

# Vláknové lasery – jasné světlo ze skleněných nitek

Pavel Peterka, Pavel Honzátko, Miroslav Karásek

Ústav fotoniky a elektroniky AVČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha – Kobylisy

*Vláknové lasery patří mezi nejpůsobivější úspěchy fotoniky posledních let. Poskytují hrubou sílu využitelnou pro řezání a sváření v průmyslu, ale lze je nalézt i v delikátních zařízeních vyvíjených pro dosud nepřesnější měření frekvence a času. Na začátku současného rozmachu této technologie stál erbiem dopovaný vláknový zesilovač, který byl jednou z klíčových komponent umožňujících rychlý rozvoj internetu. V příspěvku jsou uvedeny základní principy činnosti vláknových laserů a některé jejich aplikace.*

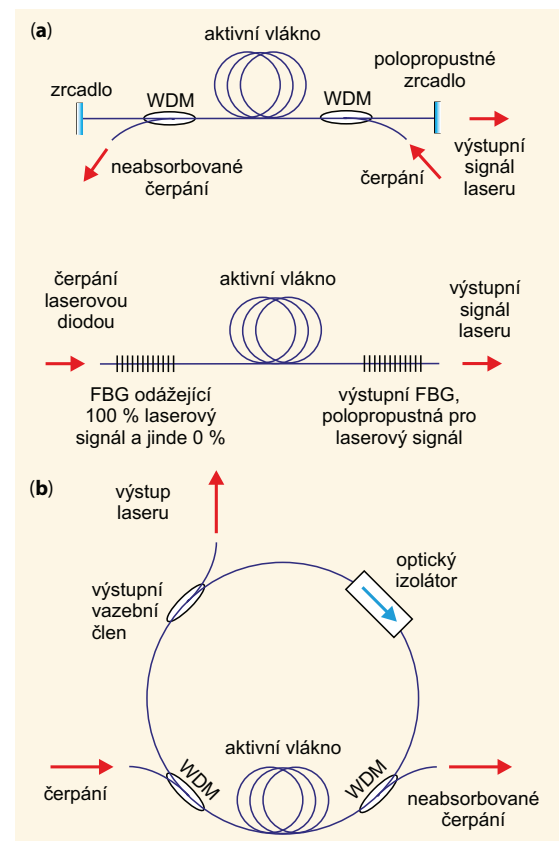
Vláknové lasery byly navrženy již v roce 1960, krátce poté, co Theodore Maiman rozzářil koherentním světlem krystal rubínu a sestavil tak první laser. Tehdy Elias Snitzer navrhl a záhy realizoval laser, ve kterém jako aktivní, zesilující prostředí použil skleněné vlákno s jádrem dopovaným neodymem. Tento vláknový laser generoval záření na vlnové délce 1,06  $\mu\text{m}$  a byl čerpaný výbojkou, kolem které bylo vlákno obtočeno ve spirále. Zatímco odvětví pevnolátkových laserů zaznamenávalo rychlý pokrok od dnů jejich objevu, po prvních pracích E. Snitzera upadají vláknové lasery v zapomnění a jsou považovány spíše za laboratorní kuriozitu. Optickým vláknům samotným však začal bouřlivý rozvoj jako bezkonkurenčnímu přenosovému médiu pro telekomunikace.

Aktivní optická vlákna byla znovuobjevena až v polovině osmdesátých let, kdy tým kolem Davida N. Payna z univerzity v Southamptonu v Anglii ukázal, že ionty prvku vzácné zeminy erbia mohou ve vláknech vyvolat zisk na vlnové délce kolem 1550 nm, využívané v komunikačních systémech. Erbiem dopovaný vláknový zesilovač (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier) způsobil v oblasti optických komunikací převratné změny. EDFA je totiž jednou z klíčových komponent, která umožnila výstavbu dálkových vysokokapacitních datových spojů a tedy i celosvětový rozvoj internetu. Tato komponenta také otevřela nové možnosti pro transparentní optické sítě s vlnovým multiplexem (WDM – Wavelength Division Multiplexing) a pro přenos dat prostřednictvím optických solitonů. Zájemci si mohou přečíst více o EDFA v Československém časopise pro fyziku v překladu článku Emmanuela Desurvira, francouzského fyzika pracujícího v osmdesátých a devadesátých letech v Bellových laboratořích [1]. 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 hledala intenzivně nové aplikace optických vláken mimo telekomunikace. Je vskutku obdivuhodné, jak jsou vláknové lasery univerzální. Některé nabízejí eleganci – široce přeladitelný výstup s úzkou šíř-

kou čáry nebo femtosekundové pulsy. Jiné zas nabízejí hrubou sílu – výstupní výkon řádu stovek wattů až kilowattů 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. Po-



