

Vláknové lasery: nový nástroj pro průmysl a medicínu

Pavel Peterka, Pavel Honzátko a Ivan Kašík

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8; peterka@ufe.cz

Optická vlákna nemusejí sloužit jen pro přenos informace. Pokud do tenkého jádra ve středu vlákna umístíme chemické prvky schopné laserové akce (stimulované emise záření), můžeme generovat velmi intenzivní a přitom kvalitní svazek záření. Vláknové lasery začínají nahrazovat starší typy laserů a otevírají zcela nové obzory v řadě oborů: od lékařství, řezání a sváření v průmyslu až po obranné systémy.

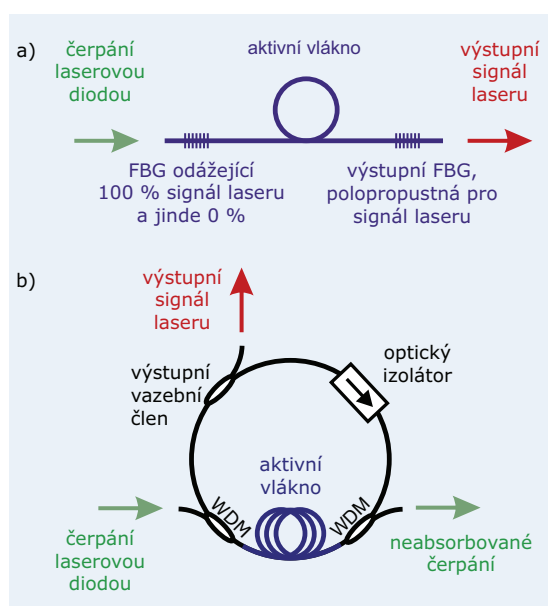
Vláknové lasery patří mezi nejmladší a nejrychleji se rozvíjející odvětví laserů. Jejich rychlý rozvoj začal až po roce 2000. Navazoval na znalosti získané při výzkumu a aplikacích erbových vláknových zesilovačů v telekomunikacích. První vláknový laser byl ovšem navržen již v roce 1960 [1], tedy v době, kdy Theodore Maiman rozzářil koherentním světlem krystal rubínu a sestavil tak první laser. Tehdy Elias Snitzer navrhl a záhy realizoval laser, ve kterém jako aktivní, zesilující prostředí použil skleněné vlákno s jádrem dopovaným neodymem. Tento vláknový laser generoval záření na vlnové délce 1,06 μm a byl čerpaný výbojkou, kolem které bylo vlákno obtočené ve spirále. Zatímco odvětví pevnolátkových laserů zaznamenávalo rychlý pokrok od dnů jejich objevu, po prvních pracích Eliase Snitzera upadly vláknové lasery v zapomnění a jsou považovány spíše za laboratorní kuriozitu. Optickým vláknům samotným však začal bouřlivý rozvoj jako bezkonkurenčnímu přenosovému médiumu

pro telekomunikace. Robert Maurer ze sklárny Corning v USA si již v 50. letech všiml, že vysoký útlum křemenného skla způsobují především příměsi a samotné křemenné sklo může mít velmi nízký útlum. Tým francouzské společnosti CSF (*Compagnie générale de télégraphie Sans Fil*) pod vedením Ericha Spitze, původem z Brna, zase vyrobil první skutečně jednomódové optické vlákno. V laboratořích CSF si dobře uvědomovali, že nejnižší známý útlum mají křemenná skla, avšak neměli pec schopnou zahřát preformu na vysokou teplotu zpracování, kolem 2 000 $^{\circ}\text{C}$, aby z ní mohli táhnout vlákno z křemenné preformy. Proto první jednomódové vlákno vyrobili z multikomponentního skla s nižší teplotou tání, které však mělo vysoký útlum. Zkušenosti a poznatky Roberta Maurera a Ericha Spitze pomohly Charlesi Kaovi v jeho výzkumu optických vláken, za který získal v roce 2009 Nobelovu cenu za fyziku. První nízkoztrátové optické vlákno se pak podařilo připravit týmu Roberta Maurera v roce 1970 [2, 3].

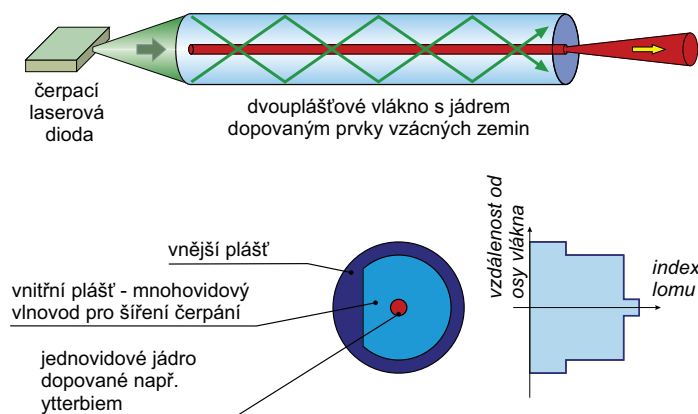
Vláknový zesilovač – klíč ke globálnímu internetu

Optická vlákna vhodná pro lasery byla znovuobjevena až v polovině osmdesátých let, kdy týmy kolem Davida N. Payna z univerzity v Southamptonu v Anglii a Francouze Emmanuela Desurvira v Bellových laboratořích v New Jersey nezávisle na sobě ukázaly, že ionty prvku vzácné zeminy erbia mohou ve vláknech vyvolat zisk na vlnové délce kolem 1 550 nm, která je využívána v komunikačních systémech. Erbiem dopovaný vláknový zesilovač (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*) umožnil výstavbu dálkových vysokokapacitních datových spojů a způsobil revoluční změny v telekomunikacích. Byl to právě vláknový zesilovač, který v polovině 90. let minulého století přispěl ke skutečně globálnímu rozvoji internetu.

