

3/2011

st SDĚLOVACÍ technika

telekomunikace – elektronika – multimédia

PŘÍSTUPOVÉ

optické sítě zrychlují na 10 Gb/s

KOMUNIKAČNÍ

systemy pro perspektivní pásma

MULTIMEDIÁLNÍ

systemy v brněnském centru SIX

SMART GRIDS

další milník procesu digitalizace

PASIVNÍ

součástky a senzory z Lanškrouna

GENESIS – Let there be Chips!

IGBT Module from Vishay and EBV for Use in
Photovoltaic Systems in Private Homes



EBVElektronik

| An Avnet Company |



CENA 38 Kč/1,80 €

ISSN 0036-9942 BŘEZEN 2011

Novinová zaslilka – povolila ČP, s. p., OZ Praha, č. j. 813/92-NP ze dne 6. 8. 1992. Placeno v hotovosti.

Optická vlákna se dočkala Nobelovy ceny za fyziku

Úvod

Telekomunikační optická vlákna získala 10. prosince 2009 Nobelovu cenu, více než 43 let od zveřejnění průlomového Kaova a Hockhamova článku v červenci 1966. Od té doby vláknové optické komunikace fascinujícím způsobem změnila sdělovací techniku. Zřejmě je to na vývoji transatlantických kabelů. Koncem 50. let minulého století bylo dosaženo rekordních 36 simultánních hlasových volání, první podmorský optický kabel z roku 1978 měl více než tisícinásobnou kapacitu, a kapacita kabelu TAT-14 v roce 2000 byla dokonce větší než poptávka. Vývoj transatlantických kabelů TAT je ukázán v tabulce 1. Ke zrodu optických vláken přispělo mnoho brilantních mozků, a přestože oceněný Charles Kuen Kao (obr. 1) měl vskutku výraznou pionýrskou úlohu, jde do jisté míry o počtu pro myšlenku samotnou a lidi, kteří

ní ochrannou vrstvou a jeho celkový průměr je 0,25 mm.

Počátek historie optických vláken lze najít hluboko v 19. století, kdy Daniel Colladon, profesor na univerzitě v Ženevě, ukázal na svých přednáškách vedení světla v laminárním proudu vody vytékajícím z nádrže (rok 1841). Sluneční světlo nechal procházet vodní nádrží a zaměřil je na otvor, kterým vytékal proud vody. Světlo lapené v proudu vody totálními odrazy na rozhraní voda-vzduch opouštělo proud vody, jen pokud se laminární proud rozrušil na kapky nebo když narazil na pevnou překážku. V zatemněném auditoriu to byl jev velmi působivý. Colladon uskutečňoval tyto pokusy kromě Ženevy i v Paříži a v Londýně a jeho světelná fontána byla používána v představeních v pařížské Opeře. Svou světelnou fontánu pečlivě popsal ve fran-

vilo mnoho, významu a rozšíření v praxi dosáhly zvláště svazky vláken pro přenos obrazu. Poprvé se podařilo takovým svazkem přenést obraz, kterým bylo rozžhavené vlákno žárovky, studentu medicíny v Mnichově Heinrichu Lammovi v roce 1930. Problém šíření elektromagnetických vln v dielektrických válcových vlnovodech, resp. „drátech“, byl řešen i teoreticky. Již v roce 1910 se jím zabývali Hondros a Debye, tehdy se zřetelem na kmitočty pásma rádiových vln, a na optických kmitočtech koncem 50. a začátkem 60. let Eli Snitzer, Cavour Yeh a další, zvláště s ohledem na použití svazků optických vláken pro endoskopy.

Výrazného pokroku v přenosu obrazu bylo dosaženo v 50. letech, kdy bylo navrženo, že jednotlivá vlákna budou tvořena silným jádrem pokrytým tenkým pláštěm z materiálu s nižším indexem lomu. Začátkem 60. let již byly ohebné vláknové optické endoskopy využívány v lékařství.

Hledá se řešení pro komunikace: mikrovlny, nebo světlo?

Na přelomu 50. a 60. let dvacátého století telekomunikační společnosti dychtivě prahly po metodě přenosu stále většího a většího množství informací, aby byly schopny uspokojit požadavky spojené s růstem využívání televize a telefonu. Výzkum byl směřován k přenosu na vyšších frekvencích, které by takový nárůst umožnily. Jedna z možností, přenos informace atmosférou elektromagnetickými vlnami, je omezena na frekvence nižší než asi 10 GHz, resp. vlnové délky menší než 3 cm. Záření kratších vlnových délek již „vidí“ hydrometeory, jako jsou vodní kapky, mlha, sníh, a nelze je pro spolehlivý přenos atmosférou použít. Proto se ještě začátkem 60. let minulého století zdálo, že rostoucí požadavky na šířku pásma páteřních přenosových tras pokryjí mikrovlnné vlnovody. Jejich výzkumu se věnovalo množství výzkumných týmů jak akademických pracovišť, tak velkých telekomunikačních společností podporovaných bohatými rozpočty. Americký telefonní gigant AT&T a jeho chlouba, výzkumné Bellovy laboratoře, prosazovaly trubkové mikrovlnné vlnovody, které by byly uloženy v hloubce větší než 1 m v co nejpřímějších liniích mezi vzdálenými ústřednami a podporovaly by preferenční šíření jediného příčného vidu na frekvenci 50 GHz. Další nadějnou cestou, povzbuzovanou i závody v dobývání vesmíru, byla družicová komunikace.

