BAB II

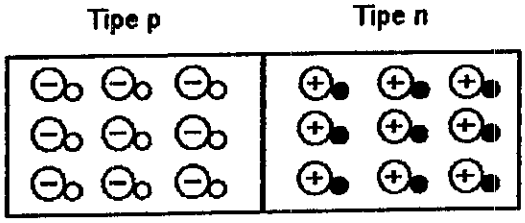
TEORI DASAR

2.1. Teori sambungan pn (pn junction).

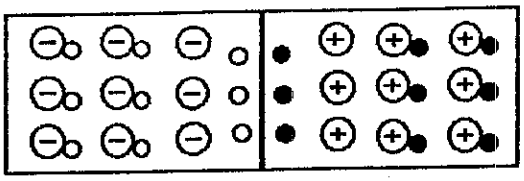
Bila sambungan pn baru terbentuk, pembawa-pembawa (hole dan elektron) berdifusi menuju daerah yang konsentrasi pembawa lebih rendah dan kemudian berekombinasi. Misalnya hole pada daerah tipe p yang mempunyai konsentrasi lebih tinggi berdifusi ke hole pada daerah tipe-n yang konsentrasinya lebih rendah, maka aseptor akan diionisasikan negatif dalam daerah tipe-p yang kemudian membentuk daerah muatan ruang negatif. Hal yang sama terjadi juga pada elektron, donor diionisasikan positif yang berakhir pada daerah muatan ruang positif. Proses ini membangkitkan **arus difusi.** Proses difusi membangkitkan medan listrik yang dimulai dari ruang bermuatan positif berakhir pada ruang bermuatan negatif. Medan listrik ini membangkitkan **arus hanyut** (drift current), medan listrik kemudian menghambat elektron dan hole berdifusi lebih lanjut karena arahnya berlawanan. Dan di dapat keseimbangan (equilibrium) antara difusi dan hanyutan. Pada daerah muatan ruang yang menghasilkan medan listrik pada dasarnya bebas dari pembawa muatan disebut *daerah deplesi* atau *daerah transisi*. Dalam daerah ini terdapat medan listrik walaupun pada sambungan pn tidak diberi tegangan. Medan ini disebut *medan dalam* atau *medan built_in*.

Gambar 2.1 menunjukkan proses yang disederhanakan dalam bentuk bidang, (a.) menggambarkan hubungan tepat setelah terbentuk, (b) medan listrik bertambah kuat bila lebih banyak pembawa berdifusi dan berekombinasi, (c) dalam keadaan seimbang antara difusi dan hanyutan, dimana $-x_p$ lebar daerah transisi tipe p, x_n lebar daerah transisi tipe n.

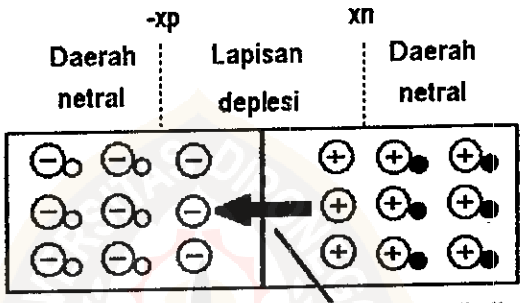
This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)



(a). Langsung sesudah pembentukan



(b) Pembawa berdifusi dan berekombinasi



(c) Keadaan seimbang

Gambar 2.1 Proses pembentukan hubungan pn , - menyatakan sebuah ion aseptor dan O sebuah hole

+ menyatakan sebuah ion donor dan ● sebuah elektron

Dalam keadaan seimbang rapat arus elektron Jn sama dengan nol.

$$J_n = 0 = q\mu_n n\varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} \quad \text{.....(2.1)}$$

q = muatan elektron = 1.6×10^{-19} C

μ_n = mobilitas elektron (m^2 /Volt.dtk).

ε = kuat medan listrik (Volt/m)

dan besar kuat medan listrik,

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dx} = -\left(\frac{kT}{qn_0}\right)\frac{dn_0}{dx} \quad \text{.....(2.2)}$$

T = temperatur (^oK)

n_o = rapat elektron dalam keseimbangan (cm^{-3})

k = konsatanta Boltzman = $8{,}63 \times 10^{-5}$ eV/^oK

Jika persamaan (2.2) diintegral pada daerah transisi dari $-x_p$ sampai x_n, besarnya medan dalam sepanjang sambungan, ϕ_i adalah :

$$\phi i = \left(\frac{kT}{q}\right)\ln\frac{N\,d\,N\,a}{n\,i^2} \quad \text{.....(2.3)}$$

ni = konsentrasi pembawa intrisik (cm^{-3})

