

VLÁKNOVÉ LASERY DOBÝVAJÍ SVĚT!

■ Obr. č. 1 – Optická vlákna jako svítící dekorace



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

Laser není úplně nový vynález, vřdyt v roce 2010 oslavil už kulatou padesátku! Říká se s nadsázkou, že padesátka u člověka je něco mezi maturitním večírkem a krematoriem. Je to zralý věk, kdy má člověk zkušenosti, ale většinou už moc nepřekvapí. U lidských vynálezů to může být úplně jinak a lasery jsou toho příkladem – i ve zralém věku dokázaly pěkně překvapit!

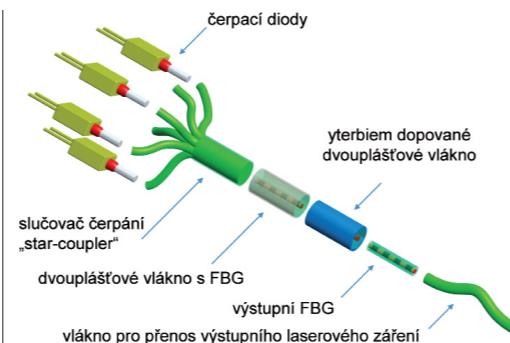
Máme na mysli především skupinu laserů, kterým se říká vláknové. A pod termínem vláknové myslíme vlákna optická. Leckdo je má doma jako příjemnou dekoraci, která se líbí hlavně dětem (obr. 1). Především jsou ale

záření, jež v současnosti nachází stále širší a širší uplatnění. Vláknové lasery začínají nahrazovat starší typy laserů a otevírají zcela nové obzory v řadě oborů – od lékařství přes měření času až po obranné systémy.

Klíč ke globálnímu internetu

Na začátku současného rozmachu vláknových laserů stál vláknový zesilovač, známý také pod zkratkou EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier). V polovině 90. let minulého století tato součástka způsobila revoluční změnu v telekomunikacích. Byl to právě vláknový zesilovač, který umožnil skutečně globální rozvoj rychlého internetu.

Jak ve skutečnosti může vypadat takový optický zesilovač EDFA, vidíte na obrázku č. 2. Optický signál je zesilován díky iontům vzácných zemin – erbia, kterými je dopováno několik metrů dlouhé vlákno. energii erbovým iontům dodává laserová dioda (polo-



■ Komponenty pláštěm čerpaného vláknového laseru

VÝHODY VLÁKNOVÝCH LASERŮ

VYSOKÁ ÚČINNOST

Notoricky známým nedostatkem většiny laserů vždy byla jejich zoufale malá účinnost – v řádu jednotek procent. Laserové diody mají účinnost celkem dostačující, dokážou převést 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 je obsaženo v široce rozšířeném a nekvalitním



Skleněná „preforma“ dvouplášťového optického vlákna

svazku. To často brání jeho využití v praxi. Optické vlákno pak může být tím magickým chybějícím článkem řetězu, který konvertuje nekvalitní světlo do jediného, vysoce

jasného laserového svazku (viz obr. 3).

JSOU ROBUSTNÍ A KOMPAKTNÍ

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

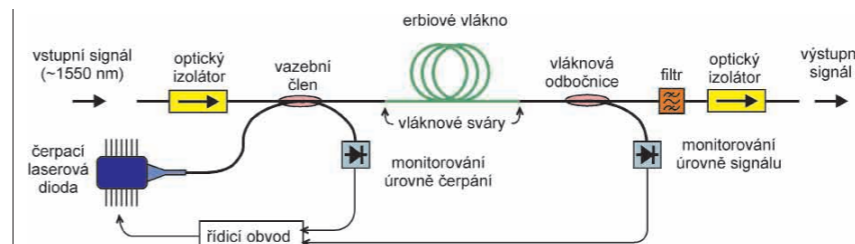
NEVYŽADUJÍ SLOŽITÉ CHLAZENÍ

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

dro obsahuje prvky vzácných zemin. Může to být erbium, jako v zesilovači EDFA, případně ytterbium nebo thulium. Systém zpětné vazby vytvoříme např. vložením zesilovače mezi dvě zrcadla. Jedno ze zrcadel je pro tento typ světelného signálu polopropustné a vychází jím výstupní laserové záření. Zrcadla mohou být vytvořena z odrazných vrstviček na koncích vlákna.

