7 DIODE SAMBUNGAN P-N

7.1 Semikonduktor

Pada bagian sebelumnya kita telah mempelajari karakteristik bahan semikonduktor beserta kemampuannya untuk menghantarkan listrik. Berdasarkan tingkat kemurnian atom penyusunnya, terdapat dua kelompok semikonduktor yaitu intrinsik dan ekstrinsik. Untuk kelompok ekstrinsik terdapat dua jenis/tipe semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Bahan semikonduktor yang banyak dipelajari dan secara luas telah dipakai adalah bahan silikon (Si).

Semikonduktor tipe-n dibuat dari bahan silikon murni dengan menambahkan sedikit pengotor berupa unsur valensi lima. Empat elektron terluar dari "donor" ini berikatan kovalen dan menyisakan satu elektron lainnya yang dapat meninggalkan atom induknya sebagai elektron bebas. Dengan demikian pembawa muatan mayoritas pada bahan ini adalah elektron.

Hal yang sama, semikonduktor tipe-p dibuat dengan mengotori silikon murni dengan atom valensi tiga, sehingga meninggalkan kemungkinan untuk menarik elektron. Pengotor sebagai "aseptor" menghasilkan proses konduksi dengan lubang (*hole*) sebagai pembawa muatan mayoritas.

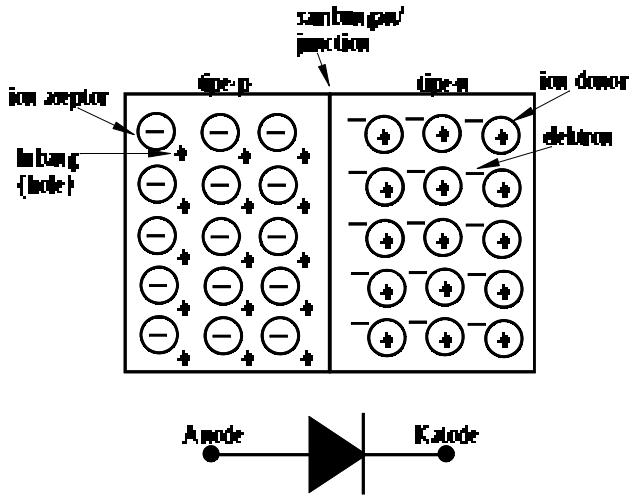
7.2 Diode

Misalkan kita memiliki sepotong silikon tipe-p dan sepotong silikon tipe-n dan secara sempurna terhubung membentuk sambungan p-n seperti diperlihatkan pada gambar 7.1.

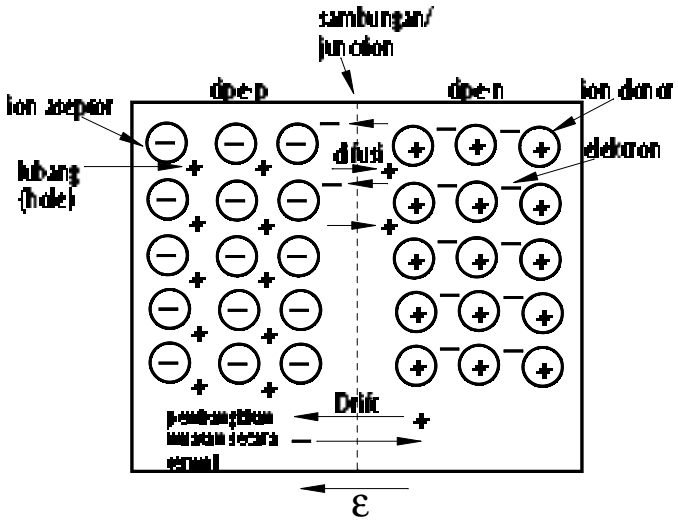
Sesaat setelah terjadi penyambungan, pada daerah sambungan semikonduktor terjadi perubahan. Pada daerah tipe-*n* (gambar 7.1, sebelah kanan) memiliki sejumlah elektron yang akan dengan mudah terlepas dari atom induknya. Pada bagian kiri (tipe-*p*), atom aseptor menarik elektron (atau menghasilkan lubang). Kedua pembawa muatan mayoritas tersebut memiliki cukup energi untuk mencapai material pada sisi

lain sambungan. Pada hal ini terjadi difusi elektron dari tipe-*n* ke tipe-*p* dan difusi lubang dari tipe-*p* ke tipe-*n*.

Proses difusi ini tidak berlangsung selamanya karena elektron yang sudah berada di tempatnya akan menolak elektron yang datang kemudian. Proses difusi berakhir saat tidak ada lagi elektron yang memiliki cukup energi untuk mengalir.



