

Diode electroluminiscente (LED)

Diagrama de benzi energetice

Să ne amintim că materialele sunt formate din atomi, iar în interiorul acestora se află electroni care se învârt pe orbite staționare în jurul unui nucleu. Fiecare orbită corespunde unei anumite valori pentru energia electronului, ceea ce înseamnă că un atom posedă doar nivele discrete de energie, ca în fig.&.1.

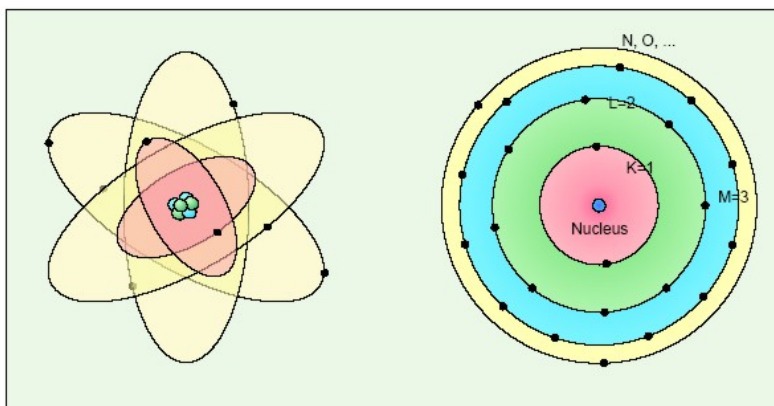


Fig.&.1

Semiconductorii sunt materiale ce constau din atomi strâns legați între ei în cadrul unei rețele cristaline. În fiecare atom există mulți electroni, dar proprietățile semiconductorului sunt date doar de electronii care se află în atomi pe cele mai exterioare orbite. Nivele energetice posibile sunt tot discrete dar sunt atât de apropiate între ele încât sunt reprezentate sub formă de benzi de energie în loc de o mulțime de nivele separate. Aceste benzi sunt privite ca niște regiuni continue de energie, dar dacă am avea o lupă specială ca să privim în interiorul lor, am putea vedea nivelele discrete care le compun, fig.&.2a.

În semiconductori se disting două benzi energetice: banda de valență (de energii joase) și banda de conducție (de energii mai mari). Ele sunt separate printr-o bandă interzisă, E_g , în care nu există nici un nivel energetic permis (adică nu poate exista nici un electron). Prin urmare electronii pot fi ori în banda de valență, ori în banda de conducție, dar nu pot fi între ele.

Dacă temperatura este zero absolut și nu este aplicat nici un câmp electric exterior, toți electronii sunt concentrați în banda de valență și nu se află nici un electron în banda de conducție. Aceasta deoarece nici un electron nu posedă suficientă energie suplimentară ca să sară peste banda interzisă. Dacă este furnizată electronilor din banda de valență energie din exterior - fie prin temperatură, fie printr-un câmp electric extern - atunci unii dintre ei vor primi suficientă energie pentru a sări peste banda interzisă și vor ocupa nivele energetice în banda de conducție. Spunem ca acești electroni sunt "excitați". Acești electroni excitați lasă goluri (echivalent cu sarcini electrice pozitive) în banda de valență, ca în fig. &.2b.

FOTOEMIȚĂTOARE

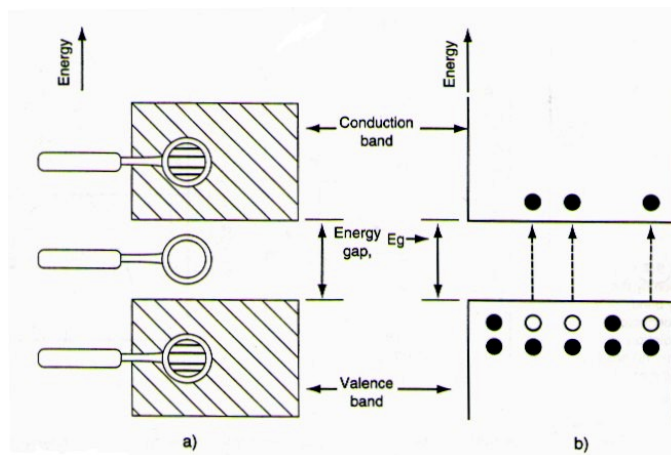


Fig.&.2

Radiația luminoasă și banzile de energie

Cînd un electron cade de pe un nivel energetic superior pe unul inferior, el eliberează o cantă de energie numită foton. Relația dintre variația de energie, ΔE , energia fotonului, E_p și lungimea de undă este:

$$\Delta E = E_p = hc/\lambda \quad (\&.1)$$

Această idee se păstrază și pentru un semiconductor. Dacă un electron excitat cade din banda de conducție în banda de valență, este eliberat un foton a cărui energie, E_p , este mai mare sau egală cu banda interzisă, E_g . Deoarece la procesul de radiație pot participa mai multe nivele energetice din banda de conducție și banda de valență, lungimile de undă radiate λ_i pot fi multiple. Prin urmare putem scrie $E_p \geq E_g$, sau sub o altă formă $\lambda_i \leq hc/E_g$ (dacă E_g este măsurat în eV și λ în nm, atunci $\lambda_i \leq 1248/E_g$). Rezultatul acestei radiații multivalente este un spectru larg, $\Delta\lambda$, a luminii emise de un semiconductor, fig.&.3.

