

vláknové lasery

úfe



AKADEMIE VĚD
ČESKÉ REPUBLIKY

věda 2

kolem
nás
objevy

Vláknové lasery - součást výzkumného programu Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., (ÚFE AV ČR, www.ufe.cz) je veřejná výzkumná instituce patřící do systému pracovišť Akademie věd České republiky, největší české neuniverzitní výzkumné organizace. ÚFE provádí základní a aplikovaný výzkum v oblasti fotoniky, optoelektroniky a elektroniky. ÚFE přispívá k rozvoji poznání v těchto oblastech a vytváří širokou bázi znalostí využitelných pro vývoj nových špičkových technologií. V oblasti fotoniky se ÚFE věnuje výzkumu a vývoji nových optických biosenzorů, výkonových vláknových laserů, generátorů koherentního záření ve střední infračervené oblasti a speciálních optických vláken. V oblasti optoelektroniky se ÚFE věnuje studiu elektronických a optických jevů na povrchu a rozhraní nanomateriálů, vyvolaných dopadem fotonů, iontů, elektronů a adsorpci atomů a molekul, za účelem jejich využití v senzorech, nových zdrojích světelného záření a pokročilých analytických metodách. Studium elektrodynamických vlastností biologických systémů a vývoj detekčních systémů pro tyto účely představují nejdůležitější výzkumné aktivity v oblasti elektroniky s přesahem do fotoniky. ÚFE rovněž provozuje a rozvíjí Laboratoř Státního etalonu času a frekvence.

ÚFE má dlouhou a úspěšnou tradici v laserové fyzice, optických vláknech i vláknových laserech. Přelomovou událostí v oboru kvantové elektroniky a laserové fyziky u nás bylo spuštění prvního kvantového generátoru záření v Československu, maseru na molekulách čpavku v laboratořích ÚFE (tehdy Ústavu radiotechniky a elektroniky, ÚRE) v březnu 1963. Lasery byly spuštěny v následujících měsících hned na čtyřech místech v Československu, z toho tři laboratoře byly v Akademii věd: ve Fyzikálním ústavu a ÚRE v Praze a v Ústavu přístrojové techniky v Brně. První nízkoztrátové optické vlákno připravili v roce 1981 rovněž v Akademii věd, v laboratoři, která je dnes součástí ÚFE. Počátek výzkumu vláknových zesilovačů a laserů v tomto ústavu sahá na přelom osmdesátých a devadesátých let 20. století.

V současnosti se výzkumem vláknových laserů zabývá tým *Vláknové lasery a nelineární optika*. Výzkumný program týmu je zaměřený na výkonové vláknové lasery a jejich využití v materiálovém průmyslu, medicíně a nelineární optice. Navazujeme na zkušenosti v oblasti optických komunikačních systémů.

Příklady projektů, na kterých se pracovníci ÚFE podílejí, uvádíme na zadních stranách obálky. Další informace mohou zájemci nalézt na www.ufe.cz a [facebook.com/ufe.avcr](https://www.facebook.com/ufe.avcr).

Cesta k vláknovému laseru

Když se dva spojí v jeden, vždy to přináší více možností. To platí i na poli moderních technologií. Co se stane, pokud spojíme laser a optické vlákno? Vznikne vláknový laser – zdroj velmi intenzivního a kvalitního svazku záření, jenž v současnosti nachází stále širší uplatnění. Vláknové lasery začínají nahrazovat starší typy laserů a otevírají i zcela nové možnosti využití v mnoha oborech od lékařství, měření času, řezání, sváření až po obranné systémy.

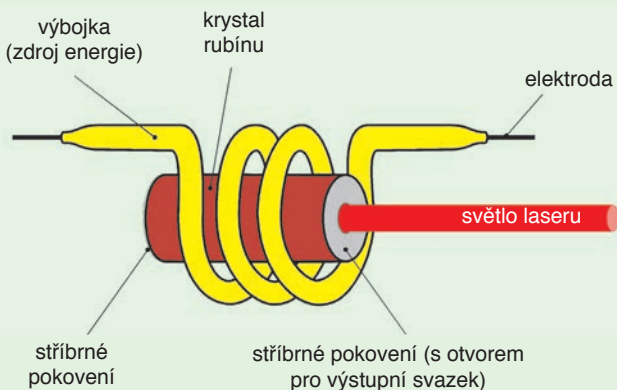
Na začátku současného rozmachu této technologie stál erbiem dopovaný vláknový zesilovač, který byl jednou z klíčových komponent umožňujících rychlý rozvoj internetu.

Vláknové lasery byly ovšem navrženy již v roce 1960, 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 byly považovány spíše za laboratorní kuriozitu. Samotná optická vlákna však čekal bouřlivý rozvoj, neboť šlo o bezkonkurenční přenosové médium pro telekomunikace.

Laser

Slovo laser je vlastně zkratkou jevu, ke kterému v laseru dochází: zesilování světla stimulovanou emisí záření (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Laser jako zařízení se skládá ze tří hlavních částí: aktivního prostředí, zdroje energie a rezonátoru. První laser svítil červeně, a to díky zesilování světla ionty chromu v krystalu rubínu. Zrcadla rezonátoru tvořila postříbřená čela rubínu a energii dodávala výbojka z fotoblesku.

Obr. 1
Schéma
konstrukce
laseru
© ÚFE



Elektrony iontů chromu nemohou mít libovolnou energii, ale mohou se nacházet pouze v určitých energetických hladinách. Proto při emisi nebo absorpci světla iontem se energie nepředává spojitě, ale po malých „kouscích“ energie – kvantech. Toto kvantum světla se nazývá foton. Pohlcením fotonu o vhodné energii přejde iont chromu z nižší energetické hladiny na některou vyšší hladinu (absorpce). Takto vybuzený (excitovaný) iont může přejít na nižší energetickou hladinu buďto samovolně (spontánní emise) nebo může být k přechodu stimulován jiným fotonem o vhodné energii (stimulovaná emise). V termodynamické rovnováze převažuje absorpce nad emisí. Aby stimulovaná emise převýšila absorpci, musíme vyvést aktivní prostředí z termodynamické rovnováhy, např. optickým čerpáním.

Optické vlákno

Jde o válec z nejméně dvou průhledných částí (jádra a pláště), které mají mírně odlišné složení materiálu, většinou křemenného skla. Válec je ohebný a velmi tenký, typicky osminu milimetru. Světlo je „zamčené“ v jádře optického vlákna díky jevu úplného vnitřního odrazu od rozhraní jádra a pláště. S jevem úplného odrazu světla se setkáte např. na koupališti – když se potopíte pod vodu a podíváte se vzhůru, uvidíte nad sebou oblohu ve světlém kruhu a okolo odraz dna (pro velké úhly dopadu dochází k úplnému odrazu). U vody ještě zůstaneme. První optické „vlákno“ vytvořil začátkem 19. století švýcarský fyzik Daniel Colladon (1802-1893), když lapil světlo do proudu vody. Colladonovy fontány slavily velký úspěch v divadlech nebo v parcích, v Anglii je proslavil John Tyndall a u nás František Křižík (1847-1941).



index lomu $n_2 < n_1$

Obr. 2 Šíření světla optickým vláknem

© ÚFE

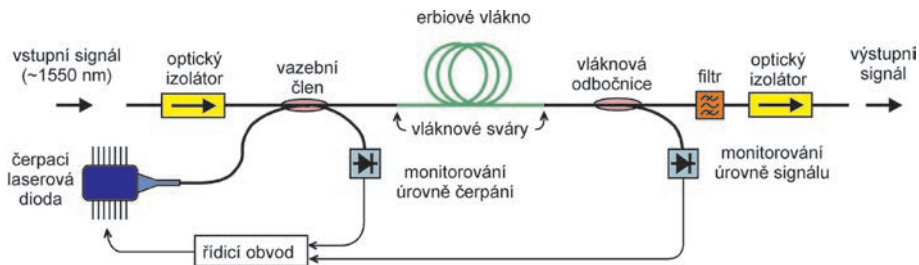
Leckdo má optická vlákna doma jako příjemnou dekoraci, která se líbí hlavně dětem. Především jsou ale optická vlákna všude kolem nás, ač je přímo nevidíme – stovky miliard kilometrů vláken jsou natažena pod silnicemi a chodníky a bez optických vláken si ani nezatelefonujeme. Použití optických vláken pro telekomunikace nebylo vždy samozřejmostí. Ještě počátkem 60. let minulého století to bylo všeobecně považováno za pošetilost. Především kvůli vysokým ztrátám světla a také proto, že v analogii s mikrovlnnými vlnovody by optické vlákno bylo nepříjemně tenké. Aby se signál šířil vlnovodem jediným způsobem, tzv. v základním módu, musel by být průměr skleněného vlákna pouhý zlomek mikrometru. Jen dvě laboratoře se tehdy zabývaly optickými vlákny pro telekomunikace.

