

## ZDROJE OPTICKÉHO ŽIARENIA

Pre optické komunikačné systémy zo všeobecného hľadiska možno ako zdroj svetla (žiarenia) použiť jeden z týchto troch typov:

- širokopásmový zdroj svetla so „spojitým spektrom“ (žiarovky, výbojky a pod.),
- úzkopásmový (čiastočne monochromatický) nekoherentný zdroj svetla (LED),
- monochromatický koherentný zdroj svetla (plynový, polovodičový, tuholátkový, farbivový či chemický laser).

Zdroje svetla (žiarenia) možno charakterizovať štyrmi množinami vlastností:

### 1. Geometrické vlastnosti emitovaného svetla

Dosah optického vláknového spoja závisí od použitej vlnovej dĺžky svetla (čo určuje tlmenie OV) a od optického výkonu naviazaného do OV (presnejšie od plochy svetlovodivej oblasti OV) a od vstupnej numerickej apertúry OV. Veličina, ktorá určuje veľkosť naviazaného optického výkonu zdroja svetla, je výkon vyžiarený na jednotku plochy a na jednotku priestorového uhla. Táto veličina je známa ako jas (alebo žiara) zdroja svetla (žiarenia). Pre vysokú účinnosť naviazania optického výkonu do OV sú potrebné zdroje svetla s vysokým jasom. V tab. sú požadované jasové parametre zdrojov svetla pre naviazanie optického výkonu 1mW do rôznych typov OV. Tabuľka poukazuje na ťažkosti naviazania svetla do OV a na nutnosť dodržania kompatibility medzi jasom zdroja svetla a typom OV.

POŽADOVANÝ JAS ZDROJOV SVETLA PRE RÔZNE TYPY OV

Typ OV	NA	Plocha jadra ( $\text{cm}^2 \cdot 10^{-8}$ )	Plocha x priestorový uhol ( $\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot 10^{-8}$ )	Jas zdroja na mW ( $\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ )
Jednovidové	0,15	50	0,28	$3,6 \cdot 10^5$
Mnohovidové	0,2	1960	19,6	$5 \cdot 10^3$
PCS (jadro 250 $\mu\text{m}$ )	0,5	$4,9 \cdot 10^4$	3070	33
Zväzok OV	0,5	$7,8 \cdot 10^5$	50000	2

### 2. Spektrálne vlastnosti emitovaného svetla

Presný opis spektrálnych vlastností zdroja svetla nie je jednoduchý. Princiálne je možné určiť strednú vlnovú dĺžku  $\lambda$  a spektrálnu šírku emitovaného svetla  $\delta\lambda$  (tzv. šírku spektra). Treba si však uvedomiť, že často má emitované svetlo aj v rámci týchto charakteristík jemnejšiu vnútornú spektrálnu štruktúru. Zvlášť pre laserové zdroje toto ovplyvňuje vlastnosti celého komunikačného systému. V optickom spektre musíme vždy uvažovať určitú úroveň

šumu, ktorá rozhodujúcim spôsobom vplyva na vlastnosti celého komunikačného systému. Minimálna úroveň šumu je určená kvantovým (výstrelovým) šumom, ktorý je dôsledkom korpuskulárnej (fotónovej) podstaty svetla. Ak určitý zdroj svetla v danom časovom intervale emituje  $N$  fotónov, potom variácia skutočného počtu fotónov v tomto časovom intervale je  $\sqrt{N}$ . Táto variácia je ekvivalentná šumovej zložke amplitúdy prenášaného signálu. Ak energia fotónu je  $\hbar\omega$  a prenášaný optický výkon  $P$ , potom počet fotónov je  $P/\hbar\omega$  a kvantový šum možno jednoducho vypočítať. Pre väčšinu zdrojov svetla je však úroveň šumu vyššia ako úroveň kvantového šumu. Toto vzniká z viacerých príčin. Často samotný budiaci elektrický zdroj je zašumený a tento šum sa elektricko-optickou konverziou prenáša do optickej oblasti. Zvlášť v laseroch sa vyskytujú rôzne rezonančné javy, ktoré sú zdrojom dodatočných šumov. Sú to napr. plazmový šum v He-Ne (alebo v iných plynových laseroch), samopulzácia v polovodičových laseroch. Vyskytujú sa tiež nehomogenity v aktívnej látke a fluktuácie optickej (fázovej) dĺžky rezonátora laserov. Tieto spôsobujú vznik fázového alebo frekvenčného šumu a tiež malého amplitúdového šumu. Je paradoxné, že mnohé nekoherentné zdroje svetla (napr. LED) majú úroveň šumu, ktorá je veľmi blízka kvantovému šumu. Toto je možné vysvetliť tým, že v týchto zdrojoch svetla nie je na generáciu svetla využitá spätnoväzobná slučka a teda nevznikajú rôzne šumové javy v dôsledku frekvenčnej závislosti a nelineárnych procesov v tejto spätnoväzobnej slučke.