Tabulka 1 Vývoj transatlantických kabelů TAT

Rok uvedení do provozu	Název	Šířka pásma, resp. přenosová kapacita	Počet hlasových kanálů	Použité klíčové technologie
1956	TAT-1	150 kHz	36	koaxiální kabel, elektronky, analogový přenos
1959	TAT-2	230 kHz	48	koaxiální kabel, elektronky, analogový přenos
1963	TAT-3	1,1 MHz	138	koaxiální kabel, elektronky, analogový přenos
1965	TAT-4	1,1 MHz	138	koaxiální kabel, elektronky, analogový přenos
1970	TAT-5	6 MHz	845	germaniové tranzistory
1976	TAT-6	30 MHz	4000	křemikové tranzistory
1978	TAT-7	30 MHz	4000	křemikové tranzistory
1988	TAT-8	280 Mb/s	40 000	optická vlákna, $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$, digitální přenos
1992	TAT-9	560 Mb/s	80 000	optická vlákna, $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$, digitální přenos
1992	TAT-10	1,1 Gb/s	120 000	optická vlákna, $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$, digitální přenos
1993	TAT-11	1,1 Gb/s	120 000	optická vlákna, $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$, digitální přenos
1996	TAT-12/13	30 Gb/s	614 000	optické zesilovače (EDFA)
2000	TAT-14	1,87 Tb/s	> 13 000 000	optické zesilovače (EDFA)

k ní přispěli. O některých okolnostech tohoto procesu pojednává tento článek.

Na začátku byly fontány a endoskopy

Princip vedení světla optickým vláknem je překvapivě jednoduchý, jde v podstatě o využití jevu úplného odrazu světelného paprsku. Optické vlákno je válcový dielektrický vlnovod z transparentního materiálu, tvořený jádrem a pláštěm, přičemž jádro má vyšší index lomu než plášť. Na obr. 2 je zobrazena struktura optického vlákna. Paprsky, které dopadají na rozhraní jádra a pláště pod úhlem větším, než je mezní úhel, se úplně odrážejí (totální odraz) a jsou jádrem vedeny. Optické vlákno, které je jednovidové na vlnových délkách 1300 i 1550 nm, má typicky průměr jádra 8 μm a průměr křemenného pláště 125 μm . Křemenné vlákno je ještě pokrýváno polymer-

couzsky psaném časopise *Comptes Rendus*. Mezi další známé příklady Colladonových fontán patří ukázky Ira Johna Tynalla v Londýně (rok 1853), světelné fontány na světové výstavě v Paříži (1889) a také Křížíkova fontána na Výstavišti v Praze (rok 1891). Od vedení světla vodním proudem je jen krůček ke skleněným světlovodům. Však také po Colladonově článku v *Comptes Rendus* na tuto možnost poukázal francouzský optik Jacques Babinet a navrhl využít zahnutý skleněný světlovod k osvětlování v zubním lékařství. Ale vzhledem k tisícileté sklářské tradici nepředpokládal, že by byl první, kdo takovou věc navrhl nebo použil, a pravděpodobně měl pravdu. Sklářští mistři si již dříve museli všimnout, jak září konečky skleněných tyček vytahovaných z pece. Návrhů různých dalších způsobů použití se obje-

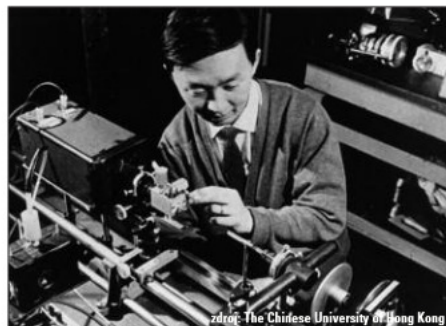
Rozsvícení prvního laseru Theodorem Maimanem v roce 1960 stimulovalo myšlenky využít pro komunikace frekvence z optického spektra, u nichž by byl přínos pro šířku pásma enormní. Z prostého poměru frekvencí je zřejmé, že zatímco mikrovlny by přinesly jen malé zlepšení, vlnové délce světla přibližně 1 μm odpovídá frekvence 300 THz. Světlo tedy nabízelo potenciálně více než 10 000krát větší přenosovou kapacitu než dosavadní rádioréleové spoje! Bylo vykonáno mnoho pokusů využít laserové světlo pro přenos informace atmosférou, ale bez valného úspěchu. Proto byly poté rozpracovávány různé metody optických vlnodů, jako byly konfokální čočkové vlnovody, plynové čočky vzniklé zahříváním plynu v trubici, popř. trubice s reflexním vnitřním povrchem.

