

# Charles Kuen Kao a optická vlákna

## Polovina Nobelovy ceny za fyziku 2009

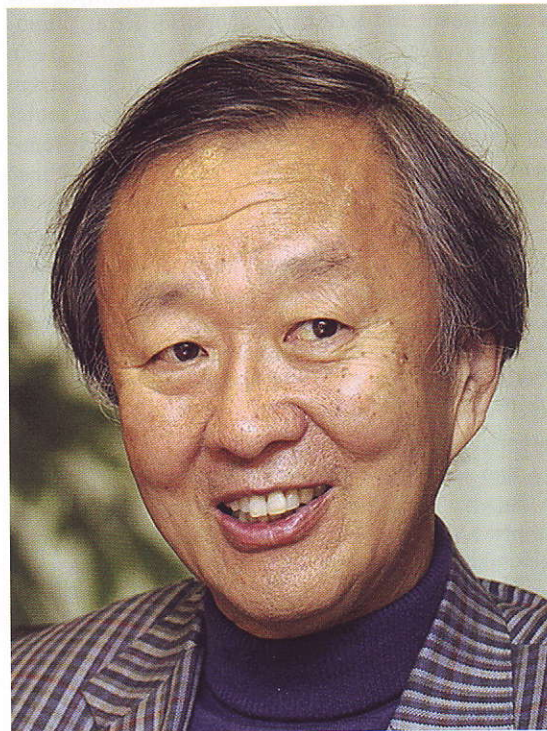
Ivan Kašík

Oddělení technologie optických vláken, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8

**D**ne 10. prosince 2009 udělila Švédská královská akademie věd Nobelovu cenu za fyziku trojici vědců, kteří významně přispěli k posunutí hranic lidského poznání v oblasti fotoniky. Polovinu ceny získal Charles Kuen Kao (obr. 1) za průlomové výsledky týkající se přenosu světla ve vlákněch pro optickou komunikaci. Po čtvrtině ceny získali George Smith s Willardem Boylem za vynález CCD čipu, který je dnes základním prvkem fotoaparátů a kamer (viz další aktualita v tomto čísle na str. 12).

Ve většině odborných nebo laických průzkumů o nejvýznamnější vědecký či vědecko-technický počín 20. století zaujímá internet vždy jedno z předních míst. Přitom právě rozvoj informačních sítí stojí na základě dvou klíčových objevů: laseru a optických vláken [1]. Za objev laseru získala Nobelovu cenu trojice vědců N. G. Basov, A. M. Prochorov a C. H. Townes. Stalo se tak v roce 1966, tedy přesně v době, kdy K. C. Kao publikoval svůj klíčový článek o optických vlákněch [2], na jehož základě získal nejvyšší vědecké ocenění teprve nedávno. Ačkoliv to nemusí být na první pohled zřetelné, sotva si dnes představíme život bez optických vláken. Zdaleka nemusíme být horlivými uživateli e-mailové komunikace, e-learningu a podobných novostí, stačí jen použít služeb kteréhokoliv bankomatu nebo si vybrat peníze „z knížky“ na poště. Ani příznivci mobilních telefonů se zpravidla neobejdou bez služeb optických sdělovacích sítí, ačkoliv viditelné kabelové spojení mezi jejich aparátem a prvním komunikačním uzlem je nahrazeno neviditelným mikrovlnným pojitkem. Většina telekomunikačních systémů dnes využívá datového přenosu po vysokorychlostních sítích budovaných na základě optických vláken. Z jedné strany nás taková výměna informací činí svobodnějšími a přispívá ke globalizaci – není dnes problémem vyměnit si čerstvé informace třeba o počasí s kamarády na Novém Zélandu. Z druhé strany nás však může na svobodě omezovat, např. různými detekčními systémy, a přispívá k odlidštění našeho života, kdy elektronická komunikace převládá nad tou přímou mezilidskou. Záleží jen na uživateli a sám oceněný Kao projevil obavu spojenou s přáním, aby výsledky jeho práce lidé využívali ke svému prospěchu.