Ďalším dôležitým systémovým parametrom zdroja svetla je koherencia. Obyčajne hovoríme o priestorovej a časovej koherencii. Priestorovú koherenciu možno jednoducho chápať ako mieru toho, ako sa zdroj svetla blíži k bodovému zdroju (napr. ako sa emitovaná vlna blíži k jedinému priestorovému vidu). Podobne časová koherencia je vyjadrením podobných analógií vo frekvenčnej oblasti, t.j. ako sa zdroj svetla blíži k jednofrekvenčnému oscilátoru (resp. ako sa emitovaná vlna blíži k jedinému časovému vidu). Koherentné vlastnosti zdrojov svetla sú dôležité v systémoch spracovania signálov, v interferometrických senzorových systémoch a pod. OV možno chápať ako prenosové médium s viacerými prenosovými cestami (zvlášť pri mnohovidovom šírení svetla), potom koherentné vlastnosti zdrojov svetla spôsobujú vznik interferenčných javov, vidového šumu a pod.

### 3. Elektro-optické prenosové charakteristiky

Väčšina zdrojov svetla pracuje s elektrickým budením. Elektrické budenie spôsobí v prvom priblížení generáciu svetla. Vzniká však aj celý rad sekundárnych javov. Z nich najdôležitejší je vzrast teploty zdroja svetla, ktorého dôsledkom je zmena vlastností generovaného svetla (zmena optickej frekvencie, výstupnej intenzity, spektrálneho rozloženia,

šumových vlastností a pod.). Dôležitou vlastnosťou (najmä z hľadiska modulácie) je linearita zdroja svetla, t.j. linearita vzťahu medzi úrovňou emitovaného svetla a aplikovaným elektrickým budením.

#### 4. Vplyv okolitého prostredia

Okolité prostredie, teplota, tlak, žiarenie a pod. vplýva na zdroje svetla. Väčšina zdrojov svetla (okrem polovodičových zdrojov svetla) má relatívne veľmi malú životnosť, ktorá je rádovo niekoľko tisíc hodín. Existuje málo preskúmané postupné zhoršovanie vlastností zdrojov svetla, silná teplotná závislosť rôznych parametrov. Preto sa v praxi často predpisuje periodická výmena zdrojov svetla.

Nároky na vlastnosti zdroja svetla sú určené požiadavkami na úroveň prenosovej charakteristiky celého optického komunikačného systému. Na zdroje optických vláknových komunikačných systémov (OVKS) kladieme tieto hlavné požiadavky:

- Čo najväčšia účinnosť konverzie elektrickej energie na optickú (svetelnú) energiu ( $\sim 10\%$ ), výstupný optický výkon  $> \text{mW}$ .
- Malé rozmery a hmotnosť.
- Jednoduchá modulovateľnosť v širokom rozsahu (až stovky MHz), a to buď priama, alebo vonkajšia.
- Vysoká monochromaticnosť (malá šírka spektra), resp. koherencia generovaného svetla.
- Generácia svetla v oblasti takých vlnových dĺžok, kde je tlmenie OV najmenšie ( $\sim 0,85\mu\text{m}$ ,  $\sim 1,3\mu\text{m}$  a  $\sim 1,5\mu\text{m}$ ).
- Čo najužšia smerová charakteristika vystupujúceho svetelného lúča.
- Jednoduché naviazanie generovaného svetla do OV, väzbových prvkov, resp. vonkajších modulátorov.
- Teplotná stabilita parametrov zdroja svetla
- Vysoká spoľahlivosť (pre priemyslové aplikácie sa vyžaduje čas života  $10^5$  až  $10^6$  hod.).
- Nízka cena.

Týmto požiadavkám najlepšie vyhovujú polovodičové lasery (LD), svetloemitujúce diódy (LED) a tuholátkové lasery Nd : YAG, resp. Nd: sklo čerpané pomocou LED.

Hoci súčasné LED a LD využívajú vlastnosti dvojitej heteroštruktúry rôznych polovodičových materiálov  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  (AlGaAs, InGaAsP, InGaAsSb), ich parametre sa podstatne líšia. Nekoherentné LED sú vo všeobecnosti menej účinné ako injekčné LD, majú