Optická vlákna byla rovněž na seznamu možných světlovodů, ale názor na jejich využití v praxi byl značně skeptický. Ta skepse měla dva zjevné důvody: disperzi a útlum. Vliv disperze na přenos informace lze pochopit z následující představy. Obecně je vhodné přenášet informaci pomocí jednoho příčného elektromagnetického vidu. Při mnohovidovém šíření se totiž rozšiřují pulzy (disperze) nesoucí informaci v čase, protože každý pulz je složen z mnoha elektromagnetických vidů vlnovodu. Jednotlivé vidy se ve vlnovodu šíří po různých drahách, a každému tedy trvá jinou dobu, než dorazí od vysílače k příjemci. U dostatečně dlouhého vlnovodu nelze dva pulzy následkem jejich rozšíření od sebe vůbec rozeznat a přenos informace již není možný. S přechodem na jednovidový režim, odstraňující mezividovou disperzi, souviselo i další omezení. Průměr skleněného jednovidového vlnovodu na optických frekvencích by musel být zlomek vlnové délky, tedy několik desetin mikrometru, zatímco mikrovlnné vlnovody byly připravovány s příčnými rozměry řádově centimetry. Představa práce s tak tenkými skleněnými vlákny odrazovala, protože se v té době neuvažovalo o možnosti optického vlnovodu se skleněným pláštěm.

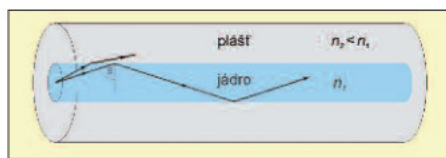
Druhým problémem přenosu informace vlákny byl útlum a ztráty skleněných materiálů. Tehdy používaná optická skla měla útlum okolo 1000 dB/km. To znamená, že po 10 m vlákna je na výstupu pouhá desetina vstupního výkonu, po 20 m setina a po 100 m nelze již téměř žádný výkon naměřit. Není divu, že když v optice vesměs málo zběhlí mikrovlnní inženýři poznali, jaký mají dostupná optická skla útlum a jak titěrné by byly jednovidové skleněné vlnovody, museli sledat ideu komunikací po optických vláknech vskutku pošetitou. Americká pracoviště, včetně Bellových laboratoří, nepovažovala optická vlákna jako přenosové médium pro komunikace za významné.

Myšlenkou využít skleněná vlákna pro komunikace se začátkem 60. let navzájem

nezávisle zaobíraly jen dva malé týmy. Jedním byla skupina ve Standard Telecommunications Laboratory nedaleko Londýna vedená Tony Karbowiakem, Polákem, který bojoval proti nacistům ve Velké Británii a po válce se tam usadil. Karbowiak na tento výzkum angažoval dva mladé doktorandy: Charlese Kuena Kaoa a George



Obr. 1 Charles Kuen Kao



Obr. 2 Struktura optického vlákna

A. Hockhama. Druhou skupinou byl laboratorní tým francouzské firmy CSF (Compagnie générale de télégraphie Sans Fil) pod vedením Ericha Spitze, původem z Brna. Po absolvování ČVUT byl E. Spitz v roce 1956 jako vědecký aspirant (v současné terminologii doktorand) 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. V laboratořích CSF se zabývali především mikrovlnnými vlnovody, ale po vynálezu laseru hledali i cesty pro přenos světla. Inspirováni skleněnými vlákny s pláštěm pro optické endoskopy, které mají co největší jádro a tenký plášť, navrhli opak: tenké jádro, umožňující jednovidové šíření světla, a relativně silný plášť. Nejen že s takovým vláknem lze snáze pracovat, ale také velikost jádra může být při malém rozdílu indexu lomu jádra a pláště zhruba desetkrát větší, než když je jádro obklopeno vzduchem (při zachování jednovidového šíření světla) a lze do něj lépe navázat světlo [3]. Jde o koncept tzv. slabého vedení vln, který později elegantně teoreticky rozpracoval pro optická vlákna v Bellových laboratořích německý výzkumný pracovník Detlef Gloge. Erich Spitz a jeho spolupracovníci si dobře uvědomovali, že nejnižší známý útlum mají křemenná skla. Ve filiálce skláren Saint-Gobain specializované na přípravu syntetického křemene nechali vyrobit z křemenného skla skleněnou tyčku – preformu. Křemenné