Počátky optického sdělování jsou staré jako lidstvo samo. Již staří Indiáni zapalovali své ohně na znamení blížícího se nebezpečí a dlouhá staletí to po nich opako-

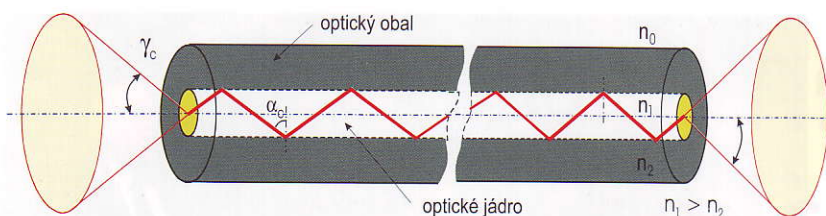


Obr. 1 Charles Kuen Kao. Foto: National Acad. of Engineering.

vali jiní. Za počátky sdělování pomocí optického vlnovodu se obvykle považují experimenty sira J. Tyndalla. Ten si uvědomil fyzikální princip totálního odrazu paprsku šířícího se prostředím o vyšším indexu lomu na rozhraní s dielektrikem o nižším indexu lomu, který vyplývá ze Snellova zákona. V roce 1853 ho demonstroval pomocí pramene vody (o indexu lomu 1,33) obklopeného atmosférou (o indexu lomu  $\sim 1$ ) na výtok z nádoby, do které soustředil svazek viditelného světla. Ačkoliv podobný experiment předváděl v řadě míst Evropy již v roce 1841 D. Colladon z univerzity v Ženevě a popsal jej ve francouzském časopise Comptes Rendus, Tyndallov populární prezentace se staly známějšími. Dodnes po celém světě pracují na tomto principu všechny světelné fontány, tu Křížkovu z roku 1891 nevyjímaje. Praktickému využití principu světelného přenosu na delší vzdálenosti však bránily poměrně vysoké optické ztráty a disperze optických vláken – vlnovodů. A právě na tento problém se soustředil Kao se svými spolupracovníky G. A. Hockhamem a T. Karbowiakem.

» Většina telekomunikačních systémů dnes využívá datového přenosu po vysokorychlostních sítích budovaných na základě optických vláken. «





Obr. 2 Optické vlákno – princip.

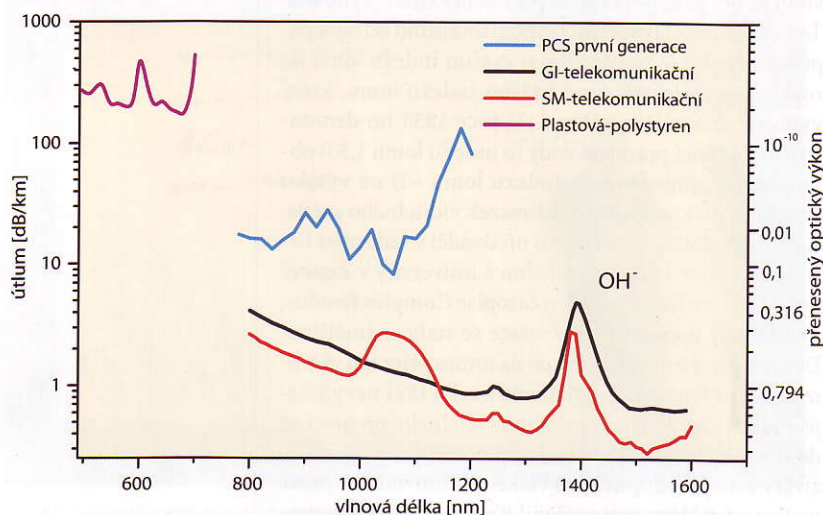
Ve své průlomové práci prezentované v Proceedings IEE v červenci 1966 Kao poprvé souhrnně popsal problematiku optického přenosu v optických vláknech [2]. Definoval optická vlákna jako dielektrické vlnovody převážně kruhové symetrie, jejichž podélný rozměr je mnohonásobně větší než příčný, kde k přenosu světla dochází na základě totálního odrazu na rozhraní optického jádra o vyšším indexu lomu a optického obalu o nižším indexu lomu (obr. 2). Soustředil se na teoretický rozbor příčin optických ztrát, odhadl potenciální snížení optických ztrát ve vláknech z křemenného skla a experimentálně demonstroval optický přenos pomocí připraveného jednovidového vlákna a He-Ne laseru. Z hlediska času soutěžil s týmem vedeným E. Spitzem pracujícím v Orsay u Paříže, z hlediska principu soutěžil s optickým přenosem ve volné atmosféře a s přenosem pomocí mikrovln. Souboj o čas i princip nakonec vyhrál. Z prostého poměru frekvencí je zřejmé, že mikrovlny by přinesly jen malé zlepšení šířky přenášeného pásma. A zatímco první experimenty přenosu záření laserů zemskou atmosférou sice prokázaly ztráty jen asi 1 dB/km (to znamená snížení výkonu asi o 21 % na vzdálenosti 1 km) za optimálních podmínek, což bylo řádově méně, než kolik byly ztráty soudobých optických vláken, při smogu, mlze, dešti nebo sněžení byl přenos zcela nerealizovatelný.