V laboratoři francouzské firmy CSF (Compagnie générale de télégraphie Sans Fil) se inspirovali lékařskými endoskopy. Navrhli a připravili první jednomódové vlákno pro optické komunikace, které mělo už praktičtější průměr zlomku milimetru. Vysoký útlum vlákna chtěli vyřešit použitím čistého křemenného skla, neměli však k dispozici vhodnou pec na jeho tavení. Francouzský tým vedl Erich Spitz, původem z Brna. Po absolvování ČVUT byl v roce 1956 jako pracovník Výzkumného ústavu sdělovací techniky A. S. Popova pozván maďarským kolegou do Budapešti a shodou okolností se ocitl ve víru událostí maďarské revoluce. Využil neočekávané příležitosti a uprchl zpoza železné opony do svobodné části Evropy. Francouzský projekt optických vláken záhy skončil a myšlenku využít křemenné sklo jako nízkoztrátový materiál pro optické komunikace experimentálně ověřil až Charles Kuen Kao z laboratoří STL (Standard Telecommunications Laboratory) nedaleko Londýna. Kao byl v roce 2009 oceněn Nobelovou cenou za fyziku, neboť přínos optických vláknových komunikací pro lidstvo je obrovský. Po Kaoových pokusech už stačilo „pouze“ křemenné vlákno skutečně vyrobit. První prakticky použitelné křemenné optické vlákno připravil tým Roberta Maurera ve sklárnách Corning v USA v roce 1970.

Vláčkový zesilovač – klíč ke globálnímu internetu

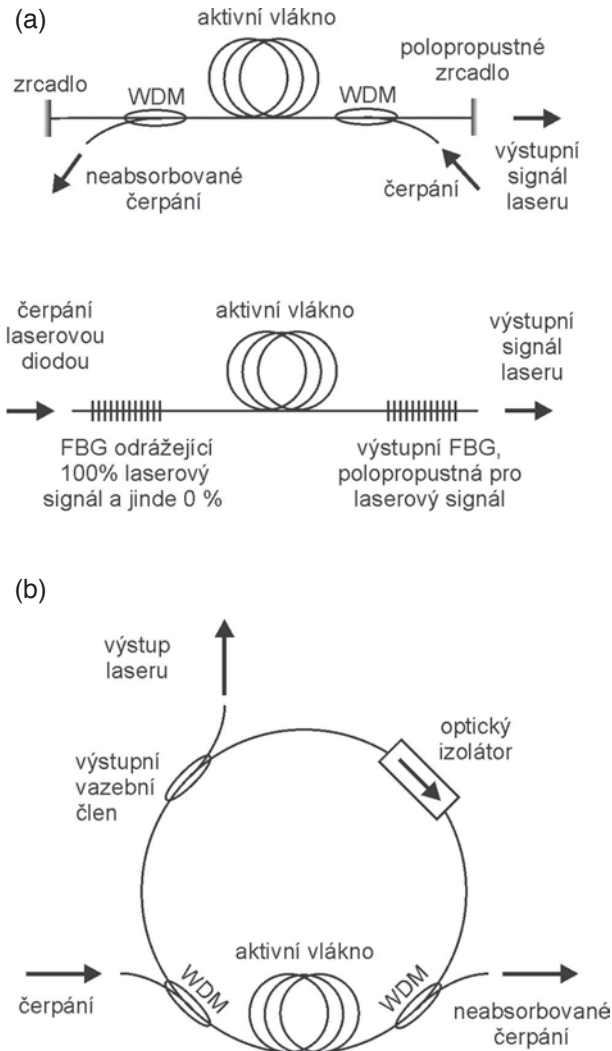
Optická vlákna vhodná pro lasery byla znovuobjevena až v polovině osmdesátých let, kdy tým kolem Davida N. Payna z univerzity v Southamptonu v Anglii ukázal, že ionty erbia (prvku vzácné zeminy) mohou ve vláknech vyvolat zisk na vlnové délce kolem 1550 nm využívané v komunikačních systémech. Erbiem dopovaný vláčkový zesilovač (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier) umožnil výstavbu dálkových vysokokapacitních datových spojů a způsobil revoluční změnu v telekomunikacích. Byl to právě vláčkový zesilovač, který v polovině 90. let minulého století umožnil skutečně globální rozvoj internetu.

Jak ve skutečnosti může vypadat takový optický zesilovač EDFA, vidíte na obrázku č. 3. Optický signál je zesilován díky iontům prvku vzácné zeminy – erbia, kterými je dopováno několik metrů dlouhé vlákno. Energii erbiovým iontům dodává laserová dioda (polovodičová součástka, v níž dochází k přeměně elektrické energie na laserové záření). Erbiové vlákno zesílí signál až 10 000×. A k čemu přesně zesilovače v optických komunikacích slouží? K regeneraci signálu, který byl v optickém vláknu v důsledku absorpce a rozptylu světla do určité míry utlumen.



Obr. 3 Schéma vláčkového zesilovače EDFA

Zesilovače se vkládají do dálkových přenosových tras zhruba po 70 až 100 km optického kabelu. V sítích kabelové televize jsou instalovány jako výkonové zesilovače zdroje signálu, který je následně rozvětven do mnoha optických kabelů vedoucích k jednotlivým objektům. EDFA otevřel nové možnosti pro transparentní optické sítě s vlnovým multiplexem (WDM – Wavelength Division Multiplexing) a pro přenos dat prostřednictvím optických solitonů.



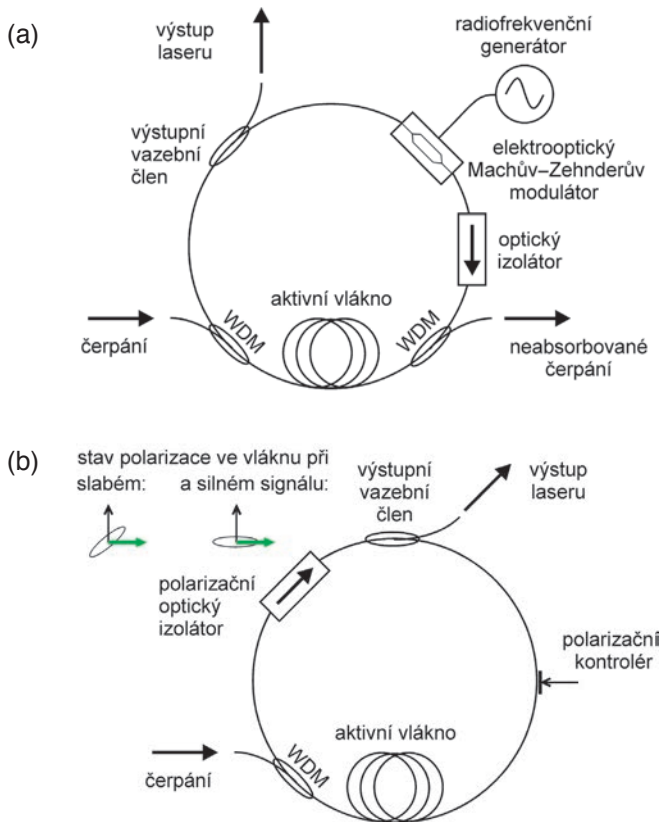
Obr. 4 Typická uspořádání vláknového laseru. (a) Fabryův-Perotův (lineární) rezonátor, (b) kruhový rezonátor (WDM – vlnově selektivní vazební člen, vlnový multiplexer, FBG – vláknová braggovská mřížka)

