

DIODA

Bagian awal buku ini memuat tentang dasar-dasar dioda dimulai dari fisika semikonduktor yang secara spesifik membahas tentang kristal semikonduktor intrinsik, dan semikonduktor ekstrinsik. Pada bagian berikutnya disajikan bagaimana sebuah dioda general dibuat memanfaatkan bahan semikonduktor ekstrinsik tipe-p, dan tipe-n. Penjelasan disajikan secara detil berikut karakteristik dioda saat diberi prategangan maju (forward biased), maupun prategangan balik (reverse biased). Disamping karakteristik dioda, dibahas juga variabel-variabel fisika penting dari piranti dioda yang umumnya oleh pabrik disajikan dalam lembar data dioda.

Setelah pembaca memahami sifat-sifat dioda beserta variabel-variabel dalam lembar data, pada bagian berikutnya dibahas rangkaian ekuivalen dioda sebagai dasar acuan analisis matematis. Rangkaian ekuivalen dioda disajikan dalam tiga aproksimasi/pendekatan yaitu pendekatan ideal, pendekatan dengan memperhitungkan tegangan lutut, serta pendekatan dengan memperhitungkan tegangan lutut dan hambatan limbak.

Selain dioda general (dioda penyearah), dibahas juga berbagai dioda khusus berikut aplikasinya. Dioda khusus yang dibahas meliputi dioda zener, LED, dioda Schottky, dan varaktor. Mayoritas aplikasi rangkaian dioda memanfaatkan komponen utama dioda penyearah. Buku ini juga membahas cara kerja dan analisis berbagai aplikasi rangkaian dioda.

Penelitian di berbagai negara menunjukkan bahwa masih banyak mahasiswa yang tidak menguasai konsep rangkaian dasar padahal sedang menempuh mata kuliah yang membahas rangkaian lanjut. Materi ini sangat penting dan perlu dibahas kembali meskipun telah dipelajari di sekolah menengah atas maupun pada mata kuliah fisika dasar di perguruan tinggi. Soal rangkaian dioda lazimnya berbentuk analisis sintesis yang memerlukan penyelesaian dengan memadukan banyak konsep yang mendasari. Setelah refreshing materi rangkaian dasar, disajikan tips menyelesaikan soal-soal rangkaian dioda.

Bab terakhir buku ini menyajikan simulasi berbagai rangkaian dioda. Simulasi dilakukan menggunakan program aplikasi Electronics Workbench (EWB). Untuk menguji penguasaan, pada tiap bab buku ini disertakan soal-soal latihan. Saat berlatih menyelesaikan soal-soal rangkaian dioda, mahasiswa disarankan agar melakukan simulasi menggunakan EWB untuk menguji ketepatan penyelesaian soal. Dengan sering berlatih dan melakukan simulasi, diharapkan mahasiswa mahir menyelesaikan soal-soal bentuk analisis sintesis. Meskipun rangkaian diubah atau dimanipulasi baik bentuk maupun nilai komponennya, diharapkan mahasiswa tetap dapat menyelesaikan dengan tepat.



Penerbit UNIPMA Press
Universitas PGRI Madiun
Jl. Setia Budi No. 85 Madiun, Jawa Timur, 63118
E-Mail: upress@unipma.ac.id
Website: kwu.unipma.ac.id

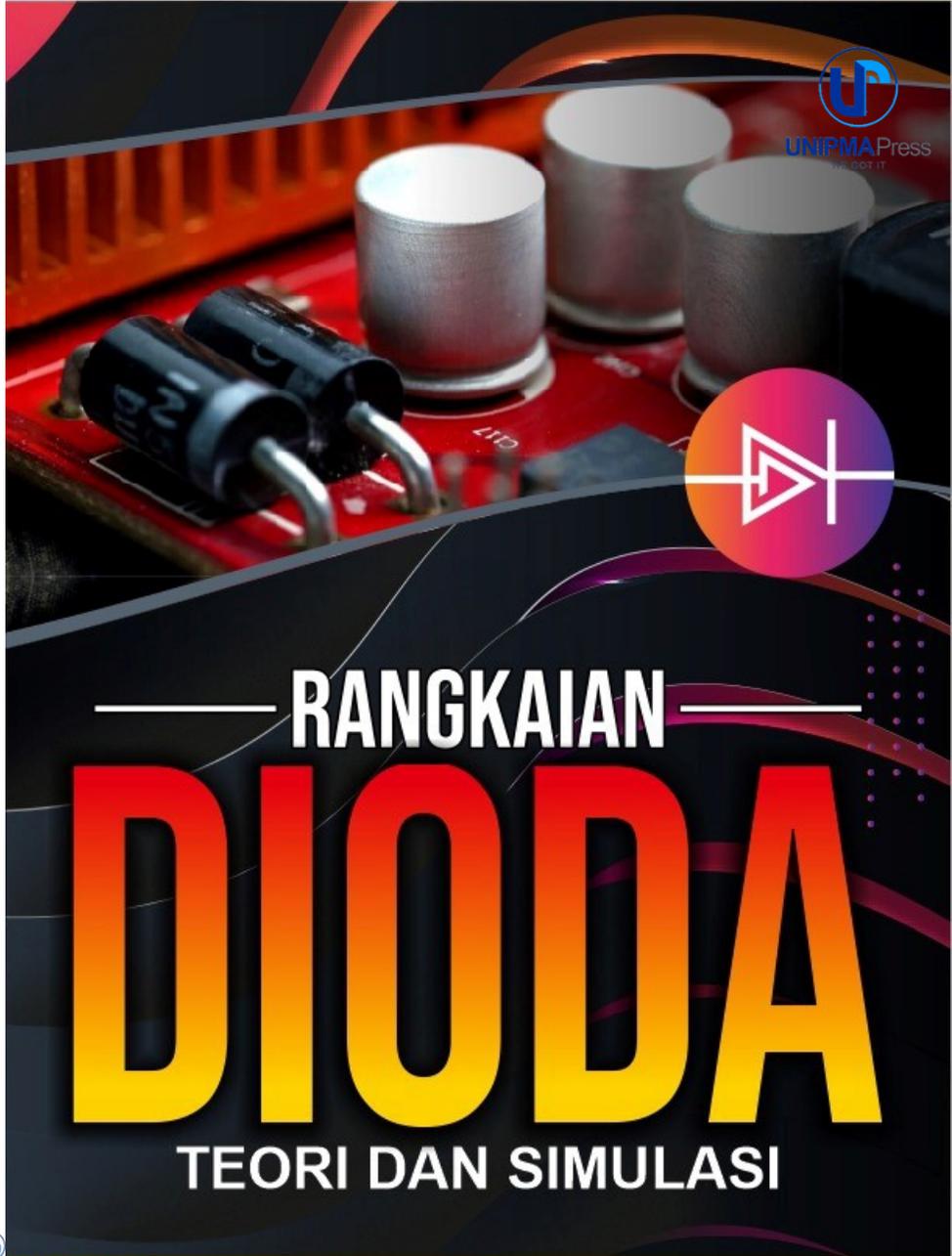
ISBN 978-623-8095-40-7



DIODA

Erawan Kurniadi, S.Si., M.Pd.

Dr. Jeffry Handhika, M.Si., M.Pd.



RANGKAIAN DIODA TEORI DAN SIMULASI

Penulis:

Erawan Kurniadi, S.Si., M.Pd.

Dr. Jeffry Handhika, M.Si., M.Pd

Rangkaian Dioda: Teori dan Simulasi

Erawan Kurniadi
Jeffry Handhika



Rangkaian Dioda: Teori dan Aplikasi

Penulis:

Erawan Kurniadi
Jeffry Handhika

Editor:

Erawan Kurniadi

Perancang Sampul:

Tim Kreatif Unipma Press

Cetakan Pertama, November 2023

Diterbitkan Oleh:

UNIPMA Press Universitas PGRI Madiun
Jl. Setiabudi No. 85 Madiun Jawa Timur 63118
E-Mail: upress@unipma.ac.id
Website: kwu.unipma.ac.id
Anggota IKAPI: No. 207/Anggota Luar Biasa/JTI/2018

ISBN: 978-623-8095-40-7

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-Undang
All right reserved

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan atas terselesaikannya buku “Rangkaian Dioda: Teori dan Simulasi” ini. Buku ini dirancang untuk digunakan sebagai salah satu referensi bagi mahasiswa yang sedang mempelajari konsep elektronika dasar. Isi buku ini diharapkan dapat mengantarkan pembaca untuk terampil menganalisis dan menyelesaikan berbagai soal rangkaian dioda. Untuk menguji ketepatan analisis dan ketepatan jawaban soal, buku ini dilengkapi dengan simulasi rangkaian.

Isi buku terinspirasi dari berbagai referensi yang relevan. Referensi acuan yang digukan adalah buku-buku teks yang sudah beredar nasional dan internasional, maupun artikel-artikel jurnal internasional. Buku ini juga ditulis dengan mengacu pada temuan-temuan penelitian yang telah dilakukan penulis selama beberapa tahun terakhir. Pembahasan disajikan dalam 5 bab yaitu: semikonduktor, teori dioda, aplikasi dioda, analisis rangkaian dioda, dan simulasi rangkaian dioda menggunakan program aplikasi EWB.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas PGRI Madiun yang mensponsori program ini, dan kepada seluruh kontributor yang membantu penyelesaian buku ini

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
BAB I SEMIKONDUKTOR	1
A. ORBIT ELEKTRON.....	1
B. KONDUKTOR DAN SEMIKONDUKTOR	3
C. KRISTAL SEMIKONDUKTOR	4
D. SEMIKONDUKTOR INTRINSIK	7
E. SEMIKONDUKTOR EKSTRINSIK	10
F. SOAL LATIHAN BAB I.....	14
BAB II TEORI DIODA	16
A. SEMIKONDUKTOR TIPE-P DAN TIPE-N	16
B. PRATEGANGAN DIODA.....	20
C. KURVA DIODA.....	24
D. KONSEP DIODA IDEAL DAN DIODA NON IDEAL	29
E. HAMBATAN DIODA DAN PENGARUH SUHU.....	35
F. LEMBAR DATA DIODA.....	37
H. SOAL LATIHAN BAB II	53
BAB III APLIKASI DIODA	55
A. PENYEARAH GELOMBANG	55
B. PENGALI TEGANGAN (<i>VOLTAGE MULTIPLIER</i>)	73
C. CLIPPER.....	75
D. CLAMPER.....	75
E. GERBANG LOGIKA DASAR.....	76
F. SOAL LATIHAN BAB III.....	78
BAB IV ANALISIS RANGKAIAN DIODA	80

A. HUKUM OHM, DAN HUKUM KIRCHHOFF	80
B. TIPS MENYELESAIKAN SOAL RANGKAIAN DIODA.....	81
C. SOAL LATIHAN BAB IV	88
BAB V SIMULASI RANGKAIAN DIODA MENGGUNAKAN PROGRAM APLIKASI EWB	91
A. PENGANTAR	91
B. SIMULASI RANGKAIAN DIODA.....	94
C. SOAL LATIHAN BAB V	106
DAFTAR PUSTAKA	108
GLOSARIUM.....	109
INDEKS	110
PROFIL PENULIS	111

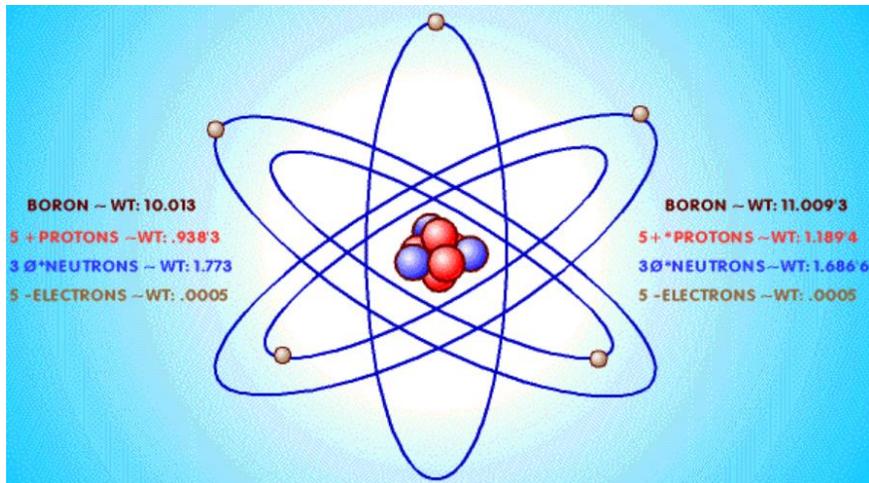
BAB I

SEMIKONDUKTOR

A. ORBIT ELEKTRON

Atom dimodelkan terdiri dari inti di pusat dan elektron-elektron yang mengelilinginya. Inti atom terdiri dari proton dan neutron sehingga muatannya positif. Sebuah atom dikatakan netral jika banyaknya elektron yang mengelilingi inti sama dengan banyaknya proton dalam inti.

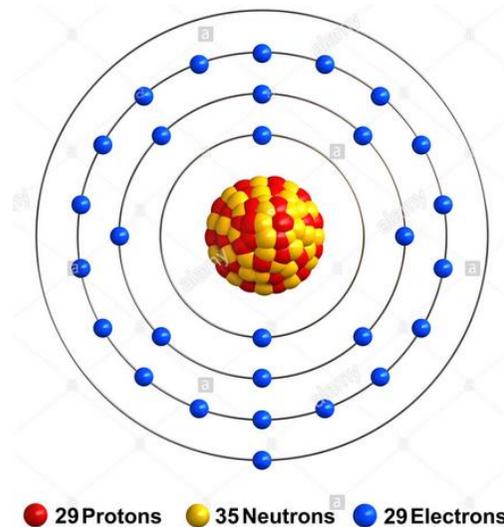
Gaya-gaya dalam sebuah atom membatasi gerak elektron dalam suatu daerah tiga dimensi yang disebut kulit-kulit. Sesuai dengan kenyataan, model atom seharusnya digambarkan dengan pola tiga dimensi. Gambar 1.1 memperlihatkan sebuah atom boron dalam pola tiga dimensi dengan dua elektron berada pada kulit pertama, dan tiga elektron berada pada kulit kedua. Elektron-elektron ini berada dalam orbit yang stabil akibat gaya tarik inti dan gaya sentrifugal.



