

1. PRINCIP přenosu světla optickým vláknem (vnitřní totální odraz).



Snímek ÚFE AV ČR

téma – vlákno

# Srdce nejvýkonnějších laserů 21. století

## OPTICKÁ VLÁKNA PRO VLÁKNOVÉ LASERY

V technice o vláknech hovoříme jako o „strukturách s kruhovou symetrií, jejichž délka je mnohonásobně větší než radiální rozměr“. Většinou jsou vyráběna z dielektrik (z polymerů nebo ze skla) a používají se jako vlákna textilní, termoizolační nebo optická. Ta posledně jmenovaná využíváme každodenně pro přenos informací – při telefonování a přístupu k internetu, při platbě kartou, často při sledování televize... Slouží ale i ve vláknových laserech, které nacházejí uplatnění v medicíně, v obraně nebo v základním výzkumu.

text **IVAN KAŠÍK, PAVEL HONZÁTKO, PAVEL PETERKA**

**OPTICKÁ VLÁKNA** musí mít střed (světlovodné jádro) z vysoce čistého materiálu, o vyšším indexu lomu, než je okolí jádra (tzv. optický obal). Díky těmto vlastnostem

dochází k jevu zvanému totální vnitřní odraz a světlo je přenášeno z jednoho konce na druhý (obr. 1).

Optické vlákno je vynález z poloviny šedesátých let minulého století, kdy vznikla

nejen první optická vlákna, ale současně i lasery a vláknové lasery nutné pro optický přenos. Pro nás může být zajímavé, že první optické vlákno s tenkým jádrem umožňujícím šíření jen jediného módu (paprsku) pro přenos informací připravila v roce 1964 ve Francii skupina Jean-Claude Simona a Ericha Spitze, rodáka z Brna (viz rámeček). Tato struktura vlákna zaručovala nízké zkrácení přenášeného signálu, ale vlákna ještě měla vysoký útlum a nehodila se pro dálkový přenos.

Optická vlákna se dočkala ocenění Nobelovou cenou v roce 2009 (Charles K. Kao). Za vláknové zesilovače, umožňující optický přenos mezi kontinenty, byl vedoucí výzkumného týmu z Univerzity v Southamptonu v Anglii David N. Payne v roce 2013 povýšen britskou královnou do rytířského stavu. Vynález laseru byl oceněn nejvyšším vědeckým oceněním již v roce 1964 (Charles H. Townes, Alexandr M. Prochorov a Nikolaj G. Basov), vláknové lasery na svoje docenění teprve čekají.

## VLÁKNOVÉ LASERY

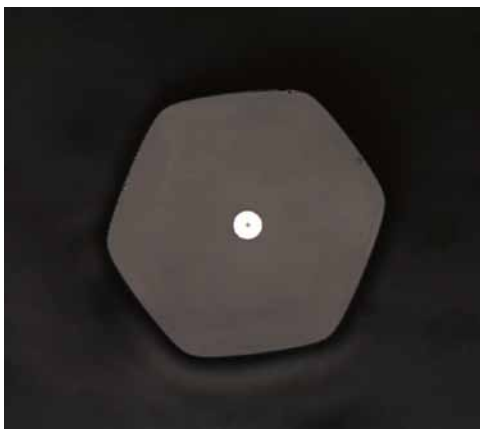
Srdcem vláknových laserů jsou speciální optická vlákna, která slouží jako aktivní prostředí (viz Vesmír 103, 706, 2024/12). To znamená, že světlo (světelná energie) je generováno přímo jádrem optického vlákna, které však musí mít specifické vlastnosti. Vlákna pro vláknové lasery se od běžných telekomunikačních vláken liší tím, že zpravidla obsahují určité množství iontů prvků vzácných zemin (lanthanoidů)<sup>1</sup> a často nemají kruhovou strukturu. Namícháním správného složení optického jádra lze dosáhnout různé vlnové délky záření laseru (jeho „barvy“ – obr. 5). Tvarováním vláken (obr. 2), umožňujícím vytváření tzv.

**Dr. Ing. IVAN KAŠÍK** (\*1963) absolvoval Fakultu chemicko-technologickou VŠCHT v Praze. V Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR se podílí na výzkumu a vývoji speciálních vláken pro vláknové lasery a zesilovače.