Užitečné telekomunikační součástky

Častým řešením zrcadel je také navaření vláknových mřížek (FBG – Fiber Bragg Grating) na vláknový zesilovač. FBG je vlastně úsek vlákna, podél kterého se periodicky mění



■ Obr. č. 2 – Schéma vláknového zesilovače EDFA

vodičová součástka, v níž dochází k přeměně elektrické energie na laserové záření). Erbiové vlákno zesílí signál až 10 000x. 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. 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.

Jak vznikne vláknový laser?

Každý laser se skládá z optického zesilovače, jehož výstupní signál se vrací zpětnou vazbou znovu na vstup. Zesilovač musí být koherentní, tedy musí zachovávat vlastnosti zesilovaných částic světla (fotonů). V případě vláknových laserů je zesilujícím médiem optické vlákno, nejčastěji takové, jehož já-

jeho optické vlastnosti – index lomu. Při výrobě FBG se změny indexu lomu dosahuje například ozářením ultrafialovým laserovým světlem. Tato periodická mřížka pak bude odrážet pouze světlo s takovou vlnovou délkou, která odpovídá dvojnásobku mřížkové periody – všechny ostatní vlnové délky bude propouštět. FBG jsou běžně používány v optických telekomunikačních sítích, např. pro oddělení optického signálu do komunikační linky nebo pro přidání nového signálu. Použití vláknových mřížek je jedním z mnoha příkladů, jak se v konstrukci vláknových laserů s výhodou využívá vyspělá technologie, vyvinutá původně pro optické komunikace. Podrobněji jsme psali o FBG a jejich použití v senzorech pro bezpečnost dopravních staveb v Panoramě 21. století č. 2/2012 v článku *Jak si posvítit na tunel?*

PIONÝR I REKORDMAN

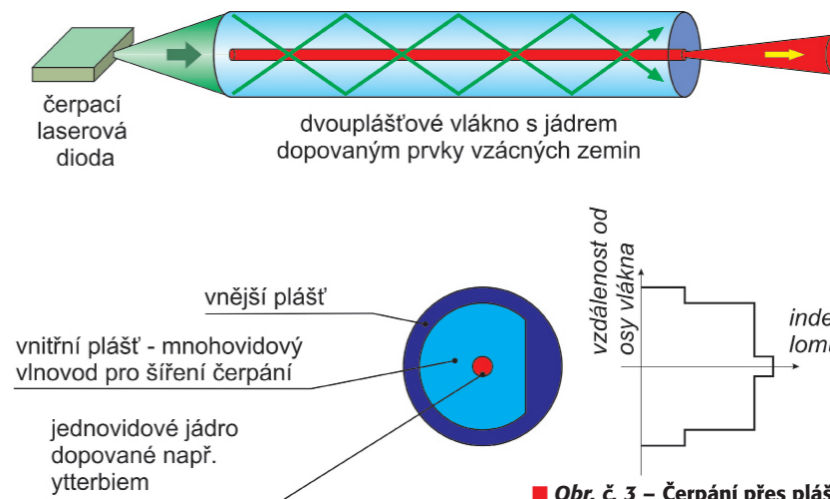
Rekordy ve výkonových vláknových laserech drží IPG Photonics, dnes již firma s globální působností. Vyrábí lasery s vůbec největším průměrným výkonem, které je možné koupit. Počátky firmy můžeme vystopovat v začátku 90. let v laboratorních Ústavu radiotechniky a elektroniky Ruské akademie věd.



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 artilerie, byl v Bělorusku zajat a několik let byl v koncentračním táboře. Od něj se po válce Gapontsev naučil, jak je důležité zůstat silný tvář v tvář protivitenství a nepřízní osudu. Sám o tom napsal: „Nedokážu si představit důležitější lekcí 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. ■

Cesta k vysokému výkonu

V posledních letech jsme svědky strmého nárůstu výkonu vláknových laserů. Paradoxně k tomu přispěla i nerozumnost burzovních makléřů na přelomu tisíciletí. Přecenili trh globálního internetu, vyšroubovali ceny akcií telekomunikačních a internetových firem příliš vysoko a o to tvrdší byl jejich pád. Tzv. „telekomunikační bublina“ splaskla v roce 2000 a měla dopad nejen na teleko-

