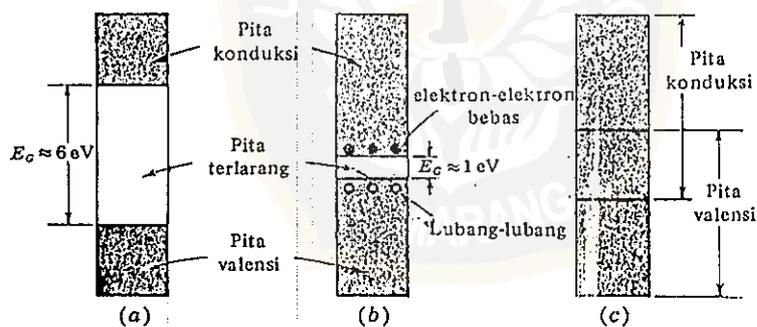


BAB II

DASAR TEORI

2.1 Logam

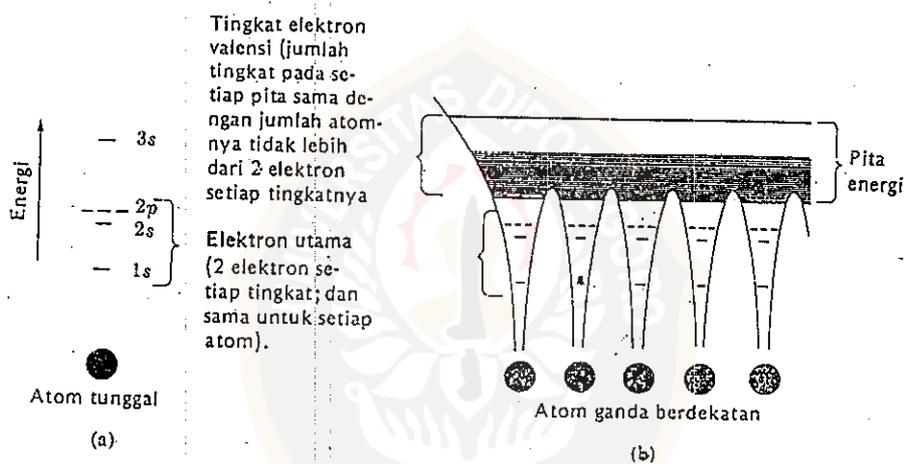
Logam merupakan suatu zat yang mempunyai struktur pita yang hanya sebagian terisi. Di bawah pengaruh medan listrik yang dikenakan, elektron dapat memperoleh energi tambahan dan memasuki tingkat energi yang lebih tinggi. Oleh karena elektron yang mobil (lincah) ini membentuk arus, maka bahan ini merupakan konduktor dan pita energi yang terisi sebagian merupakan pita konduksi. Gambar 2-1 (c) dibawah ini menunjukkan suatu contoh dari struktur pita sebuah logam, dimana pita valensi dan pita konduksi bertumpang tindih (Millman dan Halkias, 1971).



Gambar 2-1 : Struktur pita energi dari (a) isolator (b) semikonduktor (c) logam
(Millman dan Halkias, 1971)

Logam memiliki sifat-sifat, daya hantar panas dan daya hantar listrik yang tinggi, kedap cahaya dan biasanya dapat dipolis sampai mengkilap, agak berat dan mudah diubah bentuknya (Vlack, 1992).

Sifat logam tersebut disebabkan beberapa elektron terdislokalisasi dan dapat meninggalkan atom induknya (Gambar 2-2). Karena beberapa elektron dalam logam terdislokalisasi, maka dengan mudah dapat memindahkan muatan listrik dan energi termal. Sifat kedap cahaya dan daya pantul logam disebabkan oleh tanggap elektron yang terdislokalisasi terhadap getaran elektromagnetik pada frekuensi tinggi (Vlack, 1992).



Gambar 2-2 : Elektron valensi di dalam metal (sodium) (Vlack, 1992)

Salah satu sifat logam yang paling penting adalah konduktivitas listrik σ dan resistivitas ρ yang didefinisikan dengan persamaan (Smallman, 1991) :

$$R = \frac{\rho l}{A} \dots\dots\dots(2-1)$$

dengan R adalah hambatan benda uji (Ω)

ρ adalah hambatan jenis (Ωm)

l adalah panjang (m)

A adalah luas penampang (m^2)

Logam memiliki konduktivitas tinggi karena elektron-elektron dapat dengan mudah bermigrasi melalui kisi, resistensi disebabkan oleh penyebaran gelombang elektron oleh ketidakteraturan kisi. Ketidakteraturan ini disebabkan oleh beberapa faktor antara lain temperatur, unsur paduan deformasi atau radiasi atom yang masing-masing dapat menyebabkan perioditas kisi (Smallman, 1991).

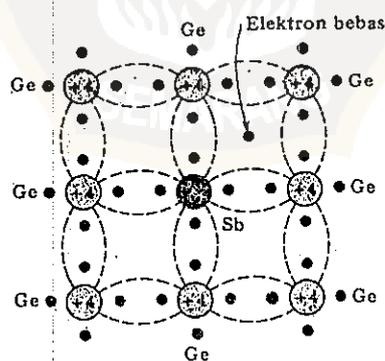
2.2 Semikonduktor

Semikonduktor merupakan suatu bahan yang mempunyai lebar pita terlarang relatif kecil (~ 1 eV). Bahan semikonduktor yang paling penting dan praktis adalah germanium dan silikon dengan nilai celah energi (E_g) berturut-turut 0,785 eV dan 1,21 eV pada 0 K. Energi sebesar ini biasanya tidak dapat diperoleh dari medan yang diterapkan. Oleh karena itu pita valensi tetap penuh dan pita konduksi kosong, sehingga bahan-bahan ini bersifat sebagai isolator pada temperatur rendah dan dikenal sebagai semikonduktor instrinsik (Millman dan Halkias, 1971). Gambar 2-1 (b) menunjukkan struktur pita energi dari sebuah semikonduktor.

Ketika temperatur dinaikkan, sebagian dari elektron valensi memperoleh panas termal yang lebih besar dari E_g , oleh karena itu elektron tersebut memasuki pita konduksi. Elektron-elektron ini bebas, dalam artian elektron-elektron tersebut

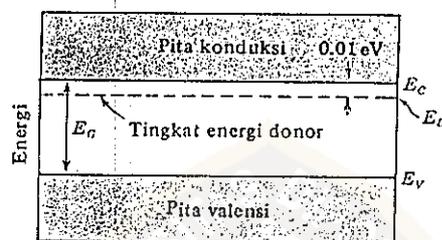
mudah bergerak walaupun dipengaruhi oleh medan yang kecil. Elektron-elektron bebas atau konduksi ditunjukkan pada gambar 2-1 (b) sebagai titik-titik. Isolator ini sekarang mulai dapat menghantarkan arus, dan disebut semikonduktor. Ketidakhadiran elektron dalam pita valensi digambarkan dengan lingkaran-lingkaran kecil dalam gambar yang disebut lubang (Millman dan Halkias, 1971).

