

# Optická vlákna se dočkala Nobelovy ceny za fyziku

*Pavel Peterka a Vlastimil Matějec, Praha*

Královská švédská akademie věd udělila 10. prosince 2009 Nobelovu cenu za fyziku třem vědcům, kteří výrazně prospěli lidstvu otevřením cest pro nové aplikace fotoniky. Polovinu této ceny získal Charles Kuen Kao za výsledky, kterých dosáhl jak v teoretickém, tak experimentálním základním výzkumu v oblasti optických vláken, druhou polovinu pak George Smith a Willard Boyle za práce v oblasti digitálního snímání obrazu. Nobelova cena za fyziku tak poctila relativně staré objevy, vždyť práce oceněných sahají až do 60. let minulého století. Technologie vzniklé na základech těchto prací se již mezitím staly natolik součástí našeho každodenního života, že bychom si bez nich těžko dokázali náš svět představit. Optická vlákna fascinujícím způsobem změnila komunikaci mezi lidmi. Názornou ilustrací této změny je vývoj transatlantických kabelů. Zatímco koncem 50. let bylo dosaženo rekordních 36 simultánních hlasových hovorů, v roce 1978 pomocí podmořského kabelu s optickými vlákny již byla přenosová kapacita více než tisícinásobná. Když byl v roce 2000 uveden do provozu kabel TAT-14 s přenosovou kapacitou 1,87 terabitů za sekundu (viz tabulka 1), stalo se poprvé, že byla k dispozici podstatně větší přenosová kapacita, než byly požadavky telekomunikačních operátorů.

Přínos optických vláken pro telekomunikace lze srovnat s objevem tranzistoru a polovodičových laserových diod generujících záření za pokojové teploty. Za objev tranzistoru získali Nobelovo ocenění John Bardeen, Walter H. Brattain a William B. Shockley z USA v roce 1956 a za objev heterostrukturálních laserových diod Zhores I. Alferov z Ruska a Herbert Krömer z Německa v roce 2000. Telekomunikační optická vlákna se tedy dočkala Nobelovy ceny v roce 2009, více než 43 let od publikace Kaoova a Hockhamova článku [1] v červenci 1966, data, které lze považovat za zrození vláknových optických komunikací. Ke zrodu optických vláken přispělo mnoho brilantních mozků, a i když Kao měl vskutku výraznou pionýrskou úlohu, jde do jisté míry o ocenění myšlenky samotné a lidí, kteří 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 paprsku. Optické vlákno je válcový dielektrický vlnovod z transparentního materiálu, tvořený jádrem a pláštěm, přičemž jádro má vyšší index

---

Ing. PAVEL PETERKA, Ph.D., a Ing. VLASTIMIL MATĚJEC, CSc., Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobyličky, e-mail: [peterka@ufe.cz](mailto:peterka@ufe.cz), [matejec@ufe.cz](mailto:matejec@ufe.cz)

lomu než plášť (viz obrázek 2 vlevo). Paprsky, které dopadají na rozhraní jádra a pláště pod úhlem větším, než je mezní úhel, se úplně (totálně) odrážejí a jsou jádrem vedeny. Počátek historie optických vláken můžeme najít hluboko v 19. století, kdy Daniel Colladon, profesor na univerzitě v Ženevě, demonstroval na svých přednáškách vedení světla v laminárním proudu vody vytékajícím z nádrže (1841). Sluneční světlo nechal procházet vodní nádrží a fokusoval ho 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 zatemnělém auditoriu to byl jev velmi působivý. Colladon prováděl tyto demonstrace 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 francouzsky psaném časopise *Comptes Rendus*. Mezi následné, obzvlášť známé příklady Colladonových fontán patří ukázky Ira Johna Tyndalla v Londýně (1853), světelné fontány na světové výstavě v Paříži (1889) a také Křížíkova fontána na výstavišti v Praze (1891). Od vedení světla vodním proudem je 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 pro osvětlování v zubním lékařství. Nicméně vzhledem k tisícileté sklářské tradici nepředpokládal, že by byl prvním, kdo takovou věc navrhl nebo použil a pravděpodobně měl pravdu. Sklářští mistři si již dříve museli všimnout, jak září koncečky skleněných tyček vytahovaných z pece. Návrhů různých dalších aplikací se objevilo mnoho, praktického významu a rozšíření 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. 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 šedesátých let již byly ohebné vláknové optické endoskopy využívány v lékařství.

