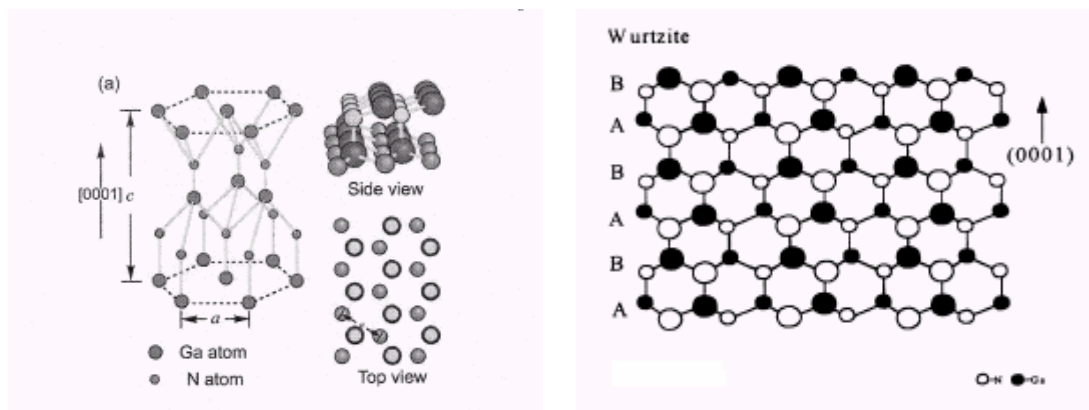


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum Galium Nitrida (GaN)

Galium nitrida (GaN) merupakan material semikonduktor III-V yang memiliki celah pita langsung (*direct bandgap*) sekitar 3,4 eV pada temperatur ruang (K. Uchida *et al*, 1996). GaN memiliki tiga struktur kristal yaitu struktur kristal *wurtzite*, *zincblende* dan *rocksalt*. Struktur heksagonal (*wurtzite*) merupakan struktur kristal GaN pada suhu ruang dan memiliki sifat yang stabil pada temperatur tinggi (Bing Zhou, 1996). Karena sifat itu, struktur kristal heksagonal sering digunakan dalam aplikasi pada devais optoelektronik dan devais elektronik. Struktur kristal heksagonal ditunjukkan oleh Gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1 Struktur kristal heksagonal GaN

Sifat-sifat dari material GaN yang berkaitan dengan struktur kristal dalam heksagonal terlihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1. Sifat-sifat GaN berkaitan dengan struktur heksagonal

GaN Heksagonal (<i>Wurtzite</i>)	
Energi gap	$E_g = 3,5 \text{ eV} \quad (T = 1,6 \text{ K})$
	$E_g = 3,39 \text{ eV} \quad (T = 300 \text{ K})$
Konstanta kisi $\left(\overset{\circ}{\text{A}} \right)$	$a = 3,189 \text{ \AA}, \quad c = 5,185 \text{ \AA}$
Indeks bias	$n(1 \text{ eV}) = 2,33, \quad n(3,38 \text{ eV}) = 2,67$
Konstanta dielektrik	8,9 (300 K)
Ekspansi termal	$a = 5,59 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \quad c = 3,17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Densitas	$6,15 \text{ g/cm}^3$
Konduktivitas termal	$K = 1,3 \text{ W/cmK}$

Sumber: Bougrov et al.(2001), Uenoyama.(1995), S.M. Sze. (1985), Lagerstedt et al. (1979), Qian et al. (1996).

Kesulitan yang sangat serius dalam penumbuhan film tipis GaN berkualitas tinggi muncul karena ketiadaan substrat yang cocok (*lattice match*) dengan parameter kekisi GaN. Sejauh ini sapphire (Al_2O_3) yang berwujud transparan merupakan substrat yang cukup baik untuk digunakan yaitu dengan diperolehnya tampilan devais optoelektronik yang baik dengan efisiensi tinggi walaupun terdapat perbedaan yang sangat besar antara konstanta kekisi dan koefisien ekspansi termal GaN dengan sapphire. Ketidaksesuaian kisi (*lattice match*) antara GaN dan sapphire sebesar 14,8% dapat menimbulkan kerapatan cacat dislokasi yang besar pada antarmuka (*interface*) GaN dan sapphire. Akan tetapi, epitaksi dari nitrida diatas sapphire masih menghasilkan daya guna piranti

yang paling baik hingga kini (F. A. Fonce, 1998). Pada tabel 2.2 dibawah ini dapat dilihat beberapa sifat fisis dari sapphire.

