

## 1 ÚVOD

### 1.1 VZNIK A VÝVOJ OPTICKÝCH KOMUNIKÁCIÍ

V oblasti prostriedkov spracovania informácií sa v poslednom období čoraz častejšie používa nový smer, ktorý je na hranici medzi optikou a elektronikou. Je to časť rádioelektroniky nazývaná **optoelektronikou**, ktorej základom je komplexné použitie optických a elektronických prostriedkov na záznam, prenos a spracovanie informácií. Podstata optoelektroniky je vo vhodnom využití procesov premeny elektrických signálov na optické a optických signálov na elektrické pri súčasnom využití akusticko-optických, optoelektronických a iných fyzikálnych javov a procesov.

V optoelektronických sústavách sa využívajú nekoherentné aj koherentné zdroje svetla. Veľmi intenzívny rozvoj optoelektroniky nastal najmä po objavení **laserov** – zdrojov koherentného optického žiarenia, dokonalých polovodičových fotodetektorov (**PIN** – fotodióda, lavínová fotodióda a pod.), optických vlákien, elektroluminiscenčných meničov a pod.

Pre nekoherentné optické žiarenie možno určiť len niektoré jeho štatistické charakteristiky: energiu, jas, polarizáciu, spektrálne zloženie a pod. Naproti tomu koherentné žiarenie možno opísať len pomocou jeho všetkých fyzikálnych charakteristík. Pre koherentné optické zväzky možno zistiť relatívnu fázu vlnenia, čo umožňuje rekonštruovať úplný obraz vln v ľubovoľnom reze optického zväzku a podrobiť ho transformáciám, ktoré sú pri použití nekoherentného svetla nerealizovateľné.

Optoelektronika má dve špecifické vlastnosti, ktoré podmieňujú jej široké možnosti:

1. Na rozdiel od elektrického signálu sa optický signál vyznačuje **dvoma priestorovými súradnicami**, vzhľadom na to, môže byť modulovaný nielen v čase, ale aj priestore. V dôsledku toho je optický zväzok z hľadiska prenosu informácií sústavou, ktorá je zložená z veľkého počtu navzájom spojených paralelných kanálov.
2. Nosiče signálu v optoelektronike sú elektricky **neutrálne fotóny**, čo spôsobuje izoláciu optickej väzby. Táto vlastnosť optoelektronických sústav má mnoho výhodných vlastností: účinnú elektrickú izoláciu medzi vstupom a výstupom, jednosmernosť spojenia (prakticky nedochádza k spätnému pôsobeniu výstupu na vstup), nevyžadujú sa mechanické kontakty, nevnáša sa frekvenčné obmedzenie a neohraničuje sa miniaturizácia zariadení.

V optoelektronike sa začínajú objavovať skupiny optoelektronických sústav, napr.: výpočtové sústavy, vyhľadávacie optoelektronické sústavy, navigačné a orientačné sústavy, rozpoznávajúce a pamäťové systémy, sústavy pre prenos a zobrazenie informácií a pod.

Prenos informácií svetlom je známy už veľmi dávno. Tak napríklad **v starovekom Grécku v 6. stor, p.n.l.** existovali systémy reléových staníc, ktoré prenášali informácie **pomocou ohňových signálov**. Známe sú tiež systémy prenosu informácií pomocou **dymových signálov** používané severoamerickými Indiánmi. Podstatou prenosu informácií vo forme dymových alebo ohňových signálov je rýchlosť prenosu, ktorá je základom aj modernejších systémov.

Prínos modernej doby k metódam prenosu informácií pomocou svetla je vo využití kvalitatívne odlišných možností, ktoré dovoľujú podstatné zvýšenie rýchlostí aj kvality prenosu informácií pomocou svetla.

Známy je systém **optických telegrafných staníc** zavedených vo **Francúzsku Claudom Chappom** v roku 1790. Pomocou sústavy semaforov bolo možné preniesť signál na vzdialenosť 200 km za 15 minút. Tento systém bol v polovici 19. stor. nahradený dokonalejším **Morseovým telegrafom**. K historickým základným objavom v oblasti optoelektronického prenosu informácií patrí aj experiment uskutočnený v roku **1870 J.Tyndallom**, ktorým bolo dokázané, že svetlo môže byť vedené vhodným dielektrickým prostredím. Tyndall sústavou zrkadiel zaviedol svetelný lúč do nádoby s kvapalinou tak, aby jeho smer padol do osi výpustného otvoru, umiestneného na boku nádoby. Po otvorení otvoru došlo k zakriveniu svetelného lúča vytekajúcim prúdom kvapaliny, teda k jeho vedeniu.

V roku **1880** podal **A.G.Bell** patent na **svetelný telefón**, ktorý umožňoval prenos zvukového signálu prostredníctvom svetelného lúča na vzdialenosť 200 m. Tento sa však vzhľadom na nedokonalosť zrkadiel a selénových detektorov svetla nerozšíril.

Prvé neúspešné pokusy **prenášať (priamo) obraz optickým vláknom** boli v roku **1927 (Baird v Anglicku a Hansell v USA)**. Prvý úspešný laboratórny pokus prenosu obrazu optickým vláknom sa uskutočnil v roku 1930. V roku 1950 boli navrhnuté flexibilné optické **vláknové endoskopy** (A.C.S. van Heelom v Holandsku a H.H.Hopkinsom a N.S.Kapanyom v Anglicku). Od tejto doby sa optické vlákna priemyselne vyrábajú a používajú pre rôzne aplikácie (pozorovanie v medicíne, osvetľovanie, dekoratívne účely a pod.). **Kapany** tiež v roku **1956** ako prvý zaviedol **pojem vláknová optika (fiber optic)**.

Začiatky optickej komunikácie v širšom rozsahu spájame s realizáciou **lasera v roku 1960** ako koherentného zdroja žiarenia. Od vtedy sa začal intenzívny výskum metód optickej komunikácie. V začiatkoch sa teoreticky a prakticky skúmali rôzne systémy priamej optickej komunikácie a komunikácia prostredníctvom periodicky usporiadaných fokusujúcich prvkov. Veľká pozornosť sa venovala aj vývoju metód optického spracovania informácií a komunikačným systémom. Systémy priamej optickej komunikácie dosiahli komerčné rozšírenie v medzidružicových spojoch, ich aplikačné možnosti v podmienkach zemskej atmosféry sú obmedzené vplyvom závislosti prenosových vlastností od poveternostných podmienok. Systémy, ktoré využívajú periodicky usporiadané fokusujúce prvky, sa dodnes širšie prakticky nevyužívajú.

Možnosť použitia **sklených optických vlákien** ako svetlovodov navrhli **temer súčasne Kao a Hockham v Anglicku a Werts vo Francúzsku v roku 1966**. Odvtedy nastáva prudký rozvoj optických vláknových komunikačných systémov. Z technickej stránky rýchly rozvoj optických vláknových komunikačných systémov umožnili dve skutočnosti:

1. Zvládnutie technológie výroby optických vlákien s relatívne malým tlmením.
2. Podstatné zvýšenie účinnosti a životnosti polovodičových zdrojov koherentného a nekoherentného svetla.






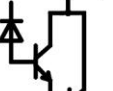




Rozhodujúcim faktorom bolo nájdenie efektívnych metód prípravy čistých skiel, ktoré umožňujú výrazne znížiť dovedy vysoké optické straty (až 1000 dB/km), čo bola ich hlavná nevýhoda v porovnaní s koaxiálnymi káblami, ktoré majú tlmenie 5-10 dB/km. Tiež boli problémy so spájaním optických vlákien. V priebehu desiatich rokov vývoja bolo tlmenie vlákien redukované na hodnoty pod 5 dB/km a boli vyvinuté vhodné spoľahlivé metódy spojenia vlákien s malým vložným tlmením. Tiež sa veľmi rozšírili práce v oblasti výskumu a vývoja zdrojov a detektorov svetla, ako aj iných prvkov **optických vláknových komunikačných systémov (OVKS)**, čoho dôsledkom sú ich široké aplikácie v praxi.

Zo všeobecného hľadiska možno v súčasnosti optické systémy na prenos kódovaných informácií rozdeliť do troch skupín:

1. **Optróny**, sú jednoduché systémy (**obr. 1.1**) na prenos signálov (analogových aj číslicových) pre aplikácie najmä v oblastiach automatizácie, merania na vysokom potenciáli a pod., ktoré využívajú elektrickú izoláciu medzi vstupom a výstupom optrónu a pod.
2. **Optické komunikačné systémy**, ktoré sú určené na prenos číslicových alebo analogových signálov pre účely:
  - a) číslicovej **telekomunikácie**,
  - b) analogovej širokopásmovej telekomunikácie (**prenos video signálu**) a anténové systémy,
  - c) **prenosu údajov** (prístrojové aplikácie, počítačové siete a pod.).

Optické komunikačné systémy môžu byť:

- a) s prenosom **voľným prostredím** (vzduch, kozmické spoje),
- b) s **prenosom svetlovodom** (periodické fokusujúce prvky, optické vlákno a pod.).

Vysielač	Prijímač	
		Fotodióda
		Fotodióda a tranzistor
		Fotodióda a Darlingtonove zapojenie
		Fototranzistor
		Fotodarlingtonove zapojenie

Obr. 1.1  
Zapojenia jednoduchých oprónov.

3. **Integrovaná optika** – kompaktné optoelektronické systémy (prvky) určené na ovládanie optického lúča (prepínače, vychyľovanie, rozvetvovanie a pod.), spracovanie signálov v optickej oblasti (modulácia, zmiešavanie, filtrácia a pod.).

Jednou z hlavných výhod optických komunikačných systémov je aj ich veľká prenosová kapacita. Napríklad: pri použití nosnej frekvencie v oblasti  $10^{14}$  Hz predstavuje frekvenčná šírka pásma (rovná jednému percentu) modulačnú frekvenciu 1000 GHz. Vzhľadom na závery teórie informácie je prenosová kapacita C „klasickej“ elektromagnetickej vlny

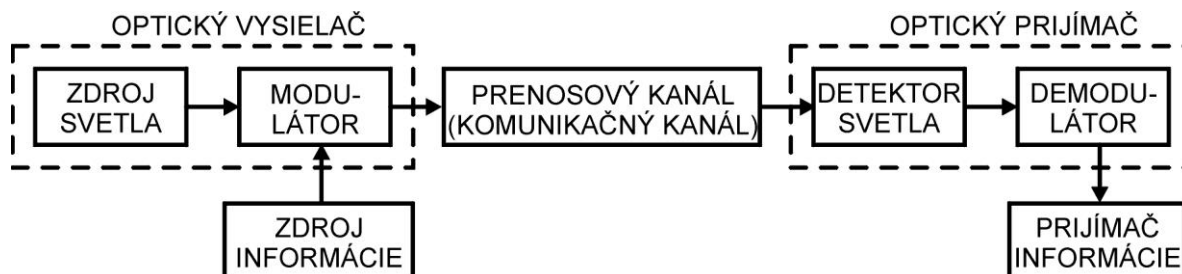
$$C = B \cdot \log\left(1 + \frac{S}{N}\right) \tag{1.1.1}$$

kde B je šírka frekvenčného pásma prenosového kanálu, S – stredná hodnota výkonu prenášaného signálu a N – šumový výkon (noise). Vidíme, že informačná kapacita závisí priamo úmerne od šírky frekvenčného pásma prenosového kanálu, ktorá vo všeobecnosti rastie s frekvenciou nosnej vlny a od pomeru signálu k šumu (S/N). Zdanlivo by preto mohlo byť výhodné použitie signálu s veľmi veľkým výkonom, alebo usilovať o dosiahnutie nulového šumového výkonu. V prvom prípade možno ukázať, že prenosový kanál je lineárny len do istej úrovne prenášaného výkonu. Pri väčších prenášaných výkonoch sa chová ako nelineárne prostredie so všetkými nepriaznivými dôsledkami pre prenášajúcu informáciu. Pri veľmi malých hodnotách šumového výkonu (t.j.  $N \rightarrow 0$ ) sa začne prejavovať kvantová podstata elektromagnetickeho poľa, ktorej dôsledkom je tzv. **kvantový šum**. Potom vzťah (1.1.1) bude mať tvar

$$C = B \log\left(1 + \frac{P}{\eta\omega B}\right) + \frac{P}{\eta\omega} \log\left(1 + \frac{\eta\omega B}{P}\right) \tag{1.1.2}$$

kde  $P$  je výkon elektromagnetickej vlny,  $\eta\omega$  je energia fotónu a  $B$  je šírka frekvenčného pásma prenosového kanálu. Prvá časť tohoto výrazu je podobná klasickému vzťahu (1.1.1) a prevažuje, ak je počet prenášaných fotónov omnoho väčší ako 1. Druhá časť je čiste kvantového pôvodu a prevažuje ak je počet prenášaných fotónov  $\sim 1$ .

Základná skupinová schéma jedného variantu **optického spoja** je na **obr. 1.2**. Optický spoj je v podstate tvorený optickým vysielačom (modulovaným zdrojom svetla), prenosovým kanálom (optickým prostredím) a optickým prijímačom (tvorený prijímacím optickým systémom a fotodetektorom). Vstupný a výstupný signál optického spoja je elektrický, preto vysielačia a prijímacia časť optického spoja obsahuje okrem optoelektronických prvkov a optických sústav tiež elektronické obvody na spracovanie vstupného a výstupného signálu.



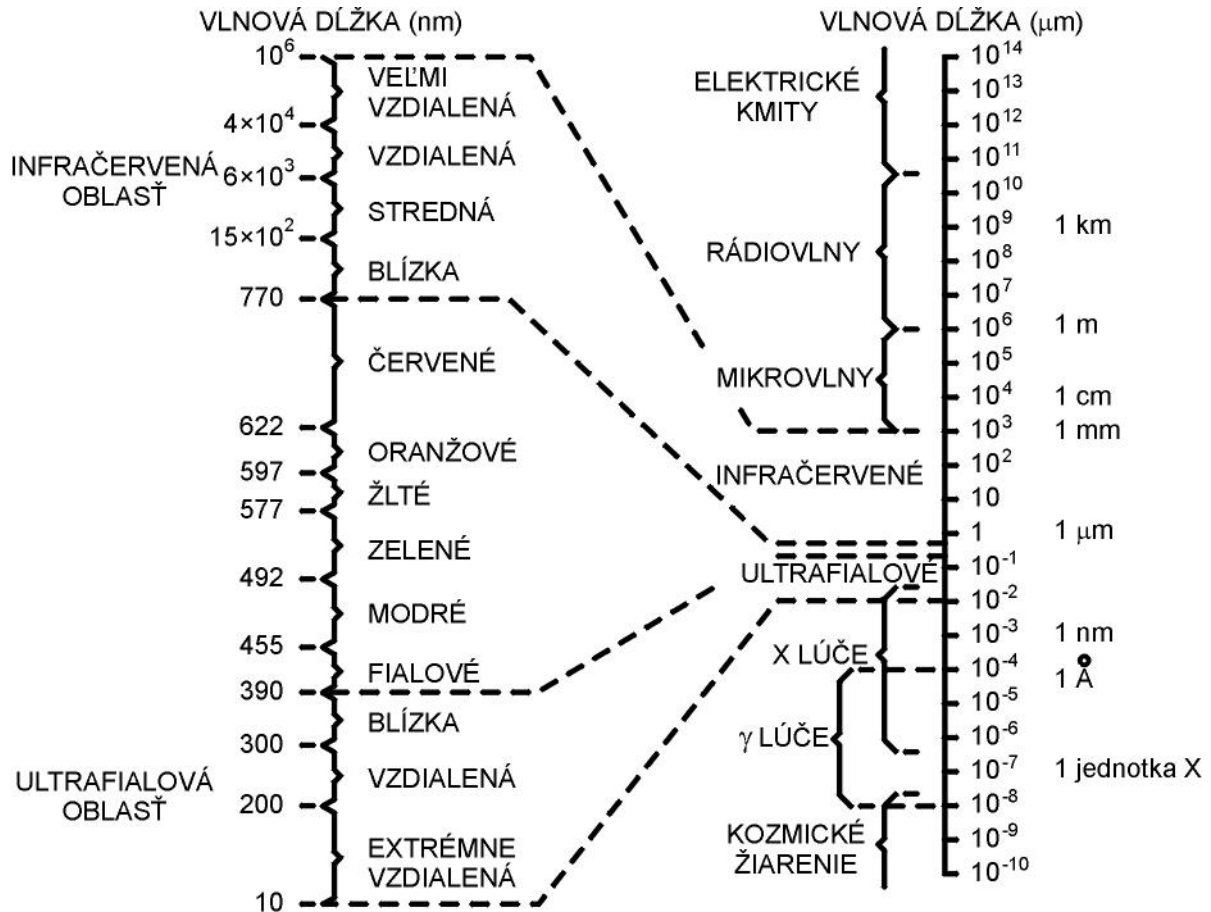
Obr. 1.2

Základná bloková schéma optického spoja.