Gambar 1.1. Model atom boron dengan pola tiga dimensi
(http://www.atomic-elements.info/boron_nucleus.htm)

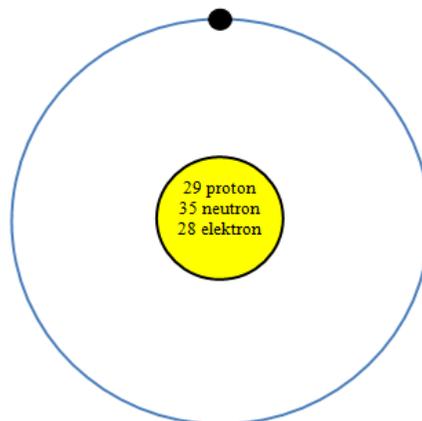
Pola tiga dimensi untuk memodelkan suatu atom akan sangat menyulitkan untuk atom-atom kompleks dengan banyak elektron. Untuk mempermudah penggambaran model atom kompleks digunakan pola dua dimensi. Gambar 1.2 memperlihatkan sebuah atom tembaga dalam pola dua dimensi dengan dua atom pada orbit pertama, delapan atom pada orbit

kedua, delapan belas elektron pada orbit ketiga, dan satu elektron pada orbit keempat (ingat pola penempatan elektron harus memenuhi pola $2n^2$, dengan n adalah nomor lintasan). Dalam pola dua dimensi, sebuah kulit tampak seperti sebuah lintasan berbentuk lingkaran sehingga dapat disebut sebagai orbit. Kulit yang pertama disebut orbit pertama, dan kulit yang kedua disebut orbit kedua.



Gambar 1.2. Model atom tembaga dengan pola dua dimensi
(<https://www.alamy.com/stock-photo-3d-render-of-atom>)

Ada pola yang lebih sederhana lagi untuk memodelkan atom tanpa mengurangi informasi penting yang dikandung suatu atom, pola tersebut yaitu pola kerak. Gambar 1.3 memperlihatkan sebuah atom tembaga dalam pola kerak dengan dua puluh delapan elektron berada dalam kerak, dan satu elektron berada pada orbit terluar.



Gambar 1.3. Model atom tembaga dengan pola kerak

Inti dan elektron yang terdapat pada lintasan-lintasan dalam tidaklah penting untuk dibahas dalam elektronika. Elektron pada lintasan terluarlah (lintasan valensi) yang paling penting karena memberikan informasi berharga terkait konduktivitas bahan.

B. KONDUKTOR DAN SEMIKONDUKTOR

Bahan yang sangat mudah menghantarkan arus listrik disebut konduktor, sebaliknya bahan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik disebut isolator. Bahan yang dapat menghantarkan arus listrik, tetapi daya hantarnya rendah (tidak sebaik konduktor) disebut semikonduktor.

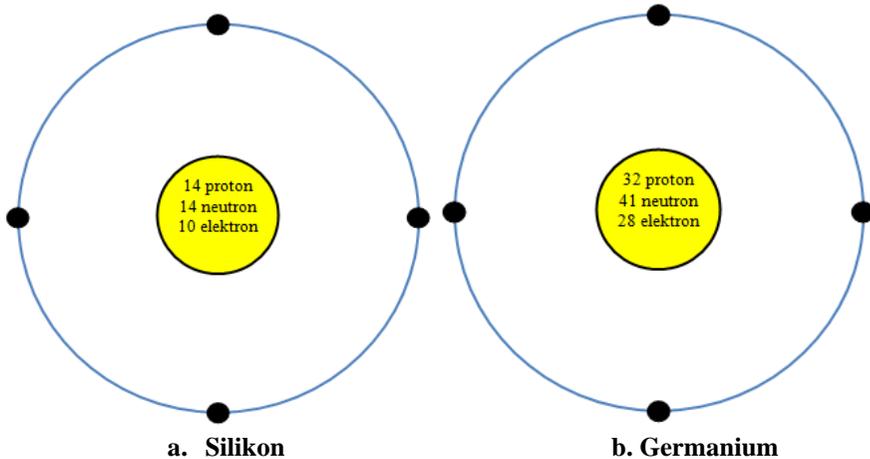
Besar kecilnya daya hantar (konduktivitas) listrik dipengaruhi oleh banyaknya sedikitnya elektron bebas yang dihasilkan. Banyak sedikitnya elektron bebas pada konduktor dipengaruhi oleh jumlah elektron pada lintasan terluar dan seberapa kuat gaya tarik oleh inti atom. Semakin banyak elektron bebas, maka semakin besar daya hantar listriknya. Perak memiliki konduktivitas listrik paling tinggi, disusul tembaga, dan yang ketiga emas. Tembaga adalah konduktor yang paling sering digunakan dalam keseharian karena konduktivitas tinggi dan harga bahan ini jauh lebih murah dibandingkan perak dan emas.

Sebuah atom tembaga (gambar 1.3) memiliki 1 elektron pada lintasan terluar (lintasan keempat dengan pola $2n^2$). Elektron ini sangat mudah lepas karena gaya tarik oleh inti yang sangat lemah. Karena gaya tarik yang sangat lemah terhadap elektron pada lintasan terluar ini, maka elektron ini sering disebut sebagai *elektron bebas*. Dalam sepotong kawat tembaga terdiri dari banyak sekali elektron bebas yang dapat dengan mudah berpindah dari satu atom ke atom lainnya. Sedikit saja tegangan listrik diberikan melintasi sepotong tembaga, maka arus listrik yang dihasilkan cukup besar.

Bahan isolator sama sekali tidak dapat menghantarkan listrik karena elektron-elektron pada lintasan terluarnya terikat dengan sangat kuat oleh inti atomnya. Contoh bahan yang bersifat isolator adalah plastik, kaca, mika, karet. Dalam elektronika, isolator ini tidaklah penting untuk dibahas.

Silikon dan germanium merupakan bahan semikonduktor yang paling lazim digunakan. Atom silikon memiliki 14 elektron, sehingga

dengan pola $2n^2$ dapat ditentukan elektron yang menempati lintasan terluar sebanyak 4 buah. Atom germanium memiliki 32 elektron, dengan demikian elektron yang menempati lintasan terluar juga sebanyak 4 buah (gambar 1.4).

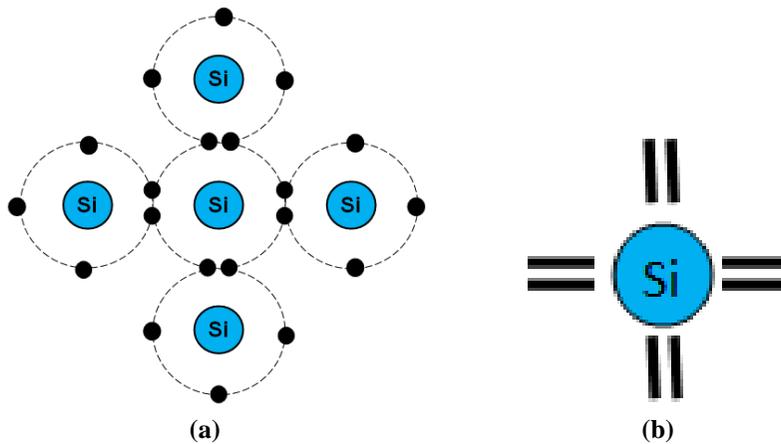


Gambar 1.4. Atom semikonduktor. (a) silikon. (b) germanium

C. KRISTAL SEMIKONDUKTOR

Atom-atom bahan semikonduktor tersusun sangat teratur (berbentuk kristal). Satu atom bahan semikonduktor mengandung empat buah elektron pada lintasan terluar yang memungkinkan terjadinya ikatan bersama. Lintasan terluar ini disebut sebagai lintasan valensi.

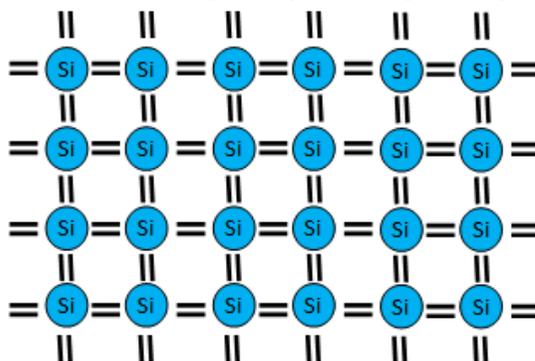
Ikatan bersama antara sebuah atom dengan tetangga terdekatnya disebut sebagai ikatan kovalen. Dalam bahan semikonduktor (contohnya silikon), sebuah atom berikatan bersama dengan empat tetangga terdekatnya (gambar 1.5.a). Masing-masing atom silikon memiliki kerak dengan 14 proton dan 10 elektron di dalamnya (bermuatan +4). Dengan demikian, sebuah atom silikon mengandung 4 elektron pada lintasan valensi (terluar). Atom yang berada di tengah memperoleh tambahan 4 elektron dari tetangga terdekatnya (masing-masing tetangga menyumbangkan 1 elektron), sehingga pada lintasan valensi terdapat 8 elektron. Elektron-elektron ini tidak lagi milik dari satu atom, tetapi miliki bersama dari atom-atom berdekatan.



Gambar 1.5. Ikatan bersama (kovalen). (a) elektron valensi pada ikatan bersama. (b) ikatan bersama.

Gambar 1.5.b menggambarkan pemilikan bersama elektron-elektron. Setiap garis melambangkan sebuah elektron milik bersama yang menghasilkan ikatan atom yang berada di tengah dengan tetangganya, sehingga setiap garis dapat disebut ikatan kovalen. Dengan demikian, dapat dikatakan masing-masing atom dalam sebuah kristal membentuk 8 ikatan kovalen dengan tetangga-tetangganya. Ikatan-ikatan kovalen ini memadukan atom-atom silikon menjadi kristal dan memberikan sifat padat.

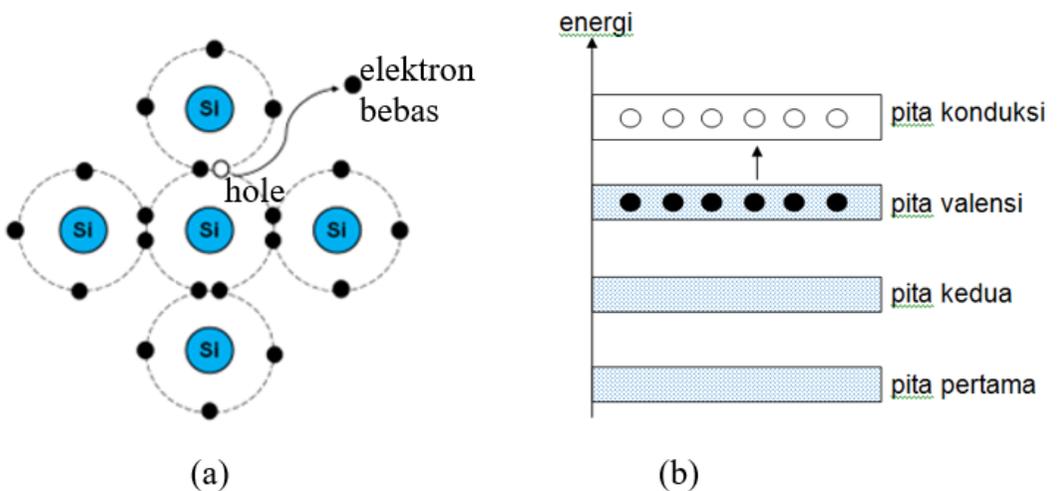
Penggambaran terpadu pola kristal memberikan bentuk keteraturan dan menunjukkan diagram ikatan dalam sebuah kristal silikon (gambar 1.6). Sesuai pola ini, masing-masing atom memiliki 8 elektron yang bergerak pada lintasan valensinya dan menghasilkan stabilitas kimia pada kristal. Lintasan valensi ini tidak dapat diisi lebih dari 8 elektron, sehingga lintasan valensi ini dikatakan jenuh jika mengandung 8 elektron.



Gambar 1.6. Diagram ikatan kovalen dalam kristal silikon.

Pada temperatur ambien (lingkungan) nol mutlak (0 Kelvin) atau - 273⁰ Celcius, semua atom penyusun bahan berada pada kondisi benar-benar diam/statis, tidak terkecuali atom-atom kristal. Jika temperatur ambien di atas nol mutlak, energi termal akan menyebabkan atom-atom dalam kristal bergetar. Semakin tinggi temperatur ini, getaran atom-atom dalam kristal akan semakin kuat. Getaran-getaran ini menyebabkan terjadinya energi kinetik yang terepresentasi menjadi suhu yang dapat diindera oleh kulit manusia. Semakin cepat getaran atom-atom, maka semakin tinggi suhu yang dihasilkan.

Getaran atom-atom dalam kristal silikon terjadi secara acak dan kadang-kadang menyebabkan terlepasnya sebuah elektron dari lintasan valensinya (gambar 1.7.a). Elektron yang lepas ini akan memiliki energi yang cukup untuk dapat memasuki lintasan tak terlarang yang lebih tinggi. Pada lintasan yang lebih tinggi ini, tarikan oleh inti terhadap elektron tersebut menjadi sangat kecil (hampir dapat diabaikan). Elektron ini dapat disebut sebagai elektron bebas karena dapat bergerak bebas dalam kristal. Tempat yang ditinggalkan elektron pada lintasan valensi disebut lubang (*hole*). Lubang ini tidak bermuatan positif, tetapi berperilaku seperti muatan positif karena dapat menangkap elektron yang melintas di dekatnya. Pada suhu di atas nol mutlak, terbentuk sejumlah elektron bebas (berada pada pita konduksi) yang jumlahnya sama dengan *hole* pada pita valensi (gambar 1.7.b)



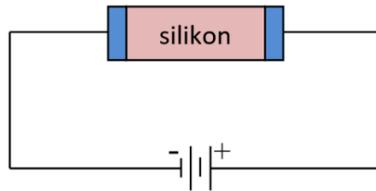
Gambar 1.7. a) Sebuah elektron bebas dan sebuah lubang (hole) terbentuk oleh energi termal., b) Pita energi pada suhu > 0 mutlak

Pada suhu nol mutlak tidak terdapat elektron bebas maupun hole dalam kristal silikon murni, tetapi pada suhu di atas nol mutlak elektron bebas dan hole mulai terbentuk akibat energi termal. Elektron bebas dan hole yang terbentuk akibat energi termal sama banyaknya. Jika elektron bebas yang terbentuk sebanyak 1 juta, maka hole yang terbentuk juga sebanak 1 juta. Elektron yang terbebas dari lintasan valensi kadang-kadang akan mendekati lubang dan tertarik masuk ke lubang. Peristiwa bergabungnya elektron bebas dengan lubang disebut rekombinasi. Waktu rata-rata (umur) antara pembentukan, dan menghilangnya elektron bebas (akibat rekombinasi) hanya beberapa nano detik (10^{-9} detik). Untuk setiap saat, di dalam kristal semikonduktor terjadi: 1) sejumlah elektron bebas dan lubang dibentuk oleh energi termal, 2) sebagian elektron bebas dan lubang-lubang mengalami rekombinasi, 3) sebagian elektron bebas dan lubang berada diantara kedua keadaan, mereka telah terbentuk, tetapi belum berekombinasi.

D. SEMIKONDUKTOR INTRINSIK

Bahan semikonduktor yang tersusun dari satu jenis atom secara murni disebut semikonduktor intrinsik. Contoh semikonduktor intrinsik yang sangat lazim adalah kristal silikon. Atom-atom yang terkandung dalam kristal ini seluruhnya adalah atom silikon, tanpa ada atom unsur lain. Contoh lain dari semikonduktor intrinsik adalah kristal germanium.

