

Light Emitting Diode (LED) Sebagai Sumber Cahaya Pada Sistem Komunikasi Serat Optik

Abstrak

Dioda adalah piranti semi-konduktor yang berfungsi untuk menyearahkan arus listrik. Light Emitting Diode (LED) adalah salah satu jenis dioda yang dapat memancarkan cahaya ketika diberi bias maju. Pada sistem komunikasi serat optik, LED digunakan sebagai sumber cahaya yang berfungsi sebagai carrier. Cahaya yang dihasilkan oleh LED diakibatkan oleh terjadinya rekombinasi antara elektron dengan hole, dimana panjang gelombang yang dihasilkan ditentukan oleh selisih pita energi konduksi dan pita energi valensi. Panjang gelombang ini besarnya harus sesuai dengan karakteristik dari serat optik yang digunakan, sehingga didapatkan hasil komunikasi yang optimum (loss power dan error rate yang kecil, data rate dan bandwidth yang besar). Teori mekanika kuantum dibutuhkan untuk menerangkan fenomena mikroskopik (prilaku elektron dan hole) di dalam bahan semi-konduktor, sehingga dapat dibuat LED dengan panjang gelombang cahaya tertentu sesuai dengan yang dibutuhkan. LED digunakan sebagai sumber optik untuk komunikasi serat optik, jenis serat optik multimode dengan data rate kurang dari 50 Mb/s, namun memiliki keuntungan dalam pengoperasiannya dibutuhkan rangkaian drive yang sederhana, tidak memerlukan rangkaian stabilisator untuk panas atau optik.

Kata Kunci : Dioda, semi-konduktor, LED, sistem komunikasi serat optik, carrier, rekombinasi, panjang gelombang, elektron, hole, pita energi konduksi, pita energi valensi, teori mekanika kuantum.

Pendahuluan

Dioda adalah piranti semi-konduktor yang berfungsi untuk menyearahkan arus listrik. Light Emitting Diode (LED) adalah salah satu jenis dioda yang dapat memancarkan cahaya ketika diberi bias maju. Pada sistem komunikasi serat optik, LED digunakan sebagai sumber cahaya yang berfungsi sebagai carrier. Cahaya yang dihasilkan oleh LED diakibatkan oleh terjadinya rekombinasi antara elektron dengan hole, dimana panjang gelombang yang dihasilkan ditentukan oleh selisih pita energi konduksi dan pita energi valensi LED

digunakan sebagai sumber optik untuk komunikasi serat optik, jenis serat optik multimode dengan data rate kurang dari 50 Mb/s, namun memiliki keuntungan dalam pengoperasiannya dibutuhkan rangkaian drive yang sederhana, tidak memerlukan rangkaian stabilisator untuk panas atau optik.

Metodologi Penelitian

Tulisan ini membahas mengenai teori dasar emisi cahaya, bahan bahan pembuatan LED dan karakteristik LED serta aplikasinya pada komunikasi optik dengan menggunakan studi literatur terhadap buku-buku, majalah dan jurnal ilmiah.

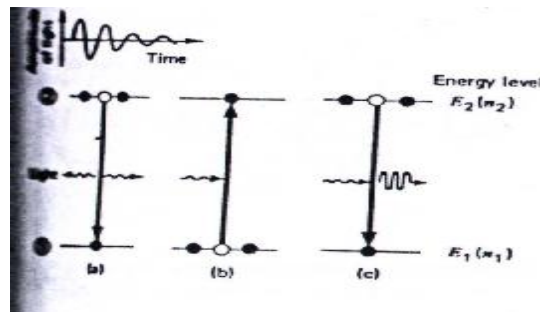
Prinsip Dasar Emisi Cahaya

Atom, molekul dan kristal semi-konduktor menyerap dan memancarkan gelombang elektromagnetik dalam bentuk cahaya dengan panjang gelombang tertentu. Menurut teori mekanika kuantum, energi internal dari sebuah atom, molekul atau sebuah semi-konduktor hanya dapat terdiri dari nilai-nilai diskrit tertentu, yang disebut dengan level kuantisasi. Ketika elektron melakukan transisi dari level energi E_2 ke level energi E_1 , maka cahaya memiliki frekuensi sebanding dengan selisih energi $E_2 - E_1$, mungkin diserap atau diemisikan. Jika h adalah konstanta Planck ($6.625 \times 10^{-34} \text{ J.s}$) maka frekuensinya adalah :

$$f_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \text{ Hz} \quad (1)$$

yang disebut dengan *Bohr condition*.

Secara skematik pada gambar (1), dijelaskan ada 2 cara sebuah atom, molekul atau semikonduktor dapat menyerap atau memancarkan cahaya sebagai hasil dari transisi antara 2 tingkat energi yang berbeda (antara level energi atau pita energi).



Gambar (1)

Cara pertama seperti pada gambar (1.a), dimana atom mula-mula berada pada level energi 2 yang lebih tinggi dan cahaya dengan frekuensi f_0 di-emisikan secara spontan dan acak tanpa cahaya luar atau tanpa adanya mekanisme pemicuan. Proses ini disebut **emisi spontan**. Ketika sejumlah besar atom dan molekul berada pada level energi tinggi, fase dari gelombang yang diradiasikan dari atom-atom atau molekul-molekul yang berbeda tidak saling bergantung, dan total intensitas cahaya yang diradiasikan berkurang secara eksponensial terhadap waktu. Cahaya yang biasa kita lihat sehari-hari biasanya disebabkan

oleh emisi spontan. Sebagai contoh, di dalam filamen sebuah lampu bohlam atom-atomnya dieksitasikan oleh energi termal.

Cara kedua adalah proses eksitasi terjadi ketika cahaya dengan frekuensi f_0 atau mendekati f_0 dipompakan ke dalam atom dari sumber luar, sekarang ada 2 kemungkinan, pertama, seperti pada gambar (1.b), sebuah atom di dalam level energi 1 dapat menyerap sebuah foton dari cahaya input dan mengalami eksitasi ke level energi 2, ini disebut **penyerapan resonan**. Kemungkinan ke-2 adalah sebuah atom mula-mula berada pada level energi 2, gambar (1.c), dapat diinduksikan untuk mengemisikan sebuah foton cahaya yang memiliki fase dan frekuensi yang sama dengan cahaya input, ini disebut **emisi yang distimulasi** dan merupakan dasar dari operasi *Laser*.

