



Snímek Zuzana Havlíková

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

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.²

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

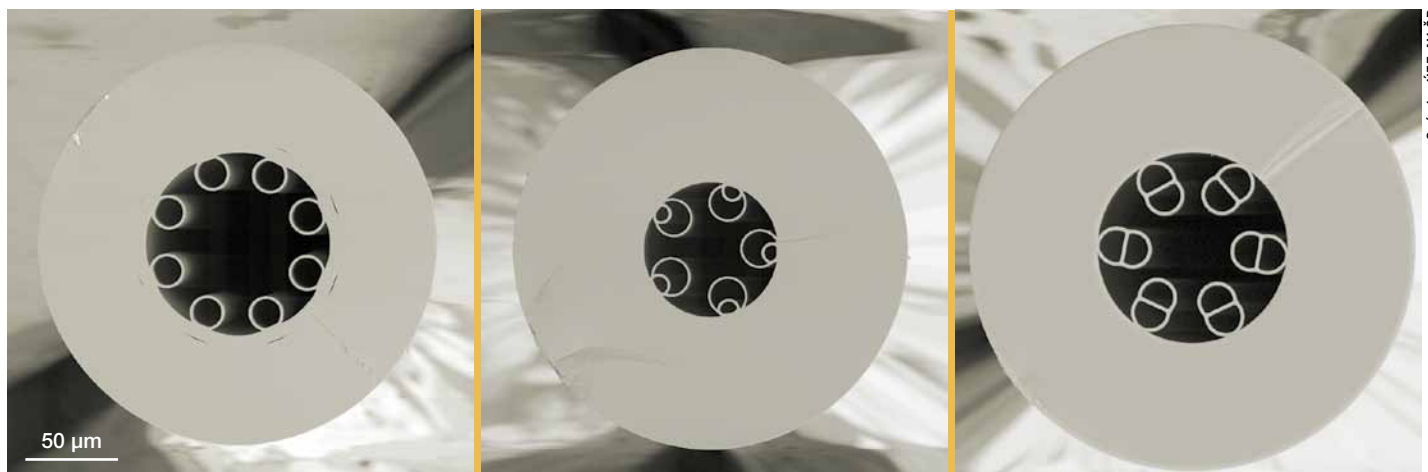
se zásobníkem revolveru se pro ně ve slovenských jazycích rychle ujalo označení revolverová vlákna, zatímco v anglosaských zemích se zpravidla mluví o tubulárních vláknech, hypocykloidních vláknech nebo, zůstaneme-li u angličtiny, *negative-curvature hollow-core fibres*.

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,



Snímek Zuzana Havlíková

7. MODERNÍ VYBAVENÍ tažičky optických vláken.



Snímky ÚFE AV ČR

Antirezonanční optická vlákna z ÚFE

V ÚSTAVU FOTONIKY A ELEKTRONIKY AV ČR (ÚFE) rozvíjíme technologii tažení antirezonančních optických vláken s dutým jádrem od roku 2019. Vlákna se táhnou na tažících věžích z preforem (viz s. 261), které jsou v tomto případě složené ze

substrátové trubice a kapilár. Vědci z našeho týmu připravili optická vlákna s jednoduchými i vnořenými kapilárami a rovněž s kapilárami typu θ (théta). Ty získaly svůj název podle tvarové podobnosti s písmenem řecké abecedy (obr. 1). Díky blízkým průměrům obou částí kapiláry je tažení vláken

1. VYBRANÁ antirezonanční optická vlákna s dutým jádrem připravená v Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR ve skenovacím elektronovém mikroskopu. **A.** Revolverové optické vlákno s osmi kapilárami. Antirezonanční optické vlákno s vnořenými kapilárami (**B**) a s θ -kapilárami (**C**).

s θ -kapilárami o něco jednodušší než tažení vláken s vnořenými kapilárami. Výzkumný tým se zabývá mj. citlivostí těchto vláken k akustickému vlnění.

ale numerické simulace provedené Polettiho týmem a nezávisle i Waltrem Belardim naznačovaly, že ve srovnání s jednoduchou revolverovou strukturou by mělo být možné vícenásobným vnořením kapilár snížit útlum o dva i více řádů. Následující léta probíhalo zdokonalování technologie tažení antirezonančních vláken s dutým jádrem a hledání jejich optimální struktury, zejména počtu kapilár, průměru jádra, průměru kapilár a tloušťky jejich stěn.