Ako zdroj svetla sa používa **laser**, alebo **elektroluminiscenčná dióda (LED)**. Optický signál sa moduluje v optickom modulátore, alebo pri použití polovodičových zdrojov svetla (**laserovej diódy (LD)** a **LED**) priamo zmenou budiaceho prúdu. Úlohou vysielačieho a prijímacieho optického systému je previesť optický signál na vysielačej strane s čo najmenšími stratami z **optického vysielača do optického prostredia (prenosového prostredia)**, resp. na prijímacej strane z optického prostredia na **fotodetektor (detektor svetla)**. Úlohou optického prijímača je transformovať optický signál späť na elektrický, pri zaistení optimálneho spracovania vzhľadom k pomeru signál/šum. Obvody spracovania signálu upravujú elektrický signál do tvaru vhodného na prenos. Sem patria najmä obvody pre združovanie signálov, multiplexory, demultiplexory a pod. Optické prostredie môže byť **tvorené voľným prostredím** (v pozemských podmienkach vzduch, v kozmických podmienkach vákuum), alebo **svetlovodmi** (tvorenými s periodickými fokusujúcimi prvkami alebo optickými vláknami).

V optických komunikačných systémoch je nosičom informácie **optický signál** (optické žiarenie, svetlo). Prenášaná **informácia** môže byť zobrazená zmenou jeho **amplitúdy, frekvencie, fázy, polarizácie, vlnovej dĺžky, trvania** alebo **kombináciou** týchto vplyvov. Prechodom optickým prostredím sa parametre optického signálu menia. Dochádza k zoslabeniu, k zmenám tvaru prenášaných impulzov, prípadne k zmene časovej polohy. Pri optickom prenose a návrhu optických spojov si treba uvedomiť pravdepodobnostný charakter vyžarovania fotónov. Jeho dôsledkom **je vznik šumu**, ktorý je priamou súčasťou optického signálu a nezávisí od jeho úrovne. V optickom prijímači vzniká pri detekcii tiež výstrelový šum úmerný dopadajúcemu optickému výkonu, ktorý podstatným spôsobom ovplyvňuje úroveň šumu na výstupe optického prijímača. Zvýšenie dosahu optického spoja možno uskutočniť zaradením opakovačov. Opakovače môžu byť so zosilnením signálu alebo s regeneráciou signálu. **V opakovačoch so zosilnením signálu** sa optický signál priamo zosilňuje vo vhodnom kvantovom (laserovom) zosilňovači. Nedostatkom je zvýšenie úrovne šumu s každým opakovačom a tým zhoršenie kvality spoja s rastúcou dĺžkou trasy. Naproti tomu **regeneračné opakovače**, v ktorých sa signál obnovuje na pôvodnú kvalitu, umožňujú na báze PCM vytvárať spoje, ktorých kvalita prenášaného signálu nezávisí od dĺžky trasy.

**Oblasť optického žiarenia** (obr. 1.3) je od vlnových dĺžok 100 nm až 1 mm. Možno ju rozdeliť na 7 podoblastí: tri **ultrafialové** oblasti (100 až 280 nm, 280 až 315 nm a 315 až 390 nm), oblasť **viditeľného svetla** (390 až 770 nm) a tri **infračervené** oblasti (770 nm až 1,4  $\mu\text{m}$ , 1,4 až 3  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$  až 1 mm).



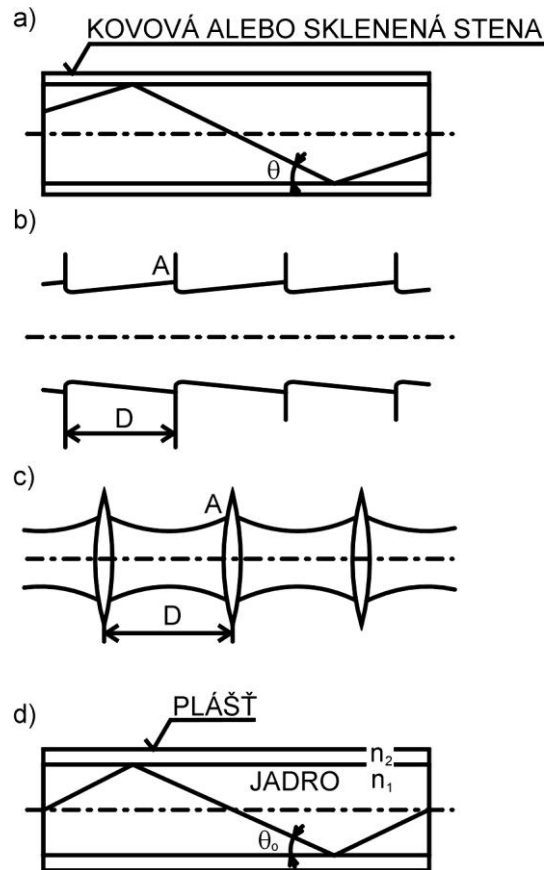
Obr. 1.3  
Elektromagnetické spektrum.

Pre **optické komunikácie** sa predpokladá využitie **oblasti medzi 0,4 až 12  $\mu\text{m}$** . V tejto oblasti je minimálne tmenie materiálov vhodných ako optické prenosové prostredie a v tejto oblasti emitujú vhodné zdroje optického žiarenia (lasery a LED). Pre kratšie vlnové dĺžky (ultrafialové žiarenie) tmenie týchto materiálov podstatne vzrastá. Na hranici röntgenového žiarenia už nie sú k dispozícii vhodné zdroje optického žiarenia. V dlhovlnovej infračervenej oblasti, kde je energia fotónov malá, je hlavným problémom malá odolnosť optických prijímačov proti rušivým signálom. Optické prijímače musia byť chladené a musia byť chránené pred rušivými signálmi vysielanými zahriatymi telesami. Optické pásmo frekvencií poskytuje obrovské možnosti prenosových kapacít. **Maximálna šírka frekvenčného pásma** sa pohybuje okolo **500 THz**. Jednou z prekážok pre jeho zataľ len teoreticky uvažované úplné využitie, ktoré by umožnilo prenášať informácie s extrémne vysokými prenosovými rýchlosťami, je konečná šírka frekvenčného pásma optických vysielateľov a prijímačov spôsobená predovšetkým konečnou šírkou frekvenčného pásma modulátorov a fotodetektorov.

Ako sme už na to poukázali, v pozemských podmienkach je výhodnejšie prenášať optické signály použitím svetlovodov. **Svetlovody** môžeme zo všeobecného hľadiska rozdeliť do troch skupín:

1. **Duté svetlovody (obr. 1.4a)** sú trubice so zrkadlovým vnútorným povrchom s priemerom niekoľko mm. V takomto svetlovode sa šíri veľký počet vidov. Svetelný lúč sa v svetlovode šíri po lomenej dráhe, pričom sa odráža na stenách trubice. Aj pri veľmi dokonalom povrchu svetlovodu dochádza k stratám pri každom odraze. Nevýhodou tohto svetlovodu je veľké tmenie až niekoľko desiatok dB/km a ich obtiažna výroba.
2. **Svetlovody s diskretnými korektormi** (s periodicky fokusujúcimi prvkami), ktorými môžu byť clony, šošovky alebo zrkadlá. Na **obr. 1.4b** je príklad svetlovodu s clonami a na **obr. 1.4c** so šošovkami. Umiestnenie šošoviek (**obr. 1.4c**) je konfokálne, t.j. vzdialenosť D sa rovná dvojnásobku ohniskovej vzdialenosti F. V týchto svetlovodoch je namiesto sklenených šošoviek výhodnejšie použiť plynové šošovky, s ktorými možno teoreticky dosiahnuť tmenie asi 1 dB/km.

Pre svetlovody tohto typu je možné súčasné šírenie priestorovo oddelených lúčov, t.j. priestorový multiplex. Nevýhodou sú vysoké náklady na výrobu, uloženie a optické nastavenie.



Obr. 1.4

Rôzne typy svetlovodov:

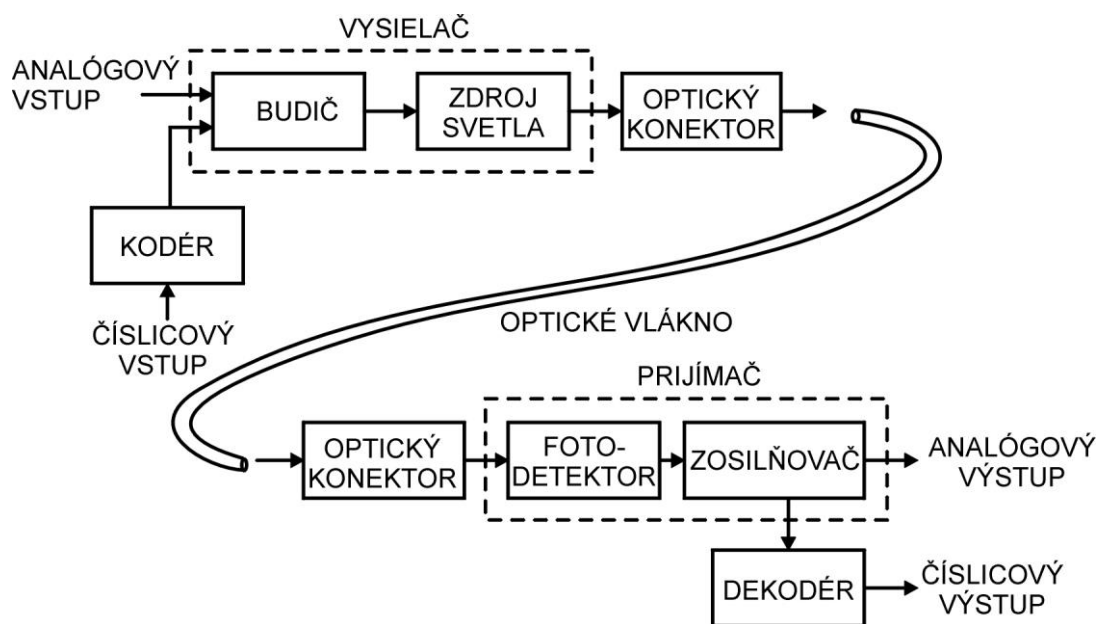
- a) duté svetlovody,
- b) svetlovody s fokusujúcimi clonami,
- c) svetlovod so šošovkami,
- d) optické vlákno.

3. **Optické vlákna** predstavujú skupinu svetlovodov, ktorých činnosť je založená na šírení svetelnej vlny vo vhodnom dielektrickom vlnovode. Na **obr. 1.4d** je znázornené optické vlákno so skokovou zmenou indexu lomu (tzv. stupňovité optické vlákno) tvorené valcovým dielektrickým jadrom s indexom lomu  $n_1$ , ktoré je obklopené dielektrickým **plášťom** s indexom lomu  $n_2$ . Keď platí, že  $n_1 > n_2$ , potom pre lúče, ktoré vstupujú do jadra optického vlákna pod uhlom  $\theta$  menším ako  $\theta_c$ , pre ktorý platí  $\cos \theta_c = n_2/n_1$ , **dochádza na rozhraní jadro – plášť k totálnemu odrazu**. Vedenie svetla je teda v týchto optických vláknoch založené na totálnom odraze na rozhraní dvoch optických prostredí s rôznym indexom lomu. Pre takéto typy svetlovodov, ktoré majú tvar tenkého vlákna (tzv. **optické vlákna**), bolo v poslednom období dosiahnuté také prenikavé zlepšenie ich vlastností, že prakticky všetky ostatné typy boli odsunuté do pozadia. Najviac sa toto zlepšenie prejavilo na **zmenšení tlmenia** optických vlákien. Napríklad pre optické vlákna na báze  $\text{SiO}_2$  bolo v poslednom desaťročí dosiahnuté zmenšenie tlmenia z 1000 dB/km na zlomky dB/km (**0,2 dB/km pri  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$** ), čo temer zodpovedá teoreticky dosiahnuteľnej hranici. Toto bolo dosiahnuté jednak použitím nových extrémne čistých materiálov, jednak výrazným zlepšením technológie výroby optických vlákien.

## 1.2 SÚČASNÉ MOŽNOSTI A PERSPEKTÍVY OPTICKEJ VLÁKNOVEJ KOMUNIKÁCIE

Súčasnú optickú vlákňovú komunikačnú systém sa môžu využiť vo všetkých oblastiach, kde sa používajú koaxiálne káble, medené vodičové spoje a pod. Ide o aplikácie od krátkych dátových liniek (prístrojové aplikácie, počítače, meracie ústredne, kabeláž lodí a lietadiel atď) až po dlhé telekomunikačné hlavné vedenie, ktoré slúži na prenos informácií medzi ústredňami.

**Optický vlákňový komunikačný systém** (optický vlákňový spoj) je tvorený tromi hlavnými časťami (obr. 1.5): **optickým vysielateľom**, **optickým vlákňom** a **optickým prijímačom**. Ako zdroj svetla (žiarenia) sa používa LED alebo polovodičový (prípadne iný) laser. Ako optické vlákňo sa používa: **celosklenené vlákňo** na báze  $\text{SiO}_2$ , vlákňo typu **PCS** (z angl. **Plastic Clad Silica**), ktoré má jadro zo skla a plášť zo silikónu alebo celoplastové vlákňo. Dĺžka vlákňa bez spojenia môže byť od 1 m až do 7 km. Ako detektor sa používa **PIN (Positive-Intrinsic-Negative) fotodióda alebo lavínová fotodióda** (APD – **Avalanche Photodiode**). V optickom vlákňovom spoji (obr. 1.5) sa vo vysielateľi **elektrický signál** konvertuje na **optický signál**, prenášaný optickým vlákňom, tento je na druhom konci optického spoja pomocou prijímača opäť konvertovaný na elektrický signál.



Obr.1.5  
Bloková schéma optického vlákňového spoja.

V optických vlákňových spojoch možno použiť **analogovú aj digitálnu moduláciu**. Pri analogovej modulácii sa intenzita svetelného lúča z lasera alebo LED mení spojito v závislosti od pôsobiaceho modulačného signálu. Analogová modulácia je jednoduchá, ale vyžaduje dobrú linearitu výstupných charakteristík zdrojov svetla. Pre optické vlákňové spoje je oveľa výhodnejšia digitálna modulácia. Potom sa prenáša optický signál v binárnom tvare. Vysielateľ optického vlákňového spoja môžeme uvažovať ako elektrooptické hradlo, ktoré emituje svetlo len, keď je na vstupe úroveň H a neemituje, keď je vstup na úrovni L. Podobne možno ako optoelektrické hradlo posudzovať aj prijímač optického vlákňového spoja. Digitálna modulácia umožňuje pri rovnakom výkone vysielateľa preniesť signál na väčšie vzdialenosti ako analogová modulácia.

Optické vlákňo sú oproti pôsobeniu vonkajšieho prostredia a poruchám pri inštalácii chránené **kábelovaním**. Keď nestačí výkon vysielateľa na prekročenie potrebnej vzdialenosti optického vlákňového spoja, je potrebné zaradiť **opakovač (retranslátora)**, ktorý pozostáva z optického prijímača, impulzného zosilňovača, regenerátora a optického vysielateľa. V súčasnosti sú optické vlákňové spoje schopné prenášať signál bez opakovačov s veľkou prenosovou rýchlosťou (až Gbit/s) na vzdialenosti desiatky až stovky kilometrov.

