktivním zrcadlem nalepeném na diamantovém chladiči (vlevo dole). Se svolením: Martin Saraceno martin@saraceno.info ; ulp.ethz.ch.

Aplikačně motivovaný vývoj centra sestává z vývoje tří Yb:YAG tenkodiskových systémů s vlnovou 1030 nm lišících se energií generovaného pulsu a opakovací frekvencí a systému

emitujícího na vlnové délce 2,08 μ m na bázi Ho:YAG aktivního prostředí (obr.2). Systémy Perla A a Perla B mohou být doplněny konverzí do 2. (515 nm) a 3. (343 nm) harmonické frekvence, systém Perla C navíc i 4. (257,5 nm) a 5. (206 nm) harmonické. Na systému Perla C je rovněž testován optický parametrický generátor a zesilovač laditelné od 1,5 do 3,2 μ m na bázi PPLN a KTA krystalů. Vlastní platforma Perla je založena na tenkodiskovém

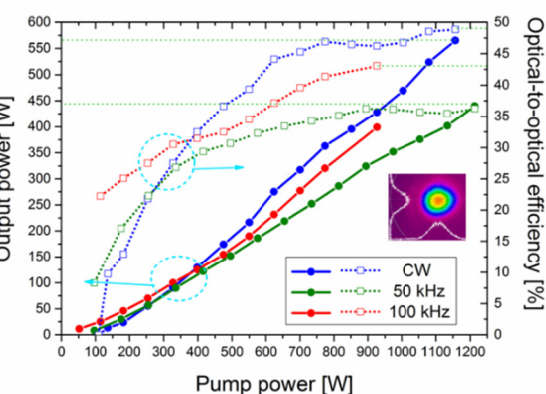


Obrázek 2. Blokové schéma laboratorních prototypů Hilase založených na tenkodiskové platformě Perla.

aktivním prostředí buzeném vláknově vázaným kontinuálním polovodičovým laserem s výkonem až 2,5 kW emitujícím v případě Yb:YAG systémů převážně na vlnové délce 969 nm. Jde tedy o přímou excitaci na horní laserovou hladinu. Vzhledem k tloušťce disku a malému zisku na jeden průchod aktivním prostředím se jeví jako neoptimálnější řešení využití regenerativních zesilovačů. V případě platformy Perla do výkonu 100 W jde o regenerativní zesilovač s rezonátorem pro stojatou vlnu, u verze do 0,5 kW pak regenerativní zesilovač s kruhovým rezonátorem, který je kratší než rezonátor se stojatou vlnou při srovnatelné velikosti módu na tenkém disku. Spínání regenerativního zesilovače zajišťuje Pockelsova cela s párem BBO krystalů, které mají v případě 500 W systému aperturu 20 mm a v půlvlnovém uspořádání ovládací napětí přibližně 9,5 kV. Navržený systém byl testován s opakovací frekvencí 50 a 100 kHz i kontinuálním režimem s velmi vysokou stabilitou a bez známek saturace do 550 W (obr.3)

Regenerativní zesilovač je provozován jako součást CPA (chirped pulse amplification) systému sestávajícího z femtosekundového vláknového oscilátoru Hilase GoPico, prodlužovače pulsů na bázi čirpovaných vláknových Braggových mřížek (CFBG), selektoru pulsů a systému vláknových předzesilovačů. Tento systém dodává do regenerativního zesilovače pulsy s energií zhruba 1 μ J a repetiční frekvencí 1 MHz.

Kompresí pulsu je pro výkony <60 W zajištěna kompaktním kompresorem na bázi čirpované objemové Braggovy mřížky (CVBG), v případě vyššího výkonu párem dielektrických difrakčních mřížek. Délka pulsu po kompresi se pohybuje od 0,9 do 1,8 ps, parametr kvality svazku M^2 dle konkrétní konfigurace od 1,15 do 1,8.



Obrázek 3. Výstupní výkon, optická účinnost a profil svazku v blízké zóně regenerativního zesilovače Perla C za různých provozních podmínek.