Současně s výzkumem EDFA se prováděl i výzkum vláknových laserů, jehož rozmach se ještě urychlil po splasknutí tzv. telekomunikační bubliny v roce 2001, kdy řada výrobců intenzivně hledala nové aplikace optických vláken mimo telekomunikace. Je vsukutku obdivuhodné, jak jsou vláknové lasery univerzální. Některé nabízejí eleganci – široce přeladitelný výstup s úzkou šířkou čáry nebo femtosekundové pulzy. Jiné zas nabízejí hrubou sílu – výstupní výkon řádu stovek wattů až kilowatů z několika desítek metrů vlákna, a to bez nutnosti drahého a rozměrného vodního chlazení.

Kontinuální vláknové lasery

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. 4. Na obr. 4a 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 užívané řešení je také navaření vláknových braggovských mřížek (FBG – Fiber Bragg Grating) na místo zrcadel na vláknový zesilovač. FBG se vyrábí nejčastěji ozářením optického vlákna externím ultrafialovým laserem přes fázovou masku, např. mikroskopickou mřížku vyleptanou v křemenné podložce. Výsledný interferenční obrazec vysokovýkonového ultrafialového záření vytvoří podél osvětleného vlákna periodickou modulaci indexu lomu tím, že přeruší některé molekulární vazby v germaniem dopovaném křemenném skle jádra optického vlákna. Tato periodická mřížka pak bude odrážet 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 vlnově selektivní filtry. Použití FBG pro vytvoření Fabryova–Perotova rezonátoru je jedním z mnoha příkladů, jak se v konstrukci vláknových laserů výhodně využívá vyspělá technologie vyvinutá původně pro optické vláknové komunikace. Na obr. 4b je další typické uspořádání vláknového laseru, kdy výstup zesilovače je přiveden na vstup a vnikne kruhový rezonátor. Do kruhového rezonátoru je zařazen výstupní vazební člen pro vyvedení laserového signálu. Dále je do rezonátoru vřazen optický izolátor, který zajišťuje generování laserového signálu jen v jednom směru a přispívá tak ke stabilitě výstupního signálu.

Vzhledem k vynikající kompatibilitě se standardními telekomunikačními optickými vlákny jsou vláknové lasery využívány v komunikacích. Velmi krátké vláknové lasery s distribuovanou zpětnou vazbou jsou praktickými a kompaktními zdroji jednofrekvenčních laserů podporujících šíření jediného podélného módu, mají tedy velmi úzkou spektrální čáru, užší než 10 kHz. Tyto lasery jsou vhodné pro použití v optických interferenčních senzorech a v koherentních optických komunikačních systémech.



Obr. 5 Příklady uspořádání pulzního vláknového laseru s aktivní (a) a pasivní (b) módovou synchronizací; osa propustnosti polarizačního izolátoru je naznačena zeleně © UFE

Pulzní vláknové lasery

Do spektrálního pásma zesílení erbia (šířka čáry přechodu Er^{3+} je cca 30 nm, resp. 4 THz), se vejdou řádově stovky tisíc tzv. podélných módů. Podélné módy obvykle oscilují nezávisle na sobě, v tzv. režimu volně oscilujících módů. Existují však metody, kterými lze dosáhnout vzájemného svázání a sfázování módů, tzv. módové synchronizace. Na jednotlivé módy se potom můžeme dívat jako na složky Fourierova rozvoje periodické funkce s periodou $T = 1/\Delta\nu$, která je rovna době jednoho oběhu světelné vlny rezonátorem. Např. frekvenční vzdálenost sousedních podélných módů 10 m dlouhého kruhového rezonátoru je $\Delta\nu = 20$ MHz. Tato periodická funkce představuje sled optických pulzů. Časová šířka pulzů je nepřímo úměrná počtu podélných módů, a tedy i šířce pásma přechodu. Ustavení režimu synchronizace módů lze dosáhnout vložením optické závěrky, která se periodicky otvírá s periodou T , do laserové dutiny. Optickou závěrku lze ovládat externím frekvenčním generátorem, mluvíme pak o aktivní módové synchronizaci. Na obr. 5a je optickou závěrkou Ma-

chův–Zehnderův amplitudový modulátor vytvořený v krystalu niobičnanu lithného (LiNbO_3), což je prvek integrované optiky. Lze také použít pasivní závěrku tvořenou saturovatelným absorbujičím prostředím, pak mluvíme o pasivní módové synchronizaci. Takovou závěrkou může být např. polarizátor v kombinaci s nelineárním natáčením polarizace v optickém vlákně tvořícím rezonátor, jak je ukázáno na obr. 5b (funkci polarizátoru zde plní polarizační optický izolátor). Pro činnost této závěrky je podstatné nelineární šíření světla ve vlákně. Světlo se šíří jádrem vlákna o průměru 8 μm . Při výkonech kolem 1 W převyšuje průměrná intenzita světla v jádře vlákna intenzitu světla na povrchu Slunce a špičková intenzita v pulzech může být ještě řádově vyšší. Přitom se projevuje optický Kerrův jev, neboli závislost indexu lomu skla vlákna na intenzitě světla. Tato změna indexu lomu, která je různá v různých částech pulzu, významně ovlivňuje změny tvaru a polarizace pulzu při šíření. Polarizačním kontrolérem (viz obr. 5b) nastavíme polarizaci světelné vlny tak, že při slabém signálu je její polarizace zkrřížená k ose propustnosti polarizátoru, ale při silné intenzitě vlny je její polarizace Kerrovým jevem stočena tak, že prochází polarizačním izolátorem s malými ztrátami. Nelineární šíření ve vlákně se podílí i na formování tvaru pulzů, např. automodulace fáze může vést ke kompresi pulzů.