**Dr. Ing. PAVEL HONZÁTKO** (\*1966), viz s. 267.

**Doc. Ing. PAVEL PETERKA, Ph.D.**, (\*1970) studoval na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské a Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze. Je ředitelem Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, věnuje se výzkumu vláknových laserů a zesilovačů, vyučuje na FJFI ČVUT.

1) Tyto prvky byly hlavním tématem Vesmíru 2026/2, pozn. red.



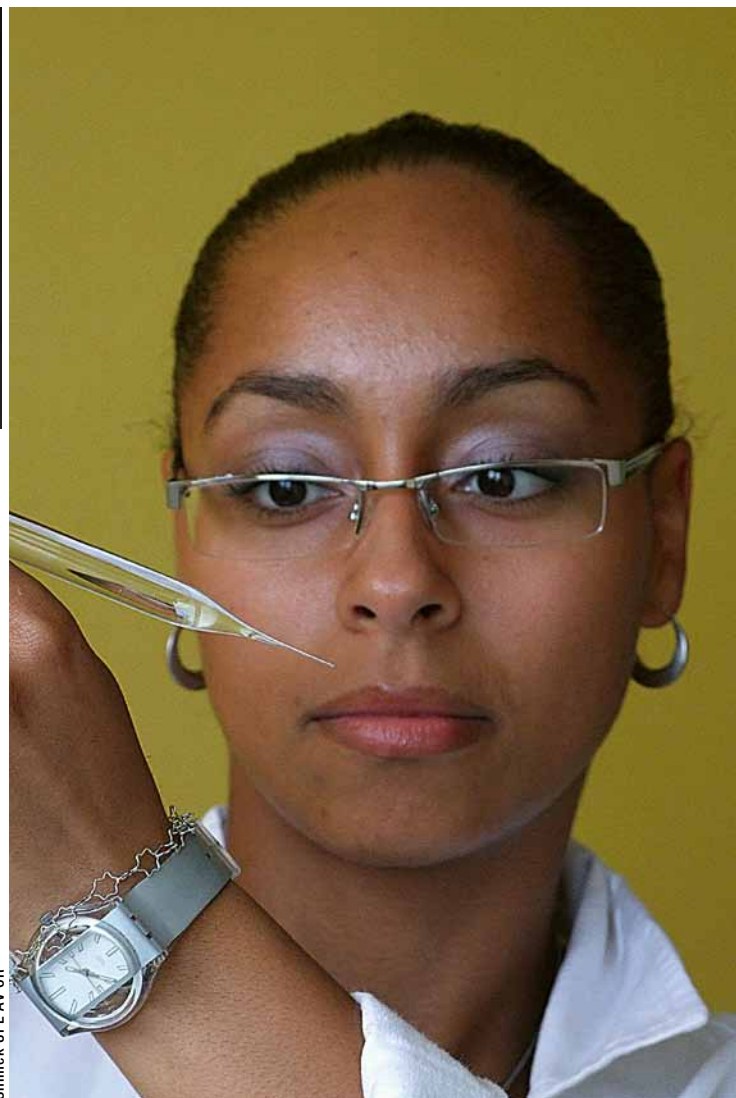
2. Nahoře: **MIKROFOTOGRAFIE** nekruhového příčného řezu speciálním vláknem pro vláknové lasery.  
3. Vpravo: **PREFORMA** z křemenného skla pro tažení speciálních optických vláken.

double-clad (dvoupláštových) struktur, lze často dosáhnout zvýšení účinnosti, a tím i výkonu vláknového laseru.

Oproti jiným typům laserů mají ty vláknové řadu předností - mají skvělou účinnost, vysoký jas, jsou kompaktní, vzhledem k jejich rozměrům je lze dobře čerpat i chladit, a jejich paprsek je na výstupu téměř nerozbitelný. První široce využívané vláknové lasery byly založeny na vlákně obsahující v jádře ionty erbia (obr. 5), emitující výkon v řádu miliwattů na vlnové délce okolo 1550 nm. V průmyslu se široce využívají vláknové lasery dopované ytterbiem, emitující na vlnových délkách v okolí jednoho mikrometru (1000 nm), s výkonem v řádu stovek wattů až jednotek kilowattů. Pro výjimečné aplikace jsou tyto lasery komerčně dostupné s výkonem přesahujícím 100 kilowattů. Pro obranné aplikace byl demonstrován vláknový laserový systém s výkonem přesahujícím 300 kilowattů a vysoce kvalitním výstupním svazkem. Takového výkonu se při zachování kvality svazku podařilo dosáhnout koherentní kombinací množství jednotlivých vláknových laserových zesilovačů.