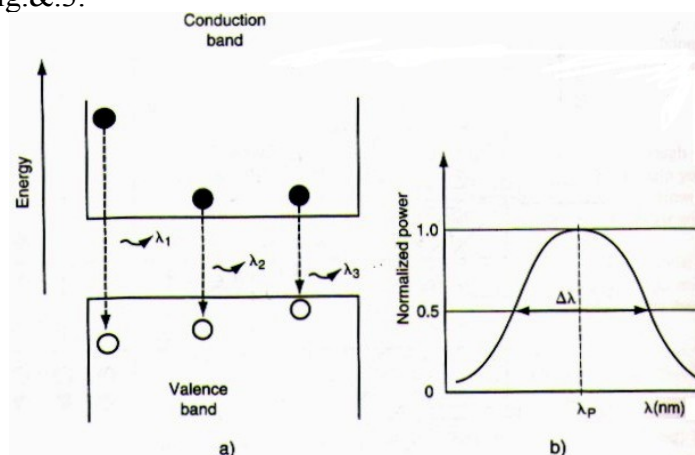


Fig.&.3.

Radiația luminoasă și joncțiune p-n

Cind un semiconductor de tip n este pus în contact cu unul de tip p, se formează o joncțiune p-n. La frontiera joncțiunii, electronii difuzează din partea n în partea p și se recombina cu golurile de aici și, în același timp, golurile din partea p difuzează în partea n și se recombina cu electronii de aici. În consecință se formează o regiune sărăcită de purtători, în care nu există nici electroni liberi, nici goluri libere. Ionii pozitivi din partea n și cei negativi din partea p a acestei regiuni, rămân necompensați ceea ce determină apariția unui câmp electric intern numit *potențial de contact* și descris cantitativ prin tensiunea de sărăcire V_D , fig.&.4.

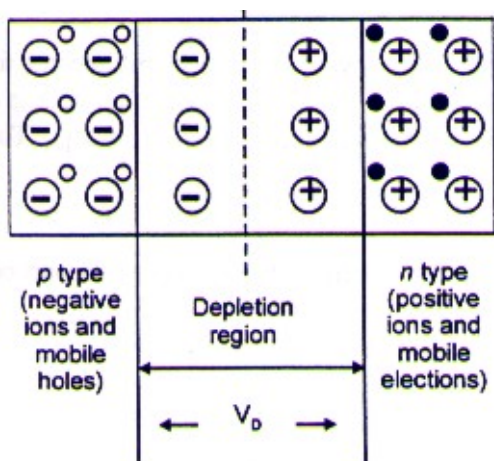


Fig.&.4.

Lucrul cel mai important de reținut este că: *recombinarea electron-gol eliberează o cantitate de energie - un foton*. Prin urmare, pentru a face un semiconductor să radieze este necesar să susținem recombina electron-gol. Dar tensiunea de sărăcire împiedică electronii și golurile de a intra în regiunea sărăcită. Prin urmare trebuie furnizată energie din exterior pentru a învinge această barieră a tensiunii de sărăcire. Această tensiune exterioară, numită *tensiune directă de polarizare*, V , este arătată în fig.&.5; ea trebuie să fie mai mare decât V_D .

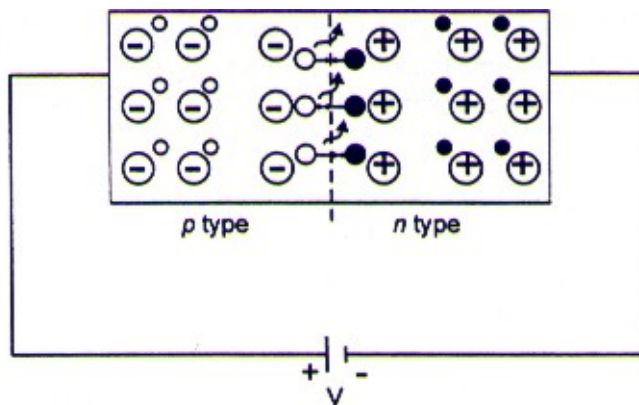


Fig.&.5.

FOTOEMIȚĂTOARE

Pentru a obține o emisie permanentă de lumină, trebuie să aibă loc următorul proces dinamic: electronii mobili din partea n, atrași de terminalul pozitiv al tensiunii V , intră în regiunea săracită. Simultan, golurile mobile din regiunea p, atrase de terminalul negativ al tensiunii V , intră în aceeași regiune săracită. Recombinarea electron-gol din interiorul regiunii săracite produce lumina. Sarcinile electrice se refac din sursa de alimentare.