Optické vláknové komunikačné systémy majú veľa výhod oproti klasickým prenosovým systémom (**tab. 1.1**), je to najmä:

1. **Extrémne veľká šírka frekvenčného pásma**, čo znamená, že určitým spojom môže byť prenášaný veľký objem informácií, veľké množstvo správ alebo hovorových signálov. Teda rečové, obrazové signály alebo údaje môžu byť jednoduchšie prenášané optickými vláknami. V súčasnosti sú komerčne dostupné OVKS so šírkou frekvenčného pásma 3 až 40 GHz. Takáto šírka pásma umožňuje prenášať po jednom spoji tisíce rečových alebo desiatky obrazových signálov, priame prepojenie počítačov a pod.

Tabuľka 1.1

#### VÝHODY VLÁKNOVEJ OPTIKY

Odolnosť voči vonkajšiemu elektromagnetickému rušeniu  
 Odolnosť voči prepočutiam v mnohovláknových kábloch  
 Jednosmerné šírenie signálu, vylúčenie problému spätnej väzby a odrazov  
 Nie sú problémy so zemnými slučkami a prechodovými potenciálmi rôznych vodičov  
 Veľmi veľká šírka frekvenčného pásma (väčšia ako niekoľko GHz)  
 Jednoduchý multiplex signálov  
 Nízka cena  
 Malé tmenie a menšia spotreba elektrického výkonu  
 Väčšia utajenosť prenášaných správ  
 Odstránený problém iskrenia a vzniku elektrického oblúku  
 Väčšia odolnosť voči vplyvom okolitého prostredia  
 Menšie rozmery, menšia hmotnosť a väčšia ohybnosť optických káblov

2. Veľkou výhodou optických vlákien je ich **malý priemer a malá hmotnosť**. Aj po pokrytí ochrannými obalmi sú optické káble omnoho menšie a ľahšie ako ekvivalentné medené koaxiálne káble. Optické káble umožňujú výrazne **redukovať rozmery** (ľahko sa dosahuje redukcia **10:1**), čo je výhodné z hľadiska efektívnejšieho využitia káblovodov v mestách, budovách, lodiach, lietadlách a pod.). Spolu s redukciou rozmerov vzniká aj **výrazná redukcia hmotnosti** optických káblov (**25:1**), čo je dôležité z hľadiska ich aplikácií v dopravných prostriedkoch (lodiach, lietadlách a automobiloch) a v raketovej technike. Kombinovaná výhoda malého priemeru a malej hmotnosti sa prejaví aj pri zmenšení nákladov na skladovanie, dopravu a inštaláciu optických káblov.
3. **Odolnosť voči prepočutiam** v paralelne vedených optických vláknach umožňuje do jedného optického kábla káblovať stovky až tisíce optických vlákien.
4. **Odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu**. Vzhľadom na dielektrickú konštrukciu nepôsobí optické vlákno ako „anténa“ a je odolné voči **rádiofrekvenčnému rušeniu (RFI)** (z angl. Radio-Frequency Interference), **elektromagnetickému rušeniu (EMI)** (z angl. ElectroMagnetic Interference) a pôsobeniu **elektromagnetických impulzov (EMP)** (z angl. ElectroMagnetic Pulses). Dôsledkom je nerušený prenos signálov aj v silne rušivom prostredí (elektrické motory, relé a iné zdroje elektromagnetického rušenia), ktoré pôsobí veľké problémy pri aplikácii kovových káblov. Optické káble nie je potrebné tieniť a môžu byť vedené v spoločných kábloch s napájacími silovými káblami.
5. **Neustále klesajúca cena** optických vlákien. Optické vlákna sú vyrobené z piesku ( $\text{SiO}_2$ ) a plastových materiálov, ktoré sú lacnejšie a širšie dostupnejšie ako meď. V súčasnosti však vzhľadom na náročnú technológiu výroby superčistých skiel a relatívne malý objem produkcie optických vlákien sú tieto drahšie ako medené vodiče. S rozšírením optických vlákien a so zdokonaľovaním technológie výroby sa počíta s prudkým poklesom ich ceny. V samotnej cene optických vlákien musíme však uvážiť aj ostatné ekonomické výhody ich aplikácie v porovnaní s medenými káblami. Predovšetkým je to zníženie nákladov (asi na jednu štvrtinu) pri inštalácii, doprave a manipulácii v porovnaní s medenými káblami. Zmenšenie nákladov pri pokladaní káblov je tiež asi polovičné aj menej. Vzhľadom na malé tmenie prinášajú optické vlákna úspory v aplikácii počtu opakovačov a nákladov na ich prevádzku a údržbu.



Tieto primárne výhodné vlastnosti optických vlákien sú dôvodom mnohých aplikácií optických vlákien. Súčasne musíme upozorniť aj na niektoré sekundárne výhodné vlastnosti optických vlákien:

- a) Väčšia **utajenosť prenášaných správ**, čo je dôležité z hľadiska vojenských aplikácií, aplikácií v bankovníctve a v počítačových sieťach. Optické vlákno nevyžaruje signál do svojho okolia, teda jediná možnosť získania signálu z optického vlákna je jeho prerušenie, resp. prudké ohnutie. Prerušenie optického vlákna a zaradenie odbočky do prenosovej trasy možno detekovať použitím metód optickej časovej reflektometrie (**OTDR** z angl. Optical Time-Domain Reflectometry).
- b) Použitím optických vlákien je možné dosiahnuť **väčšiu bezpečnosť**, pretože sa v nich prenáša svetlo a nie elektrický prúd. Preto ani pri prerušení vlákna nevzniká elektrická iskra. Optické vlákna možno preto použiť (v chemických závodoch, uhoľných baniach) v prostredí s výbušnými plynmi, bez nebezpečenstva požiaru alebo výbuchu. Pri prerušení vlákna nevzniká problém skratu a spätného pôsobenia na vysielač, respektíve prijímač. Optické vlákno môže byť opravované aj pri zapnutom zdroji.
- c) **Elektrická izolácia** a jednosmerný prenos medzi vysielačom a prijímačom. Možnosť prenosu signálov medzi miestami s veľkým potenciálovým rozdielom.
- d) **Väčšia životnosť** (predpovedaná) 20 až 30 rokov v porovnaní s 12 až 15 ročnou životnosťou konvenčných káblov.
- e) Pretože optické káble sú vyrobené zo skla a plastov, sú **odolné voči vyšším teplotám a pôsobeniu korozívnych kvapalín a plynov**.
- f) **Väčšia spoľahlivosť a jednoduchšia údržba** v dôsledku zväčšenia bez opakovačov prekenuateľných úsekov na desiatky až stovky kilometrov. Možnosť prenosu medzi telefónnymi ústredňami v mestských aglomeráciách bez opakovačov, resp. umiestnením opakovačov v ústredniach.
- g) Vzhľadom na to, že optické káble **nevyžarujú signály**, neovplyvujú na iné rádiokomunikačné služby a nezhoršujú životné prostredie.
- h) **Možnosť jednoduchého rozšírenia prenosovej kapacity** už inštalovaného systému (použitím kvalitnejších zdrojov, resp. detektorov, zlepšením modulačných techník, použitím multiplexu v elektrickej a optickej oblasti a pod.).
- i) **Šetrenie vzácnych materiálov** (náhrada medi sklom, resp. pieskom).

**Medzi nevýhody patria:** optické vlákno je vyrobené zo skla, preto je krehké a môže sa zlomiť pri prekročení hranice pružnosti; nie sú údaje o dlhodobej (napr. 20-ročnej) mechanickej stabilite; optické konektory, prepínače a pod., najmä pre jednoividové systémy, sú veľmi náročné na prácnosť a presnosť výroby a preto sú veľmi drahé.

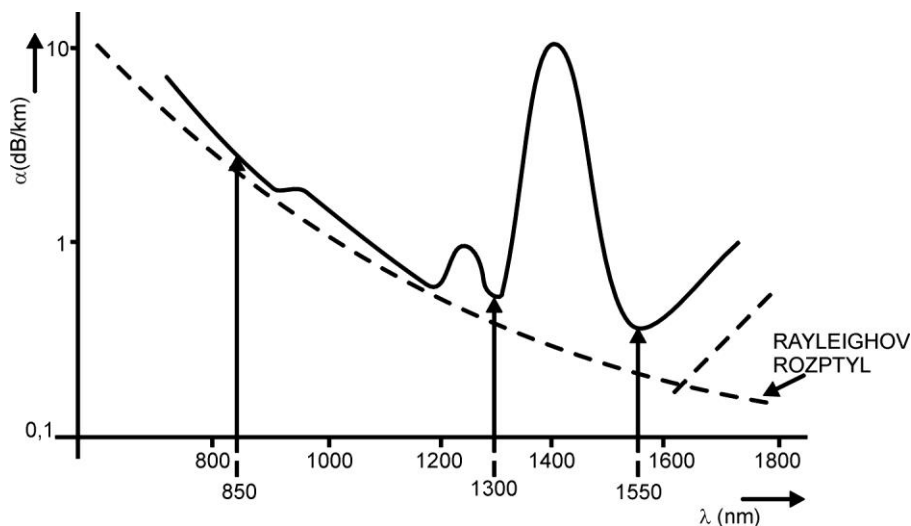
V poslednom desaťročí došlo k veľmi rýchlemu rozšíreniu použitia optických vláknových komunikačných systémov, a to najmä v oblastiach číslicovej telekomunikácie, prenosu analógového a číslicového signálu, vo videotelefónii, káblovej televízii, faximile, komunikácii v počítačových sieťach, pri prenose údajov medzi počítačom a perifériami, pri prenose údajov pre priemyselné a prístrojové aplikácie a pod. Optické vlákna sa uplatňujú aj v systémoch určených pre nekomunikačné účely, napr. pozorovanie a osvetľovanie pre lekárske a priemyselné aplikácie, dekoratívne osvetľovanie, prenos svetelnej energie, systémy spracovania signálov, optické vláknové senzory (tlaku, elektrického prúdu, teploty, intenzity elektrického a magnetického poľa a iných fyzikálnych veličín) a pod.

**Ekonomickú využiteľnosť** optických vláknových prenosových systémov **limitujú** prenosové vlastnosti optického vlákna, a to **tlmenie** (optické straty) a **rozšírenie impulzu** (disperzia). Všeobecne nízke straty umožňujú veľké vzdialenosti medzi retranslátormi (opakovačmi) a malá disperzia zasa veľkú šírku pásma na veľké vzdialenosti. Rôzne aplikácie optických vláknových prenosových systémov kladú rôzne požiadavky na vlastnosti (kvalitu) optických vlákien a iných prvkov optického

spoja, čo vyžaduje diferencovanú výrobu pre špecifické systémy. Napríklad: pre systémy prenosu údajov s prenosovými rýchlosťami rádu 10 Mbit/s na vzdialenosti niekoľko sto metrov možno použiť optické vlákna s útlmom  $\sim 100$  dB/km a s rozšírením impulzu  $\sim 100$  ns/km. Ako zdroje a detektory svetla možno použiť LED a PIN diódy. Iná je situácia pri prenose medzi telefónnymi ústredňami, kde sa vyžaduje prenosová rýchlosť 100 Mbit/s až 1 Gbit/s a vzdialenosti sú rádovo niekoľko kilometrov. Tu musíme použiť optické vlákna s tlmením menším ako 1 dB/km a s rozšírením impulzu menším ako niekoľko ns/km, pretože sa vyžaduje prenos medzi ústredňami bez opakovačov. Ako zdroje a detektory svetla možno použiť LED a PIN diódy, ktoré sú vhodné pre prenosové rýchlosti do 50 Mbit/s, pri vyšších prenosových rýchlostiach musíme použiť lasery a lavínové fotodiódy. Požiadavky na medzimestské telekomunikačné systémy, schopné pracovať s prenosovou rýchlosťou 1 Gbit/s alebo vyššou na vzdialenosti tisícky kilometrov, sú ešte prísnejšie, lebo tlmenie musí byť niekoľko desiatín dB/km a rozšírenie impulzu menšie ako 1 ns/km. To vyžaduje zvládnuť technológiu výroby optických vlákien s veľmi presne definovaným profilom indexu lomu a ako zdroje a detektory svetla musíme použiť jednovidový laser a lavínové fotodiódy.

V súčasnosti pracujúce optické vláknové prenosové systémy sú založené na využití **optických vlákien na báze SiO<sub>2</sub>**. Pri tom sa vzhľadom na spektrálnu charakteristiku tlmenia (**obr. 1.6**) používa svetlo (žiarene) z **troch oblastí**, tzv. **okien**:

**1. Okno** je v okolí  $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ . V súčasnosti sú pre túto oblasť **komerčne dostupné** všetky komponenty optických spojov pre rôzne aplikácie. Požívajú sa zdroje na báze AlGaAs a detektory na báze Si. Tieto systémy predstavujú tzv. **prvú generáciu** optických vláknových spojov, ktorá je v súčasnosti komerčne široko používaná a predstavuje základ pre ďalší rozvoj optických vláknových komunikačných systémov. Tieto systémy uvedené do prevádzky v roku 1978 boli schopné preniesť 50 – 100 Mbit/s a na vzdialenosť cca 10 km bez regenerácie. Limitujúcim faktorom týchto systémov bolo tlmenie OV.



Obr. 1.6

Spektrálna charakteristika tlmenia optického vlákna na báze SiO<sub>2</sub>.

**2. Okno** je v okolí  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ , kde optické vlákna na báze SiO<sub>2</sub> majú **nulovú materiálovú disperziu** (pre čisté SiO<sub>2</sub> pri  $\lambda = 1,27 \mu\text{m}$ ). V súčasnosti sú tieto systémy v štádiu komerčných aplikácií. V súvislosti s nimi sa hovorí o tzv. **druhej generácii** optických vláknových komunikačných systémov. Tieto systémy uvedené do prevádzky v roku 1980 majú prenosovú kapacitu 200 Mbit/s na km. Limitujúcim faktorom sa stala medzividová disperzia. Tento problém bol prekonaný vyvinutím jednovidového OV v roku 1981. Systémy druhej generácie s jednovidovým OV mali prenosovú kapacitu až 1,7 Gbit/s na km. Vzhľadom na to, že tieto systémy pracujú v oblasti minima materiálovej disperzie, nie sú kladené príliš veľké nároky na spektrálne vlastnosti zdrojov svetla, preto je možné použiť LED aj pri veľkých vzdialenostiach a relatívne väčšej šírke pásma (väčšej prenosovej rýchlosti).

**3. Okno** je v okolí  $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ , kde optické vlákna na báze SiO<sub>2</sub> majú **najmenšie tlmenie (0,2 dB/km** pri  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ ). Komerčné využitie tejto oblasti je v tzv. **tretej generácii** optických vláknových

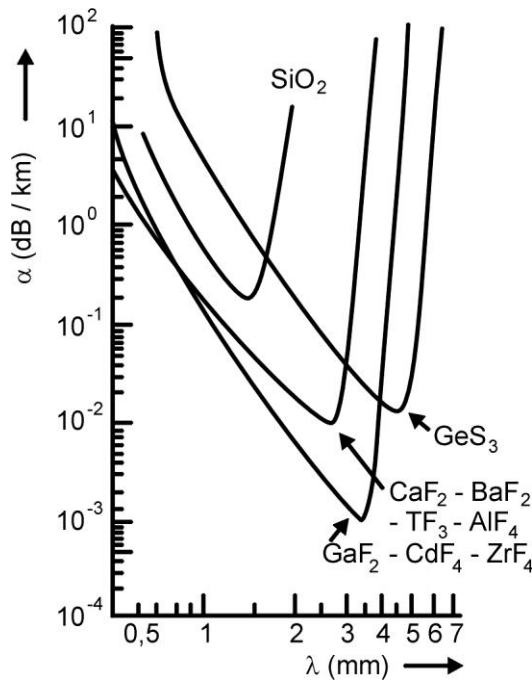
prenosových systémov. Tieto systémy sú schopné preniesť 10 Gbit/s na vzdialenosť väčšiu ako 100 km. Problém vyššej hodnoty materiálovej disperzie v tejto oblasti je prekonaný použitím jednofrekvenčných polovodičových laserov, prípadne posunutím minima materiálovej disperzie do tejto oblasti vlnových dĺžok (tzv. **OV s posunutou disperziou DSF** (Dispersion Shifted Fibers) alebo **OV s plochou disperziou DFF** (Dispersion Flattened Fibers)).