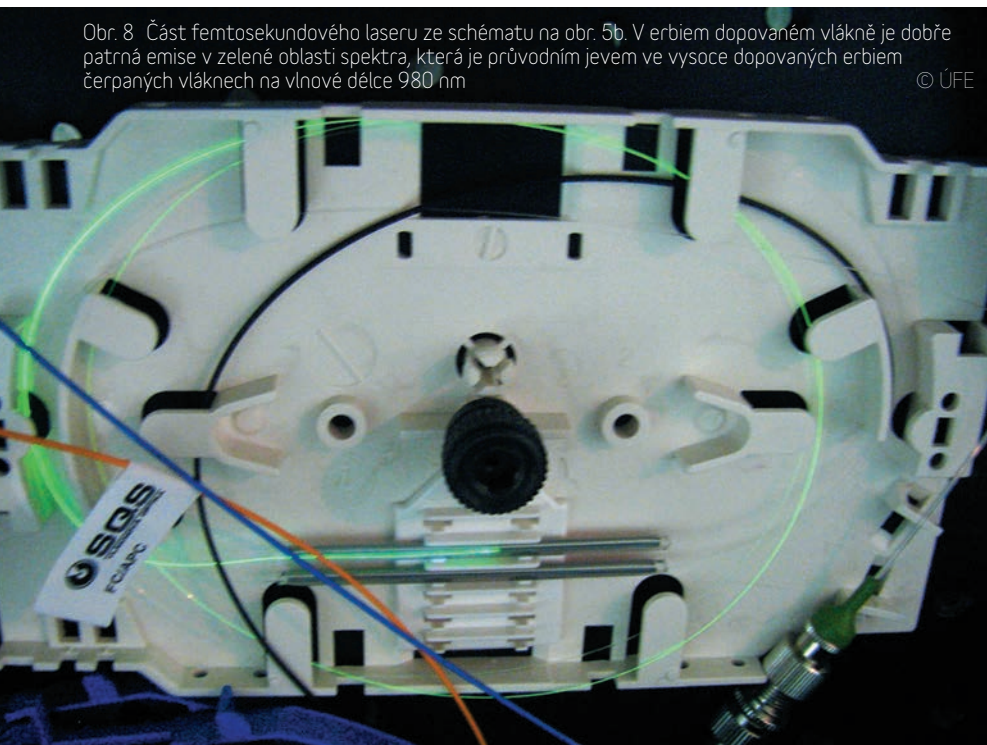
Jako u jiných typů laserů, i u vláknových laserů se používá technika spínání jakosti Q rezonátoru pro získávání sledu gigantických pulzů. Oproti módové synchronizovaným laserům se jedná o delší pulzy s nižší opakovací frekvencí, ale podstatně vyšší energií jednotlivých pulzů. V současné době jsou dostupné Q-spínané vláknové lasery s energií pulzů až 10 mJ, délkou pulzu řádově stovky ns a špičkovým výkonem desítky kW. Pro modulaci ztrát rezonátoru se používají buď aktivní modulátory, např. akustooptické, případně pro pasivní Q-spínání se používají saturovatelné



Obr. 6 Křemenná trubice při nanášení vrstev jádra pro dopování prvky vzácných zemin v ÚFE. Výsledná tyčka (preforma) se vytahuje do optického vlákna o průměru zlomku milimetru
© ÚFE



Obr. 7 Jedna z laboratoří
týmu *Vláknové lasery
a nelineární optika* ÚFE
© ÚFE



Obr. 8 Část femtosekundového laseru ze schématu na obr. 5b. V erbiem dopovaném vlákně je dobře patrná emise v zelené oblasti spektra, která je průvodním jevem ve vysoce dopovaných erbiem čerpaných vlákněch na vlnové délce 980 nm

© ÚFE

absorbéry, vesměs na bázi objemových prvků, jako jsou nelineární polovodičová zrcadla (SESAM), vrstvy uhlíkových nanočástic nebo krystaly Cr^{4+} :YAG. Q-klíčované vláknové lasery s velkou energií v pulzu jsou součástí detekčních systémů LIDAR (LIght Detection And Ranging) používaných např. v civilním letectví.

Studium pulzních vláknových laserů je jednou z tématik řešených ve skupině nelineární vláknové optiky ÚFE. Pohled do laboratoře je na obr. 7. Schéma laseru na obr. 5b odpovídá femtosekundovému vláknovému laseru, který jsme sestavili pro výzkum plně optického zpracování datových toků s vysokou přenosovou rychlostí. Laser generuje sled pulzů dlouhých 170 fs s opakovací frekvencí 40 MHz. Byly zde vyvinuty pasivně módově synchronizované vláknové lasery s opakovací frekvencí v řádu jednotek až desítek MHz, aktivně módově synchronizované vláknové lasery s opakovací frekvencí v řádu stovek MHz až jednotek GHz a vláknové lasery založené na modulační nestabilitě s opakovací frekvencí v řádu stovek GHz. Další příklady výzkumu vláknových laserů v ÚFE uvádíme na zadní části obálky.

Vysoký výkon z dvouplášťových vláken

Klíčovým krokem ke zvýšení výstupního výkonu vláknových laserů bylo koncem osmdesátých let využití metody čerpání aktivního prostředí přes plášť. Tímto způsobem je možno 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 čerpaný přes plášť realizoval Elias Snitzer, autor prvního vláknového laseru. Samotnou myšlenku čerpání přes plášť si ovšem nechal patentovat již v sedmdesátých letech Robert Maurer ze sklárny Corning Incorporated v USA. Princip laseru s dvouplášťovým aktivním vláknem je naznačen na obr. 9, uspořádání jeho komponent pak na obr. 12. Jádru 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. Jádru 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 z čerpacích diod účinně navázat 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. Oproti klasickým pevnolátkovým laserům mají tyto lasery ze své podstaty vysokou stabilitu a provozní spolehlivost, kompaktnost a malé rozměry a díky jednomódovému jádru i výbornou módovou kvalitu výstupního svazku. Vzhledem k velké délce aktivního prostředí mají lepší odvod tepelných ztrát a odpadá komplikované chlazení. Tyto výhody mají i konvenční vláknové zesilovače čerpané jednomódovými diodami. Dvouplášťová vlákna jsou mimořádně účinnými prvky pro konverzi výkonného záření polovodičových laserů s malým jasem do výkonného záření s vysokým jasem. Hlavní výhodou pláštěm čerpaných zesilovačů a laserů je proto především možnost použít vysoce výkonné mnohamódové čerpací diody a z toho vyplývající nižší cena a vysoký výstupní výkon.

Výhody vláknových laserů

Vysoká účinnost

Notoricky známým nedostatkem většiny laserů je jejich zoufale malá účinnost – v řádu jednotek procent. Laserové diody mají účinnost celkem dostačující, dokáží převést typicky 50 % (laboratorně i více) 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

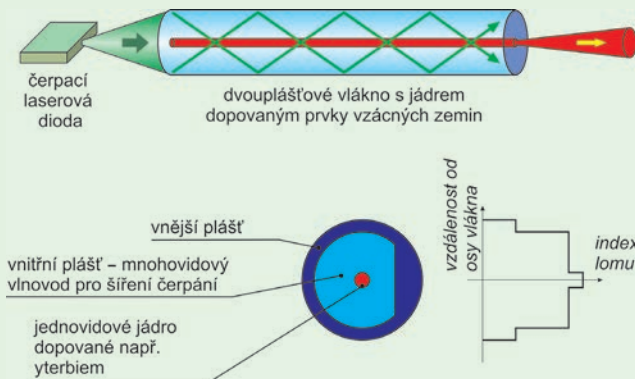
Záření běžných laserových diod je obsaženo v široce rozbíhavém a nekvalitním svazku. To často brání jeho využití v praxi. Optické vlákno pak může být tím magickým chybějícím článkem řetězu, který konvertuje nekvalitní světlo do jediného a vysoce jasného laserového svazku (viz obr. 9).

Jsou robustní a kompaktní

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

Nevyžadují složité chlazení

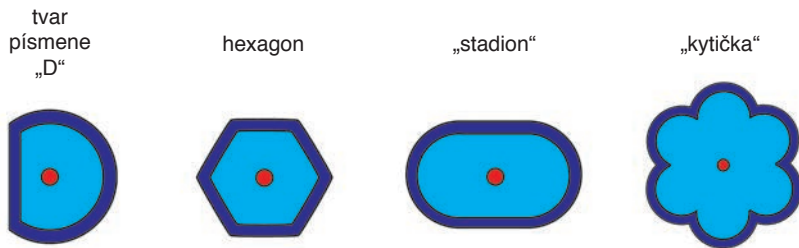
Vláknové geometrie umožňují velmi efektivní chlazení, protože u vlákna je velký poměr plochy pláště vůči celkovému objemu. Většinou stačí chlazení vzduchem místo dříve obvyklého chlazení vodou.