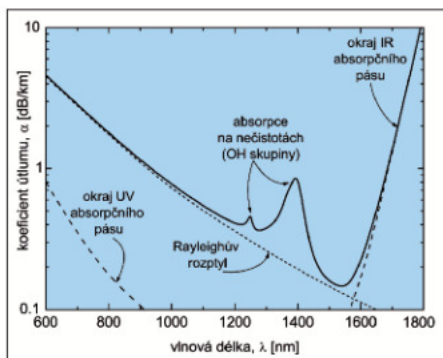
sklo má oproti jiným sklům vysokou teplotu zpracování, přibližně 2000 °C, a bohužel se jim nepodařilo najít vhodnou pec schopnou zahřát křemennou preformu tak, aby z ní mohli táhnout vlákno. Spěchajíce připravit jednovidové vlákno, obrátili se k multikomponentním sklům s nižší teplotou tání používaným pro vlákna pro endoskopy. Ve sklárnách Saint-Gobain si nechávali vyrobit preformy a sami si improvizovaným způsobem připravovali vzorky vláken. Na konec preformy připevnili závaží, preformu nahřáli letovací lampou, a tak byli schopni vytáhnout vlákna délky až několik metrů. Jádra vláken měla jen několik mikrometrů, takže po navázání červeného světla heliového-neonového laseru do vlákna mohli na výstupu sledovat stopu pole odpovídající pouze základnímu vidu. Když v roce 1965 navštívil tuto laboratoř F. F. Roberts z British Post Office spolu s Kaem z STL, byli překvapeni, neboť ačkoliv také uvažovali o skleněném vlákně pokrytém pláštěm (např. z ledu, imerze apod.), celoskleněné jednovidové vlákno k dispozici neměli. Jednovidová optická vlákna byla na světě, zbývalo ovšem vyřešit zásadní problém útlumu, neboť útlum vláken z CSF byla stovky decibelů na kilometr (dB/km).

Kaova příležitost

Tony Karbowiak z STL prosazoval vedle vláken jako vhodné přenosové médium planární jednovidový optický vlnovod z plastového pásku tloušťky jen několik desetin mikronu. Jeho teoretické výpočty dávaly slibné výsledky, ztráty vycházely jen několik decibelů na kilometr, takže zhruba polovina optického signálu zbývala i po kilometru šíření. Pak požádal své dva mladé kolegy, aby jeho myšlenku ověřili. Vlákna se tak dostala až na druhé místo. Kao a Hockham experimentovali s pásky polyetyleny a podařilo se jim připravit ultratenký pásek plastu, připomínající spíše olejovou blánu, a navázat do něj světlo heliového-neonového laseru. Jakmile ho však položili na zakřivenou plochu, červené světlo náhle ozářilo stěny zatemněné laboratoře. Světlo z ohnutého vlnovodu nezděržitelně unikalo ven. To byl konec jejich výzkumu povrchových vlnodů, neboť byly v praxi nepoužitelné. Ve stejné době dostal Tony Karbowiak nečekanou a velmi lákavou nabídku na místo vedoucího katedry elektrického inženýrství v dalekém australském New Walesu a této nabídce neodolal. Kao se stal místo něj vedoucím miniprogramu optických vlnodů. Po odchodu Karbowiaka se plně soustředil na myšlenku, která se mu zdála slibnější – optická vlákna s pláštěm.

Kuen Kao se narodil v Šanghaji 4. listopadu 1933 v pohnuté době občanské války vládnoucího Kuomintangu s komunisty a krutých agresivních výpadů sebevědo-

mého Japonska. Jeho otec, soudce, se přesto snažil vést rodinu v tradičním čínském stylu. Současně s klasickým čínským vzděláním poskytl svým synům výuku francouzštiny a angličtiny v mezinárodní škole v Šanghaji. Kaova rodina válku sice přežila, avšak v roce 1948 uprchla před komunistickým násilím z pevninské Číny do Hongkongu ovládaného Brity. Jako další čínští žáci v britských školách, přijal i Kuen Kao anglické jméno – Charles. Zpočátku ho lákala chemie, ale na konci základní školy se obrátil k elektronice a sdělovací technice, kdy sestavoval běžné elektronické úlohy, jako třeba rozhlasový přijímač „krystaliku“. Protože žádná čínská vysoká škola nenabízela studium elektroniky, odjel v roce 1952 studovat do Londýna. Anglické kosmopolitní prostředí se mu zalíbilo, po absolvování elektrotechniky na *University of London* v roce 1957 nastoupil do STL a brzo se zde seznámil a pak oženil s mladou kolegyní pocházející z čínské rodiny, ale narozenou již ve Velké Británii. V roce 1960 se krátce vrátil na univerzitu, ovšem lákavá nabídka pracovat na doktorátu přímo v STL ho přiměla se vrátit. Kombinace školy a práce byla náročná, ale finančně zají-



Obr. 3 Spektrální závislost útlumu optického vlákna z křemenného skla

mavější, než vést odříkavý život doktoranda. Neoddechl si příliš ani doma, kde pomáhal vychovávat svého malého syna a dceru [4].