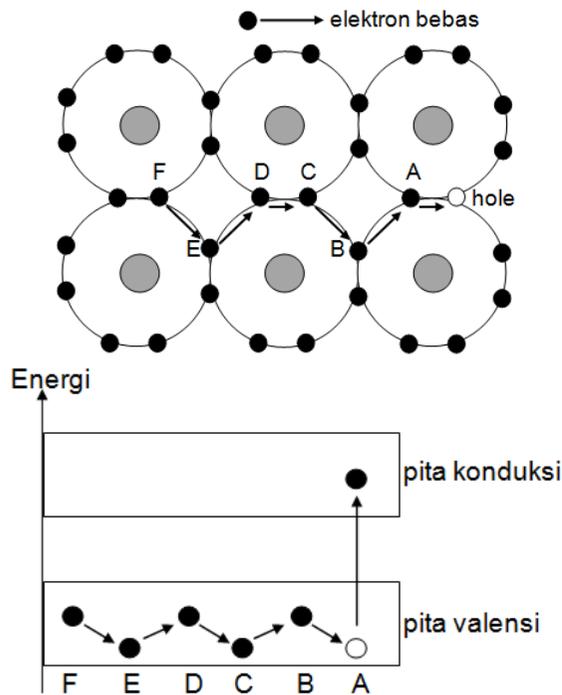
Sebuah eksperimen dengan melibatkan bahan kristal silikon dengan ujung-ujung dilapisi logam dapat menjelaskan konduktivitas bahan semikonduktor. Suatu sumber tegangan luar akan menghasilkan medan listrik diantara kedua ujung kristal tersebut (gambar 1.8). Pada suhu nol mutlak, masing-masing atom penyusun silikon dikelilingi oleh 8 elektron valensi. Akibat ikatan kovalen, elektron-elektron valensi ini terikat dengan kuat dan tidak dapat lepas sehingga pada suhu nol mutlak ini tidak ada sama sekali elektron bebas yang terbentuk. Oleh karena itu, arus listrik tidak akan dihasilkan walaupun ada tegangan dipasang pada ujung-ujung kristal silikon. Jadi dapat disimpulkan, pada suhu nol mutlak, kristal silikon berperilaku sebagai sebuah isolator.



Gambar 1.8. Silikon diberi tegangan luar

Jika temperatur di atas nol mutlak, atom-atom kristal silikon akan bergetar. Semakin tinggi temperatur, getaran semakin cepat sampai akhirnya elektron-elektron valensi memperoleh energi yang cukup untuk dapat lepas dari ikatan dan memasuki pita konduksi dalam pita energi. Dengan demikian terbentuklah elektron-elektron bebas yang dibangkitkan oleh energi termal, sehingga dalam eksperimen seperti gambar 1.8 akan timbul arus listrik. Pada suhu kamar (25°C), arus ini sangat kecil dibandingkan arus melalui sebuah konduktor. Karena sifat inilah, silikon disebut sebagai bahan semikonduktor.

Bagian dari kristal silikon yang digunakan dalam eksperimen gambar 1.8. dapat digunakan untuk menjelaskan aliran elektron dan aliran lubang yang terjadi akibat pemberian tegangan dari luar. Misalkan diambil contoh sebuah elektron bebas dan sebuah lubang dibangkitkan oleh energi termal. Elektron bebas ini akan berada pada lintasan yang sangat besar sehingga tarikan oleh inti sangat kecil. Tegangan luar akan menyebabkan elektron bebas cenderung untuk berpindah ke kanan (gambar 1.9). Gerakan elektron ke kanan tersebut terjadi dari lintasan besar ke lintasan besar di dekatnya. Dengan begitu, elektron bebas berperan serta dalam seluruh pengaliran elektron dalam kristal silikon. Gerakan elektron ke kanan ini berlangsung terus menerus, sehingga dapat dibayangkan terjadinya aliran tunak (*steady*) elektron-elektron dari kutub negatif menuju kutub positif sumber tegangan melewati kristal silikon.



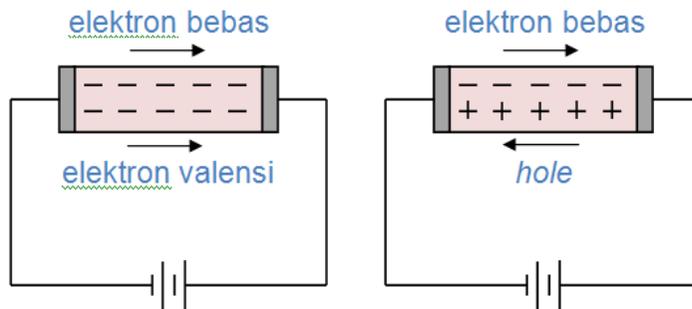
Gambar 1.9. Aliran elektron bebas dan lubang

Hal penting yang membedakan konduktor dengan semikonduktor adalah keberadaan lubang (hole). Konduktor hanya memiliki elektron bebas dan tidak memiliki lubang, akibatnya saat diberi tegangan luar, maka muatan-muatan yang mengalir dalam konduktor hanyalah elektron-elektron bebas. Sebaliknya, semikonduktor memiliki elektron-elektron bebas dan lubang-lubang. Jika tegangan luar dipasang pada semikonduktor, elektron-elektron bebas maupun lubang-lubang akan mengalir. Jika elektron bebas mengalir ke kanan, sebaliknya lubang mengalir ke kiri (gambar 1.9). Sebenarnya lubang tidaklah berpindah ke kiri, tetapi seolah-olah berpindah ke kiri.

Perhatikan lubang di ujung kanan dalam gambar 1.9. Lubang ini menarik elektron valensi A. Tarikan ini dan tegangan luar yang dipasang menyebabkan elektron valensi A masuk ke dalam lubang di ujung sehingga lubang ini lenyap (terisi elektron) dan muncul lubang baru di A. Lubang baru ini selanjutnya menarik dan menangkap elektron valensi B sehingga lubang A lenyap dan lubang B muncul. Dapat dikatakan elektron valensi pindah dari B ke A, tetapi lubang berpindah dari A ke B. Gerakan ini berlanjut dengan elektron valensi bergerak mengikuti panah, sebaliknya lubang bergerak dalam arah sebaliknya. Hal yang perlu di

tegaskan di sini, elektron valensi memang benar-benar bergerak ke kanan, tetapi lubang sebenarnya tidaklah bergerak ke kiri melainkan seolah-olah bergerak ke kiri.

Perbedaan penting konduktor dan semikonduktor terletak pada jejak atomiknya. Konduktor hanya memiliki satu jejak yaitu jejak biasa (aliran elektron bebas saja). Semikonduktor mempunyai dua macam jejak atomik: 1) jejak biasa, yaitu aliran/gerakan elektron bebas dalam pita konduksi, 2) jejak luar biasa, yaitu aliran/gerakan *holes* dalam pita valensi (gambar 10). Kehadiran *holes* dalam semikonduktor memicu ide pembuatan berbagai dioda, transistor, IC, dan berbagai piranti elektronika lainnya.



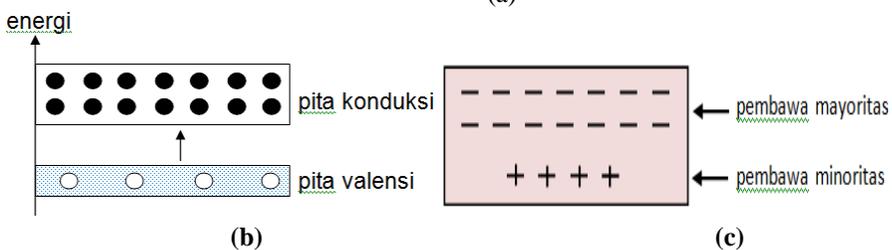
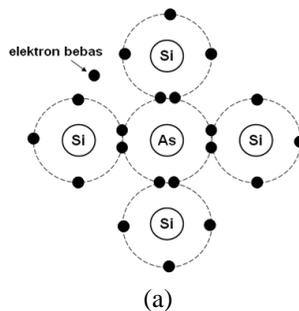
Gambar 1.10. Jejak atomik dalam semikonduktor

E. SEMIKONDUKTOR EKSTRINSIK

Jumlah elektron bebas dan lubang yang dibangkitkan melalui energi termal relatif sangat sedikit pada suhu kamar sekitar 25^0 Celcius. Akibatnya, arus yang mengalir melalui semikonduktor sangat kecil saat diberi beda potensial (jauh lebih kecil daripada konduktor) sehingga tidak bermanfaat. Untuk meningkatkan konduktivitas dilakukan pemberian tak murnian (*doping*) terhadap bahan semikonduktor intrinsik. Caranya adalah dengan sengaja membubuhkan (mencampurkan) atom-atom tak murnian pada sebuah semikonduktor intrinsik. Semikonduktor yang telah diberi tak murnian seperti ini disebut semikonduktor ekstrinsik. Semakin banyak jumlah atom tak murnian, konduktivitas semikonduktor akan semakin besar. Pabrik dapat mengontrol dengan teliti jumlah atom tak murnian sehingga konduktivitas semikonduktor ekstrinsik ini dapat diatur sesuai kebutuhan sehingga menjadi bermanfaat.

Cara memberikan tak murnian pada bahan semikonduktor intrinsik (contoh: silikon): 1) Kristal silikon dilelehkan hingga cair untuk memutuskan ikatan-ikatan kovalen, 2) Cairan silikon diberi tak murnian (lelehan atom lain bervaleksi lima atau tiga), atom-atom tak murnian akan berbaur merata dalam lelehan silikon, 3) Campuran lelehan silikon dan tak murnian tersebut didinginkan dan membentuk kristal padat.

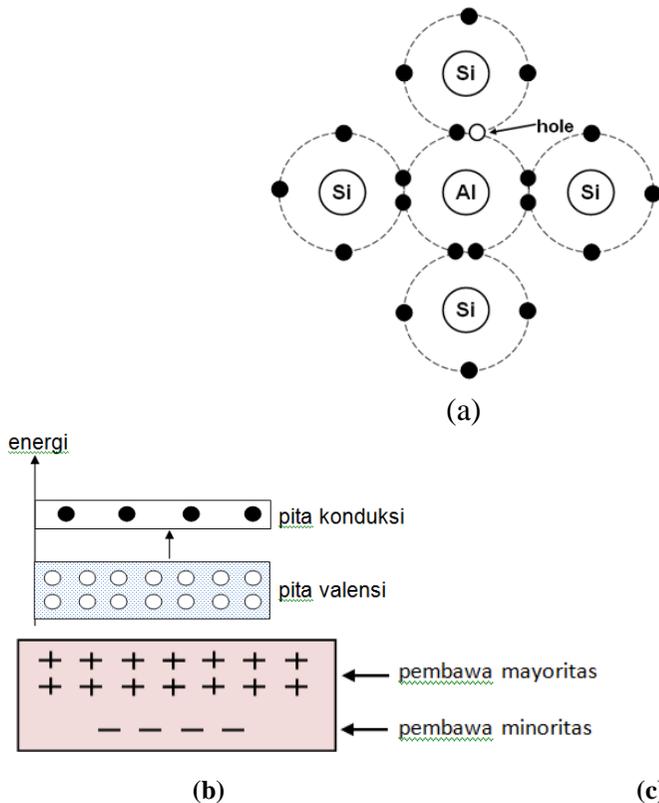
Pencampuran atom-atom bervaleksi lima (contoh: antimonium, arsenikum, dan fosfor) pada lelehan silikon akan menghasilkan ikatan bersama (kovalen) dengan pola tiap 1 atom tak murnian berikatan kovalen dengan 4 atom silikon di dekatnya dan menyisakan/menghasilkan 1 elektron bebas (gambar 1.11.a). Apabila atom tak murnian yang dicampurkan sebanyak n , maka pada suhu nol mutlak jumlah elektron bebas yang dihasilkan sebanyak n juga. Akibatnya, pada suhu kamar (sekitar 25°C), jumlah elektron bebas untuk setiap saat adalah sebanyak n ditambah elektron bebas yang dibangkitkan oleh energi termal sehingga jumlah elektron bebas jauh lebih banyak dari lubang (hole). Dengan kata lain, pemberian tak murnian atom bervaleksi lima akan meningkatkan jumlah elektron bebas. Semikonduktor ekstrinsik seperti ini dinamakan semikonduktor ekstrinsik tipe n karena pembawa mayoritasnya adalah elektron bebas, sedangkan pembawa minoritasnya adalah lubang. Atom tak murnian bervaleksi 5 yang dicampurkan dalam hal ini disebut atom donor.



Gambar 1.11. Ikatan kovalen atom silikon dengan atom tak murnian bervalensi lima. (a) Satu atom donor menghasilkan 1 elektron bebas. (b) Pada suhu > 0 K, pita konduksi terdiri dari banyak elektron bebas. (c) Elektron bebas merupakan pembawa mayoritas pada tipe n.

Gambar 1.11.b memperlihatkan perbandingan banyaknya elektron bebas (pada pita konduksi) dan lubang (pada pita valensi). Pada gambar tersebut dilukiskan pita konduksi berisi banyak sekali elektron bebas, sedangkan pada pita valensi berisi lubang dalam jumlah sedikit. Akibatnya, konduktivitas semikonduktor ekstrinsik tipe n ini lebih tinggi dari semikonduktor intrinsik. Hal ini disebabkan karena jumlah elektron bebas pada semikonduktor ekstrinsik tipe n memiliki selisih sebanyak atom tak murnian dibandingkan elektron bebas pada semikonduktor intrinsik. Semakin banyak atom tak murnian bervalensi lima yang dicampurkan, maka jumlah elektron bebas yang dihasilkan juga akan semakin banyak dan konduktivitasnya juga semakin tinggi. Dengan kata lain, konduktivitas bahan semikonduktor tipe n dapat dikontrol dari banyak sedikitnya atom donor (tak murnian). Gambar 1.11.c menunjukkan bahwa pembawa mayoritas pada semikonduktor ekstrinsik tipe n adalah elektron bebas, sedangkan pembawa minoritasnya adalah *hole* (lubang). Banyak sedikitnya atom tak murnian sangat berpengaruh pada konduktivitas, dengan kata lain tingkat konduktivitas dapat dikontrol melalui jumlah atom tak murnian.

Pencampuran atom-atom bervalensi tiga (contoh: aluminium, boron, dan galium) pada lelehan silikon akan menghasilkan ikatan bersama (kovalen) dengan pola tiap 1 atom tak murnian berikatan kovalen dengan 4 atom silikon di dekatnya dan menghasilkan 1 lubang/hole (gambar 1.12.a). Apabila atom tak murnian yang dicampurkan sebanyak n , maka pada suhu nol mutlak jumlah hole yang dihasilkan sebanyak n juga. Akibatnya, pada suhu kamar (sekitar 25°C), jumlah hole untuk setiap saat adalah sebanyak n ditambah hole yang dibangkitkan oleh energi termal sehingga jumlah lubang (hole) jauh lebih banyak dari elektron bebas. Dengan kata lain, pemberian tak murnian atom bervalensi tiga akan meningkatkan jumlah hole/lubang. Semikonduktor ekstrinsik seperti ini dinamakan semikonduktor ekstrinsik tipe p karena pembawa mayoritasnya adalah lubang, sedangkan pembawa minoritasnya adalah elektron bebas. Atom tak murnian bervalensi 3 yang dicampurkan dalam hal ini disebut atom akseptor.