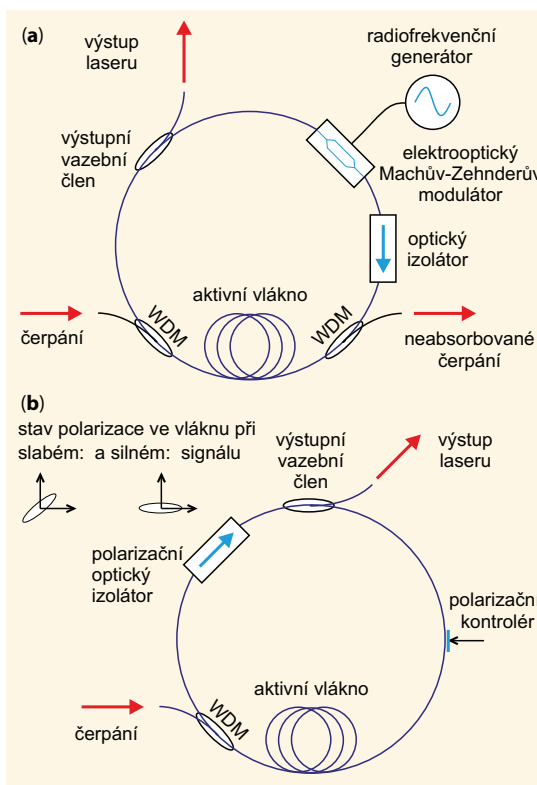
Obr. 1 Typická uspořádání vláknového laseru. (a) Fabryův-Perotův (lineární) rezonátor, (b) kruhový rezonátor.

drobněji je princip laserů popsán v tomto čísle na str. 200–203. 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 odrazné vrstvy na přesně kolmo zalomené čelo vlákna nebo přiložením externího zrcátka k čelům vlákna. Často užívané řešení zrcadel je také navaření vláknových braggovských mřížek (FBG – Fiber Bragg Grating) 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 přerušuje 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 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.

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 a mají tedy velmi úzkou spektrální čarou, užší než 10 kHz. Tyto lasery jsou vhodné pro použití v optických interferenčních senzorech a v koherentních optických komunikačních systémech.

**Pulsní 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. Více o podélných módech rezonátoru a fázovém synchronismu čtenář najde v tomto čísle na str. 200–203. 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. Tato periodická funkce představuje sled optických pulsů. Časová šířka pulsů je nepřímo úměrná počtu podélných módů, a tedy i šířce pásma přechodu. Ustavení režimu

