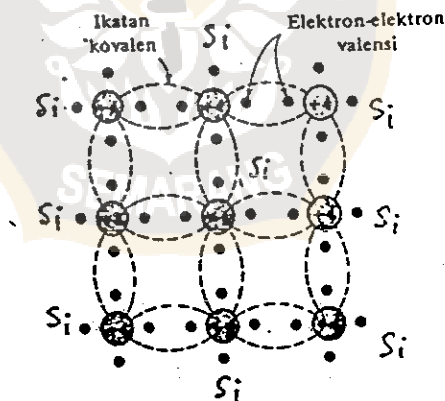


B A B II

T E O R I

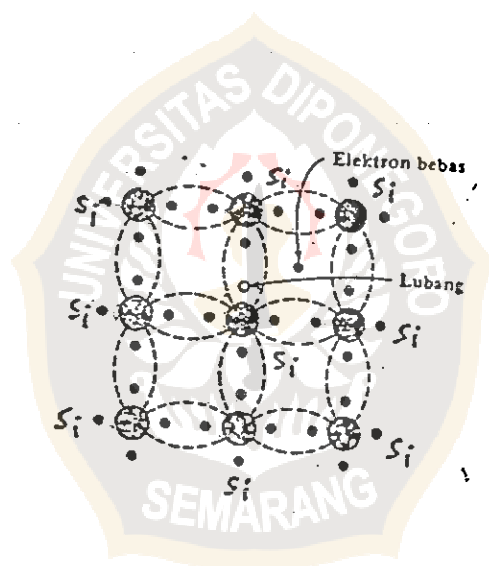
2.1. Elektron dan lubang dalam semikonduktor

Silikon (Si) dan germanium (Ge) merupakan bahan-bahan yang banyak digunakan dalam peralatan semikonduktor. Atom-atom Si dan Ge merupakan atom valensi empat. Dalam kristal atom-atom ini membentuk ikatan kovalen dengan atom-atom tetangga terdekat. Struktur kristal Si dan Ge adalah tetrahedron, satu atom pada setiap ujungnya dan satu atom pada titik pusatnya. (Milman, hal kias) Struktur kristal atom Si diperlihatkan pada gambar 2-1.



Gambar 2-1. Struktur kristal Si dilukiskan dalam dua dimensi.

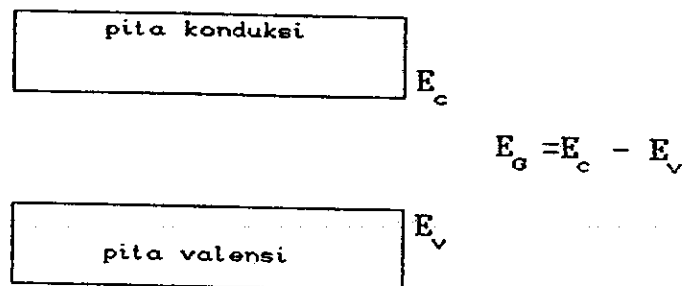
Pada temperatur yang sangat rendah 0°K , kristal Silikon berperilaku sebagai isolator oleh karna tak ada pembawa muatan yang tersedia. ^(Milman, Halkias, 1990) Pada temperatur kamar beberapa ikatan kovalen akan patah oleh energi termal yang diberikan pada kristal, sehingga elektron lepas dari ikatan. Lepasnya elektron dari ikatan menghasilkan elektron bebas dan lubang seperti diperlihatkan pada gambar 2-2. Lubang ini penting oleh karna ia dapat bekerja sebagai pembawa listrik yang sama efektifnya dengan elektron bebas.



Gambar 2-2. Kristal Si dengan satu ikatan kovalen yang patah.

2.2 Pita energi

Dalam zat padat tingkat-tingkat energi elektron dibagi kedalam pita-pita energi. ^(R. F. Pierl) Gambar 2-3. melukiskan pita energi semikonduktor.



Gambar 2-3. Struktur pita energi dari sebuah semikonduktor.

