

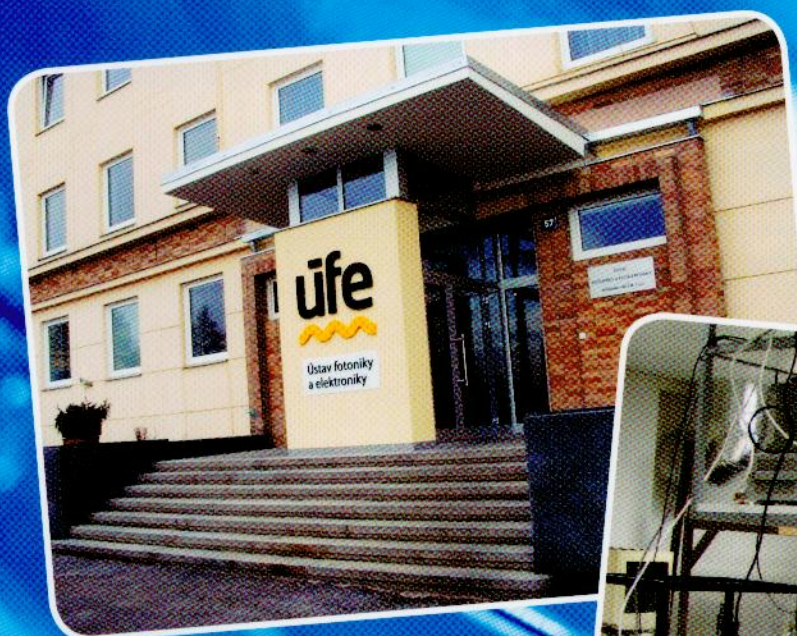
4
2010

JMO

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

FINE MECHANICS AND OPTICS

ÚSTAV FOTONIKY A ELEKTRONIKY AKADEMIE VĚD ČR, v.v.i.
INSTITUTE OF PHOTONICS AND ELECTRONICS AS CR, v.v.i.



www.uře.cz

CHABERSKÁ 57, 182 51 PRAHA 8 - KOBYLISY

Nobelova cena za fyziku za rok 2009

Nobelova cena za fyziku byla v minulém roce 2009 udělena z jedné poloviny Charlesi K. Kaovi a z druhé poloviny Willardu S. Boylemu a Georgovi E. Smithovi. Je to po pouhých čtyřech letech další Nobelova cena udělená za činnost spojenou s optikou. Připomeňme si, že to v r. 2005 byli Roy J. Glauber, John L. Hall a Theodor W. Hänsch. Jedna polovina ceny byla tehdy udělena prvnímu z nich za příspěvek ke kvantové teorii optické koherence a druhá polovina zbylým dvěma za jejich příspěvky k vývoji přesné spektroskopie založené na laserovém záření, včetně metody optického kmitočtového hřebenu.

Profesor Charles Kuen Kao obdržel cenu za průlomové úspěchy týkající se přenosu světla ve vláknech pro optické sdělování. Druhá polovina ceny byla udělena za vynález zobrazovacího polovodičového obvodu - snímače CCD. Jeden i druhý předmět ceny se staly základy obrovských průmyslových odvětví, která se nebyvale rychle rozvíjela a jejich produkty dnes tvoří neodmyslitelnou součást života.

1. PUBLIKACE ZAHAJUJÍCÍ OBOR VLÁKNOVÉHO OPTICKÉHO SDĚLOVÁNÍ

I když obě poloviny ceny mají své místo v optice, budeme se na těchto stránkách věnovat pouze první části ceny. Ch. Kao je nejmladší ze všech tří laureátů, ale práce, na kterých je jeho Nobelova cena založena, jsou naopak o něco starší, než zbylých dvou. Všechny prameny související s udělením této Nobelovy ceny se odvolávají na publikaci „Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies - Dielektrické vláknové optické povrchové vlnovody pro optické kmitočty“, kterou nositel publikoval spolu s Georgem A. Hockhamem v časopise *Proceedings IEE* v r. 1966 str. 1151-8 za svého působení ve výzkumu Standard Telecommunication Laboratories Ltd. (nyní je vlastníkem Nortel) ve Velké Británii. Je vidět, že i takový „nenápadný“ časopis může ukrývat převratné myšlenky, což je zvláště dnes hodno pozornosti, kdy se jen publikací ve „vysoce prestižních“ časopisech, jako je např. *Nature*, přikládá vysoké hodnocení.