Gambar 1.12. Ikatan kovalen atom silikon dengan atom tak murnian bervalensi tiga.

(a) Satu atom akseptor menghasilkan 1 lubang. (b) Pada suhu > 0 K, pita valensi terdiri dari lubang. (c) Lubang merupakan pembawa mayoritas pada tipe p.

Gambar 1.12.b. memperlihatkan perbandingan banyaknya elektron bebas (pada pita konduksi) dan lubang (pada pita valensi). Pada gambar tersebut dilukiskan pita konduksi berisi sedikit elektron bebas, sedangkan pada pita valensi berisi lubang dalam jumlah sangat banyak. Kondisi ini juga menyebabkan konduktivitas semikonduktor ekstrinsik tipe p ini lebih tinggi dari semikonduktor intrinsik. Hal ini disebabkan karena jumlah lubang pada semikonduktor ekstrinsik tipe p memiliki selisih sebanyak atom tak murnian dibandingkan lubang pada semikonduktor intrinsik (perlu diingat: lubang/hole berperilaku seperti muatan positif karena dapat menangkap elektron yang melintas di dekatnya). Semakin banyak atom tak murnian bervalensi tiga yang dicampurkan, maka jumlah lubang yang dihasilkan juga akan semakin banyak dan konduktivitasnya juga semakin

tinggi. Dengan kata lain, konduktivitas bahan semikonduktor tipe p dapat dikontrol dari banyak sedikitnya atom akseptor (tak murnian).

Gambar 1.12.c menunjukkan bahwa pembawa mayoritas pada semikonduktor ekstrinsik tipe p adalah *hole* (lubang), sedangkan pembawa minoritasnya adalah elektron bebas. Seperti halnya tipe n, pada semikonduktor ekstrinsik tipe p banyak sedikitnya atom tak murnian juga sangat berpengaruh pada konduktivitas. Dengan mengatur kadar tak murnian, semikonduktor ekstrinsik dapat dikontrol dengan sangat teliti konduktivitasnya.

Bahan dasar semikonduktor yang paling lazim adalah silikon dan germanium. Berdasarkan sejarah, kristal germanium murni lebih dulu dihasilkan karena lebih mudah pembuatannya dibanding kristal silikon murni. Setelah teknik pembuatan kristal semikonduktor lebih maju, kristal silikon juga mudah dibuat, bahkan karena berbagai keunggulan, akhirnya silikon menjadi bahan semikonduktor yang paling populer dan paling bermanfaat. Pada kondisi yang sama, silikon memiliki konduktivitas listrik yang lebih tinggi daripada germanium (baca juga dari berbagai sumber: keunggulan silikon dibandingkan germanium).

F. SOAL LATIHAN BAB I

1. Sesuai konduktivitasnya, materi/bahan dapat dibedakan menjadi konduktor dan semikonduktor. Bagaimana perbedaan konduktor dan semikonduktor?
2. Elektron valensi menempati lintasan terluar dalam struktur atom. Berapakah banyaknya elektron valensi yang dimiliki oleh sebuah atom semikonduktor terasing? Berapa pula elektron valensi yang dimiliki oleh atom-atom semikonduktor murni yang berikatan kovalen?
3. Semikonduktor intrinsik adalah bahan semikonduktor yang tersusun atas satu jenis atom. Jika pada suhu 75°C elektron yang terbebaskan secara termal sebanyak satu juta, berapakah banyaknya *hole* yang terbentuk? Berapakah elektron bebas pada pita konduksi, dan hole pada pita valensi saat suhunya 0 Kelvin?
4. Semikonduktor ekstrinsik tipe-n dibuat dengan memberikan tak murnian atom-atom bervalensi lima terhadap bahan semikonduktor intrinsik. Jika 1 milyar atom arsenikum dicampurkan pada atom-atom

silikon, berapakah banyaknya elektron bebas pada pita konduksi, dan berapakah banyaknya *hole* saat suhunya nol mutlak?

5. Sebuah semikonduktor intrinsik telah dibubuhi 1 milyar atom trivalen. Pada suhu -273°C , berapakah banyaknya hole pada pita valensi, dan elektron bebas pada pita konduksi? Jika pada suhu $X^{\circ}\text{C}$ terdapat 100 juta elektron bebas pada pita konduksi, berapakah banyaknya *hole* pada pita valensi di suhu tersebut?

BAB II

TEORI DIODA

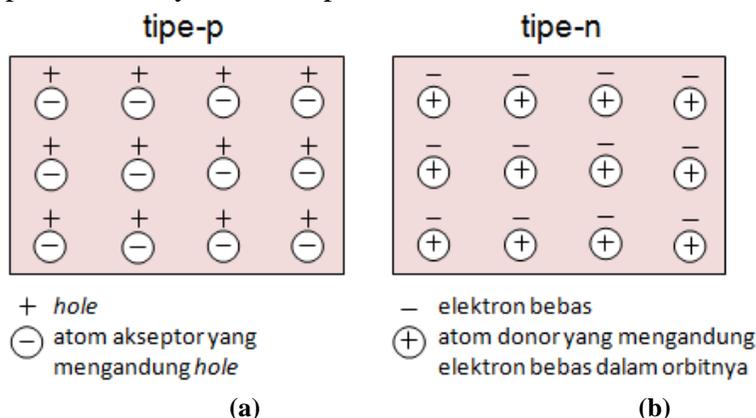
A. SEMIKONDUKTOR TIPE-P DAN TIPE-N

Semikonduktor ekstrinsik tipe-p pembawa mayoritasnya berupa lubang (*hole*), dan pembawa minoritasnya adalah elektron bebas. Pada suhu nol mutlak tidak terdapat elektron bebas, tetapi pada suhu kamar elektron bebas banyak terbentuk akibat energi termal. Namun demikian, jumlah elektron bebas ini jauh lebih sedikit dibandingkan *hole*. Banyaknya *hole* tidak hanya bergantung pada jumlah atom tak murnian, tetapi juga bergantung pada suhu. Semakin tinggi suhu, *hole* yang terbangkitkan melalui energi termal juga semakin banyak. Semikonduktor ekstrinsik tipe-n pembawa mayoritasnya berupa elektron bebas, dan pembawa minoritasnya adalah *hole*. Pada suhu nol mutlak tidak terdapat *hole*, tetapi pada suhu kamar *hole* banyak terbentuk akibat energi termal. Namun demikian, jumlah *hole* ini jauh lebih sedikit dibandingkan elektron bebas. Banyaknya elektron bebas tidak hanya bergantung pada jumlah atom tak murnian, tetapi juga bergantung pada suhu. Semakin tinggi suhu, elektron bebas yang terbangkitkan melalui energi termal juga semakin banyak.

Semikonduktor intrinsik tidak banyak bermanfaat, bahan ini tidak lebih berguna daripada penghambat (resistor) biasa, yang banyak bermanfaat adalah semikonduktor ekstrinsik. Walaupun demikian, semikonduktor ekstrinsikpun juga tidak bermanfaat jika dipakai secara terpisah. Dengan memberi takmurnian berbeda-beda pada sebuah kristal semikonduktor intrinsik sehingga separuhnya bertipe-p, dan separuh yang lain bertipe-n barulah bahan ini menjadi sangat bermanfaat.

Atom netral memiliki jumlah elektron dan proton yang sama. Jika satu elektron ditiadakan, maka atom tersebut tidak netral lagi tetapi bermuatan positif (atom bermuatan positif disebut ion positif). Sebaliknya, jika satu elektron ditambahkan pada sebuah atom netral, maka atom akan bermuatan negatif (ion negatif). Dapat juga dikatakan bahwa sebuah atom bermuatan negatif jika atom tersebut kelebihan elektron, sebaliknya sebuah atom disebut bermuatan positif jika mengalami kekurangan elektron.

Atom-atom pada bahan tipe-p dalam gambar 1.2.a disebut bersifat netral karena mengandung jumlah tanda + dan tanda – yang sama. Setiap *hole* (lubang) dan atom akseptor secara bersama-sama merupakan kesatuan yang netral, namun bila lubang dari sebuah atom akseptor berekombinasi dengan elektron bebas yang melintas di dekatnya, maka atom akseptor tersebut akan mengalami kelebihan muatan negatif dan berubah menjadi ion negatif. Pembawa mayoritas bahan tipe-p adalah lubang, sedangkan pembawa minoritasnya adalah elektron bebas. Pada keadaan tertentu elektron-elektron pada lintasan valensi (terluar) dapat lepas dan menjadi elektron bebas. Keadaan seperti ini menyebabkan jumlah pembawa mayoritas dan pembawa minoritas bertambah.

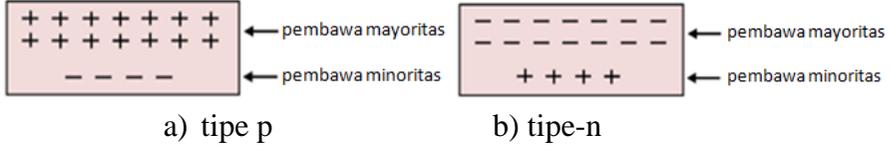


Gambar 2.1. Gambaran atom-atom netral pada: a) bahan tipe-p, dan b) tipe-n

Atom-atom pada bahan tipe-n dalam gambar 2.1.b disebut bersifat netral karena mengandung jumlah tanda + dan tanda – yang sama. Setiap elektron bebas dan atom donor secara bersama-sama merupakan kesatuan yang netral, namun bila elektron bebas dari sebuah atom donor meninggalkan orbitnya dan pindah ke orbit lain atau lepas dari orbitnya, maka atom donor tersebut akan mengalami kekurangan muatan negatif dan berubah menjadi ion positif. Seperti halnya bahan tipe-p, dalam bahan tipe-n pada keadaan tertentu elektron-elektron pada lintasan valensi (terluar) juga dapat lepas dan menjadi elektron bebas. Keadaan seperti ini menyebabkan jumlah pembawa mayoritas dan pembawa minoritas bertambah.

Gambar 2.1.a memperlihatkan atom-atom netral pada bahan tipe-p. Jika digambarkan dalam pembawa mayoritas dan pembawa minoritas tidak lagi demikian. Gambar 2.2.a menunjukkan pembawa mayoritas

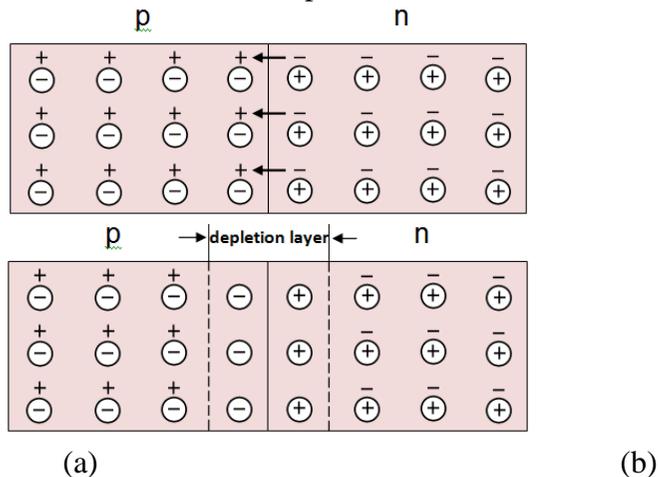
(memiliki jumlah banyak) dan pembawa minoritas (memiliki jumlah sedikit) pada bahan tipe-p. Pada bahan ini pembawa mayoritasnya adalah lubang, sedangkan pembawa minoritasnya adalah elektron bebas.



Gambar 2.2. pembawa mayoritas dan minoritas pada bahan tipe-p dan tipe-n

Gambar 2.1.b memperlihatkan atom-atom netral pada bahan tipe-n. Jika digambarkan dalam pembawa mayoritas dan pembawa minoritas tidak lagi demikian. Gambar 2.2.b menunjukkan pembawa mayoritas (memiliki jumlah banyak) dan pembawa minoritas (memiliki jumlah sedikit) pada bahan tipe-n. Pada bahan ini pembawa mayoritasnya adalah elektron bebas, sedangkan pembawa minoritasnya adalah hole. Pada gambar 2.2.b ditunjukkan bahwa pembawa mayoritas pada bahan tipe-n adalah elektron bebas, sedangkan pembawa minoritasnya adalah lubang.

Gambar 2.3 memperlihatkan sebuah kristal semikonduktor murni yang bagian sisi kirinya diberi tak murnian atom-atom bervalensi tiga, sedangkan bagian sisi kanan diberi tak murnian atom-atom bervalensi lima (piranti seperti ini dikenal dengan nama *dioda*). Batas antar sisi p dan sisi n disebut persambungan (*junction*). Dioda dapat dikatakan sebagai piranti elektronika yang terdiri dari sambungan bahan semikonduktor ekstrinsik tipe-p dan tipe-n. Secara teliti jumlah atom-atom tak murnian pada masing-masing sisi bisa diatur untuk keperluan tertentu.

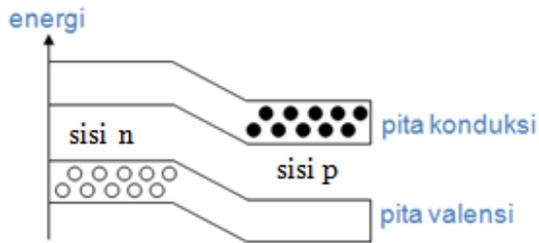


Gambar 2.3. Pemberian tak murnian pada kristal semikonduktor intrinsik.

Sesaat setelah kristal mendingin, akibat gaya tolak menolak antar muatan sejenis, maka elektron-elektron bebas pada sisi n akan menyebar ke segala arah, sebagian berdifusi melintasi persambungan menuju ke daerah p dan menjadi pembawa mayoritas (gambar 2.3.a). Di sisi p, karena dikelilingi oleh banyak *hole* (pembawa mayoritas), maka elektron bebas ini tidak berumur lama akibat berekombinasi dengan *hole* di sekitarnya.