Principiul de funcționare al unui LED

Un LED este o diodă semiconductoare care funcționează exact pe principiul prezentat mai sus al emisiei permanente de lumină. Acest concept este demonstrat de circuitul din fig.&.6. Cei familiarizați cu polarizarea directă a unei diode vor avea sigur următoarea observație: recombinația electron-gol este un proces care are loc în orice diodă sau tranzistor. Care este diferența dintre un LED și o diodă obișnuită ?

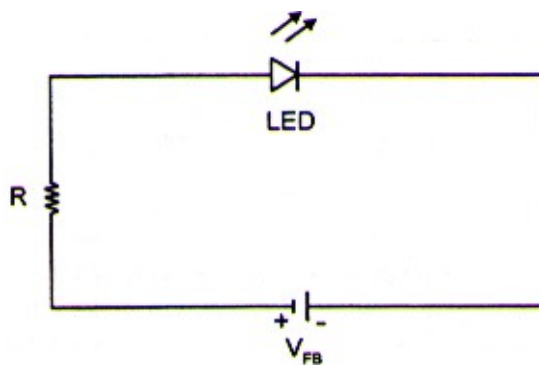


fig.&.6.

Diferența este că în diodele obișnuite, această recombinație eliberează energie sub formă de căldură - nu sub formă de lumină (adică într-un alt domeniu al spectrului). Într-un LED, aceste recombinații eliberează energie sub formă de lumină. Recombinarea generatoare de căldură se numește *neradiativă*, în timp ce recombinația generatoare de lumină se numește *radiativă*. În realitate, în orice diodă au loc ambele tipuri de recombinații; când majoritatea recombinațiilor sunt radiative, avem un LED.

Curentul direct injectează electroni în regiunea săracită de purtători, unde ei se recombinați cu golurile în mod radiativ sau neradiativ. Prin urmare, recombinațiile neradiative "consumă" din electronii excitați necesari recombinației radiative, ceea ce scade eficiența procesului. Acest fapt este caracterizat prin *eficiența cuantică internă*, η_{int} , parametru care arată ce fracție din numărul total de electroni excitați produce fotoni. Explicațiile de mai sus justifică caracteristica intrare-ieșire a unui LED prezentată în fig.&.7.

Raționamentul de mai sus poate fi formalizat astfel: puterea luminoasă, P , este energia per secundă, adică numărul de fotoni înmulțit cu energia unui foton, E_p . Numărul de fotoni este egal cu numărul de electroni injectați, N , înmulțit cu eficiența cuantică internă. Astfel:

$$P = (N\eta_{int}E_p)/t \quad (\&.2)$$

FOTOEMIȚĂTOARE

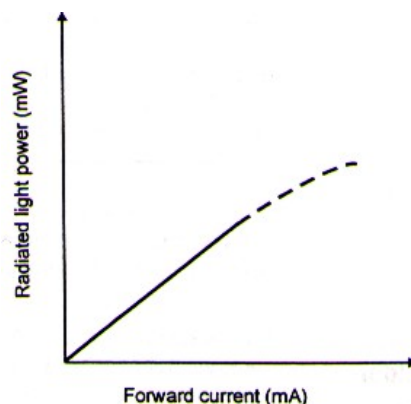


fig.&.7.

Pe de altă parte, numărul de electroni (N) înmulțit cu sarcina unui electron (e), pe secundă, este intensitatea curentului electric:

$$I = Ne/t \quad (\&.3)$$

Deci, puterea luminoasă radiată va fi:

$$P = ((It/e)\eta_{\text{int}}E_p)/t = [(\eta_{\text{int}}E_p/e)]I \quad (\&.4)$$

Dacă măsurăm E_p în electron-volți, eV, și curentul I în mA, atunci:

$$P(\text{mW}) = (\eta_{\text{int}}E_p(\text{eV}))I(\text{mA}) \quad (\&.5)$$

Exemplu

Ce putere radiază un LED dacă eficiența cuantică a sa este 1% și lungimea de undă maximă este 850 nm?

Soluție

Mai întâi trebuie să calculăm panta graficului putere funcție de curent, care este termenul $[\eta_{\text{int}}E_p(\text{eV})]$.

Dacă $\lambda = 850$ nm, atunci $E_p = hc/\lambda = 1240/\lambda = 1.47$ eV. Deci,

$$[\eta_{\text{int}}E_p(\text{eV})] = 0.0147 \text{ mW/mA}.$$

Pentru a calcula puterea trebuie să cunoaștem curentul direct. Valorile tipice pentru un LED sunt cuprinse între 50 și 150 mA. Astfel, pentru $I = 50$ mA, puterea radiată este: $P = 0.0147I = 0.735$ mW.

