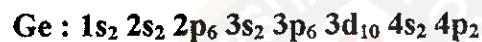
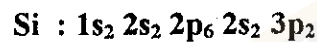


BAB II

DASAR TEORI

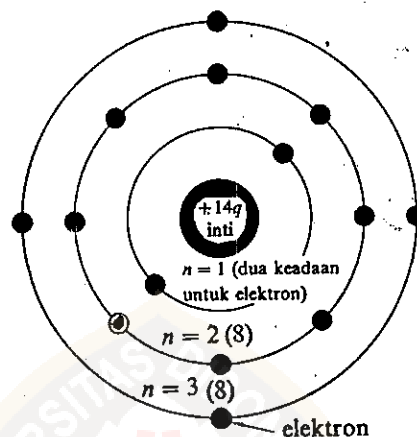
II.1. Struktur Elektron

Bahan semikonduktor silikon dan germanium dalam sistem periodik termasuk dalam unsur golongan IV yang masing - masing mempunyai empat elektron bebas pada kulit terluar. Terlihat jelas di bawah ini digambarkan konfigurasi elektron dari unsur silikon dan germanium (Jasprit Singht, 1979)



Nomor atom dari unsur Si adalah empat belas. Struktur atom silikon dapat digambarkan dengan menganggap ke-empat belas elektron bergerak mengelilingi inti. Elektron - elektron bergerak mengelilingi inti melalui orbit - orbit yang tertentu berdasarkan tingkat energi elektron masing - masing. Elektron pada kulit dalam terikat sangat kuat pada atom dan tak mudah untuk dikeluarkan. Elektron yang paling dekat dengan inti adalah yang terikat paling kuat. Dengan demikian dia mempunyai energi yang paling rendah. Silikon mempunyai muatan inti sebesar $+14q$. Lebih dari 10^{22} atom terikat bersama dalam 1cm^3 yang membentuk sebuah benda padat. (Millman, 1993)

Elektron - elektron bergerak mengelilingi inti melalui orbit - orbit yang telah ditentukan yang masing - masing mempunyai tingkat energi tertentu. Silikon mempunyai tiga bilangan kuantum utama $n = 1, 2$ dan 3 , seperti tergambar pada gambar 2.1^(Reka Rio dan Masamori, 1982)



Gambar 2.1 Struktur atom Silikon

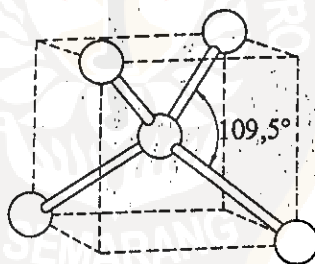
Pada gambar di atas elektron - elektron telah memenuhi kapasitas orbit $n = 1$ dan $n = 2$. Sedangkan orbit terluar ($n = 3$) masih ada empat tempat kosong untuk elektron. Berarti dapat menerima empat buah elektron dari luar. Kekosongan itu menyebabkan saling mengikatnya atom - atom dengan ikatan kovalen dan juga menentukan reaksi kimianya. Elektron yang diterima dari luar disebut elektron valensi. Silikon mempunyai empat valensi maka bahan ini merupakan unsur bervalensi empat.

II.2. Struktur Kristal

Kebanyakan logam dan semikonduktor mempunyai struktur kristal. Sebuah kristal adalah deretan atom - atom dalam ruang yang dibangun

dengan mengadakan pengulangan suatu struktur satuan dasar dalam 3 dimensi. Kedudukan atom - atom dalam kristal dapat dinyatakan sebagai deretan titik - titik dalam ruang yang membentuk jaringan dikenal dengan istilah kisi. Kristal ideal adalah kristal yang setiap atomnya memiliki tempat kesetimbangan tertentu pada kisi yang teratur. Pada kenyataannya kristal menyimpang jauh dari spesifikasi seperti itu. Cacat dalam struktur kristal salah satunya kehilangan atom, atom yang tidak pada tempatnya, kehadiran atom asing dan sebagainya.