## **Hledá se řešení pro komunikace: mikrovlny nebo světlo?**

Na přelomu padesátých a šedesátých let 20. 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 telefonů. Výzkum byl tlačen směrem k přenosu na vyšších frekvencích, který by takový nárůst umožnil. Jedna z možností, přenos informace atmosférou elektromagnetickými vlnami, je omezena na frekvence nižší než cca 10 GHz, resp. vlnové délky delší 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 šedesátých 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 firem podporovaných bohatými rozpočty, kterými disponovaly telekomunikační monopoly té doby. Americký telefonní gigant AT&T a jeho chloub, výzkumné Bellovy laboratoře, prosazovaly trubkové mikrovlnné vlnovody, které by byly zakopané v hloubce více

než 1 m v co nejpřímějších liniích mezi vzdálenými ústřednami a které by podporovaly preferenční šíření jediného příčného módu na frekvenci 50 GHz. Další nadějnou cestou, povzbuzovanou i závody v dobývání vesmíru, byla satelitní komunikace.

Rozsvícení prvního laseru Theodorem Maimanem v roce 1960 stimulovalo myšlenky využít pro komunikace frekvence z optického spektra, u nichž by přínos pro šířku pásma byl enormní. Z prostého poměru frekvencí je zřejmé, že zatímco mikrovlny by přinesly jen malé zlepšení, vlnové délce světla kolem  $1\ \mu\text{m}$  odpovídá frekvence 300 THz. Světlo tedy nabízelo potenciálně více než  $10\,000\times$  větší přenosovou kapacitu než stávající radioreléové spoje! Proběhla řada pokusů využít laserové světlo pro přenos informace atmosférou, ale bez valného úspěchu. Rozpracovávaly se pak různé metody optických vlnodů, jako byly konfokální čočkové vlnovody, plynové čočky vzniklé zahříváním plynu v trubici, případně trubice s reflexním vnitřním povrchem.

Optická vlákna byla rovněž na seznamu možných světlovodů, ale názor na jejich praktické využití 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 s pomocí jednoho příčného elektromagnetického módu. Při mnohamódovém šíření totiž dochází k rozšiřování (disperzi) pulzů nesoucích informaci v čase, protože každý pulz je složen z mnoha elektromagnetických módů vlnovodu. Jednotlivé módy se šíří ve vlnovodu po jiné dráze a každému tedy trvá jinou dobu, než dorazí od vysílače k přijímači. U dostatečně dlouhého vlnovodu nelze dva pulzy od sebe vůbec rozeznat a přenos informace již není možný. Zatímco mikrovlnné vlnovody mají příčný rozměr řádově centimetry, pokud by se měl realizovat skleněný dielektrický vlnovod na optických frekvencích, jeho průměr by měl být zlomek vlnové délky, tedy pouhých několik desetin mikrometru. Představa práce s tak tenkými skleněnými vlákny odrazovala. Druhým problémem přenosu informace vlákny byl útlum, ztráty, skelných materiálů. Tehdy používaná optická skla měla útlum kolem 1000 dB/km. To znamená, že po deseti metrech vlákna je na výstupu pouhá desetina vstupního výkonu, po 20 m setina a po 100 m již prakticky žádný výkon nenaměříme. Není divu, že když v optice vesměs málo zběhlí mikrovlnní inženýři poznali, jaký mají dostupná optická skla útlum a jak titěrné by byly jednomódové skleněné vlnovody, museli shledat ideu komunikací po optických vláknech vskutku pošetilou. 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 zaobíraly navzájem nezávisle jen dva malé týmy [2]. Jedním byla skupina ve Standard Telecommunications Laboratory (STL) nedaleko Londýna vedená Tony Karbowskiem, Polákem, který bojoval proti nacistům v Anglii a po válce se tam usadil. Karbowski na tento výzkum angažoval dva mladé doktorandy: Charlese Kuena Kao a George 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 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 jednomódové šíření světla, a relativně silný plášť. Nejenže s takovým vláknem lze snáze pracovat, ale také velikost jádra může být při malém rozdílu indexu lomu jádra a pláště zhruba  $10\times$  větší, než když je jádro obklopeno vzduchem (samozřejmě při zachování jednomódového šíření světla) a lze do něj lépe navázat světlo [3]. Jedná se o koncept tzv. slabého vedení vln, který později elegantně teoreticky rozpracoval pro optická vlákna v Bellových laboratořích německý výzkumný pracovník Detlef Gloge [4]. Je vhodné poznamenat, že šíření elektromagnetických vln v dielektrických válcových vlnovodech, resp. „drátech“, teoreticky popsali již v roce 1910 Hondros a Debye, tehdy se zřetelem na kmitočty z radiofrekvenční části spektra [5]; a na optických kmitočtech pak koncem padesátých a začátkem šedesátých let Eli Snitzer, Cavour Yeh a další, zvláště s ohledem na aplikace svazků optických vláken pro endoskopy [6], [7]. 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 proti jiným sklům vysokou teplotu zpracování, kolem  $2000^\circ\text{C}$ , a bohužel se jim nepodařilo najít vhodnou pec schopnou zahřát křemennou preformu tak, aby z ní mohli táhnout vlákno. Spěchající připravit jednomódové 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 dlouhá 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 módu. 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 jednomódové vlákno k dispozici neměli. Jednomódová optická vlákna byla na světě, zbývalo ovšem vyřešit zásadní problém útlumu, neboť vlákna z CSF měla útlum stovky dB/km.