Bersamaan dengan penyebaran elektron bebas melalui persambungan dan diikuti proses rekombinasi, maka ion-ion negatif akan dihasilkan di sebelah kiri, dan ion-ion positif akan tertinggal di sebelah kanan (gambar 2.3.b). Dengan jumlah ion yang semakin banyak, makin banyak pula elektron bebas dan lubang yang menghilang (akibat berekombinasi) di sekitar persambungan. Daerah yang mengandung ion-ion positif dan negatif ini disebut lapisan pengosongan (*depletion layer*) karena daerah ini mengalami penipisan kadar atau pengosongan dari pembawa-pembawa muatan. Saat pembentukan lapisan, pada persambungan akan terjadi beda potensial (disebut *potensial barrier*) akibat kehadiran ion-ion negatif di sebelah kiri, dan ion-ion positif di sebelah kanan. Beda potensial ini cukup besar (sekitar 0,7 volt jika berbahan dasar silikon, 0,3 volt jika berbahan dasar germanium) dan mampu menghalangi serta menghentikan difusi elektron bebas dari daerah n menuju daerah p. Jika ada elektron bebas masuk ke lapisan pengosongan sebelah kanan dan akan berdifusi menuju daerah kiri, maka akan ditolak kembali ke kanan oleh ion-ion negatif di daerah kiri persambungan.

Setelah potensial barrier terbentuk, elektron bebas tidak dapat lagi menerobos potensial ini dan dikatakan bahwa elektron bebas tidak lagi memiliki energi yang cukup untuk memasuki daerah p. Potensial barrier merupakan selisih tingkat energi seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.4. Akibat adanya potensial barrier, maka alas masing-masing pita energi menjadi setinggi batas atas dari pita yang bersesuaian. Hal ini menyebabkan energi elektron bebas di sisi n tidak lagi cukup energinya untuk melakukan penyeberangan melalui persambungan.

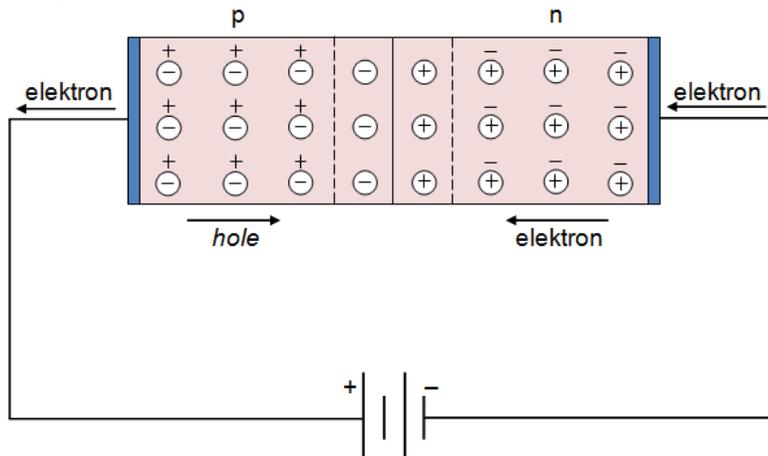


Gambar 2.4. Pita energi dioda tanpa prategangan.

Untuk membantu elektron bebas agar dapat menyeberangi daerah persambungan diperlukan energi bantuan dari luar. Hal ini dapat dilakukan dengan memberi prategangan pada dioda.

B. PRATEGANGAN DIODA

Dioda berasal dari dua kata yaitu *di* yang berarti dua, dan *ode* singkatan dari elektrode. Jadi dioda merupakan piranti dua elektrode yang hanya dapat menghantarkan arus listrik dengan baik dalam satu arah. Untuk memahami mengapa dioda hanya dapat menghantarkan arus listrik dalam satu arah saja, pada bagian ini akan dijelaskan mengapa hal tersebut dapat terjadi.



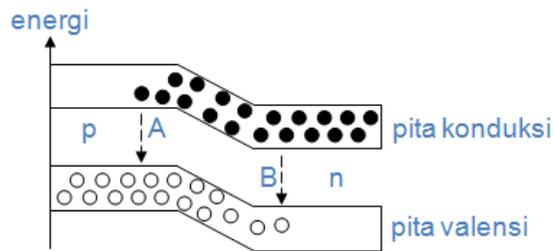
Gambar 2.4. Prategangan maju (*forward bias*).

Dioda pada gambar 2.4 diberi prategangan maju (*forward bias*), sisi p dihubungkan dengan kutub positif baterai, sedangkan sisi n dihubungkan dengan kutub negatif baterai. Hal ini akan mengakibatkan elektron-elektron bebas pada sisi n ditolak ke kiri karena bertemu dengan elektron-elektron dari kutub negatif baterai. Elektron-elektron bebas pada daerah n

bergerak ke kiri menuju ke persambungan. Kejadian ini menyebabkan munculnya ion-ion positif pada sisi kanan kristal. Ion-ion positif ini selanjutnya menarik elektron-elektron dari kutub negatif baterai menuju sisi kanan kristal. Karena kutub positif dari baterai dihubungkan dengan sisi p, lubang-lubang pada daerah p ditolak menuju ke kanan menuju ke persambungan (bukan bergerak ke kanan dalam arti sesungguhnya, tetapi mirip gerakan lampu berjalan). Setelah lubang-lubang bergerak ke kanan, maka ion-ion negatif tertinggal di sisi kiri kristal. Elektron-elektron valensi selanjutnya mengalir dari ion-ion negatif ini melalui kawat menuju ke kutub positif baterai. Jika suatu saat elektron-elektron valensi ini meninggalkan tempatnya, maka lubang-lubang baru akan terbentuk pada ujung kiri kristal.

Secara garis besar gambarannya adalah di dalam kristal elektron-elektron bebas dan lubang selalu bergerak menuju ke persambungan. Bersamaan dengan itu, elektron-elektron bebas baru (berasal dari kutub negatif baterai) akan memasuki ujung kanan kristal dan lubang-lubang baru akan terbentuk di ujung kiri kristal. Kondisi ini mengakibatkan daerah n selalu banyak terdapat elektron bebas, sedangkan daerah p selalu banyak terdapat lubang. Selanjutnya elektron-elektron bebas di daerah persambungan akan bergabung dengan lubang-lubang yang tiba di persambungan. Hasilnya, arus listrik yang kontinyu (terus menerus) akan berlangsung di dalam kristal.

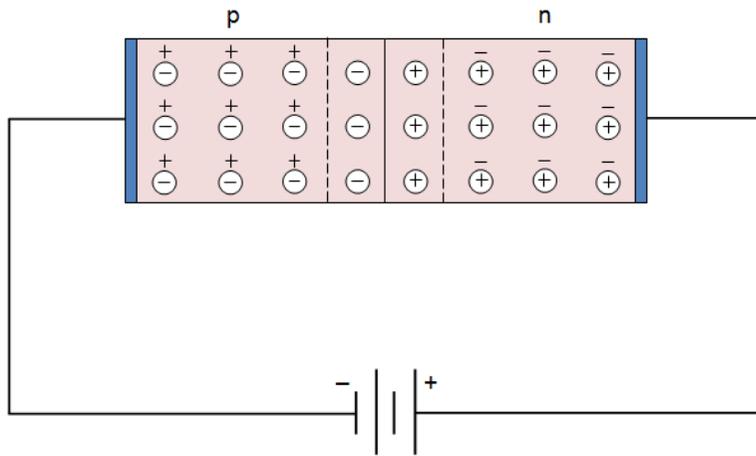
Gambar 2.5 memperlihatkan bahwa tingkat energi elektron-elektron bebas dipertinggi oleh pteganganan luar. Saat tegangan luar mencapai sekitar 0,7 volt (anggap dioda yang terpasang terbuat dari silikon), maka elektron-elektron pada sisi n dari persambungan akan memperoleh energi yang cukup besar untuk memasuki sisi p. Setelah masuk ke daerah p, elektron bebas akan menjadi pembawa minoritas dan dengan cepat akan bergabung (berekombinasi) dengan lubang di sekitarnya (lintasan A). Selanjutnya, elektron ini akan bergerak melalui lubang-lubang sebagai elektron valensi menuju ke ujung kiri kristal.



Gambar 2.5. Tingkat energi pembawa mayoritas pada prategangan maju.

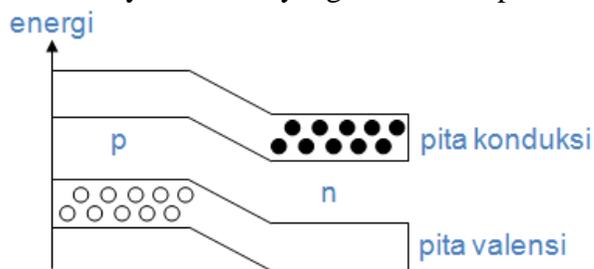
Kadangkala elektron bebas juga bergabung dengan lubang sebelum menyeberangi persambungan. Hal ini terjadi karena lubang juga dapat menyeberangi daerah persambungan dari sisi p menuju sisi n. Rekombinasi elektron bebas di sisi n persambungan digambarkan oleh lintasan B. Terlepas dari masalah dua kejadian rekombinasi di sisi p dan n, hasilnya sebenarnya sama yaitu berupa aliran tunak (*steady*) dari elektron-elektron bebas menuju ke persambungan dan berekombinasi dengan lubang. Elektron-elektron yang terjebak (berubah menjadi elektron valensi) bergerak dalam bentuk aliran tunak melalui lubang-lubang pada daerah p sehingga menyebabkan terjadinya aliran kontinyu dalam dioda. Pengukuran menggunakan amperemeter akan menunjukkan arus yang mengalir dalam dioda bernilai besar.

Gambar 2.6 menunjukkan sebuah dioda yang diberi prategangan balik (*reverse bias*). Pada rangkaian ini, daerah p dari kristal dihubungkan dengan kutub negatif baterai, sedangkan daerah n kristal dihubungkan dengan kutub positif baterai. Hal ini menyebabkan elektron-elektron bebas dan lubang-lubang bergerak menjauhi persambungan untuk sementara waktu. Akibatnya, lapisan pengosongan akan melebar hingga beda potensialnya menyamai tegangan luar yang dipasang sehingga pembawa-pembawa mayoritas akan berhenti mengalir (dalam beberapa nano detik arus listrik akan menurun mendekati nilai nol). Ini terjadi karena tegangan luar pada *reverse bias* berfungsi memperlebar potensial barrier sehingga menghalangi proses aliran dan proses rekombinasi pembawa mayoritas pada daerah persambungan. Pengukuran menggunakan amperemeter akan menunjukkan arus yang mengalir dalam dioda bernilai sangat kecil (mendekati nol).



Gambar 2.6. Prategangan balik (*reverse bias*).

Peninjauan terhadap tingkat energi dari pembawa mayoritas dapat memudahkan pemahaman apa yang terjadi pada prategangan balik. Tegangan luar menyebabkan penurunan tingkat energi elektron bebas pada sisi n daerah persambungan (gambar 2.7) dan menyebabkan pita energi n turun jauh di bawah pita energi p. Pada kondisi ini, elektron-elektron bebas tidak dapat menyeberangi persambungan karena orbitnya terlalu kecil untuk menyamai orbit yang lebih besar pada sisi p.



Gambar 2.7. Tingkat energi pembawa mayoritas pada prategangan balik.

Pada kondisi suhu nol mutlak tidak terdapat elektron bebas dalam daerah p, dan tidak terdapat lubang dalam daerah n (tidak terdapat pembawa minoritas). Akibatnya, prategangan maju menghasilkan arus searah (*direct current/dc*) yang besar, sedangkan prategangan balik tidak akan menghasilkan arus dc. Dengan demikian dioda merupakan penghantar dalam satu arah saja. Karena energi termal, pada suhu di atas nol mutlak beberapa elektron bebas mulai terbentuk dalam daerah p, dan beberapa lubang mulai terbentuk dalam daerah n (terdapat pembawa minoritas dalam daerah p maupun n). Saat dioda diberi prategangan balik, maka pembawa-pembawa minoritas akan menuju ke persambungan dioda

dan berekombinasi di daerah persambungan. Setiap kali terjadi rekombinasi, maka saat itu juga elektron bebas mengalir dari kutub negatif baterai menuju ujung kiri kristal. Bersamaan dengan itu, beberapa elektron valensi akan meninggalkan ujung kanan kristal dan masuk ke dalam kutub positif baterai. Pembawa minoritas ini terbentuk secara terus menerus akibat energi termal selama suhunya di atas nol mutlak. Akibatnya, aliran elektron akan terjadi terus menerus juga. Pengukuran menggunakan amperemeter pada rangkaian prategangan balik (untuk suhu $>$ nol mutlak) akan menunjukkan adanya arus dc yang sangat kecil.

Arus balik terjadi karena adanya pembawa minoritas pada suhu di atas nol mutlak. Sebenarnya arus balik juga dapat terjadi pada suhu nol mutlak. Hal ini disebabkan karena atom-atom yang terdapat pada permukaan kristal mempunyai ikatan-ikatan kovalensi yang terputus di daerah tepi. Akibatnya, kulit kristal penuh dengan lubang dan merupakan saluran berhambatan tinggi. Ini menimbulkan kebocoran arus melalui daerah permukaan kristal. Arus kebocoran permukaan ini tidak bergantung pada suhu, tetapi dipengaruhi oleh tegangan.

Dari penjelasan yang telah disebutkan dapat disimpulkan bahwa arus balik total merupakan jumlah dari arus pembawa minoritas dan arus kebocoran permukaan. Arus balik ini jauh lebih kecil daripada arus maju. Sebagai contoh, pada suhu ruang (sekitar 25° C) dioda 1N4001 memiliki arus balik sebesar $10 \mu\text{A}$ pada tegangan 50 volt.

C. KURVA DIODA

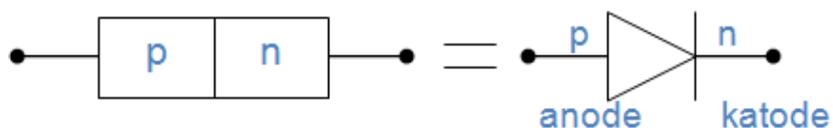
Pada tahap awal, elektronika memanfaatkan tabung vakum sebagai piranti. Dalam tabung vakum terdapat anode dan katode. Dioda dapat dikatakan merupakan piranti revolusioner pengganti tabung vakum. Walaupun ukurannya jauh lebih kecil daripada tabung vakum, namun dioda jauh lebih unggul (salah satunya disebabkan karena kadar tak murnian dioda yang dapat diatur). Sisi p dari dioda disebut anode dan sisi n dari dioda disebut katode. Pemberian prategangan maju pada dioda akan menyebabkan aliran elektron yang ekuivalen dengan arus konvensional dari anode ke katode.

Konsep arah arus listrik sering menimbulkan perdebatan. Pada tahun 1750, Franklin menggambarkan kelistrikan sebagai sistem fluida tak

tampak. Benda yang memiliki jumlah fluida melebihi batas normalnya dikatakan bermuatan positif, sebaliknya jika jumlah fluidanya kurang dari batas normalnya disebut bermuatan negatif. Sesuai teori ini, Franklin menyimpulkan bahwa “fluida listrik” mengalir dari bagian positif (kelebihan menuju ke bagian negatif (kekurangan). Konsep arah aliran listrik seperti ini dikenal dengan aliran konvensional. Thomson pada tahun 1897 elektron yaitu partikel bermuatan negatif dalam atom. Setelah penemuan ini, tidak lama kemudian ilmuwan mulai menyadari bahwa muatan yang mengalir dalam kawat hanya terdiri dari elektron-elektron bebas. Sesuai kenyataan ini, jika sebuah baterai dihubungkan dalam sebuah rangkaian, maka satu-satunya yang terjadi secara fisis adalah aliran elektron dari terminal negatif baterai menuju ke rangkaian kemudian menuju ke terminal positif. Konsep arah aliran listrik seperti ini dikenal sebagai aliran elektron.