Homostructuri și heterostructuri

Semiconductorii de tip n și de tip p discutați pînă acum erau realizați pe același semiconductor intrinsec. Jonctiunile p-n realizate în acest fel se numesc homojoncțiuni,

FOTOEMIȚĂTOARE

iar un asemenea semiconductor homostructură. Există două construcții de bază pentru un LED:

- LED cu emisie de suprafață (SLED), fig.&.8
- LED cu emisie laterală (ELED), fig. &.9

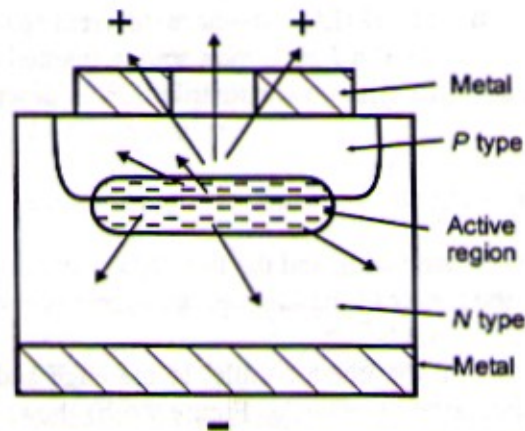


Fig.&.8.

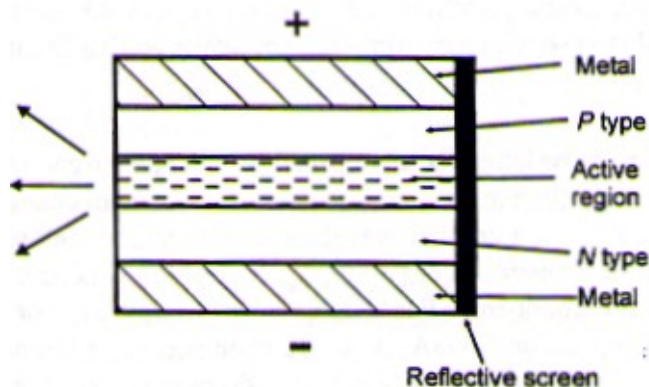


Fig.&.9.

Regiunea sărăcită de purtători și zona învecinată, în care se recombina electronii cu golurile, este numită *regiunea activă*. Lumina produsă prin această recombinare este radiată în toate direcțiile, dar ea reușește să iasă din dispozitiv doar printr-o fereastră practică în electrodul superior (fig.&.8) sau deschizătura practică într-o margine (fig.&.9). Toate celelalte direcții posibile, în cazul SLED, sau direcția opusă, în cazul ELED, sunt blocate.

O homostructură are două dezavantaje principale. Primul este acela că regiunea activă este prea difuză, ceea ce reduce eficiența dispozitivului. Recombinările electron-gol au loc pe o arie largă, situație care impune o densitate mare de current pentru a susține puterea radiată la nivelul dorit. Al doilea este că fasciculul de lumină radiat este prea larg, ceea ce face extrem de inefficient cuplajul luminii într-o fibră optică. Aceste două motive fac ca, practice, să nu se folosească homostructurile în construcția LED-urilor.

FOTOEMIȚĂTOARE

LED-urile comercializate sunt realizate pe heterostructuri, adică dioda este realizată pe mai mulți semiconductori, fiecare avînd o bandă interzisă diferită. În fig.&.10 este prezentată o heterostructură făcută din doi semiconductori diferiți.

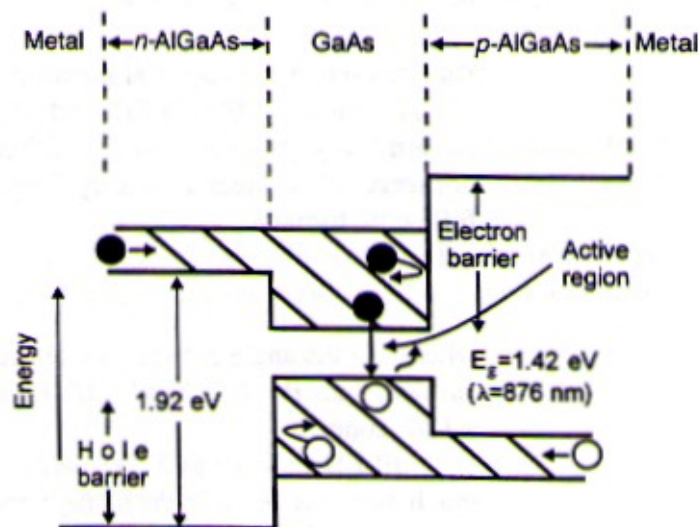


Fig.&.10.

Cu aceste heterostructuri sunt introduse două concepte de bază: conținerea recombinării electron-gol într-o regiune activă foarte redusă și ghidarea luminii radiate într-o singură direcție.