Nd = konsentrasi doping tipe n (cm^{-3})

Na = konsentrasi doping tipe p (cm^{-3})

Untuk menentukan lebar daerah muatan ruang (total daerah transisi) x_d, dilakukan dengan cara berikut. Muatan per unit luas pada daerah transisi tipe p sama dengan muatan per unit luas daerah transisi pada tipe n.

$$Nd\,x_n = Na\,x_p \quad \text{.....(2.4)}$$

Dari persamaan Poisson's

$$-\frac{d\phi^2}{dx^2} = \left(\frac{q}{\varepsilon_s}\right)\left[p(x) - n(x) + Nd(x) - Na(x)\right] \quad \text{.....(2.5)}$$

ε_s = permitivitas silikon = 1.036×10^{-12} F cm^{-1}

p(x) = rapat hole pada jarak x (cm^{-3})

n(x) = rapat elektron pada jarak x (cm^{-3})

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

P(x) dan n(x) bernilai nol dalam daerah muatan ruang sehingga penyelesaian persamaan (2.5) adalah

$$\phi(x_n) - \phi(x_p) = \phi_i = \left(\frac{q}{2\varepsilon_s}\right)\left(Nd\, x_n^2 + Na\, x_p^2\right) \quad \text{.....(2.6)}$$

Dari persamaan (2.6) di dapat x_d,

$$X_d = X_n + X_p = \left[\left(\frac{2\varepsilon_s \phi_i}{q}\right)\left(\frac{1}{Na} + \frac{1}{Nd}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(2.7)}$$

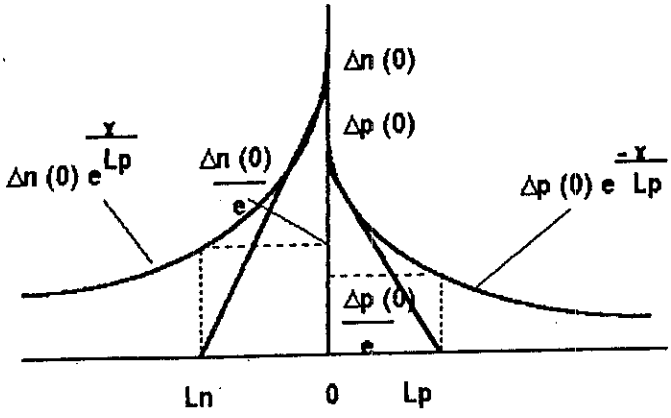
Jika tegangan bias balik (reverse bias voltage), -Va diterapkan untuk sambungan pn lebar daerah transisi x_d menjadi,

$$Xd = \left[\left(\frac{2\varepsilon_s}{q}\right)\left(\frac{1}{Nd} + \frac{1}{Na}\right)(\phi_i - Va)\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(2.8)}$$

Lebar lapisan deplesi x_d menjadi lebih kecil dengan bertambahnya bias maju.

Gambar 2.2 menunjukkan distribusi konsentrasi pembawa minoritas dalam daerah p dan daerah n. Konsentrasi dari pembawa menurun secara eksponensial terhadap jarak x dari sambungan (x = 0).

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)



Gambar 2.2 Distribusi konsentrasi pembawa minoritas dalam daerah tipe-p dan tipe-n.

Tempat dimana harga konsentrasi mencapai 1/e kali harga konsentrasi pembawa minoritas pada x = 0 adalah x = Lp dan x = Ln yang disebut *panjang difusi*. Dalam hal ini $Lp = \sqrt{Dp\tau p}$ dan $Ln = \sqrt{Dn\tau n}$, dimana Dp dan Dn masing-masing koefisien difusi daerah p dan daerah n, τp dan τn masing-masing waktu hidup elektron pada daerah n dan waktu hidup hole pada daerah p.