V uvedené publikaci autoři uvádějí, že dielektrické vlákno představuje možné prostředí pro vedení přenosu energie pro optické kmitočty. Vhodný typ dielektrického vláknového vlnovodu má kruhový průřez. Jádru má nepatrně (asi o 1 %) vyšší index lomu než okolní plášť. Průměr jádra má být srovnatelný s vlnovou délkou přenášeného světla, průměr pláště má být stonásobkem vlnové délky. Tento druh vlnovodu má operovat s jednoduchým HE_{11} videm a jeho přenosová kapacita má být větší než 1 GHz. Má být ohebný a dovolovat výrobní tolerance kolem 10 %. Až o takových „detailech“ uvažoval tehdy dnešní laureát. Autoři dále uvedli, že při vysoké přenosové kapacitě je diskutovaný typ vlnovodu ekonomicky výhodnější než koaxiální kabely a rádiové systémy. Kao vytipoval jako vhodný materiál tavený křemen. Z uvedeného přehledu článku je zřejmé, že už v něm bylo poukázáno na většinu charakteristik vláknových vlnovodů a pozdější práce „pouze“ prohlubovaly poznání o nich.

Realizace úspěšného vláknového vlnovodu tehdy ovšem závisela na dostupnosti vhodného nízkoztrátového dielektrického materiálu. Autoři v článku rozebírají spektrální útlum ve skle, v taveném křemenu a polymetylmakrylátu v rozsahu vlnových délek mezi 500 nm a 1100 nm. U skla se útlum pohyboval mezi 4-8 dB/m, u polymetylmakrylátu kolem 3 dB/m a u taveného křemene byl hrubý odhad mezi 0,2-1,2 dB/m pro vlnové délky do 800 nm. Zkoumají také vazební ztráty mezi dvěma vlákny s imerzní kapičkou mezi nimi.



Obr. 1 Profesor Charles Kuen Kao dnes

2. STRUČNÝ BĚH ŽIVOTA PROF. CH. K. KAO

Charles Kuen Kao se narodil 4. 11. 1933 v Šanghaji. Vystudoval elektroniku na britské Wolwich Polytechnic a doktorský titul získal na University of London v r. 1965. Ve Standard Telecommunication Laboratories pracoval již souběžně při doktorském studiu a pak až do r. 1970. V r. 1970 nastoupil na místo prvního profesora elektroniky na The Chinese University of Hong Kong - CUHK, kde se pro něj ustavilo oddělení elektronického inženýrství. V r. 1985 mu tato univerzita udělila hodnost doctor honoris causa. V letech 1987-96 vedl univerzitu jako vicekancléř. Bylo to období velkého rozmachu.

Na internetových stránkách hongkongské univerzity je laureátovi věnován velký prostor. Je tam také umístěno jeho 17 medailí získaných z různých končin světa. V r. 1985 obdržel Marconiho cenu (Marconi International Scientist Award), která je široce chápána jako „Nobelova cena“ za elektroinženýrství. Spojené království mu udělilo Faradayovu medaili. Od Japonska dostal v r. 1996 tzv. Dvanáctou japonskou cenu (12th Japan Prize). Laureát je v materiálech univerzity titulován jako „Otec vláknové optiky“, protože je tak znám po celém světě. Podle jeho slov byl velmi překvapen, že Nobelova nadace udělila cenu aplikovanému oboru, což je zcela výjimečné.

Čínská akademie věd ho zvolila v r. 1996 svým akademikem. V témž roce byla pojmenována na základě návrhu observatoře ČAV v Nanjingu (Purple Mountain Observatory) jedna z planetek názvem Kaokuen.

V r. 1980 zakládal Ralf Th. Kersten evropský časopis *Journal of Optical Communications*, jako první vědecký časopis s touto tematikou. Zakladatel se dnes pyšní tím, že do redakční rady tehdy povolal také Ch. K. Kaoa, jak uvedl v letošním třetím čísle tohoto časopisu. Tehdy mezi léty 1974 a 1987 Kao působil ve Spojených státech jako vedoucí vědecký pracovník a posléze i vice-president a technický ředitel v Electro-Optical Products Division ITT v Roanoke (stát Virginie). V 1983-7 byl výkonným vědeckým pracovníkem a ředitelem výzkumu v Advanced Tech Center ITT v Sheltonu (stát Connecticut).