Kao a Hockham začali podrobně analyzovat možnosti optických vláken. Hockham prováděl výpočty tolerancí na fluktuace rozměrů jádra vlákna a své výpočty ověřil na modelovém vlnovodu z oblasti mikrovl. Kao se soustředil na otázku transparentnosti dostupných optických materiálů. Hledal ve vědecké literatuře, oslovoval experty, ale vesměs jen shledával, jak málo se o problému ví. Jako by byl první, kdo si podobné otázky klade. Nelze se tomu příliš divit, nikdo předtím neměl důvod posílat světu těmito materiály dále než na vzdálenosti několika centimetrů. Kao se setkával jen s obecnou odpovědí, že za ztráty mohou nečistoty ve skle. Jeho však zajímalo víc, hledal fundamentální omezení transparentnosti skel. Po výpočtech došel k závěru, že ztráty jsou dány absorpčními pásy skla samotného (vibračními přechody molekul skla v infračerveném pásmu a elek-

tronovými přechody v UV oblasti), Rayleighovým rozptylem na náhodně rozložených nehomogenitách struktury skla a zejména absorpcí na příměsích, nečistotách ve skle. Tyto ztrátové mechanismy jsou naznačeny na obr. 3. Dospěl k povzbudivým výsledkům: pokud by se podařilo snížit koncentrace nečistot, především železa a přechodových kovů, ztráty dané absorpcí skla samotného a Rayleighovým rozptylem by



Obr. 4 Příprava preformy optického vlákna na sklářském soustruhu s kyslíko-vodíkovým hořákem v laboratoři technologie optických vláken ÚFE



Obr. 5 Preforma optického vlákna zasunutá do grafitové pece v nejhořejší části jedné ze dvou tažících věží pro přípravu experimentálních optických vláken v ÚFE

byly jen několik decibelů na kilometr. Kao a Hockham zaslali podrobnou analýzu vlastností optických vláken v listopadu 1965 k publikaci do britského časopisu *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* [2]. Kromě ztrát skla a fluktuací rozměrů popsali vlastnosti elektromagnetických módů vlákna, ohybové ztráty, disperzi signálu a z ní vyplývající omezení na šířku pásma. Článek po revizích vyšel v červenci 1966; podobné výsledky publikovala francouzská skupina o dva měsíce později v časopise *L'Onde Electronique*.

Zatímco firma CSF zastavila pokračování ve výzkumu optických vláken pro telekomunikace, Kao viděl budoucnost telekomunikací právě v jednoduché a elegantní myšlence optických vláken. Naštěstí našel pochopení u svých nadřízených a mohl ve výzkumu čistých skleněných materiálů pokračovat. Aby mohl vůbec měřit nízký útlum čistých skel s přesností na jednotky tisícín decibelu na metr, vyvinul nový, velmi cit-

livý spektrometr, který byl schopen detekovat rozdíly v útlumu dvou skleněných tyček s rozdílem délek pouhých 20 cm. Byl též zapáleným šířitelem myšlenky vláknových optických komunikací. Na svých „misijních cestách“ po světě se často setkával s nepochopením a nezájmem, ale postupně další výzkumná pracoviště mu uvěřila a „naskakovala na vlak“ jeho směru výzkumu. Když v roce 1969

naměřil ztráty syntetického křemenného skla pouhých 5 dB/km, začaly se vážně zabývat vláknovými optickými komunikacemi i Bellovy laboratoře.

Zlom nastal ve sklárnách Corning

Jedním z pracovišť, kde se dozvěděli o Kaově návrhu, byly sklárny Corning ve stejnojmenném maloměstě na severozápadě státu New York. Ačkoliv většina ostatních pracovišť zavrhovala křemenné sklo pro příliš vysokou teplotu tání a nízký index lomu, pro Corning byl tento materiál přirozenou volbou. Ve 30. letech dvacátého století zde Frank Hyde vyvinul novou metodu na přípravu čistého syntetického křemene, hydrolyzu v plameni (flame hydrolysis). Výzkumem optických vláken se začal zabývat Robert D. Maurer a pod jeho vedením zvláště dva čerství absolventi doktorského studia Peter Schultz a Donald Keck. Nejprve vytvářeli preformu vlákna metodou „tyčka v trubce“, kdy ve válci z čistého křemene nechali vyvrtat otvor, do kterého vložili tyčinku z křemenného skla dopovaného titanem. K zahřátí preformy na teplotu tažení použili jedinou pec dostupnou ve sklárnách Corning (a pravděpodobně unikátní i mezi jinými sklárnami), schopnou zahřát sklo na více než 2000 °C. Postupně se zde podařilo vytáhnout jednovidové vlákno, ale útlum byl dokonce větší než ve vláknech pro endoskopy. Schultz s Keckem usoudili, že útlum je způsoben bublinkami na rozhraní jádra a pláště a zbytky po mechanickém leštění povrchů. Použili proto metodu leštění plamenem a místo zasouvání jádrové tyčky nanесли originální metodou saze SiO_2 a TiO_2

přímo na vnitřní povrch trubky. Trvalo ale dlouho, než tento proces vedl k použitelným výsledkům. Z důvodu vytváření barevných center na molekulách TiO_2 při vysokých teplotách tažení bylo např. nutné vlákno žíhat při teplotách 800 až 1000 °C, čímž se však vlákno stávalo velmi křehkým a v nejnepohodnější okamžik praskalo. Po několika letech základního materiálového výzkumu přišel zlomový moment v roce 1970, kdy na cívce s 200 m jednovidového vlákna naměřili magický útlum 16 dB/km na červené vlnové délce heliového-neonového laseru.