ÚTLUM A PŘENOSOVÉ PÁSMO

V roce 2022 se poprvé podařilo snížit útlum tohoto typu optických vláken pod hodnotu 0,2 dB/km. Tato hranice byla považována za magickou. Jde o typický útlum telekomunikačních optických vláken na vlnové délce 1,55 μm . Optická vlákna s útlumem 0,2 dB/km byla považována za dokonalá. Jejich útlum není způsoben absorpcí na nečistotách, ale rozptylem světla drobnými fluktuacemi indexu lomu v jádře, který se označuje jako Rayleighův rozptyl. Konvenční křemenná vlákna dosáhla tohoto stupně dokonalosti v roce 1979. Za dalších 47 let se tuto hodnotu podařilo snížit jen nepatrně, na hodnotu 0,1397 dB/km ve speciálních optických vláknech pro podmorské kabely. A do tohoto hájemství razantně vtrhla antirezonanční optická vlákna s dutým jádrem. Mezi léty 2022 a 2025 se podařilo snížit jejich

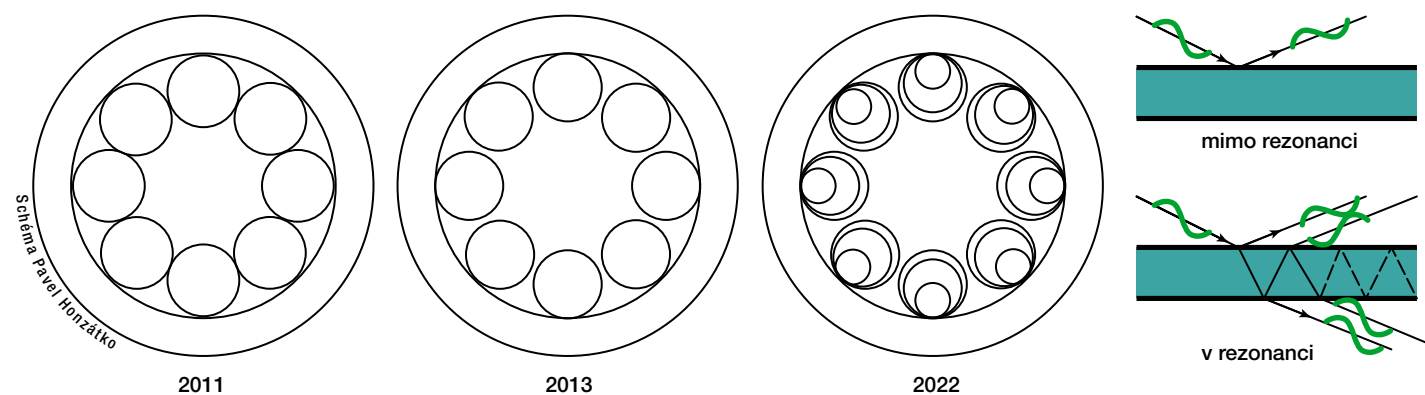
útlum z 0,174 dB/km na 0,05 dB/km. V konvenčních optických vláknech se poztrácí 90 % fotonů při šíření na vzdálenost 50 km,

u nového typu optických vláken při šíření na vzdálenost 200 km. Za malým útlumem stojí velmi slabá interakce vedeného světla



Snímek SPIE, ÚFE

2. FRANCESCO POLETTI, autor optických vláken s vnořenými kapilárami, strhujícím způsobem podal příběh vynálezu optických vláken s dutým jádrem a rekordně nízkým útlumem ve své plenární přednášce na kongresu SPIE Optics + Optoelectronics v dubnu 2025 v Praze.



3. ANTIREZONANČNÍ optická vlákna vedou světlo uvnitř dutého jádra. K vytvoření vlnodné struktury nepotřebují germanium ani jiné dopanty. Díky menšímu indexu lomu se v nich světelné signály šíří rychleji. Svůj název odvozuji od charakteristických spektrálních pásů s nízkým útlumem, které jsou vzájemně oddělené rezonančními pásy, v nichž světlo z jádra volně vytéká kvůli potlačení odrazu od prvků struktury destruktivní interferencí (podrobněji v textu).

se strukturou vlákna a nízkým Rayleighův rozptyl ve vzduchu uvnitř jádra.