Prinsip Dasar Emisi Cahaya Emisi Cahaya Pada Semi-Konduktor

Sumber cahaya dari bahan semi-konduktor (*LED* dan *Laser Diode*) merupakan sumber cahaya utama pada komunikasi optik. Akibat larangan Pauli maka elektron-elektron dari atom-atom kristal semikonduktor pada tingkat energi yang hampir sama akan membentuk tingkat-tingkat energi yang sangat berdekatan yang disebut dengan pita energi. Pita energi yang berhubungan dengan pemancaran cahaya adalah pita energi valensi dan pita energi konduksi, jika elektron dari pita valensi karena mendapatkan energi maka tereksitasi ke pita konduksi maka tempat kosong yang ditinggalkan oleh elektron tersebut disebut *hole* yang dipandang bermuatan positif. Elektron pada pita konduksi tersebut dapat turun kembali ke pita valensi mengisi *hole*, peristiwa ini disebut rekombinasi, pada peristiwa rekombinasi akan dipancarkan cahaya bersesuaian dengan selisih kedua pita energi tersebut.

Kondisi untuk transisi tersebut adalah momentum dari elektron secara ideal harus konstan. Maka untuk gambar (2.b) elektron mengalami transisi secara langsung dan mudah dari level energi tinggi ke rendah dan cahaya secara mudah diradiasikan. Pada gambar (2.b) momentum juga harus berubah, transisi elektron menjadi sulit dan probabilitas dari cahaya yang diemisikan lebih kecil. Proses pada gambar (2.a) dan (2.b) disebut *semi-konduktor transisi langsung dan transisi tidak langsung*. Panjang gelombang yang dipancarkan, λ , bergantung dengan gap energi antara pita konduksi dan pita valensi :

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \cong \frac{1.2398}{E_g (eV)} \text{ nm} \quad (2)$$

c adalah kecepatan cahaya, h adalah tetapan Planck dan E_g adalah gap energi antara pita konduksi dan valensi yang merupakan karakteristik dari material semi-konduktor. Secara matematis ketiga proses transisi tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\text{Kecepatan emisi terangsang : } B_{21}N_2r(h\nu_{12})$$

$$\text{Kecepatan emisi spontan : } A_{21}N_2$$

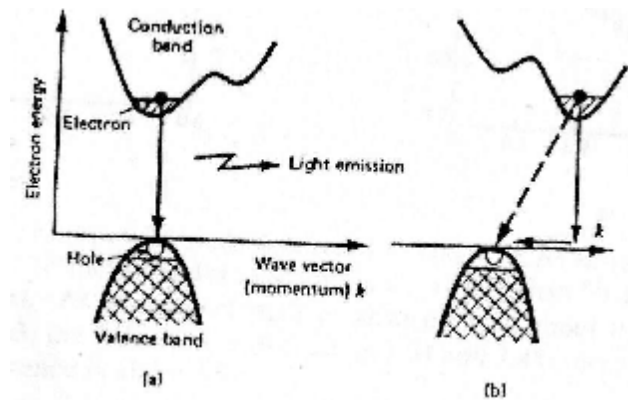
$$\text{Kecepatan absopsi : } B_{12}N_1r(h\nu_{12}) - A_{21}n_2$$

Dimana : N_1 = Jumlah atom/molekul pada level energi 2 ; N_2 = Jumlah atom./molekul pada level energi 1, $\rho(h\nu_{12})$ = Total energi foton yang dipancarkan persatuan volume dan $t = \frac{1}{A_{21}}$ = waktu hidup rata-rata untuk emisi spontan pada level energi 2. Pada kondisi

steady state : Kecepatan emisi terangsang + Kecepatan emisi spontan = Kecepatan absopsi atau :

$$B_{21}N_2r(h\nu_{12}) + A_{21}N_2 = B_{12}N_1r(h\nu_{12}) \quad (3)$$

Pada *LED* emisi spontan lebih mendominasi dibandingkan dengan emisi terangsang.



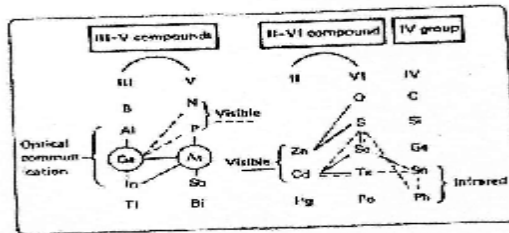
Gambar (2)

Berbagai jenis material semi-konduktor tersedia sehingga panjang gelombang yang dihasilkan hampir memuat semua spektrum dari daerah tampak sampai dekat daerah infra-merah. Pada *LED (Light Emitting Diode)*, cahaya langsung dipancarkan. Sedangkan pada dioda laser, lapisan tengah elemen semikonduktor dirancang sebagai zona aktif. Ujung-ujung zona aktif ini memantulkan dan memperkuat intensitas laser sebelum memancar keluar.

Bahan LED

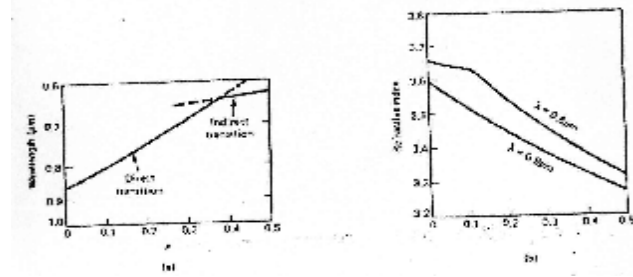
Silikon(Si) dan Germanium (Ge) adalah material utama yang digunakan pada industri semi-konduktor elektronik. Struktur level energi dari kedua elemen ini digambarkan pada gambar (2.b), karena transisi tidak langsung yang terjadi maka radiasi transfer elektron antara 2 pita tidak terjadi dengan mudah karena dibutuhkan perubahan momentum. Maka material tersebut tidak digunakan di dalam peralatan *photoemissive*. Di dalam senyawa kimia semikonduktor seperti Gallium Arsenida (GaAs), kutub-kutub dari 2 pita energi akan seperti pada gambar (2.a). Senyawa kimia semikonduktor tersebut akan memberikan transisi langsung sehingga emisi *electroluminiscent* akan lebih efisien. Semi-konduktor yang terdiri dari tiga atau empat elemen kimia memiliki keuntungan tambahan, karena gap energi bervariasi dengan komposisi-nya maka didapatkan rentang panjang gelombang yang berbeda. Gambar (3) menunjukkan beberapa senyawa semi-konduktor yang umum. Semi-konduktor yang paling penting untuk komunikasi optik adalah kelompok dari campuran kristal yang unsur utamanya adalah GaAs di nyatakan dengan garis tebal pada gambar (3) dan dikombinasikan dengan unsur-unsur tetangganya (Al, In, P, dan Sb). Sebuah *ternary compound semiconducto* biasanya dinyatakan dengan rumus