Nejlépe jsou údaje o jeho profesní kariéře shromážděny na stránkách The Science and Technology Foundation of Japan (http://www.japanprize.jp/en/prize_prof_1996_kao.html). Odtud je také zřejmé, že Kao nebyl z těch, kteří publikují stovky prací. V uvedených stránkách je shromážděno pouze 12 titulů jako „Major Books and Academic Papers“. Z toho 4 jsou z období těsně po jeho základní práci. Pozdější publikace jsou většinou více méně shrnujícího typu. V *IEE Proceedings* publikoval znova až po 20 letech, v r. 1986.

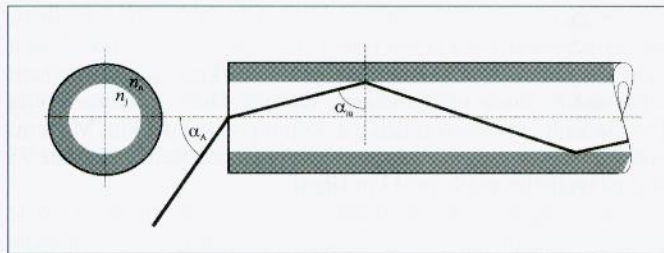
Kao má také britské a americké občanství. V současné době na něho doléhá Alzheimerova choroba, proto jeho nobelovskou přednášku četla jeho žena.

3. VĚDECKÉ ZDŮVODNĚNÍ UDĚLENÍ NOBELOVY CENY

Při každém udělování Nobelovy ceny uvádí Nobelova nadace tzv. Scientific Background jako zdůvodnění pro výběr. Uvedme zde několik bodů tohoto elaborátu.

Vedení světla v pevném prostředí využitím úplného vnitřního odrazu bylo prvně diskutováno již během 19. století. V r. 1841 D. Colladon na Univerzitě v Ženevě demonstroval vedení světla ve vodním paprsku, zatím co J. Babinet ve Francii následně tuto

ideu rovněž rozšířil na vedení v ohnuté skleněné tyči. Tento jev je často připisován J. Tyndalovi, který demonstroval v r. 1854 vedení světla ve vodním paprsku na zasedání Royal Society v Londýně podle vzpomínek M. Faradaye na dřívější Colladonovo londýnské předvádění. Je ale možno uvést, že tento jev byl znám již ze starých dob jako dekorace malými kousky skla v Egyptě či Mezopotámii. Vedení světla ve velkých vodních proudech bylo rovněž využíváno pro zábavní účely jako osvětlení fontán předváděné na Světové výstavě v Paříži v r. 1889.



Obr. 2 Průchod paprsku vláknem s jádrem a pláštěm. Indexy lomu jádra a pláště jsou postupně n_1 , n_2 , úhel mezního dopadu je α_m a aperturní úhel α_a

První aplikace vedení světla ve skleněných vláknech (nebo spíše v krátkých tenkých tyčinkách) je datováno od r. 1920. Bylo to přenášení obrazu svazkem vláken. Motivací byla gastroscopie v medicíně, flexibilní dalekohled a obrazové kódování ve vojenství a rovněž v počátcích televize. Holá skleněná vlákna byla však velmi ztrátová a nepřenášela příliš mnoho světla. Vlákna se navzájem dotýkala a světlo přecházelo z jednoho vlákna do druhého a unikalo ven z vláknového svazku. Průlom nastal začátkem padesátých let, kdy byla demonstrována idea, že k vedení světla se přispěje, bude-li k úplnému vnitřnímu odrazu docházet uvnitř vlákna, na rozhraní jádra a pláště (obr. 2). Jádro má nepatrně větší index lomu. Úplný vnitřní odraz nastává, když paprsek dopadá na rozhraní mezi jádrem a pláštěm pod větším než mezním úhlem. Podle Snellova zákona se paprsek v prostředí s menším indexem lomu láme od kolmice, tj. úhel lomu je větší než úhel dopadu. Mezního úhlu dopadu α_m se dosáhne, bude-li se paprsek lámat pod pravým úhlem

$$n_1 \sin \alpha_m = n_2,$$

protože sinus úhlu lomu je jedna.