Kristal silikon dibentuk oleh ikatan sebuah atom dengan empat buah atom terdekat. Struktur kristal ini mempunyai struktur seperti intan dan disebut struktur kristal intan^(Rekario dan Massamori, 1982)



Gambar 2.2 Konfigurasi ikatan atom dalam struktur intan

Kristal yang lebih besar dibentuk oleh blok satuan yang tersusun satu sama lain secara sistematis, dalam hal ini tiap rusuk dari blok itu panjangnya 5,43 Angstrom. Semua atom kecuali sebuah atom yang ditengah menempati puncak dari bentuk tetrahedron regular. Atom yang berada di tengah mempunyai ikatan kovalen dengan masing - masing atom dari empat

membentuk sudut $109,5^\circ$. Pada silikon atom - atom terpisah dengan jarak 2,35 Angstrom satu sama lain (Reka Rio dan Masamori, 1982)

II.3. Pendekatan Model Elektron Bebas : Celah Energi

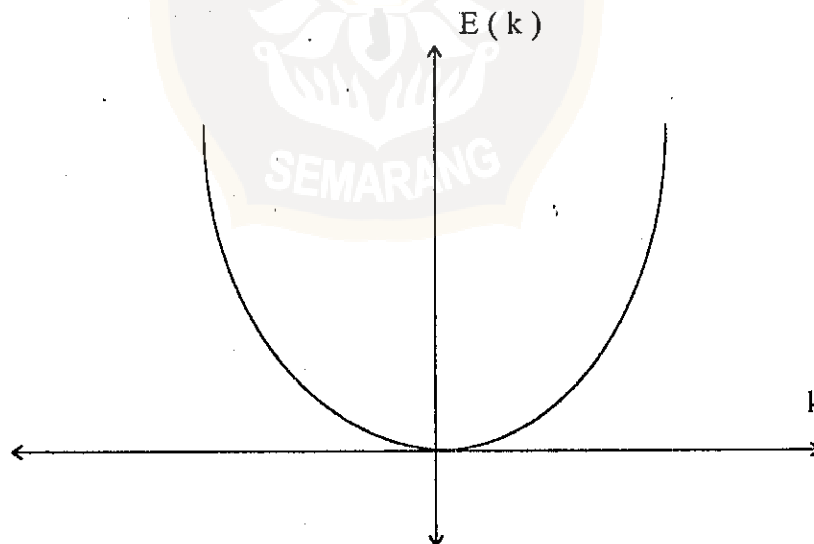
Pada model elektron bebas energi elektron yang dibolehkan adalah terdistribusi secara kontinu dari nol sampai tak terhingga, seperti gambar 2.3. (Kittel, 1986)

$$\varepsilon_k = \frac{h^2}{2m} k^2 \quad (2.1)$$

dimana dalam kondisi batas yang bersifat periodik dan fungsi gelombang elektronnya merupakan datar sebagai berikut : (Kittel, 1986)

$$\varphi(r) = \exp(\pm ik \cdot r) \quad (2.2)$$

dengan k adalah faktor gelombang.



Gambar 2.3. Nilai ε sebagai fungsi dari k pada model elektron bebas

Persamaan (2.1) dan (2.2) diatas juga berlaku untuk elektron hampir bebas atau elektron konduksi tetapi massa elektron nya harus diganti dengan massa elektron efektif m^* , karena adanya interaksi antara elektron dengan potensial periodik yang timbul oleh atom atau ion dalam kristal logam.

Selain itu akan timbul celah energi pada $k = \pm n (\pi / a)$ dengan n menyatakan bilangan bulat dan a konstanta kisi. Hal ini timbul karena gelombang yang dipantulkan dari satu atom dalam kisi yang linier berinterferensi dengan gelombang yang dipantulkan dari atom tetangga terdekat nya dengan perbedaan fase 2π sehingga timbul gelombang pantul. Ini berarti dalam daerah ini solusinya (Penyelesaian persamaan Schrodinger) merupakan gelombang berdiri . (Darmawan, 1987)

Analisa lebih lanjut menyatakan bahwa ada dua gelombang berdiri yang berbeda yang dapat dibentuk dari gelombang berjalan $\exp (+ i \frac{n}{a} x)$ dan $\exp (- i \frac{n}{a} x)$ yaitu. (Darmawan, 1987)