Apabila atom takmurnian mempunyai lima elektron valensi, maka struktur kristal dapat ditunjukkan pada gambar 2-3. Atom takmurnian akan menggeser beberapa atom germanium dari kisi-kisi kristal. Empat dari lima elektron valensi akan mengisi ikatan kovalen dan yang kelima akan terlepas, dapat digunakan sebagai pembawa arus. Energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron yang kelima sebesar 0,1 eV untuk Ge dan 0,05 eV untuk Si. Takmurnian bervalensi lima yang cocok adalah antimurnian (Sb), fosfor dan arsenikum. Takmurnian ini akan memberikan kelebihan elektron sebagai pembawa muatan negatif, oleh karena itu dikenal sebagai takmurnian donor atau tipe-n (Millman dan Halkias, 1971).



Gambar 2-3 : Kisi-kisi kristal dengan atom germanium yang digeser oleh atom takmurnian bervalensi lima (Millman dan Halkias, 1971)

Takmurnian donor jika ditambahkan pada suatu semikonduktor, tingkatan-tingkatan energi yang diperkenankan akan berada sedikit di bawah pita konduksi seperti diperlihatkan pada gambar 2-4. Tingkatan-tingkatan energi baru yang diperkenankan merupakan tingkatan energi yang diskrit, oleh karena atom-atom takmurnian dalam kristal letaknya saling berjauhan, sehingga interaksi diantara mereka sangat kecil.

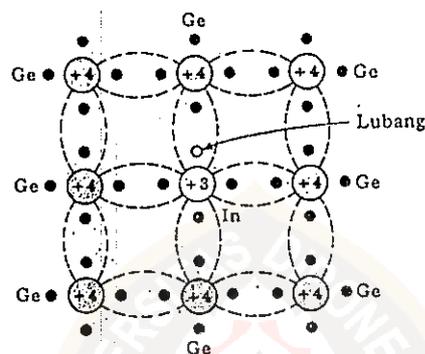


Gambar 2-4 : Diagram pita energi dari semikonduktor tipe-n (Millman dan Halkias, 1971)

Pada germanium, jarak antara tingkat energi yang diperkenankan hanya 0,01 eV dan 0,05 eV untuk silikon di bawah pita konduksi (Millman dan Halkias, 1971).

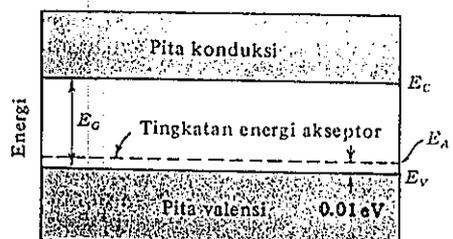
Bahan semikonduktor intrinsik apabila diisi dengan takmurnian tipe-n, tidak hanya jumlah elektron bertambah, tetapi jumlah lubang akan berkurang dibandingkan jumlah lubang yang terdapat dalam semikonduktor intrinsik. Berkurangnya lubang diakibatkan karena, dengan bertambahnya jumlah elektron, kecepatan rekombinasi elektron dengan lubang meningkat (Millman dan Halkias, 1971).

Suatu takmurnian trivalen (valensi tiga) ketika ditambahkan pada semikonduktor intrinsik, hanya tiga ikatan kovalen yang diisi, kekosongan yang terjadi pada ikatan keempat membentuk lubang. Keadaan ini dilukiskan dalam gambar 2-5. Takmurnian ini menyediakan pembawa muatan positif, dan dapat menerima elektron, dikenal sebagai akseptor atau takmurnian tipe-p (Millman dan Halkias, 1971).



Gambar 2-5 : Kisi-kisi kristal dengan satu atom germanium yang digeser oleh atom trivalen (Millman dan Halkias, 1971)

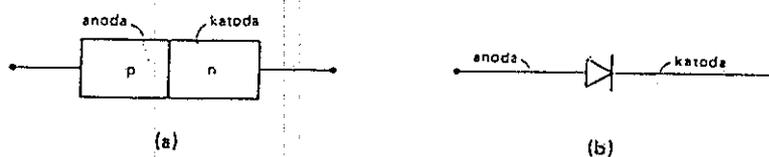
Takmurnian akseptor atau tipe-p jika ditambahkan semikonduktor intrinsik, akan terbentuk tingkatan energi yang diperbolehkan terletak sedikit di atas pita valensi, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2-6. Oleh karena energi yang dibutuhkan elektron untuk meninggalkan pita valensi dan mengisi tingkatan energi akseptor terlalu kecil, maka lubang-lubang yang terbentuk oleh elektron-elektron ini merupakan bagian yang terbesar dari pembawa muatan pada bahan semikonduktor tersebut (Millman dan Halkias, 1971).



Gambar 2-6 : Diagram tingkat energi dari semikonduktor tipe-p (Millman dan Halkias, 1971)

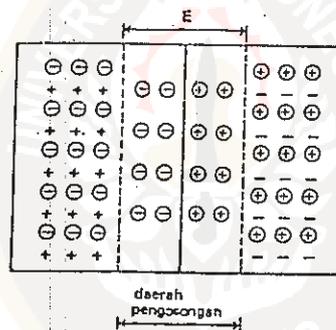
2.3 Dioda Semikonduktor

Dioda adalah suatu komponen elektronika yang dapat melewatkan arus pada satu arah saja. Ada berbagai macam dioda yaitu dioda tabung (*tube diode*), dioda-sambungan p-n (*p-n junction diode*), dioda kontak titik (*point-contact diode*) dan sebagainya. Bentuk dioda yang lazim digunakan terdiri dari semikonduktor jenis p yang dibuat bersambung dengan semikonduktor jenis n. Secara skematis dioda sambungan p-n dapat dilukiskan seperti pada gambar 2-7 di bawah ini (Sutrisno, 1986) :



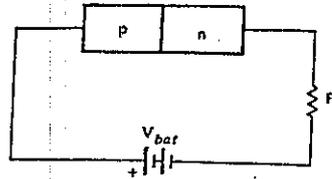
Gambar 2-7 : (a) Susunan dioda persambungan p-n, (b) Lambang dioda (Sutrisno, 1986)

