

3. SENZORY S OPTICKÝM PRINCÍPOM

Využívajú svetelný tok v rôznej podobe na vytvorenie výstupného signálu. V tejto kapitole sú opísané systémy, využívajúce najmä geometrické princípy šírenia svetla. Nazývajú sa, (resp. časť z nich) tiež *fotoelektrické*. Úvod tvorí stručné zopakovanie vlastností svetla a optiky.

Základné skupiny senzorov sú :

- ♦ **fotoelektrické** - využívajú väčšinou geometrickú optiku a ovplyvňovanie svetelného toku meranou veličinou, menšia dynamika
- ♦ **optoelektronické** - využívajú i vlnovú podstatu svetla, vysoká dynamika, väčšie nároky na zdroje a snímače svetla
- ♦ *ostatné - spolupracujú s inými princípmi (akustooptika)*

Poznámka: Presnú hranicu medzi fotoelektrickými a optoelektronickými systémami je ťažko stanoviť, môžu sa prelínať.

Podľa činnosti rozoznávame :

- **spojité** - spojitá zmena výstupu
- **dvojhodnotové** - len "svetlo - tma" (max. a min. výst. signál)
- **impulzné** - periodicky opakovaný dvojhodnotový režim

3.1. Vlastnosti svetla

Pre svetlo je vyjadrená :

- kvantita - fotometria
- kvalita - spektrum, polarizácia, koherencia...

3.1.1. Základné fotometrické veličiny

Vyjadrujú merateľné " množstvové " vlastnosti svetla, využiteľné sú najmä pre fotoelektrické systémy.

Najčastejšie je používaná **intenzita osvetlenia**, lebo sa dá pomerne jednoducho zmerať (luxmeter). Na intenzitu osvetlenia reagujú všetky snímače, podľa nej menia elektrický parameter.

Svietivosť charakterizuje zdroje svetla

Svetelný tok je veličina, ovplyvňovaná v optickej ceste

Jas charakterizuje "svietivosť" odraznej plochy, ktorú osvetlil primárny svetelný tok.

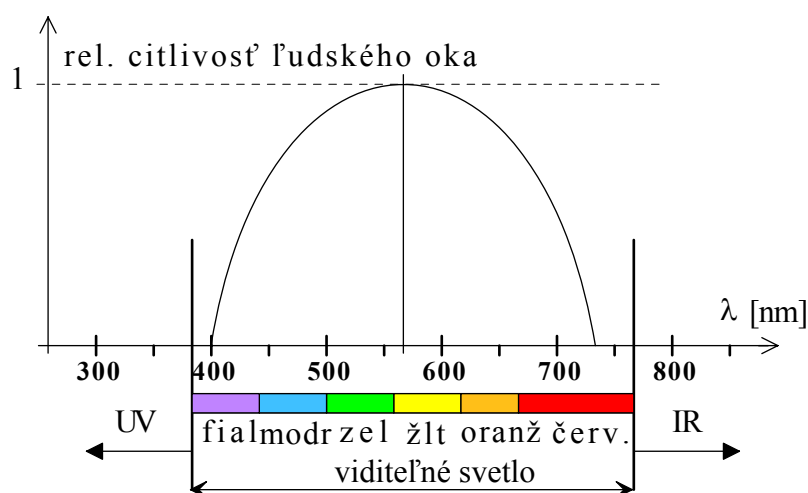
Prehľad veličín je v nasledujúcej tabuľke.

Veličina	Jednotka	Definícia	Rovnica
Svietivosť I	kandela [cd]	svietivosť v smere zdroja, monožiarenie $540 \cdot 10^{12}$ Hz žiariivosť $1/683$ [W/sr]	základná veličina
Svetelný tok Φ	lumen [lm] = cd.sr	bodový zdroj svietivosti 1 cd do uhla 1 steradián	$\Phi = I \cdot \Omega$ Ω - priest. uhol
Intenzita osvetlenia E	lux [lx] = lm/m ²	podiel svetelného toku a plochy, na ktorú dopadá	$E = \Phi / A$ A - plocha
Jas L	[cd/m ²] stará [nit]	podiel svietivosti a zdanlivej plochy (kolmý priemet na primárny tok) v danom smere	$L = I / A$

3.1.2. Spektrálna charakteristika

Charakterizuje žiarenie z hľadiska vlnových dĺžok. Rozdelenie vlnových dĺžok a porovnanie s ľudským okom je na obr. 33. Zatiaľ čo ľudské oko má maximum citlivosti v oblasti žltozelenej (cca 570 nm), väčšina optických systémov pracuje v oblasti IR (infrared - infračervenej). Z vlnovej podstaty vyplýva niekoľko definícií :

- ♦ monochromatické žiarenie - obsahuje jednu, alebo úzku oblasť vlnových dĺžok, vzniká v LED a laserových diódach
- ♦ koherentné žiarenie - všetky elementárne lúče sú navzájom vo fáze, vznikajú v rovnakom čase v rovnakom mieste (lasery), nutná podmienka je monochromatickosť žiarenia
- ♦ polarizované žiarenie (svetlo) - obsahuje kmitanie len v jednej rovine



Obr. 11

IR - Infrared (infračervené) - časté využitie pre senzory (760nm)

UV - Ultraviolet (ultrafialové) - výbojky, špeciálne oblasti (380nm)

Teplota chromatičnosti (farebná teplota)

Fiktívna teplota zdroja svetla v [K] a ovplyvňuje správne farebné podanie pri snímaní kamerou:

sviečka	1900 K
žiarovka (tungsten)	2400 - 3000 K
slnko	5500 - 6000 K
zamrač. obloha	6400 - 7000 K
biele LED	6500 - 8000 K
modrá obloha	13 000 K

Poznámka: Paradoxne sa "teplými farbami" nazývajú tie, ktoré majú nízku farebnú teplotu.

Základné časti optických - fotoelektrických systémov sú :

- ♦ **zdroje svetla** - žiarovky, LED, výbojky, oblúkovky
- ♦ **snímače svetla** - fotodiódy, fototranzistory, fotoodpory
- ♦ **optická cesta** - šošovky, zrkadlá, filtre, clony, štrbiny

3.2. Zdroje svetla

3.2.1. Žiarovky

Sú stále veľmi častým zdrojom svetla. Majú vysokú svietivosť, čo je hlavná výhoda. Ako nevýhodu majú nižšiu životnosť (spoľahlivosť), zahrievanie sa v prevádzke, zmenu parametrov stárnutím. V žiarovkách sa až 80 % výkonu mení na teplo. Účinnosť η je definovaná :

$$\eta = \frac{\text{svetelný výkon}}{\text{elektrický príkon}}$$

a stúpa s teplotou vlákna

So stúpajúcou teplotou vlákna však prudko klesá životnosť vlákna, ktoré sa odparuje a pary sa usadzujú na vnútornej stene banky, čím klesá jej svetelná priepustnosť - svetelný tok žiarovky. Normálne žiarovky sú plnené :

- vákuum (3V / 0,2-0,3A)
- dusík + argón pri zníženom tlaku (klasické 230 V)
- krytón, xenón pri atmosférickom tlaku (prúdy 0,7-0,9A)

Wolfrámové (wolfrám - tungsten) vlákno má teplotu 2900 K , Φ je cca 20 lm/W, úbytok počas životnosti asi 15 %. Striedavá zložka svetla pre 220 V/50 Hz je asi 7 %.

Poznámka: V senzorových systémoch sa potom kvôli životnosti používajú často podžeravené žiarovky.