V 2. a 3. okne sa používajú zdroje na báze InGaAs/InP a detektory na báze Ge ale aj InGaAs/InP, InGaAsP/InP a AlGaAs Sb/GaSb.

**Štvrtá generácia** OVKS sa spája s úsilím zvýšiť prenosovú kapacitu multiplexnými metódami ako sú WDM (Wavelength Division Multiplex), DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex), resp. OFDM (Optical Frequency Division Multiplex) a pod. S využitím poslednej generácie jednovidových OV optimalizovaných z hľadiska prenosových parametrov na vysokokapacitný prenos v oblasti  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$  (tieto sú DFS, DFF ale aj NZ-DSF (Non-Zero Dispersion) vlákna). Pomocou týchto systémov je možné dosiahnuť prenosovú kapacitu až 1 Tbit/s. Napríklad firma Pirelli – Cables & Systems ponúka komerčný prenosový systém Hyper – WDM s kapacitou 640 Gbit/s na vzdialenosť 640 km bez nutnosti regenerácie optického signálu, s využitím 64 prenosových kanálov v pásme  $1,525 \mu\text{m}$ , každý s kapacitou 10 Gbit/s.

V súčasnosti výskumné laboratória pracujú na **piatej generácii** optických prenosových systémov, ktoré sú založené na využití nelineárnych optických vln vo vláknach tzv. **solitónov**, ktoré predstavujú extrémne krátke impulzy optického žiarenia takého tvaru, pri ktorom je vplyv disperzie OV presne kompenzovaný nelinearitou indexu lomu jadra vlákna. V dôsledku toho sa optické solitóny môžu šíriť vláknom na veľké vzdialenosti bez skreslenia. Keďže optické solitóny sú vlastne veľmi krátke impulzy z oblasti ps, možno ich využitím dosiahnuť vysoké prenosové kapacity cca 20 Gbit/s na vzdialenosť 1000 km. Revolučný zvrät v tejto oblasti priniesol objav **optických vláknových zosilňovačov EDFA** (Erbium Doped Fiber Amplifier), ktoré umožňujú regeneráciu solitónov, ktorých energia sa pri prenose stráca vplyvom konečného tlmenia vlákna.

Základné fyzikálne výskumy a výpočty ukázali, že optické vlákna vyrobené z určitých materiálov (skiel aj kryštálov) môžu mať v **strednej infračervenej oblasti vlnových dĺžok (2 až 11  $\mu\text{m}$ ) extrémne nízke hodnoty tlmenia ( $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  dB/km), obr. 1.7.**



Obr 1.7

Spektrálna charakteristika tlmenia OV pre strednú infračervenú oblasť.

Dôležité pre praktické použitie jednovidových optických vlákien z tejto oblasti je aj to, že priemer jadra optického vlákna má niekoľko desiatok  $\mu\text{m}$ , čo uľahčuje spojenie takýchto optických vlákien navzájom aj naviazanie zdroja a detektora svetla. Táto oblasť vlnových dĺžok je z hľadiska optických

vláknových komunikácií zaujímavá aj tým, že v nej emitujú intenzívne a dobre prepracované lasery (chemické – napr. HF laser, CO a zvlášť dôležitý CO<sub>2</sub> laser). V tejto oblasti sa predpokladá tiež použiť polovodičové lasery na báze IPb, IPbSnTe a detektory na báze HgCdTe.

Materiály na výrobu optických vlákien s extrémne nízkym tlmením sú:

- a) **Sklá na báze GeO<sub>2</sub>** sú perspektívnym materiálom pre výrobu optických vlákien v strednej oblasti infračerveného spektra. Minimum tlmenia je pre  $\lambda = 2 \mu\text{m}$  pod 0,3 dB/km. Materiálová disperzia je nulová v okolí  $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$ . GeO<sub>2</sub> optické vlákna je možné vyrábať dobre prepracovanou metódou chemického usadzovania z plynnej fázy. Sklá na báze GeO<sub>2</sub> - Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> môžu byť vhodným materiálom pre výrobu optických vlákien pre oblasť vlnových dĺžok 2 až 3  $\mu\text{m}$  s tlmením menším ako 0,1 dB/km.
- b) **Fluoridové sklá** sú mnohozložkové sklá na báze fluoridov ťažkých kovov. Uvažuje sa o rozpracovaní skiel na báze ZrF<sub>4</sub>, ktoré majú minimum tlmenia v oblasti 3 až 4  $\mu\text{m}$ . Na posunutie minima tlmenia k vyšším vlnovým dĺžkam sa používajú sklá na báze fluoridov tória a vzácnych zemín (napr. 62HfF<sub>4</sub> - 33BaF<sub>2</sub> - 5LaF<sub>3</sub>, 62ZrF<sub>4</sub> - 33BaF<sub>2</sub> - 5LaF<sub>3</sub>, BaF<sub>2</sub> - CdF<sub>3</sub> - ZrF<sub>4</sub> - AlF<sub>3</sub>).
- c) **Chalkogénne sklá** typu As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, GeS<sub>2</sub>, GeSe<sub>2</sub> a pod. sú perspektívnym materiálom pre výrobu optických vlákien s minimom tlmenia 10<sup>-1</sup> až 10<sup>-2</sup> dB/km v oblasti od 4 do 6  $\mu\text{m}$ . Výhodou týchto materiálov je aj to, že ich nulová materiálová disperzia je tiež z tejto oblasti (napr. pre As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> je pri  $\lambda = 4,86 \mu\text{m}$ ).
- d) **Alkalické halogenidové kryštály a halogenidy tália** (napr. KCl, CsI, CsBr, KBr, TiBr, zmesi BrTi a JTI označované ako KRS-5 alebo KRS-6 apod.) môžu byť vhodným materiálom pre výrobu optických vlákien s extrémne nízkym tlmením rádovo 10<sup>-2</sup> až 10<sup>-3</sup> dB/km v oblasti vlnových dĺžok 1 až 10  $\mu\text{m}$ .

Treba samozrejme pripomenúť, že tieto minimálne hodnoty tlmenia v súčasnosti ešte neboli dosiahnuté. Je potrebné uskutočniť ďalšie výskumy na zníženie tlmenia k dosiahnuteľným minimálnym hodnotám. Na základe analógie vývoja poklesu tlmenia optických vlákien na báze SiO<sub>2</sub> však možno očakávať, že podobná tendencia prebehne aj s vývojom tlmenia optických vlákien určených pre oblasť vlnových dĺžok 2 až 11  $\mu\text{m}$ , a že v blízkej budúcnosti budú dosiahnuté predpokladané extrémne nízke hodnoty tlmenia 10<sup>-2</sup> až 10<sup>-3</sup> dB/km. Toto umožní prudký rozvoj optických komunikačných systémov v tejto oblasti schopných prenášať informácie bez opakovačov s veľkou prenosovou rýchlosťou na vzdialenosti tisíce kilometrov.

S rozvojom komunikačných systémov vzniká na konci šesťdesiatych rokov minulého storočia nový odbor, pre ktorý sa ujal názov **integrovaná optika**. Obsah tohto pojmu síce v súčasnosti nie je ostro vymedzený a celkom jednoznačný, ale za najpodstatnejšiu časť integrovanej optiky možno považovať výskum teoretických základov nových optických a optoelektronických prvkov a súhrn rôznych spôsobov, techník a technológií vytvárania týchto prvkov a ich združovanie do miniatúrnych (integrovaných) obvodov. Základom tohto oboru boli myšlienky o možnosti vytvorenia optických a optoelektronických prvkov v planárnej a integrovanej forme, podobne ako v mikroelektronike. Impulzom k týmto snahám boli stále sa zväčšujúce požiadavky na malé rozmery, malú hmotnosť, veľkú funkčnú spoľahlivosť a veľkú odolnosť voči vplyvom okolitého prostredia týchto prvkov a z nich vytvorených systémov.

Za hlavnú oblasť použitia týchto prvkov a z nich vytvorených integrovaných optických obvodov sa predpokladajú: optické vláknové komunikačné systémy vyšších generácií, optické vláknové senzory a optické vláknové systémy na spracovanie signálov.

Predpokladá sa, že princípy aj techniky integrovanej optiky sa budú uplatňovať postupne. V prvej etape prác sa bude riešiť vytvorenie optického prepojenia medzi jednotlivými pasívnymi a aktívnymi prvkami, uzlami a blokmi optoelektronických systémov. V ďalšej etape by sa mali realizovať rôzne procesory optického signálu. Hlavným cieľom pre blízku budúcnosť je náhrada rozhodujúcej časti elektronických prvkov a obvodov systémov na prenos a spracovanie informácií optickými prvkami a obvodmi. Pre vzdialenejšiu budúcnosť sa predpokladá, že by prostriedky integrovanej optiky umožnili vytvoriť rad nových miniatúrnych optických a optoelektronických obvodov

a systémov, ktoré by realizovali nové nekonvenčné riešenia základných častí perspektívnych zariadení na prenos a spracovanie informácií.

V súčasnosti je obor integrovanej optiky len na začiatku svojho rozvoja. Výskumné práce sú zamerané na realizáciu elektronických obvodov (napr. filtre, frekvenčné výhybky, modulátory, multiplexory a pod.) metódou planárnej technológie vo forme integrovaných optických prvkov.

### 1.3 ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE VLASTNOSTI SVETLA

V tomto odstavci opíšeme základné fyzikálne vlastnosti svetla. Pritom sa ohraničíme na opis len tých vybraných vlastností, ktoré sú potrebné pre pochopenie princípu práce **optických vlákien**, **LED**, **polovodičových laserov** a **fotodetektorov**. Podstatu svetla nebudeme analyzovať z hľadiska kvantovej teórie.

Počas sedemnásteho storočia boli vypracované dve teórie podstaty svetla: 1) **vlnová teória** Hooka a Huygensa a 2) **korpuskulárna teória** Newtona. Postupné pozorovania Younga, Malusa, Eulera a iných vedcov podporili vlnovú teóriu svetla. Na základe týchto experimentov v roku 1873 **Maxwell** sformuloval svoje **slávne rovnice** a dal základ jednotnej všeobecnej elektromagnetickej teórii svetla z ktorej vyplýva, že svetlo je **transverzálna elektromagnetická (TEM) vlna**, ktorá sa šíri vo voľnom priestore (vákuu) rýchlosťou

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1.3.1)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita a  $\epsilon_0$  je permitivita vákuu. Dosadením za  $\mu_0$  a  $\epsilon_0$  do vzťahu (1.3.1) dostaneme, že rýchlosť svetla vo vákuu je  $c=2,997925 \cdot 10^8=3 \cdot 10^8$  m/s. V roku 1887 **Hertz** ako prvý **generoval** neviditeľné **elektromagnetické vlny** s vlnovou dĺžkou rádovo 10 m.

Pripomeňme, že súčasná fyzikálna predstava o svetle je založená na **korpuskulárne-vlnovom dualizme fotónov** ako kvánt energie svetla (resp. elektromagnetického žiarenia vo všeobecnosti). Podľa tohto princípu sa svetlo v určitých javoch chová ako tok častíc (fotónov). **Kvantum energie fotónu** je

$$E_{\text{for}} = \eta \omega = fh = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3.2)$$

kde  $\eta=1,054 \cdot 10^{-34}$  je tzv. redukovaná **Planckova konštanta**,  $\eta=h/2\pi$  a  $\omega=2\pi f$  je kruhová frekvencia. Korpuskulárna teória svetla umožňuje opis javov emisie a absorpcie svetla (napr. fotoefekt).

**Fotoefekt**, čo je v podstate emisia voľných elektrónov z povrchu tuhých látok vyvolaná ich ožiarením svetlom, bol úspešne objasnený v roku 1905 Einsteinom. Einstein predpokladal, že energia svetelného lúča sa môže meniť v kvantách – fotónoch. Einsteinov koncept potom viedol Plancka k vytvoreniu fotónovej teórie emisie a absorpcie svetla v látkach. Mnohé javy však je možné opísať len vlnovou teóriou svetla, ktorá predpokladá, že svetlo je harmonická transversálne-elektromagnetická vlna. Vlnová teória svetla dobre opisuje šírenie (prenos) svetla, javy súvisiace s interferenciou a vzájomné prenikanie lúčov svetla. Pripomeňme, že na opis podstaty svetla musíme použiť ako korpuskulárnu, tak aj vlnovú teóriu svetla, ktoré sú navzájom spojené princípom korpuskulárne-vlnového dualizmu fotónov.

Na základe **princípu korpuskulárne-vlnového dualizmu** nie sú dve teórie svetla v konflikte, ale je ich treba chápať komplementárne (t.j. navzájom sa dopĺňajú). Pre naše účely je postačujúce prijať, že v mnohých experimentoch, špeciálne v tých, spojených s výmenou energie, prevláda korpuskulárna (fotónová, kvantová) podstata svetla nad vlnovou. Naopak v experimentoch s interferenciou alebo difrakciou, ak svetlo interaguje s iným svetlom, prevláda vlnová podstata svetla.

Na **obr. 1.3** je znázornené spektrum elektromagnetického žiarenia. Z tohto spektra vidíme, že optické žiarenie leží v oblasti medzi mikrovlnným žiarením (mikrovlnami) a X lúčmi (röntegovým žiarením). V tejto oblasti môžeme rozlišovať: **infračervené žiarenie** (svetlo), **viditeľné svetlo** a **ultrafialové žiarenie** (svetlo). Viditeľné svetlo je definované ako optické žiarenie, ktoré je v oblasti spektrálnej citlivosti ľudského oka (t.j. umožňuje vytvorenie vizuálneho vnímania). Svetlo samotné má bielu farbu, ale rôzne vlnové dĺžky z tejto oblasti žiarenia stimulujú vnem farby v oku. Pre optické komunikácie sa predpokladá využitie oblasti optického spektra medzi 0,4 až 12  $\mu\text{m}$ . Z **obr. 1.3** vidíme, že táto oblasť je z oblasti viditeľného svetla a infračerveného žiarenia. Žiarenie z tejto oblasti budeme však v ďalšom nazývať jednoducho svetlom, pretože toto žiarenie možno spracovávať a merať použitím podobných metód a prístrojov ako viditeľné svetlo.

## 1.4 VLNOVÁ PODSTATA SVETLA

Svetlo ako elektromagnetická vlna môže byť charakterizované časovo priestorovou závislosťou vektorov:  $\vec{E}$  - intenzity elektrického poľa a  $\vec{H}$  - intenzity magnetického poľa. Vektory  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$  vyhovujú **Maxwellovým rovniciam**, z ktorých za určitých predpokladov získame tzv. **vlnové rovnice**.

$$\Delta(\vec{E}, \vec{H}) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{E}, \vec{H}) \quad (1.4.1)$$

kde  $\Delta$  je tzv. **Laplaceov operátor** a rovnaká rovnica platí pre vektor  $\vec{E}$  aj  $\vec{H}$ . Z vlnovej rovnice vyplýva, že zmeny v elektromagnetickom poli sa šíria **rýchlosťou svetla**  $c$  a frekvencia kmitov v poli  $f$  a ich vlnová dĺžka vo vákuu  $\lambda_0$  sú navzájom spojené vzťahom

$$c = f\lambda_0 \quad (1.4.2)$$

**V materiálnom prostredí je rýchlosť svetla** vo všeobecnosti menšia ako  $c$  a je určená vzťahom

$$v = \frac{c}{n} = f\lambda \quad (1.4.3)$$

kde  $n$  je tzv. **index lomu** prostredia a  $\lambda$  je vlnová dĺžka svetla v tomto prostredí. Z elektromagnetickej teórie dostaneme

$$n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \quad (1.4.4)$$

kde  $\mu_r$  a  $\varepsilon_r$  sú tzv. **relatívna permeabilita** a **permitivita** uvažovaného prostredia.