Předmětem současného výzkumu jsou vlákna emitující i na delších vlnových délkách až do 2250 nm s výkonem ve stovkách wattů až kilowattů (více o nich níže). Na těchto vlnových délkách lasery fungují díky dopování optických vláken ionty thulia a holmia (obr. na obálce tohoto čísla Vesmír). Díky dlouholetému výzkumu dnes účinnost např. holmiových vláknových laserů dosahuje téměř teoretických hodnot, v praxi přibližně až 86 % při výkonu v desítkách wattů z jediného vlákna.

Pro činnost laseru je klíčová kvalita speciálního optického vlákna. To má mít takové složení jádra, aby nejen emitovalo záření na



Snímek ÚFE AV ČR

## Erich Spitz

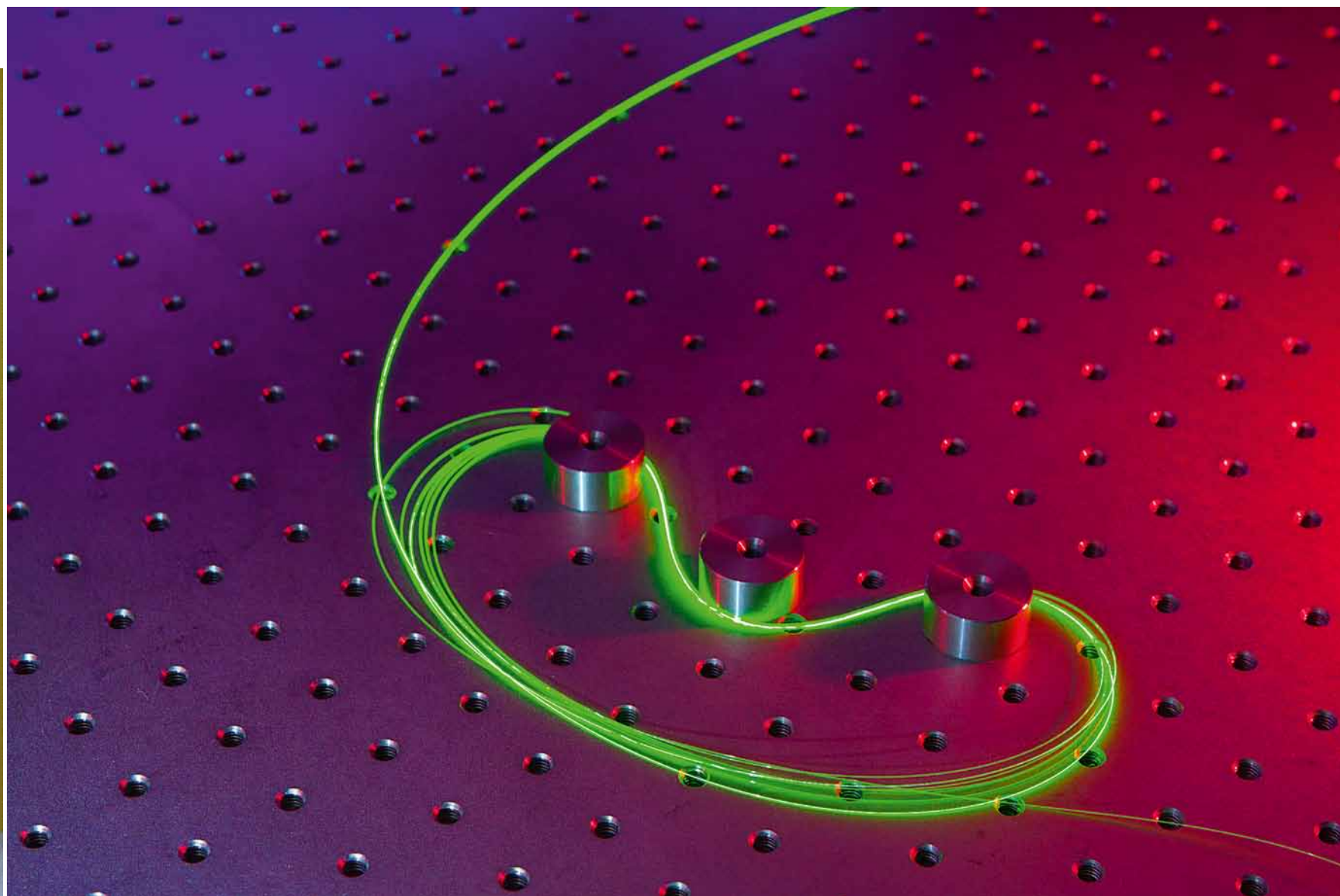
**ŽIVOTNÍ PŘÍBĚH** Ericha Spitze je fascinující a vysoce aktuální. Narodil se v Brně v roce 1931, válku prožil v pekle Terezína. Studoval na Elektrotechnické fakultě ČVUT v Praze, kde v roce 1954 promoval. Po roce (1957–1958) stráveném na observatoři v Meudonu, kde se