2.2. Difusi.

Arus hole dari tipe p mengalir menuju ke daerah tipe n karena difusi. Difusi merupakan statistik alamiah yang berelasi dengan gerakan acak partikel energi. Jika terdapat perbedaan konsentrasi partikel, maka ada aliran partikel yang mengalir dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah. Hubungan matematika yang mengembangkan masalah difusi disebut hukum Fick's, hukum Fick's pertama bersesuaian dengan rapat arus partikel dengan gradien konsentrasi.

$$f = -D\frac{\partial N}{\partial x} \quad \text{.....} (2.9)$$

f = fluksi dari atom ketidakmurnian yang melalui permukaan (m^2s^{-1})

D = konstanta difusi (m^2s^{-1})

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

N = konsentrasi atom ketidakmurnian per satuan volume

x = jarak dari permukaan

Hukum Fick's kedua menggunakan keseimbangan untuk arus partikel yaitu

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial J_N}{\partial x} \quad \text{.....(2.10)}$$

Didapat

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial N}{\partial x}\right) \quad \text{.....(2.11)}$$

maka didapat persamaan

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad \text{.....(2.12)}$$

Persamaan (2.12) merupakan hukum Fick kedua. ,

Untuk diffusan ideal (D tidak bergantung x) persamaan (2.12) dapat diselesaikan dengan beberapa syarat batas. Dua dari beberapa situasi dapat diterapkan pada keadaan tersebut, pertama bila wafer semikonduktor didifusi dengan menggunakan sumber ketidak murnian yang tidak terbatas disebut dengan "difusi sumber konstan". Keadaan kedua bila wafer semikonduktor didifusi dengan menggunakan sumber difusi yang jumlahnya terbatas disebut dengan "difusi sumber terbatas". Untuk difusi sumber konstan persamaan yang diberikan adalah:

$$N(x,t) = No\ \mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \text{.....(2.13)}$$

dimana N(x.t) konsentrasi ketidak murnian pada titik x (jarak dari permukaan) pada waktu t, No konsentrasi ketidak murnian pada permukaan (x=0), dan D koefisien difusi.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

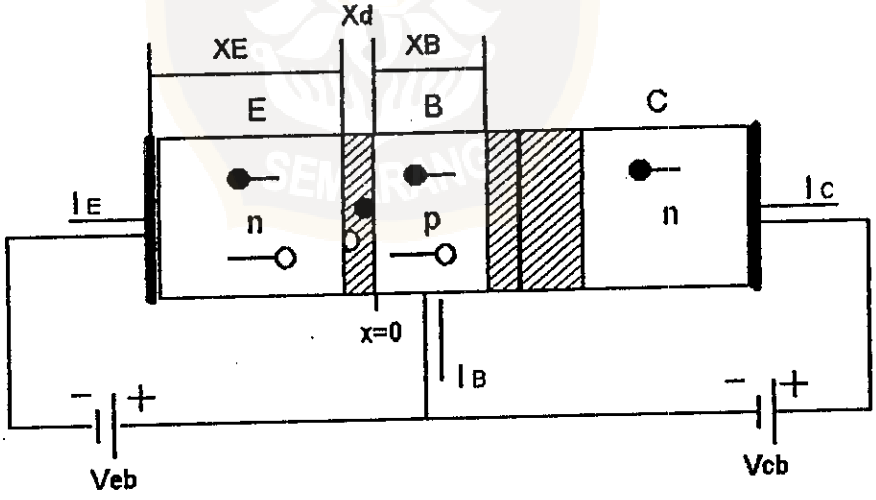
Untuk difusi sumber terbatas persamaannya :

$$N(t,x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt} \quad \text{.....(2.14)}$$

Q merupakan konsentrasi ketidak murnian atom per luas permukaan pada x = 0. Persamaan ini dikenal sebagai distribusi Gauss. Untuk distribusi erfc konsentrasi permukaan tidak bergantung pada waktu difusi.

2.3. Teori transistor.

Dengan membentuk dua sambungan pn pada sebuah kristal tunggal silikon, dimana daerah p sangat tipis dibandingkan daerah n maka terjadi transistor sambungan bipolar npn (gb.2.3). Pada gambar tersebut tegangan antara base-emiter dikenal dengan V_{be} dan tegangan antara base kolektor dengan Vbc. X_B merupakan lebar base aktif, X_E merupakan lebar emiter, dan Xd merupakan lebar lapisan deplesi. Ic, Ib dan Ie masing-masing merupakan arah arus kolektor, arus base, dan arus emiter.



Gambar 2.3 Strukture transistor npn.

Emiter dibias maju dan kolektor dibias mundur, pada saat bias maju diberikan pada dioda emiter, elektron-elektron dalam emiter belum memasuki base. Jika Veb

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

lebih besar daripada medan dalam (built-in), maka elektron emiter akan memasuki daerah base. Di daerah base elektron ini akan masuk daerah muatan ruang kolektor dan didorong medan listrik muatan ruang menuju kolektor Tidak semua elektron-elektron emiter dalam base menuju daerah muatan ruang kolektor namun sebagian elektron-elektron berekombinasi dengan hole-hole pada daerah base. Pada daerah base hole-hole mengalir menuju emiter dan sebagian lagi menuju daerah muatan ruang emiter-base.