$$\psi (+) = \exp (+ i \frac{n}{a} x) + \exp (- i \frac{n}{a} x) \quad (2.3)$$

$$\psi (-) = \exp (+ i \frac{n}{a} x) - \exp (- i \frac{n}{a} x) \quad (2.4)$$

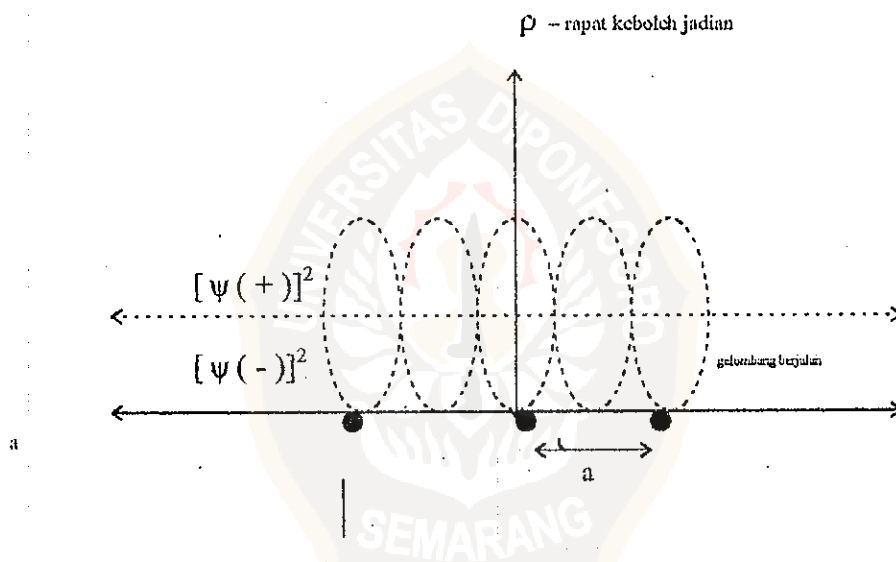
Dari solusi ini dapat diperoleh kerapatan elektron sebagai berikut,

gambar 2.4 (Darmawan, 1987)

$$\rho (+) = |\psi (+)|^2 \propto \cos^2\left[\frac{\pi}{a} x\right] \quad (2.5)$$

dan

$$\rho (-) = |\psi (-)|^2 \propto \cos^2\left[\frac{\pi}{a} x\right] \quad (2.6)$$

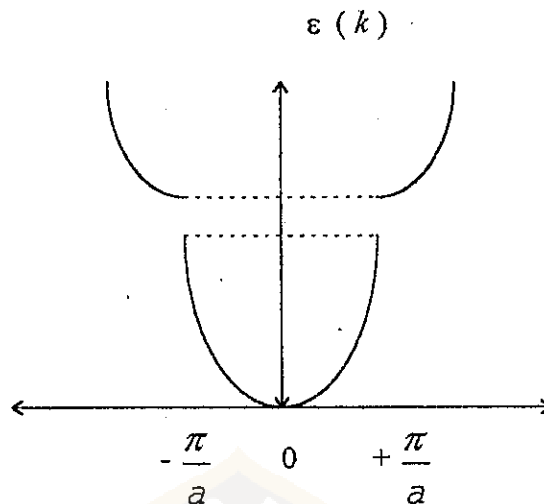


Gambar 2.4. Konsentrasi elektron untuk gelombang berdiri $\psi(+)$, $\psi(-)$ Yang juga berlaku untuk gelombang berjalan (Kittel, 1986)

Ternyata kedua solusi diatas , persamaan 2.5 dan 2.6 , memberikan gambaran penumpukan elektron pada daerah yang berlainan relatif terhadap kedudukan ion-ionnya sehingga energi potensialnya berbeda-beda. Hal inilah

yang menimbulkan loncatan energi sehingga timbul celah energi pada $k = \pm$

$\frac{\pi}{a}$, gambar 2.5:



Gambar 2.5. Timbulnya celah energi, E_p pada $\epsilon(k)$

II.4. Fungsi Fermi - Dirac

Distribusi tenaga elektron pada suatu padatan ditentukan oleh statistik Hukum Fermi - Dirac. Hasil yang didasari dari statistik ini adalah fungsi distribusi Fermi - Dirac, yang menunjukkan kebolehjadian suatu tingkat tenaga E diduduki oleh elektron, dirumuskan ^(Grove AS 1967)

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad (2.7)$$

dengan, k : konstanta Boltzman

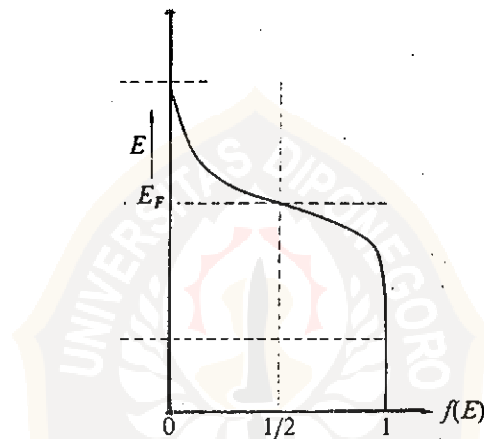
T : temperatur

E_F : Tingkat Fermi

E_F disebut tingkat fermi yaitu tenaga dimana pada suhu 0 K kebolehjadian suatu tingkat tenaga diduduki oleh elektron adalah setengah.