Najjednoduchšie elektromagnetické vlny majú tvar **sínusových (harmonických) vln**

$$E(x, t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (1.4.5)$$

kde  $E_0$  je amplitúda, člen

$$\varphi = \omega t - kx + \phi \quad (1.4.6)$$

sa nazývame **fáza**,  $k=2\pi/\lambda$  je **vlnové číslo** a  $\phi$  **fázová konštanta (počiatočná fáza)**. Pripomeňme, že podobný vzťah platí aj pre zložku  $H$  vlny. Zložky  $E$  a  $H$  sú navzájom kolmé a kolmé na smer šírenia, ktorý sa obyčajne reprezentuje **vektorom**  $\vec{k}$  (koncept TEM vlny). Takáto vlna predstavuje tzv. **rovinnú elektromagnetickú vlnu**, ktorej vlnoplocha (rovina konštantnej fázy) sa šíri rýchlosťou

$$v = \frac{\omega}{k} = f\lambda \quad (1.4.7)$$

preto sa táto rýchlosť tiež nazýva **fázová rýchlosť**. V praxi je temer nemožné vytvoriť dokonale **monochromatickú vlnu**. Vytvorí sa tak v podstate **vlnový balík** skupiny vln s navzájom blízkou hodnotou vlnovej dĺžky. Takýto balík sa potom pohybuje tzv. **grupovou rýchlosťou**

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (1.4.8)$$

Vzťah (1.4.5) predstavuje rovinnú vlnu šíriacu sa v smere osi x. Vzťah je možné jednoducho zovšeobecniť na opísanie rovinatej vlny šíriacej sa v ľubovoľnom smere určenom **vlnovým vektorom**  $\vec{k}$

$$E(x, y, z, t) = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi) \quad (1.4.9)$$

kde  $\vec{r}$  je **polohový vektor**. Elektromagnetické vlny vznikajúce z bodového zdroja možno opísať v tvare **guľovej vlny**

$$E = \frac{A}{r} \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (1.4.10)$$

kde A je konštanta vyjadrujúca intenzitu zdroja. Guľová vlna je výhodná pri opise javov vyžarovania elektromagnetických vln.

Spôsob pohybu vektora intenzity elektrického poľa  $\vec{E}$  v rovine kolmej na smer šírenia rovinatej vlny nazývame **polarizáciou**. Polarizácia môže byť:

- lineárna** (koncový bod vektora  $\vec{E}$  sa pohybuje po úsečke)
- kruhová** (koncový bod vektora  $\vec{E}$  opisuje kružnicu)
- eliptická** (koncový bod vektora  $\vec{E}$  opisuje elipsu)

Pripomeňme, že kruhová a eliptická polarizácia môže byť **ľavotočivá** alebo **pravotočivá**. Vo všeobecnosti môže byť elektromagnetická vlna **polarizovaná** (t.j. má niektorý z vyššie uvedených stavov polarizácie), **nepolarizovaná** (vektor  $\vec{E}$  sa pohybuje náhodne), **častočne polarizovaná** (superpozícia polarizovanej a nepolarizovanej vlny).

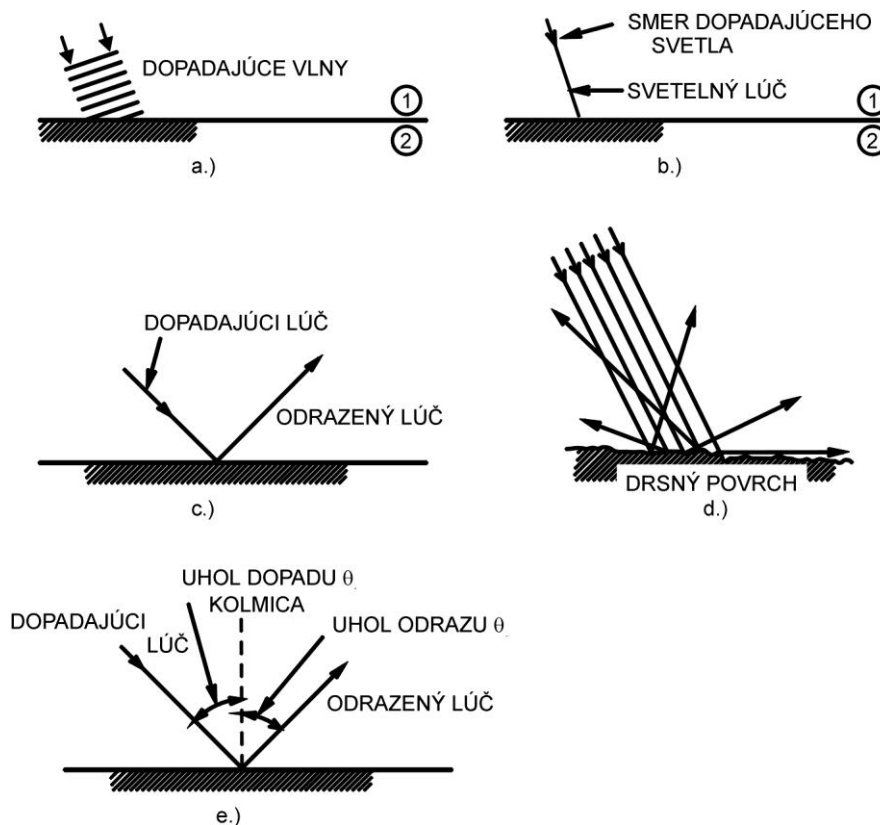
**Rýchlosť šírenia svetla** v atmosfére (vzduchu) je približne rovnaká ako vo vákuu (pre všetky vlnové dĺžky). Ale v rôznych materiáloch (ako napr. vo vode, skle a pod.) sa svetlo šíri menšou rýchlosťou, ktorá vo všeobecnosti môže závisieť od vlnovej dĺžky. Hovoríme, že tieto látky majú **disperzné vlastnosti**. Podľa toho ako preniká svetlo cez kvapaliny, plyny a tuhé látky, môžeme ich klasifikovať ako **priehľadné, priesvitné a nepriehľadné**. Priehľadné (transparentné) sú také látky, ktoré na cez ne prechádzajúce svetlo majú malý alebo zanedbateľný vplyv (napr. veľmi čistá voda, sklo, umelé hmoty, vzduch a pod.). Nepriehľadné látky svetlo neprepúšťajú. Priesvitné látky prepúšťajú svetlo čiastočne.

Svetlo sa v homogénnom izotropnom prostredí šíri priamočiario. Svetlo sa šíri z bodového zdroja ako guľová vlna. Vo veľkej vzdialenosti od zdroja (**obr. 1.8a**) ho môžeme nahradiť systémom dopadajúcich rovinných vln. Systém dopadajúcich vln možno nahradiť jedinou priamkou nazývanou **svetelným lúčom** (**obr. 1.8b**), ktorá má smer dopadajúceho svetla. Mnohé optické systémy možno riešiť použitím svetelných lúčov a geometrickým vyšetrením ich vzájomných vzťahov (uhlov). Takýto postup sa nazýva **geometrická optika**. Je to najjednoduchší prístup k riešeniu optických prvkov.

Pri dopade svetla na rozhranie (povrch určitého predmetu) **dochádza k odrazu svetla**. Ak svetlo dopadá na rovný a vyleštený povrch, dochádza (**obr. 1.8c**) k **regulárnemu odrazu**. Keď povrch

objektu má nerovnosti alebo je drsný (vzhľadom na vlnovú dĺžku dopadajúceho svetla), dochádza k **difúznemu odrazu** (obr. 1.8d). V praxi regulárny odraz nastáva na zrkadlách (napr. na vrstve vylešteného striebra) a difúzny odraz nastáva na každom neluminiscenčnom objekte. Bez difúzneho odrazu by sme tieto objekty nevideli. Pre dopad svetla na rovinný povrch platí **zákon odrazu** (obr. 1.8e). Uhol dopadu  $\theta_d$  sa rovná uhlu odrazu  $\theta_o$  (t.j.  $\theta_d = \theta_o$ ) a dopadajúci a odrazený lúč ležia v rovine dopadu. **Rovina dopadu** je určená dopadajúcim lúčom a kolmicou dopadu.

Pri dopade svetla ma rozhranie dvoch optických prostredí vzniká vo všeobecnosti okrem odrazu aj **lom svetelného lúča** (obr 1.9). Pri kolmom dopade na rozhranie (obr 1.9a) sa časť svetelnej energie dopadajúceho lúča odráža, časť preniká do druhého prostredia a tvorí predchádzajúci lúč. V ďalšom si pripomeňme základné skutočnosti vyplývajúce zo **Snellovho lomu** lúčov rovinatej lineárne polarizovanej vlny dopadajúcej šikmo na rovinné rozhranie dvoch prostredí s rôznymi indexami lomu.



Obr 1.8

Dopad svetla na rozhranie:  
 (a) dopadajúce vlny, (b) svetelný lúč, (c) regulárny odraz,  
 (d) difúzny odraz, (e) zákon odrazu.

Keď dopadá svetelný lúč na rozhranie dvoch bezstratových dielektrík (obr. 1.9b) pod uhlom  $\theta_d$ , potom sa lomený lúč šíri v druhom prostredí pod uhlom  $\theta_p$ , pričom platí **Snellov zákon lomu**

$$n_1 \sin \theta_d = n_2 \sin \theta_p = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_d} = \frac{n_1}{n_2} = n_{12} \quad (1.4.11)$$

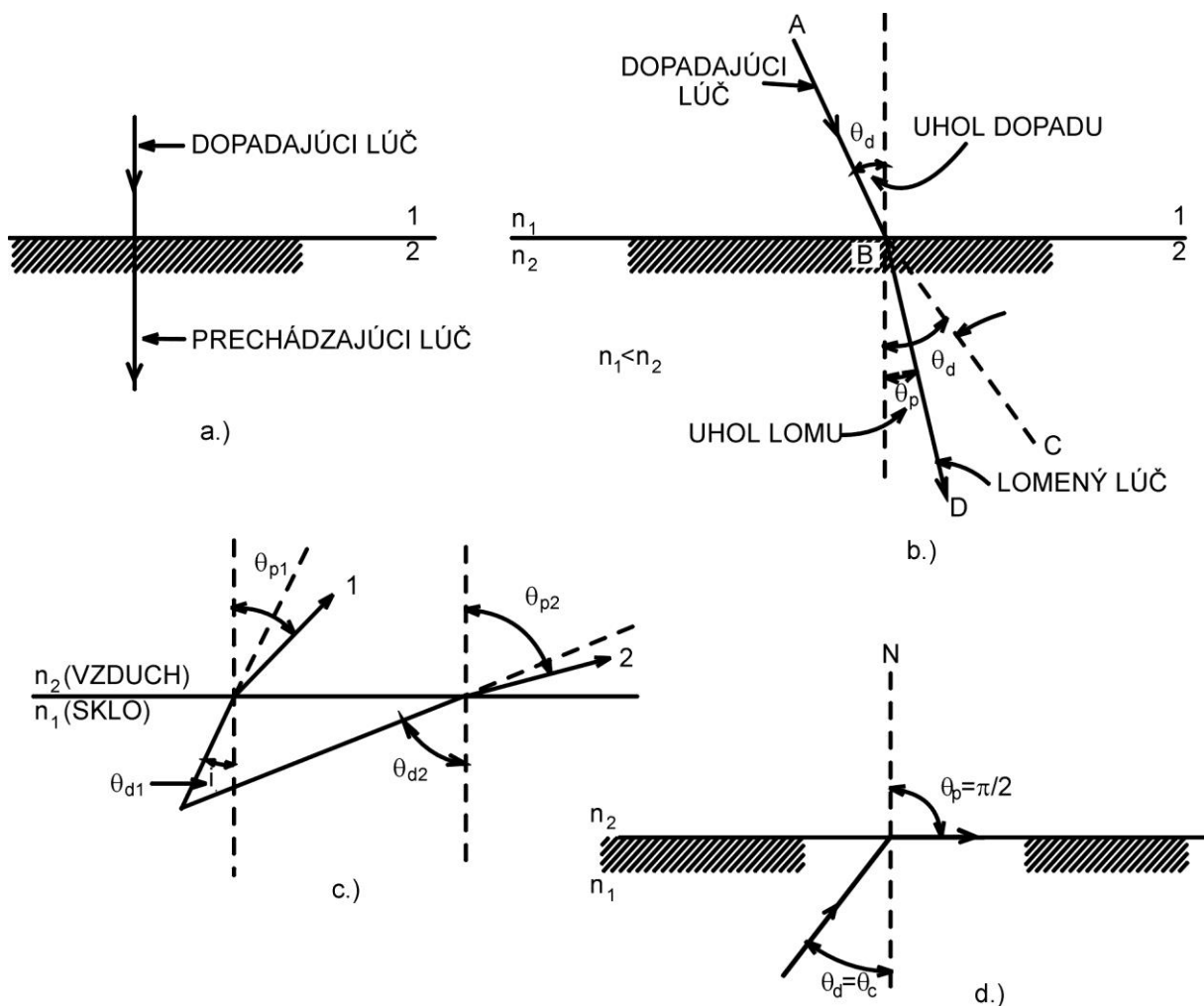
kde  $n_{12}$  je relatívny index lomu



$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{c}{v_1}}{\frac{c}{v_2}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}\mu_{r1}}{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}} \quad (1.4.12)$$

kde  $v_1$  a  $v_2$  sú rýchlosti šírenia svetla a  $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \mu_{r1}, \mu_{r2}$  sú relatívna permitivita a permeabilita v uvažovaných prostrediach. Keď svetlo dopadá na rozhranie opticky hustejšieho prostredia (napr. skla, typická hodnota  $n_1$  (1,5; 1,9)), t.j.  $n_1 > n_2$  (obr. 1.9c), potom sa lúč v druhom prostredí láme smerom **od kolmice** ( $\theta_p > \theta_d$ ) a pre určitý uhol  $\theta_d = \theta_c$  (tzv. **kritický uhol dopadu**) bude  $\theta_p = \pi/2$ , t.j. lomený lúč sa bude šíriť pozdĺž rozhrania oboch prostredí (obr. 1.19d). Pre veľkosť kritického uhla  $\theta_c$  platí

$$n_{12} \sin \theta_c = 1 \Rightarrow \theta_c = \arcsin \frac{1}{n_{12}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4.13)$$



Obr 1.9

Lom svetla na rozhraní:

- (a) kolmý dopad, (b) šikmý dopad (lom ku kolmici),
- (c) šikmý dopad (lom od kolmice), (d) totálny odraz

Pre uhly  $\theta_d > \theta_c$  je  $\sin \theta_p > 1$ . Neexistuje teda v tomto prípade v druhom prostredí homogénna lomená vlna, dochádza k **úplnému (totálnemu) odrazu** a pozdĺž rozhrania sa môže šíriť **povrchová vlna**.