$$Ga_{1-x}Al_xAs(0 \leq x \leq 1) \tag{4}$$



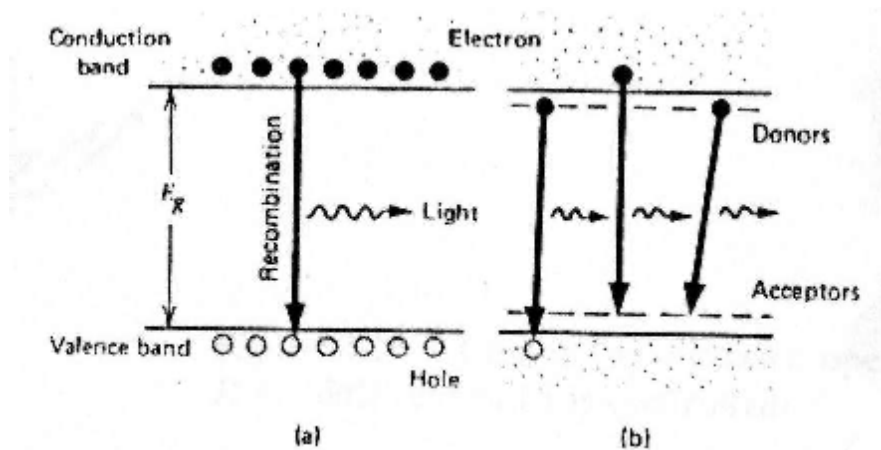
Gambar (3)

Sebagai contoh, senyawa semikonduktor dengan $x = 0.3$ menyatakan sebuah campuran kristal terdiri dari 70 % Ga dan 30 % Al, keduanya dari group III, bersama dengan As dari group V. Panjang gelombang radiasi yang didapatkan dari kristal campuran $Ga_{1-x}Al_xAs$ ditunjukkan pada gambar (4) sebagai fungsi dari x . Indeks bias juga berubah terhadap x ; rentang nilai untuk 2 panjang gelombang diberikan pada gambar (4.b).



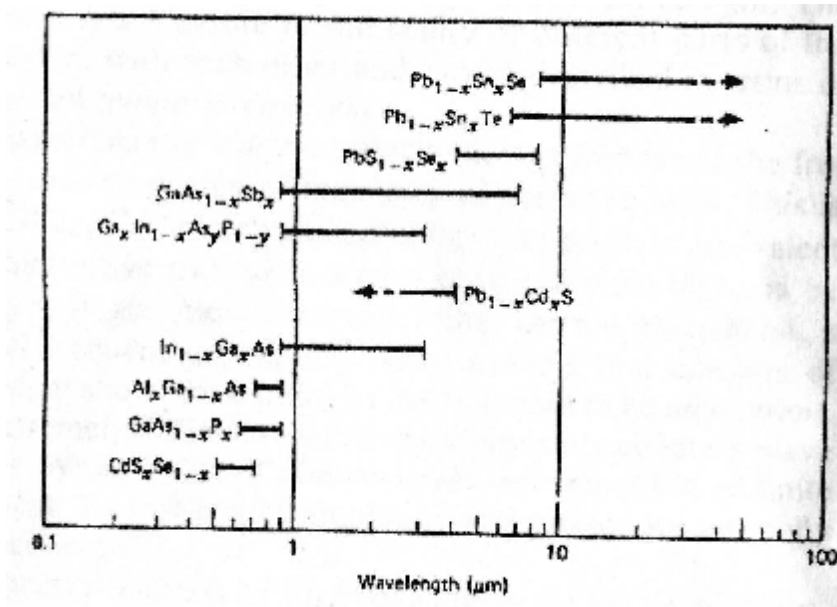
Gambar (4)

Pada beberapa semi-konduktor level energi terminal dibentuk oleh donor dan akseptor seperti ditunjukkan pada gambar (5).



Gambar (5)

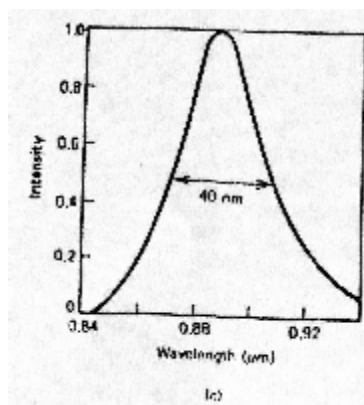
Sebagai contoh, GaP dan GaN adalah semi-konduktor transisi tidak langsung, sehingga rekombinasi radiatif sangat sulit terjadi. Pada semikonduktor seperti itu, ketakmurnian atom oksigen diberikan dan transisi terjadi melalui level energi ketakmurnian tersebut. Panjang gelombang emisi untuk berbagai senyawa semi-konduktor *ternary* dan *quaternary* ditunjukkan pada gambar (6). *Light Emitting Diode (LED)* didasarkan pada fenomena variasi variasi emisi ini.

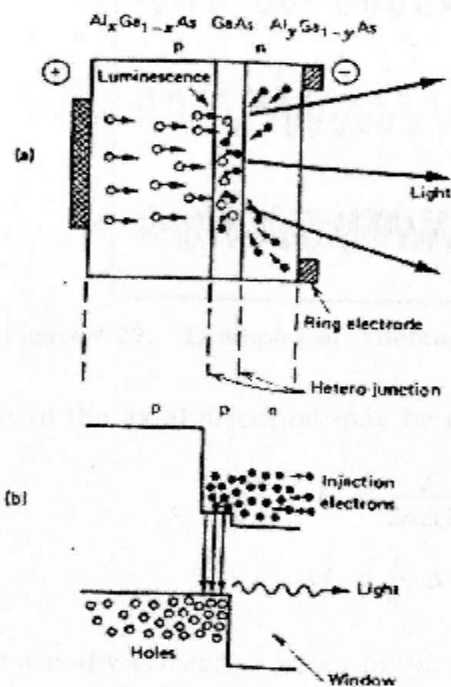


Gambar (6)

Light Emitting Diode (LED)

Salah satu bentuk dari struktur *LED* ditunjukkan pada Gambar (7). Sebuah persambungan *pn* telah dibuat dalam berbagai senyawa semikonduktor seperti yang telah disebutkan di atas. Arus listrik dibuat untuk mengalir melewati persambungan pada arah maju, sehingga elektron atau *hole* yang adalah pembawa mayoritas disuntikan ke dalam daerah persambungan dan *luminescence* terjadi akibat rekombinasi dari pembawa muatan ini (*hole* dan elektron).