Malým útlumem ale zázračné vlastnosti antirezonančních optických vláken s dutým jádrem nekončí. S útlumem těsně souvisí přenosové pásmo. V konvenčních optic-

kde dosahují nejmenšího optického útlumu. Konvenční křemenná optická vlákna vůbec nevedou světlo pod vlnovou délkou 180 nm a nad vlnovou délkou 2200 nm. Nový typ křemenných optických vláken byl naproti tomu použit v experimentech od vlnové

„Nový typ křemenných optických vláken byl použit v experimentech od vlnové délky 65 nm v extrémní UV oblasti až po vlnovou délku 6,1 μm ve střední infračervené oblasti.“

kých vláknech se pro telekomunikační účely historicky používala tři přenosová okna: okolo vlnové délky 850 nm, kde byly již v sedmdesátých letech k dispozici ledky a později lasery, okolo vlnové délky 1300 nm, kde mají tato vlákna nejmenší disperzi, a tedy nejvyšší schopnost přenést signály bez zkreslení, a okolo vlnové délky 1550 nm,

délky 65 nm v extrémní UV oblasti až po vlnovou délku 6,1 μm ve střední infračervené oblasti.

PÁSOVÁ STRUKTURA

Antirezonanční optická vlákna s dutým jádrem mají charakteristickou pásovou strukturu. Transmisní pásy jsou navzájem oddělené rezonančními pásy, ve kterých světlo vytéká z jádra ven a vlákno nevede světlo. Proto se těmto optickým vláknům říká antirezonanční. Jde o analogii Fabryho-Perotova etalonu s téměř tečným (klouzavým) dopadem paprsku na vstupní okno. Při klouzavém dopadu je odrazivost skla vysoká a světlo do stěny kapilár téměř neproniká. Je-li vlnová délka signálu v rezonanci s tloušťkou stěny kapiláry, malá amplituda pole, kterému se do stěny kapiláry přece jen podaří proniknout, se skládá ve fázi s polem, které v ní již bylo. Postupně se ve stěně kapiláry akumuluje pole s velkou amplitudou. Toto pole se vyznačuje na obě strany stěny kapiláry. Směrem do jádra se složí v protifázi s odraženým světlem a tento odraz eliminuje. Takovému skládání amplitud se říká destruktivní interference. Ve výsledku může rezonanční signál volně

procházet stěnou kapiláry a uniknout z jádra ven (obr. 3). Optické vlákno takový signál nevede. Poloha rezonančních vlnových délek, stejně jako poloha a šířka transmisních pásů mezi nimi je dána tloušťkou stěny kapilár.

Dalším důležitým parametrem při přenosu informací na dlouhé vzdálenosti je doba šíření, od které se odvíjí např. doba latence v datových centrech. Signály se v optických vláknech samozřejmě šíří rychlostí světla, a ta je v konkrétním prostředí dána podílem rychlosti světla ve vakuu a efektivního indexu lomu toho kterého prostředí. V konvenčních vláknech je efektivní index lomu okolo 1,44, zatímco v antirezonančních vláknech s dutým jádrem je efektivní index lomu přibližně 1. Signálu tak stačí k překonání kilometrové vzdálenosti doba 3,3 μs , zatímco v konvenčním vláknu na to potřebuje 4,8 μs .

OD TELEKOMUNIKACÍ PO SPEKTROSKOPII

Oblastí využití vlastností antirezonančních optických vláken je mnoho. V budoucnosti mohou nahradit konvenční optická vlákna v telekomunikačních systémech, protože dokážou překlenout delší vzdálenosti bez nutnosti regenerace signálu. Mohou přenášet data velkou rychlostí v datových centrech nebo telemetrické signály v energetických a signalizačních soustavách, kde o výši škody mohou rozhodovat mikrosekundy. Po naplnění inertním plynem s vysokým fotoionizačním potenciálem se dají použít k přenosu energetických ultrakrátkých optických pulzů, a dokonce k jejich kompresi. Nácházejí použití v ultracitlivé spektroskopii, kde nahrazují nákladné mnohaprůchodové plynové cely. S vhodným plynem mohou konvertovat světlo do ultrafialové i střední infračervené oblasti. ●

Vývoj antirezonančních optických vláken je podporován infrastrukturním projektem LasApp: Průlomové laserové technologie pro chytroú výrobu, vesměrná a biotechnologická aplikace, který je spolufinancovaný EU prostřednictvím OP JAK MŠMT ve výzvě Špičkový výzkum, č. projektu CZ.02.01.01/00/22_008/0004573.

Dr. Ing. PAVEL HONZÁTKO (*1966) získal doktorát na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy. Zabývá se výzkumem vláknových laserů a zesilovačů. V Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR vede tým vláknových laserů a nelineární optiky, který se snaží prolomit stávající výkonná omezení thuliových a holmioých laserů.