Obrázek 4. Fotografie komerčního pikosekundového systému Perla C se středním výkonem až 100W, femtosekundového předzesilovače (vlevo dole) a oscilátoru GoPico (vpravo dole).

Systém optimalizovaný pro střední výkon 100 W existuje i v komerční verzi (obr.4). Tato verze je schopna fungovat v průmyslovém prostředí s vysokou stabilitou, lze ji rozšířit o moduly frekvenční konverze a ve vývoji je procesní stanice pro mikroobrábění na bázi laseru Perla C. Platforma Perla může být přizpůsobena přání zájemců ve většině parametrů. Samostatně centrum Hilase nabízí komponenty pro diskové lasery, femtosekundové vláknové oscilátory a zesilovače, popř. Konstrukci pevnolátkových a vláknových laserů na přání zákazníka.

Poděkování

This paper was co-financed by the European Regional Development Fund and the state budget of the Czech Republic (project HiLASE CoE: Grant No. CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_006/0000674) and by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 739573. This work was also supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic (Programmes NPU I Project No. LO1602, Large Research Infrastructure Project No. LM2015086), and by the Czech Science Foundation (GACR) under project No. GA16-12960S.

TEPLOTNÍ GRADIENTY PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ

Hana Šebestová, Petr Horník, Libor Mrňa

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

Královopolská 147/62, 612 00 Brno – Královo Pole

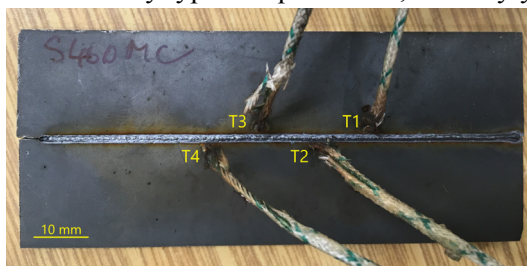
tel.: 514 541 338, e-mail: sebestova@isibrno.cz, web: www.isibrno.cz

Obor: Laserové svařování

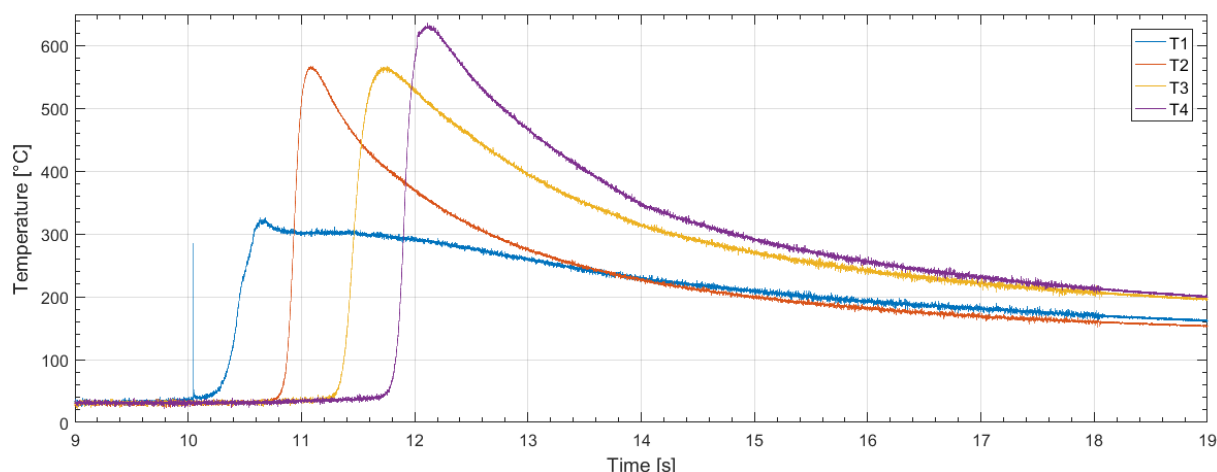
K zajištění penetračního, keyhole, módu při laserovém svařování je nutné použití svazku s plošnou hustotou výkonu vyšší než 10^6 W.cm^{-2} , což je o více než dva řády větší hodnota, než které se dosahuje při konvenčních metodách obloukového svařování. Použití takto koncentrovaného zdroje energie, navíc v kombinaci s vysokou svařovací rychlostí, má za následek rapidní nárůst teploty v místě interakce svazku se svařovaným materiálem. To vede k velmi malému objemu svarové lázně a po průchodu zdroje k prudkému poklesu teploty ve svarovém kovu i úzké tepelně ovlivněné oblasti vlivem intenzivního odvodu tepla do okolí svarového spoje.