Současně s výzkumem EDFA se prováděl i výzkum vláknových laserů, jejichž rozmach se ještě urychlil po splasknutí tzv. telekomunikační bubliny v roce 2001, kdy řada výrobců hledala intenzivně nové aplikace optických vláken mimo telekomunikace. Je vskutku obdivuhodné, jak jsou vláknové lasery univerzální. Některé



Obr. 1 Typická uspořádání vláknového laseru. a) Fabryův-Perotův (lineární) rezonátor, b) kruhový rezonátor.



Obr. 2. Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť.

nabízejí eleganci – široce přeladitelný výstup s úzkou šířkou čáry nebo femtosekundové pulzy. Jiné zas hrubou silu – výstupní výkon řádu stovek wattů až kilowattů z několika desítek metrů vlákna, a to bez nutnosti drahého a rozměrného vodního chlazení.

Principy vláknových laserů

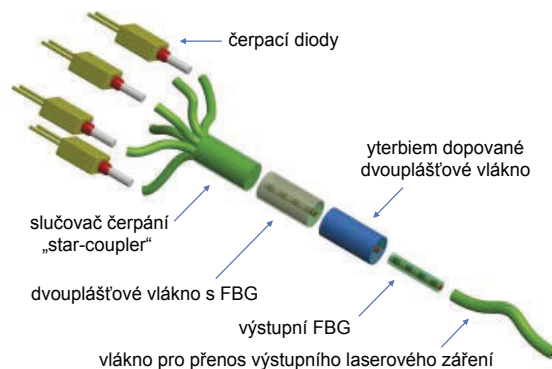
Lasery obecně jsou optické oscilátory. Skládají se z koherentního optického zesilovače, jehož výstupní signál se vrací zpětnou vazbou sfázovaný znovu na vstup. Ve specifickém případě vláknových laserů je zesilujícím médiem optické vlákno, nejčastěji optické vlákno v jádře dopované prvky vzácných zemin (např. erbiem, ytterbiem, thuliem). Systém zpětné vazby se vytváří umístěním zesilovače do optického rezonátoru. Dva typické příklady rezonátorů jsou na obr. 1. Na obr. 1a je zesilovač vložen do Fabryova-Perotova rezonátoru tvořeného zrcadly. Jedno ze zrcadel je polopropustné pro vlnovou délku signálu a vychází jím výstupní laserové záření. Zrcadla mohou být realizována několika způsoby: napařením kovové nebo dielektrické odrazivé vrstvy na kolmo zalomené čelo vlákna nebo přiložením externího zrcátka k čelům vlákna. Často užívaným řešením je také navaření vláknových braggovských mřížek (FBG – *Fiber Bragg Grating*) na místo zrcadel na vláknový zesilovač. Index lomu je periodicky modulován podél optického vlákna a je tak vytvořena jednorozměrná mřížka. Tato periodická mřížka pak bude odrazet světlo s vlnovou délkou, která je v rezonanci s mřížkovou periodou, a všechny ostatní vlnové délky bude propouštět. FBG jsou běžně používány v optických sítích jako vlnové selektivní filtry. Použití FBG pro vytvoření Fabryova-Perotova rezonátoru je jedním z mnoha příkladů, jak se v konstrukci vláknových laserů s výhodou využívá vyspělá technologie vyvinutá původně pro optické vláknové komunikace. Na obr. 1b je další typické uspořádání vláknového laseru, kdy výstup zesilovače je přiveden na vstup – vznikne kruhový rezonátor. Do kruhového rezonátoru je zařazen výstupní vazební člen pro vyvedení laserového signálu. Dále je do rezonátoru vřazen optický izolátor, který zajišťuje generaci laserového signálu jen v jednom směru a přispívá tak ke stabilitě výstupního signálu.