## **Kaova příležitost**

Tony Karbowski z STL prosazoval vedle vláken jako vhodné přenosové médium planární jednomódový optický vlnovod z plastového pásku tenkého 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 polyetylénu 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 nezadržitelně unikalo ven. To byl konec jejich výzkumu povrchových vlnovodů, neboť byly v praxi nepoužitelné. Ve stejné době dostal Tony Kar-

bowiak 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 sebevědomého 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 Brity ovládaného Hongkongu. Jako další čínští žáci v britských školách přijal Kuen Kao i 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 „krystalku“. Protože žádná čínská škola nenabízela studium elektroniky, odjel v roce 1952 studovat do Londýna. Anglické kosmopolitní prostředí se mu zalíbilo, nastoupil do STL a brzo se zde seznámil a pak oženil s mladou kolegyní pocházející z čínské rodiny, ale narozenou již v Anglii. V roce 1960 se krátce vrátil na školu, ovšem lákavá nabídka pracovat na doktorátu přímo v STL ho přiměla se vrátit. Kombinace školy a práce byla náročná, ale finančně zajímavější než vést odříkavý život doktoranda. Neoddechl si příliš ani doma, kde pomáhal vychovávat svého malého syna a dceru [8].

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 mikrovln. Kao se soustředil na otázku transparentnosti dostupných optických materiálů. Hledal ve vědecké literatuře, oslovoval experty, ale

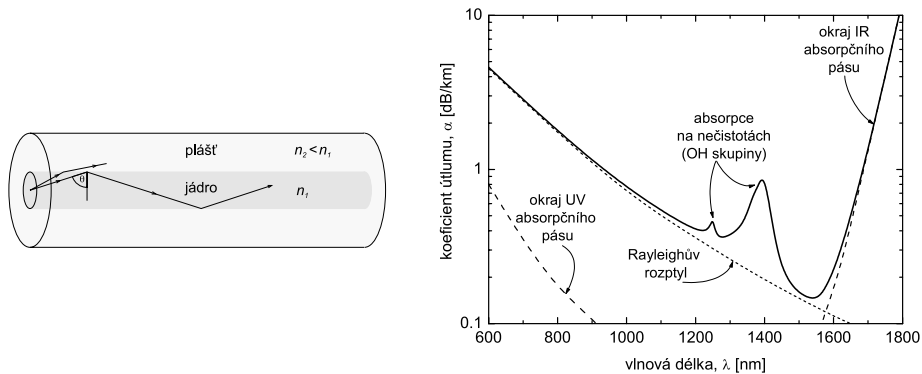


Obr. 1. Charles Kuen Kao při práci v optické laboratoři v 60. letech 20. století. (zdroj: The Chinese University of Hong Kong)