Měření teploty během svařování je možné například pyrometricky nebo termograficky. Zde ovšem narážíme na problém často neznámé emisivity povrchů svařovaných materiálů, která je navíc funkcí teploty. V případě poměrového pyrometru, který měří intenzitu tepelného záření na dvou vlnových délkách, emisivitu určovat nemusíme. Nicméně pořizovací cena je vysoká.

Předmětem tohoto příspěvku je měření teplotních cyklů při svařování oceli S460MC o tloušťce 3 mm vláknovým laserem IPG YLS 2000 pomocí termočlánků. Termočlánky typu K o průměru 0,4 mm byly přivařeny svářečkou TP2 1 DUO podél osy plánovaného svaru ve vzdálenosti 1,5 mm od hrany svařovaných dílů, střídavě na oba svařované díly v rozestupu 10 mm (Obr. 1). Následně byl s výkonem svazku 1500 W a rychlostí 20 mm.s^{-1} proveden tupý svar a současně byla s vzorkovací frekvencí 10 kHz zaznamenávána teplota. Dosažené teplotní cykly, detekované termočlánky T1 až T4, jsou uvedeny na Obr. 2.



Obr. 1. Poloha termočlánků.



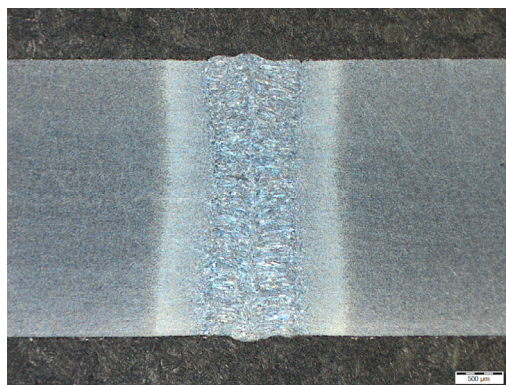
Obr. 2. Teplotní cykly zaznamenané termočlánky T1 až T4.

Termočlánek T1 byl zřejmě špatně vytvořený. Rozdíly v dosažených maximech ostatních termočlánků mohou být způsobeny nepřesným přivařením, tedy nedodržením konstantní vzdálenosti od hrany plechu. Nelze zanedbat ani vliv kvality termočlánku, kde může hrát svou roli rozdílná míra promísení kovů.

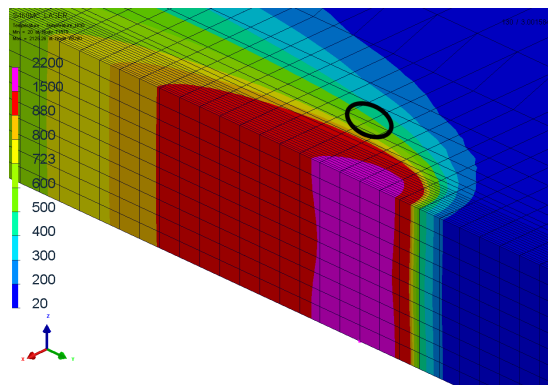
Měřená teplota nepřekročila eutektoidní teplotu, a je tedy zřejmé, že byly termočlánky umístěny v základním materiálu. To potvrzuje i metalografický výbrus příčného řezu svarem (Obr. 3), na němž byla změřena šířka svarového kovu 1,2 mm a šířka tepelně ovlivněné oblasti 2,3 mm. Pro hodnocení

teplotního gradientu v intervalu 800-500 °C bychom museli termočlánky umístit blíže k hraně svařovaných plechů.