Konsep aliran konvensional dan aliran elektron memberikan jawaban akhir yang sama dalam analisis matematis, kecuali masalah arah aliran saja yang memang berlawanan. Dalam kalangan industri, ada kelompok yang lebih suka menggunakan konsep aliran konvensional karena terlanjur banyak analisis matematis didasari konsep aliran konvensional ini. Sebagian kecil kelompok lebih menyukai menggunakan konsep aliran elektron karena lebih sesuai dengan kenyataan. Sebagian besar ilmuwan tetap menyukai aliran konvensional. Pada awal penemuan dioda para ilmuwan terlanjur terobsesi oleh penggunaan konsep aliran konvensional.

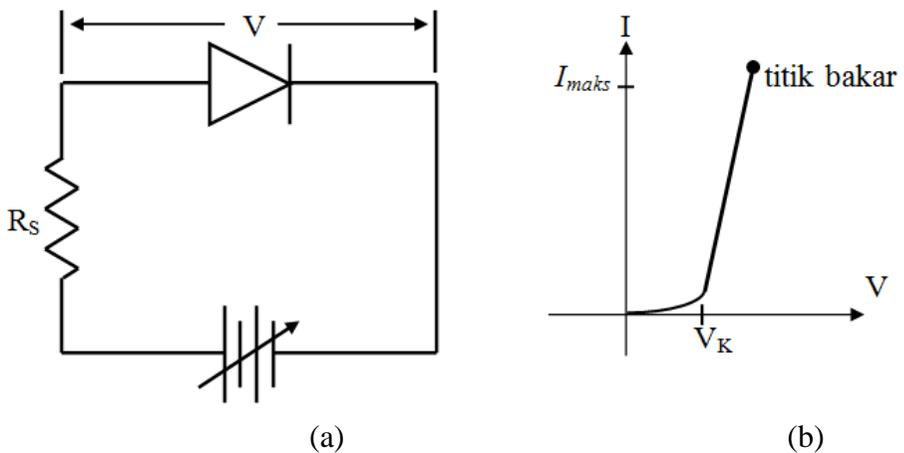
Gambar 2.8 melukiskan lambang dari dioda, tanda panah (segitiga) menunjukkan arah arus (merujuk pada aliran konvensional). Lambang ini terlanjur digunakan dan sudah mendunia. Setelah munculnya konsep aliran elektron yang lebih sesuai dengan kenyataan, lambang dioda ini tetap dipergunakan, tetapi dengan asumsi yang berbeda yaitu tanda panah menunjukkan arah datangnya elektron-elektron bebas.





Gambar 2.8. Lambang dioda dan contoh dioda.

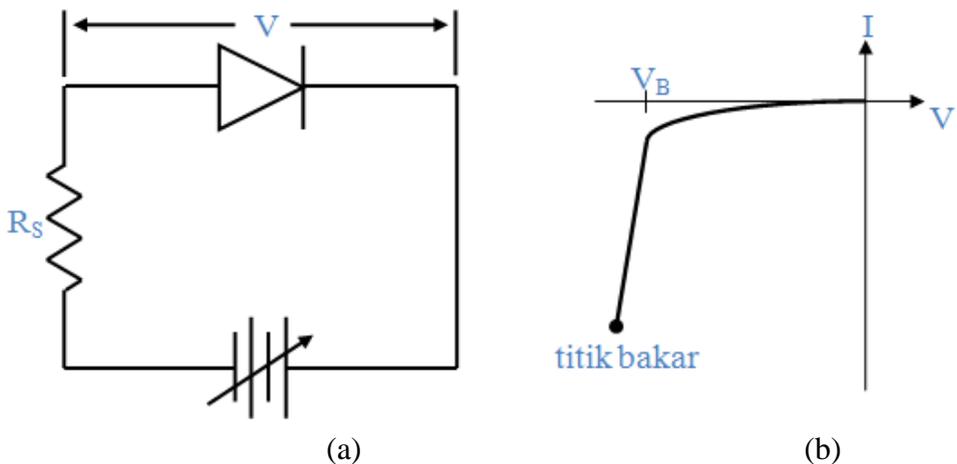
Pemberian prategangan maju dan prategangan balik pada dioda akan menghasilkan arus yang berbeda. Gambar 2.9.a melukiskan pemberian prategangan maju terhadap sebuah dioda. Eksperimen menggunakan rangkaian ini dilakukan dengan mengubah-ubah besarnya tegangan pencatu, dan mencatat kuat arusnya (amperemeter dipasang seri dengan rangkaian). Hasil eksperimen akan menghasilkan catatan tegangan dan kuat arus yang jika ditampilkan dalam kurva V melawan I disebut sebagai kurva karakteristik dioda untuk prategangan maju (gambar 2.9.b). Untuk menampilkan kurva karakteristik dioda, hasil eksperimen dapat diolah menggunakan program aplikasi Microsoft Excel. Jika dioda yang digunakan berbahan dasar silikon, kurva berbentuk seperti lutut akan terjadi pada tegangan maju sekitar 0,7 Volt. dioda yang digunakan berbahan dasar germanium, kurva berbentuk seperti lutut akan terjadi pada tegangan maju sekitar 0,3 Volt.



Gambar 2.9. Prategangan maju. a) rangkaian, b) kurva karakteristik dioda prategangan maju

Gambar 2.9.b menunjukkan saat tegangan nol volt, tidak ada arus yang mengalir melalui dioda. Jika tegangan dinaikkan sedikit demi sedikit tetapi belum mencapai nilai potensial barrier (untuk silikon nilainya sekitar 0,7 volt), arus mulai naik tetapi kenaikannya sangat sedikit (kurva berbentuk landai). Di sekitar potensial barrier, bentuk kurva menyerupai

lutut (*knee*) sehingga potensial barrier dalam kurva karakteristik dioda juga sering disebut sebagai tegangan lutut (*knee voltage*) karena tegangan di sekitarnya menghasilkan kurva berbentuk lutut. Begitu tegangan luar sedikit melebihi potensial barrier dan terus dinaikkan, arus naik dengan sangat tajam (kurva berbentuk curam). Jika tegangan terus dinaikkan, arus dioda juga akan naik terus secara linier sehingga dioda akan mendapat daya (energi per satuan waktu) yang semakin besar, ingat bahwa $P = VI$. Daya ini menimbulkan panas pada dioda (suhu dioda naik), jika nilainya berlebih (melebihi kapasitas dioda) akan menyebabkan kerusakan pada dioda. Mengingat daya berbanding lurus dengan arus, maka hal ini memberikan pembatasan pada besarnya arus yang dapat dihantar oleh dioda dengan aman. Sebagai contoh, dioda silikon 1N4001 dapat bertahan terhadap arus tunak 1 ampere. Jika dioda ini dialiri arus melebihi 1 ampere, maka dioda akan mengalami kerusakan. Walaupun demikian, dioda 1N4001 tidak akan mengalami kerusakan saat dialiri arus besar melebihi 1 ampere jika hanya berlangsung sesaat. Batas arus sesaat ini dalam spesifikasi dioda sering disebut arus hentakan (*surge current*) diberi simbol I_s .



Gambar 2.10. Prategangan balik. a) rangkaian, b) kurva karakteristik dioda prategangan balik

Pemberian prategangan balik pada dioda akan menghasilkan kurva karakteristik yang berbeda dengan kurva prategangan maju pada dioda. Gambar 2.10.a adalah rangkaian prategangan balik pada dioda. Dalam rangkaian ini, daerah p dihubungkan dengan kutub negatif sumber tegangan, sedangkan daerah n dihubungkan dengan kutub positif sumber

tegangan. Eksperimen yang dilakukan dengan mengubah tegangan sedikit demi sedikit disertai pencatatan arus yang bersesuaian akan menghasilkan kurva V melawan I yang disebut sebagai kurva karakteristik dioda prategangan balik (gambar 2.10.b). Saat tegangan balik bernilai nol, arus balik juga bernilai nol. Penambahan tegangan balik akan meningkatkan arus balik (nilainya sangat kecil) yang disebabkan oleh adanya pembawa minoritas dan kebocoran arus permukaan. Nilai arus balik ini berkisar mulai beberapa nano ampere sampai beberapa mikroampere. Saat tegangan balik mencapai tegangan dadal (V_B), arus balik meningkat dengan sangat tajam. Jika arus ini terlampaui besar dan mencapai titik bakar, maka dioda akan mengalami kerusakan.

Sebelum mencapai tegangan dadal, arus balik nilainya sangat kecil. Arus balik ini secara parsial bergantung pada suhu. Sebagai contoh, sesuai lembar data, dioda 1N4001 saat diberi tegangan 50 volt menimbulkan arus sebesar $10 \mu\text{A}$ pada suhu persambungan sekitar 20°C dan bertambah menjadi $50 \mu\text{A}$ pada suhu 75°C . Nilai tegangan dadal (*breakdown voltage*) untuk masing-masing tipe dioda berbeda-beda, biasanya ditampilkan dalam lembar data dioda (*dioda data sheet*). Sebagai contoh, dioda 1N1185 memiliki tegangan dadal sebesar 120 volt. Dioda 1N1185 ini akan mengalami kedadalan jika diberi prategangan balik lebih dari 120 volt.

Pada prategangan maju, arus yang terlalu besar akan merusak dioda karena disipasi daya menjadi terlalu besar untuk dapat diatasi oleh dioda. Dalam arah sebaliknya, tegangan yang terlalu akan menyebabkan kedadalan (*breakdown*) listrik pada dioda. Kedadalan ini dapat dianalogikan seperti proses avalans pada sisi gunung ketika sebuah batu besar jatuh menimpa dan merontokkan/melepaskan batu-batu di bawahnya. Batu-batu yang rontok ini juga merontokkan batu-batu di bawahnya sampai sisi gunung rontok seluruhnya.

Ketika tegangan balik berlebihan, beberapa elektron yang dibebaskan secara termal dari pita valensi akan memperoleh kecepatan yang cukup tinggi untuk dapat melepaskan elektron-elektron lain dari orbit valensinya. Setelah terbebaskan, elektron-elektron ini akan dipercepat oleh medan listrik yang kuat kemudian bertumbukan dengan elektron-elektron valensi lainnya. Proses ini berlangsung terus menerus sampai berakhir pada keadaan avalans yaitu lepasnya elektron-elektron valensi

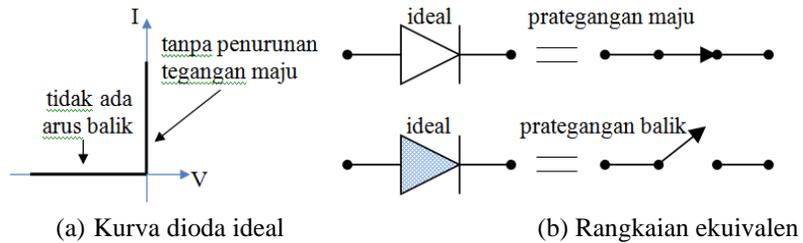
dalam jumlah sangat banyak dan menjadi elektron-elektron bebas. Tegangan saat terjadinya avalans ini disebut sebagai tegangan dadal.

D. KONSEP DIODA IDEAL DAN DIODA NON IDEAL

Faktor yang mempengaruhi hasil analisis matematis pada rangkaian memanfaatkan dioda adalah tegangan lutut (*knee voltage*) diberi notasi V_K dan hambatan limbak (*bulk resistance*) diberi notasi r_B . Untuk perhitungan cepat atau kasar yang tidak membutuhkan ketelitian tinggi, faktor tegangan lutut dan hambatan limbak dapat diabaikan. Berdasarkan hal ini, muncullah konsep dioda ideal yaitu sebuah konsep tentang besaran-besaran fisis dioda tanpa memperhitungkan tegangan lutut dan hambatan limbak.

Dalam konsep dioda ideal, kurva dioda (gambar 2.11.a) dimodelkan: 1) tidak terdapat penurunan tegangan maju, 2) tidak terdapat arus balik, 3) tidak terdapat tegangan dadal. Dioda ideal seperti ini tidak ada dalam kenyataan, ini hanyalah sebuah teori/konsep yang dapat dipergunakan untuk menyederhanakan pemahaman dan analisis matematis saja. Namun demikian, sebuah dioda yang dirancang dengan sangat baik akan bekerja hampir seperti dioda ideal karena penurunan tegangan majunya dapat diatur menjadi sangat kecil dibandingkan tegangan masuk dan tegangan keluar sehingga penurunan tegangan maju ini tidak berpengaruh dalam kinerja dioda. Inilah sebabnya dalam hitung cepat, semua dioda dapat dianggap sebagai dioda ideal dalam analisis rangkaian dioda.

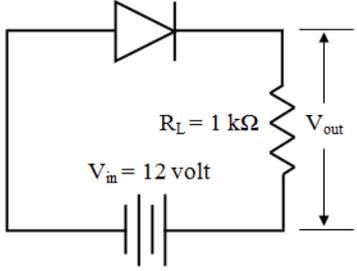
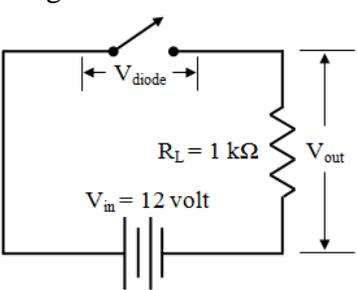
Dalam visualisasi, secara ekuivalen dioda ideal dilukiskan sebagai sebuah sakelar (*switch*) untuk memudahkan penerapan (gambar 2.11.b). Dioda digambarkan sebagai sakelar tertutup bila diberi prategangan maju, sebaliknya dioda digambarkan sebagai sakelar terbuka bila diberi prategangan balik. Jadi, pada prategangan maju, sebuah dioda digambarkan dapat menghantarkan arus listrik dengan sangat mudah (diibaratkan sebagai sakelar tertutup), sedangkan pada prategangan balik, dioda digambarkan tidak dapat menghantarkan arus listrik sama sekali (diibaratkan sebagai terbuka).