Pita valensi menggambarkan daerah harga-harga energi yang diambil oleh elektron-elektron valensi. Pita konduksi menggambarkan daerah harga-harga energi yang diambil untuk elektron bebas. Daerah antara pita valensi dan pita konduksi disebut daerah terlarang atau energi gap, E_g . Lebar daerah ini sebanding dengan energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron dari ikatan. E_g berkurang dengan naiknya temperatur. Dari eksperimen didapat bahwa E_g menurun secara linier dengan naiknya temperatur diberikan oleh (Milman, Halkias, 1990)

$$E_g = E_{g_0} - \beta T \quad (2.1)$$

dengan E_{g_0} = Energi gap pada temperatur 0° K

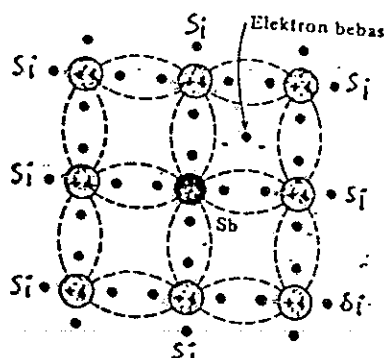
β = Konstanta tak bergantung pada temperatur

Pada temperatur yang sangat rendah pita valensi penuh dan pita konduksi kosong. Jika elektron menerima energi dari luar yang lebih besar dari celah energi, $E_g = E_c - E_v$ maka elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga menghasilkan elektron bebas pada pita konduksi dan lubang pada pita valensi.

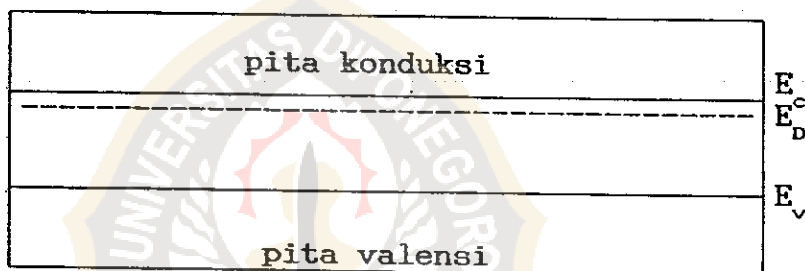
2.2. Semikonduktor Ekstrinsik

Bila pada semikonduktor murni ditambahkan atom tak murnian valensi lima atau tiga maka akan terbentuk semikonduktor yang tak murni atau ekstrinsik.

Bila atom tak murnian valensi lima yang ditambahkan, maka empat dari lima elektron valensi akan membentuk ikatan kovalen dan elektron ke lima akan bebas gambar 2-4. Energi yang diperlukan untuk membebaskan elektron ke lima kira-kira 0,01 eV untuk Ge dan 0,05 eV untuk Si. Karena tak murnian valensi lima memberikan sebuah elektron maka disebut tak murnian donor atau tipe-n. Tingkat energi atom donor sedikit dibawah pita konduksi gambar 2-5. Dalam bahan tipe-n elektron disebut pembawa mayoritas dan lubang disebut pembawa minoritas.

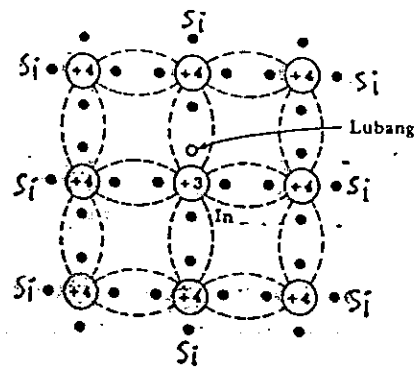


Gambar 2-4.. Kisi kristal dengan satu atom Si digeser oleh atom valensi lima.

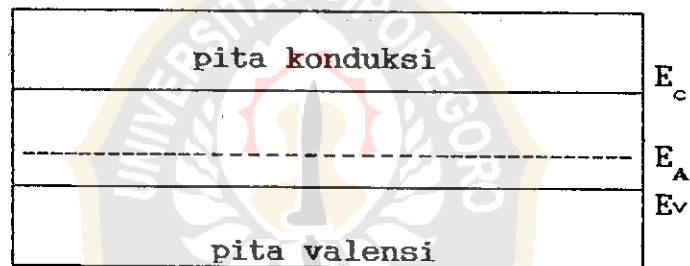


Gambar 2-5. Diagram pita energi semikonduktor tipe-n

Bila atom valensi tiga yang ditambahkan, maka hanya tiga ikatan kovalen yang terisi. Kekosongan yang terjadi membentuk lubang gambar 2-6. Diperlukan energi yang cukup kecil untuk elektron valensi agar dapat mengisi lubang tersebut. Karena tak murnian valensi tiga menghasilkan lubang maka disebut takmurnian akeptor atau tipe-p. Tingkat energi atom akeptor sedikit diatas pita valensi gambar 2-7. Dalam tipe-p lubang disebut pembawa mayoritas dan elektron disebut pembawa minoritas.