věnoval radioastronomii, se připojil k Compagnie générale de la télégraphie sans fil (CSF), která se v roce 1968 sloučila s francouzskou společností Thomson-Houston, posléze Thales. Od roku 1968 byl vedoucím laboratoře, v roce 1983 byl jmenován technickým ředitelem výzkumu společnosti



4. **ERICH SPITZ** (uprostřed) a Pavel Peterka (vlevo) při návštěvě v laboratořích Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR v roce 2019.

Snímek ÚFE AV ČR



Snímek ÚFE AV ČR

Thomson a od roku 1986 zástupcem generálního ředitele pro výzkum a technologie této firmy. Kromě toho byl v letech 2001 až 2009 předsedou a generálním ředitelem společnosti Thales Avionics LCD SA.

Je členem Francouzské akademie věd, Francouzské technologické akademie (NATF), Švýcarské akademie inženýrských věd (SATW), České inženýrské akademie a dalších prestižních vědeckých a inženýrských organizací. Je držitelem více než devadesáti patentů za průkopnickou práci v oblastech 3D holografických pamětí, koherentního šíření světla v optických vlákněch a optického zápisu. V současné době žije ve Francii, ale protože stále cítí vazbu k rodné zemi, pravidelně se i přes svůj vysoký věk vrací do České republiky. Potkává se zde s pamětníky, ale svou dávnou osobní zkušenost se zlem, kterému je vždy třeba se postavit, sdílí i se studenty.

## 5. VLÁKNO pro erbiový vláknový laser.

požadované vlnové délce a s co nejlepší účinností, ale aby pokud možno neemitovalo na žádné jiné (parazitní) vlnové délce. Současně takové vlákno má mít co nejnižší základní optické ztráty, tedy ztráty v oblastech spektra mimo absorpce použitých lanthanoidů. Nedostatky v jeho kvalitě se mohou projevit ve sníženém výkonu vláknového laseru, jeho přehřívání, nevhodné vlnové délce emise ap.

### VÝROBA OPTICKÉHO VLÁKNA

Příprava speciálních optických vláken je úloha technologicky nesnadná. Nejprve se vyrobí tyčka - tzv. preforma (obr. 3). Ta se zpravidla vyrábí některou z metod depozice z plynné fáze (CVD - z angl. *Chemical Vapor Deposition*), která zaručuje dosažení vysoké čistoty optického materiálu (obr. 6). Preformy mají zpravidla kruhový tvar, který může být dodatečně upraven pomocí laserového opracování, přesného mechanického řezání nebo broušení diamantovými nástroji.

Ve druhém kroku se preforma vytáhne do vlákna o potřebných geometrických

rozměrech a vlákno se současně pokryje polymerní vrstvou, aby se uchovaly jeho dobré mechanické vlastnosti. Těmi se rozumí především pevnost (v tahu), která je lepší než pevnost měděných drátů srovnatelného průměru. Důležitý je i minimální poloměr ohybu, který závisí na průměru vlákna: čím tenčí vlákno, tím je tento poloměr menší. Pro telekomunikace se táhnou vlákna o průměru 125  $\mu\text{m}$  (0,125 mm), s polymerní vrstvou dohromady 250  $\mu\text{m}$ . Taková vlákna se navijí na cívky obvykle o průměru okolo 30 cm. Mechanicky je lze namotat na prst, aniž by praskla, ale příliš velký ohyb má negativní vliv na jejich optické ztráty. Obvyklým minimálním průměrem tažených vláken je 80 mikrometrů; taková vlákna v experimentu obstála i pro textilní zpracování. Na druhé straně lze běžně táhnout vlákna o průměru 0,6–1,0 mm. K vidění jsou i vlákna o průměru 2,0 mm, kde bychom už spíše čekali tuhé rovné tyčky. Taková kouzla dokáže se skleněným vláknem provést polymerní ochrana, je-li správně aplikována.