II.4.1. Fungsi Distribusi Fermi-Dirac dalam Semikonduktor Intrinsik

Dalam pita konduksi ada sejumlah besar tingkat tenaga, namun kebolehjadian didudukinya tingkat - tingkat tenaga tersebut kecil, jadi ada sejumlah kecil elektron pada pita konduksi. Lain halnya dengan tingkat - tingkat tenaga pada pita valensi, kebanyakan pada tingkat - tingkat tenaga ini diduduki oleh elektron, oleh karenanya kebolehjadian didudukinya tingkat tenaga tersebut mendekati satu. Keadaan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Fungsi distribusi Fermi-Dirac semikonduktor intrinsik

Pada gambar 2.6 dapat dilihat kebolehjadian didudukinya tingkat - tingkat tenaga oleh elektron sebagai fungsi tenaga.

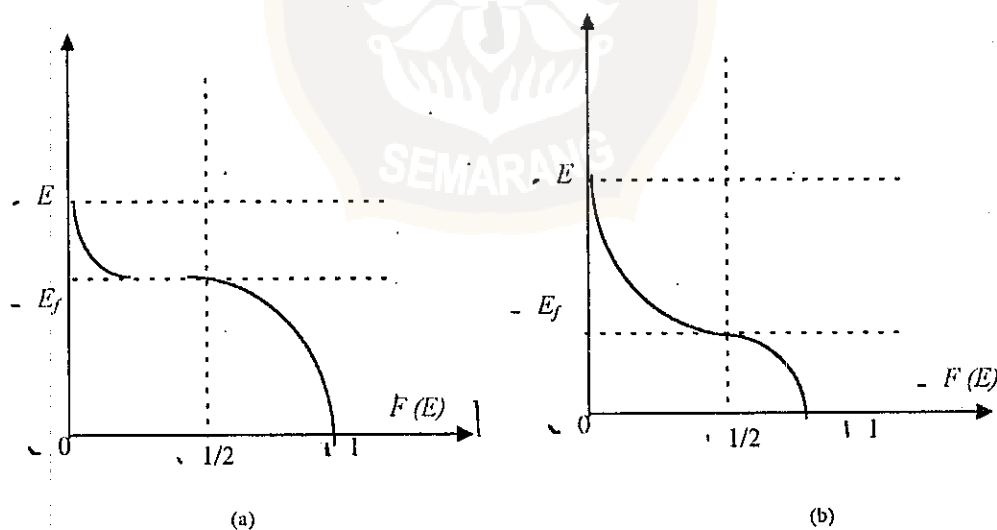
Pada suhu 0 K fungsi distribusi Fermi - Dirac simetris disekitar E_F . Keadaan pada semikonduktor intrinsik terjadi jika jumlah elektron pada pita konduksi sama dengan jumlah lubang pada pita valensi. Tingkat Fermi - Dirac pada semikonduktor intrinsik diberi simbol E_i .

II.4.2. Fungsi Distribusi Fermi - Dirac dalam Semikonduktor Ekstrinsik

Dalam semikonduktor jenis n , konsentrasi elektron pada pita konduksi lebih banyak daripada dalam semikonduktor intrinsik. Karena kerapatan tingkat - tingkat tenaga dalam pita konduksi sama seperti pada semikonduktor intrinsik.

Jadi konsekuensinya pada semikonduktor jenis n , tingkat Fermi maupun fungsi distribusi Fermi - Dirac akan tergeser ke atas dalam pita tenaganya seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.7a^(Rekarjo dan Massaori, 1982)

Lain halnya dengan semikonduktor jenis p , tingkat Fermi dan fungsi distribusi Fermi - Dirac akan tergeser ke arah bawah dalam pita tenaganya, hal ini dapat dilihat pada gambar 2.7b.