Gambar 7.1 Sambungan semikonduktor tipe-*p* dan tipe-*n*



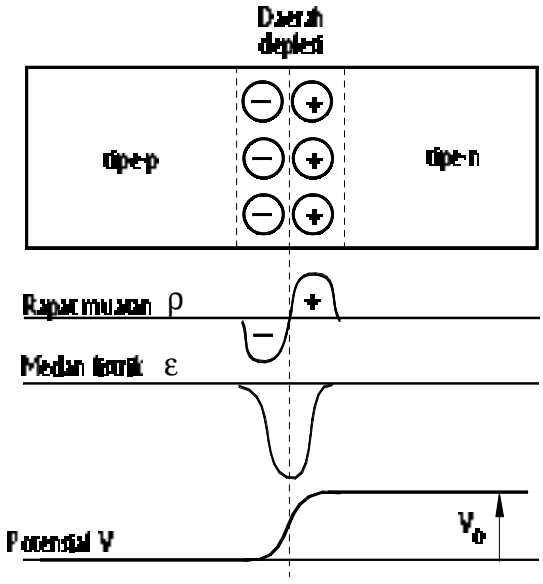
Gambar 7.2 Mekanisme aliran muatan pada daerah sambungan

Kita harus memperhitungkan proses selanjutnya dimana elektron dapat menyeberang sambungan. Daerah yang sangat tipis dekat sambungan disebut daerah deplesi (*depletion region*) atau daerah transisi. Daerah ini dapat membangkitkan pembawa muatan minoritas saat terdapat cukup energi termal untuk membangkitkan

pasangan lubang-elektron. Salah satu dari pembawa muatan minoritas ini, misalnya elektron pada tipe-p, akan mengalami pengaruh dari proses penolakan elektron difusi dari tipe-n. Dengan kata lain elektron minoritas ini akan ikut tertarik ke semikonduktor tipe-n. Gerakan pembawa muatan akibat pembangkitan termal ini lebih dikenal sebagai *"drift"*. Situasi akan stabil saat arus difusi sama dengan arus drift.

Pada daerah sambungan/daerah diplesi yang sangat tipis terjadi pengosongan pembawa muatan mayoritas akibat terjadinya difusi ke sisi yang lain. Hilangnya pembawa muatan mayoritas di daerah ini meninggalkan lapisan muatan positip di daerah tipe-n dan lapisan muatan negatif di daerah tipe-p.

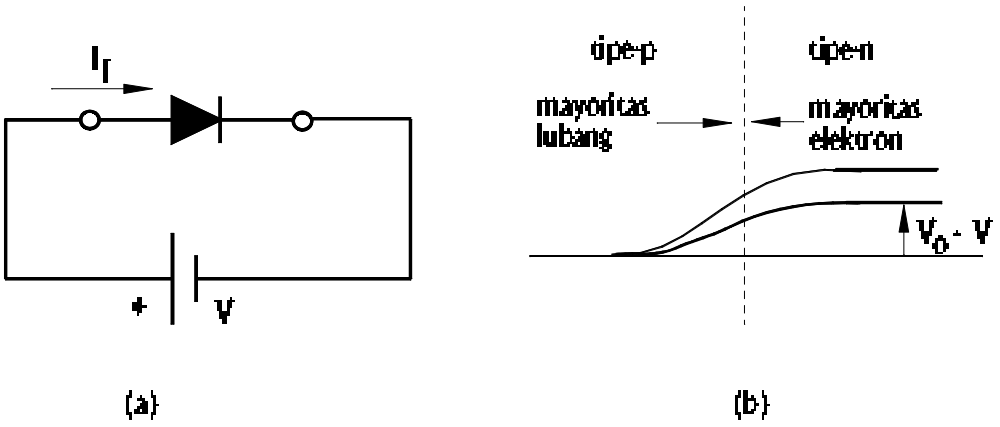
Lapisan muatan pada daerah diplesi ini dapat dibandingkan dengan kapasitor keping sejajar yang termuati. Karena terjadi penumpukan muatan yang berlawanan pada masing-masing keping, maka terjadi perbedaan potensial yang disebut sebagai "potensial kontak"atau "potensial penghalang" V_o (lihat gambar 7.3). Keadaan ini disebut diode dalam keadaan rangkaian terbuka.