Tabel 2.2. Beberapa sifat fisis dari sapphire (© Crystar Inc, 1999)

Parameter sapphire	Besarnya/Keterangan
Konstanta Kisi	a = 4,758 Å c = 12,991 Å
Struktur Kristal	Rhombohedral – heksagonal (R ₃ C)
Bidang-bidang orientasi	c-(0001), a-(11 $\bar{2}$ 0), m-(1100), r-(1102)
Kerapatan	3,98 g cm ⁻³
Ketaksesuaian kisi terhadap	GaN = 16%, AlN = 12,5% dan InN = 24,4%
Modulus Young	380 Gpa
Struktur lain yang mirip	CaCO ₃
Sifat Termal	
Titik leleh	2053 °C
Konduktivitas termal (0 °C)	0,11 kal/cm °C sekon

Penggunaan lapisan penyangga (*buffer layer*) GaN dan AlN pada temperatur rendah telah diperkenalkan oleh Nakamura tahun 1991 guna untuk mengurangi *lattice mismatch* pada *interface* tersebut. Lapisan penyangga memegang peranan yang sangat penting dalam menentukan semua sifat-sifat dari film tipis, dimana dengan menggunakan lapisan penyangga telah diperoleh tampilan devais elektronik yang lebih baik. Kehadiran lapisan penyangga dapat mereduksi kerapatan cacat dislokasi yang tinggi dan juga dapat menyebabkan *interface* menjadi lebih fleksibel.

2.2. Sifat listrik Galium Nitrida (GaN)

Sifat listrik dari bahan semikonduktor secara konvensional digambarkan oleh keadaan dari mobilitas dan kosentrasi pembawa muatan mayoritas pada medan listrik rendah dengan pengukuran efek Hall. Pengukuran efek Hall dengan

metoda Van der Pauw adalah analisa umum yang digunakan untuk menggambarkan sifat-sifat listrik dari material semikonduktor. Beberapa parameter listrik yang dapat diukur adalah koefisien Hall (R_H), konsentrasi pembawa muatan (n) dan mobilitas Hall (μ_H), masing-masing dapat dinyatakan dengan persamaan:

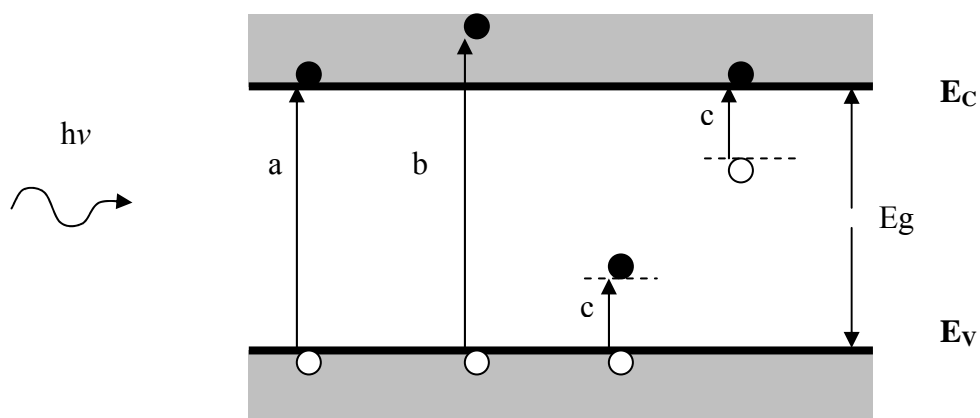
$$R_H = \frac{V_H t}{IB}, \quad n = \frac{1}{qR_H}, \quad \mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.1)$$

dimana t , V_H , I , B , dan ρ masing-masing adalah ketebalan film, tegangan Hall, arus listrik, medan magnet dan resistivitas.

Mobilitas elektron dalam GaN dipengaruhi oleh konsentrasi impuritas terionisasi dan rapat dislokasi. Mobilitas elektron / hole akan menentukan konduktivitas dari semikonduktor tipe-n atau tipe-p dan mobilitas ini dikontrol oleh mekanisme hamburan dari pembawa muatan bebas di dalam gerak induksi medan listrik. Pada temperatur rendah, mekanisme hamburan elektron / hole diionisasi oleh adanya pengotor (impuritas) sedangkan pada temperatur tinggi mobilitas akan menurun dan konduktivitas yang teramati dikaitkan dengan adanya hamburan fonon optik. Dalam penumbuhan film tipis GaN dimana nitrogen relatif sukar bereaksi dibanding dengan gallium sehingga film yang terbentuk cenderung mengalami kekosongan nitrogen (*N vacancies*) sehingga GaN tanpa doping cenderung bertipe-n. Kekosongan nitrogen (V_N) merupakan cacat utama dalam GaN yang bertindak sebagai pusat-pusat penghamburan elektron / hole yang selanjutnya akan menurunkan mobilitas elektron / hole.