Pro generaci optických pulzů se u vláknových laserů používají podobné techniky jako u jiných typů laserů. Metodou spínání jakosti Q rezonátoru lze získat sled gigantických pulzů a s energií pulzů až 10 mJ, délkou pulzu řádově stovky ns a špičkovým výkonem desítky kW. Metoda módobé synchronizace vláknových laserů pak umožňuje generaci velmi krátkých optických pul-

zů v řádu stovek femtosekund. Studium pulzních vláknových laserů je jednou z tematik řešených ve skupině nelineární vláknové optiky ÚFE. Sestavili jsme femtosekundový vláknový laser, který generuje sled pulzů dlouhých 170 fs a opakovací frekvencí 40 MHz. Laser jsme použili např. pro výzkum plně optického zpracování datových toků s vysokou přenosovou rychlostí. V tomto oboru byl společný výzkumný projekt firmy SQS Vláknová optika, ÚFE a ČVUT oceněn Cenou TAČR za rok 2013 v kategorii Originalita řešení. Při výzkumu Q-spínaných laserů jsme pozorovali působivý jev samovolného rozmitání vlnové délky laseru v rozsahu téměř 10 nm a opakovací periodou kolem 2 s. Naše pozorování bylo první zmínkou o tomto jevu. Výzkum tohoto jevu je sice ještě v počátcích, v budoucnu však může najít užitečnou aplikaci např. v jednoduchém laseru s rozmitáním vlnové délky pro systémy optických vláknových senzorů. Může rovněž přispět k poznání fyzikálních příčin nežádoucích nestabilit v kontinuálních vláknových laserech nebo naopak k návrhu a sestavení výkonných a přitom konstrukčně jednoduchých Q-spínaných vláknových laserů [4].

Vysoký výkon z dvouplášťových vláken

Klíčovým krokem ke zvýšení výstupního výkonu vláknových laserů bylo využití metody čerpání aktivního prostředí přes plášť koncem osmdesátých let. Tímto způsobem lze transformovat vysoce rozbíhavý svazek z mnohamódových laserových diod s velkou vyzařovací plochou (typicky $100 \times 1 \mu\text{m}$) do kvalitního, jednomódového laserového svazku s malou divergencí. První vláknový laser čerpáný přes plášť realizoval Elias Snitzer, autor prvního vláknového laseru [5]. Samotnou myšlenku čerpání přes plášť si ovšem nechal patentovat již v sedmdesátých letech Robert Maurer. Princip laseru s dvouplášťovým aktivním vláknem je naznačen na obr. 2, uspořádání jeho komponent pak na obr. 3. Jádro vlákna je dopováno ionty prvků vzácných zemin schopnými laserového zesílení. Vnitřní plášť má pak nižší index lomu než jádro, takže jádro slouží jako vlnovod pro signál. Jádro je většinou jednomódové. Vnitřní plášť je též obklopen materiálem s nižším indexem lomu než má sám, např. polysiloxanovým polymerem nebo akrylátem. Vnitřní plášť tedy slouží také jako vlnovod, a to pro šíření čerpání. Protože vnitřní plášť má relativně velkou plochu průřezu, je možné do něj účinně navázat z čerpacích diod vysoký optický výkon. Jak se čerpací záření šíří podél vlákna, stále znovu křížuje oblast dopovaného jádra a je v něm absorbováno na iontech vzácných zemin. Excitované ionty pak mohou formou stimulované emise předat svou energii zesilovanému signálu.



Obr. 3. Komponenty pláštěm čerpáného vláknového laseru.

Problémem specifickým pro čerpání pláštěm je zajistit účinnou absorpci čerpání podél dvouplášťového vlákna. Např. v případě kruhového průřezu vlákna je selektivně absorbována část čerpání šířící se středem vlákna, tzv. meridiální paprsky, zatímco kosé (mimoosové) paprsky jádro míjejí a tlumeny nejsou. Útlum, absorpce čerpání tak není homogenní podél celého vlákna, ale po absorpci meridiálních paprsků na počátku vlákna se již čerpání šíří téměř beze ztrát. Optimální pro aplikace dvouplášťových aktivních vláken je zajistit maximální absorpci čerpání ve vláknu, tj. zajistit homogenní útlum podél celého vlákna. Toho lze dosáhnout vhodným návrhem tvaru průřezu vnitřního pláště, který zajistí tzv. chaotickou dynamiku šíření paprsků a omezuje vliv mimoosových paprsků. Příklad takového průřezu vlákna je tzv. vlákno tvaru písmene D na obr. 2. Útlum podél vlákna lze zlepšit metodami módové konverze, díky kterým energie zbývající v mimoosových paprscích je konvertována do paprsků procházejících jádrem, které mají vysokou absorpci. Příkladem takového módového konvertoru je namotání na cívku tvaru ledviny nebo nedávno námi navržený způsob namotávání zkrucovaného vlákna, viz obr. 4. Jako první jsme publikovali rigorózní teoretické vysvětlení fyzikálních příčin módové konverze v ohnutých dvouplášťových vláknech. Vysvětlení je názorně ukázáno např. na obrázku 5, na kterém je numerickým modelem vypočtené rozložení intenzity čerpacího záření v několika bodech podél vlákna s hexagonálním průřezem vnitřního pláště, namotaného a zkruceného na cívce podle obr. 4b. Ohyb vede ke stlačení pole čerpacího záření k vnějšímu okraji a tedy zvětšení poměru efektivních ploch signálového a čerpacího záření. Samotný ohyb vlákna však ještě nemusí vést k promíchávání módů. V případě ukázaném na obrázcích 4b a 5 jsou to rotující rohy hexagonu, které rozmetávají pole čerpacího záření, což vede k velmi efektivnímu promíchávání módů a výrazně vylepšené absorpci čerpání [6].