Kvalitnejšie sú **halogénové žiarovky**, ktoré majú tzv. halogénový regeneračný proces. Banka je vyrobená z kremičitého skla, Wolfrámové vlákno je obklopené plynmi (najlepší Xenón) s halogénovými prímiesami (J, Br, Cl, F). Proces môžeme stručne naznačiť nasledujúcim dejom:

W vlákno ($> 900^{\circ}\text{C}$) \rightarrow odparovanie **W** \rightarrow usadenie na vnútornej stene banky ($250 - 900^{\circ}\text{C}$) \rightarrow zlučiny (**W + halogény**) \rightarrow pohyb zlučín v priestore \rightarrow usadenie na **W vlákne** \rightarrow ak teplota je $> 900^{\circ}\text{C}$ \rightarrow disociácia \rightarrow halogény do priestoru, **W zostáva na vlákne**.

Takto je vlákno periodicky obnovované a možno ho žeraviť až na 3100 K pri životnosti 1000 hodín. Svetelný výkon je cca 22 lm/W. V svetle je väčší podiel UV žiarenia. Teplota vlákna nesmie klesnúť pod 900°C , narušili by ho halogény. Podžeravenie je teda možné max. o 20 % v napätí. Dlhé trubkové žiarovky musia pracovať vo vodorovnej polohe (odchýľka $\pm 4^{\circ}$), inak plyny klesajú dole a neobnovujú vlákno.

Poznámka: Xenónové výbojky (auto) - zdroj žiarenia je výboj v plyne, vyžadujú vysoké napätie - menič

Poznámka: Pri AC zaradená dióda: U na 50%, spotreba na 60%, svet. výkon na 30%.

3-1. 1. Ktoré žiarovky sú výhodnejšie a aké kritériá treba zohľadniť?

- vysokonapäťové, alebo tzv. "normálne", napr. 220 V/ 150 W
- tzv. "nízkovoltové", napr. 24 V/ 150 W

3.2.2. Svetlo emitujúce diódy (LED)

Vyžarujú svetlo z viditeľného P - N prechodu. V - A charakteristika je podobná normálnej dióde, prahové napätie je podľa typu (farby) $1,5 \div 3,5$ V v priepustnom smere. Jas (svietivosť) je úmerný prúdu a je nižší ako u žiaroviek. Životnosť, t.j. pokles svietivosti na polovicu, je okolo $10^5 \div 10^6$ hod (11 \div 114 rokov). Spínacie časy sú krátke ($< 100\text{ns}$), dajú sa použiť i v optoelektronike. Svetlo je monochromatické. V senzorovej technike sú častejšie použité IR diódy (800 - 1000 nm).

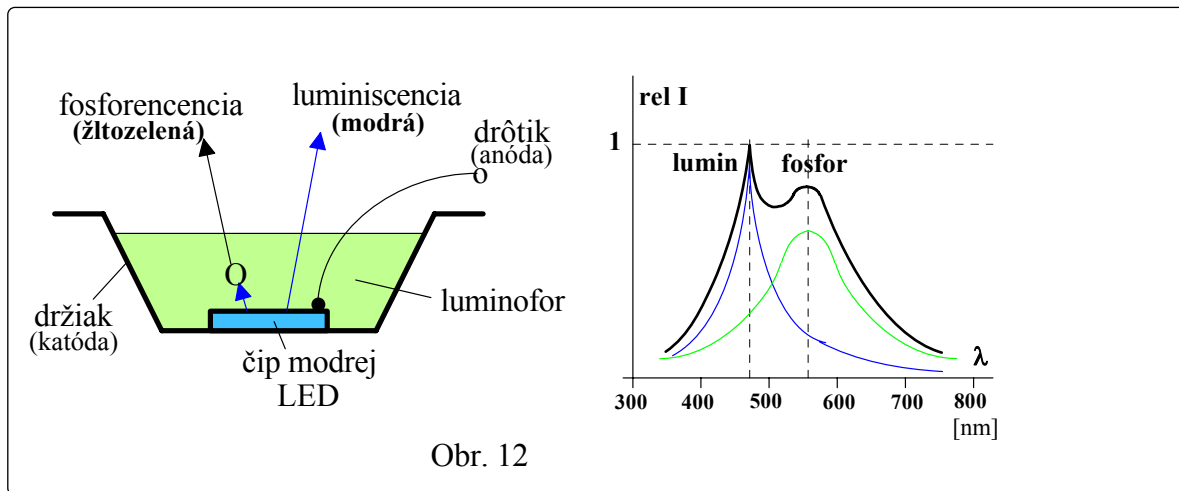
Výbojky a oblúkovky

Patria k vysokovýkonným svetelným zdrojom, vo fotoelektrických systémoch sa nepoužívajú.

Biele LED: - s luminoforom (konverzia žiarenia)
- multiprechodové (multichip) MO + ŽL, RGB

LED s luminoforom - základom je modrá LED ($U_{\text{prah}} 3,0 - 3,6$ V). Jej žiarenie vybudí luminofor, ktorý žiari na svojej vlastnej vlnovej dĺžke. Zložením týchto dvoch žiarení vzniká viac - menej biele svetlo. Luminofor by mal aj účinne opticky odfiltrovať modré svetlo.

LED multiprechodové - využívajú skladanie svetla zo základných farieb (LED diód), čipy sú v tesnej blízkosti. Jednoduchšie je z modrej a žltej, kvalitnejšie z červ. zelenej a modrej (RGB), sú isté problémy pri zmene teploty a starnutí.



Obr. 12

- U_{prah} 3,3-3,6 V.
- Záverný smer - LEN jednotky V !!
- Účinnosť 18-22 lm/W.
- Prúdy :
 - ▶ 20-30 mA pre tzv. malé (140mW)
 - ▶ 350 mA pre 1,2 W (Luxeon).

Existujú už i 3W a 5W diódy, kde sú prúdy patrične vyššie

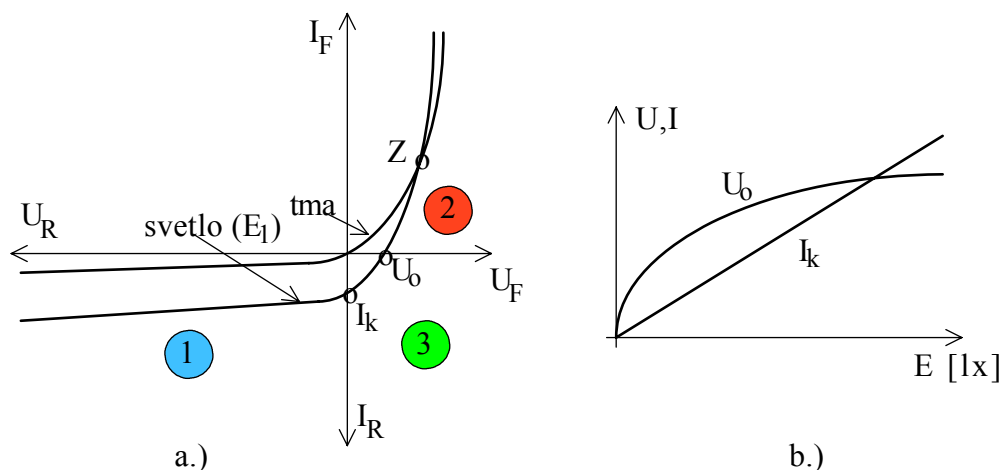
Poznámka: Charakteristika je strmá, treba obmedzenie. Možný je odpor v sérii, regulátor, mäkký zdroj.

3.3. Fotodetektory

3.3.1. Fotodiódy - rýchle, málo citlivé

Sú najrýchlejšie a najmenej citlivé prvky. V - A charakteristiky sú na obr.13a, výstupy pre hradlový režim sú na obr.13b. Obvyklé sú dva režimy práce:

- odporový - pasívny, vyhodnocujeme R, potrebný pomocný zdroj
- hradlový režim - aktívny, dióda je zdroj energie, výstup je U, alebo I



Obr. 13.