Gambar 2-6. Kisi kristal dengan satu atom Si digeser oleh atom valensi tiga.



Gambar 2-7. Diagram pita energi semikonduktor tipe-p

II.4 Konsentrasi pembawa dalam semikonduktor

Konsentrasi elektron dalam pita konduksi yang energinya terletak antara E dan $E + dE$ diberikan oleh persamaan^(R. F. Pierl)

$$dn = N(E) f(E) dE \quad (2.2)$$

$N(E)$ adalah rapat keadaan elektron dalam pita konduksi yang energinya E

$$N(E) = \frac{4\pi (2m_n)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \quad (2.3)$$

dengan m_n = masa efektif elektron

h = konstanta Planck, $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s

$f(E)$ adalah fungsi Fermi yang diberikan oleh persamaan

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp (E - E_F) / kT}$$

dengan E_F = Tingkat Fermi, eV

k = Konstanta Boltzman, $8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K

Konsentrasi elektron keseluruhan dalam pita konduksi merupakan integral dari persamaan (2.2) pada seluruh pita konduksi ^(R. F. Pierl)

$$n = \int_{E_c}^{E_c} N(E) f(E) dE \quad (2.4)$$

$$n = N_c \exp (E_F - E_c) / kT \quad (2.5)$$

N_c adalah konsentrasi keadaan efektif elektron dalam pita konduksi

$$N_c = \frac{2 (2m_n kT)^{3/2}}{h^3} \quad (2.6)$$

Dengan cara yang sama untuk konsentrasi lubang dalam pita valensi diberikan oleh

$$p = \int_{E_v}^{E_v} N_p(E) f_p(E) dE \quad (2.7)$$

$N_p(E)$ adalah rapat keadaan lubang dalam pita valensi yang energi E

$$N_p(E) = \frac{4\pi (2m_p)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E_v - E} \quad (2.8)$$

dengan m_p adalah masa efektif elektron

Oleh karena lubang merupakan tingkat energi yang kosong maka probabilitas bahwa keadaan dengan energi E kosong diberikan oleh

$$f_p(E) = 1 - f(E)$$

$$f_p(E) = 1 - \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

Hasil integral memberikan konsentrasi lubang keseluruhan dalam pita valensi

$$p = N_v \exp (E_v - E_F)/kT \quad (2.9)$$

dimana N_v adalah konsentrasi keadaan efektif lubang dalam pita valensi, diberikan oleh

$$N_v(E) = \frac{2 (2m_p / kT)^{3/2}}{h^3} \quad (2.10)$$

Persamaan (2.7) dan (2.9) berlaku untuk semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik. (Milman, Halkias, 1990) Untuk semikonduktor murni yang berada dalam kondisi setimbang termal banyaknya elektron bebas dan lubang yang dihasilkan sama banyaknya

$$n = p = n_i \quad (2.11)$$

dengan n_i = konsentrasi intrinsik semikonduktor yang

Untuk bahan intrinsik $E_F = E_i$ sehingga persamaan (2.7) dan (2.9) dapat ditulis⁽⁷⁾

$$n = N_c \exp (E_i - E_c) / kT \quad (2.12)$$

$$p = N_v \exp (E_v - E_i) / kT \quad (2.13)$$

Dengan memecahkan N_c dan N_v dari persamaan (2.12) dan (2.13) didapat

$$n = n_i \exp (E_F - E_i) / kT \quad (2.14)$$

$$p = n_i \exp (E_i - E_F) / kT \quad (2.15)$$

Oleh karena $n = p = n_i$ maka dapat ditentukan besar E_i

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) \quad (2.16)$$

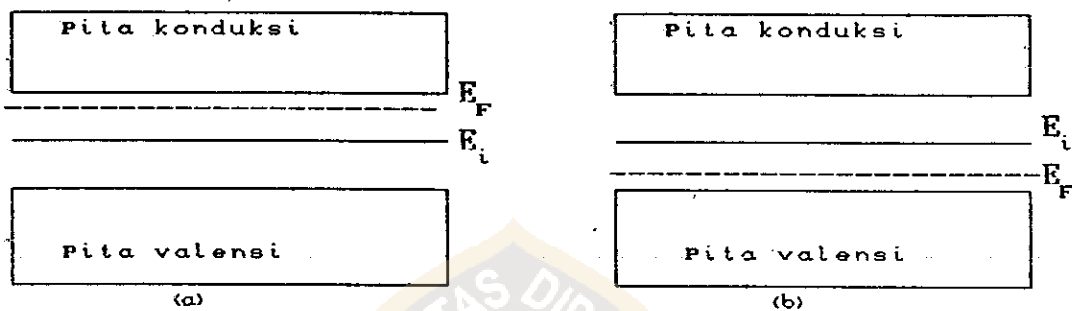
Persamaan diatas memperlihatkan bahwa E_i tepat ditengah-tengah celah energi bila $T = 0^\circ K$ atau $N_c = N_v$. Pada temperatur kamar E_i kira-kira ditengah-tengah E_g .