Výhody vláknových laserů

Vysoká účinnost

Notoricky známým nedostatkem většiny laserů vždy byla jejich malá účinnost – v řádu jednotek procent. Laserové diody mají účinnost celkem dostačující, dokážou konvertovat typicky 50 % (max. 70 %) elektrické energie do laserového světla. Světlo čerpací laserové diody je ve vláknových laserech konvertováno s účinností 60–70 % (přes 90 % laboratorně), takže celková účinnost komerčních vláknových laserů dosahuje až 25–35 %.

Kvalitní výstupní svazek

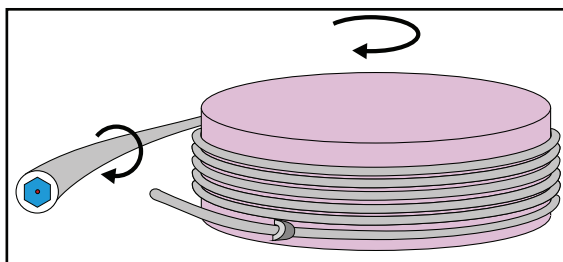
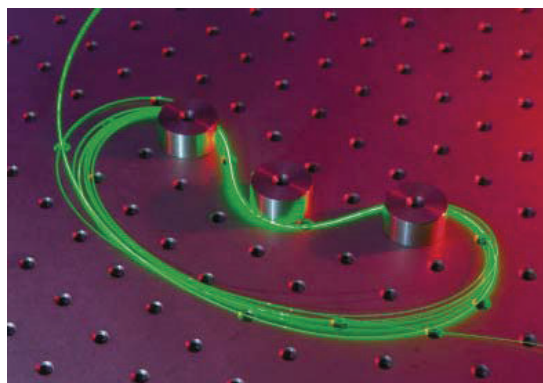
Zařízení běžných laserových diod vypouští v široce rozbíhavém a nekvalitním svazku. To často brání jeho využití v praxi. Optické vlákno pak může být tím magickým chybějícím článkem řetězu, který konvertuje nekvalitní světlo do jediného a vysoce jasného laserového svazku (viz obr. 2).

Jsou robustní a kompaktní

Jednotlivé části vláknového laseru jsou k sobě pevně spojeny kvalitním svarem, nevyžadují proto časově náročné pravidelné nastavování a servis, jsou nenáročné na obsluhu a mají dlouhou životnost, prověřenou podobnými přístroji v telekomunikacích.

Nevyžadují složité chlazení

Vláknové geometrie umožňují velmi efektivní chlazení, protože u vlákna je velký poměr plochy pláště vůči celkovému objemu. Většinou stačí chlazení vzduchem místo dříve obvyklého chlazení vodou.



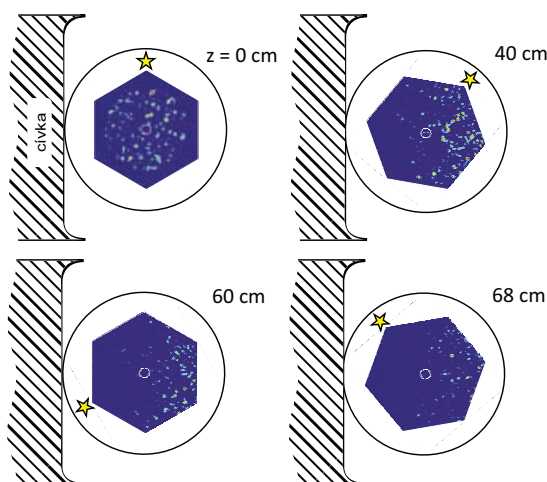
Obr. 4. Způsoby promíchávání módů speciálním navíjením vlákna: (a) cívka tvaru ledviny, (b) způsob navíjení navržený v ÚFE, kdy navíjené vlákno navíc je navíc zkruceno kolem své osy, ať při navíjení samotném nebo již dříve při tažení optického vlákna.

Dalším problémem dvouplášťových laserů a zvláště zesilovačů je navazování signálu a čerpání do aktivního vlákna. V Bellových laboratořích v USA vyvinuli elegantní metodu, využívající svařovaného vláknového vazebního členu vytvořeného z jednomódového a několika mnohamódových vláken, soustředěných okolo jednomódového signálového vlákna, tzv. *star coupler*. Podobná součástka, ovšem bez středního jednomódového vlákna, je na obr. 3. V ÚFE jsme navrhli nový způsob pro optické čerpání přes plášť a experimentálně jej ověřili pro čerpání vláknového laseru i zesilovače. Tato patentovaná metoda čerpání je založena na přímém připojení čerpacího i signálového vlákna k dvouplášťovému aktivnímu vlákně se specifickým průřezem [7].

Preciznost pro nejpřesnější měření času

Vláknové lasery dnes najdeme v řadě delikátních zařízeních. Jsou například součástí optických atomových hodin, které by měly v budoucnu zpřesnit družicové navigační systémy. Každé hodiny se skládají ze zdroje kmitání – oscilátoru (např. kyvadlo starých pendlovek) a čítače. Stávající časové normály mají jako oscilátor atomy cesia, které kmitnou 9 192 631 770krát za sekundu. Takové frekvence lze ještě počítat elektronickými čítači. Český normál času je uložen v ÚFE.