Na většině dalších pracovišť se zpočátku soustředili na snížení útlumu konvenčních optických multikomponentních skel. Výsledky ze skláren Corning stimulovaly rozšíření výzkumu křemenného skla pro optická vlákna i na jiných pracovištích. V roce 1971 John MacChesney s kolegy z Bellových laboratoří začal dopovat jádro pro zvýšení indexu lomu místo oxidu titaničitého oxidem germaničitým, při jehož použití se netvoří barevná centra. Vyvinuli za tímto účelem tzv. modifikovanou metodu nanášení z plynné fáze (Modified Chemical Vapour Deposition, MCVD), která je jednou z nejvýznamnějších metod přípravy preforem optických vláken dodnes.

Několik postřehů z dalšího vývoje ve světě i u nás

S návazností na pokrok v oblasti přípravy optických vláken byla již v roce 1975 instalována první nevýzkumná optická přenosová trasa v Dorsetu v Anglii a za rok poté byla prezentována japonskými firmami NTT a Fujikura Cables první optická vlákna s útlumem pouhých 0,47 dB/km na vlnových délkách minimální chromatické disperze v okolí 1,2 až 1,3 μm . Další převratnou událostí v oblasti vláknových optických komunikací bylo objevení vláknových zesilovačů dopovaných erbiem (Erbium-Doped Fiber Amplifiers, EDFA), jejichž zavedení umožnilo podstatně lépe využít enormní šířku pásma optických vláken a posílat po jednom vlákně několik signálů na různých vlnových délkách, tzv. vlnový multiplex (Wavelength Division Multiplexing, WDM). To je však už jiný příběh, jiný objev, který si možná zaslouží jednu z příštích Nobelových cen. Zájemci si mohou přečíst o EDFA více v Československém časopise pro fyziku v překladu článku Emmanuela Desurvira, francouzského fyzika pracujícího v 80. a 90. letech z Bellových laboratoří [5]. Rekordním přenosem po jednom vlákně je nyní 25,6 Tb/s, kdy bylo multiplexováno 320 signálů, každý s kapacitou 80 Gb/s, na 160 různých vlnových délkách a ve dvou ortogonálních polarizacích po 240 km vlákna. Odhaduje se, že v současnosti jsou po světě instalována optická vlákna v délce okolo jedné

miliardy kilometrů. Globální rozšíření širokopásmových sítí, které umožnilo rychlý rozvoj internetu, způsobilo až nezdravou euforii obchodníků na Wall Streetu a vedlo k nadhodnocení telekomunikačních technologií. Nevyhnutelné splasknutí tzv. telekomunikační bubliny nastalo v roce 2001. Rozvíjely se pak intenzivněji i jiné než telekomunikační aplikace optických vláken, např. vláknové senzory a vláknové lasery,



Obr. 6 Kónický přechod z preformy na vlákno vzniklý v grafitové peci tažící věže z obr 5

kteří v mnoha aplikacích začínají nahrazovat konvenční pevnolátkové lasery. Firma IPG-Photonics Valentina Gapontseva, který s vláknovými lasery začínal v Ústavu radiotechniky a elektroniky Akademie věd SSSR ve Frjazinu nedaleko Moskvy, nedávno oznámila kontinuální vláknový laser s výkonem přesahujícím 10 kW v kvalitním, difrakčně limitovaném svazku. V současnosti je vysoce aktuální výzkum metod koherentního slučování jednotlivých svazků, díky nimž se očekává možnost kontinuálně generovat záření s výkonem řádu stovek kilowattů.

V bývalém Československu bylo první optické vlákno připraveno v roce 1980 v Československé akademii věd v oddělení optických vláken Společné laboratoře silikátů ČSAV a VŠCHT, pozdějším Ústavu skelných a keramických materiálů ČSAV. Toto oddělení přešlo v roce 1993 do Ústavu radiotechniky a elektroniky (ÚRE) AV ČR, dnešního Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) AV ČR, v. v. i. V tomto oddělení byla v letech 1980 až 1990 vyvinuta kompletní technologie přípravy optických vláken první a druhé generace, která byla předána do poloprovozu ve Sklo Unionu Teplice. V ÚRE byla vyvíjena měřicí zařízení jak pro optické trasy, např. optický reflektometr pro měření útlumu, tak pro výrobu vláken, jakým bylo zařízení pro měření průměru taženého vlákna, a řídicí systém pro tažení. První optická trasa byla položena mezi Dejvicemi a Smíchovem v roce 1985 a obsahovala spolu s japonskými kabely i vlákno československé výroby. V roce 1990 se však Sklo Union Teplice rozhodl sou-

středit na jiný typ výroby a technologii optických vláken prodal do zahraničí. Optická vlákna se v ČR nyní připravují pouze v ÚFE, a to pro potřeby výzkumu (viz obr. 4 až obr. 6). Mezi aktuální řešení problémy patří základní materiálový výzkum vláken, včetně přípravy nanostrukturovaných jader dopovaných prvky vzácných zemin, popř. prvky přechodových kovů pro vláknové lasery a zesilovače. Úzkým hrd-