Gambar 7.3 Diode p-n dalam keadaan rangkaian terbuka

Dalam keadaan rangkaian terbuka seperti diperlihaatkan pada gambar 7.3, hanya pada daerah deplesi yang terjadi penumpukan muatan pada masing-masing sisi; daerah lainnya dalam keadaan netral. Penumpukan muatan pada daerah deplesi mengakibatkan terjadinya medan listrik ε dalam arah $-x$. Kita dapat menggunakan $v = -\int \varepsilon \, dx$ untuk

mendapatkan distribusi potensial pada daerah deplesi dengan mengambil integral medan listrik. Potensial kontak/potensial penghalang V_o yang terjadi akan menahan terjadinya difusi pembawa muataan mayoritas dan memberi kesempataan terjadinya arus drift melalui sambungan seperti telah dijelaskan di atas.



Gambar 7.4 Diode *p-n* berpanjar maju (*forward bias*): a) Rangkaian dasar dan b) Potensial penghalang mengalami penurunan.

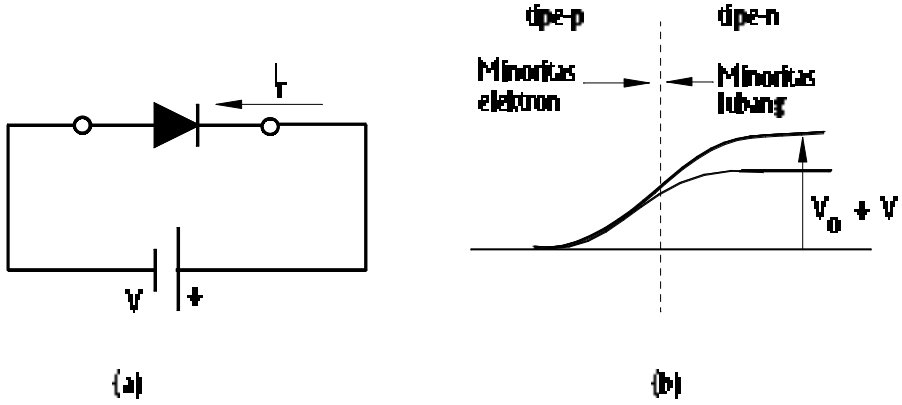
7.3 Panjar Maju (*Forward Bias*)

Besarnya komponen arus difusi sangat sensitif terhadap besarnya potensial penghalang V_o. Pembawa muatan mayoritas yang memiliki energi lebih besar dari eV_o dapat melewati potensial penghalang. Jika keseimbangan potensial terganggu oleh berkurangnya ketinggian potensial penghalang menjadi $V_o - V$, probabilitas pembawa muatan mayoritas mempunyai cukup energi untuk melewati sambungan akan meningkat dengan drastis. Sebagai akibat turunnya potensial penghalang, terjadi aliran arus lubang dari material tipe-p ke tipe-n, demikian sebaliknya untuk elektron.

Dengan kata lain menurunnya potensial penghalang memberi kesempatan pada pembawa muatan untuk mengalir dari daerah mayoritas ke daerah minoritas. Jika potensial penghalang diturunkan dengan pemasangan panjar maju eksternal V seperti diperlihatkan pada gambar 7.4, arus I_f akan mengalir.

7.4 Panjar Mundur (*Reverse Bias*)

Jika potensial penghalang dinaikkan menjadi $V_o + V$ dengan memasang panjar mundur sebesar V (lihat gambar 7.5), maka probabilitas pembawa muatan mayoritas memiliki cukup energi untuk melewati potensial penghalang akan turun secara drastis. Jumlah pembawa muatan mayoritas yang melewati sambungan praktis turun ke nol dengan memasang panjar mundur sebesar sekitar sepersepuluh volt.



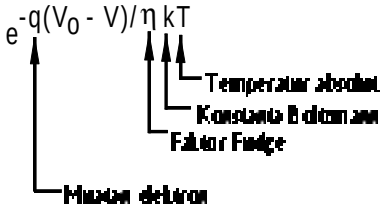
Gambar 7.5 Diode *p-n* berpanjar mundur (r*everse bias*) a) Rangkaian dasar dan b) Potensial penghalang meninggi.

Pada kondisi panjar mundur, terjadi aliran arus mundur (I_r) yang sangat kecil dari pembawa muatan minoritas. Pembawa muatan minoritas hasil generasi termal di dekat sambungan akan mengalami "drift" searah medan listrik. Arus mundur akan mencapai harga jenuh $-I_o$ pada harga panjar mundur yang rendah.

Harga arus mundur dalam keadaan normal cukup rendah dan diukur dalam μA (untuk germanium) dan nA (untuk silikon). Secara ideal, arus mundur seharusnya berharga nol, sehingga harga $-I_o$ yang sangat rendah pada silikon merupakan faktor keunggulan silikon dibandingkan germanium. Besarnya I_o berbanding lurus dengan laju generasi termal $g = rn_i^2$ dimana harganya berubah secara eksponensial terhadap perubahan temperatur.