V optických atomových hodinách však kmitají elektrony na optických kmotočtech, které jsou o 5 řádů vyšší. To znamená, že kmitnou milion miliardkrát za sekundu! Na jednu stranu je to důvod, proč jsou optické hodiny potenciálně přesnější. Jak ale tyto kmity počítat? Elektronicky už to nejde. Takovým „pravítkem“ pro počítání optických kmitů je hřeben optických frekvencí, který lze vytvořit pomocí kruhového vláknového laseru generujícího velmi krátké, jen kolem 100 femtosekund dlouhé impulzy. Pro lepší představu: poměr 100 femtosekund k jedné sekundě je zhruba stejný jako poměr jednoho dne ke stáří našeho vesmíru (jeho stáří odhadujeme na 15 až 20 miliard let). Hřeben optických frekvencí je čítačem, který převede dokonale



Obr. 5. Rozložení pole čerpacího záření po průřezu dvouplášťového vlákna s hexagonálním tvarem vnitřního pláště v několika pozicích podél vlákna. Vlákno je navinuto na cívce o poloměru 3 cm a míra kroucení je 1 °/mm. Jeden konkrétní roh hexagonu je označen žlutou hvězdou. Rotující rohy hexagonu rozmetávají pole čerpacího záření, což vede k velmi efektivnímu promíchávání módů a výrazně vylepšené absorpci čerpání [6].

přesné frekvence optického oscilátoru do oblasti, kde je již umíme zpracovávat elektronicky.

Pomocník lékaře

Široké použití nacházejí vláknové lasery také v medicíně. Začínají dominovat trhu například v precizních laserových skalpelech pro operace oka. Používají se i pro operace ledvinových kamenů. Vláknové lasery jsou téměř ideálním širokospektrálním zdrojem světla pro optickou koherentní tomografii (OCT – *Optical Coherence Tomography*). Pomocí OCT můžeme sice skenovat jen několik milimetrů povrchu kůže nebo sítnice oka, ale mnohem podrobněji než rentgenová počítačová tomografie – známé „cétéčko“. Lékaři tak snáze odhalí poškození oka nebo začínající rakovinu kůže. Záření thuliových a holmiových vláknových laserů v okolí 2 μm vykazuje silnou absorpci ve vodě. To předurčuje tyto lasery pro použití v medicíně, jako jsou fragmentace ledvinových kamenů, léčba benigní hyperplazie prostaty nebo laserová angioplastika. Jednomódové, thuliem dopované vláknové lasery přinášejí v ledvinové laserové litotripsii řadu zásadních výhod oproti nyní využívaným mnohamódovým konvenčním laserům [8]. V oblasti minimálně invazivní chirurgie mohou být tyto laserové systémy použity pro precizní řezání tkáně při současném zastavení krvácení rozdělených cév. Výzkum vláknových laserů generujících záření v oblasti 2 μm je tématem projektu TAČR č. TH01010997 „Thuliové vláknové lasery pro průmyslové a medicínské aplikace“ řešeným pod vedením pracovníků ÚFE spolu s VŠCHT v Praze a firmami SQS Vláknová optika z Nové Paky a MATEX PM z Plzně. V thuliových křemenných optických vláknech se výrazně projevuje nezářivé zhašení excitovaných iontů thulia kvůli vysoké energii fononů křemenné matrice skla. Zvýšení účinnosti fluorescence je proto velmi aktuální téma výzkumu. Slibným přístupem je modifikace skleného materiálu aspoň v bezprostředním okolí iontů thulia, např. pomocí dopování keramickými nanočásticemi. Tuto metodu publikovali jako první pracovníci ÚFE v roce 2007 a je nyní rozvíjena i na řadě

jiných pracovišt [9, 10]. Zabývali jsme se rovněž metodami koherentní a spektrální kombinace svazků thuliových vláknových laserů, které umožňují zvýšit radianci thuliem dopovaných vláknových laserových systémů nad rámec možností jednotlivého laseru [11].

Hrubá síla pro vrtání a řezání betonu

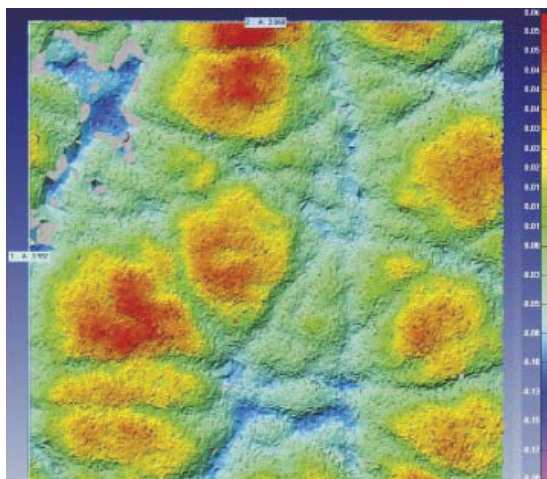
Kromě precizní práce se vláknové lasery osvědčují i jako hrubá síla. Např. výstup 100W laseru může být fokusován na průměr až 1 μm při odpovídající měrné zářivosti několika $\text{GW}/\text{cm}^2/\text{steradián}$. Hodí se k řezání a sváření v průmyslu a také ve stavebnictví. V oblastech ohrožených zemětřesením je aktuální posílit staré betonové konstrukce dalšími železnými pruty. Klasické příklepové vrtačky však celou konstrukci mohou spíše rozrušit, a proto je lepší použít laserové vrtání. Vláknový laser také dokáže s chirurgickou přesností vyříznout cestu ve zřícené železobetonové budově zničené zemětřesením. Zavalení lidé tak mohou být osvobozeni s menším nebezpečím, než kdyby se použily buldozery. Zkouší se rovněž využití vláknových laserů pro ekologickou likvidaci vysloužilých jaderných elektráren. Rozřezávaly by se jimi víc než metr silné betonové obálky jaderných reaktorů.