2.3. Sifat Optik Galium Nitrida (GaN)

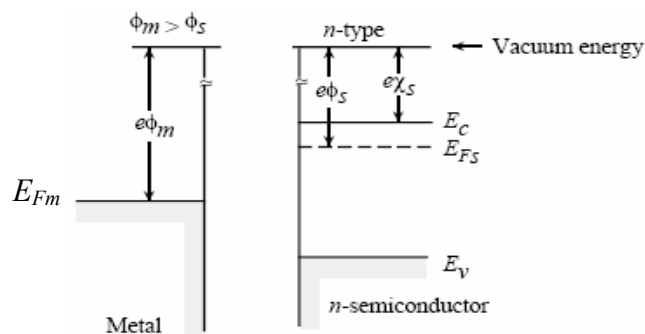
Secara teori, struktur pita energi GaN dapat ditentukan menggunakan metode *pseudopotensial* empiris. GaN memiliki sifat celah pita dengan transisi langsung (*direct bandgap*), dengan lebar celah pita energi (E_g) sekitar 3,4 eV pada suhu ruang. Kondisi ini sangat cocok untuk aplikasi seperti detector ultraviolet. Aplikasi GaN sebagai detektor cahaya ultraviolet dapat dipelajari sifatnya melalui proses fotoionisasi dalam medium semikonduktor akibat proses *absorpsi* foton, dimana terjadinya transisi elektron secara langsung dari pita valensi ke pita konduksi ketika semikonduktor GaN menyerap energi foton $h\nu \geq E_g$ seperti tampak pada Gambar 2.2. Pada gambar tersebut untuk proses (a) dan (b) disebut transisi intrinsik (*band to band transition*). Jika $h\nu < E_g$ maka foton akan diserap jika ada tingkat energi dalam celah terlarang yang diakibatkan adanya cacat *deep level* atau impuritas seperti pada proses (c), proses tersebut disebut transisi ekstrinsik.



Gambar 2.2. Absorpsi optik untuk (a) $h\nu = E_g$, (b) $h\nu > E_g$ dan (c) $h\nu < E_g$

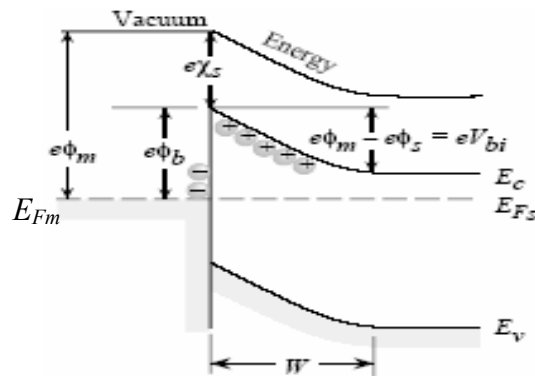
2.4. Model Jalur Energi Metal Dengan Semikonduktor

Model jalur energi dari hubungan metal dengan semikonduktor tipe-n relatif terhadap tingkatan vakum sebelum kontak untuk $\Phi_m > \Phi_s$ ditunjukkan oleh Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3. Model jalur energi dari metal dan semikonduktor tipe-n sebelum kontak

Jika suatu metal akan dijadikan kontak dengan semikonduktor, maka tingkat Fermi pada kedua bahan tersebut harus bersesuaian pada kesetimbangan termal (Schroder,1990). karena $E_{FS} > E_{FM}$, maka elektron akan berpindah dari semikonduktor ke metal, sampai perbedaan tingkat energi Fermi menjadi nol. Setelah perpindahan berhenti ($\Delta E_F = 0$), jumlah elektron dalam semikonduktor akan menurun dan semikonduktor jadi bermuatan positif. Muatan-muatan positif mengionisasikan donor yang menempati satu lebar tertentu dari semikonduktor terhadap bidang pertemuan metal-semikonduktor. Elektron lebih, memasuki metal tetapi jumlahnya dapat diabaikan dibandingkan dengan elektron-elektron dari metal itu sendiri. Model jalur energi dari metal dengan semikonduktor setelah adanya kontak dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.4. Model jalur energi dari metal-semikonduktor setelah kontak

Jika tingkatan energi Fermi telah sama, maka terjadi dua daerah di dalam semikonduktor yaitu: daerah muatan ruang dan daerah netral. Terjadi medan listrik yang arahnya dari semikonduktor menuju metal dalam daerah muatan ruang, menghalangi elektron yang berasal dari daerah netral ke metal. Medan listrik inilah yang menaikkan tegangan daerah muatan ruang yang disebut tegangan barrier atau barrier Schottky.