Pro odhad tohoto gradientu byla v programu SYSWELD provedena simulace teplotních polí při svařování laserem. Rozložení teplot v podélném řezu osou svaru je uvedeno na Obr. 4.



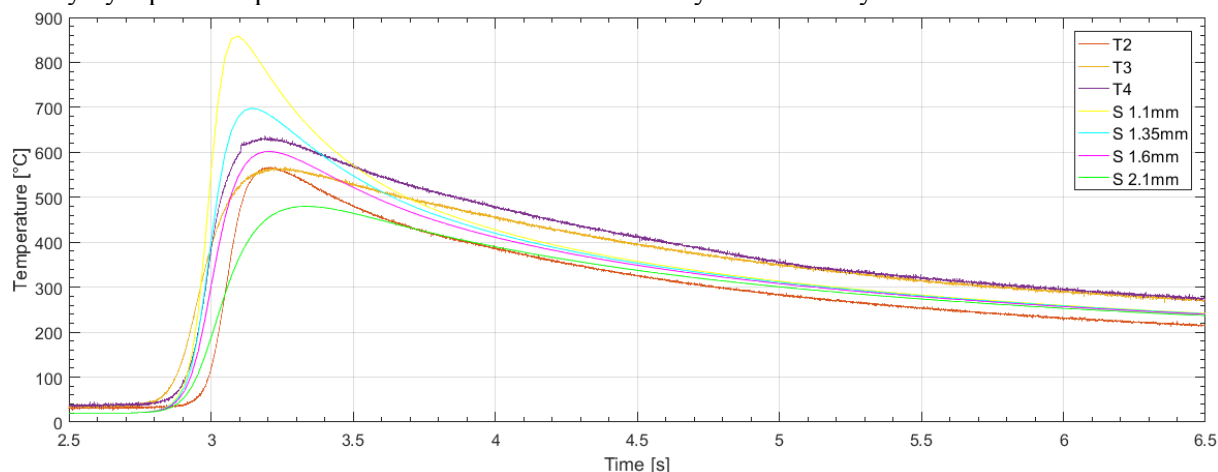
Obr. 3: Příčný řez swarem.



Obr. 4: Simulované teplotní pole v čase 3 s.

Ze simulace plyne, že tepelně ovlivněná oblast leží v intervalu 0,6-1,3 mm od osy svaru. Teplot vyšších než 800 °C se dosahuje ve vzdálenostech do 1,2 mm od osy svaru. Simulovaný teplotní gradient v intervalu 800-500 °C dosahuje přibližně -630 °C.s^{-1} ve svarovém kovu a jeho absolutní hodnota klesá s rostoucí vzdáleností od osy svaru na -550 °C.s^{-1} v blízkosti hranice tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu (1,1 mm od osy svaru).

Porovnání měřených a simulovaných teplotních cyklů je uvedeno na Obr. 5. Maximální teploty měřené termočlánky leží mezi maximy teplot vypočtenými v uzlových bodech sítě modelu vzdálených 1,1 mm a 2,1 mm od osy svaru. Tyto body přibližně vymezují kontaktní plochu termočlánku, jak je naznačeno na Obr. 4. Pouze malá část plochy termočlánku zasahuje do tepelně ovlivněné oblasti. Maximální simulovaný teplotní gradient v uzlovém bodě, který leží nejblíže středu termočlánku (1,6 mm od osy svaru) dosahuje 3400 °C.s^{-1} při ohřevu a -330 °C.s^{-1} při chladnutí, což je v dobré shodě s termočlánkem T2, kde byly zjištěny hodnoty 4000 °C.s^{-1} , resp. -350 °C.s^{-1} . Rozdílné teplotní gradienty měřené jednotlivými termočlánky jsou zapříčiněny pravděpodobně nekonzistentností termočlánků. Vzhledem k vysoké dynamičnosti procesu laserového svařování mohou i velmi malé odchylky v poloze a provedení termočlánků vést k rozdílným detekovaným hodnotám.