Untuk bahan tipe-n, tingkat Fermi berada diatas tingkat intrinsik. Dari persamaan (2.14) bila $N_D \gg n$, maka

$$E_F - E_i = kT \ln(N_D / n_i) \quad (2.17)$$

Sedangkan untuk bahan tipe-p tingkat Fermi berada dibawah tingkat intrinsik

$$E_i - E_F = kT \ln(N_A/n_i) \quad (2.18)$$



Gambar 2-8. Tingkat Fermi dalam semikonduktor (a) tipe-n (b) tipe-p

Perkalian rapat eletron bebas dan lubang menghasilkan

$$n_i^2 = N_v N_c \exp - (E_c - E_v)/kT \quad (2.19)$$

karena $E_g = E_c - E_v$ maka persamaan (2.12) menjadi

$$n_i^2 = N_c N_v \exp - E_g/kT \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) berlaku untuk bahan instrinsik dan ekstrinsik. ^(Milman, Halkias, 1990) Dengan memasukkan nilai-nilai fisis untuk N_c, N_v dan mengganti $E_g = E_{g0} - \beta T$ didapat

$$n_i^2 = A_0 T^3 \exp - E_{g0}/kT \quad (2.21)$$

dengan A_0 = Konstanta tak bergantung pada temperatur.

Dalam semikonduktor tipe-p rapat atom akseptor sebanding dengan banyaknya lubang sedangkan dalam tipe-n rapat atom donor sebanding dengan rapat elektron bebas. Bila rapat atom donor N_D dan rapat atom akseptor N_A , maka untuk tipe-p

$$\begin{aligned} N_A &= p_p \\ n_p &= n_i^2 / N_A \end{aligned} \quad (2.22)$$

dan untuk tipe-n

$$\begin{aligned} N_D &= n_n \\ p_n &= n_i^2 / N_D \end{aligned} \quad (2.23)$$

dengan p_n = konsentrasi lubang dalam tipe-n

n_p = konsentrasi elektron dalam tipe-p

2.5. Arus hanyut dan arus difusi

Ada dua mekanisme arus mengalir dalam semikonduktor. pertama adanya aliran muatan yang disebabkan oleh adanya medan listrik yaitu arus hanyut. Kedua adanya gradien konsentrasi yaitu arus difusi.

Rapat arus hanyut untuk elektron dan lubang (A/m^2) diberikan oleh persamaan ^(Milman, Halkias, 1990)

$$\begin{aligned}\vec{J}_n &= q \mu_n n \vec{E} \\ \vec{J}_p &= q \mu_p p \vec{E}\end{aligned}\quad (2.24)$$

Bila rapat arus hanyut disebabkan oleh elektron dan lubang, maka rapat arus hanyut adalah

$$\begin{aligned}\vec{J} &= (\mu_n n + \mu_p p) \vec{E} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}\quad (2.25)$$

μ_n dan μ_p adalah mobilitas elektron dan lubang ($\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$), E adalah medan listrik (V/m) dan σ adalah konduktivitas ($1/\text{ohm}$).

Konsentrasi semikonduktor dapat tidak merata. Adanya perbedaan konsentrasi menyebabkan arus mengalir walaupun tanpa medan listrik. Arus ini disebut arus difusi. Rapat arus difusi untuk lubang dan elektron diberikan oleh

$$\begin{aligned}\vec{J}_n &= q D_n \frac{dn}{dx} \\ \vec{J}_p &= -q D_p \frac{dp}{dx}\end{aligned}\quad (2.26)$$

dengan D_p dan D_n adalah konstanta difusi lubang dan elektron (m^2/s). Mobilitas dan konstanta difusi dihubungkan oleh persamaan Einstein

$$D_p/\mu_p = D_n/\mu_n = V_T \quad (2.27)$$

dengan $V_T = kT/q$, ekuivalen tegangan dari temperatur.