Obr. 9 Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť

© ÚFE

Problémem specifickým pro čerpání pláštěm je zajistit účinnou absorpci čerpání podél dvoupláštového 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 dvoupláštových aktivních vláken je zajistit maximální absorpci čerpání ve vlák-



Obr. 10 Příklady průřezů vláken vhodných pro čerpání přes plášť

© ÚFE

nu, tj. zajistit homogenní útlum podél celého vlákna. Toho lze dosáhnout vhodným návrhem tvaru průřezu vnitřního pláště, který zajistí tzv. chaotickou dynamiku šíření paprsků. V dvouplášťovém vlákně s „chaotickým“ šířením paprsků se při libovolném způsobu buzení dosáhne po jisté délce vlákna statisticky rovnoměrného rozložení intenzity záření po průřezu. Příklad takového průřezu vlákna je tzv. vlákno ve tvaru písmene D na obr. 10.

Dalším problémem dvouplášťových laserů a zvláště zesilovačů je navazování signálu a čerpání do aktivního vlákna. V literatuře bylo popsáno několik způsobů, jak navázat současně čerpání do vnitřního mnohamódového pláště a signál do jednomódového jádra. V laboratorních podmínkách je ještě přijatelné kombinování signálu a čerpání na vstupu aktivního vlákna pomocí objemových optických prvků a čoček. Pro zachování výhod šíření signálu optickým vláknem byly vyvinuty v zásadě dva různé způsoby navázání čerpání do vnitřního pláště aktivního vlákna. Možným způsobem je příčné navázání čerpání z boku aktivního vlákna buďto difrakčním prvkem, např. hranolem, nebo prostřednictvím zářezu ve tvaru V-drážky. V druhém případě je čerpání navázáno na začátku dvouplášťového vlákna

Pionýr i rekordman

Rekordy ve výkonových vláčkových laserech drží IPG Photonics, dnes již firma s globální působností. Vyrábí lasery s vůbec největším průměrným výkonem, které je možné koupit. Počátky firmy můžeme vystopovat do začátku 90. let v laboratořích Ústavu radiotechniky a elektroniky Ruské akademie věd.

Zakladatelem a hlavním vlastníkem firmy je ruský fyzik Valentin P. Gapontsev (*1939), jehož dětství dramaticky zasáhla druhá světová válka. V roce 1941 byl s rodinou narychlo evakuován z Moskvy na Ural. Otec, kapitán artilérie, byl v Bělorusku zajat a několik let byl v koncentračním táboře. Od něj se po válce Gapontsev naučil, jak je důležité zůstat silný tváří v tvář protivenství a nepřízni osudu. Sám o tom napsal: „Nedokážu si představit důležitější lekci pro někoho, kdo dnes začíná podnikat.“ Ve svém podnikání má nyní až trojitou zálohu všech klíčových výrobních kapacit (vedle Ruska a Německa i v New Jersey v USA). Když většina výrobců stěhovala své výrobní kapacity za levnou pracovní silou do Asie, Gapontsev naopak budoval výrobu v blízkosti významných výzkumných center v Evropě a USA, aby neztratil kontrolu nad výrobou a duševním vlastnictvím.

Obr. 11
Příklad preformy
dvouplášťového optického
vlákna s nekruhovým
průřezem pro snadné
navázání čerpacího
a signálového vlákna,
připravené v ÚFE
© ÚFE

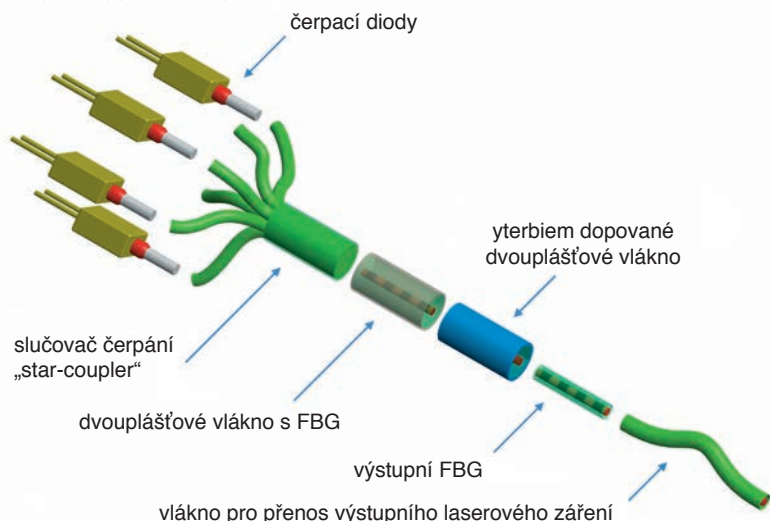


ve směru jeho osy. V Bellových laboratořích v USA vyvinuli elegantní metodu využívající svařovaný vláknový vazební člen vytvořený z jednomódového a několika mnohamódových vláken, soustředěných okolo jednomódového signálového vlákna, tzv. „star coupler“. Podobná součástka, ovšem bez středního jednomódového vlákna, je na obr. 12. 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 vláknu se specifickým průřezem. Příklad preformy tohoto vlákna je na obr. 11.

Jaké jsou další prvky vzácných zemin používané pro vláknové lasery kromě erbia a neodymu? Je to především yterbium, které silně absorbuje v pásmu 980 nm a emituje záření kolem 1100 nm. V posledních letech jsme svědky strmého růstu výstupního výkonu yterbium dopovaných dvouplášťových vláken. V roce 2009 byl sestaven yterbiový vláknový laser s kontinuálním výstupním výkonem 10 kW vycházejícím z jediného optického vlákna. Postavila jej jedna z vůdčích společností v oblasti výkonových vláknových laserů, firma IPG Photonics Valentina Gapon-tseva, jenž s výzkumem vláknových laserů začal v Ústavu radiotechniky a elektroniky Akademie věd SSSR ve Frjazinu nedaleko Moskvy. Významným prvkem je také thulium, které má široký emisní pás v pásmu 1,9–2,2 μm a silnou absorpci kolem 800 nm a k dispozici jsou i výkonné čerpací mnohamódové diody. I thuliové vláknové lasery na 2 μm se již blíží hranici 1 kW kontinuálního výstupního výkonu současně při vysoké výkonové konverzní účinnosti 65 %. Výhodou thuliových laserů pro průmyslové aplikace je právě jejich spektrální rozsah v tzv. „eye safe“ oblasti, způsobující mnohem menší poškození oční sítnice oproti vlnovým délkám yterbiových laserů.

Obr. 12 Komponenty pláštěm čerpaného vláknového laseru

© ÚFE



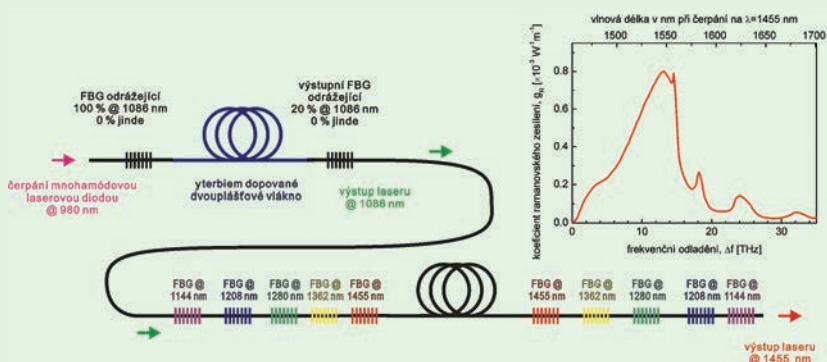
Limity výstupního výkonu

Fyzikální limit výstupního výkonu z jediného vláknového laserového systému je odhadnut na cca 10–20 kW. Hlavními omezujícími faktory výstupního výkonu vláknových laserů jsou ztrátové teplo a nežádoucí nelineární jevy. Výkonová konverzní účinnost ytterbiových vláknových laserů je velmi vysoká, vyšší než 80 %, takže např. při čerpání 1 kW je ztrátové teplo jen 200 W a je možné odvést ho vzhledem k velké délce a malému průměru aktivního prostředí (vláken) ještě bez nutnosti vodního chlazení. Sbližováním vlnových délek čerpání a laserového signálu, tedy snižováním tzv. kvantového defektu, je možné dále snížit tepelnou zátěž. To byla klíčová metoda k dosažení rekordních 10 kW z jediného ytterbiového optického vlákna.