Kao se tedy soustředil na problém optických ztrát a disperze optických vláken. Správně konstatoval, že příprava vláken o větší délce z krystalických nebo polykrytalických materiálů je nereálná. Proto se soustředil na amorfni materiály, zejména křemenné sklo, polymethylmetakrylát a polystyren. V poválečných letech měl již od kolegů z týmu vedeného F. Hydem k dispozici syntetické křemenné sklo vzniklé hydrolyzou  $\text{SiCl}_4$ , jehož optické ztráty byly asi o jeden řád nižší než u ostatních materiálů. Z výpočtu Rayleighova rozptylu určil minimum optických ztrát do oblasti 300–1 000 nm a identifikoval kritické nečistoty způsobující značné absorpční ztráty,

především ionty  $\text{Fe}^{3+}$ . Dnes hovoříme o uvedené spektrální oblasti jako o prvním telekomunikačním „okně“ a ke kritickým nečistotám přibyla chemicky vázaná vlhkost (ionty OH<sup>-</sup>), která intenzivně absorbuje záření dále v blízké infračervené oblasti okolo 1 400 nm. Kao předpověděl, že pokud bude dosaženo obsahu železitých iontů ve skle na úroveň jednoho ppm (tj. desetitisíciny procenta), optické ztráty vláken se sníží na úroveň okolo 20 dB/km. Pro přenos to znamená, že na vzdálenost 1 km bude přeneseno 1 % z navázaného vstupního optického výkonu, což je ještě postačující pro telekomunikační přenosy na kratší až střední vzdálenosti. Z tehdejšího hlediska to byla předpověď vizionářská, protože ztráty optických skel se v té době pohybovaly okolo 1 000 dB/km. S disperzí se hodlal Kao vypořádat přípravou jednovidového vlnovodu, tedy vlákna, ve kterém se bude šířit jeden jediný vid. Při vlnové délce použité pro přenos je jasné, že vlnovodné jádro takového vlákna mělo průměr jen několik mikrometrů. To samozřejmě přinášelo problémy jak mechanické pevnosti, tak přesné kontroly průměru jádra vlákna a ztrát vlivem (mikro) ohybů. Nicméně se mu podařilo připravit vlákno o průměru v jednotkách mikrometrů s tolerancí okolo 5 %, zafixovat ho do kapiláry naplněné imerzní kapalinou a s pomocí He-Ne a/nebo GaAs laseru demonstrovat přenos ve viditelné a blízké infračervené oblasti.

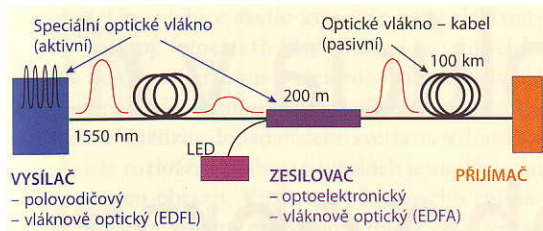
Malé rozměry vyvinutých vláken samozřejmě vyvolávaly pochybnosti o jejich praktickém využití v komunikacích stejně tak jako tehdejší vysoké optické ztráty použitých materiálů. Poměrně brzy si skleněná vlákna našla své využití v elektrotechnice, kde přenos na vzdálenosti několika metrů byl zároveň dostačující pro galvanické oddělení jednotlivých vysokonapětových částí strojů a zařízení. Dále začala být vlákna vzhledem ke svým rozměrům úspěšně využívána pro optické senzory [3]. Francouzský tým od výzkumu na poli telekomunikačních vláken zakrátko upustil, zatímco Kao se soustředil na základní výzkum dostatečně čistých materiálů vhodných pro přenos. Jeho myšlenkám vyšli vstříc ve sklárnách Corning Glass pánové R. Maurer, P. Schultz a D. Keck. Přišli s myšlenkou vytáhnout vlákno z „preformy“ složené z tyčky křemenného skla dopovaného  $\text{TiO}_2$  umístěné v trubce z čistého křemenného skla. Rozdíl ve složení sklovin jim zajišťoval potřebný rozdíl indexu lomu mezi optickým jádrem a obalem. Modifikovali vyvinutou metodu přípravy syntetického křemene a překonali problém vysoké teploty zpracování okolo 2 000 °C při přípravě vlákna. Přes počáteční obtíže se jim nakonec v roce 1970 podařilo připravit dostatečně dlouhé jednovidové vlákno s útlumem pod 20 dB/km v červené části spektra.