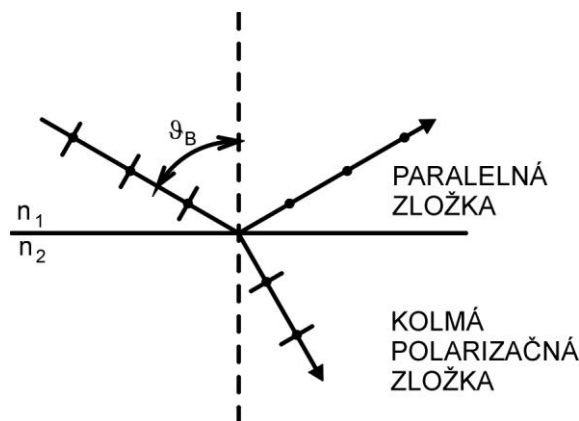
Pri uvážení polarizačných vlastností vlny dopadajúcej na rovinné rozhranie dvoch prostredí (**obr. 1.10**) zisťujeme, že intenzita paralelnej a kolmej polarizačnej zložky vlny závisí od uhlu dopadu. Pre určitý uhol dopadu, tzv. **Brewsterov uhol**  $\theta = \theta_B$  má paralelná zložka nulovú odrazivosť, t.j. celá paralelná zložka sa prenáša do druhého prostredia (**obr. 1.11**). Je možné ukázať, že pri dopade pod Brewsterovým uhlom sú odrazená a lomená (prenesená) vlna navzájom kolmé, teda zo Snellovho zákona lomu (1.4.11)

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \cos \theta_B \quad (1.4.14)$$

teda

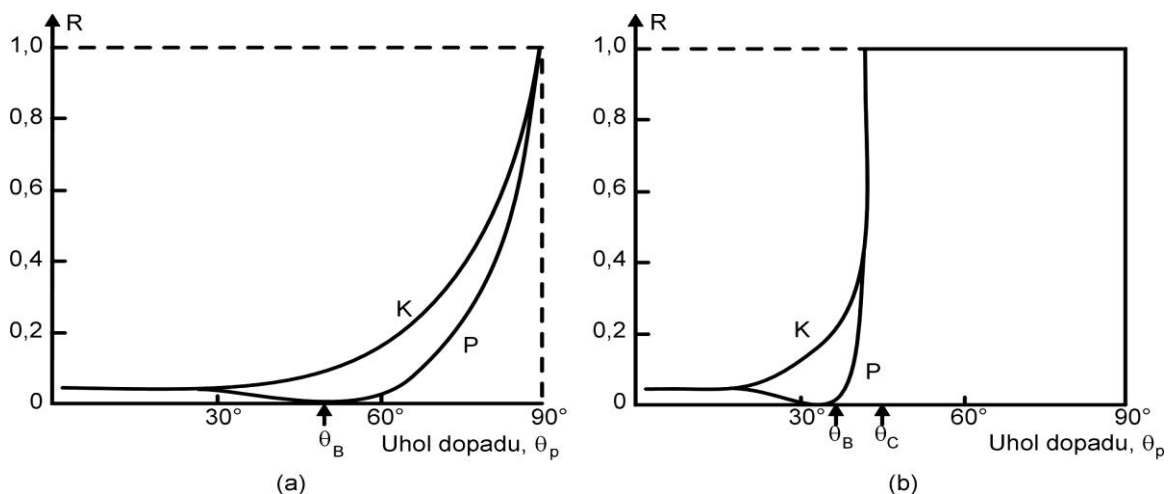
$$\text{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_{12}} \quad (1.4.15)$$

Z Brewsterovho zákona (1.4.15) vyplýva, že jedna z metód na polarizovanie svetla je jeho dopad na rad sklenených platničiek pod Brewsterovým uhlom. V praxi sa obyčajne používa 7 platničiek. Pripomeňme, že svetlo môže byť tiež polarizované použitím selektívnej absorpcie v rôznych materiáloch: prírodných (napr. turmalín) alebo umelých, ktoré označujeme ako polaroidy. **Polaroid** je plastická fólia (tenká vrstva) polyvinilalkoholu impregnovaného jódom. Molekuly jódu polyvinilalkoholu sú orientované do dlhých reťazcov pôsobiacich anizotropné prnutie vo fólii. Táto fólia potom prepúšťa okolo 80% svetla polarizovaného kolmo k reťazcom molekúl a menej ako 1% svetla polarizovaného paralelne k týmto reťazcom. Je teda zjavné, že reťazec molekúl interaguje s paralelne polarizovaným svetlom a absorbuje ho.



Obr 1.10

Lom svetla pri dopade pod Brewsterovým uhlom.



Obr 1.11

Odráživosť ako funkcia uhlu dopadu pre paralelne (P) a kolmo (K) polarizovanú zložku  
(a) opticky redšie prostredie, (b) opticky hustejšie prostredie.

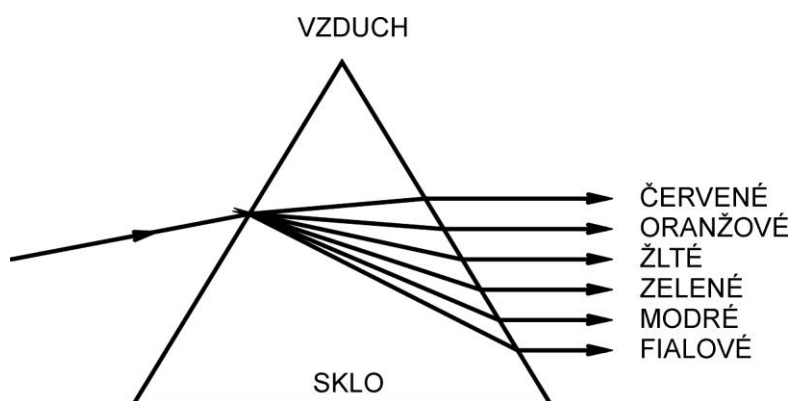
Polaroidová fólia sa v praxi široko používa k vytvoreniu lineárne polarizovaného svetla v optických systémoch. Pripomeňme však, že rôzne **polarizačné hranoly**, ako napr. **Nicolov hranol** a **Glanov-Thompsonov hranol** sú viac účinné.

Ak svetlo dopadajúce na lineárne polarizujúci element je už polarizované, potom intenzita prenášaného svetla závisí od uhla  $\theta$  medzi rovinou polarizácie dopadajúceho svetla a polarizujúceho elementu (polarizátora). **Intenzitu** prenášaného svetla možno vyjadriť **Malusovým zákonom**

$$I = E_0^2 \cos^2 \theta = I_0 \cos^2 \theta \quad (1.4.16)$$

kde  $I_0$  je intenzita dopadajúceho svetla.

Zatiaľ sme uvažovali svetelný lúč len s jedinou vlnovou dĺžkou, tzv. **monochromatický lúč**. Reálne svetelné lúče sú väčšinou tvorené svetlom s mnohými vlnovými dĺžkami a nazývame ich **polychromatickými lúčmi**. Na **obr. 1.12** je znázornené rozloženie bieleho svetla na jednotlivé monochromatické komponenty s využitím javu disperzie na sklenenom optickom hranole. Pripomeňme, že biele svetlo sa obvykle skladá zo šiestich zložiek znázornených na **obr. 1.12**.



Obr 1.12  
Disperzia bieleho svetla.

**Disperzia** vzniká v dôsledku rôznej rýchlosti šírenia svetla s rôznou vlnovou dĺžkou. Pretože lúče s rôznou vlnovou dĺžkou majú v dôsledku rôznej rýchlosti šírenia rôzne indexy lomu, lámu sa po prechode optickým hranolom pod rôznym uhlom.

Pri vyšetrowaní rôznych problémov optoelektroniky (optiky vo všeobecnosti) často stojíme pred problémom nájsť výsledné pole (vlnu), ktoré vzniká **superpozíciou** dvoch alebo viacerých vln pôsobiacich v tom istom bode priestoru. Problém možno formálne zapísať v tvare

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots \quad (1.4.17)$$

kde  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots$  sú zložky intenzity elektrického poľa individuálnych vln v určenom čase a priestore. Sčítanie (sumácia) vln sa uskutočňuje rôznym spôsobom v závislosti od vyšetrowaného problému a od vlastností interagujúcich vln, ktorú nazývame **koherencia**. V prípade **nekoherentného svetla** sa intenzity jednoducho **sčítajú**. Pre **koherentné svetlo** (rôzne zdroje majú konštantné fázové pomery) vznikajú tzv. **interferenčné pružky**.

Základný **matematický opis interferencie** dvoch optických lúčov (vln)

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \sin(\omega t - kx + \phi_1) \\ E_2 &= E_{02} \sin(\omega t - kx + \phi_2) \end{aligned} \quad (1.4.18)$$

možno vyjadriť v tvare

$$I = E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (1.4.19)$$

Ak amplitúdy vln sú rovnaké  $E_{01}=E_{02}$ , potom

$$I = 2E_{01}^2 [1 + \cos(\phi_2 - \phi_1)] \quad (1.4.20)$$

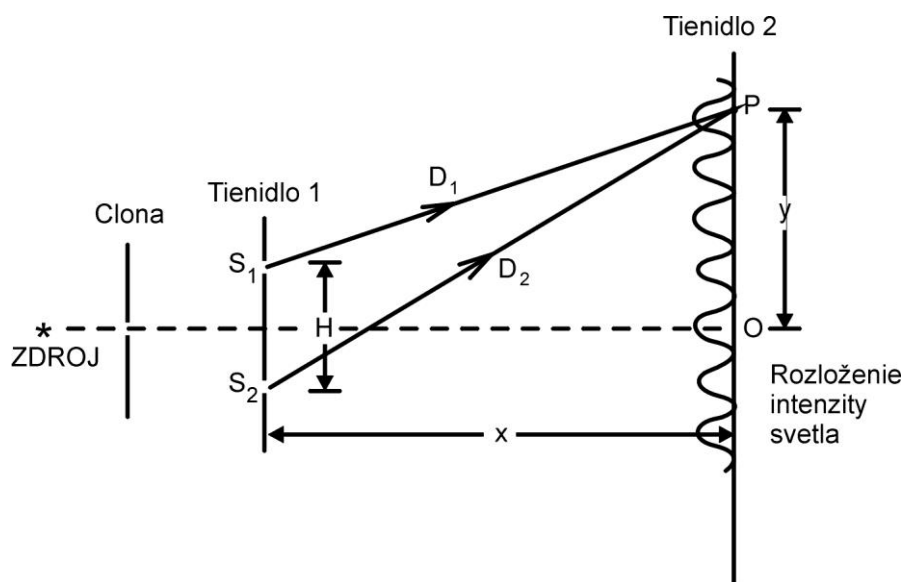
alebo

$$I = 4E_{01}^2 \cos^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) \quad (1.4.21)$$

Tento vzťah ukazuje, že intenzita interferenčných prúžkov je určená ako funkcia  $\cos^2$ . Intenzita interferenčných prúžkov sa mení od hodnoty  $4E_{01}^2=4I_1^2$  k nule ak sa fázový rozdiel dvoch koherentných vln mení od 0 do  $\pi$ . Pre  $E_{01} \neq E_{02}$  sa intenzita mení v rozsahu od  $(I_1 + I_2)^2$  a  $(I_1 - I_2)^2$ . Klasický prípad demonstrácie interferencie je **Youngov pokus** realizovaný už v roku 1802 (obr. 1.13). V tomto experimente monochromatické svetlo prechádza cez otvor S v clone a ožaruje tienidlo s dvomi malými otvormi  $S_1$  a  $S_2$ . Vzhľadom na to, že svetlo z otvorov  $S_1$  a  $S_2$  pochádza z otvoru S a tento je budený jediným zdrojom svetla, sú lúče šíriace sa od otvorov  $S_1$  a  $S_2$  koherentné. Tieto lúče sa šíria vo forme guľových vln a dopadajú na tienidlo 2. Ožiarenie tienidla 2 závisí od fázového rozdielu svetiel od zdrojov  $S_1$  a  $S_2$ . Intenzita svetla v bode P bude závisieť od fázového rozdielu

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(D_2 - D_1) \quad (1.4.22)$$

kde  $D_1$  a  $D_2$  sú vzdialenosti bodu P od  $S_1$  a  $S_2$ . **Svetlé interferenčné prúžky** vznikajú ak je fázový rozdiel  $\Delta\phi=0$ , alebo  $\pm 2p\pi$ , kde p je prirodzené číslo, t.j. ak platí



Obr. 1.13  
Geometria Youngovho pokusu

$$\frac{2\pi}{\lambda}(D_2 - D_1) = \pm 2p\pi \quad (1.4.23)$$

z čoho

$$|D_2 - D_1| = p\lambda \quad (1.4.24)$$

Podobne **tmavé prúžky** vznikajú ak platí

$$|D_2 - D_1| = (2p + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (1.4.25)$$

Na prvý pohľad by sa zdalo, že intenzita všetkých interferenčných prúžkov rovnakého druhu je rovnaká. Toto vzhľadom na uplatnenie difrakcie nie je pravda.

**Interferenčné javy** umožňujúce rozdelenie intenzít možno pozorovať aj na **tenkých vrstvách** alebo platničkách (**obr. 1.14**). V tomto prípade vzniká interferencia medzi lúčmi odrazenými od bodu A a B na blízkom a vzdialenom povrchu platničky. Ak sú tieto povrchy rovnobežné potom vlny šíriace sa od bodov A a C sú rovnobežné a musíme použiť šošovku na ich sústredenie aby došlo k interferencii. Použitím elementárnej geometrie a Snellovho zákona lomu možno ukázať, že rozdiel optických dráh  $(AB + BC)n$  a  $AD$  je rovný  $2nL\cos\theta_2$ , kde  $\theta_2$  je uhol lomu,  $L$  je hrúbka platničky a  $n$  je jej index lomu. Fázový rozdiel je teda

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(2nL\cos\theta_2) \quad (1.4.26)$$

a **svetlé interferenčné prúžky** vznikajú ak platí

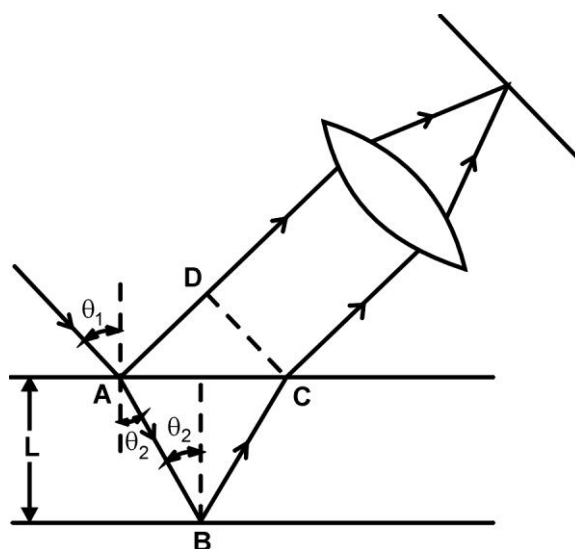
$$\frac{4\pi nL\cos\theta_2}{\lambda} = 2p\pi \quad (1.4.27)$$

teda

$$p\lambda = 2nL\cos\theta_2 \quad (1.4.28)$$

Podobné **tmavé interferenčné prúžky** vznikajú, ak platí

$$(2p + 1)\frac{\lambda}{2} = 2nL\cos\theta_2 \quad (1.4.29)$$

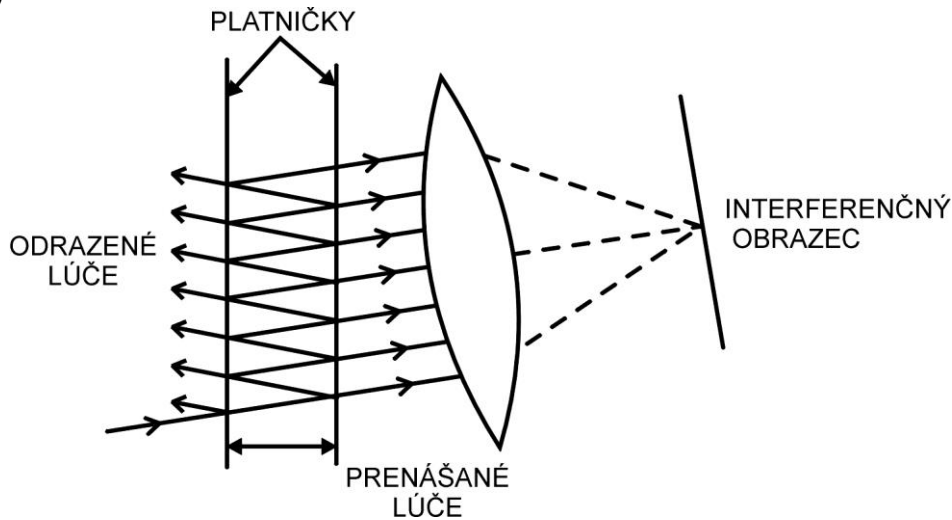


Obr 1.14  
Interferenčný jav na tenkej vrstve alebo platničke.