Model pertama bentuk barrier tersebut dikembangkan oleh Schottky dan Mott (S.M.Sze,1985). Dalam model Schottky-Mott tinggi barrier didefinisikan sebagai perbedaan antara fungsi kerja metal (Φ_m) dan fungsi kerja semikonduktor (Φ_s). Untuk kasus kontak metal-semikonduktor tipe-n dimana $\Phi_m > \Phi_s$ (lihat Gambar 2.5), tinggi barrier (Φ_b) dapat diperoleh dari persamaan

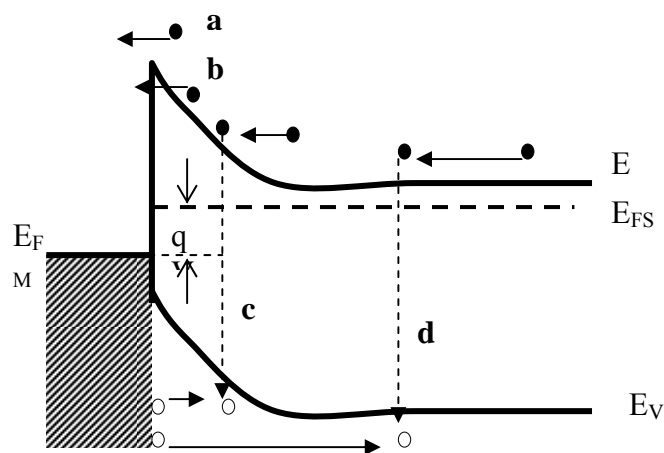
$$e\Phi_b = e\Phi_m - e\Phi_s + (E_C - E_F) = e\Phi_m - e\chi_s \quad (2-2)$$

dengan χ_s = afinitas elektron dari semikonduktor, E_C = tingkat energi pada pita konduksi dan E_F = tingkat energi Fermi. Parameter Φ_b menunjukkan barrier pada aliran elektron dari metal ke semikonduktor.

Untuk aliran elektron dari semikonduktor ke metal (proses kebalikannya) barier diberikan oleh potensial built-in V_{bi} .

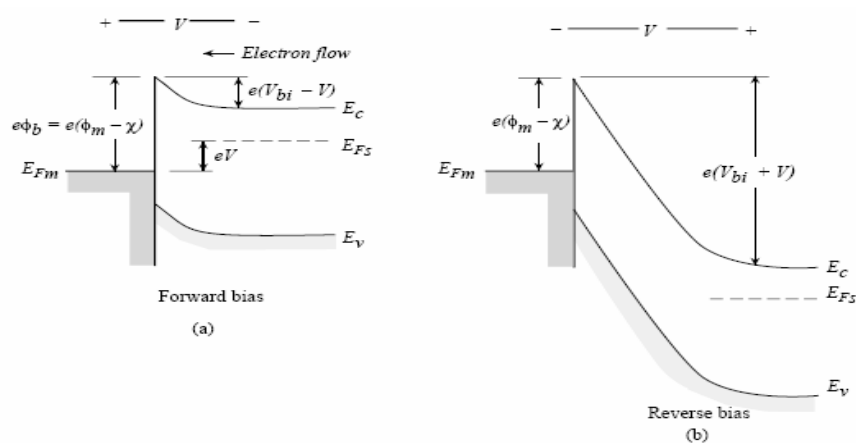
2.5. Transport Arus Pada Barrier Schottky

Mekanisme transport arus dalam kontak metal-semikonduktor didominasi oleh pembawa mayoritas yang terdiri dari empat proses transport pada kondisi bias maju (Gambar 2.6), yaitu (a) emisi elektron dari semikonduktor di atas barier menuju metal, (b) proses mekanika kuantum tunneling yang menerobos barier, (c) injeksi hole dari logam ke semikonduktor dengan rekombinasi dalam daerah muatan ruang dan (d) injeksi hole dari metal ke semikonduktor dengan rekombinasi dalam daerah netral.