Gambar 2.7 Fungsi distribusi Fermi - Dirac semikonduktor ekstrinsik

(a) jenis - n

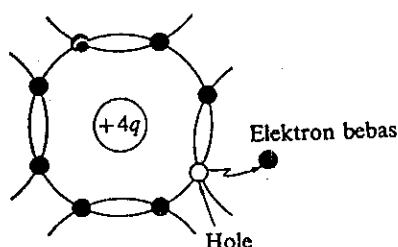
(b) jenis - p

II.5 Semikonduktor Intrinsik

Kristal silikon merupakan salah satu bahan semikonduktor intrinsik. Semikonduktor intrinsik merupakan unsur golongan IV dalam sistem periodik yang belum terkotori oleh unsur lain. Pada lintasan terluarnya suatu atom dikelilingi oleh empat elektron. Ikatan antar atom silikon merupakan ikatan kovalen.

Proses penghantaran listrik pada semikonduktor bergantung pada temperatur mutlaknya. Pada temperatur nol kelvin semua elektron berada pada pada pita valensi dan pada pita konduksi tidak terdapat elektron. Elektron-elektron pada pita valensi tidak dapat bergerak bebas.

Dalam temperatur tertentu sejumlah elektron pada pita valensi terutama yang berada pada tingkat energi paling tinggi akan terjadi eksitasi termal yang menyebabkan elektron-elektron akan berpindah ke state energi konduksi. Akibatnya dalam pita valensi tersebut akan terjadi kekosongan dan elektron yang berada dalam pita valensi lebih rendah akan mengisi kekosongan tersebut. Proses ini akan menyebabkan terjadinya konduktivitas listrik. Keadaan ini dilukiskan dalam gambar 2.8.



Gambar 2.8. Elektron - lubang dalam atom semikonduktor instrinsik

Pada gambar terlihat sebuah elektron terlepas dari ikatannya dan bergerak acak dalam kristal. Energi untuk melepaskan elektron tersebut kira-kira 1.1 eV untuk silikon. Tempat yang ditinggalkan elektron tersebut disebut lubang. Lubang ini dapat bekerja sebagai pembawa muatan. Gerak dari lubang ini berlawanan arah dengan gerak elektron.

Dalam semikonduktor intrinsik banyaknya lubang dan banyaknya elektron bebas adalah sama. Gerakan termal terus menerus menghasilkan pasangan lubang-elektron yang baru. Sedangkan elektron-lubang yang sebelumnya menghilang akibat rekombinasi. Konsentrasi p harus sama dengan konsentrasi n sehingga ^(Millman dan Halkias, 1993) ;

$$n = p = n_i$$

dimana : n_i = konsentrasi intrinsik

n = elektron

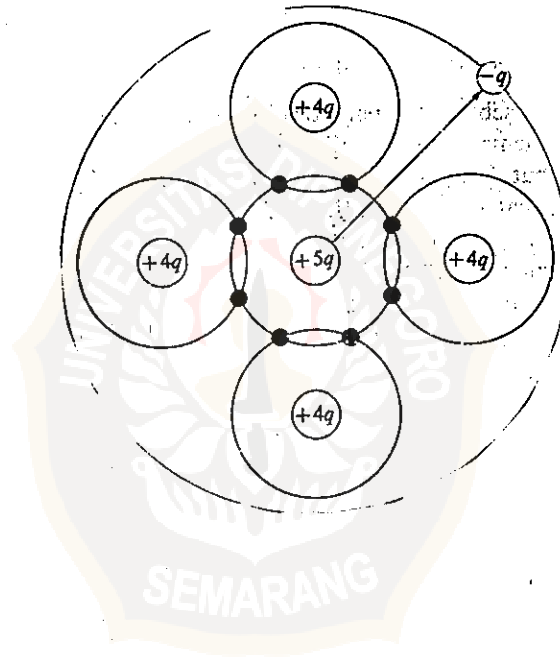
p = lubang

II.6. Semikonduktor Ekstrinsik

Rapat pembawa muatan pada semikonduktor intrinsik akan mengalami perubahan apabila bahan tersebut terkotori oleh unsur dari golongan lain. Bahan semikonduktor yang mempunyai bilangan valensi IV bila dikotori oleh unsur golongan V akan terjadi ikatan kovalen antara empat elektron kulit terluar dengan satu elektron sisa. Elektron tersebut ikatannya

sangatlah lemah, sehingga akan mudah bergerak keseluruhan bagian kristal dan mudah untuk terionisasi, seperti gambar 2.9.