6. PŘÍPRAVA PREFOREM pro tažení optických vláken dopovaných ionty thulia a nanočásticemi oxidu hlinitého metodou depozice z plynné fáze MCVD.

Snímek Zuzana Havlíková

Polymerní ochrana je nanášena pomocí trysky umístěné v ose tažící sestavy až v samém konci tažící věže. Ta je vysoká obvykle 5 až 20 metrů. Začíná v horní části peci na 2100 °C, do které se podáváním postupně zakládá preforma. Když za těchto vysokých teplot preforma změkne, odkápnou kapka, která za sebou gravitací táhne skleněné vlákno. Jeho průměr je okamžitě bezkontaktně změřen a informace je sdílena ve zpětné vazbě s navíjecím mechanismem vlákna ve spodní části věže. Po odstřížení kapky je vlákno zavedeno do tohoto navíjecího mechanismu a zpětná vazba (regulátor) zajišťuje dodržování přesného průměru skleněného vlákna. Úloha je technicky náročná, protože je vyžadována vysoká přesnost (přibližně v rámci 1 μm). Jinak by hrozily potíže, vlákno by například nešlo spojovat pomocí konektorů. Ve spodní části tažící věže jsou také umístěny jednotky pro nanášení polymeru a jeho vytvrzování ultrafialovým světlem nebo tepelně.

Většina vláken pro vláknové lasery se táhne z preforem na bázi čistého křemenného skla (čistého oxidu křemičitého) s příměsí iontů lanthanoidů. Překážkou v přípravě preforem je skutečnost, že lanthanoidy i v minimálním množství (na úrovni setin procenta) způsobují odmísení nebo krystalizaci skla, které je doprovázeno intenzivním rozptylem, a vlákno se tak stává

nepoužitelné. Přítomnost právě přítomnost lanthanoidů ve skle je příčinou stimulované emise laserů. Úkolem technologií je tedy najít cestu, jak protichůdné vlivy vyřešit. Jejich práce tak často připomíná činnosti spíš známé z pohádky o chytré horáknyni. Jedním z nalezených řešení je přimíchání dalších modifikujících oxidů, např. oxidu fosforečného nebo oxidu hlinitého. Oxid hlinitý (na rozdíl od oxidu fosforečného) sám

o sobě není sklotvorný, a tak je do preforem vnášen speciálně vyvinutou technologií ve formě nanočástic. Z toho můžeme vidět, jak moderní nanotechnologie vstupují do našich každodenních životů.

**VÝHODY DVOU MIKROMETRŮ**  
Výzkumníci u nás i po celém světě se v poslední dekádě věnují výzkumu vláknových laserů pracujících v oblasti okolo

2 mikrometrů z několika důvodů. Prvním z nich je skutečnost, že jsou šetrnější k lidskému oku (tzv. „eye-safe“) a v případě nežádoucí interakce laserového záření se zrakem nemusí nutně dojít k závažnějším poškozením sítnice. Pro vlnové délky nad 1,4 mikrometru je totiž práh poškození sítnice posunut více než o čtyři řády, a to díky absorpci záření ve vodě v oku. To samozřejmě neznamená, že je možné oči vystavovat přímému záření těchto laserů vyšších tříd, jejichž interakce s okem vždy vede k závažnému poškození nebo ztrátě zraku. Ale třeba odražené paprsky takto mohou být méně nebezpečné.

Druhým důvodem jsou široké možnosti jejich použití, např. pro obrábění plastů, pro řadu aplikací interní medicíny nebo dermatologie. V těchto oblastech již vyvinutá thuliová nebo holmiová vlákna a vláknové lasery nacházejí komerční využití. V souvislosti se současnou situací se stále častěji zvažuje jejich použití také pro ochranu kritických infrastruktur a pro obranné účely. V těchto oblastech mohou sloužit např. jako optické zdroje pro senzory využívající neviditelné záření, ale pomalu se začíná naplňovat i vize jejich použití pro poškozování nebo ničení různých cílů. V delší perspektivě se uvažuje o jejich použití pro datový přenos ve volném prostoru. To znamená, že třeba v kosmu by takové laserové systémy mohly sloužit k navigaci nebo vzájemné komunikaci satelitů, nutně bezdrátově.