Dalam hal ini arus emiter terdiri dari tiga bagian. *Pertama* elektron emiter yang berdifusi ke daerah base dan sebagian elektron berekombinasi dengan hole base sebagian menuju daerah sambungan kolektor, *kedua* hole base yang berekombinasi dengan elektron pada daerah muatan ruang, *ketiga* hole base yang berdifusi di daerah emiter dan berekombinasi dengan elektron emiter. Komponen pertama dan ketiga merupakan komponen diluar daerah muatan ruang disebut dengan *arus difusi* dan kompenen kedua merupakan komponen di daerah muatan ruang disebut *arus rekombinasi*. Untuk komponen elektron emiter yang berdifusi ke daerah base yaitu :

$$I_{diff,B} = qD_{nB}\frac{n_i^2}{N_A X_B} e^{V_m/kT} A_j \quad \text{.....} (2.15)$$

dimana D_{nB} = koefisien difusi elektron pada base

N_A = konsentrasi aseptor base

X_B = lebar base

A_j = luas sambungan emiter-base

Komponen hole base yang berdifusi ke emiter dan berekombinasi yaitu :

$$I_{diff,E} = q\,D_{pE}\frac{n_i^2}{N_D X_E} e^{qV_m/kT} A_j \quad \text{.....} (2.16)$$

dimana D_{pE} = koefisien difusi hole pada emiter

N_D = konsentrasi aseptor emiter

X_E = lebar emiter

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Komponen hole base yang berekombinasi pada daerah transisi emiter-base

$$I_{rek} = \tfrac{1}{2}\, q\, \frac{n_i}{\tau_o}\, X_d\, e^{qV_{EB}/2kT}\, A_j \quad \text{.....(2.17)}$$

dimana τ_o = waktu hidup hole dalam emiter

X_d = lebar daerah transisi emiter-base

Elektron yang diinjeksikan dari emiter ke kolektor jauh lebih besar dari pada elektron yang diinjeksikan ke base atau dapat dikatakan arus kolektor hampir sama dengan arus emiter. *Alpha* transistor menyatakan dekatnya harga kedua arus tersebut, didefinisikan sebagai

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad \text{.....(2.18)}$$

Dapat dikatakan α merupakan penguatan arus dengan base dibumikan. Semakin tipis dan semakin sedikit base didop semakin besar harga α. Secara ideal, jika semua elektron emiter diinjeksikan ke daerah kolektor, harga α = 1. *Beta* transistor juga didefinisikan sebagai perbandingan arus kolektor dengan arus base,

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{.....(2.19)}$$

Atau Beta merupakan penguatan arus dengan emiter dibumikan.

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{1}{1/\alpha - 1} \quad \text{.....(2.20)}$$

Penguatan arus dengan base dibumikan α, dapat ditulis sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_C}{I_{nC}}\,\frac{I_{nC}}{I_{nE}}\,\frac{I_{nE}}{I_E}$$

$$\alpha = M\, \alpha_T\, \gamma \quad \text{.....(2.21)}$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

M merupakan perbandingan arus kolektor total dengan arus elektron yang memasuki daerah muatan ruang sambungan kolektor-base dari base atau disebut *faktor multiplikasi kolektor.*

$$M = \frac{1}{1-\left(BV_{CEO}/BV_{CBO}\right)^{n}} \quad \text{.....} (2.22)$$

Dari persamaan (2.22) dengan menganggap $\alpha_T = 1$, $\gamma = 1$ dan n = 4 untuk silikon tipe n didapat :

$$BV_{CEO} \approx \frac{BV_{CBO}}{\sqrt[4]{\beta}} \quad \text{.....} (2.23)$$

α_T merupakan perbandingan elektron emiter yang melewati base pada sisi daerah muatan ruang sambungan kolektor-base dengan elektron emiter yang memasuki base dari daerah muatan ruang sambungan emiter-base atau disebut *faktor transport base.*

$$\alpha_T = \sec h\frac{X_B}{L_n} \approx \frac{1}{1+X_B^2/2L_n} \quad \text{.....} (2.24)$$

dengan $L_n = (D_n\,\tau_n)^{1/2}$

D_n = koefisien difusi elektron

τ_n = waktu hidup elektron

γ perbandingan elektron emiter yang memasuki base dari daerah muatan ruang sambungan emiter-base dengan arus emiter total atau disebut *efisiensi emiter.*

$$\gamma = \frac{I_{diff,B}}{I_{diff,B} + I_{diff,E} + I_{rek}} \quad \text{.....} (2.25)$$

Jika dua sambungan (sambungan emiter-base dan sambungan kolektor-base) cukup dekat elektron emiter mencapai sambungan kolektor melalui daerah transisi kolektor dan didorong medan daerah transisi kolektor menuju kolektor. Besar arus

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

yang terjadi pada sambungan kolektor-base hampir menyamai besar arus pada sambungan emiter-base. Prinsip ini yang mendasari transistor sebagai penguat (amplifier).

