

ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS

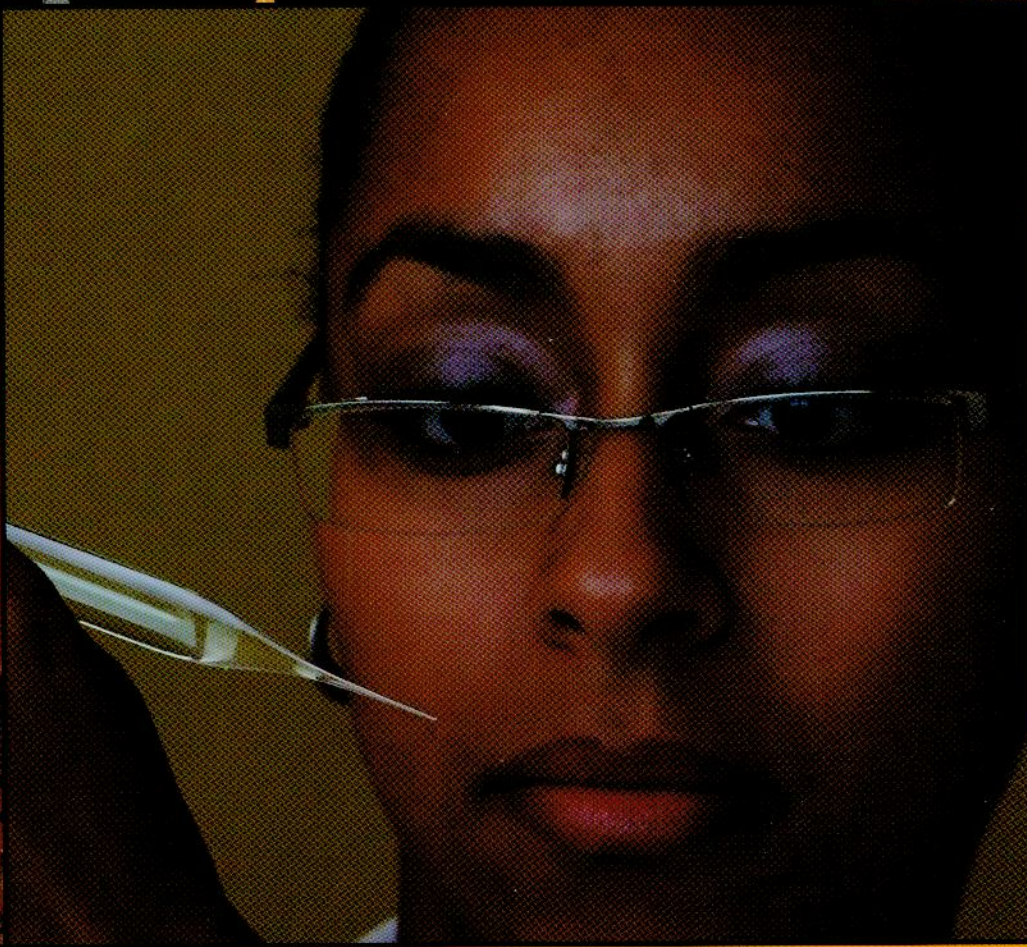
PRO FYZIKU

1
2011

Nobelova cena za fyziku
2009: texty přednášek
o optických vláknech
a nábojově vázaných
strukturách (CCD)

Cesty k udělení Nobelovy
ceny očima V. Ginzburga

Fyzikální a estetické
aspekty hudební akustiky



Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, v. v. i., Praha
<http://www.cscasfyz.fzu.cz>
svazek 61 ISSN 0009-0700

Optická vlákna – páteř moderních komunikací

Ivan Kašík, Pavel Peterka

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i.

Optická vlákna nás obklopují denně na každém kroku, přitom většinou zůstávají skryta našim očím v bludišti kabelových kanálů a sítí. Jsou základním prvkem moderních komunikací a jejich vývoj trval od prvních myšlenek řady desetiletí. Klíčovou osobností spjatou s tímto vývojem je Charles Kue Kao, kterému byla za celoživotní dílo a průlomové výsledky v této oblasti udělena polovina Nobelovy ceny. V tomto díle rubriky „Ve zkratce“ se pokusíme vysvětlit základní principy a charakteristiky optických vláken.