Gambar (7)

Gambar (7) menunjukkan prinsip operasi dari LED yang memiliki sebuah persambungan *double-heterostructure* dimana terdiri dari tipe p $Ga_{1-x}Al_xAs$ dan tipe n $Ga_{1-y}Al_yAs$ dengan tipe p GaAs antara keduanya. Elektron disuntikan melalui persambungan pn dari lapisan tipe n berekombinasi dengan *hole* pada lapisan GaAs, dan panjang gelombang dari cahaya yang diradiasikan berkoresponden dengan gap pita energi dari GaAs. Pada sisi lain elektron yang diinjeksi tidak dapat berdifusi ke dalam lapisan tipe p $Ga_{1-x}Al_xAs$ karena adanya *heterojunction barrie*, sehingga *luminescence* hanya terjadi di dalam lapisan GaAs. Cahaya yang diradiasikan keluar oleh dioda terjadi tanpa reabsorpsi karena gap energi antara pita pada lapisan GaAlAs lebih besar dibandingkan dengan yang di GaAs. Gambar (7.b) menunjukkan satu contoh struktur pita dari dari sebuah LED GaAs. Frekuensi pusat adalah $0.89 \mu\text{m}$, dan lebar spektral sekitar 40 nm.

Struktur LED

Struktur LED yang biasa digunakan pada saat ini adalah menggunakan bahan GaAsP/GaAs sebagai berikut dengan konfigurasi sebagai berikut :

Lapisan	Fungsi	Bahan	Ketebalan
1	Lapisan kontak metal	-	-
2	Lapisan untuk perbaikan kontak	p-GaAs	~ 1,0 μm
3	Lapisan <i>waveguide</i> (pengurung)	p-Ga _(1-x) As _x P	~ 1,0 μm
4	Lapisan aktif (rekombinasi elektron-hole)	n-Ga _(1-y) As _y P	~ 0,3 μm
5	Lapisan <i>waveguide</i> (pengurung)	n-Ga _(1-x) As _x P	~ 1,0 μm
6	Substrat	n-GaAs	~ 100 μm
7	Lapisan kontak metal	-	-

Hole (lubang) dari lapisan 3 dan elektron dari lapisan 5 akan berekombinasi di lapisan 4 sehingga menghasilkan emisi cahaya. Lapisan *waveguide* berfungsi sebagai pengurung optik (*optical confinement*) yang dihasilkan dari lapisan aktif untuk ditransmisikan ke luar. Ada 2 jenis *LED* yaitu *LED Surface Emitter* (*Burrus* atau *Front Emitter*) dan *LED Edge Emitter*. Pada *LED Surface Emitter*, bidang dari lapisan aktif diarahkan tegak lurus ke sumbu serat optik, diameter lapisan aktif biasanya sekitar 50 μm dengan ketebalan 2,5 μm . Pola emisi dari *LED Surface Emitter* 120⁰ HPBW (*Half Power Beam Bandwidth*) merata. *LED* jenis *Edge Emitter* terdiri dari daerah aktif yang merupakan sumber cahaya inkoheren dan dua lapisan *waveguide*. Lapisan *waveguide* mempunyai indeks bias lebih rendah dari lapisan aktif, tetapi lebih tinggi dari indeks bias lapisan-lapisan yang lain. Struktur ini membentuk suatu saluran *waveguide* yang langsung mengarahkan radiasi optisnya ke serat optik. Untuk menyesuaikan dengan diameter serat optik (50 – 100 μ), stripe kontak dibuat lebarnya 50 – 70 μm . Panjang daerah aktif biasanya 100 – 150 μm . Pola emisi dari *Edge Emitter* lebih terarah daripada *Surface Emitter*. Pada bidang paralel dengan persambungan dimana tidak ada pengaruh *waveguide*, berkas optis yang dipancarkan berbentuk *Lambertian* ($\sim \cos \theta$) dimana HPBW θ_{\parallel} 120⁰. Pada bidang tegak lurus persambungan, HPBW θ_{\perp} berkisar 25⁰ – 35⁰ tergantung kepada tebal lapisan *waveguide*. Untuk *LED* dengan panjang gelombang 800 nm ~ 900 nm, menggunakan bahan semikonduktor *ternary alloy* Ga_{1-x}Al_xAs. Rasio x dari Aluminium Arsenida terhadap Gallium menentukan E_g dari *alloy* dan berhubungan dengan panjang gelombang puncak dari radiasi cahaya yang dipancarkan, sesuai dengan persamaan (2). Secara empirik diperoleh hubungan antara E_g dengan fraksi mol x pada semikonduktor *ternary alloy* :

$$E_g = 1,424 + 1,266x + 0,266x^2 \text{ untuk } 0 \leq x \leq 0,37 \quad (5)$$

dengan menggunakan persamaan (4) dan (1) misal untuk $x = 0,07$ maka $\text{Ga}_{0,93}\text{Al}_{0,07}\text{As}$ akan memiliki $E_g = 1,51$ eV sehingga cahaya yang diemisikan terjadi pada $\lambda_p = 0,82 \mu\text{m}$.

Untuk *LED* dengan panjang gelombang $1,0 \mu\text{m} \sim 1,7 \mu\text{m}$, menggunakan bahan semikonduktor *quaternary alloy* $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. Dengan memvariasikan nilai x dan y pada lapisan aktif, akan diperoleh panjang gelombang puncak λ_p yang diinginkan. Persamaan empirik (xx) dapat juga digunakan untuk *quaternary alloy* dengan mensyaratkan secara empirik : $y \cong 2,20x$ pada $0 \leq x \leq 0,47$ sehingga :

$$E_g = 1,35 - 1,76x + 0,78x^2 \quad (6)$$

misal untuk $x = 0,26$, $y = 2,20x = 0,56$ maka $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}_{0,56}\text{P}_{0,44}$ dan cahaya yang diemisikan $\lambda_p = 1,3 \mu\text{m}$.