Conținerea este obținută plasînd un semiconductor cu o bandă interzisă mică între două straturi semiconductoare cu bandă interzisă mai mare. În fig.&.10 se arată că semiconductorul GaAs, a cărui bandă interzisă este $E_g = 1.42 \text{ eV}$, este plasat între două straturi de semiconductor AlGaAs, care are $E_g = 1.92 \text{ eV}$.

Asă cum se poate vedea în fig. &.10, electronii injectați din semiconductorul AlGaAs de tip n se confruntă cu o barieră de potențial la joncțiunea dintre semiconductorul GaAs și semiconductorul AlGaAs de tip p. Această barieră reflectă electronii înapoi în regiunea activă. Același mecanism se aplica și golurilor.

Conducția luminii într-o singură direcție este obținută prin faptul că semiconductorul GaAs are un indice de refracție, 3.66, mai mare decît straturile învecinate de AlGaAs, 3.2. În acest fel, regiunea activă funcționează similar cu miezul unei fibre optice.

Structura descrisă mai sus este numită *heterostructură dublă*. Cele mai multe LED-uri comercializate utilizează heterostructuri triple pentru a îmbunătăți eficiența radiației și conținerea luminii radiate.

Configurația spațială a radiației unui LED

Cele două tipuri de leduri au configurații spațiale ale radiației diferite. SLED-ul radiază lumina ca o sursă Lambertiană, ca în fig.11.

FOTOEMIȚĂTOARE

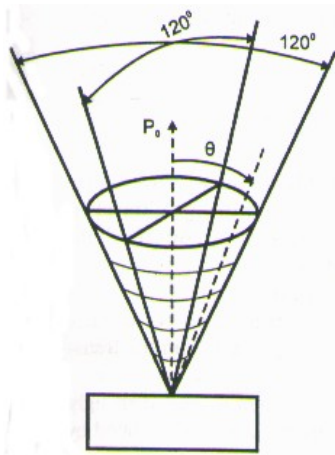


Fig.11.

Distribuția spațială a puterii radiate este descrisă de formula:

$$P = P_0 \cos \theta \quad (\&.6)$$

unde θ este unghiul dintre direcția de observație și dreapta perpendiculară pe suprafața de radiație. Jumătate din puterea unei surse Lambertiene este concentrată într-un con de 120° .

ELED-ul radiază ca o sursă Lambertiană într-un plan paralel cu marginea, producând un fascicol mult mai îngust într-un plan perpendicular pe margine, ca în fig.&.12.

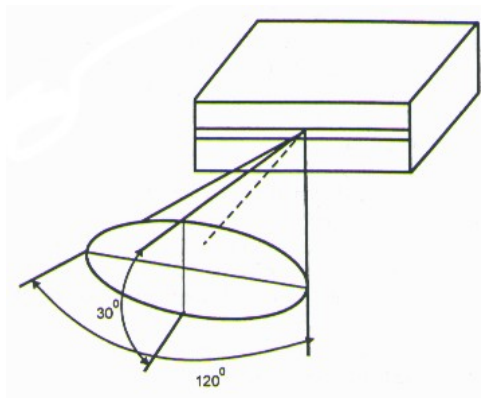


Fig.&.12.

Spectrul radiației unui LED

Lungimea de undă radiată depinde de banda interzisă a semiconductorului. Nu putem schimba banda interzisă, prin urmare pentru a obține o altă lungime de undă trebuie să alegem un alt semiconductor. O energie E_g dorită se obține utilizând un semiconductor compus din mai multe elemente. De exemplu, banda interzisă pentru GaAs este de 1.42 eV, dar dacă folosim AlGaAs putem obține o bandă interzisă între 1.42 și 1.92 eV. Valoarea exactă depinde de raportul ingredientilor. Astfel, pentru un semiconductor

FOTOEMIȚĂTOARE

compus din 37% AlAs și 63% GaAs, E_g este egal cu 1.92 eV. Dacă scădem cantitatea de AlAs, scade și E_g . În tabelul 1 prezentăm benzile interzise și lungimile de undă a unora din cei mai populari semiconductori.

Tabelul 1

Materialul	E_g (eV)	λ (nm)
Si	1.17	1067
Ge	0.775	1610
GaAs	1.424	876
InP	1.35	924
InGaAs	0.75 - 1.24	1664 - 1006
AlGaAs	1.42 - 1.92	879 - 650
InGaAsP	0.75 - 1.35	1664 - 924

Prima generație de fibre optice în telecomunicații a folosit LED-uri realizate di AlGaAs care radiau în jur de 850 nm, prima fereastră de transparență. A doua și următoarele generații au folosit LED-uri pe InGaAsP care radiază în a doua și a treia fereastră de transparență (1300 nm și 1550 nm).

Pe de altă parte, SLED-urile sunt făcute să radieze pe 850 nm și 1300 nm, în timp ce ELED-rile sunt făcute să radieze pe 1300 nm și 1550 nm.