S nárůstem výkonu nabývají na významu nelineární jevy, stimulovaný Brillouinův a Ramanův rozptyl. Brillouinův rozptyl je vyvolán podélnou akustickou vlnou vzniklou elektrostrikcí a rozptýlená vlna je spektrálně posunutá o cca 10 GHz. Jeho velikost závisí na úhlu rozptylu, maximum energie je rozptýleno ve zpětném směru. Brillouinův rozptyl je zvláště významný pro signály s úzkou šířkou čáry, a proto je tento jev možné účinně potlačit snížením koherenční délky signálu, neboli jinak řečeno, rozšířením spektra signálu. Ramanův rozptyl označuje jev, kdy světelná vlna excituje vyšší vibrační módy molekul SiO_2 , a je tak rozptylována do vlny lišící se o energii vibračního přechodu – pro křemenné sklo je to 13,2 THz. Tyto jevy lze do jisté míry potlačit vhodným návrhem vlákna, např. zvětšením průměru jádra.

Ramanovské vláknové lasery

Stimulovaného Ramanova rozptylu v jednomódových optických vláknech lze využít k účinné konverzi záření vláknového laseru do záření s nižší frekvencí, do tzv. Stokesovy vlny. Zapišeme-li na konce vlákna pár braggovských mřížek, které



Obr. 13 Schéma ramanovského laseru používaného pro distribuované zesilování signálu v optických komunikacích. Vpravo nahoře je spektrální závislost koeficientu ramanovského zesílení pro standardní jednomódové vlákno

odrážejí světlo o vlnové délce Stokesovy vlny, vytvoříme pro tuto vlnovou délku rezonátor. Stokesova vlna je dále zesilována stimulovaným Ramanovým rozptylem, takže energie z čerpacího laseru je velmi účinně přelévána do příslušné Stokesovy vlny. Tento proces je možno posunout dále k delším vlnovým délkám vytvářením dalších rezonátorů, takže se vytváří vlastně několik do sebe zapouzdřených rezonátorů, jejichž rezonanční frekvence se liší pokaždé o 13,2 THz. Tak například zápisem pěti párů braggovských mřížek odražejících záření na vlnových délkách 1144, 1208, 1280, 1362 a 1455 nm bude vytvořen kaskádní rezonátor ramanovského laseru, který zkonvertuje vlnovou délku 1086 nm yterbiového vláknového laseru do záření na vlnové délce 1455 nm, viz obr. 13. Tento příklad neuvádíme náhodou, ramanovský laser na 1455 nm vyvolává Ramanovo zesílení v standardních jednomódových vláknech v komunikačním pásmu 1550 nm. Bude-li přenosové vlákno čerpáno proti směru šíření signálu (čerpací ramanovský laser je na straně přijímače) bude pomocí Ramanova zesílení výrazně prodloužena vzdálenost přenosu bez opakovacích. V rámci společného projektu sdružení CESNET, které provozuje páteřní akademickou počítačovou síť České republiky, a ÚFE byl demonstrován přenos dvou WDM kanálů 10 gigabitového Ethernetu po 320 km standardního jednomódového vlákna bez linkových zesilovačů.

Preciznost pro nejpřesnější měření času

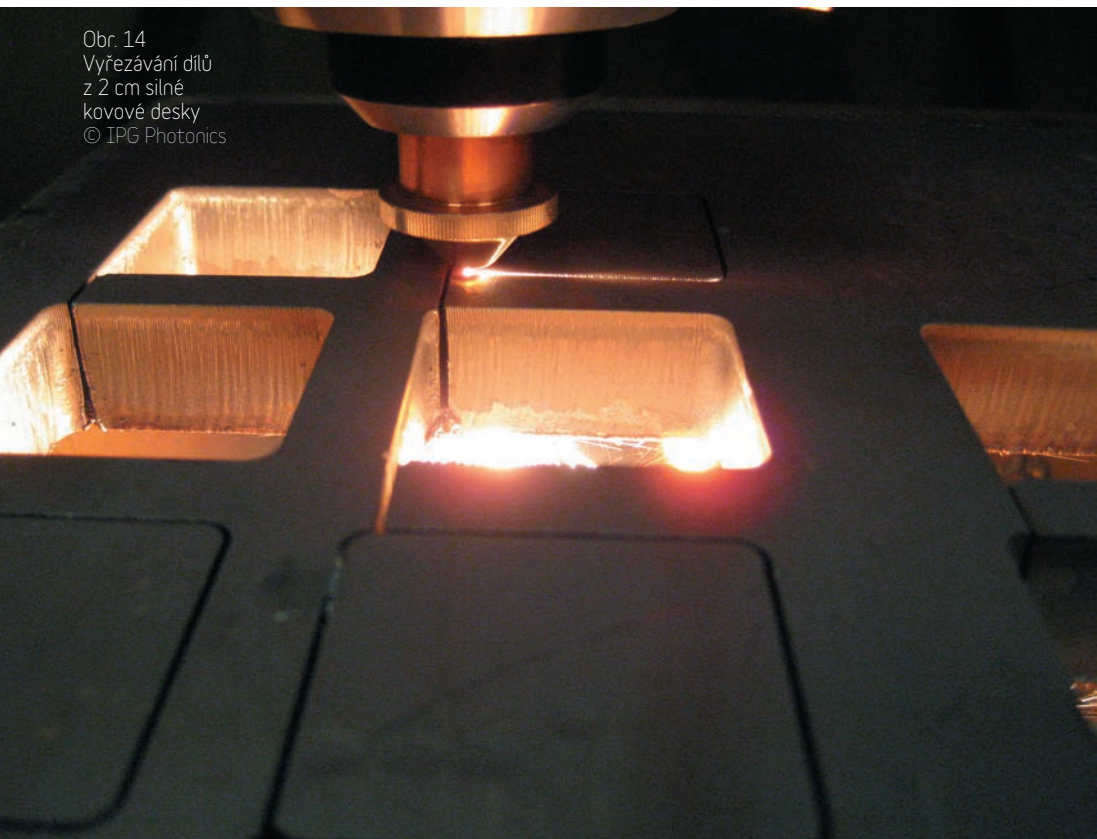
Vláknové lasery dnes najdeme v řadě delikátních zařízení. Jsou například součástí optických atomových hodin, které by měly v budoucnu zpřesnit družicové navigační systémy. Každé hodiny se skládají ze zdroje kmitání – oscilátoru (např. kyvadlo starých pendlovek) – a čítače. Stávající časové normály mají 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 *Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) Akademie věd ČR*.

V optických atomových hodinách však kmitají elektrony na optických kmitočtech, 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 (odhadem 15–20 miliard let). Hřeben optických frekvencí je čítačem, který převede dokonale přesně frekvence optického oscilátoru do oblastí, kde je již umíme zpracovávat elektronicky.

Pomocník lékařů

Široké použití nacházejí vláknové lasery také v medicíně. Začínají dominovat například trhu s precizními laserovými skalpely 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 mili-

Obr. 14
Vyřezávání dílů
z 2 cm silné
kovové desky
© IPG Photonics



metrů povrchu kůže nebo sítnice oka, ale mnohem podrobněji než rentgenovou počítačovou tomografií, známým „cétéčkem“. Lékaři tak snáze odhalí poškození oka nebo začínající rakovinu kůže. Silná absorpce záření thuliových a holmiových vláknových laserů ve vodě pak předurčuje tyto lasery pro použití v medicíně, například při fragmentaci ledvinových kamenů, léčbě benigní hyperplazie prostaty nebo laserové angioplastice. V oblasti minimálně invazivní chirurgie mohou být tyto laserové systémy použity pro precizní řezání tkáně při současném zastavení krvácení rozdělených cév.