Efisiensi Kuantum Internal *LED*

Efisiensi Kuantum Internal pada lapisan aktif merupakan bagian dari pasangan elektron-hole yang berekombinasi dan teradiasi. Jika laju rekombinasi radiatif per unit volume adalah R_r dan laju rekombinasi non radiatif per unit volume adalah R_{nr} , maka efisiensi kuantum internal η_0 :

$$h_0 = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} \quad (7)$$

Untuk perubahan *carrier* yang eksponensial, umur rekombinasi radiatif :

$$t_r = \frac{\Delta n}{R_r} \quad (8)$$

dimana $\Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$. Δn adalah perubahan kerapatan elektron, Δn_0 adalah pertambahan kerapatan elektron pada awal injeksi dan τ adalah umur *carrier*. Umur rekombinasi non-radiatif :

$$t_{nr} = \frac{\Delta n}{R_{nr}} \quad (9)$$

sehingga :

$$h_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau_r}{\tau_{nr}}\right)} = \frac{\tau}{\tau_r} \quad (10)$$

dimana τ adalah umur rekombinasi bulk :

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}} \quad (11)$$

Pada struktur *heterojunction*, rekombinasi non-radiatif pada batas-batas dari lapisan-lapisan semikonduktor yang berbeda hasil dari *mismatch* (ketidak tepatan) *lattice* (kisi) kristal cenderung menurunkan umur (waktu hidup) ini, sehingga menurunkan efisiensi kuantum internal. Dalam semikonduktor aliran elektron atau *hole* memberikan kenaikan arus listrik menurut persamaan berikut :

$$i_e = qD_e \frac{\partial(\Delta n)}{\partial x} \quad \text{dan} \quad i_h = qD_h \frac{\partial(\Delta p)}{\partial x} \quad (12)$$

Δp = perubahan kerapatan *hole*, q = muatan elektron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb), D_e = koefisien difusi elektron dan D_h = koefisien difusi *hole*. Aliran arus ini merupakan akibat dari distribusi *carrier* di dalam bahan walaupun tidak ada medan listrik. Karena *carrier* muatan terdifusi melalui bahan, sebagian akan hilang karena rekombinasi. Mereka bergerak sepanjang L_e dan L_h yang disebut panjang difusi dan ditentukan oleh koefisien difusi dan umur bahan :

$$L_D = \sqrt{Dt} \quad (13)$$

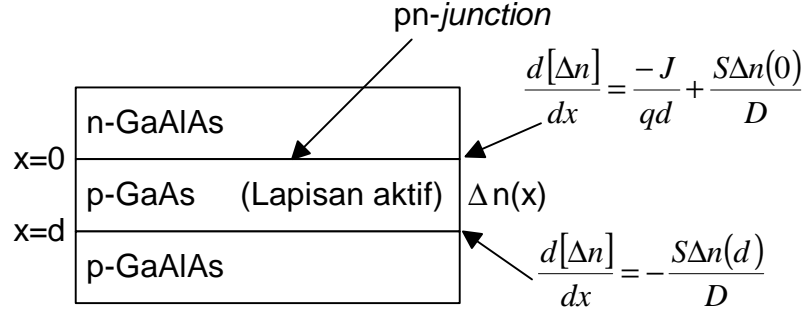
suatu *heter-junction* biasanya disifatkan oleh besaran $\frac{SL_D}{D}$ yaitu perbandingan dari kecepatan rekombinasi *interface* (batas lapisan) S (cm/detik) dan kecepatan difusi bulk $\frac{D}{L_D}$.

Untuk batas lapisan yang pemantulannya sempurna, $S = 0$, kontak *ohmic* dikarakteristikan dengan $S = \infty$ dan $S = \frac{D}{L_D}$ menyatakan suatu *interface* yang tidak dapat dibedakan dengan bahan bulk. Kriteria untuk *LED* dengan efisiensi tinggi adalah bahwa S harus lebih kecil dari 10^4 cm/dt pada *interface heterojunction*. Pada devais *hetero-struktur* praktis (tipikal) nilai $S \approx 5 \times 10^3$ cm/dt.

Reduksi dalam umur bulk untuk rekombinasi *hetero-interface* non-radiatif dapat diperoleh dari pemecahan persamaan kontinuitas *steady*. Untuk satu dimensi :

$$D \frac{d^2[\Delta n(x)]}{dx^2} - \frac{\Delta n(x)}{t} = 0 \quad (14)$$

dimana $\Delta n(x)$ adalah kerapatan elektron per cm^3 pada posisi x , dalam lapisan aktif dengan tebal d , yang diukur dari *p-n junction* (lihat gambar (8)).



Gambar (8)

Dengan mengasumsikan kecepatan rekombinasi pada permukaan sama pada kedua batas *hetero-interface*, maka :

$$\frac{d[\Delta n]}{dx} \Big|_{x=0} = -\frac{J}{qd} + \frac{S}{D} \Delta n(0) \quad (15)$$

$$\frac{d[\Delta n]}{dx} \Big|_{x=d} = -\frac{S}{D} \Delta n(d) \quad (16)$$

$\frac{J}{qD}$ adalah *junction carrier* diinjeksikan melalui *p-n junction* pada $x = 0$, dan $\frac{S}{D} \Delta n$ adalah jumlah *carrier* berekombinasi pada interface. J adalah kerapatan arus. Dengan mengasumsikan solusi untuk $\Delta n(x)$ adalah :

$$\Delta n(x) = Ae^{\frac{x}{L_D}} + Be^{-\frac{x}{L_D}} \quad (17)$$

dimana A dan B adalah konstanta dan $L_D = \sqrt{Dt}$, maka dengan memasukan persamaan (17) ke persamaan (14) dan menggunakan syarat batas pada persamaan (15) dan (16) akan menghasilkan solusi :

$$\Delta n(x) = \frac{JL_D}{qD} \left(\frac{\cosh\left(\frac{d-x}{L_D}\right) + \left(\frac{L_D S}{D}\right) \sinh\left(\frac{d-x}{L_D}\right)}{\left[\left(\frac{L_D S}{D}\right)^2 + 1\right] \sinh\left(\frac{d}{L_D}\right) + \left(\frac{2L_D S}{D}\right) \cosh\left(\frac{d}{L_D}\right)} \right) \quad (18)$$