Cuplajul luminii în fibră

Cheia pentru cât de departe putem transmite lumina printr-o fibră nu este cât de puternică este sursa ci cât din puterea acesteia putem cupla în interiorul fibrei.

Dacă aproximăm configurația de radiație a unui SLED prin modelul Lambertian, atunci puterea luminoasă, P_{in} , cuplată într-o fibră cu salt de indice, având apertură numerică NA, poate fi calculată cu relația:

$$P_{in} = P_0(NA)^2 \quad (\&.7)$$

unde P_0 este determinată cu relația (&.6).

Exemplu

Care este puterea cuplată într-o fibră multimod, cu salt de indice, având miezul cu indicele de refracție 1.48 și teaca cu 1.46, dacă SLED-ul radiază o putere de 100 μ W.

Soluție

Apertura numerică a fibrei este: $NA = \sqrt{1.48^2 - 1.46^2} = 0.2425$. Prin urmare:

$$P_{in} = P_0(NA)^2 = 100\mu W \times 0.0756 = 7.56\mu W$$

Cu alte cuvinte, mai puțin de 10% din puterea radiată este cuplată în fibră multimod.

Citirea datelor de catalog ale unui LED
Lungimea de undă a radiației și lățimea spectrală

Lungimea de undă radiată, adesea numită lungimea de undă de vîrf, λ_p , este determinată de banda interzisă, E_g . Fabricanții specifică, de obicei, valorile minime și maxime ale lui λ_p . Astfel pentru un SLED produs de firma AMP, aceste limite sunt 1290 nm și 1350 nm, iar pentru un ELED sunt 1270 nm și 1330 nm. λ_p crește odată cu creșterea curentului de comandă sau a temperaturii, dar rămâne în intervalul specificat. Lățimea spectrală, $\Delta\lambda$, este măsurată la jumătate din maxim (FWHM în figura &.13).

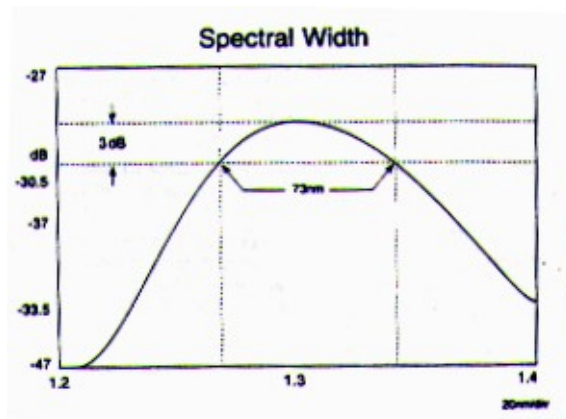


fig.&.13

Pentru SLED-ul de la AMP, lățimea spectrală este de 170 nm, iar pentru un ELED este mult mai mică: 65 nm.

Lățimea spectrală depinde de temperatură, așa cum se arată în fig. 14.

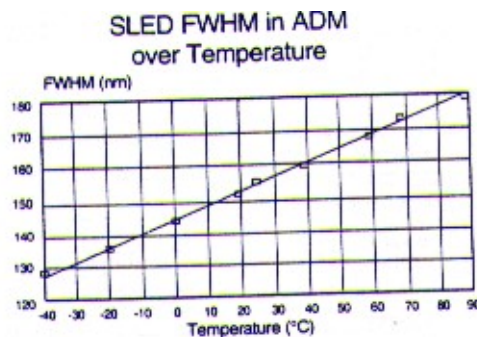


fig.&.14

În intervalul 25°C și 90°C, lățimea spectrală crește de la 155 nm la 180 nm, adică cu o panta de 0.38 nm/°C. Lățimea spectrală crește și o dată cu curentul de comandă, panta fiind de aproximativ 0.69 nm/mA, fig.&.15.

FOTOEMIȚĂTOARE

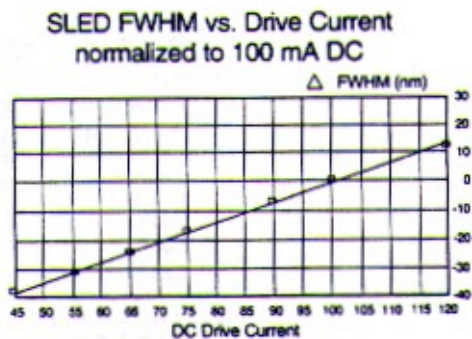


Fig.&.15.

Reamintim că lățimea spectrală a sursei este parametrul critic pentru dispersia cromatică a fibrei optice.

Caracteristicile electrice

Caracteristicile electrice - tensiune directă, capacitate și curent invers - sunt comune oricărei diode, fig.&.16.