Obr. 5: Porovnání simulovaných (S) a měřených (T, 1,5 mm) teplotních cyklů.

Poděkování

Autoři děkují za podporu TA ČR (TG03010046-12 a TH04010366).

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Smluvní výzkum v oblasti laserového svařování a dělení materiálů
- Diagnostika laserového svařování

PŘENOS LASEROVÝCH PULZŮ SE ŠPIČKOVÝM VÝKONEM >100 MW OPTICKÝMI VLÁKNY

Ing. Jan Vanda, Ph.D.

Fyzikální ústav AV ČR, HiLASE Centrum

HiLASE Centrum

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.

Za Radnicí 828

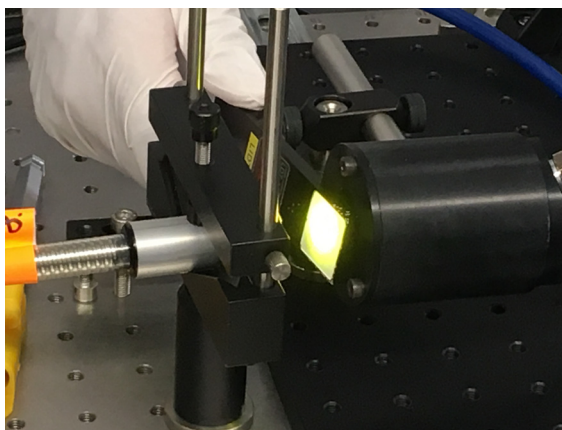
252 41 Dolní Břežany

www.hilase.cz

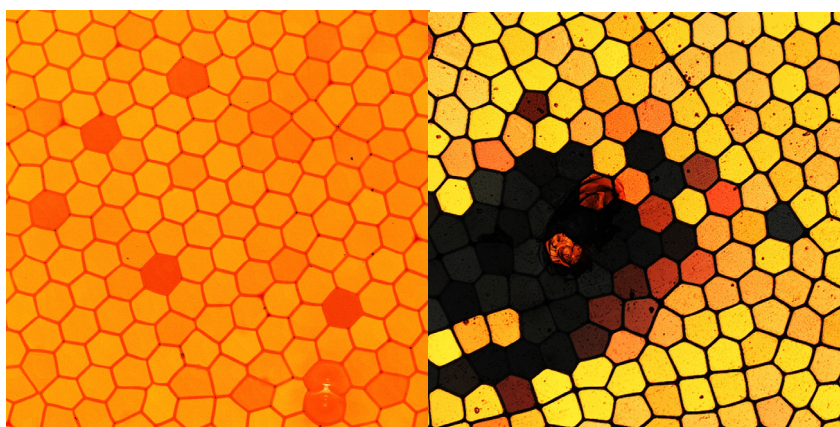
Obor: LIDT, práh poškození způsobeného laserem, pulzní lasery, optická vlákna

Transport energie z laserového zdroje k aplikaci je klíčovým faktorem pro efektivní využití laserů v aplikacích. Systémy využívající tzv. "free space" přenos laserového paprsku pomocí zrcadel vzduchem nebo pevným potrubím vyžadují obsluhu s hlubokou a odbornou znalostí laserové optiky a množství součástí zvyšuje riziko selhání sestavy. Takové systémy jsou navíc velmi obtížně integrovatelné do sériové výroby a na průmyslové roboty. Pro optimální a efektivní nasazení pulzních laserů s vysokým výkonem je nezbytné vyvinout způsob přenosu laserových paprsků, který zmíněné překážky odstraní. Pro optimální a efektivní nasazení pulzních laserů s vysokým výkonem je nezbytné vyvinout způsob přenosu laserových paprsků, který zmíněné překážky odstraní. Běžná metoda přenosu laserového paprsku, která zmíněné nedostatky odstraňuje a je nasazována v kontinuálních laserech, spočívá ve využití optického vlákna jako přenosového prostředí. Kontinuální lasery nicméně pracují s řádově nižšími špičkovými výkony (<100 kW), než lasery pulzní (>100 MW) a takové výkony jsou pro vláknovou optiku považovány za příliš vysoké. Jak ale ukazují praktické zkušenosti i výpočty, materiál optických vláken (křemenné sklo, SiO₂) je naopak schopen snést mnohem vyšší výkony bez poškození. Nespolehlivost optických vláken ve výkonných pulzních laserech je tak možné zcela přičíst vnějším vlivům, jako je nevhodné ošetření povrchu, nečistoty, inkluze atd.