Gambar 2.5. Proses transport arus dalam kondisi bias maju pada kontak metal dengan semikonduktor tipe-n

Arus yang mengalir melalui barier schottky tergantung pada polaritas tegangan yang diberikan. Pada keadaan tidak ada bias antara kontak metal-semikonduktor, konsentrasi elektron pada metal dan semikonduktor sama, sehingga secara *netto* tak ada arus yang mengalir. Gambar 2.6, menunjukkan model jalur yang memperlihatkan karakteristik listrik dari kontak metal-semikonduktor tipe-n ketika diberi bias.



Gambar 2.6. Model jalur yang memperlihatkan kontak metal-semikonduktor tipe-n ketika diberi bias.

Pada pemberian bias maju seperti pada Gambar 2.6 (a). Semikonduktor mempunyai tingkatan energi eV lebih tinggi daripada metal. Elektron-elektron pada metal dengan tingkatan energi Φ_b di atas E_F yang dapat melompati barier, seperti yang terjadi tanpa bias, dan elektron-elektron dalam semikonduktor yang dapat melompati barier, terletak pada tingkatan Fermi dengan jarak eV . Karena $\Phi_b > (E_C + e(V_{bi} - V) - E_{FS})$, maka konsentrasi elektron dalam metal yang dapat melewati barier (n_M) lebih kecil dari konsentrasi semikonduktor (n_s) akibatnya elektron-elektron dengan konsentrasi ($n_s - n_M$) mengalir dari semikonduktor ke

metal. Menghasilkan arus dari metal ke semikonduktor. Perbedaan konsentrasi itu dapat diturunkan sebagai berikut :

$$n_s - n_M = N_C \exp^{-\Phi_b/kT} (\exp^{eV/kT} - 1) \quad (2-3)$$

Pada Gambar 2.6 (c) merupakan kebalikan dari (b), yaitu tegangan dalam semikonduktor lebih rendah dengan harga eV, maka tegangan barrier meningkat dari eV_{bi} ke $e(V_{bi} + V)$, berarti didapat barrier yang lebih tinggi untuk elektron bebas dalam daerah netral. Karena $n_s < n_M$ maka :

$$n_s - n_M = -N_C \exp^{-\Phi_b/kT} (\exp^{eV/kT} - 1) \quad (2-4)$$

Hasilnya, elektron-elektron dengan konsentrasi ($n_M - n_s$) mengalir dari metal ke semikonduktor, menghasilkan arus dari semikonduktor ke metal. Persamaan (2-4) berlaku untuk harga V yang cukup besar, maka $n_s - n_M = -n_M$, yang berarti konsentrasi elektron yang dapat melompati barrier tidak terpengaruh oleh tegangan yang diberikan dan juga konsentrasi elektron n_M yang dapat melompati barrier sangat rendah (Reka Rio, 1999).

2.6. Kontak Ohmik

Kontak ohmik didefinisikan sebagai kontak antara metal dengan semikonduktor dimana resistansi kontak dapat diabaikan relatif terhadap resistansi bahan pada semikonduktor. Sifat kontak ohmik yang baik tidak akan

menurunkan daya guna devais yang dibuat. Ukuran kualitas kontak ohmik ditunjukkan oleh harga resistansi kontak (R_c) yang didefinisikan sebagai

$$R_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \Big|_{v=0} (\Omega cm^2) \quad (2-5)$$

dengan J = rapat arus dan V = tegangan yang diberikan. Kualitas kontak ohmik yang baik memiliki nilai $R_c \leq 10^{-7}$ (Fall, 2002). Untuk kontak metal-semikonduktor dimana arus emisi termionik mendominasi transport arus maka hambatan jenis kontak diberikan oleh persamaan :

$$R_c = \frac{k}{eA^*T} \exp\left(\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2-6)$$

dengan k = konstanta Boltzman, A^* = konstanta Richardson, dan Φ_b = tinggi barier. Persamaan (2-11) menunjukkan bahwa jika tinggi barier rendah maka nilai R_c kecil.

Untuk kontak semikonduktor dengan doping tinggi menyebabkan lebar barier menjadi sempit dan tansport arus kebanyakan karena adanya mekanisme penerobosan arus.