lem optických komunikací je směrování a zpracování optických paketů v komunikačních uzlech, které jsou v současnosti elektronické. Řešením by bylo co nejvíce elektronických operací přesunout do optické oblasti. Jednou z takových komponent jsou vláknové filtry založené na mřížkách s dlouhou periodou, pro jejichž přípravu bylo v ÚFE postaveno unikátní zařízení. Vláknové

mřížky vyrobené v ÚFE byly testovány v mnoha náročných aplikacích na předních světových pracovištích a tento projekt byl letos mezi čtyřmi projekty oceněnými předsedou Grantové agentury ČR, které vybíral zhruba ve dvou tisících projektech. Se sdružením CESNET, provozovatelem páteří akademické počítačové sítě České republiky, byl vyvinut vlastní, modulární EDFA, který je nyní vyráběn jednou z předních firem v oboru optických komunikací u nás, podnikem Optokon v Jihlavě. Ve spolupráci s dalším významným českým výrobcem optovláknových komponent a subsystémů SQS-vláknová optika v Nové Pace jsou v ÚFE zkoumány a vyvíjeny součástky s fotonickými krystalovými vlákny připravenými z vysoce nelineárních materiálů (olovnatá a chalkogenná skla) s širokými možnostmi využití právě v transparentních optických sítích, např. pro konverzi vlnové délky optických signálů. Výčet aktivit by si zasloužil podrobnějšího výkladu, zájemci jej mohou nalézt v dubnovém čísle časopisu Jemná mechanika a optika, ve kterém je věnována série článků výzkumu optických vláken v ÚFE [6]. Do některých laboratoří ÚFE je možné nahlédnout v rámci dnů otevřených dveří, které jsou pořádány každoročně v prvním listopadovém týdnu.

Když Alfréd Nobel projevil ve své závěti přání ocenit každoročně ty, „kdo v předchozím roce udělili lidstvu největší prospěch“, určil, že pětina částky měla připadnout tomu, „kdo učiní nejdůležitější objev nebo vynález na poli fyziky“ [7]. V oblastech přírodních věd je velmi těžké vy-

brat ty, jejichž objev či vynález přinese lidstvu velký prospěch v krátké době, natož během roku. U výsledků základního výzkumu je to ještě těžší, jejich převedení do praxe tak, aby skutečně přinášely prospěch lidstvu, je vesměs dlouhodobý proces. Někdy se lze v novější historii setkat dokonce i s Nobelovými cenami, kde význam oceněných výsledků je sice nesporný, ovšem cesta k prospěchu lidstvu v praxi ještě zakončena nebyla. Charles Kuen Kao patří mezi ty fyziky, jejichž výsledky základního výzkumu došly k realizaci v praxi relativně rychle. Od publikování průlomového článku Ch. K. Kao a G. Hockhama trvalo pouhé čtyři roky, než bylo vyrobeno nízkoztrátové vlákno pro komunikace, které Kao předpověděl, a brzy poté začala optická vlákna spektakulárně měnit svět telekomunikací. Po zveřejnění jmen vědců oceněných v roce 2009 za fyzikální objevy a vynálezy se objevovaly v tisku názory, že je zvláštní, že Nobelovu cenu získali vědci za aplikovaný výzkum. V tomto případě jde ovšem o dvojí nepochopení. Především Nobel ve své závěti mluví o objevech a vynálezech s prokazatelným prospěchem pro lidstvo a nespecifikuje, že by mělo nutně

jít o teoretický či základní výzkum. A dále Kaoovu práci lze podle veřejně akceptovaných měřítek, zakotvených mimo jiné i v českých zákonech, nepochybně zařadit mezi základní výzkum. Vždyť v počátcích této práce bylo nutné výzkumem ověřit myšlenku, že je možné nalézt materiál, který – uspořádan do optického vlákna – umožní šíření světla na velké vzdálenosti. A pouze tato ověřená myšlenka umožnila následující řešení praktických aplikací. Tyto diskuse však ukazují i na to, že skutečný a kvalitní výzkum lze jen těžko spoutat definicemi a že základní a aplikovaný výzkum jsou těsně propojeny, a to zejména ve výzkumu materiálů. Vždyť zkoumat materiál a zcela abstrahovat od jeho možných užitečných vlastností nemá velký smysl. Je proto velmi záslužné, že Ch. K. Kao a myšlenka použít optická vlákna pro přenos informace Nobelovu cenu v roce 2009 získali, protože tento základní výzkum přinesl v krátké době aplikovatelné výsledky s ohromujícím prospěchem pro lidstvo.

Ing. Pavel Peterka, Ph.D.,
Ing. Vlastimil Matějec, CSc.,
Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR

Výzkum speciálních optických vláken v ÚFE je podpořen mj. Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR projektem ME112042 „scan4surf“. Autorem fotografií 4 až 6 je Adam Novozámský. Tento text vychází z článku otisknutého v časopise *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [1].