▮ Hrubá síla pro vrtání betonu

Kromě precizní práce se vláknové lasery osvědčují i jako hrubá síla. Např. výstup 100W laseru může být soustředěn 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, proto je lepší použít laserové vrtání. Vláknový la-

ser 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.

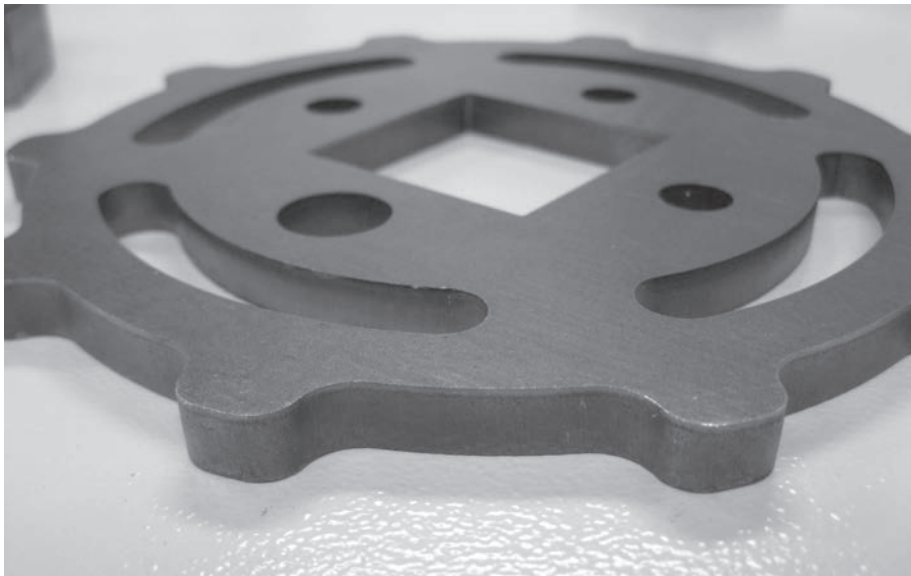
Nástroje pro průmysl i pro kutily

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 benzínové 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 (výroba fotovoltaických panelů a fólií nebo polovodičových zdrojů osvětlení). 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 sváru.

Možná si vzpomínáte na laserovou pilku ve známém seriálu Návštěvníci. A na to, jak lehce s ní Vlastimil Brodský podtínal plaňkový plot. Zatím jsou vláknové lasery příliš drahé, ale se svým potenciálem na výrazné snížení ceny a miniaturizaci mohou brzy prorazit i do oblasti hobbymarketů. 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.

Obr. 15 Kovový díl vyříznutý z 13mm desky

© IPG Photonics

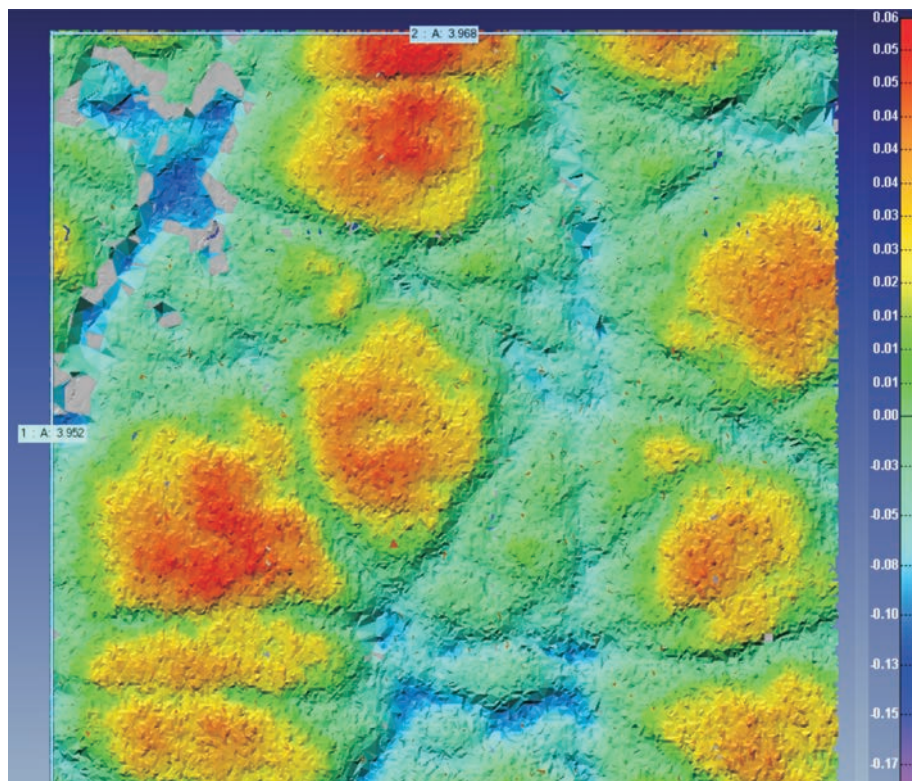


Slučování svazků vláknových laserů

Pro většinu průmyslových aplikací je výkon v řádu kW více než dostatečný. Přesto některé extrémní aplikace vyžadují ještě vyšší výkony. Toho je možné dosáhnout kombinováním výstupů z několika vláknových laserů. Prostorovým složením jednotlivých výstupních svazků do apertury společné výstupní čočky se sice dosáhne vyššího výkonu, ale zvyšuje se rozbíhavost svazku, přicházíme tedy o jeho módovou kvalitu. Firma IPG takto realizovala 100kW kontinuální vláknový laserový systém. Je možné také kombinovat dva svazky s různou polarizací. Analogicky k systémům vlnového multiplexu využívaným v optických komunikacích lze skládat výstupy laserů generujících na mírně odlišných vlnových délkách. Očekává se tak možnost kontinuálně generovat záření v difrakčně limitovaném svazku s kontinuálním výkonem řádu stovek kW. Nejprogresivnější, ale současně nejnáročnější je koherentní kombinace svazků z mnoha vláknových laserů nebo vláknových zesilovačů. Gérard Mourou, průkopník metody čerpvaného zesilování pulzů (CPA, chirped pulse amplification) a jeden z duchovních otců projektu nejvýkonnějšího laseru na světě ELI (Extreme Light Infrastructure)

Obr. 16 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. Laserové zdroje pro skener vyvíjeli pracovníci ÚFE a firmy Safibra. Prototyp byl vystaven na výstavě Laser - svět fotoniky v Mnichově v roce 2013

© Fraunhofer IPT



považuje koherentní kombinaci svazků vláknových zesilovačů za jeden ze dvou nejvýznamnějších směrů výzkumu v oboru laserové fyziky pro příští desetiletí. Druhou oblastí je pak podle něj zvyšování účinnosti laserů, kde rovněž mohou hrát významnou úlohu vláknové lasery. G. Mourou uvažoval o použití vláknových zesilovačů i pro výkonovou zesilovací část laserového systému ELI, který je právě budován v Dolních Břežanech u Prahy. Pro generaci petawattových pulzů, pro něž je projektován laserový systém ELI, by však bylo potřeba řádově tisíců vláknových zesilovačů pulzů a jejich vzájemná synchronizace bude těžkým výzkumně-technickým oříškem. Schůdnějším řešením zřejmě bude realizace výkonových zesilovačů ELI na bázi tenkých disků.