2.7. Karakteristik I-V Pada Kontak Metal-Semikonduktor

Secara umum karakteristik arus-tegangan (I-V) pada barier schottky menggunakan teori emisi termionik untuk $V_f > 3kT/e$ (J.K.Sheu dkk, 1998)

$$I = \left[SA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{KT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2-7)$$

Persamaan (2-7) bisa dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2-8)$$

dimana I_0 adalah arus saturasi (jenuh balik), diberikan oleh

$$I_0 = SA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{KT}\right) \quad (2-9)$$

Dimana I_0 = arus saturasi , e = muatan elektron, k = konstanta Boltzman, T = temperature pengukuran, n = factor ideal, Φ_b = tinggi barrier, S = luas kontak dan A^* = konstanta efektif Richardson. Sedang tinggi barrier efektif pada bias nol diberikan oleh persamaan :

$$\Phi_b = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{SA^*T^2}{I_0}\right) \quad (2-10)$$

Parameter Φ_b ini menunjukkan barrier pada aliran elektron dari logam ke semikonduktor. Secara teoritis nilai konstanta Richardson A^* dapat dihitung dengan persamaan :

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* K^2}{h^3} \quad (2-11)$$

Hasilnya sekitar $120m_n$ ($A/cm^2 K$), dengan m_n^* = massa efektif elektron didalam GaN yaitu sebesar $(0,22 \pm 0,03) m_0$ (m_0 = massa diam elektron), dan h = konstanta Plank. Jadi untuk GaN tipe-n, A^* bernilai $26 A.cm^{-2}.K^{-2}$.

Perbedaan energi antara tingkat konduksi dan tingkat Fermi diberikan oleh :

$$V_n = \frac{(E_C - E_F)}{e} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (2-12)$$

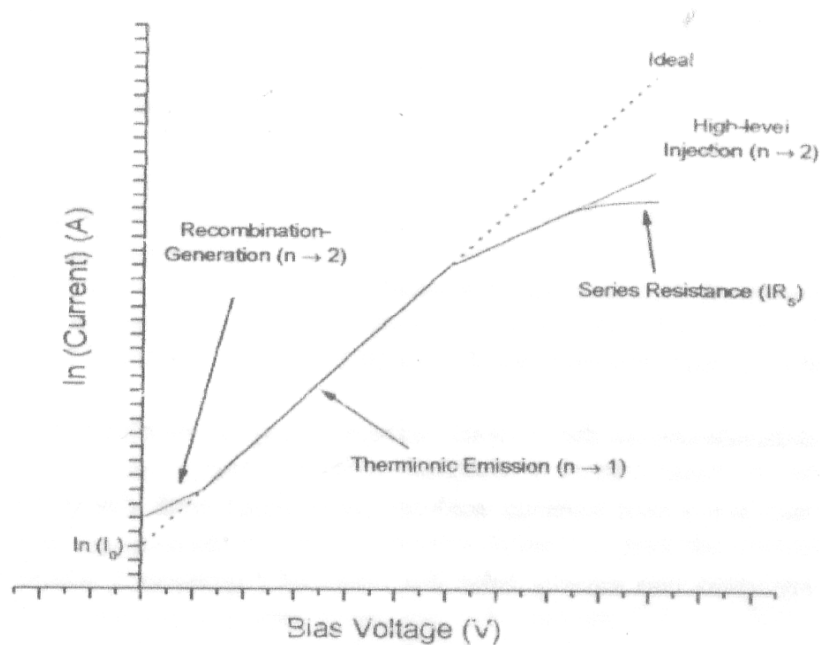
dengan N_D = konsentrasi donor, N_C = rapat keadaan pada pita konduksi diberikan oleh persamaan $N_C = 2(2\pi m_n^* kT/h^2)^{3/2}$ Pada temperature kamar 300^0K maka konsentrasi $N_C = 2,59 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Potensial built-in dapat dicari dari tinggi barier sebesar $V_{bi} = \Phi_b/e - V_n$.

Ekstrapolasi dari plot bias maju terhadap $\ln(I)/ [I - \exp(-eV/kT)]$ didapat arus saturasi I_o pada bias nol, sehingga dapat dicari tinggi bariernya. Sedangkan factor ideal (n) juga dapat dicari dari plot grafik tersebut dengan persamaan :

$$\frac{1}{n} = \frac{kT}{e} \frac{d(\ln J)}{dV} \quad (2-13)$$

Faktor ideal (n) menunjukkan mekanisme transport arus yang terjadi.

Gambar 2.7 menggambarkan karakteristik kurva I-V dengan faktor ideal tertentu.



Gambar 2.7. Karakteristik I-V dengan faktor ideal tertentu.