Ketika terjadi persambungan antara bahan jenis-p dan bahan jenis-n, elektron bebas pada bahan jenis-n akan berdifusi melalui sambungan, masuk kedalam bahan jenis-p dan terjadi rekombinasi dengan lubang-lubang yang ada di dalam bahan p. Sebaliknya, lubang pada bahan p berdifusi masuk kedalam bahan n, dan berrekombinasi dengan elektron serta saling meniadakan muatan. Akibatnya, tepat pada persambungan p-n terjadi daerah tanpa muatan bebas, yang disebut daerah pengosongan (*depletion region*). Pada daerah pengosongan ini terjadi medan listrik yang melawan proses difusi selanjutnya, karena terpisahnya muatan positif dari muatan negatif. Dengan adanya medan listrik ini terjadi *beda potensial listrik* antara bagian p dan bagian n (Sutrisno, 1986). Hal ini dapat diperlihatkan pada gambar 2-8 :



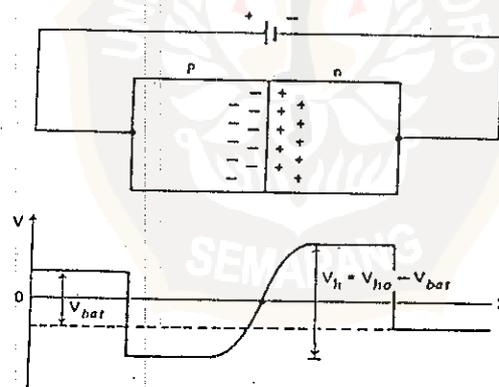
Gambar 2-8 : Muatan listrik pada sambungan p-n (Sutrisno, 1986)

Apabila antara ujung bahan-p dihubungkan dengan kutub positif dan bahan-n dengan kutub negatif suatu baterai, maka keadaan ini dikatakan sambungan p-n diberi bias maju sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2-9 di bawah ini, sedangkan sebaran potensial pada sambungan p-n tampak pada gambar 2-10.



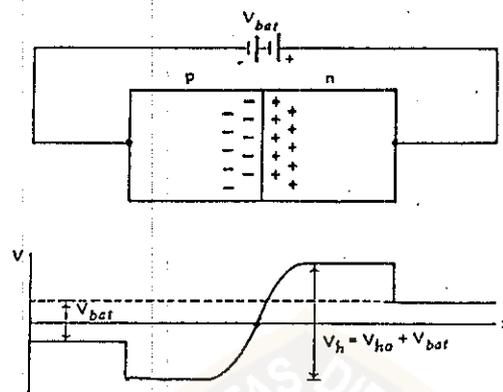
Gambar 2-9 : Bias maju pada sambungan p-n (Sutrisno, 1986)

Pemberian bias maju ini, menyebabkan bukit potensial (V_h) menjadi kurang daripada tinggi bukit potensial tegangan (V_{ho}). Dengan berkurangnya tinggi bukit potensial, elektron dari bagian n dan lubang dari bagian p mudah menyeberang, sehingga terjadi aliran listrik (Sutrisno, 1986).



Gambar 2-10 : Sebaran potensial listrik jika dioda diberi bias maju (Sutrisno, 1986)

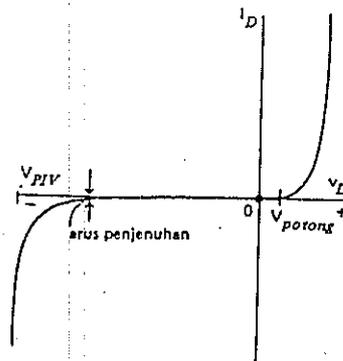
Sebaliknya jika kutub baterai positif dihubungkan dengan ujung bahan n dan kutub baterai negatif dengan ujung bahan p, dikatakan sambungan p-n diberi bias mundur. Distribusi potensial sambungan p-n dengan tegangan mundur ditunjukkan pada gambar 2-11.



Gambar 2-11 : Sebaran potensial pada sambungan p-n dengan bias mundur (Sutrisno, 1986)

Dengan adanya bias mundur pada sambungan p-n, bukit potensial bertambah tinggi, sehingga muatan ekstrinsik (elektron pada jenis-n dan lubang pada jenis-p) susah mengalir, karena tidak mempunyai cukup tenaga untuk mengatasi bukit potensial. Ternyata peninggian bukit potensial ini diikuti dengan pelebaran daerah pengosongan pada persambungan p-n (Sutrisno, 1986).

Ciri atau karakteristik dioda adalah hubungan antara arus dioda dan beda tegangan antara kedua ujung dioda. Untuk dioda persambungan p-n, karakteristik arus tegangannya dapat dilihat pada gambar 2-12.



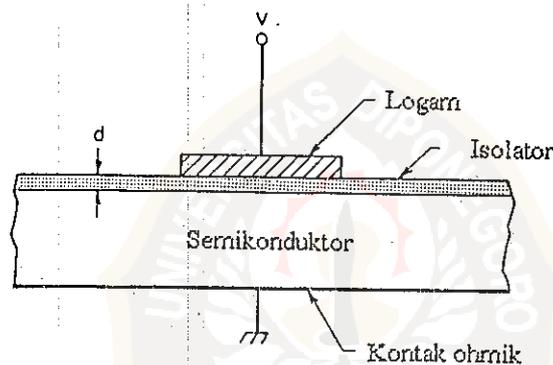
Gambar 2-12 : Karakteristik I-V dioda sambungan p-n (Sutrisno, 1986)

Pada lengkung ciri dioda, arus dioda $i_D = 0$ jika $v_D = 0$. Ini sesuai dengan ketentuan bahwa pada keadaan tanpa tegangan ($v_D = 0$) arus minoritas dan arus mayoritas mempunyai besar sama tetapi arah yang berlawanan, sehingga arus total pada keadaan panjar sama dengan nol (Sutrisno, 1986).

Jika dioda diberi tegangan maju ($V_D > 0$), arus i_D mula-mula mempunyai nilai $i_D = 0$, sehingga $V_D = V_{potong}$ setelah itu arus dioda naik dengan cepatnya terhadap perubahan tegangan dioda V_D . Untuk dioda silikon $V_{potong} = 0,6$ V sedang untuk dioda germanium $V_{potong} = 0,3$ V. Pada tegangan mundur arus yang mengalir amat kecil, yang terdiri dari arus pembawa muatan minoritas, mengalir dari anoda ke katoda dan disebut *arus penjenjahan* dioda. Pada tegangan mundur tertentu, lengkung ciri turun dengan curam, dikatakan terjadi *kedadalan* . Tegangan mundur pada keadaan ini disebut *tegangan dadal* atau tegangan balik puncak (*peak inverse voltage - PIV*). Dioda penyearah ada yang mempunyai $V_{PIV} = 50$ V, 100 V, 200 V dan seterusnya tergantung pada jenisnya (Sutrisno, 1986).