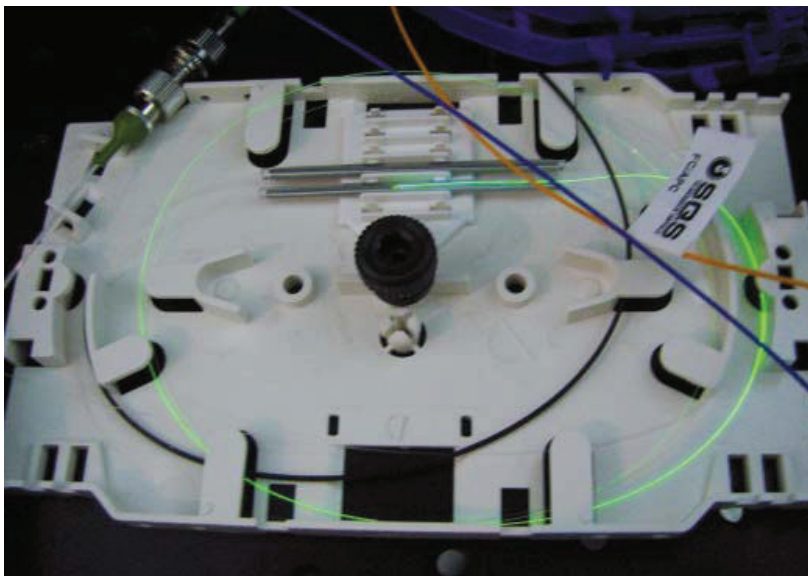


**Obr. 2** Příklady uspořádání pulsního vláknového laseru s aktivní (a) a pasivní (b) módovou synchronizací.

synchronizace módů lze dosáhnout vložením optické závěrky do laserové dutiny, která se periodicky otvírá s periodou  $T$ . Optickou závěrku lze ovládat externím frekvenčním generátorem, mluvíme pak o aktivní módové synchronizaci. Na obr. 2a je optickou závěrku tvořené v krystalu niobičnanu lithného ( $LiNbO_3$ ), což je prvek integrované optiky. Lze také použít pasivní závěrku tvořenou saturovatelným absorbujícím prostředím, pak mluvíme o pasivní módové synchronizaci. Takovou závěrku může být např. polarizátor v kombinaci s nelineárním natačením polarizace v optickém vlákně tvořícím rezonátor, jak je ukázáno na obr. 2b (funkci polarizátoru zde plní polarizační optický izolátor). Pro činnost této závěrky je podstatné nelineární šíře-



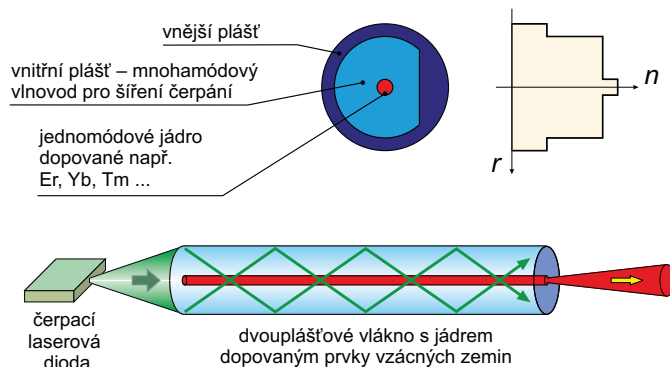
**Obr. 3** Laborař nelineární vláknové optiky ŮFE, ve které probíhá také výzkum vláknových laserů.



**Obr. 4** Část femtosekundového laseru ze schématu na obr. 2b. V erbiem dopovaném vlákne je dobře patrná emise v zelené oblasti spektra, která je průvodním jevem ve vláknech vysoce dopovaných erbiem čerpaných na vlnové délce 980 nm.

ni světla ve vlákne. Světlo se šíří jádrem vlákna, které má průměr 8  $\mu\text{m}$ . Při výkonech kolem 1 W převyšuje průměrná intenzita světla v jádře vlákna intenzitu světla na povrchu Slunce a špičková intenzita v pulsech může být ještě řádově vyšší. Přitom se projevuje optický Kerrův jev neboli závislost indexu lomu skla vlákna na intenzitě. Tato změna indexu lomu, která je různá v různých částech pulsu, významně ovlivňuje změny tvaru a polarizace pulsu při šíření. Polarizačním kontrolérem, viz obr. 2b, nastavíme polarizaci světelné vlny tak, že při slabém signálu je její polarizace zkřížená vůči ose propustnosti polarizátoru a má velké ztráty, ale při silné intenzitě vlny je její polarizace Kerrovým jevem stočena tak, že prochází polarizačním izolátorem s malými ztrátami. Nelineární šíření ve vlákne se podílí i na formování tvaru pulsů, např. automodulace fáze může vést ke kompresi pulsů.

Jako u jiných typů laserů, i u vláknových laserů se používá technika spínání jakosti Q rezonátoru pro získávání sledu gigantických pulsů. Oproti módově synchronizovaným laserům se jedná o delší pulsy s nižší opakovací frekvencí, ale podstatně vyšší energií jednotlivých pulsů. V současné době jsou dostupné Q-spínané vláknové lasery s energií pulsů až 10 mJ, délkou pulsu řádově stovky ns a špičkovým výkonem desítky kW. Pro modulaci ztrát rezonátoru se používají buď aktivní modulatory, např. akustooptické, případně pro pasivní Q-spínání se používají saturovatelné absorberů, vesměs na bázi objemových prvků, jako jsou nelineární



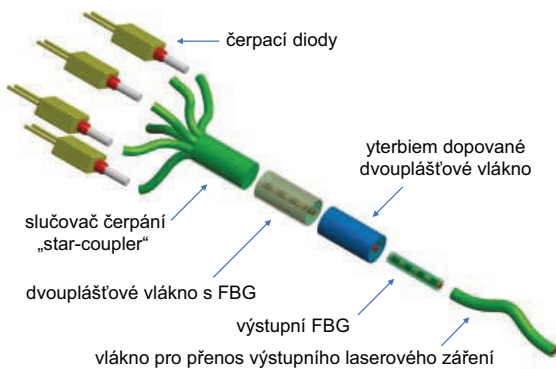
**Obr. 5** Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť.

polovodičová zrcadla (SESAM), vrstvy uhlíkových nanočástic nebo krystaly  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ .