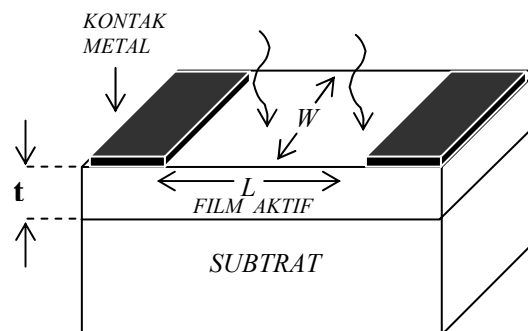
2.8. Fotokonduktor

Fotokonduktor dikenal sebagai fotoresistor pada dasarnya adalah sebuah resistor yang sensitif terhadap cahaya. Berkas cahaya dengan energi foton $h\nu$ lebih besar dari energi gap akan diserap oleh fotokonduktor yang akan membangkitkan pasangan elektron-hole sehingga akan merubah konduktivitas semikonduktor. Fotokonduktor dibagi menjadi dua tipe, yaitu fotokonduktor intrinsik dan ekstrinsik. Fotokonduktor intrinsik adalah fotokonduktor yang terjadi akibat eksitasi pembawa muatan dari pita valensi ke pita konduksi sedangkan fotokonduktor ekstrinsik adalah fotokonduktor yang melibatkan eksitasi pembawa muatan dari level-level energi tambahan oleh impuritas ke pita konduksi dan pita valensi.

Terdapat tiga proses mendasar dalam fotokonduktor yaitu: (1) proses pembangkitan pasangan elektron-hole (*carrier*) akibat adanya proses absorpsi energi foton oleh material semikonduktor, (2) proses transport muatan pembawa, dan (3) proses interaksi arus listrik dengan rangkaian eksternal untuk memberikan sinyal keluaran dalam bentuk respon arus atau respon tegangan. Proses absorpsi cahaya dengan energi di atas energi gap semikonduktor yang membangkitkan arus foto dapat menentukan daerah operasi fotokonduktor.

2.8.1 Struktur Fotokonduktor

Pada fotokonduktor, permukaan horizontalnya diapit oleh dua kontak metal, dimana permukaan ini tidak terlindung oleh cahaya masuk. Kontak metal dengan semikonduktor harus bersifat kontak ohmik (resistansinya minimum).

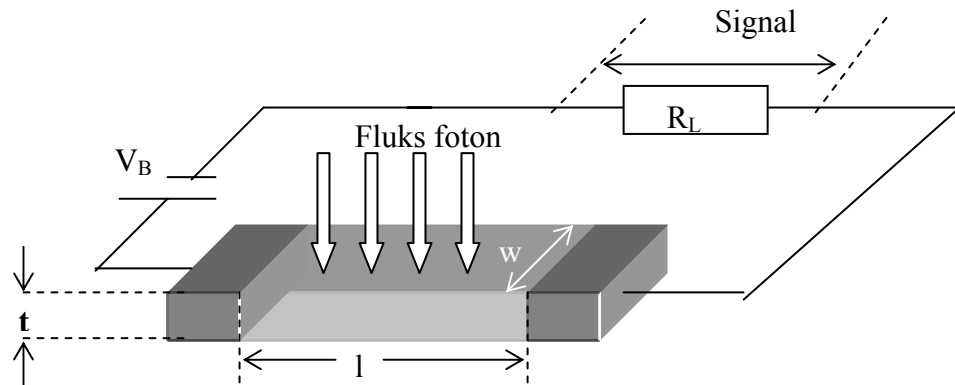


Gambar 2.8. Struktur fotokonduktor

Untuk hasil fotokonduksi yang maksimal dapat dilakukan dengan cara memperpanjang jarak W dan memperkecil L lapisan semikonduktor aktifnya.

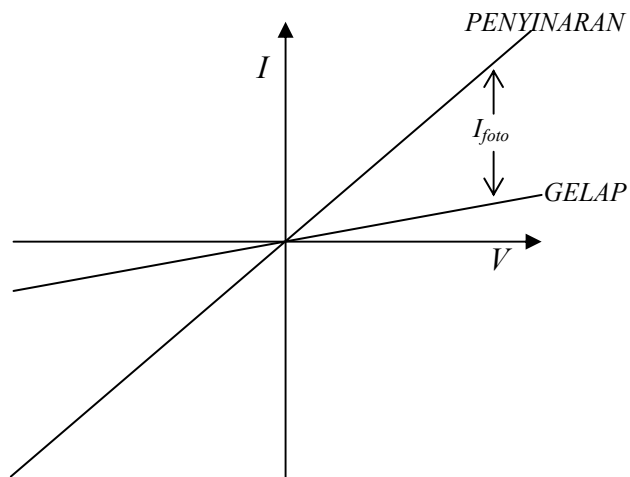
2.8.2 Karakteristik Listrik Fotokonduktor