Di dalam lapisan aktif, ,kerapatan elektron rata-rata :

$$\overline{\Delta n} = \frac{1}{d} \int_0^d \Delta n(x) dx = \frac{J t_{eff}}{q d} \quad (19)$$

dimana :

$$t_{eff} = t \left(\frac{\sinh\left(\frac{d}{L_d}\right) + \left(\frac{L_D S}{D}\right) \left(\cosh\left(\frac{d}{L_d}\right) - 1\right)}{\left[\left(\frac{L_D S}{D}\right)^2 + 1\right] \sinh\left(\frac{d}{L_d}\right) + 2\left(\frac{L_D S}{D}\right) \cosh\left(\frac{d}{L_d}\right)} \right) \quad (20)$$

τ_{eff} adalah umur *carrier* efektif rata-rata jika rekombinasi permukaan dianggap penting. Bila rekombinasi *interface* merupakan proses rekombinasi radiatif yang dominan, kecepatan rekombinasi permukaan S lebih kecil daripada kecepatan bulk D/L_D ($= L_D/\tau$). Dengan menggunakan syarat ini, maka $L_D S/D \lll 1$, dan tebal lapisan aktif d sama atau lebih kecil daripada panjang difusi L_D , sehingga persamaan (20) menjadi :

$$\frac{1}{t_{eff}} = \frac{1}{t} + \frac{2S}{D} \quad (21)$$

Persamaan (21) memberikan reduksi umur disebabkan oleh rekombinasi *interface* . Pereduksian umur ini tentu menurunkan efesiensi kuantum internal.

Jika α_λ adalah koefisien absorpsi pada panjang gelombang λ dari bahan lapisan aktif, maka daya optis maksimum dalam *p-n junction* pada panjang gelombang ini adalah :

$$P = \frac{hc}{I t_r} \int_0^d \Delta n(x) e^{-\alpha_\lambda x} dx \quad (22)$$

Masukan persamaan (18) ke persamaan (22) maka didapatkan :

$$P = \frac{hc}{I t_r} h_i^{dh} J \quad (23)$$

$$h_i^{dh} = \frac{h_0}{2} \left(\left(\frac{L_D S}{D} \right)^2 + 1 \right) \sinh \left(\frac{d}{L_d} \right) + 2 \left(\frac{L_D S}{D} \right) \left(\cosh \left(\frac{d}{L_d} \right) \right)^{-1} \quad (24)$$

$$- \left(\left(\frac{1 + \frac{L_D S}{D}}{1 + a_1 L_D} \right) \left(1 - \exp \left(\frac{-d(1 + a_1 L_D)}{L_D} \right) \right) e^{\frac{d}{L_D}} - \left(\frac{1 - \frac{L_D S}{D}}{1 - a_1 L_D} \right) \left(1 - \exp \left(\frac{d(1 - a_1 L_D)}{L_D} \right) \right) e^{-\frac{d}{L_D}} \right)$$

h_i^{dh} adalah efisiensi kuantum internal akibat rekombinasi *interface* dan rugi absorpsi. η_0 adalah efisiensi kuantum internal pada $S = 0$ dan $\alpha_\lambda = 0$ (persamaan (10)) dan dh adalah *double-hetero-struktur LED*.

Dengan cara yang sama, umur rekombinasi total $\tau_{eff}(\alpha\lambda)$ jika rugi absorpsi diperhitungkan, dapat diperoleh dengan mengandaikan kerapatan elektron rata-rata pada lapisan aktif :

$$\overline{\Delta n(a_1)} = \frac{1}{a_1} \int_0^d \Delta n(x) e^{-a_1 x} dx = \frac{J t_{eff}(a_1)}{q d} \quad (25)$$

dengan membandingkan persamaan (23), (24) dan (25) maka :

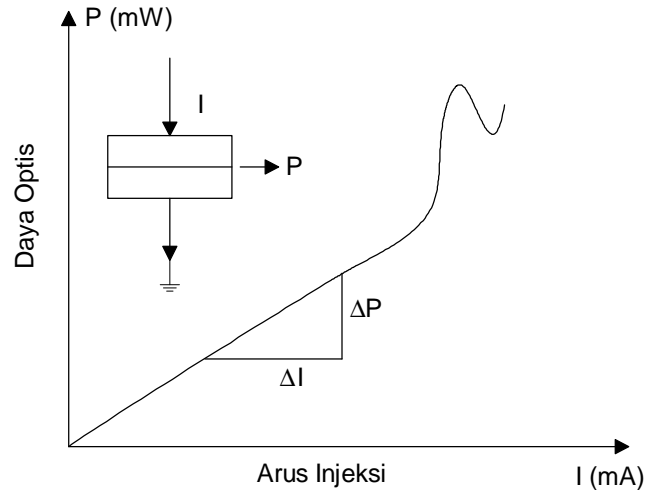
$$t_{eff}(a_1) = h_i^{dh} t_r \quad (26)$$

LED Untuk Komunikasi Serat Optik

LED digunakan sebagai sumber optik untuk sistem komunikasi optik dengan kecepatan data (*data rate*) kurang dari 50 Mb/s dan jenis serat optik multi mode. Daya optis yang dibutuhkan sekitar sepuluh mikro-watt, dalam pengoperasiannya dibutuhkan rangkaian *drive* yang sederhana, tidak memerlukan rangkaian stabilisator untuk panas atau optik. Dalam penggunaan *LED* sebagai sumber optik untuk komunikasi optik perlu diperhatikan beberapa besaran berikut :

- Efisiensi Devais

Emisi cahaya yang dibangkitkan di dalam lapisan aktif pada *LED* merupakan hasil mekanisme emisi spontan sehingga karakteristik daya optis keluaran terhadap arus injeksi diperlihatkan pada gambar (9).