Studium pulsních vláknových laserů je jednou z tematik řešených ve skupině nelineární vláknové optiky ÚFE. Pohled do laboratoře je na obr. 3. Schéma laseru na obr. 2b odpovídá femtosekundovému vláknovému laseru, který jsme sestavili pro výzkum plně optického zpracování datových toků s vysokou přenosovou rychlostí. Laser generuje sled pulsů dlouhých 170 fs a opakovací frekvencí 40 MHz. Byly zde vyvinuty pasivně módově synchronizované vláknové lasery s opakovací frekvencí řádu jednotek až desítek MHz, aktivně módově synchronizované vláknové lasery s opakovací frekvencí řádu stovek MHz až jednotek GHz a vláknové lasery založené na modulační nestabilitě s opakovací frekvencí řádu stovek GHz. Další příklady výzkumu vláknových laserů v ÚFE najde čtenář v dubnovém čísle časopisu *Jemná mechanika a optika* [2], které je věnováno výzkumu vláknové optiky v ÚFE v souvislosti s udělením Nobelovy ceny za fyziku v roce 2009, kdy polovinou ceny byl oceněn výzkum optických vláken [3].

### 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 je možno transformovat vysoce rozbíhavý svazek z mnohamódových laserových diod s velkou vyzářovací plochou (typicky  $100 \times 1 \mu\text{m}$ ) do kvalitního, jednomódového laserového svazku s malou divergencí. První vláknový laser čerpaný přes plášť realizoval opět 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. 5, uspořádání jeho komponent pak na obr. 6. Jádro vlákna je dopováno ionty prvků vzácných zemin schopných 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 zesílovanému signálu. Oproti klasickým pevnolátkovým laserům mají tyto lasery inherentně vysokou stabilitu a provozní spolehlivost, kompaktnost a malé rozměry, 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 účinné prvky pro konverzi výkonového záření polovodičových laserů s malým jasnem do výkonového záření s vysokým jasnem. Hlavní výhodou pláštěm čerpaných zesilovačů a laserů je proto především možnost použít vysoce výkonných mnohomódových čerpacích diod a z toho vyplývající nižší cena a vysoký výstupní výkon.



**Obr. 6** Komponenty pláštěm čerpaného 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 (mimooosové) 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. 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 tvaru písmene D na obr. 5.

Dalším problémem dvouplášťových laserů a zvláště zesilovačů je navazování signálu a čerpání do aktivní-



**Obr. 7** Preforma optického vlákna zasunutá do grafitové pece v nejhorkější části jedné ze dvou tažících věží pro přípravu experimentálních optických vláken v ÚFE.



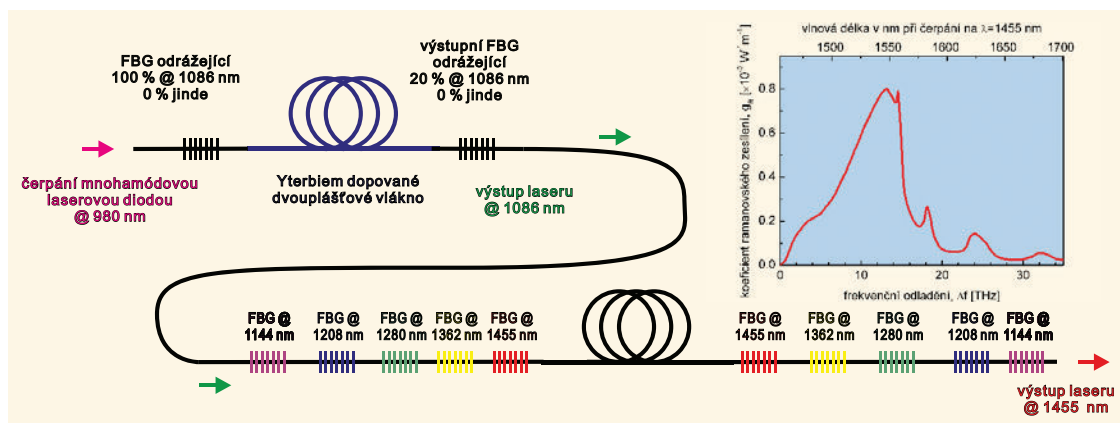
**Obr. 8** Příklad preformy dvouplášťového optického vlákna s nekruhovým průřezem pro snadné navazání čerpacího a signálového vlákna připravené v ÚFE.