Nástroje pro průmysl i pro kutily

Vláknové lasery je možné použít v řadě dalších aplikací pro zpracování materiálu, jako je dekorativní rytí, značkování a popisování výrobků, děrování, trepanování nebo vrtání a tvarování vstřikovacích trysek pro benzinové a dieselové motory. S jejich pomocí lze vyrobit výrazně účinnější, lehčí a levnější magnety pro elektromotory a také lehčí a menší baterie pro elektromobily. Stávají se nepostradatelnými nástroji pro rapidně rostoucí fotonický průmysl jako je výroba fotovoltaických panelů a fólií nebo polovodičových zdrojů osvětlení. Femtosekundové vláknové lasery mohou obrábět díky nelineární absorpci i materiály, které jsou



Obr. 6. Preforma optického vlákna zasunutá do grafitové pece v nehořejší části jedné ze dvou tažících věží pro přípravu experimentálních optických vláken v ÚFE.



Obr. 7. Sken reliéfu formy, která se používá pro lisování plastových dílů interiéru automobilů. Povrch je strukturován výkonovým laserem. Laserový strukturovací systém s integrovaným skenerem byl výsledkem evropského projektu *scan4surf*, pro který ÚFE vyvíjelo širokopásmový zdroj záření s ytterbiem-dopovaným optickým vláknem. Prototyp byl vystaven na výstavě Laser – svět fotoniky v Mnichově v roce 2013. (Zdroj: Fraunhofer IPT)

jinak pro danou vlnovou délku transparentní. Jedná se navíc o změny struktury materiálu v miniaturních rozměrech zaměřené s nanometrovou přesností a bez tepelných změn okolí, proto tato technika bude ideální pro nové metody 3D mikroobrábění.

Významnou oblastí nejrůznějších aplikací na zpracování materiálu je samozřejmě i automobilový průmysl. Zde je výhodou vláknových laserů, oproti jiným typům laserů srovnatelného výkonu, především vysoká kvalita svazku umožňující např. svařování na relativně velké vzdálenosti, až jednotky metrů. Svařování pak může být rychlejší, flexibilnější a nedochází ke znečišťování laserové svařovací hlavy, která je dostatečně daleko od svaru. Dostupné jsou průmyslové ytterbiové vláknové lasery s jednomódovým výstupním svazkem a výkonem 10 kW a laserové systémy prostorově kombinující výstup několika těchto laserů a celkovým výstupním výkonem až 100 kW [12]. Vláknové lasery jsou tak v současnosti vůbec nejvýkonnější lasery na trhu.

Možná si vzpomínáte na laserovou pilku ve známém seriálu *Návštěvníci*. A na to, jak lehce s ní Vlastimil Brodský podtínal plaňkový plot. Zatím jsou laserová zařízení příliš drahá, ale s jejich potenciálem na výrazné snížení ceny a miniaturizaci mohou brzy prorazit i do oblasti hobby marketů. Překážky se dají očekávat v legislativě. Bez jakési formy „zbrojního pasu“ je asi nebude možné koupit. Taková laserová pilka nebo vrtačka totiž může být i velmi nebezpečná.

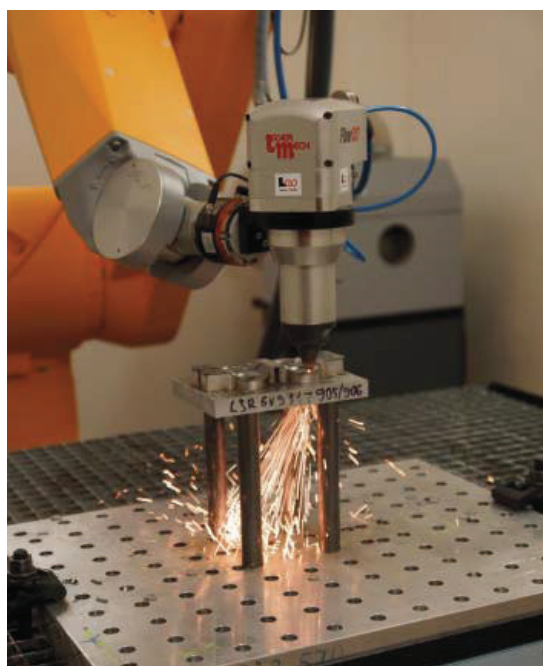
Mocná zbraň

Vysoký výkon vláknových laserů nezůstal stranou zájmu obranných aktivit. Upravené průmyslové lasery s výkonem jednotek kW až 10 kW byly doplněny sofistikovaným systémem pro rychlou korekci změn indexu lomu v atmosféře. Tímto způsobem bylo možné zajistit fokusaci svazku na vzdálenost až několika kilometrů, dostatečnou pro ničení mnohých typů cílů. Bez nadsázky lze říci, že vláknové lasery přinášejí revoluci v tzv. zbraních se směrovanou energií (*directed energy weapons*). Pro víceúčelové kolové vozidlo americké armády, známé Humvee, byl například vyvinut vláknový laser