7.5 Karakteristik Umum Diode

Saat diode berpanjar maju, probabilitas pembawa muatan mayoritas yang mempunyai cukup energi untuk melewati potensial penghalang $V_o - V$ akan tergantung pada faktor:



Jadi arus difusi yang mengalir adalah sebesar

$$I = Ae^{V/\eta V_T} \qquad (V_T = kT/q) \tag{7.1}$$

dimana V_T = 25 mV pada temperatur ruang, η =1 untuk gemanium dan berharga 2 untuk silikon. Jadi arus total yang mengalir adalah sebesar

$$I = -I_o + Ae^{V/\eta V_T} \tag{7.2}$$

atau karena I = 0 untuk V = 0 diperoleh

$$I = I_o\left(e^{V/\eta V_T} - 1\right) \tag{7.3}$$

Persamaan 7.3 merupakan karakteristik *I-V* umum diode. Jika V berharga positif dan bernilai sebesar sekitar sepersepuluh volt maka persamaan 7.3 menjadi

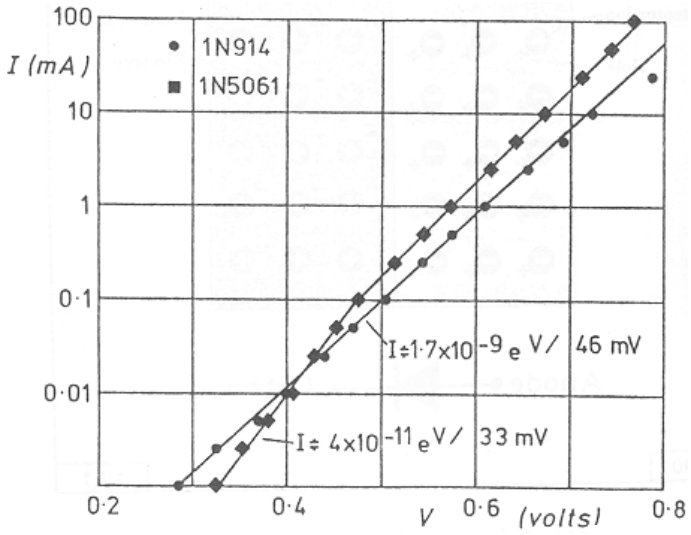
$$I \approx I_o e^{V/\eta V_T} \tag{7.4}$$

dan juga

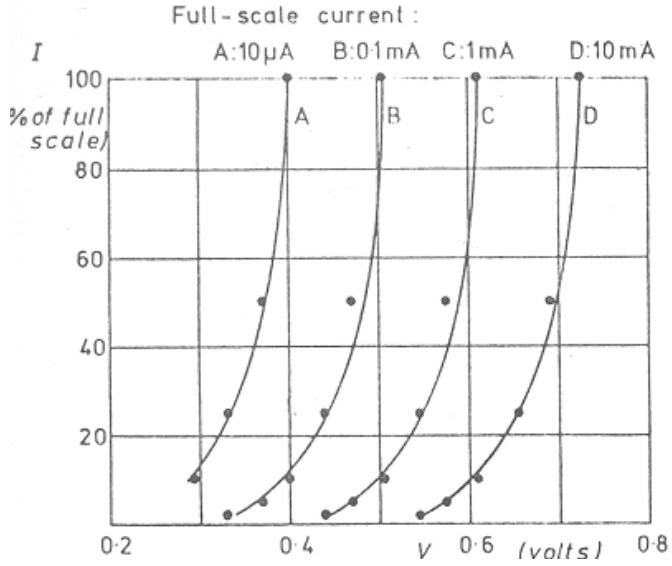
$$\ln I = \frac{1}{\eta V_T}(V) + \ln I_o \tag{7.5}$$

yaitu akan berupa garis lurus jika diplot pada kertas grafik log-linier (semilogaritmik).

Sebagai gambaran karakteristik seperti dalam persamaan 7.5, diukur dua jenis diode tipe 1N914 dan 1N5061. Hasil plot karakteristik *I-V* kedua diode seperti terlihat pada gambar 7.6. Untuk diode 1N914 (diode isyarat-kecil) terlihat mempunyai kecocokan yang sangat baik dengan persamaan 7.5, kecuali pada arus yang relatif tinggi dimana hambatan diode memberikan penurunan sebesar *IR* dengan adanya kenaikan *V*. Untuk diode 1N5061 (diode daya 1 amp) juga mempunyai kecocokan yang sangat baik dengan persamaan 7.5, kecuali pada arus yang relatif rendah. Perhatikan bagaimana I_o hanya berharga pada orde nA untuk diode silikon di atas