Specifications: 100mA Forward Current, 25°C

Parameter	Part No. Suffix	Test Conditions	Units	Min.	Typ.	Max.
Coupled power			μW	10	20	—
50 μm fiber	-1	—	dBm	-20	-17	—
62.5 μm fiber	-1	—	dBm	-15	-13	—
50 μm fiber	-2	—	μW	20	30	—
62.5 μm fiber	-2	—	dBm	-17	-15	—
50 μm fiber	-2	—	μW	50	75	—
62.5 μm fiber	-2	—	dBm	-13	-11	—
Wavelength	—	—	nm	1290	—	1350
Spectral FWHM	—	—	nm	—	—	170
Forward voltage	—	—	V	—	1.4	1.7
Capacitance	—	f=1MHz, 0V	pF	—	15	50
Leakage current	—	-2V	μA	—	—	2
Rise/fall time	—	100mA 50% duty cycle 12.5 MHz	ns	—	2.5	4
Bandwidth	—	—	MHz	—	115	—
$\lambda/\Delta\lambda$	—	-40 to +85°C	nm/°C	—	-38	—
$3P_{out}/\Delta T$	—	—	dB/°C	—	-03	—
Reliability MTTW	—	-1.5dB EOL	hrs	—	2.3 x 10 ⁶	—

Fig.&.16.

Fabricanții specifică uneori *tensiunea directă în funcție de curentul direct*, a cărei alătură este ca în figura &.17.

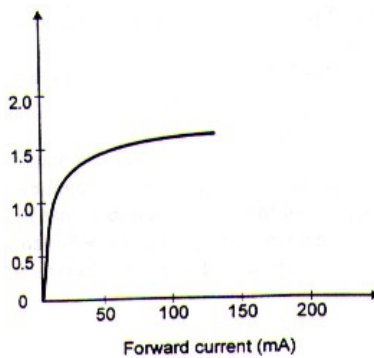


Fig.&.17.

FOTOEMIȚĂTOARE

De regulă, valoarea tensiunii directe nu depășește 2V.

Capacitatea, C, este inerentă unui LED. Există două surse ale acestei capacități:

- capacitatea asociată joncțiunii p-n, numită capacitate de încărcare;
- capacitatea asociată cu timpul de viață al purtătorilor în regiunea activă, numită capacitate de difuzie.

Această capacitate limitează abilitatea de modulație a LED-ului prin restricționarea benzii. De exemplu, fabricantul Mitel Semiconductor AB (Jarfalla - Suedia) specifică pentru un SLED o capacitate de 20 pF și o bandă de 200 MHz (la o lungime de undă de vârf de 865 nm) și 200 pF pentru un SLED a cărui bandă este 125 MHz (la o lungime de undă de vârf de 1320 nm). Acesta este intervalul tipic de valori pentru capacitatea unui LED.

Curentul invers este cauzat de purtătorii minoritari. Aceștia sunt produși de energia termică. Acest curent este măsurat la o anumită tensiune inversă, de exemplu 2V în fig.&.16.

Timpul de viață, timpul de creștere/descreștere și banda de frecvențe

Timpul de viață, τ , al purtătorilor este timpul dintre momentul în care ei sunt injectați în regiunea sărăcită și momentul în care ei se recombină. Din acest motiv se mai folosește și denumirea de *timp de viață de recombinare*. Valorile sale variază de la nanosecunde la milisecunde. Trebuie făcută distincție între timpul de viață radiativ, τ_r , și neradiativ, τ_{nr} , astfel încât timpul de viață se calculează cu relația:

$$1/\tau = 1/\tau_r + 1/\tau_{nr} \quad (\&.8)$$

Eficiența cuantică internă, η_{int} , care arată câți fotoni sunt radiați în raport cu numărul total de electroni injectați, poate fi calculată cu relația:

$$\eta_{int} = \tau/\tau_r \quad (\&.9)$$

Timpul de creștere/descreștere, t_r , este definit între 10% și 90% din valoarea maximă a pulsului, ca în fig.&.18.

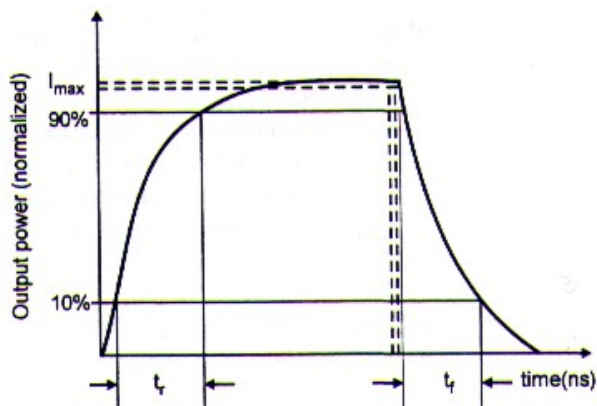


Fig.&.18.

FOTOEMIȚĂTOARE

Pentru un LED, acest parametru arată cum urmărește pulsul de lumină de la ieșire pulsul electric modulator de la intrare, vezi fig.&.19.