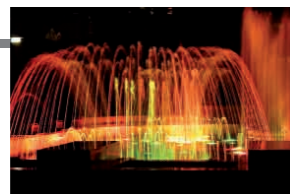


■ Obr. č. 3 – Čerpání přes plášť: Dvouplášťová vlákna transformují velmi rozbíhavý svazek z laserové diody do málo rozbíhavého laserového svazku

■ PŘIPOMEŇTE SI

OPTICKÉ VLÁKNO

Jde o válec z nejméně dvou průsvitných částí (jádra a pláště), které mají mírně odlišné složení materiálu, většinou křemenného skla. Válec je velmi tenký, typicky osminu milimetru, takže se dá ohýbat. 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

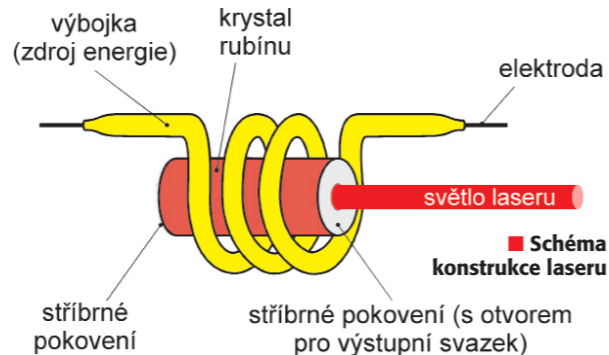


■ Křížiková fontána v současnosti

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



■ Šíření světla v optickém vlákně



■ Schéma konstrukce laseru

Tyndall a u nás František Křížík (1847–1941).

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

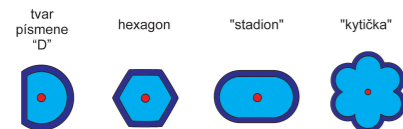
se skládá ze tří hlavních částí: aktivního prostředí, zdroje energie a rezonátoru. První laser sestavil Theodor Maiman v roce 1960. Svítil červeně, a to díky zesilování světla ionty chromu v krystalu rubínu. Zrcadla rezonátoru tvořila postříbená čela rubínu a energii dodávala výbojka z fotoblesku. ■

munikace, ale i na celé hospodářství, zejména v USA a Evropě. Výzkum i výroba v oblasti EDFA se tedy začaly soustředit i na jiné oblasti než na telekomunikace.

Z pohledu fyziky umožnila radikálně zvýšit výkon především metoda čerpání přes plášť, jak je vidět z obrázku 3. Ionty vzácných zemin jsou obsaženy v jádře, které je obklopeno dvěma pláštěmi. Čerpání se snadno navazuje do širokého vnitřního pláště, zatímco v tenkém jádře je generován laserový signál. Tímto způsobem je možno transformovat vysoce rozbíhavý svazek z laserových diod do kvalitního laserového svazku s malou rozbíhavostí.

Kruhové tvary se nehodí

Samotnou myšlenku čerpání přes plášť si nechal patentovat již v 70. letech minulého století Robert Maurer ze skláren Corning Incorporated v USA. Tentýž Maurer, jehož tým vyrobil v roce 1970 první optické vlákno s nízkými ztrátami, a tedy prakticky použitelné v telekomunikacích. Tehdy však nebyly k dispozici dostatečně výkonné čerpací laserové diody. A bylo třeba vyřešit řadu dalších výzkumných problémů. Např. se ukázalo, že klasický kruhový tvar průřezu vlákna je ten nejméně vhodný. Většina paprsků v plášti totiž obíhá kolem jádra – nemůže být tedy absorbována v jádře a předat tak energii aktivnímu prostředí (některé vhodné tvary průřezu vidíte na obrázku 4). Také bylo třeba vymyslet, jak sloučit záření z několika čerpacích diod dohromady a při-



■ Obr. č. 4 – Příklady průřezů vláken vhodných pro čerpání přes plášť

padně i přidat nebo naopak oddělit vlastní signál laseru.