Gambar 7.6 Karakteristik *I-V* diode tipe 1N914 dan 1N5061 pada skala semilogaritmik



Gambar 7.7 Karakteristik *I-V* diode dalam skala linier

Gambar 7.7 memperlihatkan plot karakteristik *I-V* diode dalam skala linier dengan skala *I* 10mA (A), 1 mA (B), 0,1 mA (C) dan 10μA (D). Terlihat bahwa tegangan "*cut-in*" bergeser ke kiri dan juga keseluruhan kurva bergeser ke kiri. Ini dapat diharapkan terjadi jika

$$I_1 = I_o e^{V_1/\eta V_T} \tag{7.6}$$

dan

$$I_2 = I_o e^{V_2/\eta V_T} \tag{7.7}$$

maka

$$I_1 / I_2 = e^{(V_1 - V_2)/\eta V_T} \tag{7.8}$$

Persamaan 7.8 memperlihatkan bahwa diperlukan perubahan tegangan yang sama untuk menaikkan arus diode *n* kali. Besarnya I_o tergantung pada pembawa muatan hasil generasi termal jadi sangat tergantung pada temperatur. Untuk silikon I_o akan naik menjadi dua kali lipat setiap ada kenaikan temperatur 10^oC.

Contoh 1

Sebuah diode silikon memiliki karakteristik arus sebesar 1 mA pada tegangan 581 mV pada kedua ujungnya. Perkirakan berapa besarnya tegangan yang diperlukan diode agar memiliki arus sebesar

i) 15 mA
ii) 1 μA
iii) 1 nA dan
iv) 1 A

Jawab

Untuk arus $I >> I_o$

$$I \approx I_o \exp(V/\eta V_T)$$

karena untuk diode silikon $\eta \approx 2$ maka diperoleh

$$1\times10^{-3} \approx I_o \exp(581/50)$$

atau

$$I_o \approx 8{,}98 \times 10^{-9}\ \text{A}$$

i) $15 \times 10^{-3} \approx 8{,}98 \times 10^{-9} \exp\left(V / 0{,}05\right)$

$V \approx 0{,}716$ volt

Untuk memeriksa hasil tersebut; terlihat V naik sebesar 135 mV $\approx 2{,}5\,\eta V_T$, sehingga arus seharusnyaa naik sebesar $\sim e^{2{,}5}$ kali $\approx$ 12 kali.

ii) $10^{-6} \approx 8{,}98 \times 10^{-9} \exp\left(V / 0{,}05\right)$

$V \approx 0{,}236$ volt

iii) Di sini I berharga lebih rendah dari I_o, sehingga kita harus menggunakan persamaan karakteristik diode secara utuh

$10^{-9} = 8{,}98 \times 10^{-9} \left(\exp\left(V / 0{,}05\right) - 1\right)$

$V = 5{,}3$ mV

Hasil ini perlu kita curigai karena pada arus yang begitu rendah mungkin η akan mendekati satu.

iv) Kita dapat menggunakan pendekatan

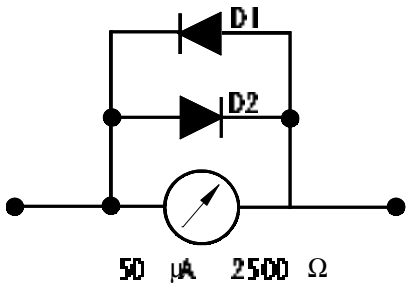
$1 = 8{,}98 \times 10^{-9} \exp\left(V / 0{,}05\right)$

$V = 0{,}926$ volt

Hasil ini juga perlu kita curigai karena pada arus yang begitu besar mungkin diode akan menjadi sangat panas sehingga akan mengubah harga I_o dan V_T secara signifikan. Juga hambatan pada daerah tipe-p dan tipe-n akan memberikan kontribusi terhadap penurunan *IR*.

Contoh 2

Misalkan diode silikon pada contoh 1 digunakan sebagai diode pelindung pada suatu meter dasar $50\mu A$ dengan hambatan dalam sebesar 2500 Ω seperti terlihat pada gambar 7.8). Perkirakan seberapa sukses usaha tersebut.



Gambar 7.8 Diode digunakan sebagai pelindung

Jawab

Kita harus memeriksa apakah diode tidak mengambil arus terlalu besar saat meter melewatkan 50 μA. Tegangan pada meter sebesar

$$50\ \mu A \times 2500\ \Omega = 125\ mV$$

Arus yang melalui diode yaitu panjar maju sebesar

$$I = I_o\left(\exp\left(V/\eta V_T\right)-1\right)$$

$$= 8{,}98\times10^{-9}\left(\exp\left(125/50\right)-1\right)$$

$$= 100\ nA$$

sedangkan arus mundur diode sebesar I_o. Dengan demikian arus total sebesar 109 nA = 0,109 μA. Ini merupakan harga yang sangat kecil dibandingkan dengan harga arus meter (yaitu 1: 500), sehingga diode tidak mengganggu akurasi meter.