Bila arus dihasilkan oleh arus hanyut dan arus difusi maka rapat arus lubang dan elektron diberikan oleh

$$\begin{aligned} \vec{J}_p &= q \mu_p p \vec{E} - q D_p \frac{dp}{dx} \\ \vec{J}_n &= q \mu_n n \vec{E} + q D_n \frac{dn}{dx} \end{aligned} \quad (2.28)$$

2.6. Muatan pembawa minoritas yang diinjeksikan

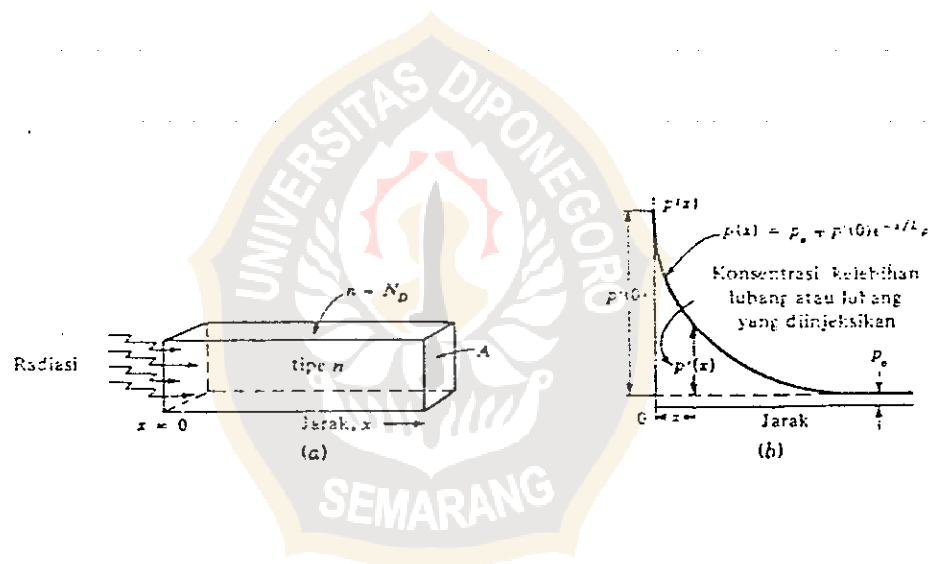
Bila semikonduktor yang berada dalam kondisi setimbang diganggu maka konsentrasi pembawa akan berubah. Umumnya konsentrasi pembawa dalam semikonduktor merupakan fungsi dari waktu dan jarak, diberikan oleh persamaan kontinuitas (Milman, Halkias, 1990)

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_o - p}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n_o - n}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x}$$

Dengan $\partial p/\partial t$ dan $\partial n/\partial t$ adalah kenaikan lubang dan elektron persatuan waktu. p_o dan n_o konsentrasi lubang dan elektron dalam kondisi setimbang dan τ_p dan τ_n adalah waktu lubang

dan elektron sebelum rekombinasi. Gambar 2-9 memperlihatkan batang semikonduktor yang diberikan donor secara merata sedemikian sehingga rapat elektron $n = N_D$ tak bergantung pada posisi. Pada $x = 0$ batang diberikan radiasi. Akibat transfer energi terbentuk pasangan elektron-lubang. Anggap konsentrasi minoritas yang diinjeksikan lebih kecil dari rapat atom donor, $p' \ll n$ (sarat injeksi tingkat rendah). Oleh karena arus hanyut berbanding lurus dengan gradien konsentrasi dan karena $p + p_0 \ll n$ maka arus hanyut lubang dapat diabaikan.



Gambar 2-9. (a) Cahaya jatuh dari sebuah batang semikonduktor yang panjang. (b) konsentrasi lubang (minoritas) $p(x)$ dalam batang sebagai fungsi dari x dari ujung batang.

Dari persamaan kontinuitas, substitusi nilai $J_p = 0$ dan dengan mengambil $dp/dt = 0$ untuk keadaan stasioner, didapat

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p_o - p}{\tau_p D_p}$$

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p'}{L_p} \quad (2.30)$$

dengan $p' = p_o - p$ adalah konsentrasi kelebihan lubang.
 L_p adalah panjang difusi lubang, diberikan oleh

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

Solusi persamaan (2.22) adalah

$$p'(x) = p'(0) \exp -x/L_p \quad (2.31)$$

yang menyatakan penurunan konsentrasi lubang terhadap jarak. Dengan memasukkan persamaan (2.31) ke (2.26) diperoleh Arus difusi minoritas lubang dalam tipe-n diberikan oleh

$$I_{pn}(x) = \frac{A q D_p}{L_p} p'(0) \exp -x/L_p \quad (2.32)$$

Untuk semikonduktor tipe-p dengan cara yang sama, arus difusi minoritas elektron

$$I_{np}(x) = \frac{A q D_n}{L_n} n'(0) \exp -x/L_n \quad (2.33)$$

2.7 .Persambungan p-n

Bila pada semikonduktor murni ditambahkan tak murnian tipe-p pada satu sisi dan tak murnian tipe-n pada sisi yang lain maka akan terbentuk persambungan p-n atau dioda.