Optické vlákno

Optické vlákno je dielektrická struktura (vlnovod) většinou válcové symetrie, jejíž podélný rozměr je mnohonásobně větší než příčný, složená z optického jádra o vyšším indexu lomu a optického obalu o nižším indexu lomu, která přenáší světlo ve směru své podélné osy.



Obr. 1 Křižíkova fontána v současnosti

Historie

Počátek historie přenosu světla vlnovody sahá hluboko do 19. století, kdy Daniel Colladon, profesor univerzity v Ženevě, demonstroval na svých přednáškách (1841) vedení slunečního světla proudem vody (o indexu lomu 1,33) vytékajícím ven z nádrže (do vzduchu o indexu lomu ~1). Jeho pokus se stal známým zejména v podání Johna Tyndalla, který ho v roce 1853 demonstroval v Londýně. U nás je dobře známá Křižíkova fontána (obr. 1), vybudovaná již roku 1891 na pražském Výstavišti.

Novodobá historie optických vláken je spjata s osobou Charlese Kuena Kaa (obr. 2), který v roce 1966 publikoval v Proc. IEE klíčový článek, ve kterém souhrnně popsal problematiku optického přenosu v optických vláknech. Soustředil se na problém optických ztrát a disperze a došel k závěru, že amorfní materiály, zejména křemenné sklo, jsou pro tento účel jedinečné. Již tenkrát správně odhadl přípustnou mez optických ztrát na úrovni 20 dB/km (umožňující přenést 1 % navázaného vstupního výkonu na vzdálenost 1 km) a související maximální přípustný obsah nečistot, který u kritických nečistot (např. Fe^{3+} , OH^- , Co^{2+}) nesmí přesahovat jednotky ppm (tj. desetitisíciny procenta). V té době to byly hodnoty značně vizionářské, ale Kao se svojí úpornou celoživotní snahou přičinil o jejich realizaci. Za celoživotní dílo v této oblasti a za průlomové výsledky (základního) výzkumu přenosu světla ve vláknech byla před rokem Charlesi K. Kaovi udělena polovina Nobelovy ceny za fyziku (viz číslo 1/2010 tohoto časopisu). Společně s trojicí vědců N. G. Basovem, A. M. Prochorovem a C. H. Townesem, kteří ve stejné době položili základy moderním laserům, tak vybudoval fundament moderních komunikací.



Obr. 2 Charles Kuen Kao – nositel Nobelovy ceny za fyziku. (Foto: National Acad. Of Engineering)

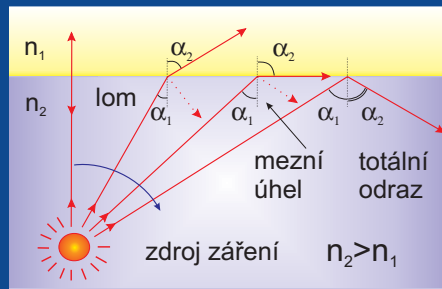
Princip

Princip vedení světla v optických vláknech je překvapivě jednoduchý – jde v podstatě o využití jevu úplného vnitřního odrazu paprsku (angl. *total internal reflection*) na rozhraní jádra a obalu. Úplný odraz vyplývá ze známého Snellova zákona, který říká, že poměr sinů úhlu dopadu a lomu je pro určitá dvě prostředí stálý a rovný poměru velikosti indexu lomu (rychlosti vlnění) v jednotlivých prostředích, tj.