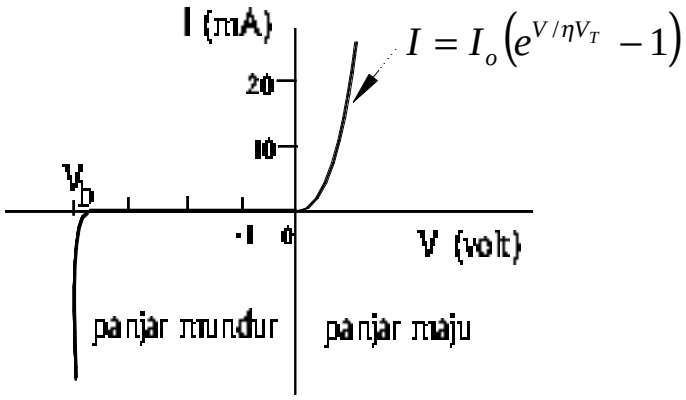
Jika arus sebesar 1 ampere melewati rangkaian pada gambar 7.8, kita telah melihat pada contoh 1 bahwa tegangan diode akan berharga sebesar 1 V. Harga ini sebesar 8 kali sensitivitas tegangan meter skala penuh.

7.6 Efek Zener dan Avalanche

Di samping terjadinya perubahan ketinggian potensial penghalang pada diode akibat diberi panjar maju atau mundur, maka juga terjadi perubahan lebar daerah deplesi atau daerah transisi. Pada tegangan panjar maju, ketinggian potensial penghalang akan menurun dan daerah deplesi akan menipis. Sebaliknya saat diberi panjar mundur daerah deplesi akan melebar.

Jika panjar mundur dinaikkan terus, maka pada suatu harga tegangan tertentu terjadi kenaikan arus mundur secara tiba-tiba (lihat gambar 7.9). Keadaan ini terjadi akibat adanya efek *Zener* atau efek *avalanche*. Pada patahan Zener (*Zener breakdown*),

medan listrik pada sambungan akan menjadi cukup besar untuk menarik elektron dari ikatan kovalen secara langsung. Dengan demikian akan terjadi peningkatan jumlah pasangan lubang-elektron secara tiba-tiba dan menghasilkan kenaikan arus mundur secara tiba-tiba pula. Efek *avalanche* terjadi pada tegangan di atas tegangan patahan Zener. Pada tegangan tinggi ini, pembawa muatan memiliki cukup energi untuk memisahkan elektron dari ikatan kovalen.