Oleh karena pada lintas persambungan terdapat gradien konsentrasi, maka lubang dalam tipe-p akan berdifusi ke tipe-n dan elektron berdifusi ke dalam tipe-p. Akibat proses difusi lubang dekat persambungan tipe-p dan elektron dekat persambungan tipe-n akan menghilang akibat proses rekombinasi, sehingga menghasilkan muatan tak tertutupi. Daerah ini disebut daerah muatan ruang atau daerah transisi, lebarnya kira-kira $0,5 \mu\text{m}$.

Pada daerah muatan ruang, rapat muatan nol dipersambungan, positif disebelah kanan dan negatif disebelah kiri persambungan. Distribusi ini menghasilkan medan listrik internal. Proses difusi berlangsung terus sampai medan listrik cukup kuat untuk menghentikan proses difusi, sehingga tidak ada arus mengalir melewati persambungan dan sistem berada dalam keadaan setimbang.

Adanya medan listrik didaerah muatan ruang menghasilkan perbedaan potensial antara daerah p dan n

yang disebut potensial barrier atau potensial kontak. Karena dioda berada dalam keadaan setimbang arus total haruslah sama dengan nol, dengan demikian dapat ditentukan potensial barrier V_0 . Dengan mengambil $J_p = 0$ dan dengan menggunakan hubungan Einstein didapat

$$E = \frac{V_T}{p} \frac{dp}{dx}$$

karena

$$E = - dV/dx$$

maka

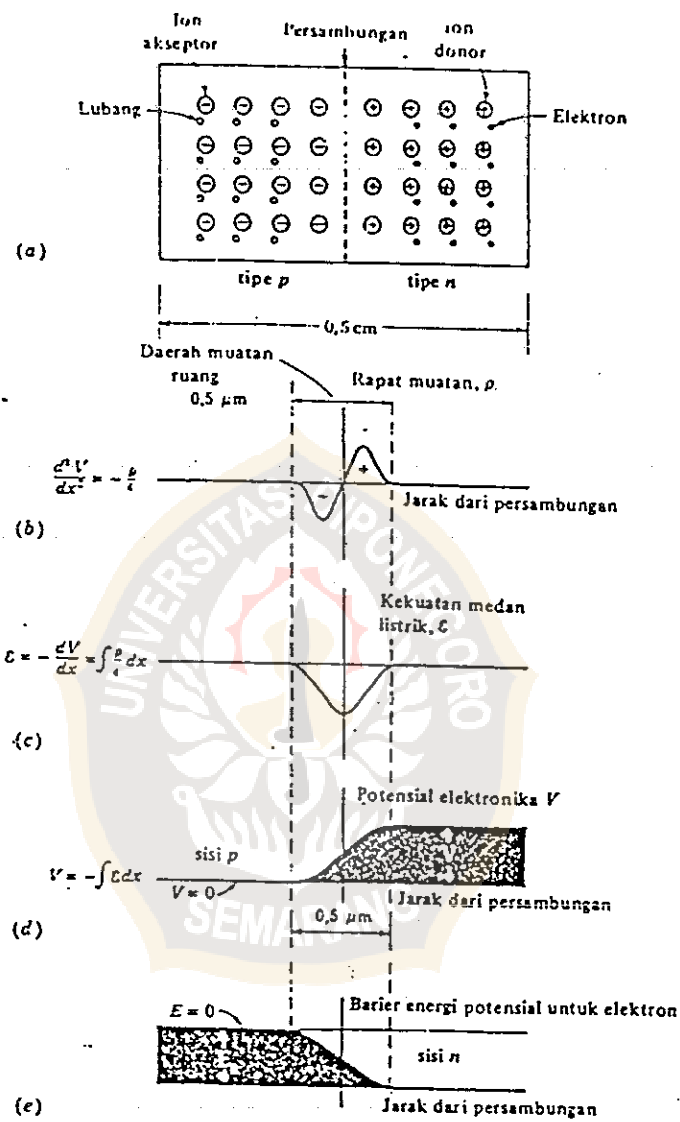
$$dV = - V_T dp/dx \quad (2.34)$$

integral dari persamaan (2.34) menghasilkan

$$V_0 = - V_T \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (2.35)$$

Jika $p_1 = p_{p0}$ adalah konsentrasi lubang dalam kesetimbangan termal didaerah p dan $p_2 = p_{no}$ adalah konsentrasi lubang dalam kesetimbangan termal dalam daerah n ,maka