Aperturní úhel vlákna je poloviční vrcholový úhel sbíhavého kužele paprsků, které mohou vniknout do jádra vlákna. Sinus tohoto úhlu se snadno dostane z geometrie paprsků.

$$\sin \alpha_a = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_m} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

V r. 1954 H. H. Hopkins a N. S. Kapany v Imperial College London úspěšně sestavili svazek několika tisíc vláken délky 75 cm a prokázali dobré parametry pro přenášení obrazu. Kombinace technologie vláknových svazků našla u některých aplikací, a to zejména gastroscopie, přímou cestu k průmyslové produkci. Teorie šíření světla ve vláknech byla popsána podrobněji N. S. Kapany a později vylepšena v publikaci z r. 1961 E. Snitzerem.

Optická oblast elektromagnetického spektra odpovídající vlnovým délkám viditelného, blízkého infračerveného a ultrafialového spektra se odedávna považovala za atraktivní pro sdělování. Kmitočet světelného vlnění je vysoký a dovoluje proto modulaci vysokými kmitočty a tudíž vysokou rychlost přenosu. V r. 1880 si patentoval G. A. Bell optický telefon nazvaný foton telefon sestávající ze zrcadla rozechvívaného zvukem, na něž bylo soustředěno sluneční světlo. Světlo po odraze procházelo volným vzduchem na selenový detektor svázaný se sluchátkem. O něco později byly podobné myšlenky patentovány a jeden patent se také týkal průchodu světla křemenem jako prostředím přenosu. V padesátých letech 20. století ovšem jen velmi málo vědců věřilo optickému sdělování jako schůdnému řešení.

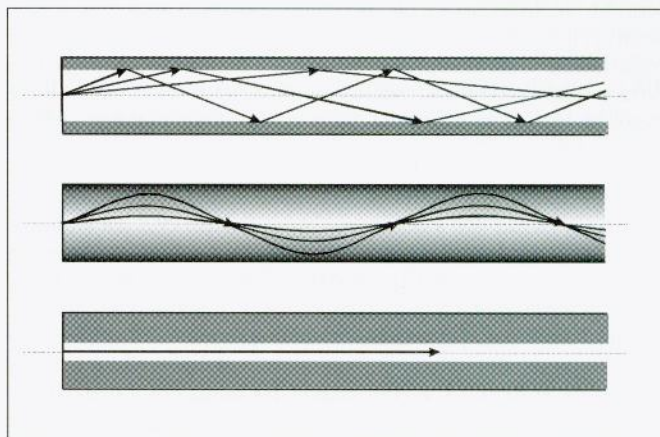
Před sto lety byli G. Marconi a K. F. Braun počtení Nobelovou cenou za příspěvek k rozvoji bezdrátové telegrafie, před padesáti lety se rychle rozvíjelo elektronické a rádiové sdělování. První transatlantický kabel byl položen v r. 1956 a umělé družice brzy nato ještě vylepšily pokrytí země sdělovacími prostředky. První komunikační družice byla vynesena již v r. 1958. Výzkum ve sdělování byl soustředěn hlavně na kratší rádiové vlny milimetrové oblasti s úmyslem dosáhnout vyšších přenosových rychlostí. Tyto vlny však nemohly procházet tak snadno vzduchem jako delší vlny a výzkum se proto obrátil k návrhu praktických vlnovodů.

Vynález laseru začátkem šedesátých let (Nobelova cena v r. 1964 C. H. Townesovi, N. G. Basovovi a A. M. Prochorovovi) znamenal nový podnět k výzkumu optického sdělování. Brzy nato byl T. H. Maimanem předveden impulzní laser na rubínu a A. Javan postavil první laser s kontinuálním provozem se směsí plynů He a Ne. Polovodičové lasery se objevily v témž čase, ale byly zprvu nepříliš praktické, protože vyžadovaly vysoké proudy a nepracovaly při pokojové teplotě. Teprve o několik let později zavedením heterostruktur (Nobelova cena v r. 2000 Z. I. Alferovovi a H. Kroemerovi) dovolilo práci při pokojové teplotě a tím se staly tyto lasery ideálním zdrojem pro optické sdělování.