2.4. Respon frekuensi.

Batas frekuensi dari transistor harus diketahui , tidak hanya karena alasan ekonomis namun penguatan dayanya akan turun pada frekuensi tertentu. Karakteristik yang penting dalam menentukan besarnya frekuensi transistor npn ialah waktu yang dibutuhkan elektron dalam perjalanannya dari emiter ke kolektor. Ada banyak faktor yang membatasi respon frekuensi tersebut. Faktor-faktor itu adalah :

2.4.1. Konstanta waktu lintas emiter

Konstanta waktu lintas emiter didefinisikan sebagai ,

$$\frac{1}{\omega_e} = r_e C_{Te} \quad \text{.....(2.26)}$$

r_e = resistansi emiter

C_{Te} = kapasitansi daerah transisi emiter

dengan ,

$$r_e = \frac{kT}{qI_E} \quad \text{.....(2.27)}$$

$$C_{Te} = A_e\sqrt{\frac{qx\varepsilon_0 N_B}{V_T}} \quad \text{.....(2.28)}$$

Ae = luas emiter

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.4.2. Waktu transit base.

Faktor kedua adalah waktu yang diperlukan elektron dalam perjalanannya sepanjang base

$$\frac{1}{\omega_b} = \frac{X_B^2}{2,43\, D_{nB} \ln\left(N_{aB} / N_{dc}\right)} \quad \text{.....(2.29)}$$

dengan ,

D_{nB} = konstanta difusi elektron dalam base

X_B = lebar base aktif

N_{aB} = konsentrasi impurity base pada junction emiter

N_{dC} = konsentrasi epitaksi daerah kolektor

2.4.3. Waktu transit lapisan deplesi kolektor

Signal pembawa setelah melewati daerah base akan memasuki lapisan deplesi dari sambungan kolektor yang dibias balik. Pada titik tersebut pembawa mengenai medan listrik kuat sehingga pembawa mengalir secara hanyutan (drift). Besar kecepatan hanyutan pembawa dipengaruhi oleh mobilitas pembawa dan besar medan listrik yang mengenainya. Kecepatan hanyut dari pembawa yang terkena oleh medan listrik mempunyai batas tertentu pada medan tertentu. Untuk silikon batas kecepatannya adalah $8,5 \times 10^6$ cm/s.

$$t_d = \frac{X_m}{v_{sc}}$$

X_m = lebar lapisan deplesi hubungan kolektor ,

v_{sc} = batas kecepatan pembawa

$= 8,5 \times 10^6$ cm/s

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Waktu lintas elektron sesuai dengan waktu transit diperlihatkan Early[1] adalah td /2 sehingga,

$$\frac{1}{\omega_d} = \frac{X_m}{2\ v_{sc}} \quad \text{.....(2.30)}$$

2.4.4. Konstanta waktu lintas kolektor

Konstanta waktu lintas kolektor didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan elektron melewati daerah kolektor adalah sebagai berikut :

$$\frac{1}{\omega_c} = r_{sc}\ C_{Tc} \quad \text{.....(2.31)}$$

Keempat faktor ini yang membatasi respon frekuensi dan dari faktor-faktor ini akan dicari luas emiter yang diperlukan pada bab 3. Frekuensi anguler alpa $\omega_{\alpha b}$ merupakan waktu yang diperlukan elektron yang berjalan dari emiter sampai kolektor.

$$\frac{1}{\omega_{\alpha b}} = \frac{1}{\omega_e} + \frac{1}{\omega_b} + \frac{1}{\omega_d} + \frac{1}{\omega_c} \quad \text{.....(2.32)}$$

Dan frekuensi penguatan f_T merupakan waktu yang diperlukan elektron dari emiter sampai kolektor dengan faktor koreksi.

$$\frac{1}{\omega_{\alpha b}} = \frac{\alpha K_\theta}{2\pi\ f_T} \quad \text{.....(2.33)}$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)