vesměs jen shledával, jak málo se o problému ví. Jako by byl prvním, kdo si podobné otázky klade. Nelze se tomu příliš divit, nikdo předtím neměl důvod posílat světlo 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 více, hledal fundamentální omezení transparentnosti skel. Po výpočtech došel k závěru, že ztráty jsou dány absorpčními pásy čistého materiálu samotného (vibračními přechody molekul v infračerveném pásmu a elektronovými přechody v UV oblasti), Rayleighovým rozptylem na náhodně rozložených nehomogenitách struktury skla a absorpcí na příměsích, nečistotách ve skle. Tyto ztrátové mechanismy jsou naznačeny na obrázku 2. Dospěl k povzbudivým výsledkům: že pokud by se podařilo snížit koncentrace nečistot, především železa a přechodových kovů, ztráty dané absorpcí materiálu a Rayleighovým rozptylem by byly jen několik dB/km. Kao a Hockham zaslali podrobnou analýzu vlastností optických vláken v listopadu 1965 k publikaci do britského časopisu *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* [1]. 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 a podobné výsledky publikovala francouzská skupina o dva měsíce později v časopise *L'Onde Electronique* [9]. 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 skelných materiálů pokračovat. Aby mohl vůbec měřit nízký útlum čistých skel s přesností na jednotky dB/m, vyvinul nový, velmi citlivý spektrometr, schopný 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 a 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 Kaoově 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 třicátých letech zde Frank Hyde vyvinul novou metodu na přípravu čistého syntetického křemene, hydrolyzu v plameni (flame hydrolysis). Při této metodě reaguje v plameni kyslíko-vodíkového hořáku voda a plynný chlorid křemičitý (získaný odpařením z kapalného skupenství) za vzniku ultračistých sazí  $\text{SiO}_2$ . 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 metodou „tyčka v trubce“: ve válci z čistého křemene nechali vyvrtat díru, do které vložili tyčinku z křemenného skla dopovaného titanem. K zahřátí preformy na teplotu tažení použili jedinou pec dostupnou ve sklár-



Obr. 2. Struktura optického vlákna (vlevo). Optické vlákno, které je jednomódové na vlnových délkách 1300 nm i 1550 nm, má typicky průměr jádra  $8 \mu\text{m}$  a průměr křemenného pláště  $125 \mu\text{m}$ . Křemenné vlákno je ještě pokrýváno polymerní ochrannou vrstvou a má celkový průměr  $0,25 \text{ mm}$ . Spektrální závislost útlumu optického vlákna z křemenného skla (vpravo).

nách Corning (a pravděpodobně unikátní i mezi jinými sklárny) schopnou zahřát sklo na více než  $2000^\circ \text{C}$ . Postupně se zde podařilo vytáhnout jednomódová vlákna, 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  $\text{SiO}_2$  přímo na vnitřní povrch trubky. Trvalo ale dlouho, než tento proces vedl k použitelným výsledkům. Vlivem vytváření barevných center na molekulách  $\text{TiO}_2$  při vysokých teplotách tažení bylo např. nutné vlákno žíhat při teplotách  $800\text{--}1000^\circ \text{C}$ , čímž se však vlákno stávalo velmi křehkým a v nejnevhodnější okamžik praskalo. Po několika letech základního materiálového výzkumu přišel zlomový moment v roce 1970, kdy na cívce s  $200 \text{ m}$  jednomódového vlákna naměřili magický útlum  $16 \text{ dB/km}$  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 začali dopovat jádro pro zvýšení indexu lomu místo oxidu titaničitého oxidem germaničitým, který má lepší sklotvorné vlastnosti než oxid titaničitý a nedochází u něho k tak vysoké tvorbě barevných center. Používali tradiční metodu nanášení z plynné fáze. Podařilo se jim sice připravit nízkoztrátová vlákna, ale šlo o velmi zdoluhavý proces. Proto navrhli modifikovanou metodu nanášení z plynné fáze (MCVD – Modified Chemical Vapour Deposition). V této metodě jsou plynné chloridy zaváděny dovnitř rotující křemenné trubice upevněné v soustruhu. Trubice je zevnějšku zahřívána posuvným hořákem. V horké zóně dochází k chemické reakci a složky skla se usazují ve formě bílých sazí na vnitřních stěnách trubice. Saze jsou pak zprůhledněny slinutím při použití vyšší teploty hořáku. V posledním kroku se trubice zahřeje na teplotu asi  $2000^\circ \text{C}$ , kdy se stává tvárnou a vlivem povrchového napětí trubice zkolabuje na tyčku – preformu. MCVD je jednou z nejvýznamnějších metod přípravy preforem optických vláken dodnes.