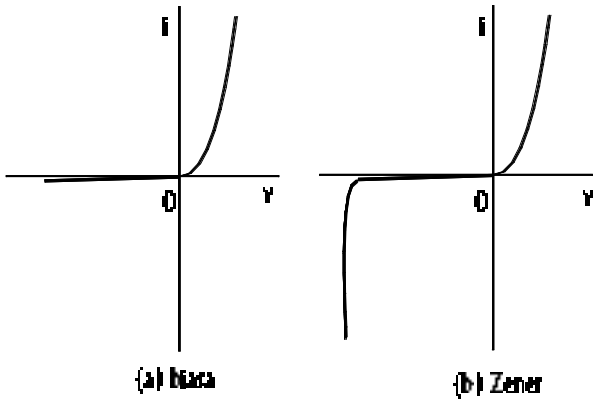


Gambar 7.9 Karakteristik *I-V* diode p-n

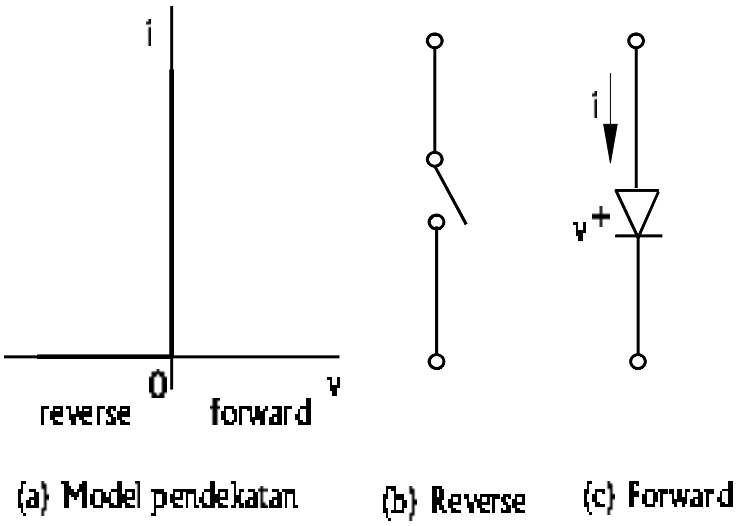
Pada daerah patahan, arus mundur berharga sangat besar dan hampir tidak tergantung pada besarnya tegangan. Penurunan tegangan panjar mundur di bawah V_b akan menurunkan arus ke harga I_o. Dengan mengontrol kerapatan doping, kita dapat mendesain diode Zener agar memiliki tegangan patahan pada harga dari beberapa volt sampai beberapa ratus volt. Kondisi penting yang dapat dimanfaatkan adalah bagaimana diode ini dapat memberikan tegangan yang relatif konstan saat arus berubah-ubah.

7.7 Model Rangkaian

Model listrik suatu piranti sering disebut model rangkaian yang tersusun atas rangkaian ideal. Kita dapat membuat model ideal dari karakteristik nyata diode (lihat gambar 7.10 dan 7.11) dan menggunakannya untuk memprediksi karakteristiknya untuk aplikasi praktis.

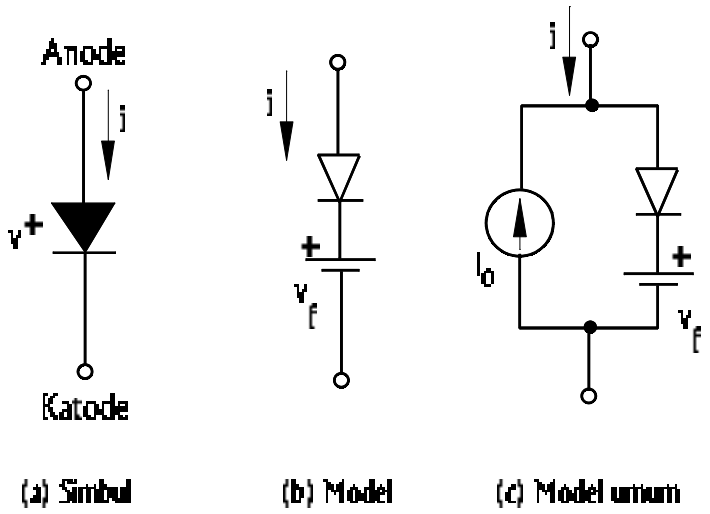


Gambar 7.10 Karakteristik nyata diode



Gambar 7.11 Model ideal diode

Karakteristik penting diode adalah perbedaan yang ekstrem antara panjar maju dan panjar mundur. Diode yang ideal memperlihatkan tidak adanya hambatan aliran arus saat panjar maju dan terdapat hambatan yang besarnya tak terhingga pada panjar mundur. Pada saat panjar mundur, dapat digambarkan seperti saklar yang sedang terbuka (gambar 7.11-b) dan pada saat panjar mundur seperti saklar yang tertutup. Saklar tersebut diilustrasikan seperti pada gambar 7.11-c, dengan segitiga menggambarkan arah arus maju.