Ak je platnička z opticky hustejšieho materiálu, ako okolité prostredie, potom vzniká fázový posun  $\pi$  pri odraze od horného povrchu a vyššie uvedené podmienky pre vznik interferenčných prúžkov si navzájom vymenia úlohy.

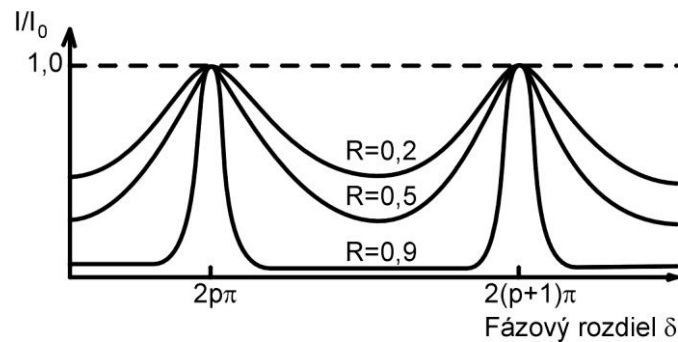
Pre daný prúžok  $p$ ,  $\lambda$ ,  $L$  a  $n$  sú konštantné a preto  $\theta_2$  musí byť konštantné, takéto prúžky sú známe ako prúžky s rovnakým sklonom. Ak je uhol dopadu nie veľmi veľký a použijeme monochromatický zdroj potom je možné pozorovať prúžky v tvare koncentrických krúžkov v ohniskovej rovine pozorovacej šošovky.

V praxi je možné interferenčný obraz lepšie pozorovať pre prenášaný lúč ako pre odrazený lúč (obr. 1.15)



Obr. 1.15

Mnohonásobný odraz a interferencia na dvoch rovnobežných (paralelných) platničkách.



Obr. 1.16

Zmena relatívnej intenzity ( $I/I_0$ ) interferenčných prúžkov od zmeny hodnoty odrazivosti zrkadiel  $R$ .

Ak sú odrazové plochy platničiek rovnobežné sú mnohonásobne odrazené lúče rovnobežné a môžu interferovať v ohnisku pozorovacej šošovky. Fázový rozdiel lúčov je daný rozdielom optických dráh dvoch prechodov platničkou a fázovými zmenami vplyvom odrazu od odrazných plôch. Rozdelenie intenzity je dané zložitejším výrazom

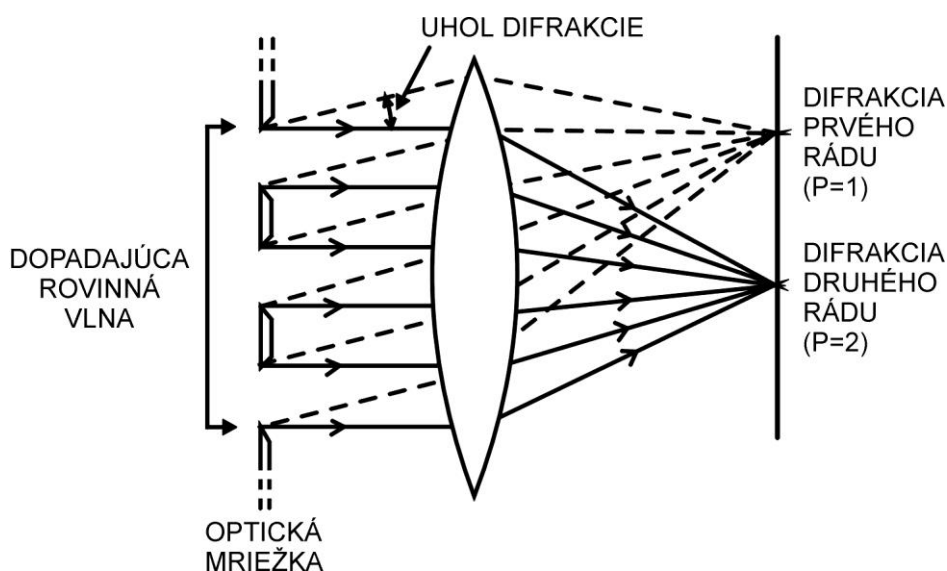
$$I = \frac{I_0 T^2}{1 - R^2} \left( \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\delta}{2}} \right) \quad (1.4.30)$$

kde  $I_0$  je intenzita dopadajúceho lúča,  $R$  - koeficient odrazu,  $T$  – koeficient prechodu platničky a  $\delta$  je celková fázová zmena medzi interferujúcimi lúčmi. Ak je  $R$  veľké (väčšie ako 0,8) potom interferenčné maximá sú veľmi ostré (**obr. 1.16**). Prúžky tohto typu vznikajú vo **Fabryho – Perotových rezonátoroch**.

Mnoholúčové interferenčné javy môžu byť vyvolané rozdelením vlnoplochy. Toto je dosiahnuté použitím viac ako dvoch otvorov v tienidle. V praxi sa takéto rozdelenie do veľmi veľkého počtu lúčov realizuje použitím optickej mriežky. **Optickou mriežkou** rozumieme sklenenú dosičku v ktorej je pravidelným spôsobom urobené veľké množstvo vrypov. Možno ukázať (**obr. 1.17**), že maximum interferenčného obrazca pre optickú (difrakčnú) mriežku vzniká, ak platí

$$p\lambda = (a + b)\sin \theta = d \cos \theta \tag{1.4.31}$$

kde  $d=a+b$  je konštanta mriežky ( $a$  je šírka a  $b$  vzdialenosť vrypov) a  $\theta$  je uhol difrakcie.



Obr 1.17  
Interferencia na optickej mriežke.

Ak umiestnime nepriehľadný objekt medzi zdroj svetla a tienidlo, potom môžeme pozorovať, že tieň objektu nie je dokonale ostrý. Určitá intenzita svetla je prítomná aj v oblasti geometrického tieňa (v tmavej zóne). Podobne svetlo, ktoré sa šíri z malej apertúry, alebo úzkej štrbiny sa rozplýva. To, že svetlo sa v týchto prípadoch nešíri len priamočiaro sa nazýva **difrakcia** a je to prirodzený dôsledok vlnovej podstaty svetla.

Základná vlastnosť difrakcie svetla môže byť vysvetlená použitím **Huygensovho princípu**. Podľa toho princípu šírenie svetelnej vlny môže byť predikované uvažovaním, že každá vlnoplocha pôsobí ako zdroj sekundárnych vln, ktoré sa šíria do všetkých smerov. Obálka týchto vln po malom časovom okamihu je nová vlnoplocha. Sekundárne vlny sa šíria vo forme guľových vln (**obr. 1.18**). Kvantitatívny opis Huygensovho princípu je známy ako **Fresnelov – Kirchhoffov vzorec**.

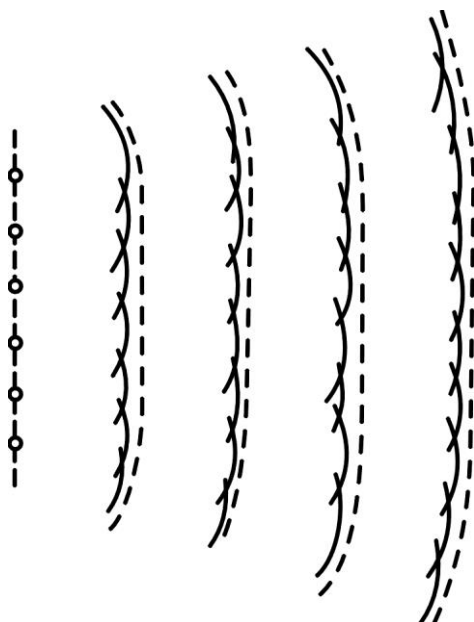
Pri vyšetrowaní javu difrakcie sa obyčajne rozlišuje medzi dvomi všeobecnými prípadmi označenými ako **Fraunhoferova** a **Fresnelova difrakcia**. **Fraunhoferova difrakcia** vzniká ak sú dopadajúce a difrakované vlny efektívne rovinné. O **Fresnelovej difrakcii** hovoríme ak je zakrivenie vlnoploch podstatné. Pritom nie je ostrá hranica medzi týmito prípadmi.

Fraunhoferova difrakcia vzniká napríklad na úzkej štrbine (**obr. 1.19**). Viac ako 80% svetla prechádza cez apertúru v hlavnom maxime okolo ktorého je po oboch stranách rad sekundárnych maxím. Tieto maximá sú ožiarenia, ktoré vznikajú v smeroch určených difrakčnými uhlami  $\theta$  danými vzťahom

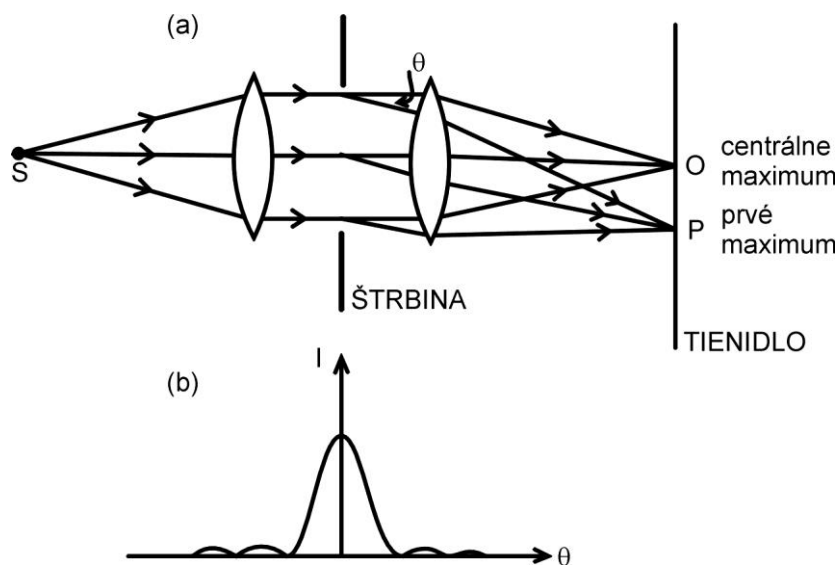
$$\sin \theta = \frac{p\lambda}{D} \quad (1.4.32)$$

kde  $D$  je šírka štrbiny. Iný z praktického hľadiska veľmi dôležitý prípad je difrakcia na kruhovej apertúre, kde difrakovaný obrazec pozostáva zo svetlej centrálnej oblasti obklopenej tmavými a svetlými prstencami. Okolo 84% svetla je sústredené v centrálnej oblasti, ktorá sa volá **Airyho disk**. Miera difrakcie sa určuje uhlom  $\theta$  pri ktorom vzniká prvý tmavý prstenec, pre ktorý z Fresnelovho–Kirchhoffovho vzorca dostaneme

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} \approx \frac{\lambda}{D} \quad (1.4.33)$$



Obr 1.18  
Huygensov princíp.



Obr 1.19  
Fraunhoferova difrakcia (a) a rozloženie ožiarenia (b).



kde  $D$  je priemer apertúry. Pripomeňme, že difrakcia určuje teoretickú hranicu rozlíšenia optických prístrojov a je tiež zodpovedná za vznik chýbajúcich častí interferenčného obrazca. Rozdelenie ožiarenia týchto obrazcov má vo všeobecnosti obálku, ktorá zodpovedá difrakčnému obrazcu na jednoduchej štrbine (**obr. 1.19b**).

## 1.5 KLASICKÉ ZDROJE SVETLA

**Klasickými** alebo **tepelnými zdrojmi** svetla nazývame také zdroje svetla, ktoré vyžarujú elektromagnetickú energiu v priamej súvislosti s ich teplotou. Klasické zdroje svetla možno rozdeliť do dvoch skupín: **čierny žiarič** a **čiarový žiarič**. Čiernym žiaričom nazývame nepriehľadné telesá alebo aj husté plyny, ktoré prakticky vyžarujú na všetkých vlnových dĺžkach. Čiarové žiariče naproti tomu vyžarujú na diskretných vlnových dĺžkach.

Žiarenie z nepriehľadných telies (objektov) a hustých plynov bolo veľmi intenzívne študované v devätnástom storočí a vyústilo do formulácie nasledujúcich empirických zákonov. Najprv bolo zistené, že rýchlosť akou je energia emitovaná (t.j. vyžiarený výkon) je úmerná štvrtej mocnine absolútnej teploty

$$W = \sigma T^4 \quad (1.5.1)$$

kde  $W$  je celkový vyžiarený výkon na jednotku plochy a  $\sigma$  je **Stefanova konštanta**. Tento vzťah je známy ako **Stefanov-Boltzmanov zákon**. Platí presne len pre tzv. **ideálne absolútne čierne teleso**. Aproximácia absolútne čierneho telesa môže byť realizovaná malou dierkou v inak uzavretej dutine, ktorá je vyhrievaná rovnomerne na konštantnú teplotu. Žiarenie, ktoré opúšťa túto dutinu cez malý otvor zodpovedá žiareniu absolútne čierneho telesa a riadi sa presne Stefanovým-Boltzmanovým zákonom. Väčšina teplých povrchov sa len blíži k ideálnemu prípadu a ich vyžarovanie možno opísať vzťahom

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.5.2)$$

kde  $\varepsilon$  je **emisivita povrchu** ( $\varepsilon$  má hodnotu medzi 0 a 1).

Experimentálne bolo potvrdené, že spektrálna distribúcia emitovanej energie pri určitej teplote má maximum a toto maximum sa posúva ku kratším vlnovým dĺžkam s rastúcou teplotou (**obr. 1.20**). Tento posun je určený **Wienovým zákonom**

$$\lambda_m T = \text{konšt.} \quad (1.5.3)$$

kde  $\lambda_m$  je vlnová dĺžka maxima.

Zákonitosti na obr. 1.20 a Wienov zákon boli exaktne opísané **Planckovým vzťahom**

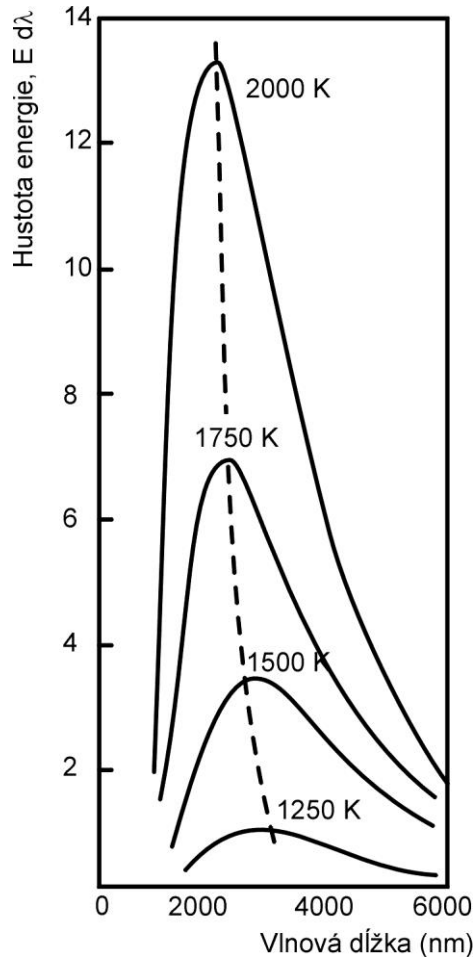
$$W_f = \frac{2\pi h f}{c^3} \left[ \frac{1}{\exp(hf/kT) - 1} \right] \quad (1.5.4)$$

kde  $W_f$  je spektrálna žiarivosť. K odôvodneniu tohto vzťahu Planck využil **kvantovú podstatu svetla**, t.j. uvažoval, že energia svetla (žiarenia) sa môže meniť len diskretné v určitých kvantách, ktoré nazval **fotóny**. Tento vzťah potom položil **základy modernej kvantovej teórie svetla**.