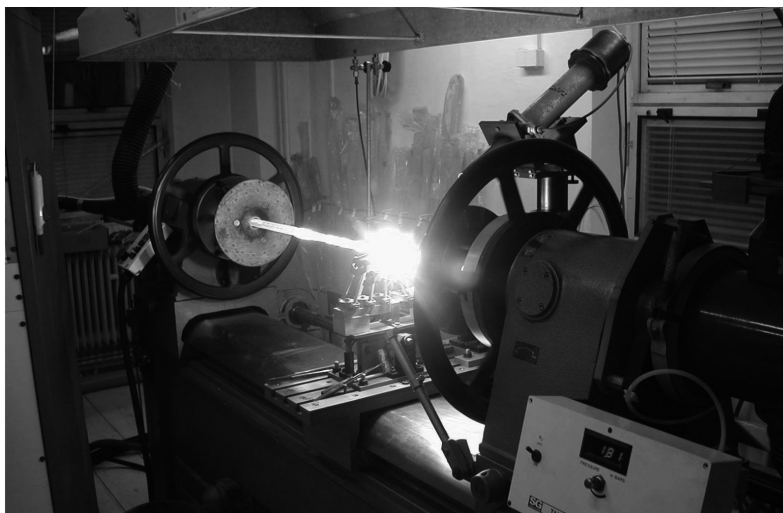
## Několik postřehů z dalšího vývoje ve světě i u nás

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 demonstrována japonskými firmami NTT a Fujikura Cables první optická vlákna s útlumem pouhých 0,47 dB/km na vlnových délkách minimální chromatické disperze v okolí 1,2–1,3  $\mu\text{m}$ . Další revoluční událostí v oblasti vláknových optických komunikací bylo objevení vláknových zesilovačů dopovaných erbiem (EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifiers), jejichž nasazení umožnilo podstatně lépe využít enormní šířku pásma optických vláken a posílat po jednom vlákně několik signálů na různých vlnových délkách, tzv. vlnový multiplex (WDM, Wavelength Division Multiplexing). To je už však jiný příběh, jiný objev, který si možná zaslouží jednu z příštích Nobelových cen. Zájemci si mohou přečíst více o EDFA v *Československém časopise pro fyziku* v překladu článku Emmanuela Desurvira, francouzského fyzika pracujícího v 80. a 90. letech v Bellových laboratořích [10]. Z knih o optických vláknech pak lze doporučit např. práce [11]–[13]. Současným rekordem je přenos 25,6 terabitů za sekundu, kdy bylo multiplexováno 320 signálů, každý s kapacitou 80 gigabitů za sekundu, na 160 různých vlnových délkách a ve dvou ortogonálních polarizacích po 240 km vlákna [14]. Odhaduje se, že v současnosti je po světě instalováno kolem jedné miliardy km optických vláken [2]. 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, které 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 přes 6 kW v kvalitním, difrakčně limitovaném svazku. V současnosti je vysoce aktuální výzkum metod koherentního slučování jednotlivých svazků, od něhož se očekává možnost kontinuálně generovat záření s výkonem řádu stovek kW.