Preciznost pro nej přesnější měření času

Vláknové lasery dnes najdeme v řadě deklárních zařízení. Jsou například součástí optických atomových hodin, které by měly 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 (jeho stáří odhadujeme na 15–20 miliard let). Hřeben optických frekvencí je čítačem, který přivede dokonale přesně frekvence optického oscilátoru do oblasti, kde je již umíme zpracovávat elektronicky.

Pomocník lékaři

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 „cetéčko“. Lékaři tak snáze odhalí poškození oka nebo začínající rakovinu kůže.

Hrubá síla pro vrtání betonu

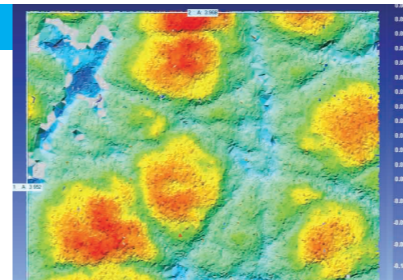
Kromě precizní práce se vláknové lasery osvědčují i jako hrubá síla. Hodí se k řezání a sváření, v průmyslu a také ve stavebnictví.



■ Svařování materiálu vláknovým laserem

tví. 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. Rozřezá-



■ Sken reliéfu formy, která se používá pro lisování plastových dílů interiéru automobilů. Povrch je strukturován výkonovým laserem.

valy by se jimi víc než metr silné betonové obálky jaderných reaktorů.

Nástroje pro průmysl i 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 vstříkovačích trysek pro benzínové a diesellové 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.

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 k výraznému snížení ceny a miniaturizaci mohou brzo 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

Není divu, že vláknové lasery lákají i vojáky. V roce 2010 zničil laser letící balistickou

raketu. Šlo o megawattový chemický laser, nesený letadlem Boeing 747. 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.

Co nás čeká?

I když už dobývají staré trhy a umožňují nové aplikace, řada témat ve výzkumu vláknových laserů je stále nedořešena a vynořují se nové otázky. Jednou z nich jsou dosud málo prozkoumané nestabilní stavy vláknových laserů, které mohou být pro jejich činnost zničující. Samovolně vybuzený gigantický optický impuls může dokonce vytvořit z části skleněného jádra plazmovou kuličku, šířící se rychlostí kolem 1 m/s. Tento jev je naštěstí zcela ojedinělý a pozorován byl pouze v laboratoři. I méně „efektní“ nestability však mohou způsobit destrukci jak laseru, tak i připojených zařízení.

Méně nebezpečí pro naše oči

Vývoj směřuje také k vláknovým laserům na nových vlnových délkách vyzařovaného světla. Kromě už běžných 1 a 1,5 mikrometru je dnes aktuální výzkum laserů pro zdroj záření v oblasti UV záření a především ve střední infračervené oblasti světelného spektra (od 2 k 5 mikrometrům). V průmyslu se často používají lasery na vlnové délce kolem 1 mikrometru, které mohou snadno poškodit sítnici oka. Oproti tomu thuliové vláknové lasery na vlnové délce 2 mikrometry poškodí oko až při víc než 1000x větší intenzitě. Někdy se proto nazývají jako „oku bezpečné“ či „eye-safe“ lasery.

Dalším žhavým tématem výzkumu je také kombinování laserových svazků. Podaří-li se sfázovat několik vláknových laserů do jediného svazku, celkový výstupní výkon by byl řádově vyšší. O této možnosti zpočátku uvažoval i francouzský fyzik Gérard Mourou, duchovní otec „super laseru“ ELI, který se buduje ve středočeských Dolních Břežanech. Tam by bylo třeba sloučit výstupy tisíců vláken a to je zatím nereálné očekávání. Zařízení ELI (Extreme Light Infrastructure) má být nejvýkonnějším laserem na světě a již po roce 2015 by mělo sloužit výzkumu v oblasti fyziky, optiky, nanotechnologií, medicíny či farmacie.

Možná se dočkáme od vláknových laserů ještě dalších překvapení. Doufejme, že budou dobývat svět hlavně svými výhodami pro mírové použití, a ne válečné. ■

Pavel Peterka

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i.,
www.ufe.cz

Článek vznikl ve spolupráci
s firmou LAO – průmyslové systémy, s.r.o.



■ Obranný systém amerického námořnictva pro ničení taktických zbraní obsahuje 6 samostatných vláknových laserů, sloučených do jediného svazku