Mocná zbraň

Vysoký výkon vláknových laserů nezůstal stranou zájmu obranných aktivit. Únor roku 2010 byl mezníkem v oblasti americké strategické obranné iniciativy, lidově nazývané též „star wars“: poprvé se totiž podařilo laserem sestřelit letící balistickou raketu typu SCUD, jejíž výrobu mají autoritativní režimy severní Koreje a Íránu dobře zvládnutu. Byla zneškodněna kyslíkojódovým chemickým laserem neseným na palubě letounu Boeing 747, který po několika sekund soustředil na raketu záření o výkonu v řádu MW. Vláknové lasery sice zatím dokážou generovat jen několik setin výkonu tohoto chemického laseru, ale jejich další vynikající vlastnosti jsou pro řadu vojenských aplikací přitažlivé. 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. Vysoké výkony pro obranné aplikace vyžadují koherentní kombinaci svazků a tato technologie je stále v plenkách.

Text brožury zpracovali Pavel Peterka, Pavel Honzátko, Ivan Kašík a Adéla Michková s využitím následující literatury a podkladů:

P. Peterka. Vláknové lasery dobývají svět. *Panorama 21. století* (6), 2012, s. 16–19; P. Peterka, P. Honzátko a M. Karásek. Vláknové lasery – jasné světlo ze skleněných nitěk. *Československý časopis pro fyziku* **60** (4–5), 2010, s. 302–307; I. Kasík, P. Peterka. Optická vlákna – páteř moderních komunikací. *Československý časopis pro fyziku* **61** (1), 2011, s. 4–7; P. Peterka, P. Honzátko, M. Karásek, J. Kaňka, I. Kašík a V. Matějec. Vláknové lasery – principy a aplikace. *Jemná mechanika a optika* **55** (4), 2010, s. 115–120; P. Peterka a V. Matějec. Optická vlákna se dočkala Nobelovy ceny za fyziku. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **55** (1), 2010, s. 1–11; *OPN talks with Gérard Mourou, Optics and Photonics News*, special issue: lasers **21** (5), 2010, s. 12–13; D. Halliday, W. Resnick, J. Walker. *Fyzika*. Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2003; obrázky průmyslového využití vláknových laserů poskytla společnost LAO – průmyslové systémy s. r. o.; studijní materiály ze semestrálního kurzu „Vláknové lasery a zesilovače“ přednášeného od r. 2007 na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

Obr. 17 Vlákňový laserový systém Boeing Laser Avanger byl úspěšně vyzkoušen k ničení improvizovaných výbušnin a bezpilotních letounů © Boeing



KOHERENTNÍ KOMBINACE VLÁKNOVÝCH LASERŮ

Cílem projektu byl výzkum koherentního a spektrálního kombinování svazků za účelem dosažení vysoké radiance z thuliem dopovaných vláknových laserů. V těchto systémech je hlavní překážkou k dosažení vysokých výkonů tepelná zátěž. Problémy lze vyřešit koherentním nebo spektrálním kombinováním svazků, které umožňuje zvýšit radianci thuliem dopovaných vláknových laserových systémů nad rámec možností jednotlivého laseru. Náš tým jako první dosáhl koherentního kombinování záření dvojice thuliem dopovaných vláknových laserů v oblasti středních výkonů. Výstupní výkon našeho laseru byl 20 W a byl omezen nám dostupným výkonem čerpání. Výzkum podpořila Grantová agentura ČR (č. projektu 205/11/1840).

FOTONIKA VE STŘEDNÍ INFRAČERVENÉ OBLASTI

Výzkum je zaměřen na široce laditelné generátory koherentního záření založené na generaci rozdílového kmitočtu v periodicky pólovaných nelineárních krystalech, např. KTP. Za zdroje fundamentálních kmitočtů slouží výkonové vláknové lasery. Dále je projekt zaměřen na aplikace ve spektroskopii (lékařská diagnostika, monitorování ovzduší apod.) a metrologii (přenos měřicích metod z blízké infračervené oblasti do střední infračervené oblasti). Výzkum podpořila Technologická agentura ČR (č. projektu TA02010825).

SCAN4SURF: MONITOROVÁNÍ LASEROVÝCH STRUKTUROVACÍCH SYSTÉMŮ

Cílem evropského projektu scan4surf bylo vyvinout měřicí systém pro průmyslový laser obrábějící přesné díly, např. formy pro lisování plastů v automobilovém nebo leteckém průmyslu. Tyto formy jsou velmi drahé a nepřesné zaostření výkonného laseru by mohlo celou formu neopravitelně poškodit. Měřicí systém bude i v průběhu obrábění zajišťovat přesné zaostření laserové obráběcí hlavy. Koordinátory celého projektu byly německá firma Precitec (vedoucí světový výrobce laserových obráběcích a svařovacích hlav) a Fraunhoferův institut pro výrobní technologie. Na české straně byla koordinátorem firma Safibra a měli jsme za úkol vyvinout vhodný zdroj záření pro měřicí senzor. Jeden ze zdrojů byl na bázi optického vlákna dopovaného ytterbiem. Jeho výhodou je větší výkon než má polovodičová LED dioda.

NESTABILITA A SAMOVOLNÁ PULZACE VLÁKNOVÝCH LASERŮ

I když vláknové lasery už dobývají staré trhy a umožňují nové aplikace, řada výzkumných témat je stále nedorešena a vynořují se nové otázky. Jednou z nich jsou dosud málo prozkoumané nestabilní stavy vláknových laserů. My jsme např. při výzkumu pulzních vláknových laserů pozorovali působivý jev samovolného rozmítání vlnové délky laseru v rozsahu téměř 10 nm a s opakovací periodou kolem 2 s. Naše pozorování bylo první zmínkou o tomto jevu, aspoň ve volně dostupné literatuře. Tento jev je nežádoucí nestabilitou v kontinuálních vláknových laserech, může ale najít užitečnou aplikaci např. v jednoduchém laseru s rozmítáním vlnové délky pro systémy optických vláknových senzorů. Výzkum byl podpořen projektem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy (projekt č. ME10119 „FILA“).

MÉNĚ NEBEZPEČÍ PRO OČI – VLÁKNOVÉ LASERY V OBLASTI 2 MIKROMETRŮ

Lasery pracující na vlnové délce kolem 1 mikrometru mohou snadno poškodit sítnici oka. Oproti tomu thuliové vláknové lasery na vlnové délce 2 μm poškodí oko až při víc než 1000× větší intenzitě. Někdy se proto označují jako „oku bezpečné“ či „eye-safe“ lasery. Thuliové vláknové lasery mohou v některých aplikacích nahradit ytterbiové lasery a pro zpracování určitých materiálů, např. plastů, jsou dokonce vhodnější. Spolu s výrobním závodem SQS vláknová optika v Nové Pace řešíme projekt aplikovaného výzkumu optických vláknových součástek pro laserová zařízení pracující ve spektrální oblasti okolo 2 μm . Projekt je podpořen Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR grantem „EYESAFE2u“, č. FR-TI4/734. V oblasti materiálového výzkumu nových typů optických vláken hledáme cesty, jak zvýšit účinnost vláknových laserů na vlnových délkách okolo 2 μm , a to modifikací křemenného jádra vlákna keramickými nanočásticemi. Tento projekt je podpořen Grantovou agenturou ČR (projekt č. 14-35256S).

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Jaroslav Klokočník a kol.: **Družice a gravitační pole Země**

Martin Štefko: **Diskriminace v zaměstnání a obrana proti ní**

DOSUD VYŠLO:

Eva Semotanová: **Historická krajina Česka a co po ní zůstalo**

Edice Věda kolem nás | Objevy
Vláknové lasery | Pavel Peterka a kol.

Vydal Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobylisy, v Nakladatelství Academia, Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., Vodičkova 40, 110 00 Praha 1. Grafickou úpravu a obálku navrhl Jakub Krč, studio Lacerta. Technická redaktorka Monika Chomiaková. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2014. Ediční číslo 11710. Sazba a tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

Další svazky získáte na:
www.vedakolemnas.cz | www.academiaknihy.cz | www.eknihy.academia.cz