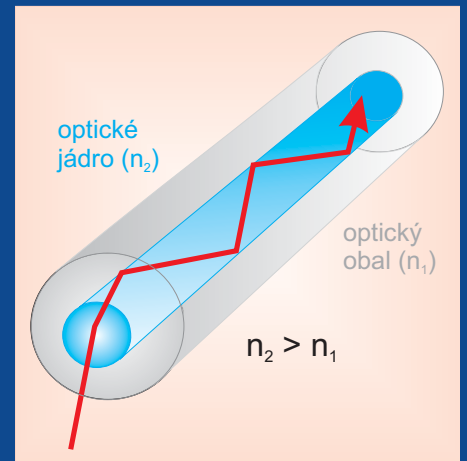
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Šíří-li se paprsek opticky hustším prostředím pod různými úhly, v jednom okamžiku nastane situace, kdy úhel lomu (α_2) je roven 90° ($\sin \alpha_2 = 1$). Takový úhel dopadu α_1 nazýváme úhlem mezním (kritickým). Překročí-li úhel dopadu tento mezní úhel, dojde k úplnému odrazu paprsku zpět do prostředí opticky hustšího.

Paprsek navázaný do jádra optického vlákna se tedy šíří z jednoho konce na druhý na základě úplného odrazu (obr. 3) na rozhraní mezi optickým jádrem (o vyšším indexu lomu) a obalem (o nižším indexu lomu).



Obr. 3
a) úplný odraz,
b) šíření světla v optickém vlákně



Vlastnosti optických vláken

Jednou ze základních charakteristik optických vláken je **numerická apertura (NA)**:

$$NA = \sqrt{(n_{\text{jádro}}^2 - n_{\text{obal}}^2)} = \sin \theta$$

Numerická apertura nám říká, jak velký je maximální vstupní (nebo výstupní) úhel paprsků (θ), které ještě můžeme do vlákna navázat (nebo které z něj na druhé straně vystupují). Čím větší numerická apertura je, tím více světla z bodového zdroje lze do vlákna soustředit a přenést. Je tedy žádoucí, aby rozdíl indexů lomu mezi optickým jádrem a obalem (viz vzorec) byl co největší. To má však své meze, protože kromě indexu lomu jsou materiály optického jádra a obalu charakterizovány také roztažností a překročením určité meze tohoto kontrastu dojde k mechanickým defektům (praskání, odlupávání apod.) Pro překonání těchto omezení jsou v posledních letech vyvíjeny nové druhy speciálních vláken tzv. mikrostrukturálních, kde funkci obalu v co největší míře zastávají vzduchové díry.

Další základní charakteristikou je **optický útlum**. Ten charakterizuje optické ztráty vlákna způsobené absorpcí a rozptylem světla při jeho průchodu vláknem:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{10}{L} \cdot \log \frac{P_{\text{výstupní}}}{P_{\text{vstupní}}} \text{ [dB / km]}$$

Útlum nám říká, jaký podíl navázaného světla na dané vlnové délce projde na druhý konec vlákna. Útlum je závislý na vlnové délce a je to proto, že absorpce i rozptyl, které jsou jeho příčinou, jsou spektrálně závislé.

Záření v každém optickém vlákně podléhá tzv. Raileighovu rozptylu, který vzniká v důsledku interakce tohoto záření s objekty menšími, než je vlnová délka, tj. molekulami vlastního materiálu – skla, polymeru apod. Tento rozptyl klesá se čtvrtou mocninou vlnové délky a z podstaty věci jej nelze odstranit. Na spektrální závislosti útlumu vláken (obr. 4) [P. Peterka a V. Matějček: „Optická vlákna se dočkala Nobelovy ceny za fyziku“, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, 55(1):1–11, 2010] se projevuje poklesem útlumu směrem do minima v blízké infračervené oblasti. Kromě Raileighova rozptylu každý reálný materiál, tedy i jádro optického vlákna, vykazuje určité nedokonalosti, které jsou příčinou přídavných rozptylových ztrát. Charakter těchto ztrát závisí na velikosti rozptylových center a teoreticky ho lze eliminovat.