Intenzivní výzkum vhodného přenosového prostředí v optické oblasti začal od šedesátého roku. Optické vlákno však bylo tehdy mimo pozornost pro svůj vysoký útlum. Útlum se vyjadřuje v jednotkách dB/m jako součinitel

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P\{0\}}{P\{L\}},$$

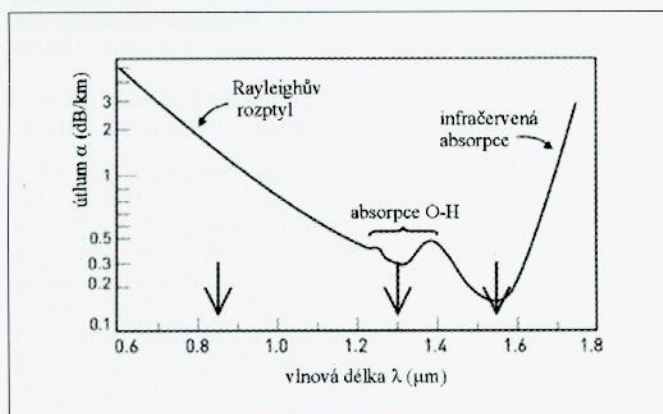
kde $P\{0\}$ a $P\{L\}$ jsou vstupní a výstupní světelný výkon a L je délka vlákna. Útlum prvních optických vláken byl typicky 1000 dB/km, což znamená, že po 20 metrech zůstalo pouze 1% výkonu. Jiné možnosti, jako vedení světla řadou čoček nebo plynovými trubicemi s radiálním teplotním gradientem pro neustálé soustředování světelného svazku, se neosvědčily. A. E. Karbowiak ze Standard Telecommunication Laboratories ve Velké Británii a J. C. Simon společně s E. Spitzem z CSF (Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil) ve Francii ukázali, že pro optické sdělování by bylo vhodné používat vlnovody, v nichž by se šířil jediný vid (např. v tenkých vrstvách), protože by došlo k redukci disperze (E. Spitz byl před opuštěním ČSSR pracovníkem Výzkumného ústavu pro sdělovací techniku A. S. Popova - VÚST v Praze). J. - I. Nishizawa a I. Sasaki v Japonsku jakož i S. A. Miller z Bellových laboratoří ve Spojených státech navrhli optická vlákna s gradientním indexem lomu. V mnohovídrových vláknech s radiálním gradientem indexu lomu se redukují ve srovnání se skokovým průběhem indexu lomu



Obr. 3 Šíření paprsků v mnohovídrovém, gradientním a jednovídrovém vlákně. V důsledku různých optických drah různě skloněných paprsků nastává v mnohovídrovém vlákně rozšíření signálu (vidová disperze). V gradientním vlákně s vhodným radiálním gradientem indexu lomu k rozšíření nedochází, ale získání přesného gradientu je v praxi obtížné. Proto je nejvhodnější vlákno jednovídrové

disperzní efekty vznikající v důsledku různých rychlostí prostorových vidů (obr. 3). Tato vlákna měla být využita jako první generace optických vláken pracujících při vlnové délce 870 nm. Avšak žádné řešení nenalezlo lék na problém útlumu.

Charles K. Kao byl jako mladý inženýr v STL angažován v optickém sdělování. Začal pod vedením A. E. Karbowiaka a potom dostal na starost malou skupinu, v níž měl zpočátku jen jednoho spolupracovníka - G. A. Hockhama. To byl mladý teoretik, jehož práce na analýze efektu nedokonalostí ve vlnovodech vedla k disertační práci obhájené v r. 1969. Společně podrobně vyšetřovali základní vlastnosti optických vláken vztažené k optickému sdělování. Na rozdíl od většiny kolegů brali v úvahu nejen fyziku vlnovodů, ale také materiální vlastnosti. Jejich závěry Kao prezentoval v Londýně začátkem r. 1966 a publikoval v červnu téhož roku. Nejdůležitějším výsledkem bylo, že ztráty v dielektrickém prostředí jsou většinou způsobeny absorpcí a rozptylem (obr. 4). Absorpce byla převážně způsobena nečistotami, zejména ionty železa. Ostatní ztráty vyvolané ohybem a nedokonalostmi vlnovodu jakož i šířivé a vyzařovací ztráty byly shledány jako malé. Autoři dospěli k závěru, že vlákna ze skla o vyšší čistotě by mohla být vhodná pro optické sdělování a že by mohla mít útlum menší než 20 dB/km, který se považoval za mezní pro životaschopné optické sdělování.