Zásadní kvalitativní posun v oblasti optických vláken [4] přinesl vynález metody Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) pro přípravu preforem – tyčí pro tažení optických vláken. J. B. McChesney ji prezentoval v roce 1974 na sklářském kongresu v Číně, resp. v roce 1982 [5]. Vycházel ze skutečnosti, že prakticky nelze efektivně čistit látky v pevném stavu, avšak např. destilací nebo mikrofiltrací lze dobře čistit výchozí kapaliny, které pak mohou sloužit k přípravě vysoce čistého skla. V této sklářsky poněkud neobvyklé metodě navrhl oxidovat páry  $\text{SiCl}_4$  přímo v prostoru substrátové trubice a vzniklé submikronové částice  $\text{SiO}_2$  usazovat na stěny ve formě tenkých skelných vrstev. Přípravou preforem po jednotlivých vrstvách tak lze, při vhodném dopování, dosáhnout libovolného koncentračního profilu, a tedy



Obr. 3 Optické ztráty (útlum).





Obr. 4 Optické komunikace – princip.

i profilu indexu lomu. Ale především se lze pečlivým čištěním výchozích látek dopracovat obsahu např. železitých iontů pod 1 ppm, který v roce 1966 označil K. C. Kao za kritický. Koncept metod CVD byl později rozpracován do řady modifikací (PCVD, OVD, VAD). Jednovidová vlákna tažená z preforem připravených metodou MCVD dnes dosahují minimálních optických ztrát okolo 0,2 dB/km, což odpovídá poklesu optického výkonu o 4,6% na vzdálenosti 1 km, jak je patrné z obr. 3.

Při pohledu do nedávné historie zjistíme, že již v roce 1975 byla instalovaná (v Dorsetu) první komerční optická přenosová trasa pracující na vlnové délce okolo 1 300 nm. V současné době je rekordem přenos rychlostí 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 [6]. Ačkoliv bylo již podle odhadů položeno na zeměkouli kolem jedné miliardy kilometrů telekomunikačních vláken, z toho asi 700 tisíc kilometrů jen v naší malé zemi, výzkum na tomto poli pokračuje dále. S rozvojem optických komunikací (obr. 4) se ukázala např. potřeba optického zesilování, která znamenala velkou výzvu pro rozvoj vláknových zesilovačů a laserů [7]. Výzvou je zvyšování přenosové kapacity instalované kabeláže. To lze zařídit dvěma způsoby – multiplexováním v časové oblasti nebo ve spektrální oblasti. V prvním případě to znamená vývoj velmi rychlých zdrojů – např. solitonových laserů, pracujících na standardní telekomunikační délce (1 550 nm), kdy kapacita přenosu je dána vysokou opakovací rychlostí laseru. V druhém případě to znamená vývoj vláknových laserů a zesilovačů pracujících na vlnových délkách mimo standardní oblast, umožňující rozdělení datového toku do více kanálů (vlnových délek). Vývoj nezadržitelně směřuje k celooptickému zpracování informací.