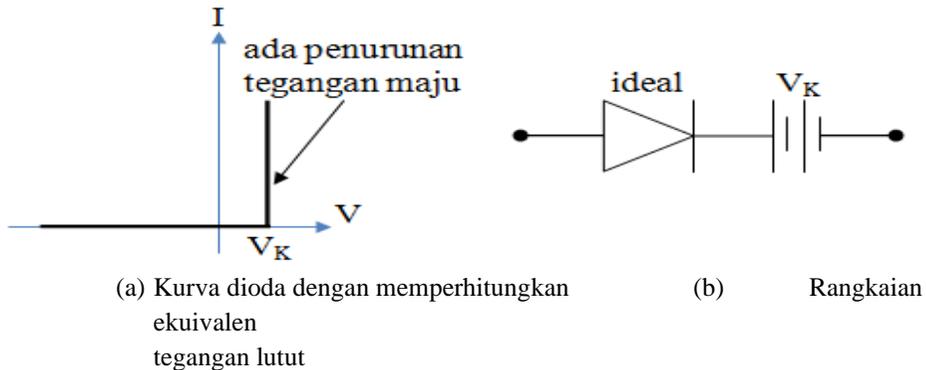
Gambar 2.11. Konsep dioda ideal

Penggunaan konsep dioda ideal ini sangat memudahkan analisis matematis. Contoh soal beserta penyelesaian berikut menunjukkan betapa sederhananya analisis matematis yang didasari oleh konsep dioda ideal.

<p>Contoh soal 2.1.</p> <p>Gambar berikut adalah rangkaian sederhana menggunakan dioda dan hambatan beban yang dipasang secara seri. Dalam rangkaian ini, dioda diberi prategangan maju. Berapakah besarnya tegangan keluar dan arus yang mengalir dalam dioda? Gunakan dioda ideal!</p>	
<p>Penyelesaian:</p> <p>Dalam rangkaian tersebut, dioda mendapat prategangan maju, sehingga dioda dapat diibaratkan sebagai sakelar tertutup (konsep dioda ideal). Sesuai gambar tersebut, maka:</p> $V_{out} = V_{in} = 12 \text{ volt}$ <p>Sesuai gambar ini, arus yang mengalir melalui hambatan beban adalah:</p> $I = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{12 \text{ volt}}{1 \text{ k}\Omega} = 12 \text{ mA}$ <p>Dioda dan hambatan beban dirangkai seri, sehingga arus yang mengalir melalui dioda sama dengan arus yang mengalir melalui hambatan beban yaitu sebesar 12 mA.</p>	<p>Rangkaian ekuivalen:</p>

<p>Contoh soal 2.2.</p> <p>Gambar berikut adalah rangkaian sederhana menggunakan dioda dan hambatan beban yang dipasang secara seri. Dalam rangkaian ini, dioda diberi prategangan balik. Berapakah besarnya tegangan keluar, arus yang mengalir dalam dioda, dan tegangan dioda? Gunakan dioda ideal!</p>	
<p>Penyelesaian:</p> <p>Dalam rangkaian tersebut, dioda mendapat prategangan balik, sehingga dioda dapat diibaratkan sebagai sakelar terbuka (konsep dioda ideal). Sesuai gambar tersebut, maka tidak ada arus yang mengalir dalam rangkaian, sehingga:</p> $V_{out} = IR_L = 0 (1 \text{ k}\Omega) = 0 \text{ volt}$ $I = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{0 \text{ volt}}{1 \text{ k}\Omega} = 0 \text{ mA}$ <p>Sesuai hukum II Kirchhoff, tegangan dioda adalah:</p> $V_{diode} = V_{in} - V_{out} = 12 \text{ volt} - 0 \text{ volt} = 12 \text{ volt}$	<p>Rangkaian ekuivalen:</p> 

Konsep dioda ideal memang memudahkan dan mempercepat analisis matematis, namun ini sebenarnya tidak sesuai dengan kenyataan. Untuk analisis yang lebih teliti, salah satu faktor yang perlu diperhitungkan adalah tegangan lutut (V_K). Pada konsep dioda ideal, kurva dioda menunjukkan tidak adanya penurunan tegangan, namun jika tegangan lutut diperhitungkan, maka kurva dioda menunjukkan adanya penurunan tegangan sebesar tegangan lutut (gambar 2.12.a).



Gambar 2.12. Konsep dioda dengan memperhitungkan tegangan lutut

Pendekatan analisis matematis dengan memperhitungkan tegangan lutut ini perlu diterapkan jika tegangan lutut merupakan harga yang cukup berarti dibandingkan tegangan masukan. Sebagai contoh, suatu rangkaian ketelitiannya ditetapkan memiliki toleransi dibawah 5%. Jika dioda yang dipasang dalam rangkaian adalah dioda silikon dengan $V_K = 0,7$ volt, maka untuk tegangan masuk 15 volt, tegangan lutut dapat diabaikan karena persentasenya hanya 4,67% ($< 5\%$ tegangan masuk). Sebaliknya, jika tegangan masuknya 12 volt, maka tegangan lutut harus diperhitungkan karena persentasenya 5,83% ($> 5\%$ tegangan masuk). Ketentuan tentang diperhitungkan tidaknya tegangan lutut juga tergantung pada tujuan analisis. Jika hanya untuk keperluan pemecahan kesulitan secara cepat (*trouble shooting*), maka konsep dioda ideal cukup baik untuk digunakan, namun jika untuk keperluan merancang rangkaian, maka memperhitungkan tegangan lutut akan menghasilkan rancangan yang lebih baik karena lebih teliti. Konsep analisis memperhitungkan tegangan lutut hanya bermanfaat untuk analisis pada prategangan maju.

<p>Contoh soal 2.3.</p> <p>Gambar berikut adalah rangkaian menggunakan dioda dan hambatan beban yang dipasang secara seri. Dalam rangkaian ini, dioda diberi prategangan maju. Jika dioda terbuat dari silikon dan tegangan lutut diperhitungkan, berapakah besarnya tegangan keluar dan arus yang mengalir dalam dioda?</p>	
<p>Penyelesaian:</p>	<p>Rangkaian ekuivalen:</p>

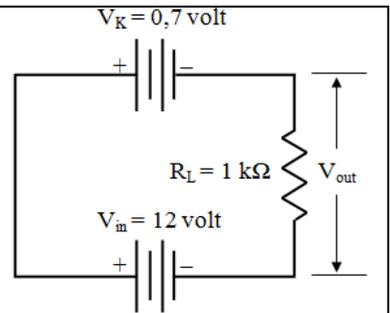
Sesuai soal, dioda mendapat prategangan maju, sehingga dioda dapat diibaratkan sebagai sumber tegangan dengan polaritas seperti gambar, maka:

$$V_{out} = V_{in} - V_K = 12 \text{ volt} - 0,7 \text{ volt} = 11,3 \text{ volt}$$

Sesuai gambar ini, arus yang mengalir melalui hambatan beban adalah:

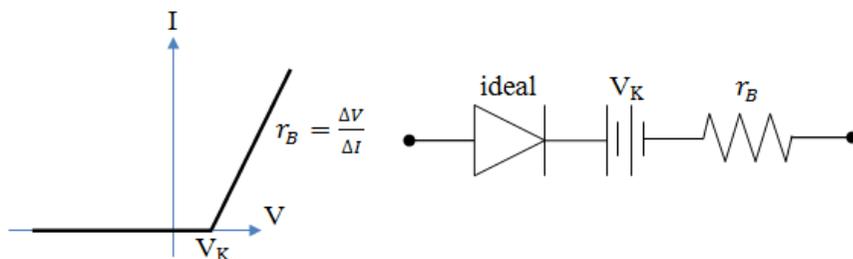
$$I = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{11,3 \text{ volt}}{1 \text{ k}\Omega} = 11,3 \text{ mA}$$

Dioda dan hambatan dirangkai seri, sehingga arus yang mengalir melalui dioda juga sebesar 11,3 mA.



Analisis matematis dengan memperhitungkan tegangan lutut ini sedikit lebih panjang dibandingkan menggunakan konsep dioda ideal, namun sebenarnya juga tidak terlalu sulit. Hasil akhir perhitungan tentu saja berbeda (lebih teliti) dengan hasil perhitungan menggunakan konsep dioda ideal, namun demikian ada analisis yang lebih teliti lagi yaitu dengan memperhitungkan tegangan lutut V_K sekaligus juga memperhitungkan hambatan limbak r_B (*bulk resistance*).

Gambar 2.13.a memperlihatkan kurva dioda dengan memperhitungkan tegangan lutut dan hambatan limbak. Menurut pendekatan ini, dioda mulai menghantar di atas tegangan lutut, namun selanjutnya dioda berfungsi sebagai penghambat kecil. Nilai hambatan limbak ini relatif konstan sehingga perubahan arus dioda berbanding lurus dengan perubahan tegangannya. Perbandingan perubahan tegangan terhadap perubahan arus ini disebut hambatan limbak.



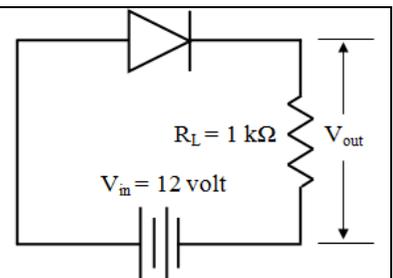
Gambar 2.13. Kurva dioda, dan lambang dioda dengan memperhitungkan tegangan lutut dan hambatan limbak

Gambar 2.13.b memperlihatkan rangkaian ekuivalen dari sebuah dioda jika tegangan lutut dan hambatan limbak diperhitungkan. Dalam rangkaian ini, dioda ideal dihubungkan dengan tegangan lutut beserta hambatan limbaknya. Berdasarkan pendekatan ini, penurunan tegangan dioda dalam keadaan menghantar terjadi akibat adanya tegangan lutut dan hambatan limbak. Menurut konsep ini, dioda silikon paling tidak memerlukan tegangan masuk 0,7 volt agar dapat berfungsi sebagai penghantar. Konsep analisis memperhitungkan tegangan lutut dan hambatan limbak ini hanya bermanfaat untuk analisis rangkaian prategangan maju. Sesuai pendekatan ini, tegangan total dioda adalah $V_{dioda} = V_K + Ir_B$.

Hambatan limbak perlu diperhitungkan jika nilainya menyebabkan hasil analisis matematis melebihi batas toleransi kinerja rangkaian. Misal, batas toleransi itu adalah 5%, maka hambatan limbak 5 Ω atau lebih perlu diperhitungkan jika hambatan seri di luar dioda berharga 100 Ω . Jika hambatan limbak kurang dari 5% hambatan seri, maka hambatan limbak boleh diabaikan kecuali untuk keperluan analisis yang membutuhkan ketelitian tinggi.

Contoh soal 2.4.

Gambar berikut adalah rangkaian menggunakan dioda dan hambatan beban yang dipasang secara seri. Dalam rangkaian ini, dioda terbuat dari silikon dengan hambatan limbak 20 Ω . Jika tegangan lutut dan hambatan limbak diperhitungkan, berapakah besarnya arus yang mengalir dalam dioda dan tegangan keluarannya?



<p>Penyelesaian:</p> <p>Memperhatikan rangkaian ekuivalen, maka arus yang mengalir melalui dioda adalah:</p> $I_{dioda} = \frac{V_{in} - V_K}{R_L + r_B} = \frac{12 \text{ volt} - 0,7 \text{ volt}}{1 \text{ k}\Omega + 20 \Omega} = 11,08 \text{ mA}$ <p>Karena arus melalui hambatan beban sama dengan arus dioda, maka tegangan keluarannya adalah:</p> $V_{out} = (11,08 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 11,08 \text{ volt}$	<p>Rangkaian ekuivalen:</p> <p>$V_K = 0,7 \text{ volt}$</p> <p>$r_B = 20 \Omega$</p> <p>$R_L = 1 \text{ k}\Omega$</p> <p>$V_{in} = 12 \text{ volt}$</p>
--	---

E. HAMBATAN DIODA DAN PENGARUH SUHU

Dioda adalah sebuah piranti non linier karena arus yang melaluinya tidak berbanding lurus dengan tegangan dioda. Hambatan dc dari dioda (perbandingan tegangan total dioda terhadap arus total dioda) tidaklah tetap. Ketika berada dalam rangkaian dan catu daya dipasang, nilai hambatan dc dioda kecil dalam arah maju (*forward bias*), tetapi besar dalam arah sebaliknya (*reverse bias*). Dalam arah maju maupun balik, hambatan dc dioda juga tidak konstan. Contoh soal 2.4 dan 2.5 membuktikan hal ini.

Contoh soal 2.5.

Ketika diberi prategangan maju, dioda 1N914 memiliki arus maju 10 mA pada tegangan 0,65 volt, 30 mA pada 0,75 volt, dan 50 mA pada 0,85 volt. Berdasarkan data ini, apakah hambatan dc maju dioda 1N914 ini bernilai tetap?

Penyelesaian:

$$R_{F1} = \frac{0,65 \text{ volt}}{10 \text{ mA}} = 65 \Omega \quad \left| \quad R_{F2} = \frac{0,75 \text{ volt}}{30 \text{ mA}} = 25 \Omega \quad \left| \quad R_{F3} = \frac{0,85 \text{ volt}}{50 \text{ mA}} = 17 \Omega$$

Dari hasil perhitungan, terlihat bahwa hambatan dc maju dioda 1N914 nilainya tidak tetap.

Contoh soal 2.6.

Ketika diberi prategangan balik, dioda 1N914 memiliki arus balik 25 nA pada tegangan 20 volt, dan 5 μ A pada 75 volt. Berdasarkan data ini, apakah hambatan dc balik dioda 1N914 ini bernilai tetap?

Penyelesaian:

$$R_{R1} = \frac{20 \text{ volt}}{25 \text{ nA}} = 800 \text{ M}\Omega \quad \left| \quad R_{R2} = \frac{75 \text{ volt}}{5 \mu\text{A}} = 15 \text{ M}\Omega \quad \right|$$

Dari hasil perhitungan, terlihat bahwa hambatan dc balik dioda 1N914 nilainya juga tidak tetap.

Contoh soal 2.4 dan 2.5 juga membuktikan bahwa dalam arah maju, hambatan dc sebuah dioda bernilai sangat kecil jika dibandingkan hambatan dc dalam arah sebaliknya. Dalam arah maju (*forward bias*), nilai hambatan dc dioda 1N914 berorde Ω , sedangkan dalam arah sebaliknya (*reverse bias*), nilainya berorde mega Ω ,

Pengukuran nilai hambatan dioda saat tidak terpasang dalam rangkaian tentu saja akan menunjukkan hasil yang berbeda lagi. Untuk dioda silikon, perbandingan hambatan balik dan maju dari dioda saat tidak terpasang dalam rangkaian harus melebihi 1000 : 1. Untuk dioda daya tinggi perbandingan ini sekitar 100 : 1. Dalam praktik, pengukuran dengan ohmmeter analog dapat menghasilkan arus besar yang dapat merusak dioda. Agar dioda terhindar dari kerusakan, pengukuran sebaiknya dilakukan pada skala yang lebih besar, misalnya R x 100.