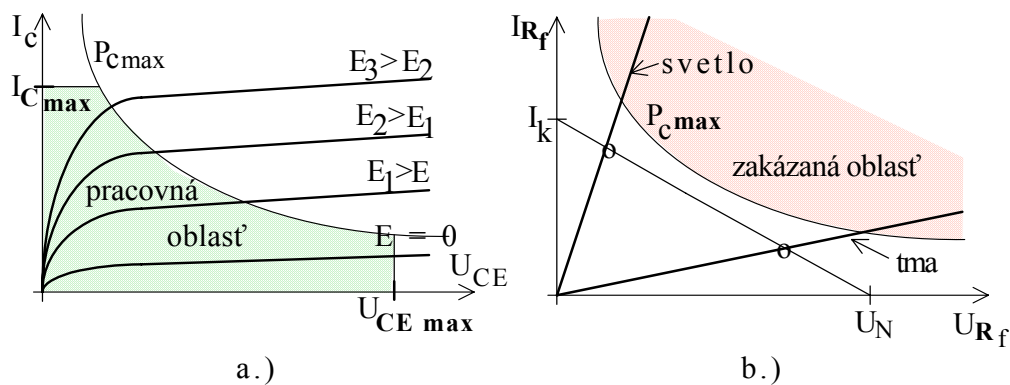
Na charakteristikách obr.13a máme oblasti:

- 1 - odporový režim v závernom smere (rastie $E \rightarrow$ rastie I_R)
 - 2 - odporový režim v priepustnom smere (rastie $E \rightarrow$ klesá I_F)
 - 3 - hradlový režim (U_0 je výst. napätie naprázdno, I_k je výst. prúd nakrátko)
- Z - pracovný bod necitlivý na svetlo

V oblasti 1 je max. citlivosť a minimálna zotrvačnosť. Výstupné charakteristiky U_0 sú približne logaritmické, pre I_k lineárne (obr.13b.), čo je výhodnejšie. Treba však zabezpečiť prácu do nulového (minimálneho) odporu. Použiteľné je zapojenie s OZ, prevodník $I \rightarrow U$. Fotodiódy sú citlivé (najmä kremíkové) skôr v IR oblasti 800 ÷ 900 nm, špeciálne 1000 nm.

3.3.2. Fototranzistory

Sú citlivejšie, ale i zotrvačnejšie ako fotodiódy. Obvykle majú len dva vývody (kolektor a emitor), báza je aktivovaná svetlom, ktoré vstupuje cez miniatúrnu šošovku. Niekedy je vyvedená i báza, potom je možné ovplyvniť elektricky parametre fototranzistora. Výstupné charakteristiky sú na obr. 14a. Parameter je intenzita osvetlenia na báze. Výber prvkov je podľa parametrov U_{CEmax} , I_{Cmax} , P_{Cmax} . V obvodoch pracujú samostatne, alebo spolu s diódami, prípadne v Darlingtonovom zapojení. Hodnotu P_{Cmax} treba dodržať, kritická môže byť pri "polootvorenom" tranzistore. Spektrálne sú citlivejšie opäť skôr v IR oblasti (800 ÷ 1000 nm).



Obr. 14.

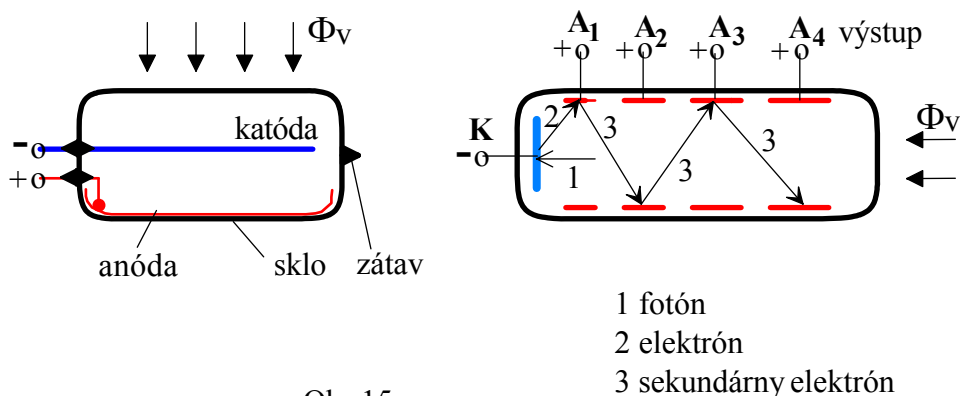
3.3.3. Fotoodpory

Najcitlivejšie, ale súčasne najzotrvačnejšie prvky. Spektrálne sú ladené skôr do viditeľnej oblasti (500 ÷ 600 nm). V - A charakteristiky s naznačením zakázanej výkonovej oblasti sú na obr. 14b. Veličiny U_{Rf} a I_{Rf} sú napätie a prúd fotoodporu. Naznačená priamka reprezentuje obvod, kde v sérii s fotoodporom je zapojený odpor R. Celá sústava je napájaná napätím U_N , pričom $I_k = U_N/R$. Obecne sú časovo a teplotne viac závislé ako fotodiódy a fototranzistory. Ich odpor sa mení v rozsahu cca 100 Ω ÷ 10 M Ω (úplná tma). Menia iba pasívny parameter, t.j. odpor, rovnako pre striedavý a jednosmerný signál. Max. odpor (pre tmu) dosahujú rádovo po [minútach].

3-2. 1. Čo treba dodržať pri vytvorení reťazca zdroj svetla - fotodetektor, resp. aké ich vlastnosti treba zohľadniť ?

3.3.4. Fotónky, fotonásobiče

Sú to vákuové, alebo plynom plnené prvky - elektrónky. Používajú sa na špeciálne účely. Fotonásobič má zatiaľ najvyššiu známu citlivosť zo všetkých prvkov. Spoločná nevýhoda je pomerne vysoké anódové napätie (100 - 300V) a opotrebenie katódy. Princíp je na obr.15.



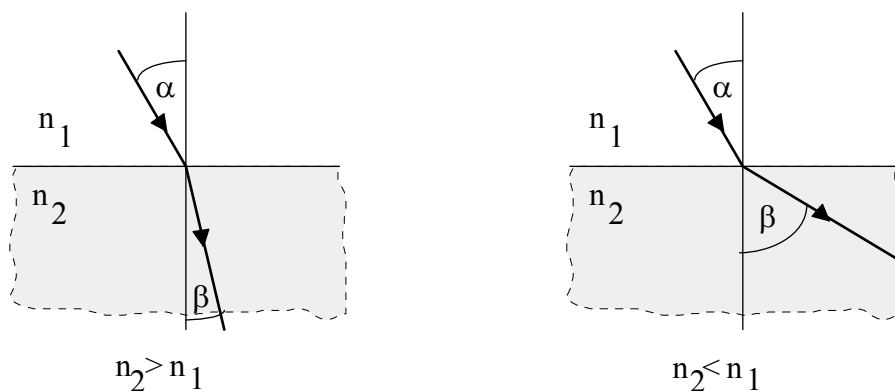
Obr.15

1 fotón
 2 elektrón
 3 sekundárny elektrón

3.4. Optické členy obvodov

3.4.1. Šošovky

Využíva sa princíp lomu lúčov na rozhraní dvoch prostredí. Znázornenie je na obr.16.



Obr.16.

Veličiny n_1 a n_2 sú absolútne indexy lomu.