2.4 Dioda Semikonduktor Isolator Logam (SIL)

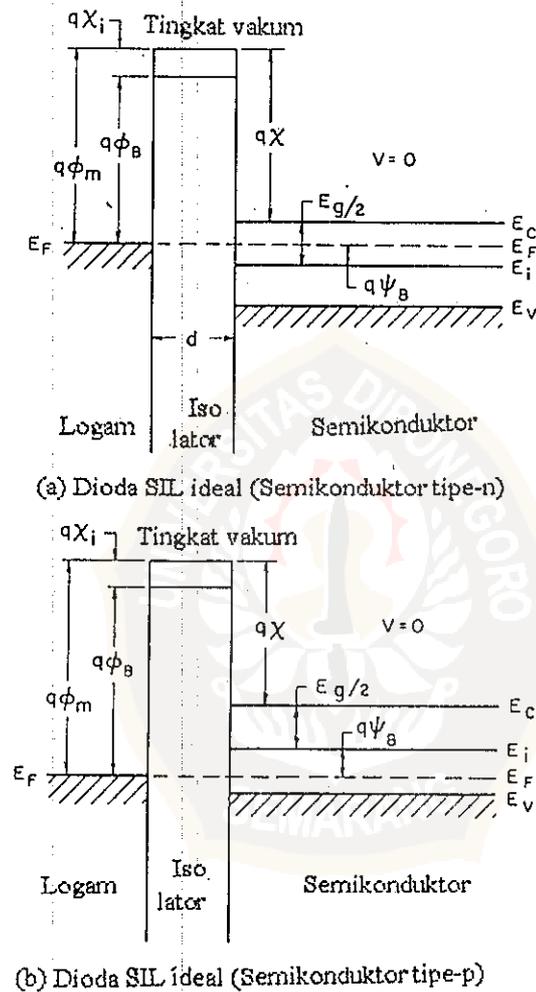
Perangkat elektronika dengan susunan Semikonduktor Isolator Logam (SIL) terdiri dari semikonduktor berupa substrat silikon tipe-n atau tipe-p. Pada permukaan silikon tersebut dideposisikan lapisan tipis sebagai isolator. Di atas permukaan isolator, dideposisikan lapisan tipis suatu logam dengan kemurnian yang sangat tinggi sebagai kontak elektroda, sedangkan pada permukaan silikon lain dideposisikan lapisan tipis suatu logam yang berfungsi sebagai kontak ohmik (Adianto, 1995). Susunan ini dapat dilihat pada gambar 2-13 (Sze, 1969) :



Gambar 2-13 : Susunan perangkat elektronik Semikonduktor Isolator Logam (Sze, 1969)

Dengan melihat gambar di atas dapat diketahui bahwa d adalah ketebalan isolator bahan organik dan V adalah tegangan yang diaplikasikan pada lempengan medan logam. Tegangan, V , akan positif apabila lempengan logam dibias positif dengan kontak ohmik dan V , akan negatif jika lempengan logam dibias negatif dengan kontak ohmik (Sze, 1969).

Diagram pita energi struktur SIL ideal saat $V = 0$ ditunjukkan pada gambar 2-14 masing-masing (a) untuk semikonduktor tipe-n dan (b) untuk semikonduktor tipe-p (Sze, 1969).



Gambar 2-14 : Diagram pita energi untuk struktur SIL ideal saat $V = 0$ (Sze, 1969)

Dioda SIL ideal didefinisikan sebagai berikut (Sze, 1969) :

- a. Pada bias aplikasi 0, tidak ada perbedaan energi antara fungsi kerja logam ϕ_m dan fungsi kerja semikonduktor ϕ_s atau perbedaan fungsi kerja $\phi_{ms} = 0$,

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad \text{untuk tipe n} \dots\dots\dots (2-2a)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad \text{untuk tipe p} \dots\dots\dots (2-2b)$$

dengan ϕ_m adalah fungsi kerja logam

χ adalah afinitas elektron semikonduktor

χ_i adalah afinitas elektron insulator

E_g adalah celah pita

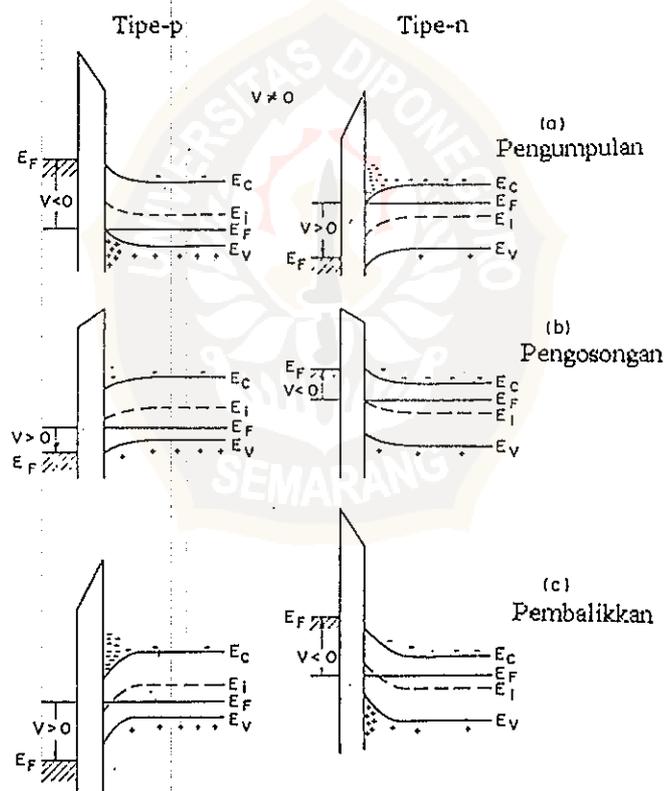
ϕ_B adalah potensial barrier antara logam dan semikonduktor

ψ_B adalah perbedaan potensial antara level Fermi E_f dan level Fermi intrinsik E_i

- b. Muatan-muatan yang dapat eksis pada struktur di bawah pengaruh pembiasan adalah muatan yang ada pada semikonduktor yang besarnya sama tetapi berlawanan tanda pada permukaan logam yang berdekatan dengan isolator.
- c. Tidak ada pembawa transport yang melewati insulator di bawah kondisi pembiasan dc atau resistivitas insulator tak terbatas.

Ketika suatu dioda SIL ideal dibias dengan tegangan positif atau negatif, secara mendasar ada tiga kejadian yang muncul pada permukaan semikonduktor.