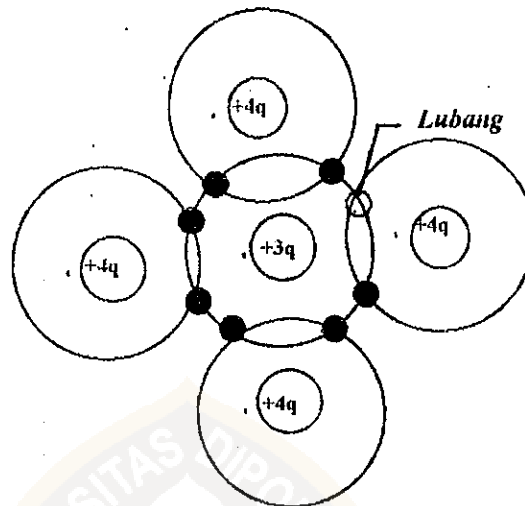
Kondisi ini disebut bahan semikonduktor tipe-n, karena atom donor mempunyai kelebihan sebuah elektron. Tingkat energi atom donor sedikit dibawah pita konduksi.



Gambar 2.9. Elektron dalam atom semikonduktor tipe-n

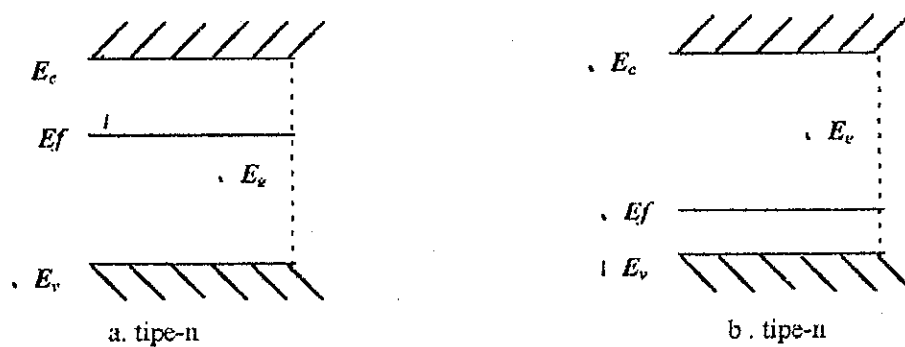
Sebaliknya apabila semikonduktor intrinsik yang terkotori oleh unsur golongan III akan timbul kekosongan elektron dari atom donor dan dinamakan bahan semikonduktor tipe-p. Dengan adanya kekosongan ini, maka bahan dapat dikatakan kekurangan elektron yang biasa disebut lubang.

Timbul lubang ini menyebabkan elektron dalam ikatan kovalen akan mudah bergerak memasukinya, seperti gambar 2.10. Akibatnya akan timbul lubang baru dan seterusnya akan menimbulkan aliran listrik. Aliran lubang ini akan berlawanan arah dengan gerakan elektron



Gambar 2.10 Lubang dalam atom semikonduktor tipe-p

Dengan adanya pengotoran oleh atom donor maupun akseptor, akan menyebabkan terjadinya energi gap seperti gambar 2.11^(Milman dan Halkias, 1983)



Gambar 2.11. Diagram pita energi semikonduktor ekstrinsik

II.7. KONSENTRASI PEMBAWA DALAM SEMIKONDUKTOR

Konsentrasi elektron dalam pita konduksi yang energinya terletak antara E dan E + dE diberikan oleh persamaan (R.F. Pieri, 1983)

$$dn = N(E) f(E) dE \quad (2.9)$$

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

$$N(E) = \frac{4\pi (2m_n)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \quad (2.10)$$

dengan

m_n = massa efektif elektron

h = konstanta Planck, $6,26 \cdot 10^{-34}$ J.s

f(E) adalah fungsi Fermi yang diberikan oleh persamaan

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp(E - E_F) / kT} \quad (2.11)$$

dengan E_F = Tingkat Fermi, eV

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

Konsentrasi elektron keseluruhan dalam pita konduksi merupakan integral dari persamaan (2.11) pada seluruh pita konduksi (R.F. Pieri, 1983)

$$n = \int_{E_c}^{E_c} N(E) f(E) dE \quad (2.12)$$

$$n = N_c \exp (E_F - E_c) / kT \quad (2.15)$$

N_c adalah konsentrasi keadaan efektif elektron dalam pita konduksi

$$N_c = \frac{2 (2m_n \pi kT)^{3/2}}{h^3} \quad (2.16)$$

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

$$p = \int_{E_v}^{E_F} N_p(E) f_p(E) dE \quad (2.17)$$

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

$$N_p(E) = \frac{4\pi (2m_p)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E_v - E} \quad (2.18)$$

dengan m_p = massa efektif elektron

Oleh karena lubang merupakan tingkat energi yang kosong, maka probabilitas bahwa dengan keadaan 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