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad \text{pričom } \mu_r \cong 1$$

Do opticky hustejšieho prostredia sa lúče lámu "ku kolmici" (napr. zo vzduchu do vody), do opticky redšieho prostredia sa lúče lámu "od kolmice". Pri väčšom uhle α lúč vôbec neprenikne do druhého prostredia. Napr. pohľad z vody nad hladinu je kruhovo obmedzený, za ním je odraz späť do vody.

3.4.2. Základné typy šošoviek

- ♦ spojné - využiteľné i samostatne na získanie reálneho obrazu (konvexné)
- ♦ rozptylné - (konkávne) doplnok spojných v zložitejších sústavách (objektív)

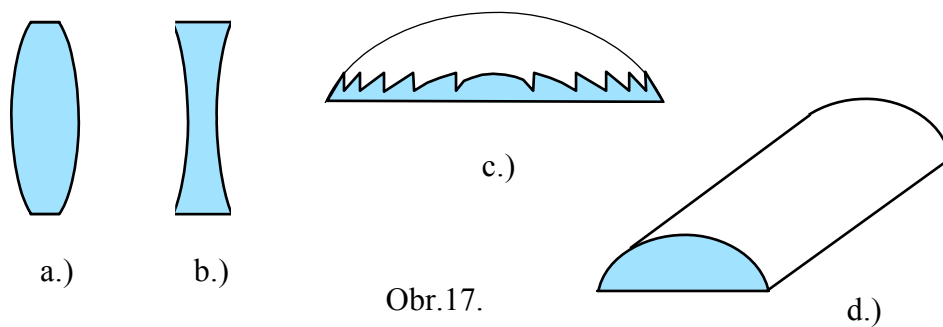
Reálny obraz - dá sa zachytiť na priemetňu, napr. papier, prevrátený

Zdanlivý obraz - nedá sa zachytiť na priemetňu, neprevrátený a zväčšený

Poznámka: Reálny obraz je taký, ktorý sa dá zachytiť na nejakú priemetňu, napr. papier. Oproti originálu je prevrátený a obvykle zmenšený. Zdanlivý obraz je taký, ktorý sa nedá zachytiť na priemetňu, hoci okom ho vidíme. Oproti originálu je neprevrátený a zväčšený - princíp "lupy".

Základné používané tvary šošoviek sú na obr. 17, kde máme :

- a.) spojná šošovka - v strede je hrubšia ako na okrajoch
- b.) rozptylná šošovka - v strede je tenšia ako na okrajoch
- c.) Fresnelova šošovka - spojná šošovka s veľkou plochou
- d.) valcová šošovka - špeciálna spojná šošovka



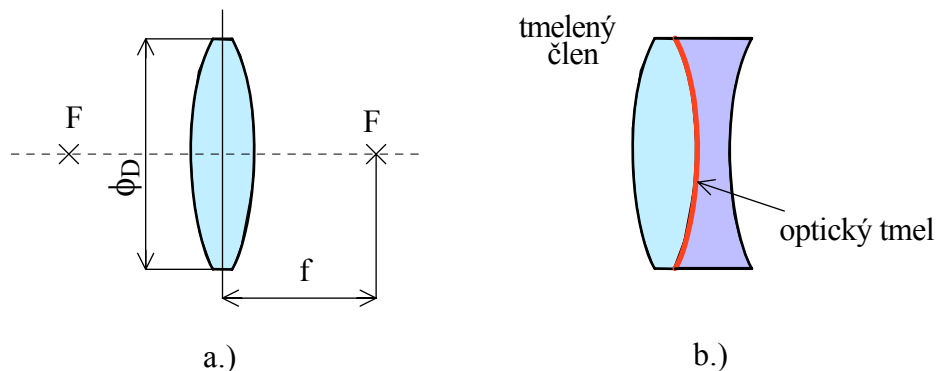
Obr.17.

Spojné i rozptylné šošovky môžu mať rôzny tvar (vypuklosť), musia byť však zachované kritériá hrúbky stred - okraj. Fresnelova šošovka pri veľkých rozmeroch nahrádza klasickú, ktorá by bola veľká a ťažká. Oblúčky sú časťou tvoriacej plochy ekvivalentnej šošovky. Valcová šošovka zobrazí bod ako priamku (v smere pozdĺžnej osi), použiteľné pre malé fotodetektory v snímačoch polohy.

Parametre šošovky sú znázornené na obr. 18a.

Sú to :

- ohnisková vzdialenosť f , udáva sa v [mm].
- priemer šošovky ϕ_D , od čoho závisí relatívny otvor (svetelnosť)



Obr. 18.

Ohnisková vzdialenosť je vzdialenosť ohniska od roviny šošovky. Udáva sa v [mm]. Niekedy sa udáva jej prevrátená hodnota, tzv. *optická mohutnosť* M :

Optická mohutnosť M :

$$M = \frac{1}{f} \quad [D; m;]$$

jednotka je *dioptria* D, pričom:

➤ + D spojná

➤ – D rozptylná

Priemer šošovky ϕ_D ovplyvňuje množstvo prechádzajúceho svetla. V pomere k f sa nazýva relatívny otvor, pri objektívoch svetelnosť s . Je vytvorená normalizovaná rada svetelností :

$$s = \frac{f \text{ [mm]}}{\phi_D \text{ [mm]}} \quad s \geq 1 \quad (1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; \text{ atd.})$$

Hodnoty s sú prakticky väčšie ako 1 a vybrané s z tabuľky majú vlastnosť :

Každý ďalší člen prepúšťa 1/2, alebo dvojnásobok svetla oproti susednému členu.

Jednoduchá šošovka je použiteľná len na nenáročné aplikácie, lebo má značné optické vady. Na ich kompenzáciu sa používajú zložené sústavy v kombinácii s rozptylnými šošovkami. Výsledok má vždy charakter **spojnej šošovky**.

Použitie viacerých šošoviek prináša problémy viacnásobných odrazov od plôch na rozhraní sklo - vzduch. Potlačenie tohoto efektu je možné :

- ♦ použitím tmelených členov obr.18b. kde sa zmenší počet voľných plôch stmelením viacerých šošoviek do jedného celku
- ♦ nanosením antireflexných vrstiev, čo sú pary kovov, na voľné plochy. Kombináciou rôznych druhov sa dá ovplyvniť spektrálna priepustnosť. Niekedy sa značia **MC** (multicoating).

Najznámejšie zložené sústavy sú :

- ♦ kondenzor - sústava 2 až 3 šošoviek, použitie má v svetelných zdrojoch
- ♦ objektív - dobre korigovaná optická sústava (3 ÷ 20 šošoviek), použitie na zobrazovanie (kamery)

Kondenzor vytvára zo zdroja (kvázibodového) svetla rovnobežný zväzok lúčov, použiteľný pre meracie účely.