Kejadian-kejadian tersebut diilustrasikan pada gambar 2-15. Sebagai contoh yang pertama adalah semikonduktor tipe-p. Ketika suatu tegangan negatif ($V < 0$) diaplikasikan pada lempengan logam, gambar 2-15 a, puncak pita valensi melengkung ke atas dan berakhir pada level Fermi. Untuk suatu dioda SIL ideal tidak ada arus yang mengalir pada struktur, oleh karena itu level Fermi tetap konstan pada semikonduktor. Karena pembawa kerapatan tergantung secara eksponensial pada perbedaan energi ($E_f - E_v$), pembelokan pita ini menyebabkan pengumpulan pembawa mayoritas (lubang) di dekat permukaan semikonduktor. Peristiwa ini disebut dengan kejadian *pengumpulan* (Sze, 1969).



Gambar 2-15 : Diagram pita energi untuk struktur SIL ideal ketika $V \neq 0$ untuk kedua semikonduktor tipe-n dan tipe-p (Sze, 1969)

Apabila tegangan positif kecil ($V > 0$) diaplikasikan, gambar 2-15 b, pita melengkung turun dan pembawa mayoritas dikosongkan, sehingga dinamakan kejadian *pengosongan*. Ketika tegangan positif besar diaplikasikan, gambar 2-15 c, lengkungan pita-pita yang rata seperti level instrinsik E_i pada permukaan yang menyeberang level Fermi E_f . Pada titik ini jumlah elektron-elektron (pembawa minoritas) pada permukaan lebih besar daripada lubang-lubang, permukaan kemudian dibalikkan dan ini adalah kejadian *pembalikkan*. Hasil yang sama dapat ditentukan untuk semikonduktor tipe-n, dengan mengubah polaritas tegangannya (Sze, 1969).

2.4.1 Efek Fungsi Kerja Logam

Suatu dioda SIL ideal telah diasumsikan bahwa perbedaan fungsi kerja (gambar 2-14) untuk suatu semikonduktor tipe-p (pers. 2-2a dan pers. 2-2b) adalah 0. Jika nilai ϕ_{ms} tidak 0 dan kerapatan muatan permukaan tetap Q_{fc} terdapat pada antarmuka insulator semikonduktor, kurva kapasitansi tegangan percobaan akan digantikan dari kurva teori ideal oleh sejumlah (Sze, 1969) :

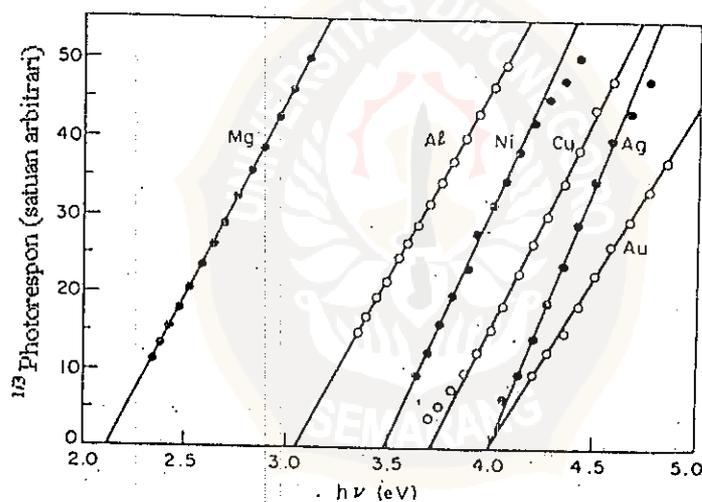
$$V_{FB} = \frac{Q_{fc}}{C_i} - \phi_{ms} \dots \dots \dots (2-3)$$

dengan V_{FB} adalah pergeseran tegangan yang berhubungan dengan kapasitansi pita datar dan C_i adalah kapasitansi insulator per satuan luas (ϵ_i/d). Kerapatan muatan tetap ditentukan dari persamaan (2-3) :

$$Q_{fc} = C_i (V_{FB} + \phi_{ms}) \quad \text{coul/cm}^2 \dots\dots\dots(2-4a)$$

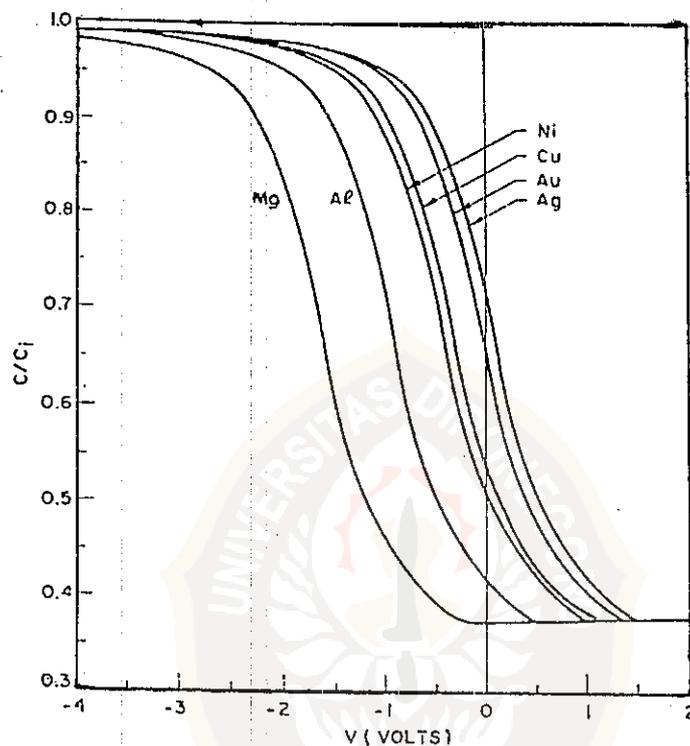
$$= \frac{C_i}{q} (V_{FB} + \phi_{ms}) \quad \text{charges/cm}^2 \dots\dots\dots(2-4b)$$

Efek fungsi kerja logam pada dioda SIL dapat dipelajari dengan menggunakan pengukuran photorespon dan pengukuran kapasitansi tegangan SIL. Gambar 2-16 menunjukkan akar pangkat tiga photorespon versus energi foton untuk dioda SIL menggunakan variasi logam. Intersepsi pada sumbu $h\nu$ berhubungan dengan energi barrier $q\phi_B$ logam- S_iO_2 (Sze, 1969).