Pada Gambar 2.8 diperlihatkan Proses pengukuran fotokonduktor. Untuk sampel yang memiliki resistansi besar $R_{\text{sampel}} \gg R_L$, maka signal yang terukur adalah sebagai perubahan arus dari rangkaian akibat adanya peningkatan konduktivitas sampel. Dan untuk menghindari pengaruh termal pada saat pemakaian, maka fotokonduktor harus digunakan pada temperatur cukup rendah yaitu $kT \ll h\nu$.



Gambar 2.9. Mekanisme pengukuran fotokondutor

Karakteristik listrik dari fotokondutor pada keadaan tanpa penyinaran (gelap) dan keadaan dengan penyinaran (Kwok, 1995) dapat dilihat pada kurva arus (I) terhadap tegangan (V) pada Gambar 2.9 berikut ini:



Gambar 2.10. karakteristik I-V fotokondutor dengan penyinaran dan tanpa penyinaran (gelap)

Pada kurva I-V pada keadaan gelap arus yang dihasilkan (untuk tipe-n) memenuhi persamaan berikut :

$$I = \frac{wteV_B\mu_e n}{l} \quad (2-14)$$

Ketika ada penyinaran maka timbul kenaikan arus, kenaikan arus tersebut biasanya disebut dengan arus foto (I_{ph}). Arus foto yang terukur dapat dinyatakan dengan persamaan

$$I_{foto} = \frac{wteV_B\mu_e \Delta n}{l} \quad (2-15)$$

dimana μ_e adalah mobilitas elektron dan $\Delta n = n - n_o$ adalah penambahan konsentrasi pembawa akibat fotogenerasi elektron. Bila kenaikan konsentrasi elektron konduksi adalah Δn maka akan terjadi kenaikan konduktivitas material sebesar $\Delta\sigma = (e \Delta n \mu_n)$.

2.8.3 Unjuk Kerja Fotokonduktor

Terdapat beberapa parameter yang digunakan untuk menunjukkan unjuk kerja dari fotokonduktor, diantaranya responsivitas (A/W) yang menunjukkan perbandingan antara sinyal output berupa respon arus atau respon tegangan dengan sinyal input berupa daya sumber cahaya yang datang pada fotokonduktor, dan didefinisikan sebagai berikut :

$$R = \frac{I_{foto}}{P_\lambda} \quad (2-16)$$

dimana I_{foto} (arus foto) adalah selisih arus penyinaran dengan arus gelap sedangkan P_λ adalah daya optik. Dari responsivitas dapat ditentukan respon

spektral dari fotokonduktor, dengan cara memplot responsivitas sebagai fungsi panjang gelombang. Dan dari persamaan (2-14) dapat diperoleh hubungan responsivitas dengan tegangan sebagai berikut:

$$R = \frac{wteV_B \mu_e \Delta n}{P_\lambda l} \quad (2-17)$$

Gain fotokonduksi (G) merupakan banyaknya elektron yang terdeteksi dan berkontribusi terhadap arus foto tiap foton yang datang (E. Monroy dkk, 1997). didefinisikan dengan persamaan

$$G = \frac{\tau}{t_{tr}} \eta \quad (2-18)$$

Dimana η adalah efisiensi kuantum internal, τ adalah waktu hidup pembawa muatan dan waktu transit pembawa muatan (t_{tr}) yang besarnya adalah

$$t_{tr} = \left(\frac{L^2}{\mu_n V} \right) \quad (2-19)$$

dimana L merupakan jarak *finger*, μ_n adalah mobilitas elektron dan V adalah tegangan yang digunakan. Hubungan responsivitas (R) dengan gain fotokonduksi (G) dirumuskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$G = \frac{I_{ph}/e}{P_{inc}/h\nu} = \frac{I_{ph}}{e} \cdot \frac{h\nu}{P_{inc}} = R \frac{hc}{e\lambda} \quad (2.20)$$

Dimana λ adalah panjang gelombang, h: konstanta Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ eV), c: kecepatan cahaya ($3 \cdot 10^8$ m/s) dan e : muatan elektron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)