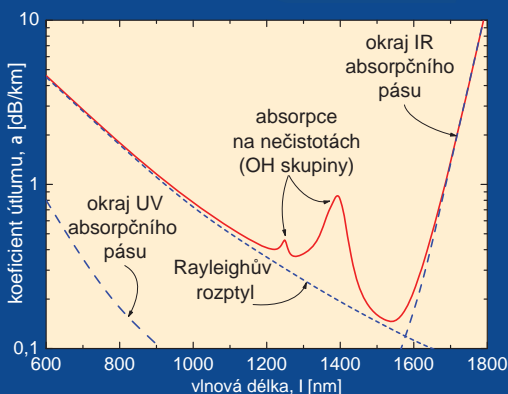
Kromě rozptylu je optický útlum dále způsobován absorpcí. Ta vzniká v důsledku interakce záření s vlastním materiálem vlákna, případně s jeho nečistotami. V ultrafialové oblasti spektra je záření od určité vlnové délky dále směrem ke kratším vlnovým délkám zcela pohlcováno elektronovými přechody molekul materiálu a hovoříme o krátkovlnné hraně propustnosti (materiálu, vlákna). Podobně je tomu v blízké infračervené oblasti, kde je záření pohlcováno vibracemi a rotacemi vazeb molekul materiálu a hovoříme o dlouhovlnné hraně propustnosti. Mezi těmito hranami existuje tzv. okno propustnosti, ve kterém vykazuje materiál minimální absorpci. Vedle toho může být záření absorbováno atomy, ionty či molekulami nečistot. Jak zjistil již Ch. K. Kao, stačí jen nepatrné množství nečistot na úrovni desetitisícin procenta, např. OH⁻ skupin, aby optický útlum vzrostl a vlákno se stalo nepoužitelným.

V souvislosti s optickým útlumem křemenných optických vláken hovoříme obvykle o třech tzv. oknech propustnosti okolo 850, 1 300 a 1 550 nm, ve kterých jsou primárně provozovány optické komunikace.



K dalšímu čtení o optických vláknech doporučujeme:

B. E. A. Saleh, M. C. Teich: *Fundamentals of photonics*. J. Wiley & Sons, NY (český překlad *Základy fotoniky* vydal MATFYZPRESS, Praha 1994–96).

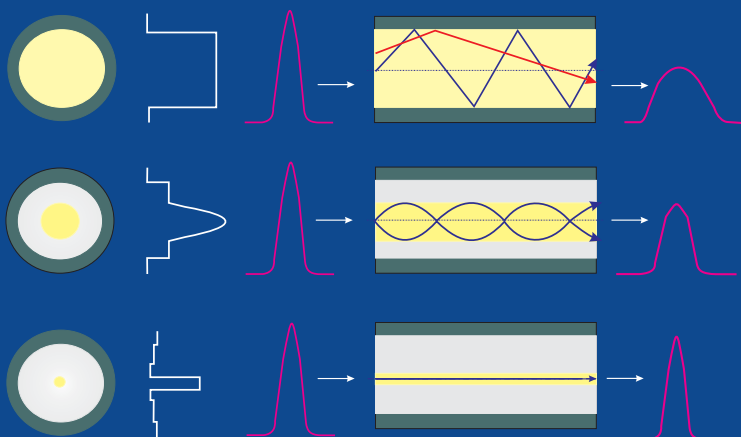


Obr. 4 Rozbor optických ztrát.

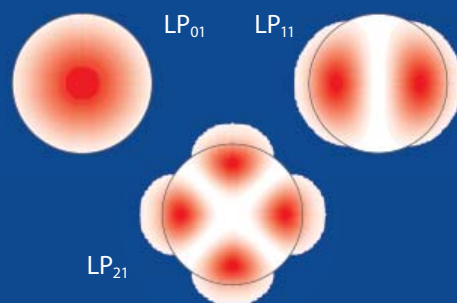
Další důležitou charakteristikou je **disperze**. Ta nám říká, nakolik se původně ostrý pulz navázaný na začátku vlákna rozšíří při průchodu vlákem. Je to důležitá informace - pokud bychom posílali optické pulzy příliš krátce za sebou, díky disperzi (rozšíření) by se po uražení určité vzdálenosti postupně vzájemně prostoupily a namísto oddělených signálů (bitů) by na konci komunikační linky byl detekován pouze šum. Chceme-li popisovat disperzi, nevystačíme si již s představou paprskové optiky, ale musíme trochu nahlédnout do tajů vlnodivé optiky. Ta popisuje šíření světla jakožto elektromagnetického vlnění pomocí Maxwellových rovnic. Každý vid je charakterizován konstantou šíření a příčným rozložením pole, které je pro první tři vidy patrné na obr. 5 (kružnicí je vyznačeno rozhraní jádra a pláště).