Objektív sa používa na sústredenie lúčov na fotoelement, alebo na zobrazenie scény na obrazový senzor (CCD). Parametre objektívu sú :

- ohnisková vzdialenosť [mm]
- svetelnosť (max. relatívny otvor) , obvykle z už uvedeného radu

Údaje bývajú na obrube objektívu :

- úplne vypísané, napr. $f = 50 \text{ mm}$, 1 : 2,8
- alebo formou zlomku $2,8/50$ (niekedy $50/2,8$)

Ohnisková vzdialenosť môže byť pevná, alebo premenlivá. Objektív s premenlivou ohniskovou vzdialenosťou sa nazýva ZOOM (transfokátor, varioobjektív). Údaje bývajú formou zlomku, dôležitejší je údaj f , ako násobnosť zoomu. Príklad:

$$24 - 90/2,8 - 3,5 \quad (f \text{ je od } 24 \text{ do } 90 \text{ mm, s pritom klesá od } 2,8 \text{ do } 3,5)$$

Základná vlastnosť objektívu je **korekcia optických väd**. Medzi najznámejšie patria:

- ♦ astigmatizmus (bod sa nezobrazí ako bod, ak je mimo osi)
- ♦ koma (bod je "kométa" mimo osi)
- ♦ aberácia: ➤ chromatická - iné λ , iný lom (farebné lemovanie hrán)
➤ sférická - na guľ. ploche sa lámu lúče na okraji inak ako v strede (neostrosť), spojky a rozptylky majú iné znamienko
- ♦ skreslenia - súdkovité, poduškovité

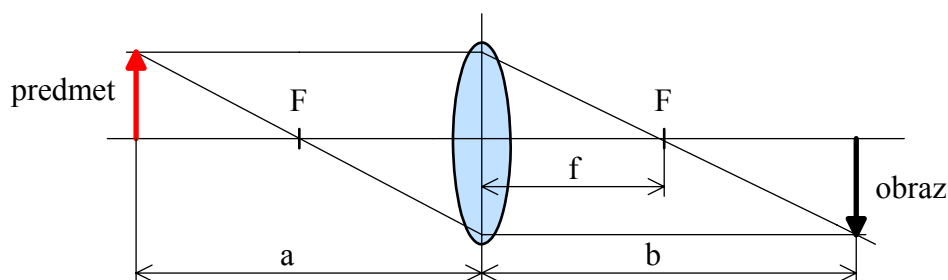
- Korekcie : ➤ kombinácia spojky - rozptylky
 ➤ rôzne typy skla (index lomu)
 ➤ asférické šošovky (neguľové plochy)

Kompletné údaje na obrube :

- výrobca, typ (Minolta Rokkor)
- **f a s**, napr. $f = 50 \text{ mm}$, $1 : 2,8$
- alebo formou zlomku $2,8/50$ (niekedy $50/2,8$)
- zoom a jeho rozsah (reálny, mm), svetelnosť $2,8 - 3,3/6 - 72$
- ASPHERICAL (ASPH skrátené) - obsahuje asférické členy
- IS - image stabilizer (optická stab. obrazu proti rozhýbaniu)
- $\phi 68$ - priemer príslušenstva (fílre)

3.4.3. Optické zobrazenie šošovkou

Pre optické zobrazenie reálneho obrazu, t.j. takého, ktorý sa dá zachytiť na priemetňu, sú použiteľné len spojné šošovky - jednoduché, alebo zložené sústavy. Princíp je na obr.19.



Obr.19.

- f - ohnisková vzdialenosť
 a - predmetová vzdialenosť
 b - obrazová vzdialenosť

Zobrazením získame reálny, prevrátený, zväčšený, alebo zmenšený obraz. Ostro zobrazený bude, ak platí zobrazovacia rovnica :

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

zväčšenie $z = \frac{b}{a}$

Zväčšenie z je obvykle $z < 1$, ale môže byť i $z > 1$. Pre ostré zobrazenie slúži potom **zaostrovací systém**. Keďže a i f sú dané, zaostrenie sa robí zmenou vzdialenosti b . Pre predmet v ∞ je $b = f$, pre všetky ostatné a je b väčšie, teda rovinu šošovky vzdľujeme od priemetne.

3.4.4. Zrkadlá

sa používajú na zmenu smeru lúčov využitím odrazu. Rozoznávame zrkadlá :

- rovinné, menia smer lúčov
- duté - majú reálne ohnisko, lúče sústreďujú doňho (gul'ové, parabolické)
- vypuklé - použiteľné len pre zdanlivý obraz
- polopriepustné - časť lúčov odrážajú, časť prepúšťajú

Optické zrkadlá sú povrchovo pokovené (proti dvojitému odrazu) na sklenej, alebo kovovej podložke (pozor pri čistení), pričom typ kovu odraznej vrstvy ovplyvňuje spektrálnu "priepustnosť". Lacnejšie typy sú z plastu a odrazná vrstva je Al. Podobný problém je pri polopriepustných zrkadlách, lebo tieto sú tvorené parami kovov. Tieto majú navyše problém pri prenose - odraze polarizovaného svetla.

3.4.5. Filtre

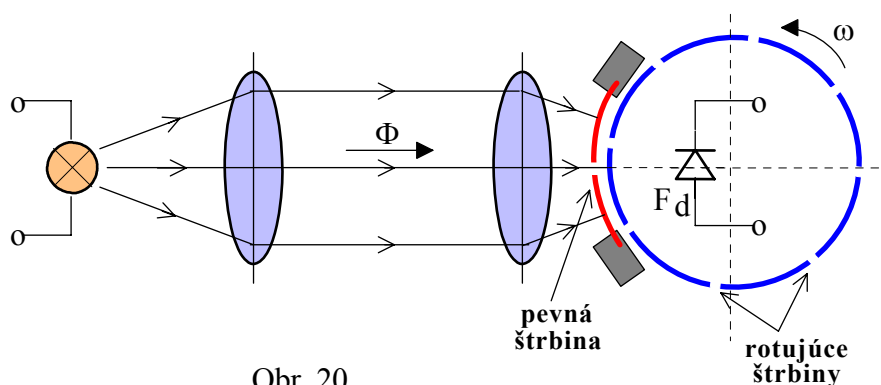
Najčastejšie majú tvar kruhovej dosky s planoparalelnými plochami. Používajú sa na selekciu vlnových dĺžok z daného svetla. Časté sú filtre, prepúšťajúce len IR zložku. Treba mať na pamäti, najmä pri väčších svetelných výkonoch, že zvyšné zadržané spektrum sa vo filtri mení na teplo a pre vyššie výkony musia byť filtre patrične dimenzované (chladenie). Špeciálne sú polarizačné filtre, ktoré majú definovanú rovinu priepustnosti. Táto závisí od obvodového uhla natočenia filtra, pričom filter je kolmo na svetelný tok. Vlastná sklenená časť býva otočne uložená, aby sa daná rovina dala nastaviť.

Poznámka: Filtre sa musia aplikovať v rovnobežnom zväzku lúčov, inak pôsobia ako opt. klin - posúvajú priesečník lúčov.

3.4.6. Ostatné prvky

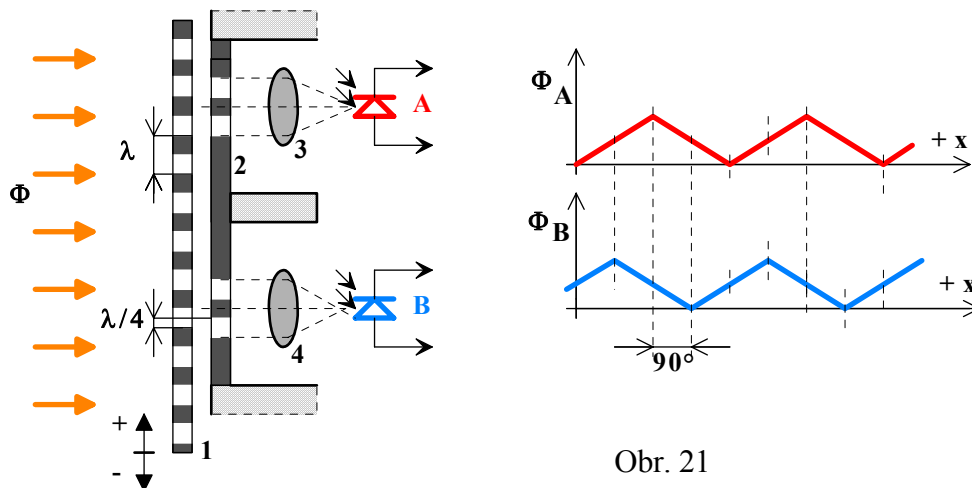
Hranoly (trojboký, pentagonálny), **clony**, **štrbiny**, **tieniace krídelká**, **optické mriežky**, **šedý klin** sú doplnkové členy na ovplyvňovanie svetelného toku.