LITERATURA

- [1] Peterka, P., Matějec V.: *Optická vlákna se dočkala Nobelovy ceny za fyziku. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, 2010, 55(1), i–ii.*
- [2] Kao, K. C., Hockham, G. A.: *Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. Proceedings IEE, July 1966, vol. 113, pp. 1151–1158.*
- [3] *Osobní vzpomínky Dr. Ericha Spitze.*
- [4] Hecht, J.: *City of light – the story of fiber optics. Oxford University Press, New York, 2004.*
- [5] Desurvire, E.: *Zlatý věk optických vláknových zesilovačů. Čsl. časopis pro fyziku, 1994, roč. 44, č. 3, s. 183–191.*
- [6] Peterka, P., Honzátko, P., Karásek, M., Kaňka, J., Kašík, I., Matějec, V.: *Vláknové lasery – principy a aplikace. Jemná mechanika a optika, 2010, 55(4), i15–120.*
- [7] Nobel, A. B.: *Poslední vůle. Paříž, 27. listopadu 1895.*

Plně optický tranzistor umožňuje řízení světelného paprsku

V článku, který se objevil 11. listopadu v časopise *Science*, výzkumníci EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne) a Institutu Maxe Plancka pro kvantovou optiku představili objev metody pro spojení fotonů a mechanických vibrací, které by mohly nalézt široké uplatnění v oblasti telekomunikací i kvantových informačních technologií. Profesor Tobias Kippenberg a jeho tým z laboratoře Fotoniky a kvantového měření při EPFL objevili nový způsob, jak vytvořit vazbu mezi světlem a vibracemi. Na základě tohoto objevu postavili mikrozařízení, ve kterém může být paprsek světla procházející optickým mikrozonaátorem řízen druhým, silnějším světelným paprskem. Zařízení tak funguje jako optický tranzistor, ve kterém jeden světelný paprsek ovlivňuje intenzitu toho druhého.

Na obr. 1 je mikrosnímek s falešnou barvou pocházející ze skenovacího elektronového mikroskopu, na kterém je mikrozonaátor použitý ve studii OMIT. Červená horní část představuje toroid z oxidu křemičitého, který je podepřen křemíkovým pilířem (šedá) na polovodičovém čipu. Toroid slouží pro fotony jako vynikající optický rezonátor a podporuje mechanické vibrace (fonony). Vzájemná vazba mezi fo-

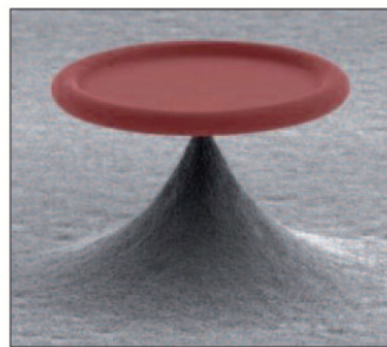
tony a fonony může být využita pro plně optické řízení světla.

Optický mikrozonaátor má dvě hlavní vlastnosti:

- zachycuje světlo v malé skleněné struktuře, přičemž nasměruje paprsek do kruhu,
- struktura vibruje, podobně jako sklenka na víno, v přesně stanovených frekvencích.

Protože je struktura tak malá (zlomek průměru lidského vlasu), tyto frekvence jsou 10 000krát vyšší než vibrace sklenky na víno. Když je světlo přivedeno do zařízení, fotony

působí silou nazvanou tlak záření, která je značně zvětšena rezonátorem. Rostoucí tlak deformuje dutinu zajišťující vazbu mezi světlem a mechanickými vibracemi. Jsou-li použity dva světelné paprsky, interakce obou laserů s mechanickými vibracemi má za následek jakýsi optický „přepínač“: silný řídicí laser může zapnout nebo vypnout slabší snímací laser, stejně jako v elektronickém tranzistoru.



Obr. 1 Mikrozonaátor OMIT

„Že je tento efekt teoreticky možný, víme již více než dva roky, ale dokázat to bylo mnohem obtížnější,“ vysvětluje Albert Schliesser z Institutu Maxe Plancka. Starší výzkumník Samuel Deléglise (EPFL) poznamenává, že „shoda mezi teorií a experimentem je opravdu zářející.“

Využití tohoto efektu, pojmenovaného optomechanicky indukovaná transparentnost (OptoMechanically-Induced Transparency, OMIT), může do fotoniky přinést zcela nové možnosti. Konverze záření na vibrace je již široce využívána v mobilních telefonech, např.

přijímač převádí elektromagnetické záření na mechanické vibrace, které umožňují signál efektivně filtrovat. Dosud však tento druh konverze nebylo možné dělat se světlem. S OMIT zařízením lze optické signály poprvé přeměnit na mechanické vibrace. To nabízí množství různých možností v telekomunikacích, např. nové optické vyrovnávací paměti mohou být navrženy tak, aby mohly ukládat optické informace až na několik sekund.