Šíří-li se jádrem vlákna více vidů, hovoříme o struktuře vlákna **mnohavidového**. Takové vlákno má jádro o velkém průměru ($\sim 50\text{--}1\,000\ \mu\text{m}$) a šíření světla si velmi hrubě můžeme představit pomocí paprsků, tak jak to byl popisováno v úvodní části. Šíří-li se v jádře vlákna jeden jediný vid, hovoříme o struktuře vlákna **jednovidového**. Takové vlákno má jádro o malém průměru blízkém vlnové délce používaného záření ($\sim 3\text{--}8\ \mu\text{m}$) a v takovém případě již s představami paprskové optiky nevystačíme.

Je-li vlákno mnohavidové, může se šířit v jeho jádře až tisíce vidů. Jejich optická dráha je různě dlouhá – můžeme si ji pomocí paprsků představit jako odraz od rozhraní jádro/pláště pod různým úhlem. Delší dráha při stejné rychlosti (konstantě šíření) nutně vede k situaci, že některé paprsky dorážejí na druhý konec vlákna rychleji a některé pomaleji. Jevu říkáme **mezividová disperze**, která je příčinou deformace vstupních pulzů. Mezividovou disperzi lze snížit „zrychlením“ paprsků, které se šíří v blízkosti pláště u mnohavidových vláken s parabolickým profilem indexu lomu, viz obr. 6. V jednovidových vláknech se šíří jediný vid, a proto se vliv mezividové disperze neuplatňuje. Uplatňuje se však vliv disperze **chromatické**. Chromatická disperze je dána jednak disperzí materiálovou, způsobenou závislostí indexu lomu materiálu na vlnové délce záření, jednak disperzí vlnodivovou, která závisí na tvaru profilu indexu lomu optického vlákna – vlnovodu. Chromatickou disperzi proto lze částečně kompenzovat vhodným návrhem **profilu indexu lomu**. Příklady různých profilů indexu lomu můžeme vidět na obr. 6.



Obr. 6 Profily indexu lomu nejběžnějších druhů optických vláken (polymer-clad-silica, mnohavidové gradientní, jednovidové), popis šíření světla v těchto vláknech a deformace vstupních pulzů vlivem disperze a útlumu.



Obr. 5 Rozložení vidového pole.

Příprava optických vláken

Příprava optických vláken je velkým technologickým úkolem, jehož zvládnutí trvalo lidstvu od prvních Tyndalových pokusů více než jedno století. Odehrává se ve dvou krocích – **přípravě tzv. preformy a vlastním tažením vlákna**.

Preforma je skleněná tyčka – polotovar pro tažení vlákna. Z důvodu požadovaného malého útlumu musí být vyrobena z velmi čistého materiálu a z důvodu požadavků na disperzi musí mít zcela přesnou strukturu. Ani jeden z těchto požadavků nelze splnit klasickými sklářskými technologiemi. Proto se používají postupy tzv. CVD (Chemical Vapor Deposition) – depozice z plynné fáze (viz obr. 7). Znamená to vlastně přípravu skla spalováním par výchozích látek (SiCl_4). Plyny/páry nebo výchozí kapaliny lze totiž velmi dobře čistit destilací a dosáhnout tak požadovaných parametrů. Navíc se takto sklo připravuje po jednotlivých tenkých vrstvách, čímž lze získat požadované struktury v podobě jemných profilů indexu lomu. Hotová preforma (obr. 8) se v druhém kroku zavěsí do pece tažičky optických



Obr. 7 Zařízení MCVD na přípravu preformem.