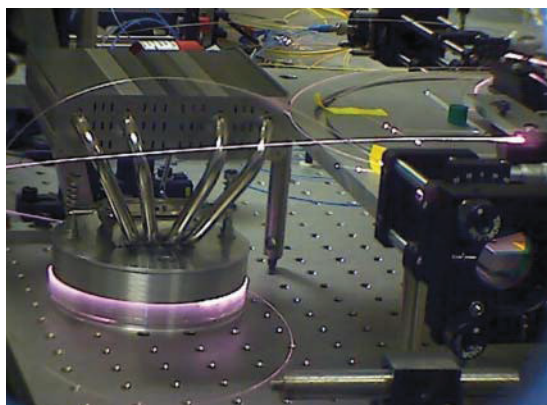
pro účinné zneškodňování min a improvizovaných výbušnin. Americké námořnictvo zase vláknovým laserem úspěšně sestřelilo bezpilotní letoun nebo zneškodnilo plavidlo používané piráty u somálských břehů. Výhodou je i nízká cena „výstřelu“ ve srovnání s jinými typy zbraňových systémů. Thuliové a holmiové vláknové lasery se zase využívají pro širokopásmové výkonové zdroje záření ve střední infračervené oblasti, které mohou sloužit v letadlech jako systém aktivní ochrany před řízenými protiletectkými raketami. Tím, že vytváří falešné cíle mimo letadlo nebo dokonce vyřadí z činnosti zaměřovací systém rakety, dojde k výbuchu rakety v bezpečné vzdálenosti od letadla. Další zvyšování výkonu pro obranné aplikace vyžaduje koherentní kombinaci svazků, ovšem tato technologie je stále v plenkách.

Vláknové urychlovače částic „do kapsy“

Koherentní kombinace svazků je rovněž základní myšlenkou pro zatím vizionářské využití vláknových laserů a zesilovačů, které chceme zmínit úplně na závěr. Jedná se o využití v laserech poháněných plazmových urychlovačích částic. V nedávném experimentu v laserovém centru BELLA v kalifornské Lawrence Berkeley National Laboratory dosáhli s tamním petawattovým laserem urychlení částic na energii 4,25 GeV v cca 10 cm dlouhé trubici s plazmatem. Oproti tradičním radiofrekvenčním lineárním nebo kruhovým urychlovačům, jakým je například známý LHC urychlovač v laboratoři CERN, je v nich dosahováno tisícinásobně větších gradientů změny energie částic. Oproti obřím, až desítky kilometrů dlouhým urychlovačům to jsou potenciálně velmi kompaktní zařízení, s nadsázkou řečeno „kapesní“ velikosti. Jejich princip je známý od konce sedmdesátých let, vyžadují však extrémně vysoké energie ultrakrátkých světelných pulzů. Zde je nutno si připomenout, že aktivní optická vlákna nejsou kvůli své geometrii s relativně malou plochou jádra nejvhodnějším zařízením pro generaci pulzů s vysokou energií, práh poškození optických vláknových vlnodůů je řádově nižší než v případě tradičních pevnolátkových laserů nebo nových typů tenkodiskových a deskových (slab) laserů. Vysoký průměrný výkon, resp. vysoká opakovací frekvence vlá-



Obr. 8. Obrábění vláknovým laserem. (Zdroj: LAO, Praha)



Obr. 9 Thuliový vláknový laser v laboratoři výkonových vláknových laserů týmu Vláknové lasery a nelineární optika ÚFE. Tento výzkum je podpořen projektem TAČR č. TH01010997 „Thuliové vláknové lasery pro průmyslové a medicínské aplikace“, řešeným pod vedením pracovníků ÚFE.

nových laserů, energetická účinnost a v neposlední řadě finanční hledisko a tedy možnost kombinace velkého počtu laserů jsou natolik lákavé faktory, že se hledají cesty, jak pro urychlovače částic využít i vláknová laserová zařízení. I když pouhé kombinování stovek tisíc vláknových zesilovačů je z technického hlediska zatím nemožné, hledají se i další cesty, jak zvýšit energii pulzu. V zásadě jde o roztažení jednoho optického pulzu v čase, v prostoru a koherentní kombinaci množství pulzů opět v prostoru a čase. Tedy o kombinaci techniky zesilování frekvenčně čerpaných pulzů (*Chirped Pulse Amplification*, CPA) a metod multiprostorové kombinace pulzů (*Multidimensional Pulse Combination*). Na začátku zesilovacího řetězce je snížena intenzita pulzu protažením délky pulzu. Impulzy jsou pak replikovány v čase, aby bylo dosaženo opakovací frekvence ~10 kHz. Sled natežených pulzů je pak rozdělen do množství vláknových zesilovačů (předpokládá se až několika set), které mají optimalizovaný průřez tak, aby příčný průřez světelné stopy byl co největší. Zvláště výhodná jsou pro tento účel fotonická krystalová vlákna se sítí podélných vzduchových otvorů. Zesílené pulzy je pak třeba koherentně složit jak v čase, tak v prostoru a složený pulz, nyní s vysokou energií, komprimovat na původní délku. Možnosti realizace vláknových laserových urychlovačů studovalo např. evropské konsorcium ICAN (*International Coherent Amplification Network*) [13]. Možná se v budoucnosti budeme setkávat s kompaktními urychlovači částic poháněnými vláknovými lasery pro zpracování radioaktivního odpadu jaderných elektráren nebo pro léčbu rakoviny protonovou terapií.