Gambar 2-16 : Akar pangkat tiga photorespon versus energi foton untuk dioda SIL dengan menggunakan variasi logam (Sze, 1969)

Fungsi kerja logam diberikan oleh jumlah ϕ_B dan χ_i , dengan χ_i adalah afinitas elektron insulator. Hasil-hasil yang sama ditentukan dari pengukuran kapasitansi SIL sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2-17.



Gambar 2-17 : Hubungan kurva-kurva kapasitansi SIL (Sze, 1969)

Dari persamaan (2-3), jika dua buah logam yang berbeda dideposisikan sebagai lempengan medan pada sampel silikon teroksidasi yang sama, pergeseran antara dua kurva SIL eksperimen akan menunjukkan perbedaan fungsi kerja logam ($\phi_{m1} - \phi_{m2}$) atau ($\phi_{B1} - \phi_{B2}$). Oleh karena itu apabila nilai ϕ_m untuk beberapa logam

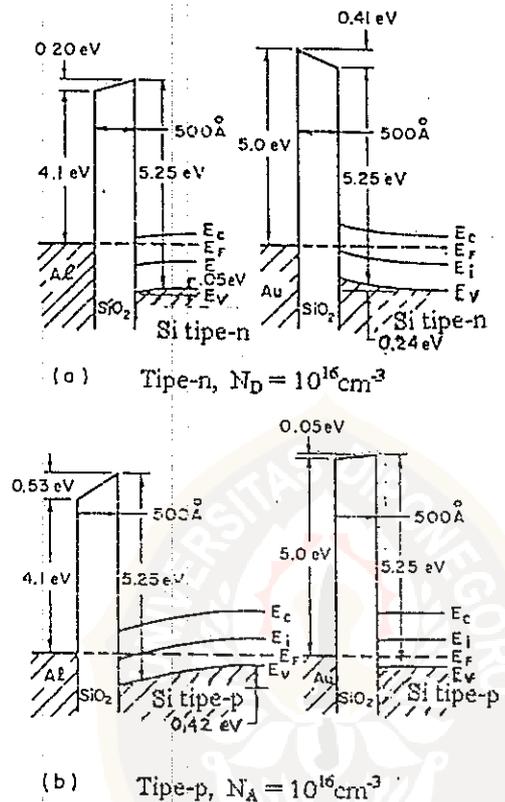
diketahui (misal Al dengan $\phi_m = 3,2$ V dari photorespon), kemudian nilai ϕ_m untuk logam lain, dapat ditentukan. Hasil-hasil ini dapat ditunjukkan pada tabel 2-1, juga ditunjukkan fungsi kerja vakum (Sze, 1969).

Tabel 2-1 : Fungsi kerja logam (volt) (Sze,1969)

Logam	ϕ_m (C - V)	ϕ_m (Photoresponse)	ϕ_m (Fungsi Kerja Vakum)
Mg	3,35	3,15	3,7
Al	4,1	4,1	4,25
Ni	4,55	4,6	4,5
Cu	4,7	4,7	4,25
Au	5,0	5,0	4,8
Ag	5,1	5,05	4,3

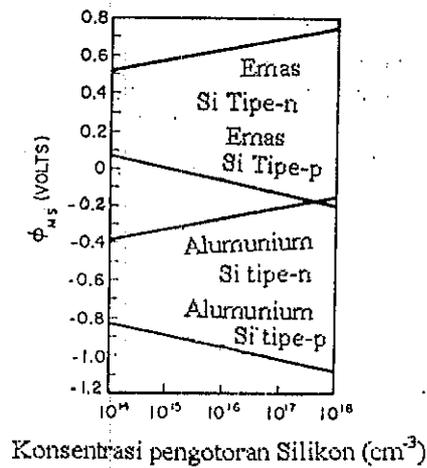
Hasil-hasil di atas menunjukkan bahwa ϕ_{ms} dapat mempengaruhi potensial permukaan silikon dan pada pengevaluasian kerapatan muatan permukaan dari kurva C-V, pergeseran tegangan harus dikoreksi untuk ϕ_m . Gambar 2-18 (a) dan 2-18 (b) menunjukkan diagram pita untuk dua elektroda logam (Al dan Au) masing-masing pada silikon tipe-n dan tipe-p (10^{-16} cm⁻³) untuk ketebalan oksida 500 Å dan muatan permukaan 0. Dapat dilihat bahwa dengan memilih logam-logam elektroda yang

sesuai, permukaan tipe-n dapat diubah dari pengumpulan ke pengosongan dan permukaan tipe-p dapat diubah dari pita datar ke pembalikkan (Sze, 1969).



Gambar 2-18 : Diagram pita untuk Al dan Au pada silikon (a) tipe-n (b) tipe-p (Sze, 1969)

Pada gambar 2-19, dibutuhkan koreksi ϕ_{ms} yang ditunjukkan sebagai fungsi tipe dan pendopongan silikon untuk kedua elektroda emas dan aluminium (Sze, 1969).



Gambar 2-19 : Diagram ϕ_{ms} versus pendopongan silikon (Sze, 1969)

2.4.2 Efek Orientasi Kristal

Kerapatan tingkat permukaan suatu sistem Si – SiO₂ dibawah kondisi oksidasi yang diberikan mempunyai nilai terbesar untuk substrat orientasi <111>. Hasil dapat dikorelasi dengan efek orientasi kristal pada nilai-nilai oksidasi. Nilai oksidasi diberikan oleh $C \exp(-E_a/kT)$ dengan C adalah suatu tetapan yang besarnya sesuai ikatan silikon yang tersedia per cm² untuk bereaksi dengan oksigen atau molekul air dan E_a adalah energi aktifasi (Sze, 1969).

Sifat-sifat bidang kristal silikon yang berorientasi panjang <111>, <110>, dan <100> memperlihatkan bahwa permukaan (111) mempunyai bilangan ikatan tersedia per cm² terbesar dan permukaan (111) mempunyai nilai terkecil (Sze, 1969). Hal ini ditunjukkan pada tabel 2-2 di bawah ini :

Tabel 2-2 : Sifat-sifat bidang kristal silikon (Sze, 1969)

Orientasi	<111>	<110>	<100>
Luasan bidang sel satuan	$\sqrt{3}a^2/2$	$\sqrt{2}a^2$	a^2
Jumlah atom pada satu luasan	2	4	2
Jumlah ikatan yang tersedia pada satu luasan	3	4	2
Jumlah atom per cm^2	$7,85 \times 10^{14}$	$9,6 \times 10^{14}$	$9,6 \times 10^{14}$
Jumlah ikatan yang tersedia per cm^2	$11,8 \times 10^{14}$	$6,8 \times 10^{14}$	$6,8 \times 10^{14}$

Pada pengujian permukaan dengan orientasi berbeda, menunjukkan bahwa $E_a(100) > E_a(111) > E_a(110)$. Karena permukaan (100) mempunyai E_a terbesar dan ikatan yang ada terkecil, nilai oksidasi (100) akan menjadi terbesar (Sze, 1969).