Obr. 8 Preforma přecházející do optického vlákna při tažení.

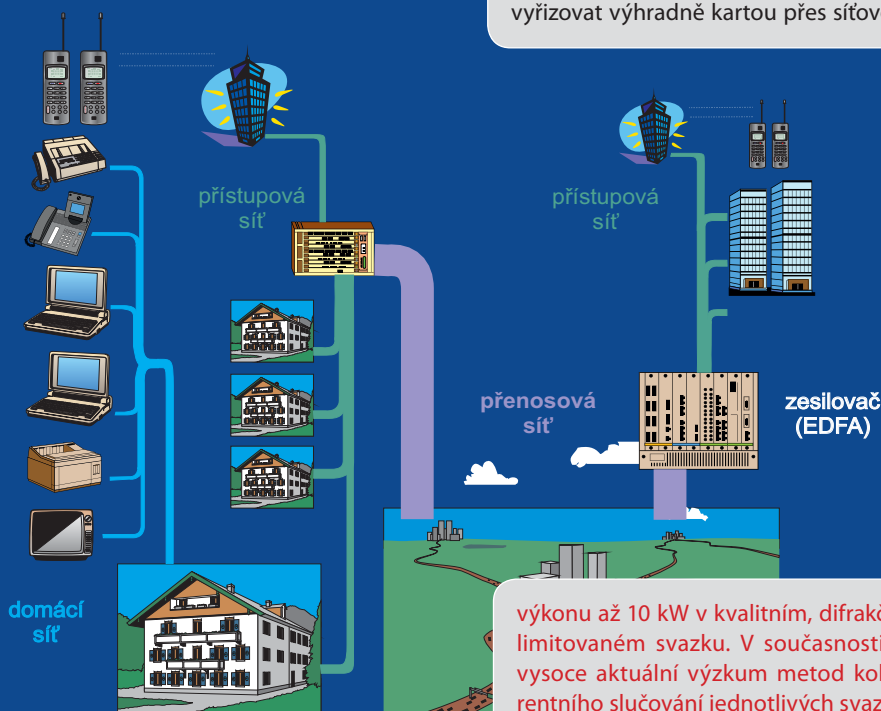


Obr. 9 Tažička optických vláken.

vláken (obr. 9) a po rozežhání na 2 000 °C z ní odkápnou kapka, která za sebou táhne tenké vlákno. To je uchopeno do navíjecího zařízení, které musí být v rychlé zpětné vazbě s bezkontaktním měřením jeho průměru. Tím je zajištěna stabilita průměru vlákna, která je důležitá pro další zpracování a použití. Aby se zabránilo křehnutí vlákna a zajistila jeho ohebnost, musí být na skleněný povrch kontinuálně nanášena vrstva polymeru, která chrání skleněnou část vlákna před vlhkostí a vnějšími mechanickými vlivy.

Přípravě optických vláken bylo věnováno zvláštní číslo časopisu *Jemná mechanika a optika* 1/2010, optickým vláknům a vláknovým laserům čísla 1 a 4–5/2010 *Československého časopisu pro fyziku*.

Obr. 10 Použití optických vláken v komunikacích.