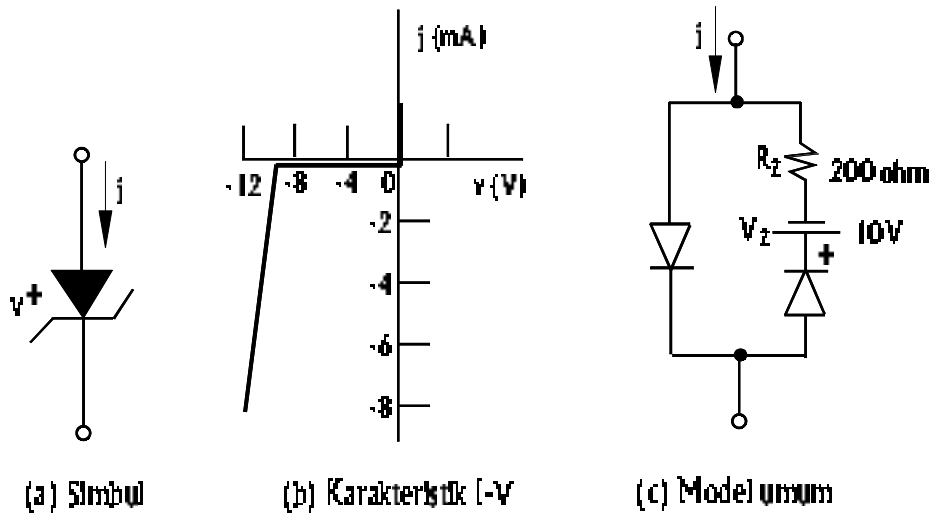
Gambar 7.12 Diode semikonduktor

Pada diode semikonduktor, hanya diperlukan tegangan maju sebesar 0,3 V (untuk germanium) atau 0,7 V (untuk silikon) untuk mengalirkan arus. Kombinasi sebuah diode ideal dan sebuah sumber tegangan (lihar gambar 7.12-b) biasa digunakan untuk menggambarkan kinerja sebuah diode. Jika arus jenuh pada diode berharga cukup besar, maka keadaan ini harus diperhitungkan pada model. Salah satu cara untuk menggambarkan keadaan tersebut dapat dibuat model dengan menambarkan satu sumber arus dengan besar I_o seperti diperlihatkan pada gambar 7.12-c.

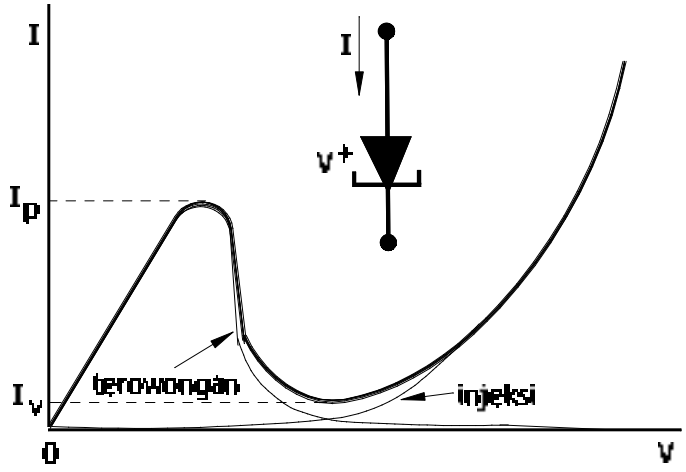
Kurva karakteristik *I-V* untuk diode Zener dapat dibuat dengan bentuk linier seperti diperlihatkan pada gambar 7.13. Pada saat panjar maju, arus mengalir dengan bebas, hambatan maju sangat kecil dan dapat diabaikan. Pada tegangan panjar mundur lebih besar dari tegangan patah, besarnya hambatan dapat diperkirakan dengan melihat kurva pada gambar 7.13-b sebesar

$$R_Z = \frac{\Delta v}{\Delta i} = \frac{12-10}{0{,}01-0} = 200\ \Omega$$

Pada model rangkaian diode terdapat sumber tegangan untuk menggambarkan bahwa arus mundur tidak akan mengalir sampai tegangan negatif pada kaki diode melebihi 10V.



Gambar 7.13 Representasi model diode Zener.



Gambar 7.14 Karakteristik diode terowongan

7.8 Diode Terowongan (*Tunnel Diode*)

Jika konsentrasi doping dinaikkan, maka lebar daerah deplesi akan menipis dan karenanya tinggi potensial penghalang akan menurun. Jika konsentrasi doping dinaikkan lagi sehingga ketebalan darah deplesi menjadi lebih rendah dari 10 nm, maka terjadi mekanisme konduksi listrik baru dan menghasilkan karakteristik piranti elektronika yang unik.

Seperti telah dijelaskan oleh Leo Esaki pada tahun 1958, bahwa untuk potensial penghalang yang sangat tipis menurut teori kuantum mekanik, elektron dapat menerobos melewati potensial pengahalang (melalui terowongan) tanpa harus memiliki

cukup energi untuk mendaki potensial tersebut. Karakteristik *I-V* dari 'Diode Esaki" diperlihatkan pada gambar 7.14. Terlihat bagaimana arus terowongan memberi kontribusi terhadap arus yang mengalir terutama pada tegangan maju relatif rendah.

Arus terowongan akan naik dengan adanya kenaikan tegangan sampai efek dari arus maju mulai memberi kontribusi. Setelah puncak arus I_p dicapai, arus terowongan menurun dengan adanya kenaikan tegangan arus injeksi mulai mendominasi. Arus puncak I_p dan arus lembah I_V merupakan titik operasi yang stabil. Karena efek terowongan merupakan penomena gelombang, transfer elektron terjadi dengan kecepatan cahaya dan pergantian antara I_p dan I_V terjadi dengan cepat sehingga cocok untuk aplikasi komputer. Lebih jauh antara I_p dan I_V terdapat daerah dimana hambatan $r = dV / dI$ berharga negatif yang dapat digunakan untuk osilator dengan frekuensi sangat tinggi.