Príklad na štrbiny, obr. 20



Obr. 20.

Príklad na optické mriežky, obr. 21



Obr. 21

Optické mriežky umožňujú zmenšiť krok pod hodnotu šírky fotodetektora. Na obr.21 sú tzv. dvojité (fázovo posunuté) mriežky, ktoré umožňujú zistiť i smer pohybu. Bližšie v kapitole

4. OPTOELEKTRONIKA

V tejto kapitole sú opísané základné optoelektronické princípy, vlastnosti systémov a ich možné využitia v praxi. Optoelektronika je rozsiahla a veľmi rýchlo sa vyvíjajúca disciplína, preto i táto časť nemôže postihnúť celú problematiku v plnej šírke.

Optoelektronika využíva skôr vlnovú podstatu žiarenia.

Vlnové dĺžky sú v IR oblasti 850 ÷ 1100 nm. Pre vláknovú optiku je to až 1400 nm (ideálne).

Využitie princípov je približne v oblastiach :

- displeje
- vláknová optika : prenos informácií, senzorová technika
- laserová technika - interferenčné merania, holografia, prenos a záznam informácií
- optočleny - oddelenie obvodov
- zobrazovacia technika - PSD, CCD prvky
- spolupráca s inými odbormi - akustooptika

4.1. Zdroje žiarenia

V podstate sa používajú tri typy zdrojov :

- ♦ LED - diódy na menej náročné účely
- ♦ laserová dióda - náročnejšie úlohy, čiastočne monochromatické
- ♦ lasery (plynové) - monochromatické a koherentné svetlo

4.1.1. LED - diódy

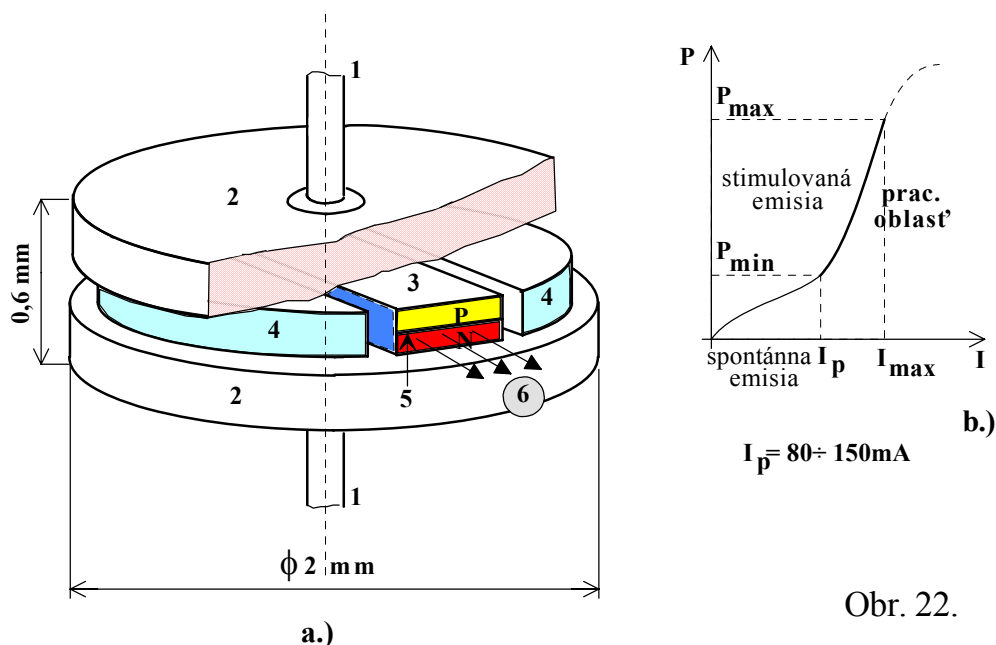
Vlastnosti sú opísané pri fotoelektrických systémoch. Spínacie časy sú krátke < 50 ns. Spektrálne sú ladené od viditeľného do IR žiarenia (až do 1200 nm). Sú to rýchle prvky s menším svetelným výkonom. V sensorovej technike sa používajú takmer výlučne v IR

oblasti. Rozsah pracovných teplôt je $-50 \div +100$ °C. Oblasti použitia sú v optočlenoch, senzorových systémoch, menej náročných optovláknových systémoch a podobne.

- 4-1. 1. Prečo sa využíva najmä IR oblasť žiarenia ?
 2. Môže sa vyskytnúť problém pri prenose signálu v reťazci LED - fotodióda, ak intenzita E na fotodióde dosťahuje ?

4.1.2. Laserové diódy

Sú to akoby silne vybudené LED. Tu potom vyššia dodaná energia vyvoláva stimulovanú emisiu, výsledok je monochromatické, čiastočne koherentné žiarenie, nevhodné ale na interferenčné merania. V konštrukcii je rozdiel oproti LED v dokonalejšom chladení kryštálu. Konštrukcia je na obr.22a. Kryštál polovodiča musí mať rozmery úmerné vlnovej dĺžke emitovaného žiarenia. Materiál kryštálu s jeho rozmermi tvorí tzv. Fabry - Perotov rezonátor. Od tohoto závisí vlnová dĺžka (farba) žiarenia. Steny, neprepúšťajúce svetlo, sú matné. Výkonová charakteristika $P = f(I_{bud})$ je strmá, (obr.22b), je nutná regulácia. Prúd I_{prah} je cca $80 \div 150$ mA. Za touto hodnotou nastáva stimulovaná emisia, čo sú organizované preskoky medzi energetickými hladinami. Napájací prúd diódy musí teda vystúpiť nad túto hodnotu. Účinnosť je niekoľko % pri normálnej teplote, diódy sú vhodné na meracie účely. Pri nízkych teplotách (10 K) je účinnosť cca $30 \div 50$ %. Monochromaticnosť žiarenia je oveľa vyššia ako u obvyčajnej LED, čo umožňuje lepší návrh optiky na získanie úzkeho, nerozbiehavého lúča. Samotný zdroj (kryštál) má max svietivosť v optickej osi. Využitie diód je na získanie intenzívneho úzkeho lúča pre väčšie vzdialenosti, napájanie optovláknových systémov, špeciálne účely.



Obr. 22.

4.1.3. Lasery

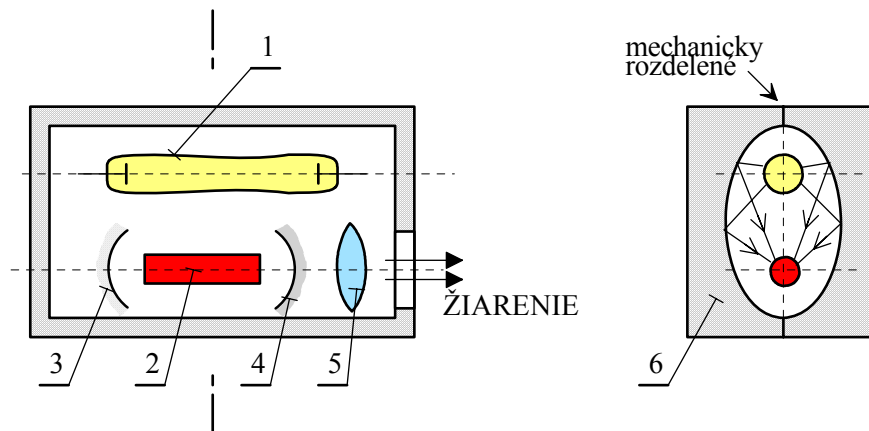
Podľa emitujúcej látky ich delíme na :

- lasery v pevnej fáze - žiarenie produkuje tuhá látka
- kvapalinové - možnosť preladenia
- plynové - menšia účinnosť, vysoká koherentnosť

Lasery pracujú s čerpaním pomocnej energie, najčastejšie svetelnej, zdroje:

- výbojky
- laserové diódy (často IR)

Približná zostava lasera v pevnej fáze je na obr.23



Obr. 23.