ho 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 navazání čerpání do vnitřního pláště aktivního vlákna. Možným způsobem je příčné navazání čerpání z boku aktivního vlákna buďto nějakým difrakčním prvkem, např. hranolem, nebo prostřednictvím zářezu ve tvaru V-drážky. V druhém případě je čerpání navázáno na začátku dvouplášťového vlákna ve směru jeho osy. 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. 6. V ÚFE jsme navrhli nový způsob pro optické čerpání přes plášť a experimentálně jej ověřili pro čerpání vláknového laseru i zesilovače [4]. Tato patentovaná metoda čerpání je založena na přímém připojení čerpacího i signálového vlákna k dvouplášťovému aktivnímu vlákně se specifickým průřezem. Příklad preformy tohoto vlákna je na obr. 8.

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 yterbiem 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 Gapontseva, který s výzkumem vláknových laserů začal v Ústavu radiotechniky a elektroniky Akademie věd SSSR ve Frjazinu nedaleko Moskvy. Významným prvkem je také thulium, které

» **Problémem dvouplášťových laserů a zvláště zesilovačů je navazování signálu a čerpání do aktivního vlákna.** «

» Fyzikální limit výstupního výkonu z jediného vláknového laserového systému je odhadnut na cca 10–20 kW. «



**Obr. 9** Schéma ramanovského laseru používaného pro distribuované zesilování signálu v optických komunikacích. Vpravo nahoře je spektrální závislost koeficientu ramanovského zesílení pro standardní jednomódové vlákno.

má široký emisní pás v pásmu 1,9–2,2  $\mu\text{m}$  a silnou absorpci kolem 800 nm, kde jsou rovněž k dispozici výkonné čerpačí mnohamódové diody. I thuliové vláknové lasery na 2  $\mu\text{m}$  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 vzhledem k výrazně nižšímu prahu poškození oční sítnice oproti vlnovým délkám yterbiových laserů.

### 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 yterbiových vláknových laserů je velmi vysoká, vyšší než 80 %, takže např. při čerpání 1 kW je ztrátové teplo jen 200 W a to je možné odvést 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 yterbiového 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 posunuta 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, ekvivalentně řečeno, rozšířením spektra signálu. Ramanův rozptyl označuje jev, kdy světelná vlna excituje vyšší vibrační módy molekul  $\text{SiO}_2$  a je tak rozptylována do vlny, která se liší 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.

### 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 svaz-

ků do apertury společné výstupní čočky se sice dosáhne vyššího výkonu, ale zvyšuje se rozbihavost svazku, přicházíme tedy o jeho módobou kvalitu. Firma IPG takto realizovala 50 kW 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 [5]. Nejprogresivnější, ale současně nejnáročnější je koherentní kombinace svazků z mnoha vláknových laserů nebo vláknových zesilovačů.

*Gérard Mourou, vynálezce metody zesilování čerpaných pulsů (CPA, chirped pulse amplification) a jeden z duchovních otců projektu nejvýkonnějšího laseru na světě ELI (Extreme Light Infrastructure), považuje koherentní kombinaci svazků vláknových zesilovačů za jeden ze dvou nejvýznamnějších směrů výzkumu v oboru laserové fyziky pro příští desetiletí [6].*

Druhou oblastí je pak podle něho zvyšování účinnosti laserů, kde vláknové lasery rovněž mohou hrát významnou úlohu. G. Mourou uvažoval o použití vláknových zesilovačů i pro výkonovou zesilovací část laserového systému ELI. Projekt ELI je v tomto čísle představen na str. 197–198. Pro generaci petawattových pulsů, pro něž je projektován laserový systém ELI, by však bylo potřeba řádově tisíců vláknových zesilovačů pulsů a jejich vzájemná synchronizace bude těžkým výzkumně-technickým oříškem. Schůdnějším řešením zřejmě bude realizace výkonových zesilovačů ELI na bázi tenkých disků.