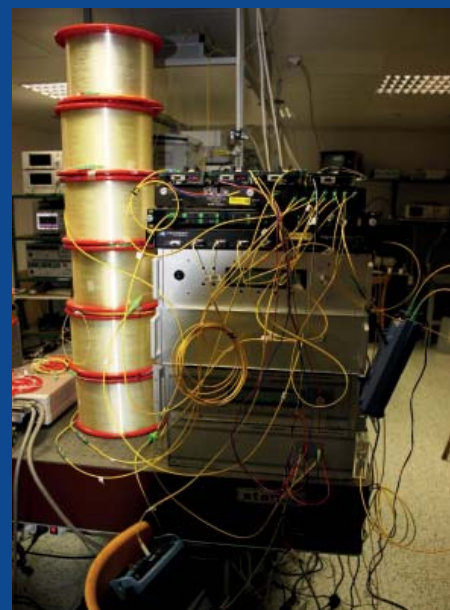


Použití optických vláken

Optická vlákna byla vyvíjena především pro přenos v telekomunikacích. Je to proto, že zkrácení vlnové délky (λ) nosného vlnění (záření) nutně vede podle známého vzorce $\lambda = c/v$ (c – rychlost světla) k významnému zvýšení pracovní frekvence ν , a tedy i ke zvýšení kapacity přenosu (vyjádřeno v bit/s) vůči radiokomunikacím. Porovnejme např. frekvenci sítě Wi-Fi (cca 2,5 GHz) a telekomunikačního laseru na vlnové délce 1,55 mikronu (200 THz). Světlo nabízí potenciálně než 10 000krát větší přenosovou kapacitu!

Dnes si život bez optických vláken představíme jen těžko. I když je běžně často nevidíme, protože kabely jsou obvykle uloženy v zemi nebo nějakým jiným obložení, naše data se po nich rozběhnou při prvním stisknutí klávesy počítače, při prvním výběru peněz z bankomatu nebo pošty, nákupu jízdenky na vlak a dokonce i při telefonování mobilem. Dokonce už i nové televizní přijímače běžné ceny dnes mají jeden ze vstupů upravený pro optické vlákno pro případ, že za pár let vlákna běžně dosáhnou až do našich domovů (sítě FTTH – Fiber To The Home). Představu takových komunikací představil Bill Gates před několika lety v Praze. Podle ní bude mít každý člen domácnosti vlastní počítač nebo notebook, připojený do domácí sítě bezdrátovým připojením (Wi-Fi), k síti bude též připojena televize a domácí kino, všechny žádosti a formuláře se budou vyřizovat přes web, důchody nebo poplatky v bance a na poště se budou vyřizovat výhradně kartou přes síťovou

výkonu až 10 kW v kvalitním, difrakčně limitovaném svazku. V současnosti je vysoce aktuální výzkum metod koherentního slučování jednotlivých svazků, díky němuž se očekává možnost kontinuálně generovat záření s výkonem řádu stovek kW. Ale to už je jiná kapitola.



Obr. 11 Laboratorní měřící pracoviště pro optický přenos signálů 10×10 Gbit/s na 383 km optického vlákna navinutého na cívkách.

čtečku, síť senzorů bude obsluhovat vytápění a rodinná data (fotografie, filmy) se budou periodicky zálohovat na síťová zálohovací média. Telefon, který byl u počátku tohoto dění a který dnes představuje jen 10 % přenášených dat, bude samozřejmě přenášen také touto sítí (VoIP). Jestliže uvnitř domácnosti stáčí každému uživateli pomalejší Wi-Fi připojení, z domácnosti již budou odcházet (přicházet) třeba po metalické síti větší balíky dat (obr. 10). A když se „prameny“ datových toků z různých domácností (třeba velkého paneláku) spojí do jednoho velkého proudu a začnou opouštět tuto přístupovou síť, nastává situace, kdy je nutné zvýšit kvalitu připojení (obr. 11), tj. podstatně zvýšit jeho rychlost směrem k rychlostem používaným na páteřních sítích. Podíváme-li se pozorně okolo sebe, uvidíme, že Gatesova představa nebyla nijak nerealistická.

Tím, jak se přenáší digitálních dat stále více, je potřeba hledat cesty pro další zvyšování kapacity sítě. Jsou rozvíjeny přístupy multiplexování v časové nebo spektrální oblasti (TDM a WDM) a celooptické zpracování informace, které vyžadují stále nové typy optických vláken a vláknových komponent (viz loňské číslo 4–5 tohoto časopisu). Kromě toho jsou dnes optická vlákna stále častěji využívána pro vláknově-optické senzory monitorující technologické procesy, parametry životního prostředí nebo procesy v lidském těle. V poslední dekádě se rychle rozvíjejí vláknové lasery, které v mnoha aplikacích začínají nahrazovat konvenční pevnolátkové lasery. Kontinuální vláknové lasery dosahují