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------|
| 1 - výbojka (zdroj svetelnej energie) | 4 - polopriepustné zrkadlo |
| 2 - aktívna (svetlo emitujúca) látka | 5 - šošovka (kolimačná) |
| 3 - odrazné, nepriepustné zrkadlo | 6 - delené eliptické zrkadlo |

Časti (2-3-4) tvoria "optický rezonátor"

Výbojka a aktívna látka sú v ohniskách eliptického zrkadla. Energia výbojky sa odrazmi sústreďuje v druhom ohnisku elipsy a vybudí aktívnu látku - elektróny prejdú na vyššie nestabilné energetické hladiny. Pri preskoku naspäť (z nestabilných hladín) sa vygeneruje žiarenie. Aktívna látka tuhá býva **rubín, neodymové sklo, alebo trubica, plnená plynom**. Obvykle má tvar písmena H, kde sú vlastne dve prepojené trubice s tým istým plynom (CO₂, He, Ne, Ar, He - Ne zmes). Časti 2,3,4 tvoria tzv. optický rezonátor s rozmermi prispôbenými generovanému žiareniu. Najviac sa zosilňujú lúče v osi rezonátora, preto výstupný lúč je úzky a nerozbiehavý. Žiarenie sa zadrží v rezonátore optickou uzávierkou (efekt Kerrov, Pockelsov), kým nenarastie jeho intenzita na požadovanú hodnotu. Potom sa vygeneruje výkonný impulz. Účinnosť premeny energie je do 10 %. Na meracie účely sa používajú väčšinou plynové lasery s vysokou koherentnosťou, napr. He-Ne, Ar, CO₂.

Nevýkonové využitie laserov je pre :

- prenos informácií (optovlákná)
- holografia
- meranie vzdialeností (geometrické, interferenčné)

Poznámka: Koherentnosť, t.j. lúče vo fáze, nie je zaručená pre ľubovoľnú vzdialenosť od zdroja. Zavádza sa pojem "koherenčná dĺžka". Na tejto vzdialenosti (rádovo 1 m), je potom s určitou presnosťou fáza zaručená.

- 4-2. 1. Ako by sa dala pre laserovú diódu regulovať hodnota prúdu do žiadanej oblasti a čo môže byť žiadaná hodnota ?
2. Aká môže byť presnosť merania laserovou interferenčnou metódou, ak ju pokladáme za inkrementálnu a krok je posun o vlnovú dĺžku λ ?

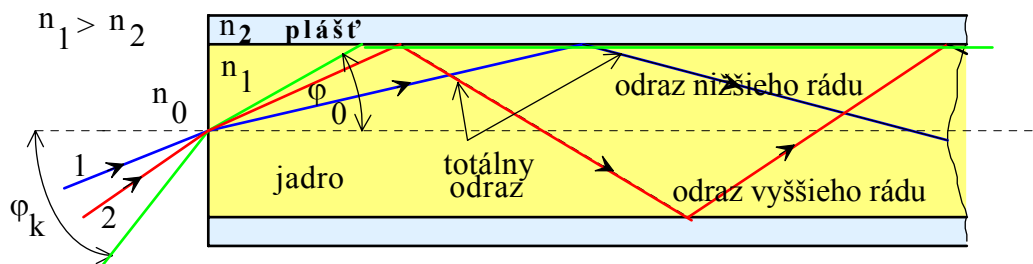
4.2. Vláknová optika

Je to relatívne nový, dynamicky sa rozvíjajúci obor. Zahŕňa obvykle 4 oblasti využitia :

- ♦ prenos obrazov - zväzkom elementárnych svetlovodov
- ♦ prenos analógových signálov - náročný, málo používaný
- ♦ prenos číslicových signálov - najčastejšia aplikácia
- ♦ optovláknové senzory

4.2.1. Elementárny svetlovod

Je základom vláknovej optiky, princíp je na obr.24. Je tu využitý princíp **absolútneho odrazu od rozhrania dvoch prostredí**. Predpokladáme rozhranie dvoch materiálov s rôznymi indexami lomu n_1, n_2 . Pri dopade lúča na rozhranie, kde nie je využitý princíp odrazu od reflexnej plochy, sú možné tri situácie. Predpokladáme, že uhol dopadu je medzi lúčom a kolmicou na rozhranie a lúč postupuje z prostredia n_1 . Ak tento uhol je malý, lúč prechádza do druhého prostredia n_2 . Ak je uhol väčší ako kritický, nastáva totálny odraz. Pri kritickom uhle lúč prechádza po rozhraní.



Obr. 24

Na obr.24 je kritický uhol dopadu pretransformovaný na kritický vstupný uhol (medzi osou a lúčom) φ_k . Tieto typy lúčov teda prechádzajú priamo rozhraním, resp. paralelne s ním. Ak $\varphi_{\text{lúča}} > \varphi_k$, potom nenastáva odraz a lúč opúšťa svetlovod. Totálny odraz platí iba pre uhly vstupu $\varphi_{\text{lúča}} < \varphi_k$. Uprednostňujeme odrazy nižšieho rádu, (lúč 1) lebo majú kratšiu cestu cez svetlovod. Znamená to menší uhol vstupu do svetlovodu, ideálne sú lúče v optickej osi, ale sú tu technologické problémy s nasmerovaním lúča. Hodnota φ_k je okolo $10 \div 12^\circ$ pre multimódne vlákna. Pri šírení svetelného impulzu cez vlákno dorazia najskôr osové lúče, s oneskorením prichádzajú jednotlivé (odrazené) rády. Dochádza k rozšíreniu výstupného

impulzu s menlivou amplitúdou. Ďalší impulz sa dá preniesť až po odznení predošlého. Možnosti sú nasledovné :

- väčší pomer $n_2 : n_1$ znamená viac vidov (rádov) - mnohovidové vlákna, resp. multimódové vlákna
- menší pomer $n_2 : n_1$ - jednovidové vlákna

Multimódové (mnohovidové) vlákna môžu mať skokovú zmenu $n_2 : n_1$, alebo plynulú zmenu indexu lomu, tzv. gradientné (selfock - samozaostrovacie). Priemer jadra je $> 10 \mu\text{m}$ a majú menšiu kapacitu prenosu kvôli rozširovaniu výstupných impulzov.

Jednovidové (monomódové) vlákna majú menší priemer jadra ($1 \div 5 \mu\text{m}$), prenášajú odrazy nižšieho rádu, ale sú problémy s presným navedením svetla do svetlovodu - straty. Zatiaľ sú menej používané.

Ak je využitý totálny odraz, lúč nemôže opustiť svetlovod a z obklopujúceho prostredia nemôže do svetlovodu lúč vstúpiť tak, aby ním prešiel na koniec. Pri zakrivení svetlovodu, ak platí $R > 20r$ (R je polomer zakrivenia, r je polomer vlákna) nenastáva zmena prechodu lúčov oproti priamemu svetlovodu. V praxi, ak je $r = 20 \mu\text{m}$, R je $0,4 \text{ mm}$, čo je nedosiahnuteľné kvôli mechanickým vlastnostiam.

Straty pozostávajú z viacerých zložiek a udávajú sa súhrnne v dB/km. V súčasnosti sú pod 1dB/km (0,3 dB/km).