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“: podařilo se totiž poprvé laserem sestřelit letící balistickou raketu typu SCUD, jejichž výrobu mají autoritativní režimy Severní Koreje a Íránu dobře zvládnuto. Byla zneškodněna kyslíkojódovým chemickým laserem neseným na palubě letounu Boeing 747, který po několik sekund soustředil na raketu záření výkonu v řádu megawattů. Mezi alternativy pro tyto laserové systémy začínají patřit i vláknové lasery. To však vyžaduje právě koherentní kombinaci svazků a tato technologie je stále v plenkách [7].

## 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 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 odrážejících 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. 9). 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.

## Některé další aplikace

Vláknové lasery jsou užitečné pro jakoukoliv aplikaci, která vyžaduje mechanicky odolný zdroj koherentního záření s vynikající módovou kvalitou výstupního svazku. V tomto závěrečném odstavci zmíníme některé další aplikace, které jsme dosud neuvedli. Zvláště zajímavou oblastí aplikací je zpracování materiálu. Např. výstup 100W laseru může být fokusován na průměr až 1  $\mu\text{m}$  při odpovídající měrné zářivosti několika  $\text{GW}/\text{cm}^2/\text{steradián}$ . Vláknové lasery je tedy možno použít pro žihání součástek jemné mechaniky, řezání až několik centimetrů silných ocelových dílů, selektivní pájení a svařování komplikovaných mechanismů, značkování plastových a kovových dílů, jakož i rozmanité tiskové aplikace. Byly ukázány aplikace kilowattových vláknových laserových systémů pro vyprošťování osob ze zříceniných betonových budov při zemětřesení, řezání pancéřových desek ve vojenském loďařském průmyslu, svařování trub tranzitních plynovodů a mnohé další. 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 hlavičky, která je dostatečně daleko od sváru. Slibné aplikace jsou také v medicíně, v oční chirurgii a v zubním lékařství, kde na vlnové délce  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ , resp. její druhé harmonické 532 nm, mohou být yterbiové vláknové lasery používány místo Nd:YAG laserů, a na vlnové délce v okolí 2  $\mu\text{m}$  pak thuliové vláknové lasery



**Obr. 10** 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.

mohou nahradit pevnolátkové lasery na bázi krystalů dopovaných holmiem.

Vláknové lasery s pasivní módovou synchronizací generující pulsy řádu stovek femtosekund mohou najít využití v ramanovské spektroskopii a Q-klíčované vláknové lasery s velkou energií v pulsu jsou součástí detekčních systémů LIDAR (Light Detection And Ranging) používaných např. v civilním letectví. Generátory hřebene optických frekvencí na bázi femtosekundových kruhových vláknových laserů je možno použít pro zatím nejpřesnější měření času, frekvence a dalších veličin. Možná nejdůležitější perspektiva vláknových laserů tkví v inherentní jednoduchosti konceptu vláknového laseru, která při případné hromadné výrobě povede k významnému snížení cen oproti srovnatelným konvenčním laserům.

Výzkum speciálních optických vláken pro vláknové lasery v ÚFE je podpořen Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR projektem ME10119 „FILA“. Autoři děkují za pečlivou přípravu obrázků 6–8 a 10 Adamu Novozámskému. V článku byly použity, podobně jako v práci [2], materiály ze semestrálního kursu „Vláknové lasery a zesilovače“ přednášeného na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

## Literatura

- [1] E. Desurvire: Zlatý věk optických vláknových zesilovačů, Čs. čas. fyz. **44**, 183 (1994).
- [2] P. Peterka, P. Honzátko, M. Karásek, J. Kaňka, I. Kašík a V. Matějec: „Vláknové lasery – principy a aplikace“, *Jemná mechanika a optika* **55**, 115 (2010).
- [3] P. Peterka, V. Matějec: „Optická vlákna se dočkala Nobelovy ceny za fyziku“, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **55**, 1 (2010).
- [4] P. Peterka, V. Kubeček, P. Dvořáček, I. Kašík and V. Matějec: „Experimental demonstration of novel end-pumping method for double-clad fiber devices“, *Opt. Lett.* **31**, 3240 (2006).
- [5] J. Limpert, F. Roser, T. Schreiber, Ch. Wirth, T. Peschel, R. Eberhardt, A. Tunnermann: „The rising power of the fiber lasers and amplifiers“, *J. Selected Top. Quant. Electron.*, **13**, 537 (2007).
- [6] OPN talks with Gérard Mourou, *Optics and Photonics News*, special issue: *Lasers* **21**(5), 12 (2010).
- [7] J. Hecht: „A new generation of laser weapons is born“, *Laser Focus World* **46**, 36 (2010).