Práce se samostatnými vlákny nicméně přináší další potíže, jako je například omezení maximální možné apertury vlákna, a tedy maximální energie v pulzu s ohledem na uplatnění nelineárních jevů při extrémních intenzitách; nebo naše schopnost fokusovat a kolimovat intenzitní laserové záření do velmi malé oblasti. Řešením se lze opět inspirovat v oboru kontinuálních laserových zdrojů, kde je teplotní zátěž vlákna daná vysokým středním výkonem omezena rozdělením do více vláken. Svazek takových vláken je pak jednodušší chladit a nejsou vystavena tak vysoké zátěži. Naše ukázaly, že pro situace kdy jde o prostý přenos energie a není vyžadována koherentní kombinace na výstupu vláken, lze stejně efektivně přenášet svazkem vláken i laserové pulzy o délce několika nanosekund a energii dosahující úrovně jednotek Joule. Takové laserové pulzy dosahují špičkový výkon až 100 MW a úspěšný přenos optickými vlákny výrazně zvyšuje potenciál aplikací, které je využívají, jako je například laserové zpracování povrchů nebo laserové obrábění.



Test přenosu 60 MW laserových pulzů svazkem vláken ($\lambda = 1030 \text{ nm}$; $\Delta t = 1,4 \text{ ns}$; $f = 1 \text{ kHz}$), na stínítku svítí výstupní stopa ze svazku.



Pohled na svazek optických vláken mikroskopem s 20x objektivem; vlevo: snímek nepoškozeného povrchu po 15 minutách přenosu 44 MW; vpravo: snímek povrchu po překročení prahu poškození 68 MW.

Další oblasti zájmu s nabídkou spolupráce:

- Měření prahu poškození
- Vývoj optiky pro vysokoenergetické lasery
- Vláknová optika pro pulzní lasery

ČESKÝ OPTICKÝ KLASTR

Šlechtitelů 813/21
Holice, 779 00 Olomouc
Tel.: +420 581 243 685



info@optickyklastř.cz

Český optický klastř

Český optický klastř je zřízen za účelem zlepšování podmínek pro rozvoj optického průmyslu v České republice (s důrazem na Olomoucký kraj) formou spolupráce podniků, veřejného sektoru a vzdělávacího sektoru v celém hodnotovém řetězci oboru optika, optomechanika, fotonika, optoelektronika a jemná mechanika, včetně související výroby, rozvoje technologií a služeb v dodavatelské a odběratelské sféře.

Členové Českého optického klastřu



OptiXs

www.optixs.cz



Lasery, fotonika
a jemná mechanika

www.mit-laser.cz



www.nwg.cz



Centrum pro inovace a transfer technologií



Lasery, fotonika
a jemná mechanika

OptiXs



Název: E-sborník příspěvků multioborové konference LASER59
Editor: Bohdan Růžička
Vydavatel: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.
Královopolská 147, 612 64 Brno
Vydáno v roce: 2019
Vydání: První
Náklad: -

Za obsahovou a jazykovou úpravu odpovídají autoři příspěvků.

ISBN 978-80-87441-27-5



Centrum pro inovace a transfer technologií



Lasery, fotonika
a jemná mechanika



© 2019, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

ISBN 978-80-87441-27-5