V bývalém Československu bylo první optické vlákno připraveno v roce 1980 v Československé akademii věd v laboratoři technologie optických vláken. Tato laboratoř je nyní součástí Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) AV ČR, v.v.i. V této laboratoři byla vyvinuta kompletní technologie přípravy optických vláken první a druhé generace, která byla pak předána do poloproduktu ve Sklounionu Teplice. V tehdejší Ústavu radiotechniky a elektroniky (nyní ÚFE) byla vyvíjena měřicí zařízení jak pro optické trasy, např. optický reflektometr pro měření útlumu, tak pro výrobu vláken, jakým bylo zařízení pro monitorování průměru taženého vlákna a řídicí systém pro tažení. Tyto řídicí systémy, včetně holografického měřiče průměru vlákna, byly dodány i do zahraničí, např. do pracovišť v Jeně v Německu a ve Frjazinu u Moskvy. První optická trasa byla položena mezi Dejvicemi a Smíchovem v roce 1986 a obsahovala spolu s japonskými vlákny i vlákno československé výroby [15]. V roce 1990 se však Sklounion Teplice rozhodl soustředit na jiný typ výroby a technologii optických vláken odprodal do zahraničí. Optická vlákna se v ČR nyní připravují pouze v ÚFE, a to za



účelem výzkumu. Mezi aktuální řešené problematiky patří základní materiálový výzkum vláken, včetně přípravy nanostrukturovaných jader dopovaných prvky vzácných zemin, příp. prvky přechodových kovů pro vláknové lasery a zesilovače.<sup>1)</sup> V oblasti výkonových vláknových laserů a zesilovačů byl navržen původní způsob navázat záření čerpání a signálu do dvouplášťového vlákna [16], byly zkoumány pulzní vláknové lasery s módovou synchronizací nebo založené na modulační nestabilitě [17].



Obr. 3. Příprava preformy optického vlákna na sklářském soustruhu s kyslíko-vodíkovým hořákem v laboratoři technologie optických vláken Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i.

Úzkým hrdlem 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, jež umožňuje implementaci těchto filtrů do všech typů optických vláken, nezávisle na jejich chemickém složení. Vláknové mřížky vyrobené na našem pracovišti byly testovány v mnoha náročných aplikacích (ultrarychlé zpracování signálu, telekomunikace s ultravysokou přenosovou kapacitou atd.) na předních světových pracovištích [18]. Spolu se sdružením CESNET, provozovatelem páteřní akademické počítačové sítě České republiky, byl vyvinut vlastní, modulární EDFA, který nyní vyrábí jedna z předních firem v oblasti optických komunikací u nás, podnik 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 chalkogenní skla) s širokými možnostmi využití právě v transparentních optických sítích, např. pro konverzi vlnové délky optických signálů. Pozoruhodných výsledků bylo dosaženo i v oblasti vláknových

<sup>1)</sup> Výzkum speciálních optických vláken pro vláknové lasery a zesilovače v ÚFE je podpořen Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR projektem ME10119 „FILA“.

rok uvedení do provozu	název	šířka pásma, resp. přenosová kapacita	počet hlasových kanálů	klíčové použité technologie
1956	TAT-1	150 kHz	36	koaxiální kabel, elektronky, analogový přenos
1959	TAT-2	230 kHz	48	-"
1963	TAT-3	1,1 MHz	138	-"
1965	TAT-4	1,1 MHz	138	-"
1970	TAT-5	6 MHz	845	germaniové tranzistory
1976	TAT-6	30 MHz	4000	křemíkové tranzistory
1978	TAT-7	30 MHz	4000	-"
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	-"
1993	TAT-11	1,1 Gb/s	120 000	-"
1996	TAT-12/13	30 Gb/s	614 400	optické zesilovače (EDFA)
2000	TAT-14	1,87 Tb/s	> 13 000 000	-"

Tabulka 1. Vývoj transatlantických kabelů TAT.

senzorů s evanescentní vlnou pro snímání chemických veličin. Tento výčet aktivit by si zasloužil podrobnější výklad, zájemci jej budou moci nalézt v dubnovém čísle časopisu *Jemná mechanika a optika*, ve kterém bude věnována série článků výzkumu optických vláken v ÚFE. 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 udělali lidstvu největší prospěch“, určil, že pětina částky měla připadnout tomu, „kdo učiní nejdůležitější objev nebo vynález na poli fyziky“ [19]. V oblastech přírodních věd je velmi těžké vybrat 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, a tedy aby skutečně přinášely prospěch lidstvu je vesměs dlouhodobý proces. Někdy se v novější historii setkáváme dokonce i s Nobelovými cenami, kde význam oceněných výsledků je sice nesporný, ovšem cesta k praktickému prospěchu lidstvu ještě zakončena nebyla. Charles Kuen Kao patří mezi ty fyziky, jejichž výsledky základního výzkumu došly k praktické realizaci relativně rychle. Od publikování jejich objevného článku trvalo čtyři roky, než bylo vyrobeno nízkoztrátové vlákno pro komunikace, které Kao předpověděl, a brzo 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 jít nutně o teoretický či základní výzkum. A dále Kaoovu práci lze podle veřejně akceptovaných měřítek, zakotvených mimo jiné i v českých zákonech, zařadit nepochybně 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 v materiálovém výzkumu. Vždyť zkoumat materiál a zcela abstrahovat od jeho možných užitných 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 získaly, protože tento základní výzkum přinesl v krátké době aplikovatelné výsledky s ohromujícím prospěchem pro lidstvo.