V prípade excitovaných plynov, v ktorých je malá interakcia medzi individuálnymi atómami, iónmi a molekulami je elektromagnetické žiarenie (svetlo) emitované pri dobre definovaných diskretných vlnových dĺžkach. Toto môže byť objasnené veľmi ľahko použitím jednoduchého **Bohrovho modelu atómu**. Podľa tohto modelu uvažujeme, že atóm pozostáva z pozitívneho jadra

s nábojom  $Ze$  ( $Z$  je atómové číslo) a negatívnych elektrónov s nábojom  $e$  a hmotnosťou  $m$ , ktoré sa môžu nachádzať na určitých dovolených energetických hladinách určených vzťahom

$$E_n = -\frac{mZ^2R^4}{8n^2h^2\varepsilon_0^2} \quad (1.5.5)$$



Obr 1.20

Distribúcia energie v spektre žiarenia absolútne čierneho telesa pri rôznych teplotách.

kde  $n$  je prirodzené číslo známe ako hlavné kvantové číslo. Elektróny môžu byť excitované z normálneho základného stavu do vyšších energetických hladín. Ak elektrón prejde z vyššej energetickej hladiny na niektorú nižšiu energetickú hladinu emituje sa kvantum žiarenia – fotón. Energia tohto kvanta sa rovná rozdielu energií energetických hladín

$$\Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \eta\omega \quad (1.5.6)$$

z čoho použitím (1.5.5) dostaneme

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{me^4Z^2}{8h^3\varepsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (1.5.7)$$

kde  $n_f$  a  $n_i$  sú hlavné kvantové čísla zodpovedajúce koncovému a počiatočnému stavu prechodu. Z tohto vzťahu je zjavný čiarový (diskrétny) charakter emitovaného žiarenia. Emitované žiarenie má veľmi malú šírku spektrálnej čiary. Rozšírenie tejto čiary závisí od mnohých fyzikálnych javov (Heizenbergov princíp neurčitosti, Starkov jav, Zeemanov jav, Dopplerov jav atď.).

## 1.6 ZÁKLADY RÁDIOMETRIE A FOTOMETRIE

V súvislosti s optickým meraním v oblasti optických komunikácií sa používajú dva systémy jednotiek: rádiometrické a fotometrické. **Rádiometrické jednotky** sa používajú na meranie energie žiarenia vo vyšetrovanom spektre (vzhľadom na vlnovú dĺžku). **Fotometrické jednotky** sú spojené s meraním len v tej časti optického spektra, ktorá je z oblasti spektrálnej citlivosti očí (viditeľné svetlo). Fotometria neuvažuje neviditeľné žiarenie. Hoci tieto systémy jednotiek používajú rôzne pojmy a symboly, navzájom úzko súvisia a možno určiť vzťahy medzi týmito sústavami jednotiek a prevodné koeficienty. V tab. 1.2 sú uvedené definície a označenia základných rádiometrických a fotometrických jednotiek. Rádiometrické jednotky sú označené indexom **e (energia)** a fotometrické jednotky indexom **v (visible z angl. viditeľné)**.

**Žiarivý tok** vyjadruje vyžiarenú energiu za jednotku času

$$P_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1.6.1)$$

**Vyžiarenú energiu** možno vyjadriť integrálom

$$Q_e = \int P_e dt \quad (1.6.2)$$

Tú časť žiarivého toku  $P_e$ , resp. žiarivej energie  $Q_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak, nazývame **svetelným tokom**  $P_v$ , resp. **svetelnou energiou**  $P_v$ . Základnou jednotkou rádiometrie je **jeden watt (W)**, fotometrie je **lumen (lm)**. Špička (pík) citlivosti ľudského oka je pri vlnovej dĺžke  $\lambda=555$  nm, keď  $1 \text{ watt} \cong 680 \text{ lumenov}$ .

**Vyžarovaním**  $M_e$  nazývame plošnú hustotu žiarivého toku

$$M_e = \frac{dP_e}{dA_s} \quad (1.6.3)$$

kde  $dP_e$  je plošným elementom  $dA_s$  vyžiarený žiarivý tok. Plošný element  $dA_s$  vyžaruje len do jedného polopriestoru. Žiarivý tok možno vyjadriť integrálom

$$P_e = \int M_e dA_s \quad (1.6.4)$$

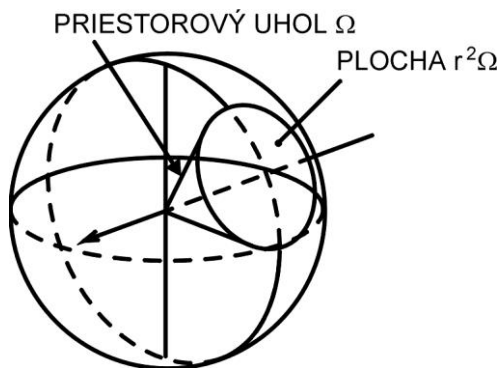
Tú časť vyžarovania  $M_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak nazývame **svetlením**  $M_v$ . Bodovým žiaričom možno priradiť veličinu **žiarivosť**  $I_e$ , vyjadrenú pomerom

$$I_e = \frac{dP_e}{d\Omega} \quad (1.6.5)$$

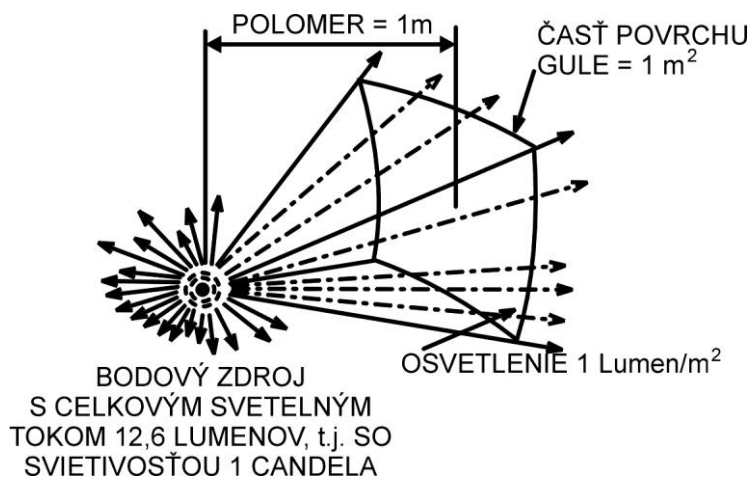
kde  $dP_e$  je bodovým žiaričom vyžiarený tok do priestorového uhlu  $d\Omega$ . Žiarivý tok do priestorového uhlu  $d\Omega$  (**obr. 1.21**) možno vyjadriť integrálom

$$P_e = \int_{\Omega} I_e d\Omega \quad (1.6.6)$$

Tú časť žiarivosti  $I_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak, nazývame svietivosťou  $I_v$ . Jednotkou svietivosti je **candela (cd)**, ktorá je (obr. 1.22) definovaná ako svietivosť v danom smere monochromatického bodového svetelného zdroja s frekvenciou vyžarovania  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, ktorého žiarivosť je v tomto smere  $1/683$  W na steradián.



Obr 1.21  
Žiarivý tok bodového žiariča do priestorového uhla  $\Omega$ .



Obr. 1.22  
Svietivosť bodového zdroja.

Výkon na jednotku priestorového uhla a jednotku projekčnej plochy vyjadruje veličina **žiara**  $I_e$ , definovaná vzťahom

$$I_e = \frac{dI_e}{dA_{sf}} = \frac{dI_e}{dA_s \cos \varphi} = \frac{d^2 P_e}{dA_s \cos \varphi d\Omega} \quad (1.6.7)$$

kde  $dA_{sf}$  je projekcia vyžarovacej plochy  $dA_s$  do smeru vyžarovania a  $\varphi$  je uhol medzi smerom vyžarovania a kolmicou plochy  $dA_s$ . Pre zadaný smer možno žiarivosť  $I_e$  plochy  $A_s$  vyjadriť integrálom

$$I_e = \int_{A_s} L_e dA_s \cos \varphi \quad (1.6.8)$$

Tabuľka 1.2

RÁDIOMETRICKÉ A FOTOMETRICKÉ JEDNOTKY

Definícia	Rádiometria			Fotometria		
	Označenie	Názov	Jednotka	Označenie	Názov	Jednotka
Energia	$Q_e$	Žiarivá energia	J	$Q_v$	Svetelná energia	lm/s
Energia za jednotku času = výkon = tok	$P_e$	Žiarivý tok	W	$P_v$	Svetelný tok	lumen (lm)
Výkon vstupujúci cez jednotku plochy	$E_e$	Ožiarenie	W/m <sup>2</sup>	$E_v$	Osvetlenie	lm/m <sup>2</sup> lux (lx)
Výkon vystupujúci cez jednotku plochy	$M_e$	Vyžarovanie	W/m <sup>2</sup>	$M_v$	Svetlenie	lm/m <sup>2</sup>
Výkon na jednotku priestorového uhlu	$I_e$	Žiarivosť	W/sr	$I_v$	Svietivosť	candela (cd)
Výkon na jednotku priestorového uhlu a jednotku projekčnej plochy	$L_e$	Žiara	W/(m <sup>2</sup> sr)	$L_v$	Jas	cd/m <sup>2</sup>
Energia na jednotku plochy	$H_e$	Dávka ožiarenia	J/m <sup>2</sup>	$H_v$	Expozícia	lx.s

Vyžarovanie  $M_e$  do priestorového uhla  $\Omega$  možno vyjadriť integrálom

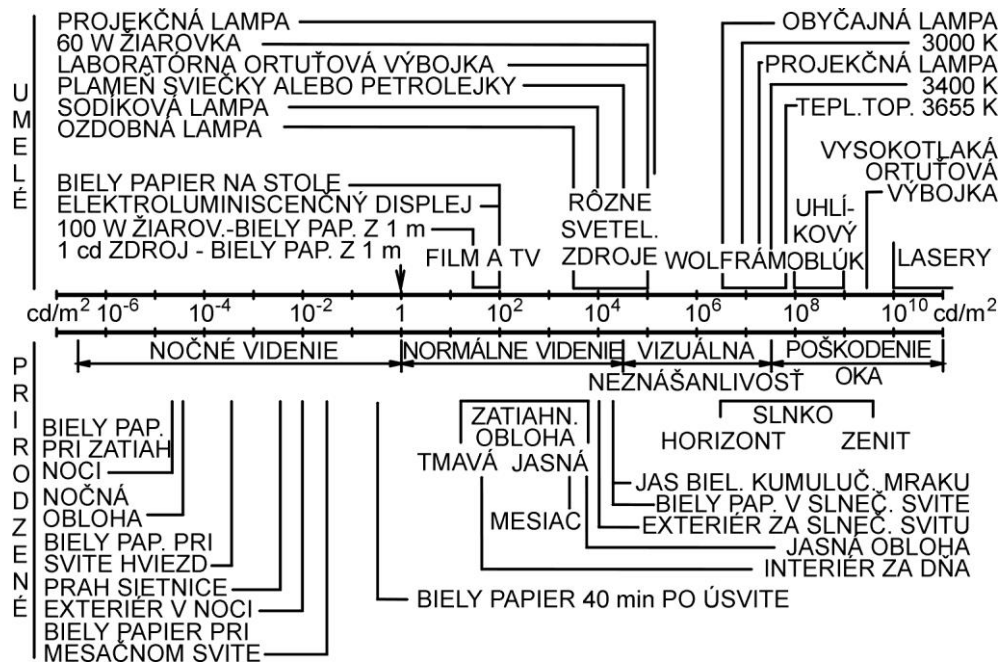
$$M_e = \int_{\Omega} L_e d\Omega \quad (1.6.9)$$

Žiarivý tok  $P_e$  plochy  $A_s$  do priestorového uhla  $\Omega$  dostaneme dvojným integrálom

$$P_e = \iint_{A_s \Omega} L_e dA_s \cos \varphi d\Omega \quad (1.6.10)$$

Medze integrálov v tomto vzťahu sú určené rozmermi žiarivej plochy a veľkosťou priestorového uhla  $\Omega$ . Pre plošné žiarivce integrujeme od 0 do  $2\pi$  steradiánov, pre žiarivce vyžarujúce do celého priestoru od 0 do  $4\pi$  steradiánov.

Tú časť žiary  $L_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak, nazývame **jasom**  $L_v$ . Na obr. 1.23 sú znázornené oblasti jasu umelých a prírodných zdrojov svetla.



Obr 1.23  
Oblasti jasu umelých a prírodných zdrojov svetla.

Účinnosť zdroja žiarenia  $\eta_e$ , resp. zdroja svetla  $\eta_v$ , je definovaná vzťahmi

$$\eta_e = \frac{P_e}{P} \quad (1.6.11a)$$

$$\eta_v = \frac{P_v}{P} \quad (1.6.11b)$$

kde  $P$  je vstupný (budiaci) výkon zdroja žiarenia, resp. svetla a  $P_e$  resp.  $P_v$  sú výstupné výkony žiarenia, resp. svetla.

Doposiaľ uvádzané radiometrické a fotometrické veličiny sa vzťahovali na zdroje žiarenia (svetla). V ďalšom uvedieme základné veličiny vzťahujúce sa na prijímače (detektory) svetla (žiarenia).

Ožiarenie  $E_e$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) je definované ako pomer žiarivého toku  $dP_e$  a ožiarenej plochy  $dA$

$$E_e = \frac{dP_e}{dA} \quad (1.6.12)$$

Žiarivý tok  $P_e$  dopadajúci na konečnú plochu  $A$  dostaneme integráciou

$$P_e = \int_A E_e dA \quad (1.6.13)$$

Tú časť žiarenia  $E_e$ , ktorá je z oblasti citlivosti ľudského zraku, nazývame **osvetlením**  $E_v$ . Jednotkou osvetlenia je **lux (lx) =  $\text{lm}/\text{m}^2$** .

**Dávku ožiarenia** (za určitý časový interval  $T$ ) počítame integráciou

$$H_e = \int_T E_e dt \quad (1.6.14)$$

Jednotkou dávky ožiarenia  $H_e$  je  $\text{Wsm}^{-2} = \text{Jm}^{-2}$ .

Tú časť dávky ožiarenia  $H_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak, nazývame **expozičiou** (dávkou osvetlenia)  $H_v$  ( $\text{lmsm}^{-2} = \text{lx.s}$ ).

V doposiaľ uvádzaných veličinách rádiometrie, resp. fotometrie sme neuvažovali spektrálnu závislosť (t.j. závislosť od vlnovej dĺžky  $\lambda$ , resp. frekvencie  $f$ ). Túto závislosť možno vyjadriť vo vyššie uvedených vzťahoch uvažovaním spektrálnych rádiometrických veličín uvedených v **tabuľke 1.3**.

Tabuľka 1.3

SPEKTRÁLNE RÁDIOMETRICKÉ VELIČINY

Názov	Definícia	Praktická jednotka
<b>Spektrálny žiarivý Tok</b>	$P_{e\lambda} = \frac{dP_e}{d\lambda}$ $P_{ef} = \frac{dP_e}{df}$	<b>W. ( 1 / nm )</b> W. ( 1 / Hz )
<b>Spektrálna dávka Žiarenia</b>	$H_{e\lambda} = \frac{dH_e}{d\lambda}$	<b>Wsm<sup>-2</sup>.( 1 / nm )</b>
<b>Spektrálna žiara</b>	$L_{e\lambda} = \frac{dL_e}{d\lambda}$	Wm <sup>-2</sup> . ( 1 / nm )
<b>Spektrálna žiarivosť</b>	$L_{e\lambda} = \frac{dI_e}{d\lambda}$	W / sr. ( 1 / nm )
<b>Spektrálne vyžarovanie</b>	$M_{e\lambda} = \frac{dM_e}{d\lambda}$	Wm <sup>-2</sup> . ( 1 / nm )
<b>Spektrálne ožiarenie</b>	$E_{e\lambda} = \frac{dE_e}{d\lambda}$	Wm <sup>-2</sup> . ( 1 / nm )