širšiu vyžarovaciu charakteristiku, čo sa prejavuje aj pri účinnosti naviazania na OV. Účinnosť naviazania LD je rádovo vyššia, zvlášť pri použití nízkostratových gradientných OV (priemer jadra  $\sim 50\mu\text{m} \Rightarrow \text{NA} \sim 0,2$ ). Potom napríklad pri rovnakom elektrickom vstupnom výkone ( $\sim 200\text{mW}$ ) je LED schopná do tohto OV dodať optický výkon  $300\mu\text{W}$  a LD až  $3\text{mW}$ . Pritom celkový emitovaný optický výkon pre LED je  $\sim 7\text{mW}$  a pre LD  $\sim 10\text{mW}$ . Účinnosť naviazania LD je teda lepšia 7x. Zmenou zloženia základného materiálu LD a LED možno v istých medziach prispôbovať vlnovú dĺžku emitovaného svetla spektrálnemu priebehu tlmenia použitého OV. Ďalším dôležitým parametrom zdrojov svetla je odozva na impulzný signál (nábeh a dobeh optického impulzu a linearita prevodovej charakteristiky) a závislosť optického výkonu od budiaceho prúdu. Optické impulzy LED majú menej strmé čelo a tylo ako LD, väčšinou 3 až 15ns, LD sú podstatne rýchlejšie ( $\sim 200\text{ps}$ ), pokiaľ pracujú s trvalým jednosmerným prúdom udržiavajúcim režim práce LD tesne nad prahovou hodnotou. LED je preto možné modulovať maximálne do 200MHz a LD až niekoľko GHz. Linearita prevodovej charakteristiky, vyjadrená ako percento výkonu druhej harmonickej demodulovaného svetla, je asi 40dB pre LD aj LED. LD vzhľadom na silnú teplotnú a výkonovú závislosť prahového prúdu vyžadujú zložitejšie napájacie a modulačné obvody ako LED. Pre LD použité na analógovú moduláciu v pásme nad 200MHz sa vyžaduje skreslenie druhou harmonicou pod 50dB. Túto hodnotu možno dosiahnuť len pre jednovidové LD.

ZDROJE SVETLA PRE OPTICKÉ VLÁKNOVÉ KOMUNIKAČNÉ SYSTÉMY

Vlnová dĺžka ( $\mu\text{m}$ )	0,85		1,05	1 až 1,7	
Zdroje svetla	LED AlGaAs	LD AlGaAs	YAG : Nd <sup>3+</sup>	LED InGaAsP	LD alebo InGaAsSb
Čerpanie	El. prúd	El. prúd	Opticky (LED)	El. prúd	
Vlnová dĺžka generovaného svetla ( $\mu\text{m}$ )	0,75 až 0,9	0,75 až 0,9	1,06	0,9 až 1,6	
Šírka spektra (nm)	35	3 až 0,1	< 0,1	55	3
Výstupný výkon (mW)	1	10	10	1	1 až 10
Účinnosť	niekoľko %	niekoľko %	< 1 %	niekoľko %	
Účinnosť naviazania	niekoľko %	50 %	100 %	$\sim 5$ %	50 %
Modulácia	priama	priama	vonkajšia	priama	
Modulačná rýchlosť (Gbit s <sup>-1</sup> )	0,2	$\sim 0,5$	1 až 3	0,1	100

## PRÍKLADY

**Príklad 1** Pre elektroluminiscenčný zdroj na báze GaSb vypočítajte potrebnú koncentráciu dier v P oblasti, aby žiarivý čas života bol 1ns. Rekombinančný koeficient pre GaSb je  $2,39 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ .

$$\left( \tau_r = \frac{1}{B_p n}, n = 4,1841 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3} \right)$$

**Príklad 2** Polovodičový GaAs laser má optický rezonátor s dĺžkou  $250 \mu\text{m}$  a šírkou  $100 \mu\text{m}$ . Pri prevádzkovej pracovnej teplote je faktor  $A = 21 \cdot 10^{-3} \text{ A}^{-1} \text{ cm}$  a koeficient strát  $\alpha_0 = 10 \text{ cm}^{-1}$ . Vypočítajte prahovú hustotu prúdu a potom prahový prúd pre tento laser, ak predpokladáte, že zrkadlá nie sú pokryté protiodraznou vrstvou a prúd je vstrekaný do optického rezonátora. Index lomu GaAs je 3,6.

$$\left( r_1 = r_2 = r = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2; J_p = \frac{1}{A} \left[ \alpha_0 + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_1 r_2} \right] = \frac{1}{A} \left[ \alpha_0 + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{(r)^2} \right] = 2,6465 \cdot 10^3 \text{ A cm}^{-2}; \right.$$

$$\left. I_p = J_p \cdot S = J_p \cdot L \cdot d = 661,63535 \text{ mA} \right)$$

**Príklad 3** Odrazivosť zrkadiel  $350 \mu\text{m}$  dlhého optického rezonátora polovodičového lasera je  $0,5 \text{ A cm}^{-2}$  a faktor  $A = 22 \cdot 10^{-3} \text{ cm A}^{-1}$ . Vypočítajte koeficient strát optického rezonátora.

$$\left( \alpha_0 = A J_p - \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_1 r_2} = 27,943855 \text{ cm}^{-1} \right)$$

**Príklad 4** Injekčný polovodičový GaAs laser s dĺžkou optického rezonátora  $500 \mu\text{m}$  má koeficient strát optického rezonátora  $\alpha_0 = 20 \text{ cm}^{-1}$ . Meraná vonkajšia diferenciálna kvantová účinnosť prvku je 45%. Vypočítajte vnútornú kvantovú účinnosť lasera, ak poznáte, že index lomu GaAs je 3,6.

$$\left( \eta_i = \eta_D \left[ 1 + \frac{2\alpha_0 L}{\ln \frac{1}{r_1 r_2}} \right] = \eta_D \left[ 1 + \frac{\alpha_0 L}{\ln \frac{1}{(r)^2}} \right] = 84,42\% \right)$$