2.5 Plasma

2.5.1 Definisi Plasma

Jika energi (temperatur) suatu gas dinaikkan, atom-atom gas akan terionisasi. Gas melepaskan elektron-elektronnya yang pada keadaan normal mengelilingi inti. Percampuran antara ion-ion yang bermuatan positif dan elektron-elektron yang bermuatan negatif mempunyai sifat-sifat yang sangat berbeda dengan gas pada umumnya dan materi pada fase ini disebut plasma. Jadi, plasma dapat didefinisikan

sebagai gas terionisasi dan dikenal sebagai materi keempat setelah fase padat, cair dan fase gas (Nur, 1998).

Jagad raya ini diperkirakan terdiri dari 99 % plasma (Santoso, 1976). Plasma ini terbentuk dari proses ionisasi gas atmosfer oleh partikel-partikel kosmis dan terjadi sejak awal terciptanya alam semesta melalui reaksi termonuklir. Di laboratorium, plasma dapat dibentuk dengan mengionisasi gas melalui lucutan listrik dalam tabung gas bertekanan rendah, pemanasan laser, pemanasan biasa, medan osilator radio frekuensi (RF), sumber arus searah atau gelombang mikro.

2.5.2 Derajat Ionisasi (δ) dan Panjang Gelombang Debye (λ_D)

Berdasarkan ionisasinya, plasma dapat dibedakan menjadi dua yaitu terionisasi lemah dan terionisasi kuat. Terionisasi lemah, jika derajat ionisasinya kurang dari 10^{-4} dan terionisasi kuat apabila derajat ionisasinya lebih dari 10^{-4} . Derajat ionisasi disimbolkan sebagai δ dan didefinisikan sebagai (Santoso, 1976) :

$$\delta = \frac{n_+}{n} = \frac{n_-}{n} \dots\dots\dots(2-5)$$

dengan n_+ adalah jumlah ion positif

n_- adalah jumlah ion negatif

n adalah jumlah zarah mula-mula

Pada gas yang terionisasi rendah, interaksi antara partikel adalah interaksi *binair*. Dinamika partikel bermuatan ditentukan oleh tumbukan antara elektron-partikel netral dan ion-partikel netral. Sedangkan tumbukan antara partikel bermuatan

sering diabaikan, karena rendahnya kerapatan partikel bermuatan dibandingkan dengan partikel-partikel netral. Selain itu, akibat dari perbedaan massa antara sebuah elektron dengan partikel netral, tumbukan antara elektron dan partikel netral tanpa pertukaran energi yang cukup berarti, hanya menghasilkan arah gerak elektron saja yang berubah. Jadi dapat disebutkan bahwa elektron-elektron mempunyai suatu temperatur kesetimbangan antar sesamanya yaitu temperatur elektronik T_e , sedangkan ion-ion dan partikel-partikel netral dengan massa yang hampir sama mempunyai suatu temperatur kesetimbangan yang lain pula yaitu $T_o = T_i$ (Nur, 1998).

Pada gas yang terionisasi tinggi, interaksi antara partikel-partikel bermuatan memegang peranan yang sangat penting. Gerakan elektron-elektron dan ion-ion terkendali dengan gaya Coulomb yang menimbulkan efek-efek kolektif (Nur, 1998).

Meskipun plasma adalah gas yang terionisasi, namun tidak semua gas yang terionisasi adalah plasma. Hal ini karena plasma harus mempunyai syarat tertentu yang harus dipenuhi seperti kerapatan, suhu plasma, panjang gelombang Debye (λ_D), dan energi (kT_e). Hubungan antara panjang gelombang Debye, kerapatan plasma, dan suhu plasma dapat dirumuskan sebagai berikut (Francis, 1974) :

$$\lambda_D = \left[\frac{\epsilon_0 k T_e}{n e^2} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (2-6)$$

dengan λ_D adalah panjang Debye (m)

ϵ_0 adalah konstanta permitivitas ($C^2 N^{-1} m^{-2}$)

k adalah konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$)

T_e adalah temperatur plasma (K)

n adalah kerapatan elektron (m^{-3})

e adalah muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19} C$)

2.5.3 Pembentukan Plasma Dengan Medan Radio Frekuensi

Plasma adalah gas yang terionisasi. Untuk mengionisasi gas dapat dilakukan dengan memberikan energi pada sistem reaktor plasma. Salah satu sumber energi yang sering dipakai adalah osilator radio frekuensi (RF) yaitu rangkaian osilator yang berfungsi untuk memasok daya dan memberikan getaran listrik pada daerah frekuensi radio (0,3 – 300 MHz).

Catu daya radio frekuensi ini terdiri dari rangkaian L, C yang disusun secara seri dan beberapa komponen lain termasuk transformator untuk menyesuaikan tegangan yang diperlukan terhadap tegangan PLN. Komponen utama dari sumber radio frekuensi adalah sebuah tabung trioda yang mempunyai daya keluaran hingga ratusan watt. Besar frekuensi dari sistem radio frekuensi dapat diubah-ubah berdasarkan persamaan (Wasito, 1976) :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \dots\dots\dots(2-7)$$

dengan f adalah frekuensi keluaran (Hz)

L adalah induktansi (H)

C adalah kapasitansi (F)

Terjadinya proses ionisasi gas dalam reaktor plasma dengan menggunakan catu daya radio frekuensi (RF) dapat berlangsung dengan dua cara yaitu (Beiser, 1991) :

- a. proses ionisasi secara penyerapan energi elektromagnetik yang dipancarkan dari osilator radio frekuensi (RF) sehingga terjadi transisi tingkat-tingkat energi atom.
- b. Proses ionisasi yang terjadi karena adanya tumbukan antar partikel gas dengan elektron yang terpancar dari elektroda.

Pada proses yang pertama, terjadi penyerapan energi gelombang elektromagnetik (foton). Hal ini mengakibatkan partikel gas tereksitasi dan terjadi transisi tingkat-tingkat energi atom. Jika frekuensi foton yang datang melebihi frekuensi ambang partikel untuk ionisasi maka elektron dapat terlepas dari atom dan terbentuk ion dari gas tersebut. Proses ini disajikan dalam persamaan (Beiser, 1991) :

$$h\nu = K + h\nu_0 \dots\dots\dots(2-8)$$

dengan h adalah konstanta Planck ($6,602 \times 10^{-34}$ J.s)

K adalah energi kinetik fotoionisasi (J)

ν adalah frekuensi foton datang (Hz)

ν_0 adalah frekuensi ambang ionisasi (Hz)

Penyerapan energi foton oleh partikel gas selain menyebabkan ionisasi, dapat juga menyebabkan disosiasi yaitu pemisahan molekul gas menjadi atom-atom penyusunnya.