$$p = N_v \exp (E_v - E_F) / kT \quad (2.19)$$

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

$$N_v(E) = \frac{2 (2m_p \pi kT)^{3/2}}{h^3} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.17) dan (2.19) berlaku untuk semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik. (Millman, Halkias, 1990) Untuk semikonduktor murni yang berada dalam kondisi setimbang termal banyaknya elektron bebas dan lubang yang dihasilkan sama banyaknya

$$n = p = n_i \quad (2.21)$$

dengan n_i = konsentrasi intrinsik semikonduktor yang merupakan fungsi dari suhu

Untuk bahan intrinsik $E_F = E_i$ sehingga persamaan (2.17) dan (2.19) dapat ditulis

$$n = N_c \exp (E_i - E_c) / kT \quad (2.22)$$

$$p = N_v \exp (E_v - E_i) / kT \quad (2.23)$$

Dengan memecahkan N_c dan N_v dari persamaan (2.22) dan (2.23) didapat

$$n = n_i \exp (E_F - E_i) / kT \quad (2.24)$$

$$p = n_i \exp (E_i - E_F) / kT \quad (2.25)$$

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

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) \quad (2.26)$$

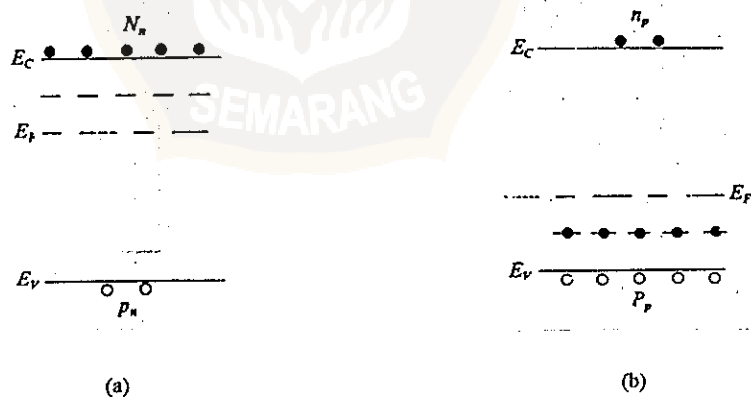
Persamaan di atas memperlihatkan bahwa E_i tepat di tengah-tengah celah energi bila $T = 0K$ atau $N_c = N_v$. Pada temperatur kamar E_i kira-kira di tengah-tengah E_G .

Untuk bahan tipe-n, tingkat Fermi berada di atas tingkat intrinsik. Dari persamaan (2.24) bila $N_D \gg n$, maka

$$E_F - E_i = kT \ln (N_D / n_i) \quad (2.27)$$

Sedangkan untuk bahan tipe-p, tingkat Fermi berada di bawah tingkat intrinsik.

$$E_i - E_F = kT \ln (N_A / n_i) \quad (2.28)$$



Gambar 2.11. Tingkat Fermi dalam semikonduktor (a) tipe-n (b) tipe-p

Perkalian rapat elektron bebas dan lubang menghasilkan

$$n_i^2 = N_v N_c \exp - (E_c - E_v) / kT \quad (2.29)$$

karena $E_G = E_c - E_v$ maka persamaan (2.22) menjadi

$$n_i^2 = N_c N_v \exp - E_G / kT \quad (2.30)$$

Persamaan (2.30) berlaku untuk bahan intrinsik dan ekstinsik (Milman, Halkias, 1990)

Dengan memasukkan nilai-nilai fisis untuk N_c , N_v dan mengganti $E_G = E_{G0} - \beta T$, diperoleh

$$n_i^2 = A_0 T^3 \exp - E_{G0} / kT \quad (2.31)$$

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

$$\begin{aligned} N_A &= P_p \\ n_p &= n_i^2 / N_D \end{aligned} \quad (2.32)$$

Hole dalam semikonduktor pada arah sumbu x dipercepat dengan medan listrik, sedangkan pada arah sumbu z diberikan medan magnet. Gerakan dari partikel bermuatan dalam medan magnet diberikan sebagai :

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.34)$$

dengan \mathbf{F} adalah vektor gaya yang bekerja pada partikel yang disebut gaya Lorentz ; \mathbf{v} adalah kecepatan partikel dan \mathbf{B} adalah medan magnet.