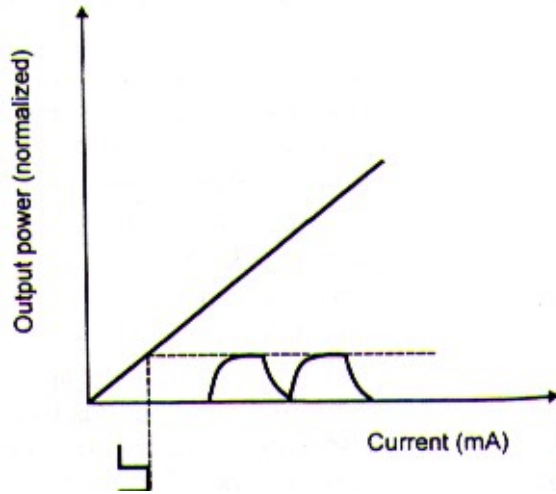


Fig.&.19.

Timpul de creștere/descrere este determinat de capacitatea LED-ului (C), de amplitudinea treptei de curent de la intrare (I_p) și de timpul de viață (τ) și se poate calcula cu relația [1]:

$$t_r = 2.2 \left[\tau + \left(1.7 \times 10^{-4} \times T^{\circ}K \times C \right) / I_p \right] \quad (\&.10)$$

unde $T^{\circ}K$ este temperatura absolută în kelvini ($0^{\circ}C = 273^{\circ}K$). Pentru o valoare mare a lui I_p , al doilea termen devine neglijabil și *timpul de creștere este determinat, în ultimă instanță de timpul de viață*. Fabricanții preferă să măsoare acest timp, valorile tipice încadrându-se între 2 și 4 ns.

Banda de modulație, BW , este intervalul de frecvențe de modulație în cadrul căruia puterea electrică detectată scade la -3dB, vezi fig.&.20.

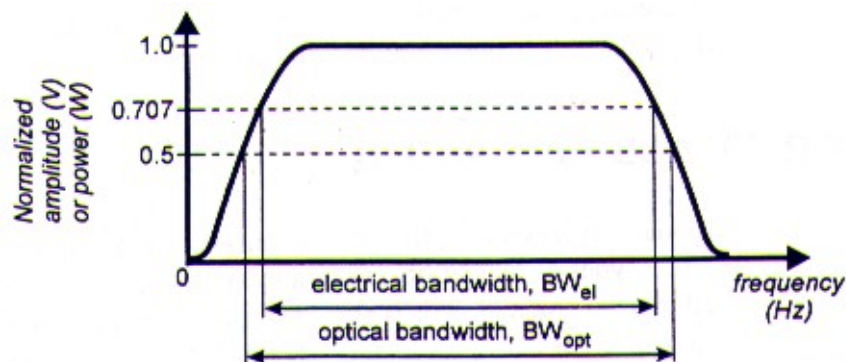


Fig.&.20.

În electronică, relația generală de legătură dintre bandă și timpul de creștere este:

FOTOEMIȚĂTOARE

$$BW = 0.35/t_r \quad (\&.11)$$

Dacă introducem în relația de mai sus $t_r = 2.5$ ns (din datele din fig.&.16) nu obținem $BW = 115$ MHz, așa cum apare în aceeași figură (ci obținem 140 MHz).

Această discrepanță apare deoarece dacă curentul direct este modulat cu pulsația ω , intensitatea luminii la ieșirea LED-ului, $I(\omega)$, va varia după relația, [2]:

$$I(\omega) = I(0) / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2} \quad (\&.12)$$

unde $I(0)$ este intensitatea luminoasă emisă de LED în curent continuu, iar τ este timpul de viață. Puterea electrică detectată este proporțională cu I^2 . Prin urmare, considerând raportul $I^2(\omega)/I^2(0) = 1/2$, ceea ce înseamnă o scădere la -3dB, din relația (&.12) obținem:

$$BW = \Delta\omega = 1/\tau \quad (\&.13)$$

Se evidențiază astfel un principiu foarte important: *banda de modulație a unui LED este limitată de timpul de viață al purtătorilor*. Explicația fizică a acestui principiu este următoarea. Presupunem că un electron este excitat în banda de conducție. Lui îi ia τ ns pînă cînd să cadă în banda de valență prin recombinare. În acest interval de timp nu puteți modifica starea lui, astfel încît chiar dacă se întrerupe curentul direct, trebuie așteptat τ ns pînă cînd radiația va înceta practic.

Produsul putere-bandă

Produsul putere-bandă este un altă caracteristică importantă a unui LED. Acest produs este o constantă. Cu alte cuvinte, puteți crește banda de modulație a unui LED doar în detrimentul puterii de ieșire. Reciproc, puteți crește puterea de ieșire a unui LED, doar în detrimentul benzii de modulație.

[1] Gerd Keiser, "Optical Fiber Communications", New York: McGraw-Hill, 1991.

[2] S.E. Miller, I.P. Kaminow, "Optical Fiber Telecommunications", Academic Press, 1988, pag. 467 - 507.