Gambar (9)

$$\text{Efisiensi Devais : } h_{dev} = \frac{\Delta P}{\Delta I} \left(\frac{mW}{mA} \right) \quad (27)$$

- **Kapabilitas Modulasi**

Respon frekuensi dari *LED* dibatasi oleh kapasitansi difusinya yang terjadi akibat adanya *carrier* yang diinjeksikan di dalam daerah lapisan aktif. Jika arus kendali dimodulasi pada frekuensi ω , intensitas dari keluaran optis akan menjadi :

$$I(\omega) = I_0 \left(1 + (\omega \tau_{eff})^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (28)$$

dimana I_0 adalah intensitas yang dipancarkan pada frekuensi modulasi nol dan τ_{eff} adalah umur *carrier* efektif. *Bandwidth* modulasi dari *LED* didefinisikan sebagai *bandwith* 3-dB dari daya listrik yang terdeteksi yang menghasilkan sinyal optis yang termodulasi. Karena daya sinyal listrik yang terdeteksi sebanding dengan $I^2(\omega)$, *bandwidth* modulasi didefinisikan sebagai *band*-frekuensi pada $P(\omega) = \frac{P(0)}{2}$ dan

ekivalen dengan $I^2(\omega) = \frac{I^2(0)}{2}$, sehingga *bandwidth* modulasi 3-dB menjadi :

$$\Delta \omega = \frac{1}{\tau_{eff}} \quad (29)$$

Parameter penting lainnya adalah *Power Bandwidth Product (PBP)* :

$$PBP = \Delta w.P = \frac{1}{t_{eff}} \left(\frac{hc}{qt} \right) n^{th} J \quad (30)$$

Dengan menggunakan persamaan (xx) maka PBP menjadi :

$$PBP = \Delta w.P = \frac{hc}{ql} \frac{1}{t_r} J \quad (31)$$

Respon Transien

Diasumsikan bahwa kapasitansi muatan ruang persambungan C_s bervariasi lebih lambat terhadap arus daripada kapasitansi difusi C_d sehingga C_s dapat dianggap konstan. Nilai tipikal C_s antara 350 – 1000 pF untuk arus kecil sampai menengah. Waktu bangkit (*rise time*) untuk titik setengah arus (setengah daya) pada *LED* adalah :

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{C_s}{bI_p} \ln \left(\frac{I_p}{I_s} \right) + t \ln(2) \quad (32)$$

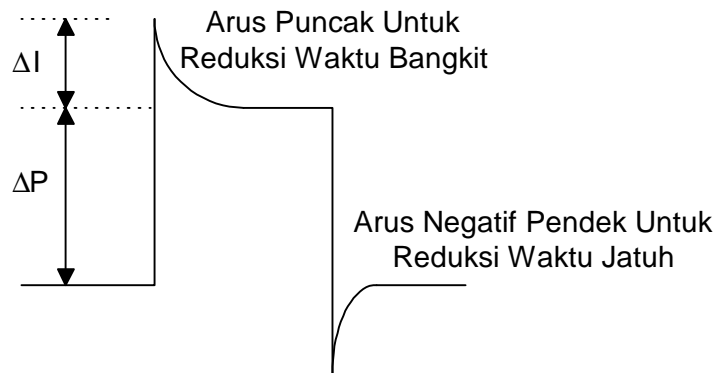
dan waktu bangkit untuk naik dari 10 % - 90 % adalah :

$$t_{10-90} = \left(\frac{2C_s}{bI_p} + t \right) \ln(9) \quad (33)$$

dimana $b = \left(\frac{q}{2k_B T} \right)$, I_p = amplitudo dari arus searah yang digunakan *LED*, I_s = arus saturasi dioda, dan τ = umur *carrier* minoritas. Pada arus yang tinggi, waktu bangkit tergantung hanya pada umur *carrier* :

$$t_{\frac{1}{2}} = t \ln(2) \quad (34)$$

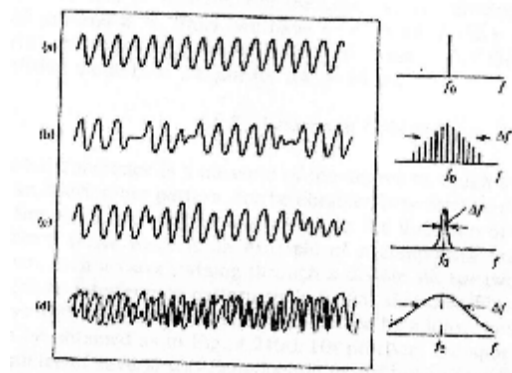
$$t_{10-90} = t \ln(9) \quad (35)$$



Gambar (10)

Koherensi

Kata koherensi menyatakan karakteristik cahaya yang diradiasikan. Tingkat koherensi adalah sebuah ukuran dari kemampuan bagian-bagian yang berbeda dari barisan gelombang untuk berinterferensi satu sama lain dan dapat dinyatakan didalam istilah *spatial coherence* dan *temporal coherence*. *Temporal coherence* dari sebuah gelombang menyatakan kesempitan spektrum frekuensinya dan tingkat keteraturan dari barisan gelombang, hal ini diilustrasikan pada gambar 11. Cahaya koheren sempurna, seperti pada gambar 11 bagian a) ekuivalen dengan sebuah barisan gelombang satu frekuensi dengan spektrum frekuensinya dapat dinyatakan hanya dengan satu garis, monokromatik. Sedangkan sebuah gelombang dengan beberapa komponen frekuensi, atau sebuah gelombang yg terdiri dari penggabungan barisan gelombang pendek acak seperti pada gambar 11 bagian d) dikatakan tidak koheren. Secara praktis sangat sulit untuk mendapatkan cahaya yang koheren sempurna seperti pada gambar 11 bagian a).



Gambar (11)

Barisan gelombang yang spektrumnya hampir terdiri dari satu frekuensi tapi lebarnya berhingga atau dengan sedikit fluktuasi amplitudo dan fase biasanya disebut *quasi koheren*. Anggap lebar spektrum adalah Δf (di dalam frekuensi) atau Δl (di dalam panjang gelombang), panjang koherensi l_c yang artinya adalah panjang sepanjang dimana efek interferensi di dalam arah sumbu mungkin didapatkan, dinyatakan dengan rumus :

$$l_c = \frac{c}{2n\Delta f p} = \frac{l^2}{2p n \Delta l} \quad (36)$$

$$\Delta f = \frac{c}{l^2} \Delta l \quad (37)$$

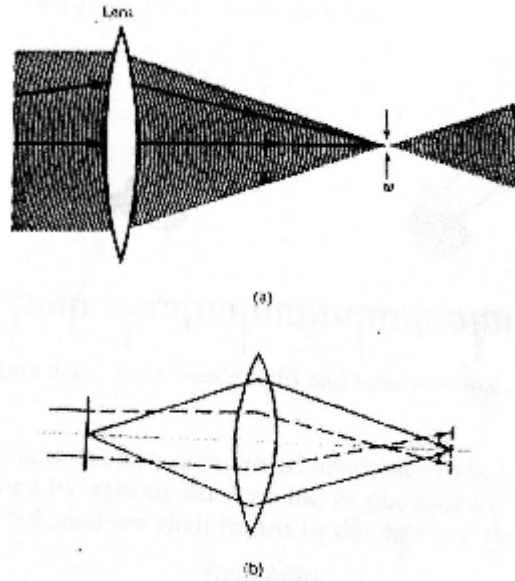
dimana n adalah indeks bias didalam medium perambatan, c adalah kecepatan cahaya di dalam ruang hampa. Untuk *LED* GaAs, $\Delta l = 30 \text{ nm}$ maka $l_c = 3.8 \text{ mm}$.