Bila \mathbf{i}, \mathbf{j} dan \mathbf{k} adalah vektor satuan masing-masing pada arah x, y dan z .

$$\mathbf{B} = k B_z \quad (2.35)$$

$$\mathbf{v} = i v_x \quad (2.36)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.34) diperoleh hubungan vektor satuan :

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{i} \times \mathbf{k}) v_x B_z = -j (q v_x B_z) \quad (2.37)$$

yang menyatakan gaya dengan arah negatif pada sumbu y . Maka berarti hole ditolak oleh gaya Lorentz ke arah sisi permukaan a . Bila hanya terdapat gaya Lorentz saja, hole akan dikonsentrasikan secara tidak terhingga pada permukaan a . Tetapi ada yang menghentikan proses tersebut. Karena Hall didistribusikan pada satu sisi permukaan a , maka timbul medan listrik pada arah y , yaitu dari permukaan a ke permukaan b .

dan untuk tipe-n

$$N_D = n_n$$

$$P_n = n_i^2 / N_D \quad (2.33)$$

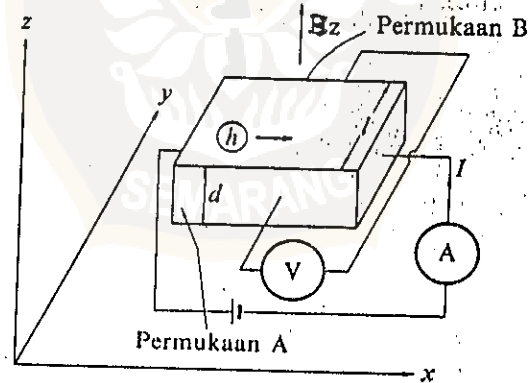
dengan

P_n = konsentrasi lubang dalam tipe-n

n_p = konsentrasi elektron dalam tipe p

II.8. EFEK HALL

Salah satu cara untuk menentukan konsentrasi pembawa adalah dengan metode Efek Hall, ^(Reka Rio, Masamori, 1982) Gambar 2.12 menunjukkan prinsip pengukuran konsentrasi Hall dalam semikonduktor tipe-p.



Gambar 2.12. Prinsip pengukuran Efek Hall

Keadaan tenang (seimbang) berlangsung bila tercapai keseimbangan antara medan listrik dan gaya Lorentz, dan timbul beda tegangan antara permukaan a dan b Ini disebut tegangan Hall yang sebanding dengan konsentrasi pembawa (dalam hal ini konsentrasi hole), sebagai berikut ;

Bila E_y adalah medan listrik dan dalam keadaan gaya seimbang diperoleh . (Reku Rio dan

Masamori, 1982)

$$q E_y - q v_x B_z = 0 \quad (2.38)$$

$$\text{atau } E_y = v_x B_z \quad (2.39)$$

Tegangan Hall V_H diberikan sebagai :

$$V_H = I E_y \quad (2.39)$$

Bila p adalah konsentrasi hole, karena arus I adalah :

$$I = q p v_x dI \quad (2.40)$$

Persamaan (2.39) direduksi menjadi :

$$V_H = \frac{B_z I}{q d p} = B_z I \frac{R_H}{d} \quad (2.41)$$

Bila V_H , B_z , q dan d diketahui, maka p dapat dihitung memakai persamaan (2.41), dimana $R_H = 1/qp$ disebut koefisien Hall. Konsentrasi elektron dapat dihitung dengan cara yang sama, tetapi harus diingat bahwa elektron bermuatan negatif. Hasilnya :

$$V_H = \frac{-B_z}{qdn} \quad (2.42)$$

Arah dari medan listrik Hall dalam hal semikonduktor tipe-n berlawanan dengan pada semikonduktor tipe-p. Dengan cara ini dapat pula ditentukan tipe konduksi semikonduktor yaitu dengan mengetahui polaritas tegangan Hall. Dengan konstanta Hall didefinisikan (Omar, 1975):

$$R_h = \frac{p\mu_h^2 - n\mu_e^2}{e(p\mu_h + n\mu_e)^2} \quad (2.43)$$

Pada persamaan diatas, jika $n \gg p$ maka persamaan 2.44 akan mendekati persamaan:

$$R_h = -\frac{1}{ne} \quad (2.44)$$

Yang berarti bahwa dalam semikonduktor mayoritas pembawa muatan listriknya adalah elektron

Dan jika $p \gg n$ persamaan 2.43 akan mendekati persamaan :

$$R_h = \frac{1}{pe} \quad (2.45)$$

yang berarti bahwa dalam semikonduktor mayoritas pembawa muatan listriknya adalah lubang.