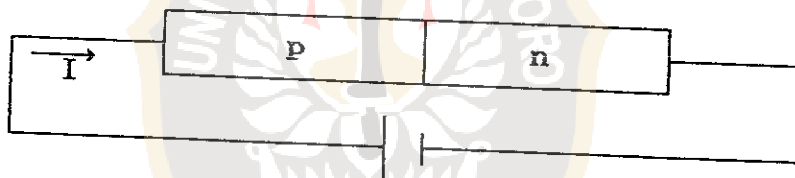
$$V_0 = V_T \ln \frac{p_{p0}}{p_{no}} \quad (2.36)$$



Gambar 2-10. Diagram skematik dari persambungan p-n, termasuk rapat muatan, kekuatan medan listrik dan barrier energi potensial dipersambungan.

2.7.1 Prategangan maju

Suatu tegangan luar yang diterapkan dengan polaritas seperti pada gambar 2-11, disebut prategangan maju. Polaritas seperti ini menurunkan barrier potensial V_0 , sehingga lubang dalam tipe-p melewati persambungan ketipe-n menjadi arus minoritas terinjeksikan kedalam tipe-n. sebaliknya elektron dalam tipe-n menjadi arus minoritas terinjeksikan kedalam tipe-p. Oleh karena lubang bergerak dari kiri kekanan membentuk arus yang sama dengan arus elektron yang bergerak dari kanan ke kiri maka arus total yang melewati persambungan adalah jumlah dari arus minoritas elektron dan lubang.



Gambar 2-11. Persambungan p-n diberi bias maju

2.7.2. Prategangan balik

Bila pada dioda diberikan polaritas tegangan seperti pada gambar 2-12 dioda dikatakan diberi tegangan balik. Polaritas tegangan ini menaikkan potensial barrier V_0 . Kenaikkan ini digunakan untuk mengurangi aliran pembawa mayoritas (lubang dalam tipe-p dan elektron dalam tipe-n),

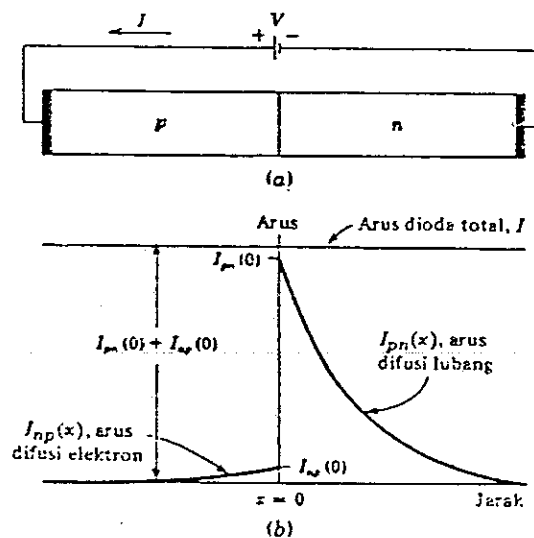
sehingga arus yang dihasilkan sama dengan nol. Akan tetapi energi termal yang diberikan pada semikonduktor menghasilkan sedikit pasangan lubang elektron pada seluruh kristal sehingga menghasilkan pembawa minoritas (lubang dalam tipe-n dan elektron dalam tipe-p). Pembawa minoritas ini mengembara melewati persambungan menghasilkan arus balik I_0 . Arus balik I_0 bertambah dengan naiknya temperatur dan tidak bergantung pada tegangan yang diterapkan.



Gambar 2-12. Persambungan p-n diberi bias mundur

2.8. Persamaan Volt-Ampere dioda

Bila pada dioda diberikan prategangan maju V lubang akan diinjeksikan kedalam tipe-n dan elektron kedalam tipe-p. Dalam kondisi injeksi tingkat rendah arus minoritas hampir seluruhnya disebabkan oleh arus difusi minoritas dan arus hanyut minoritas dapat diabaikan.