## L i t e r a t u r a

- [1] KAO, K. C., HOCKHAM, G. A.: *Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies*. Proceedings IEE, vol. 113, 1151–1158, July 1966.
- [2] *Sand from century past; send future voices fast*. Nobelovská přednáška přednesená paní Gwen May Wan Kao v zastoupení jejího manžela Charlese Kuena Kaoa, 10. prosince 2009.
- [3] *Osobní vzpomínky Dr. Ericha Spitze*.
- [4] GLOGE, D.: *Dispersion in weakly guiding fibers*. Applied Optics, Vol. 10, 2442–2445, 1971.
- [5] HONDROS, D., DEBYE, P.: *Elektromagnetische wellen an dielektrische drahten*. Annalen der Physik Vierte Folge, Band 32, s. 465–476, 1910.
- [6] SNITZER, E.: *Cylindrical dielectric waveguide modes*. J. Opt. Soc. Am., Vol. 51, No. 5, 491–498, 1961.
- [7] YEH, C.: *Elliptical dielectric waveguides*. J. Applied Physics, Vol. 33, No. 11, 3235–3243, 1962.
- [8] HECHT, J.: *City of light – the story of fiber optics*. Oxford University Press, New York, 2004.
- [9] WERTS, A.: *Propagation de la lumiere coherente dans les fibres optiques*. L'Onde Electronique, Vol. 46, 967–980, 1966.
- [10] DESURVIRE, E.: *Zlatý věk optických vláknových zesilovačů*. Čs. čas. fyz., ročník 44, číslo 3, 183–191, 1994.
- [11] SNYDER, A. W., LOVE, J. D.: *Optical Waveguide Theory*. Chapman and Hall Ltd., London, 1983, 1991.
- [12] GHATAK, A., THYAGARAJAN, K.: *Introduction to fiber optics*. Cambridge University Press, 1998, 2000.
- [13] HECHT, J.: *Understanding fiber optics*. Fifth Edition, Pearson Education Ltd., 2006.
- [14] GNAUCK, A. H., CHARLET, G., TRAN, P., WINZER, P. J., DOERR, C. R., CENTANNI, J. C., BURROWS, E. C., KAWANISHI, T., SAKAMOTO, T., HIGUMA, K.: *25.6-Tb/s C+L-band transmission of polarization-multiplexed RZ-DQPSK signals*. Presented at the Optical Fiber Commun. Conf., Anaheim, California, USA, Postdeadline Paper PDP19, 2007.
- [15] MATĚJEC, V., KAŠÍK, I.: *Optická vlákna a komunikace*. Věda a technika mládeži, ročník 51, číslo 4, 28–30, 1998.
- [16] PETERKA, P., KUBECEK, V., DVORACEK, P., KASIK, I., MATEJEC, V.: *Experimental demonstration of novel end-pumping method for double-clad fiber devices*. Optics Letters, vol. 31, no. 22, 3240–3242, 2006.
- [17] HONZATKO, P., PETERKA, P., KANKA, J.: *Modulation instability sigma-resonator fiber laser*. Optics Letters, vol. 26, no. 11, 810–812, 2001.
- [18] SLAVIK, R., AZAÑA, J., PARK, Y.: *Long Period Fiber Gratings for High Speed Optical Pulse Shaping: Principles and Applications*. In: Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California, USA, invited paper OWN3, 2009.
- [19] *Alfred Bernhard Nobel, poslední vůle*. Paříž, 27. listopadu 1895.