Pracovné vlnové dĺžky sú zatiaľ okolo $1 \mu\text{m}$, perspektívne oblasti (min. straty) okolo $1,2 \mu\text{m}$ a $1,5 \div 1,6 \mu\text{m}$.

4.2.2. Príslušenstvo a vlastnosti prenosu

Použitie optovláken je zložitejšie ako "drôtených vodičov". Už i taká jednoduchá operácia, ako je spojenie dvoch kovových vodičov (skrútením, spájkovaním), je tu komplikovaná. Treba použiť špeciálne konektory, alebo špeciálne technológie pre nerozoberateľné spojenie. Komplikované sú tiež prepínače, viacpólové konektory, odbočenie signálu, atď.. Existuje špeciálne príslušenstvo pre rôzne aplikácie. Sú to výrobky jemnej mechaniky s vysokou presnosťou a teda i vyššou cenou ako klasické drôtové spoje. Nutné je samozrejme odborné zaškolenie a určitá prax - zručnosť pri používaní týchto pomôcok.

Prenos cez optovláka je charakterizovaný:

- svetlovod nevyžaruje, ani neprijíma signály do/z okolia
- prenos nie je náchylný na rušenia z okolia
- prenos je striktné jednosmerný, t.j. len od vysielača k prijímaču
- nastáva úplné galvanické oddelenie vysielača a prijímača
- nastáva oddelenie potenciálov (i ako bezpečnostné)

4.3. Snímače svetelného žiarenia

V optoelektronike sa musia používať rýchlejšie fotodetektory, a to :

- ▶ fototranzistory
- ▶ fotodiódy

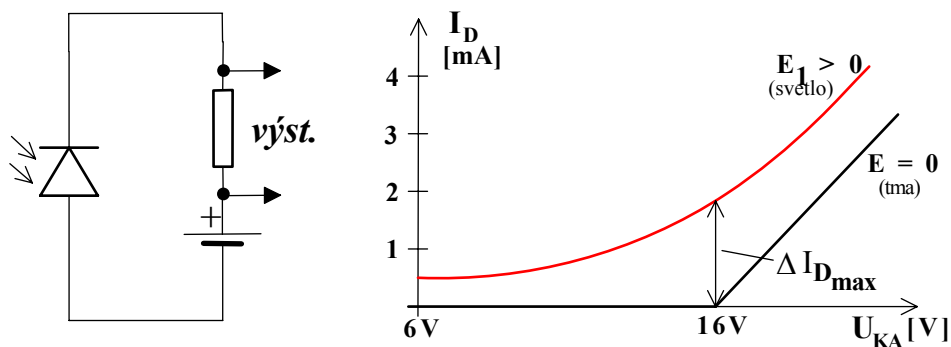
Fototranzistory sú použiteľné skôr pre nenáročné účely, napr. v optočlenoch.

Fotodiódy sú menej citlivé, ale rýchlejšie prvky.

Podľa technológie a použitia poznáme fotodiódy :

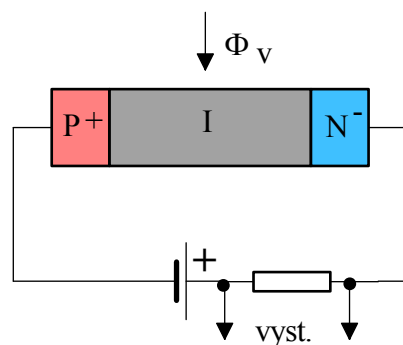
- normálna (názov len *fotodióda*): opis vo fotoelektr. systémoch, sú vhodné pre rýchlostne nenáročné aplikácie
- **lavínová fotodióda** sa používa v závernom smere, kde sa otvára svetlom. Dej nazývaný *lavínový prieraz* je veľmi rýchly [ps], vratný a dosahuje sa vysoká citlivosť. Dióda pracuje spojitě a pracovný bod sa nastavuje (napätím) do oblasti max. citlivosti (obr.25)
- **PIN fotodióda**, má medzi P a N zónami vrstvu odporovú I. Svetelný tok Φ_v v I vrstve vytvorí nosiče náboja, ktoré spôsobia vodivosť medzi P a N, pričom dej je rýchly, rýchlosť závisí od technológie - šírky vrstvy I. Medzná f je cca 1 GHz, dióda je schopná snímať i krátke [ns] laserové impulzy. Princíp je na obr.26

Posledné dve diódy sa hlavne používajú pre rýchle optoelektronické aplikácie a ich spoločný znak je malá vstupná plocha pre svetelný tok (okienko ϕ 40 μ m), svetlo treba presne nasmerovať.



Obr. 25

PIN fotodióda - štruktúra a zapojenie



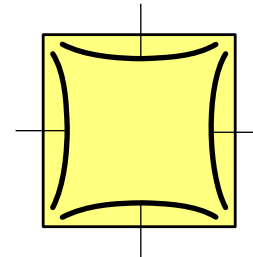
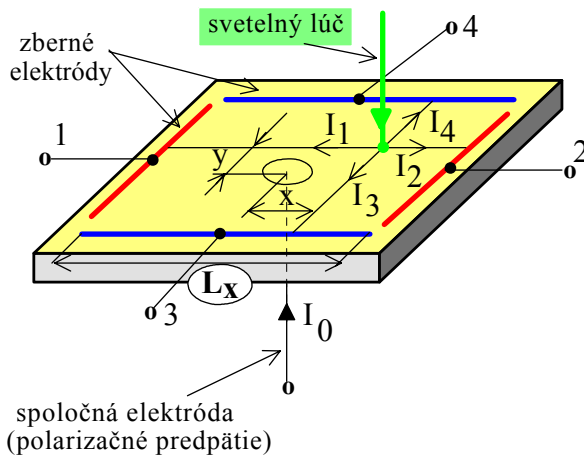
Obr. 26

4.3.1. Snímače pre špeciálne účely

PSD prvky (Position Sensitive Device) Sú to prvky využívajúce tzv *laterálny fotojav*. (laterálny - priečny, bočný)

Podľa typu a možností snímania môžu byť:

- lineárne - pre jednu súradnicu
- plošné - pre dve súradnice.



Obr. 27

Poznámka: PSD prvky vyhodnocujú **polohu** dopadu lúča na plochu elementu. Neposkytujú informáciu o **intenzite** daného lúča. Tým sa líšia od CCD prvkov.

Princíp plošného prvku je na obr. 27. Lineárny prvok by mal len dve zberné elektródy. Plošný prvok má 4 zberné elektródy a jednu spoločnú elektródu na vytvorenie predpätia. V pravej časti obrázku je príklad skutočnej geometrie elektród kvôli lepšej linearite systému. Vyhodnocované prúdy sú pomerne malé, čo kladie nároky na vyhodnocovací obvod.

Z miesta dopadu lúča tečú 4 prúdy k zberným elektródam. Vyhodnotenie súradníc je podľa vzťahov :

$$x = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \frac{L_x}{2} \qquad y = \frac{I_4 - I_3}{I_3 + I_4} \frac{L_x}{2}$$

Príklad parametrov :

- ♦ rozmery aktívnej plochy 30 x 30 mm
- ♦ výstupný prúd $I_0 = 1 \mu\text{A} !!$ (cez spoločnú elektródu)
- ♦ rozlíšenie 12 μm , chyba $\pm 0,9 \%$

- 4-3. 1. Ako sa dá výhodne nasmerovať žiarenie do malej vstupnej plochy lavínovej a PIN fotodiódy ?
2. Ako sa prejaví zmena intenzity E dopadajúceho lúča na PSD prvok ?

CCD prvky (Charge Coupled Device)