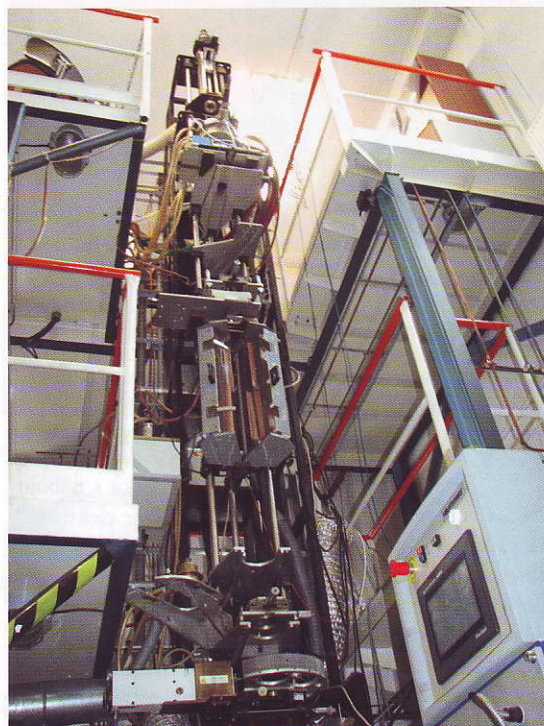
První tuzemské optické vlákno vzniklo v roce 1980 v Československé akademii věd, resp. ve Společné laboratoři pro chemii a technologii silikátů ČSAV a VŠCHT v Praze. Jeho optické ztráty byly na úrovni srovnatelné s tehdejší světovou produkcí (obr. 3). První optický přenos byl demonstrován v téže době na Karlově mostě a první optická trasa byla položena mezi Dejvicemi a Smíchovem v roce 1986, kdy vedle japonských kabelů byly položeny i zkušební tuzemské. Na základě těchto úspěchů bylo investováno do vývoje technologie pro výrobu mnohavidových gradientních vláken a jednovidových vláken pro oblast 1 550 nm. Technologie byly předány do sériové výroby do Sklo Unionu Teplice (dnešní Glaverbel), odkud byly na základě politických rozhodnutí po roce 1989 odprodány do zahraničí, kde fungují dodnes. Výzkum na poli optických vláken se však nezastavil; dnes je laboratoř s jedinou kompletní technologií pro přípravu optických vláken v ČR (obr. 5) součástí Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) AV ČR. Řeší se zde projekty základního materiálového výzku-

mu zabývající se speciálními vlákny s nanostrukturovaným jádrem pro vláknové lasery a zesilovače, vlákny mikrostrukturálními (obr. 6) nebo vlákny dvouplášťovými s nekruhovým průřezem [8]. Nemalá pozornost je také věnována speciálním vláknům pro vláknové senzory – vláknům s invertovaným profilem indexu lomu, se zapsanými mřížkami, vláknům taperovaným a dalším. Výzkumu optických vláken v ÚFE bude speciálně věnované dubnové číslo časopisu *Jemná mechanika a optika*.

Od doby, kdy Charles Kuen Kao publikoval svůj průkopnický článek, se optická vlákna stala nedílnou součástí naší každodenní reality. Nobelova cena mu tedy právem náleží, i když jeho práce není registrována vyhledavačem Scopus a praktické výsledky se dostavily až s časovým odstupem.

**Literatura**

[1] C. H. Townes: „Birth of the maser and laser“, in: *Optical Chemical Sensors*, red. F. Baldini a kol., Springer-Verlag, Berlin 2006, s. 1–15.  
 [2] K. C. Kao, G. A. Hockham: „Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies“, *Proc. IEE* 113, 1151 (1966).  
 [3] G. Boise, A. Harmer: *Chemical and Biochemical Sensing with Optical Fibers and Waveguides*. Artech House, Norwood 1996.  
 [4] S. E. Miller, A. B. Chynoweth: *Optical Fiber Telecommunications*. Academic Press, Orlando 1979.  
 [5] S. R. Nagel, J. B. McChesney, K. L. Walker: „An overview of the MCVD process and performance“, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-18, 459 (1982).  
 [6] A. H. Gnauck, G. Charlet, P. Tran, P. J. Winzer, C. R. Doerr, J. C. Centanni, E. C. Burrows, T. Kawanishi, T. Sakamoto, K. Higuma: „25.6-Tb/s C+L-band transmission of polarization-multiplexed RZ-DQPSK signals“, *Optical Fiber Commun. Conf., Anaheim, 2007*, Postdeadline paper PDP19.  
 [7] E. Desurvire: „The golden age of optical fiber amplifiers“, *Physics Today*, 28 (Jan. 1994); český překlad M. Chomát: *Čs. čas. fyz.* 44, 183 (1994).  
 [8] P. Peterka, I. Kašík, V. Matějec: *Zařízení a způsob pro navázání signálu a čerpání do dvouplášťového optického vlákna*. CZ Pat. 301215, 2009.



Obr. 5 Tažička optických vláken.



Obr. 6 Mikrostrukturální optické vlákno.