Spatial coherence adalah sebuah ukuran dari tingkat dimana terjadi interferensi yaitu sebuah pola interferensi dapat diperoleh diantara dua bagian berbeda dari gelombang di dalam sebuah permukaan yang tegak lurus terhadap arah perambatan. Sebuah gelombang datar serba sama adalah contoh gelombang *Spatial coherence* sempurna: sehingga jika melewati sebuah celah ganda menghasilkan sebuah pola interferensi seperti pada gambar (12).



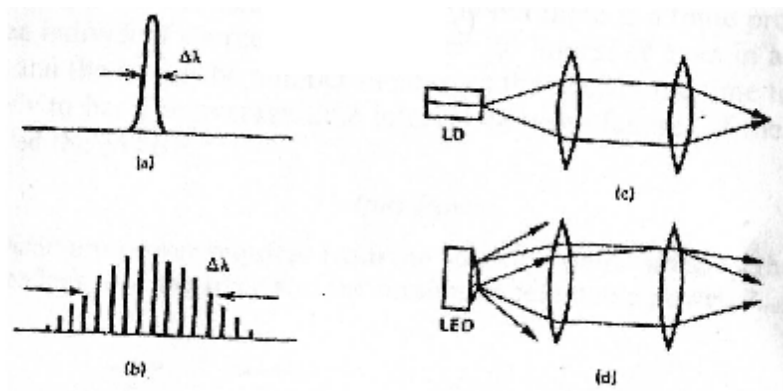
Gambar (12)

Juga, jika sebuah gelombang dengan muka gelombang serba sama difokuskan oleh sebuah lensa, maka titik fokus dapat diperoleh seperti pada gambar (13.a) (secara praktis, titik ini menyebar sepanjang diameter sebesar beberapa panjang gelombang disebabkan oleh difraksi).



Gambar (13)

Sebuah gelombang yang tidak koheren dimana merupakan campuran dari gelombang acak yang merambat pada arah yang berbeda-beda tidak dapat difokuskan pada satu titik, seperti pada gambar (13.b). Gelombang yang tidak koheren dapat dipikirkan sebagai campuran acak dari banyak gelombang datar atau gelombang dengan muka gelombang yang kompleks. Emisi dari *LED* memiliki sedikit *coherence*, muka-gelombangnya memiliki distribusi yang kompleks dan acak. Pada gambar (14.c), gelombang yang dipancarkan *temporal* dan *spatial coherence* dengan sangat baik, sedangkan gelombang yang dipancarkan *LED* seperti pada gambar (14.d) memiliki sedikit *temporal* dan *spatial coherence* sehingga tidak dapat difokuskan ke dalam sebuah titik.



Gambar (14)

Kesimpulan

1. Emisi cahaya pada suatu bahan terjadi karena berpindahnya elektron dari level energi tinggi ke energi rendah. Emisi cahaya yang terjadi bisa secara spontan atau distimulasi.
2. Frekuensi (panjang gelombang) cahaya yang diemisikan ditentukan oleh selisih level energi dimana terjadinya transisi.
3. Pada bahan semikonduktor yang berperan dalam proses emisi cahaya adalah pita konduksi dan pita valensi. Cahaya diemisikan ketika terjadi transisi dari pita konduksi ke pita valensi dimana elektron berekombinasi dengan *hole*. Transisi dapat terjadi secara langsung dan tidak langsung. Pada transisi langsung cahaya diemisikan dengan mudah sedangkan pada transisi tidak langsung menyebabkan probabilitas cahaya yang diemisikan lebih kecil/menjadi sulit terjadi.
4. Panjang gelombang cahaya emisi pada bahan semi-konduktor bergantung pada gap energi antara pita energi konduksi dan valensi, dengan tersedianya variasi bahan-bahan semikonduktor maka cahaya yang diemisikan memuat hampir semua spektrum dari daerah tampak sampai daerah dekat infra-merah.
5. Agar terjadi transisi langsung maka diperlukan senyawa kimia semikonduktor tertentu, senyawa semikonduktor *ternary* dan *quaternary* memberikan berbagai variasi panjang gelombang cahaya yang diemisikan.
6. *LED* merupakan persambungan semikonduktor tipe-*p* dan tipe-*n* dimana cahaya diemisikan ketika terjadi rekombinasi antara *hole* dan elektron pada daerah persambungan, hal ini terjadi jika *LED* diberi bias maju. Spektrum panjang gelombang dari *LED* bergantung pada bahan semi-konduktor tipe-*p* dan tipe-*n* yang digunakan dan struktur persambungannya.
7. *LED* digunakan sebagai sumber optik untuk komunikasi optik, jenis serat optik multimode dengan *data rate* kurang dari 50 Mb/s, namun memiliki keuntungan dalam pengoperasiannya dibutuhkan rangkaian *drive* yang sederhana, tidak memerlukan rangkaian stabilisator untuk panas atau optik.
8. Cahaya yang dipancarkan *LED* memiliki sedikit *temporal* dan *spatial coherence*.

Daftar Pusaka

C. Palais, Joseph : Fiber Optic Communications

<http://www.howstuffworks.com>

<http://www.tpub.com>

Iga, Kenichi: Process Technology for Semiconductor Lasers, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

P. Agrawal, Govind : *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley & Sons, Inc

Saleh, B.E.A : *Fundamentals Of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc

Suematsu, Yasuharu, "Introduction to Optic Fiber Communications", OHM Inc., 1976

Young, Matt : *Optics and Lasers*, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1984