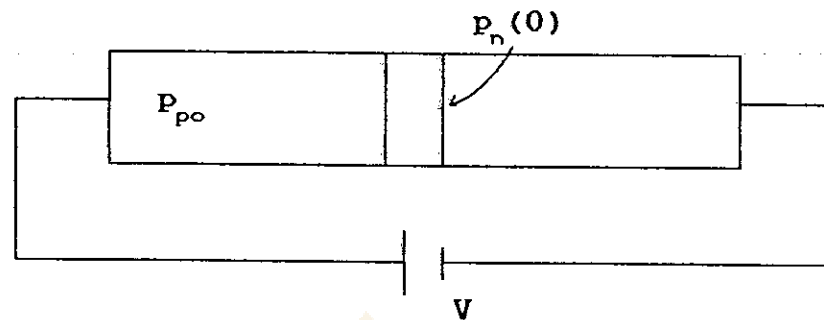
Gambar 2-13. Komponen arus elektron dan arus lubang terhadap jarak dalam dioda. Sisi p diberi lebih banyak tak murnian dibandingkan bagian n. Daerah muatan ruang pada persambungan dianggap kecil sekali sehingga dapat diabaikan

Gambar 2-13 memperlihatkan grafik arus difusi minoritas I_{np} dan I_{pn} . Dalam daerah transisi mengandung sedikit sekali muatan yang lincah, anggap pembentukan pembawa dan rekombinasi diabaikan dalam daerah ini. Arus difusi minoritas melintasi persambungan di $x = 0$ diberikan oleh persamaan

$$I_{pn}(0) = \frac{A q D_p}{L_p} p_n'(0) \quad (2.38a)$$

$$I_{np}(0) = \frac{A q D_n}{L_n} n_p'(0) \quad (2.38b)$$

Dengan $p_n'(0)$ dan $n_p'(0)$ adalah konsentrasi pembawa yang diinjeksikan dipersambungan tergantung pada tegangan V yang diterapkan.



Gambar 2-14. Konsentrasi lubang dalam dioda

Gambar 2-14 memperlihatkan dioda yang diberibias maju. Disebelah kiri dari bahan tipe-n konsentrasi lubang sama dengan konsentrasi setimbang termal p_{po} . Pada daerah kanan daerah deplesi, disebelah n konsentrasi lubang adalah $p_n(0)$. Tegangan V_j adalah potensial barrier V_0 dikurangi tegangan V . Dengan mengintegrasikan persamaan

$$E = \frac{V_T}{p} \frac{dp}{dx} = - dV/dx$$

$$\int_{p_{po}}^{p_n(0)} dp/p = - \int_0^{V_j} dV/V_T$$

$$p_n(0) = p_{po} \exp - (V_0 - V_j) / V_T \quad (2.40)$$

Dari persamaan (2.36)

$$p_{no} = p_{po} \exp -V_0/V_T \quad (2.41)$$

$$p_n(0) = p_{no} \exp V/V_T \quad (2.42)$$

yang merupakan hukum persambungan. dengan mengganti $p_n'(0) = p_n(0) - p_{no}$ pada persamaan (2.31a) didapat

$$I_{pn}(0) = \frac{A q D_p p_{no}}{L_p} (\exp V/V_T - 1) \quad (2.43)$$

dengan cara yang sama untuk arus difusi minoritas elektron di $x = 0$

$$I_{pn}(0) = \frac{A q D_p p_{no}}{L_p} (\exp V/V_T - 1) \quad (2.44)$$

Arus dioda total di $x = 0$ adalah jumlah dari $I_{pn}(0)$ dan $I_{np}(0)$ atau

$$I = I_{pn}(0) + I_{np}(0) \quad (2.45)$$

karena arus sama diseluruh rangkaian maka arus dioda
 o total diberikan oleh

$$I = I_0 (\exp V/V_T - 1) \quad (2.46)$$

I_0 adalah arus balik jenuh diberikan oleh persamaan

$$I_0 = A q (\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n}) \quad (2.47)$$

dengan p_{no} = konsentrasi lubang dalam tipe-n pada kesetimbangan termal.

n_{po} = konsentrasi elektron dalam tipe-p pada kesetimbangan termal.

Persamaan (2.42) berlaku untuk dioda Ge. Untuk Si arus difusi dapat diabaikan dibandingkan dengan arus pembentukan muatan didaerah transisi, sehingga persamaan arus untuk Si dapat didekati oleh ^(Milman, Halkias, 1990)

$$I = I_0 (\exp V/2V_T - 1) \quad (2.48)$$

Untuk arus balik jenuh dapat didekati oleh

$$I_0 = K T^{4,5} \exp - E_{g0} / 2kT \quad (2.49)$$