Proses kedua dari ionisasi adalah peristiwa tumbukan antar partikel di dalam tabung reaktor. Pada saat anoda dan katoda di dalam tabung reaktor bertekanan rendah, diberikan beda potensial yang besar dari sumber tegangan osilator radio frekuensi, maka elektron-elektron yang terletak pada katoda akan terlepas dan dipercepat menuju anoda. Dalam perjalanannya partikel-partikel ini mengalami tumbukan dengan partikel gas yang banyak tersebar di antara anoda dan katoda. Peristiwa ini mengakibatkan pemindahan seluruh atau sebagian dari energi partikel penumbuk ke partikel gas, sehingga partikel-partikel gas dapat tereksitasi. Jika energi perpindahan ini melebihi energi ambang ionisasi, maka partikel gas dapat mengalami ionisasi. Proses ini senantiasa disertai dengan lucutan, sehingga plasma yang dihasilkan disebut plasma lucutan pijar (*glow discharge plasma*) (Beiser, 1991).

2.5.4 Polimerisasi Plasma

Apabila suatu lucutan pijar dibangkitkan dalam sebuah tabung reaktor yang mengandung campuran bahan organik, pembentukan polimer akan terjadi pada substrat atau bahkan dalam ruang plasma. Hal ini disebut sebagai polimerisasi plasma dan pada saat kondisi lucutan yang sesuai telah dipilih, lapisan tipis terpolimer dapat dideposisikan pada substrat material yang diinginkan (Konuma, 1992).

Proses polimerisasi plasma terdiri dari dua tipe utama polimerisasi :

a. Polimerisasi plasma terinduksi

Rute langsung dari monomer menjadi polimer dapat digambarkan dengan polimerisasi reaksi berantai pada kasus monomer-monomer tertentu. Polimerisasi

plasma terinduksi secara skematis diperlihatkan dengan mekanisme seperti di bawah ini (Yasuda, 1985) :

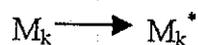
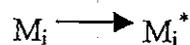


Dengan i, k adalah jumlah satuan pengulangan, M menyatakan bahan (material) monomer yang dapat menjadi sebuah kepingan atau bahkan sebuah atom dilepaskan dari bahan monomer organik, tetapi tidak perlu memiliki struktur sama seperti bahan monomer, M^* menyatakan sebuah reaktif yang dapat menjadi sebuah ion dari lucutan, sebuah molekul yang terangsang atau sebuah radikal bebas yang dihasilkan dari monomer M tetapi tidak perlu mempermasalahkan struktur molekuler dari bahan monomer.

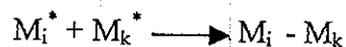
b. Polimerisasi plasma

Rute lewat sebuah perantara reaktif adalah reaksi utama di dalam polimerisasi plasma. Polimer yang terbentuk melalui reaksi sebagai berikut :

reaksi awal



reaksi berikutnya



Reaksi pembentukan



Pada pemakaian sebuah plasma, lapisan tipis polimer dapat dibentuk secara langsung dari gas-gas organik yang tidak mempunyai letak bangun aktif, sedangkan pada reaksi polimerisasi biasa monomer yang mempunyai letak bangun aktif, semacam ikatan ganda diperlukan dalam reaksi polimerisasi (Konuma, 1992).

Yasuda (1985) mengelompokkan monomer hidrokarbon kedalam tiga kelas menurut kereaktifannya selama proses polimerisasi, yaitu :

- a. monomer yang mengandung tiga ikatan, cincin aromatik dan heteroring
- b. monomer dengan ikatan ganda atau struktur siklik
- c. hidrokarbon jenuh

Yasuda (1985) juga telah menyimpulkan bahwa untuk kelompok (1) dengan dua radikal bebas yang mempunyai dua bangun aktif dan dapat berguna pada saat reaksi polimerisasi. Untuk kelompok (2) dengan satu radikal bebas dan untuk kelompok (3) dengan satu radikal dan dua radikal bebas, mempunyai peran yang hampir sama pada reaksi-reaksi polimerisasi.

Studi yang telah dilakukan tidak banyak menjelaskan tentang perilaku elektron-elektron dalam plasma organik. Kerapatan elektron dan temperatur elektron untuk plasma C_6H_6 -Ar akan menghasilkan lapisan tipis di daerah tekanan rendah dan laju aliran monomer tinggi. Kerapatan elektron akan mencapai $10^9/cm^3$ dan temperatur elektron kira-kira 3×10^4 K (Konuma, 1992).

2.6 Teknik Deposisi

Teknik deposisi adalah teknik yang digunakan untuk mendeposisikan plasma pada substrat atau bahan yang dikehendaki agar terbentuk lapisan tipis. Ada beberapa teknik pendeposisian lapisan tipis yang dikembangkan para ahli seperti teknik evaporasi hampa (*vacuum evaporation*), teknik penembakan ion (*ion beam sputtering*), dan teknik plasma lucutan pijar (*glow discharge plasma*) (Suyitno, dkk, 1998).

Pada pendeposisian lapisan tipis bahan organik dengan menggunakan bahan organik toluena sebagai deposan, teknik yang dipilih adalah teknik plasma lucutan pijar. Untuk pendeposisian lapisan tipis bahan organik terpolimer ini dibutuhkan uap bahan organik (toluena) yang akan dibawa kedalam reaktor plasma oleh gas argon (Ar). Reaktor plasma ini adalah tabung vakum yang berbentuk silinder. Setelah adanya lucutan akibat adanya pengaruh osilator medan radio frekuensi (RF), partikel gas akan mengalami ionisasi dan membentuk plasma (Suyitno, dkk, 1998).

Plasma yang terbentuk akan didorong keluar dari kamar reaktor menuju ruang pendeposisian melalui kanal keluaran oleh tegangan pendorong. Pada ruang pendeposisian yang dihubungkan dengan pompa vakum terdapat lensa Einzel dan tempat dudukan substrat. Setelah plasma sampai pada kamar deposisi, maka plasma akan difokuskan oleh lensa Einzel dan dipercepat menuju substrat oleh daya tarik dari katoda. Di atas katoda ini telah diletakkan substrat, sehingga akan mengakibatkan plasma terdeposisi pada permukaan substrat. Proses ini berlangsung terus menerus sampai terbentuk lapisan tipis (Suyitno, dkk, 1998).