Obr. 4 Útlum křemene v závislosti na vlnové délce. Dominantní složkou útlumu v oblasti kratších vlnových délek je Rayleighův rozptyl se závislostí λ^{-4} a v oblasti delších infračervená absorpce v molekulách. Nečistoty ve formě radikálů O-H je obvykle těžko odstranit. Šipky ukazují vlnové délky využívané pro optické sdělování. Nejmenší útlum se dosahuje pro vlnovou délku 1,55 μm

Kao společně se svými novými spolupracovníky T. W. Daviesem, M. W. Jonesem a C. R. Wrightem pokračovali v práci řadou pečlivých měření spektrálního útlumu světla ve skle a jiných materiálech. Ukázal zejména, že tavený křemen (SiO_2) má čistotu požadovanou pro optické sdělování. Naneštěstí tento materiál má vysokou teplotu tavení. Poté začal celosvětový výzkum s cílem

vyrobit skleněná vlákna s nízkými ztrátami. Čtyři roky po článku Kaoa a Hockhama uspěl výzkumný tým R. D. Mauera z Corning Glass Works ve Spojených státech s důmyslnou metodou zvanou CVD (Chemical Vapor Deposition). Podařilo se jim vytáhnout vlákna z taveného křemene s malými ztrátami. Aby dosáhli malého rozdílu indexů lomu mezi jádrem a pláštěm, dopovali křemenné jádro titanem a plášť ponechali nedopovaný. Později nahradili titan germaniem a dosáhli útlumu 4 dB/km při 850 nm. Několik dalších technologických postupů bylo nalezeno v Japonsku, USA a Velké Británii. J. B. MacChesney a spolupracovníci v Bellových laboratořích vyvinuli modifikovanou CVD (MCVD) technologii dovolující efektivní výrobu optických vláken. V několika letech bylo dosaženo útlumu menšího než 1 dB/km, což je mnohem lepší než hodnota předpovězená Kaoem. Dnes je útlum světla ve vláknech pro vlnovou délku 1,55 μm pod 0,2 dB/km. Moderní optické vlákno je mimořádně transparentní prostředí s více než 95 % zůstávajícího světla po 1 km šíření.

Dnešní optické sdělování dosáhlo současného stavu díky řadě zásadních průlomů. Byly vyvinuty vhodné zdroje světla založené na dvojítech heterostrukturách pro oblast 1550 nm. Optoelektronické opakovače, které se u prvních přenosových systémů používaly pro kompenzaci ztrát, byly nahrazeny optickými zesilovači, zejména erbiem dopovanými vláknovými zesilovači. Lineární zkreslení způsobené disperzí se odstraňuje pomocí segmentů tzv. kompenzačních vláken s velkou normální disperzí. Optické sdělování využívá vlnový multiplexing, kdy se jediným vláknem přenášejí současně desítky signálů na různých vlnových délkách, čímž se lépe využije přenosová kapacita vlákna. První neexperimentální optické linky byly nainstalovány v r. 1975 ve Velké Británii a brzy nato v USA a Japonsku. První transatlantický vláknový optický kabel byl položen v r. 1988.

Globální sdělování a zejména internet a dálkový telefon jsou dnes založeny primárně na technice optických vláken. Přenosová kapacita moderních jednovládných vláken je 12 terabitů za sekundu. To je miliónnásobek přenosové kapacity nejrychlejších radioreléových tras. Zatímco na úsvitu optického věku se optika používala jen na nejrychlejších trasách mezi ústřednami, dnes se už i v Evropě uvažuje o rozvodu optických vláken do každého domu. Tato technologie (anglicky FTTH – Fiber To The Home) je dnes již běžná v Asii a umožňuje domácnostem přístup k vysokorychlostnímu internetu, digitální televizi a VOIP telefonii. Vláknové optické sítě se používají ke sběru a přenosu dat ve velkém hadronovém collideru (LHC) ve švýcarském CERNu nebo v rámci obřího belgického radioastronomického teleskopu LOFAR o průměru 350 km. Naleznete je v nemocnicích v pozitronových emisních tomografech, v moderních Airbusech A350 nebo Boeingech 787, ale i v domácnostech, kde zajišťují rozvod digitálních signálů v HiFi zařízeních.

Miroslav Miler, Pavel Honzátko

Doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc., Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8-Kobylisy, tel.: 266 773 454, e-mail: miler@ufe.cz

Dr. Ing. Pavel Honzátko, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8-Kobylisy, tel.: 266 773 527, e-mail: honzatko@ufe.cz