Závěr

V článku byly použity materiály z publikace Vláknové lasery, která vyšla v nakladatelství Academia v edici Věda kolem nás, řada Objevy [14, 15]; dále z popularizačního článku Vláknové lasery dobývají svět, časopis Panorama 21. století 6/2012 [16] a ze studijních materiálů semestrálního kurzu „Vláknové lasery a zesilovače“, přednášeného od r. 2007 na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Některé další výsledky aktuálního výzkumu týmu Vláknové lasery a nelineární optika mohou zájemci najít ve speciálním dvojčísle časopisu Jemná mechanika a optika 5-6/2015, které vyšlo u příležitosti Mezinárodního roku světla UNESCO a 60. výročí výzkumu světla v ÚFE [17].

Literatura

- [1] E. Snitzer: „Proposed fiber cavities for optical masers“, J. Appl. Phys. **32**, 36 (1961).
- [2] P. Peterka, V. Matějček: „Optická vlákna se dočkala Nobelovy ceny za fyziku“, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie **55**, 1 (2010).
- [3] I. Kašík, P. Peterka: „Optická vlákna – páteř moderních komunikací“, Čs. čas. fyz. **61**, 4 (2011).
- [4] P. Peterka, P. Honzátka, P. Koška, F. Todorov, J. Aubrecht, O. Podrazký, I. Kašík: „Reflectivity of transient Bragg reflection gratings in fiber laser with laser-wavelength self-sweeping“, Opt. Express **22**, 30024 (2014).
- [5] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tuminelli, B. C. McCollum: „Double-clad, offset core Nd fiber laser“, Proc. of Optical Fiber Sensors, New Orleans, USA, January 1988, s. 533.
- [6] P. Koška, P. Peterka, J. Aubrecht, O. Podrazký, F. Todorov, Y. Baravets, P. Honzátka, Ivan Kašík: „Enhanced pump absorption efficiency in coiled and twisted double-clad thulium-doped fibers“, Proc. of Advanced Solid State Lasers, Berlin, Germany, October 2015, s. ATu2A.23.
- [7] P. Peterka, I. Kasik, V. Matejcek, V. Kubecek, P. Dvoracek: „Experimental demonstration of novel end-pumping method for double-clad fiber devices“, Opt. Lett. **31**, 3240 (2006).
- [8] L. A. Hardy, Ch. R. Wilson, P. B. Irby, N. M. Fried: „Thulium fiber laser lithotripsy in an in vitro ureter model“, J. Biomed. Opt. **19**, 128001 (2014).
- [9] I. Kasik, P. Peterka, J. Mrazek, P. Honzátka: „Silica optical fibers doped with nanoparticles for fiber lasers and broadband sources“, J. Current Nanoscience **11** (2015).
- [10] I. Kašík, P. Honzátka, P. Peterka, J. Mrázek, O. Podrazký, J. Aubrecht, J. Proboštová, J. Cajzl, F. Todorov: „Speciální optická vlákna – srdce thuliových vláknových laserů a zesilovačů“, Jemná mechanika a optika **60**, 4 (2015).
- [11] P. Honzátka, Y. Baravets, F. Todorov, P. Peterka, M. Becker: „Coherently combined 20 W at 2000 nm from a pair of thulium-doped fiber lasers“, Laser Physics Letters **10**, 095104 (2013).
- [12] E. Shcherbakov, V. Fomin, A. Abramov, A. Ferin, D. Mochalov, V. P. Gapontsev: „Industrial Grade 100 kW Power CW Fiber Laser“, Proc. of Advanced Solid-State Lasers, Paris, France, October 2013, paper ATu4A.2.
- [13] G. Mourou, B. Brocklesby, T. Tajima, J. Limpert: „The future is fibre accelerators“, Nature Photonics **7**, 258 (2013).
- [14] P. Peterka, P. Honzátka a I. Kašík: Vláknové lasery. Academia, Praha 2014.
- [15] H. Turčičová: „Recenze knihy Vláknové lasery: Pavel Peterka a kol.“, Čs. čas. fyz. **64**, 346 (2014).
- [16] P. Peterka: „Vláknové lasery dobývají svět“, Panorama 21. století **6**, 16 (2012).
- [17] „60 let světla v Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR“, Jemná mechanika a optika **60**, 153–208 (2015).



Obr. 10 Díly vyříznuté z kovových desek a plechů. (Zdroj: LAO, Praha)