V současné době se výzkumný tým Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR ve spolupráci s dalšími špičkovými pracovišti v ČR a ve světě zabývá výzkumem nových odolných materiálů, které by přispěly k využití laserů pro kosmické účely. Pod tím si lze představit např. ochranu Země před srážkami s náhodnými kometami nebo asteroidy, které stále častěji předpovídají astronomické modely. To je ale zatím hudbou vzdálené budoucnosti. Úlohou v podstatně bližším časovém horizontu by měl být úklid kosmického „smetí“ vzniklého lidskou činností (např. nefunkčních satelitů nebo jejich zbytků), pohybujícího se na nízké oběžné dráze.<sup>2</sup>

Zvláštní kapitolou výzkumu speciálních optických vláken pak tvoří dutá křemenná vlákna, kde se světlo (světelná energie) šíří v dutině o přesných rozměrech (viz následující článek). ●

*Výzkum byl podpořen projektem GAČR 23-05701S Cooling: Překonání teplotních omezení thuliových vláknových laserů a infrastrukturním projektem LasApp: Průlomové laserové technologie pro chytrou výrobu, vesmírné a biotechnologické aplikace, který je spolufinancovaný EU prostřednictvím OP JAK MŠMT ve výzvě Špičkový výzkum, č. projektu CZ.02.01.01/00/22\_008/0004573.*

2) Aktuální témata výstižně shrnuje plný název námi řešeného projektu LasApp, viz poděkování na konci článku.

# Optická vlákna, která nebrzdí světlo

**Klasická optická vlákna přenášejí světlo díky totálnímu vnitřnímu odrazu na rozhraní skleněného jádra a obalu. V optických vláknech s dutým jádrem se ale světlo šíří vzduchem nebo jiným plynem. Toto řešení otevírá cestu k přenosu světla na dříve nemyslitelných vlnových délkách a s výrazně nižším útlumem.**

text **PAVEL HONZÁTKO**

**KDYŽ V ROCE 2011** publikoval Andrej D. Pryamikov článek o dutém optickém vláknu s osmi kapilárami rozmístěnými podél vnitřního obvodu, málokdo tušil, jaký směr nabere další vývoj. Ale již tato první

navzájem dotýkat a každá byla spojená s pláštěm optického vlákna jen podél jedné linie. Navzdory tomu světlo nevytékalo mezi kapilárami z jádra rychleji a optický útlum se dokonce snížil. Pro podobnost

**„V konvenčních optických vláknech se poztrácí 90 % fotonů při šíření na vzdálenost 50 km, u nového typu optických vláken při šíření na vzdálenost 200 km.“**

práce naznačila, že půjde o něco výjimečného. Představila totiž antirezonanční křemenné optické vlákno s dutým jádrem, které vedlo světlo ve střední infračervené oblasti, na vlnové délce 3,8 μm, kde je křemenné sklo neprůhlednou zdí.

V té době se již optická vlákna etablovala pro přenos datových toků v internetu i v telekomunikacích. Využívalo se ale jen několik úzkých spektrálních oblastí s nízkým optickým útlumem, nejčastěji spektrální okno okolo vlnové délky 1,55 μm.

O dva roky později přišla zásadní inovace vnitřní struktury antirezonančních vláken s dutým jádrem. Kapiláry se přestaly

se zásobníkem revolveru se pro ně ve slovenských jazycích rychle ujalo označení revolverová vlákna, zatímco v anglosaských zemích se zpravidla mluví o tubulárních vláknech, hypocykloidních vláknech nebo, zůstaneme-li u angličtiny, *negative-curvature hollow-core fibres*.

O skutečný průlom se pak postaral Francesco Poletti (obr. 2). V laboratořích jeho týmu na Univerzitě v Southamptonu vzniklo v roce 2015 první vlákno s vnořenými kapilárami. Do každé z kapilár se vnořila ještě menší kapilára, podobně jako v matřičce. Vlákno mělo daleko k dokonalosti a změněný optický útlum byl vysoký,



7. MODERNÍ VYBAVENÍ tažičky optických vláken.

Snímek Zuzana Havlíková