Operasi dari suatu rangkaian memanfaatkan dioda dapat mengalami perubahan kualitas akibat perubahan suhu. Jika suhu lingkungan (*ambient temperature*) naik, maka suhu dalam dioda juga akan naik. Kenaikan suhu ini menyebabkan peningkatan jumlah pembawa minoritas dalam daerah p maupun n dari dioda. Tambahan pembawa minoritas ini (elektron bebas dan lubang) dapat mengubah harga tegangan lutut dalam arah maju, dan dapat juga mengubah arus pembawa minoritas dalam arah balik. Semakin tinggi suhu, pembawa minoritas ini semakin banyak terbentuk akibat energi termal karena getaran atom yang semakin cepat.

Saat dioda diberi prategangan maju, pembawa-pembawa minoritas akan mengakibatkan deionisasi pada sebagian daerah di area lapisan pengosongan yang menyebabkan terjadinya penurunan tegangan lutut atau potensial barrier. Lembar data dioda yang diterbitkan oleh pabrik, kadangkala menyertakan informasi seberapa besar penurunan tegangan

lutut sebuah dioda akibat kenaikan suhu. Jika informasi ini tidak tersedia, pendekatan umum yang dapat digunakan sebagai acuan adalah menggunakan persamaan $\Delta V_K = (T_2 - T_1)(-2 \text{ mV})$.

Sesuai persamaan tersebut, tegangan lutut akan mengalami penurunan sebesar 2 mili volt untuk setiap derajat kenaikan suhu (dalam celcius). Perubahan tegangan lutut sangat terasa jika suhu mengalami perubahan yang cukup besar sehingga hal ini akan mempengaruhi kinerja dari rangkaian. Oleh karenanya, jangkauan suhu sangat diperhatikan dalam rangkaian-rangkaian elektronika komersial.

Dioda tertentu sengaja dipasang pada prategangan balik (*reverse bias*), contohnya dioda zener. Pada prategangan balik, kenaikan suhu akan meningkatkan jumlah pembawa minoritas. Akibatnya, arus balik oleh pembawa minoritas menjadi besar. Data eksperimen menunjukkan untuk dioda silikon, arus balik ini bertambah sekitar dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu sebesar 10^0 C. Misal, pada suhu 25^0 C arus balik yang terjadi sebesar 5 nA, maka pada suhu 35^0 C arus balik menjadi 10 nA, pada suhu 45^0 C menjadi 20 nA.

Pada suhu ruang sekitar 25^0 C, suatu rangkaian biasanya berfungsi dengan sangat baik karena rangkaian biasanya dirancang untuk sesuai dengan keadaan lingkungan keseharian. Perubahan suhu yang tidak besar biasanya tidak banyak berpengaruh pada kinerja rangkaian, namun perubahan suhu yang cukup ekstrim dapat mempengaruhi kinerja rangkaian. Pada rangkaian dioda prategangan maju, perubahan suhu yang mencolok (ekstrim) menyebabkan perubahan tegangan lutut yang cukup besar pula. Untuk rangkaian dioda prategangan balik, perubahan suhu yang ekstrim akan menyebabkan perubahan arus balik oleh pembawa minoritas yang ekstrim pula.

F. LEMBAR DATA DIODA

Faktor-faktor penting yang perlu diperhatikan ketika merancang rangkaian dioda adalah: 1) batas tegangan dadal, 2) batas daya, 3) batas arus. Jika faktor-faktor tersebut dilanggar, rangkaian bisa mengalami kerusakan.

Kedadalan dioda harus dihindari dalam operasi karena dapat merusak dioda atau mengurangi kualitas operasinya (kecuali dioda zener yang memang sengaja dioperasikan dalam daerah dadal). Tidak ada lambang baku untuk batas tegangan dadal suatu dioda. Berbagai pabrik menuliskan batas tegangan dadal ini dalam notasi yang berbeda-beda. Notasi-notasi yang biasa digunakan yaitu: $V_{R(max)}$ (tegangan balik maksimum), $V_{(BR)}$ (kedadalan tegangan), BV (tegangan dadal), PRV (tegangan balik puncak), PIV (tegangan balik puncak), V_{RWM} (maksimum operasional dari kebalikan tegangan), dan $V_{(RM)}$ (maksimum dari kebalikan tegangan). Biasanya disertakan pula informasi tentang batas-batas kedadalan untuk penggunaan pada pencatu dc (arus searah) dan ac (arus bolak-balik).

Faktor lain yang merusak dioda adalah daya yang berlebih pada dioda. Pabrik biasanya juga menyertakan batas daya maksimum dioda (P_D) dalam lembar data dioda. Dalam arah maju, tegangan dadal cukup jauh dari harga tegangan lutut (biasanya satu volt atau lebih, tergantung juga pada besarnya arus). Hasil kali tegangan dengan arus disebut daya, jika harganya tinggi akan menimbulkan panas yang berlebih dan dapat menyebabkan dioda meleleh. Pabrik kadangkala menyertakan informasi batas daya ini dalam lembar data. Contoh data, dioda 1N914 memiliki batas daya maksimum (P_D) sebesar 250 mW. Ini berarti daya melebihi 250 mwatt akan merusak dioda 1N914. Berdasarkan batas dayanya, dioda dibedakan menjadi dioda sinyal kecil dan dioda sinyal besar. Batas daya untuk dioda sinyal kecil adalah 0,5 W, lebih dari itu disebut dioda sinyal besar.

Informasi batas daya maksimum memang kadangkala disertakan oleh beberapa pabrik, namun banyak pabrik tidak menyertakan informasi ini dan lebih memilih untuk menampilkan harga-harga batas arus (*current rating*), yaitu arus maksimum yang dapat disalurkan oleh dioda secara aman. *Current rating* yang umum ditampilkan adalah batas arus tunak dan batas arus sentakan.

Batas arus tunak biasanya dinyatakan dalam I_0 , sebagai contoh dioda 1N4001 memiliki $I_0 = 1$ A. Ini berarti, dioda 1N4001 dapat menyalurkan arus tunak sebesar 1 ampere atau kurang. Jika digunakan untuk menyalurkan arus tunak melebihi 1 ampere, maka dioda tersebut akan rusak atau usia pakainya lebih pendek dari normal. Agar arus yang

mengalir lewat dioda tidak melebihi I_0 , cara yang umum adalah dengan menambahkan penghambat pembatas arus (resistor) dalam rangkaian dan dipasang seri dengan dioda.

Sebenarnya dioda dapat dilewati arus yang besarnya cukup jauh diatas I_0 asalkan hanya mengalir dalam waktu yang sangat singkat (arus sentakan). Kadangkala pabrik juga menyertakan informasi tentang batas arus sentakan. Beberapa notasi yang biasa digunakan adalah I_{surge} , $I_{\text{FM(surge)}}$, dan I_{FSM} . Batas arus sentakan ini tentu saja lebih tinggi dibandingkan batas arus dc (I_0) karena dioda tidak akan mencapai suhu merusak selama arus sentakan berlangsung sangat singkat. Pada tabel 2.1 ditunjukkan I_{FSM} sebesar 30 A, dan I_0 sebesar 1 A. Artinya, dioda dapat dilalui arus sebesar 30 A dengan aman asalkan berlangsung dalam waktu yang sangat singkat, tetapi jika aliran arus berlangsung lama, maka dioda hanya aman dilalui arus sebesar 1 A atau kurang.

Tabel 2.1. Contoh lembar data dioda

<https://www.diodas.com/assets/Datasheets/ds28002.pdf>

Characteristic	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V_{RRM}								
Working Peak Reverse Voltage	V_{RWM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
DC Blocking Voltage	V_{R}								
RMS Reverse Voltage	$V_{\text{R(RMS)}}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @ $T_{\text{A}} = +75^{\circ}\text{C}$	I_{O}				1.0				
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single Half Sine-Wave Superimposed on Rated Load	I_{FSM}				30			A	
Forward Voltage @ $I_{\text{F}} = 1.0\text{A}$	V_{FM}				1.0			V	
Peak Reverse Current @ $T_{\text{A}} = +25^{\circ}\text{C}$	I_{RM}				5.0			μA	
at Rated DC Blocking Voltage @ $T_{\text{A}} = +100^{\circ}\text{C}$					50				
Typical Junction Capacitance (Note 2)	C_{J}	15			8			pF	
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta\text{JA}}$				100			K/W	
Maximum DC Blocking Voltage Temperature	T_{A}				+150			$^{\circ}\text{C}$	
Operating and Storage Temperature Range	$T_{\text{J}}, T_{\text{STG}}$				-65 to +150			$^{\circ}\text{C}$	

A. DIODA KHUSUS

1. Dioda Zener

Dioda penyearah tidak pernah dioperasikan dalam daerah dadal, dengan kata lain dioda ini lebih sering diberi prategangan maju (*forward bias*). Lain halnya dengan dioda zener, dioda ini memang sengaja dioperasikan dalam daerah dadal melalui prategangan balik (*reverse bias*). Penggunaan utama dioda zener adalah dalam rangkaian regulator tegangan yaitu untuk mempertahankan tegangan beban dc pada harga yang relatif tetap walaupun tegangan saluran luar atau hambatan beban dari rangkaian mengalami perubahan. Sebagai

contoh, dioda zener 6,2 volt ketika digunakan dalam rangkaian regulator akan menjaga tegangan dc berharga sekitar 6,2 volt walaupun tegangan saluran luar berharga beberapa volt di atasnya. Regulator tegangan ini sangat berguna untuk menjaga agar suatu rangkaian mendapatkan tegangan catu yang tidak melebihi batas rancangan sehingga rangkaian menjadi aman. Dioda zener bekerja berdasarkan prinsip kedadalan dioda yang disebabkan dua hal yaitu efek zener dan efek avalans.

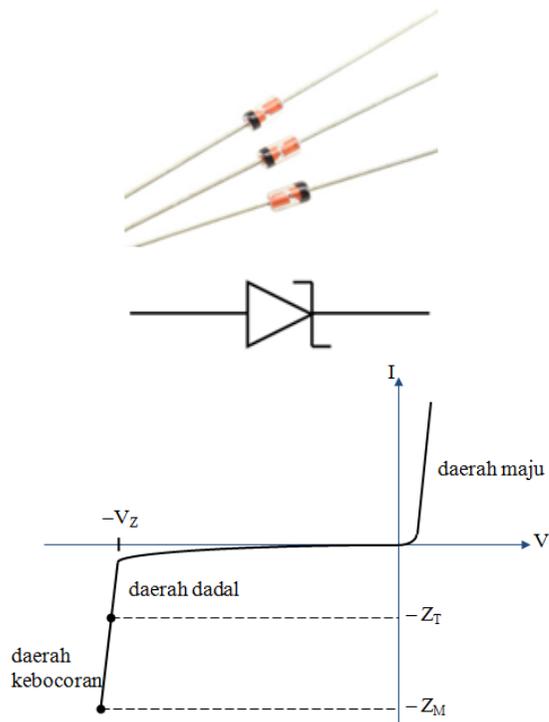
Dioda zener dapat mengalami kedadalan akibat efek zener. Ketika sebuah dioda diberi tak murnian dalam jumlah besar, maka ketika diberi prategangan balik akan terjadi medan listrik yang sangat besar di daerah persambungan. Medan listrik yang kuat akan membebaskan elektron valensi dari orbitnya. Kejadian ini menimbulkan arus balik yang besar. Efek semacam ini dinamakan efek zener, kadangkala disebut juga efek emisi medan tinggi.

Kedadalan pada dioda juga dapat terjadi akibat efek avalans. Ketika dioda diberi prategangan balik, pembawa-pembawa minoritasnya akan menimbulkan tegangan balik yang sangat kecil di bawah titik dadal (kebocoran arus). Jika tegangan balik melebihi tegangan dadal, maka pembawa-pembawa minoritas tersebut akan mendapat energi yang cukup besar untuk melepaskan elektron-elektron valensi dari orbitnya, selanjutnya elektron-elektron valensi yang telah bebas tersebut dapat melepaskan elektron-elektron valensi lainnya (peristiwa semacam ini disebut dengan efek avalans). Akibat dari efek avalans, jumlah elektron bebas menjadi sangat banyak sehingga menimbulkan terjadinya arus balik yang besar.

Secara umum, efek zener lebih dominan menyebabkan kedadalan pada tegangan balik di bawah 5 volt, sedangkan efek avalans lebih dominan menyebabkan kedadalan saat tegangan balik di atas 6 volt. Pada tegangan antara 5 sampai 6 volt, efek zener dan efek avalans berperan seimbang dalam menyebabkan kedadalan. Jadi, dioda zener dengan tegangan dadal di atas 6 volt sebenarnya lebih cocok disebut dioda avalans, namun sudah terlanjur disepakati bahwa semua dioda yang menampilkan salah satu efek (zener dan avalans) disebut sebagai dioda zener.

Gambar 2.14 memperlihatkan dioda zener, lambang dan kurva karakteristiknya. Dengan mengubah kadar (tingkat) tak murnian, dioda zener dapat diatur memiliki tegangan dadal yang berbeda-beda (berkisar antara 2 sampai 200 volt). Sebenarnya dioda zener dapat bekerja dalam daerah maju, daerah kebocoran, maupun daerah dadal, namun untuk keperluan regulasi tegangan, dioda zener selalu dioperasikan dalam daerah dadal. Dalam operasi memanfaatkan sumber arus bolak-balik atau ac (*alternating current*), dioda zener dapat beralih antara ketiga keadaan (daerah operasi) yang telah disebutkan.

Dalam daerah maju, dioda zener mulai menghantar pada tegangan 0,7 volt seperti dioda biasa. Dalam daerah kebocoran (tegangan balik 0 volt sampai < batas dadal), dioda hanya dilalui oleh arus kebocoran yang sangat kecil. Kedadalan ditandai oleh lutut grafik yang sangat tajam dan dilanjutkan dengan grafik peningkatan arus yang hampir tegak lurus. Dalam daerah dadal ini terlihat bahwa tegangannya hampir tidak mengalami perubahan (kurang lebih sebesar V_Z).



Gambar 2.14. Dioda zener, lambang, dan kurva karakteristik

Dalam lembar data, harga V_Z ini tercantum untuk arus uji I_{ZT} (tabel 2.2). Lembar data kadangkala juga mencantumkan P_{ZM} (batas daya), dan I_{ZM} (burn-out point/titik bakar), secara matematis, $I_{ZM} = \frac{P_{ZM}}{V_Z}$. Lembar data merupakan acuan yang sangat penting untuk diperhatikan saat merancang rangkaian. Batas-batas maksimum meliputi batas arus tunak, batas arus sentakan, dan batas daya tidak boleh dilanggar untuk menjamin komponen tidak mengalami kerusakan sehingga bisa bertahan lama dalam pemakaian. Penggunaan dioda zener dalam regulator tegangan, lebih lanjut akan disajikan dalam bab III, sedangkan simulasi penggunaan dioda zener dalam rangkaian regulator tegangan disajikan dalam bab V. Dalam praktik sesungguhnya di laboratorium, regulator zener dapat dengan mudah dieksperimenkan.

Tabel 2.2. Contoh lembar data dioda zener <http://www.simonsdialogs.com/wp-content/uploads/2015/06/bzx85-zener-data.jpg>

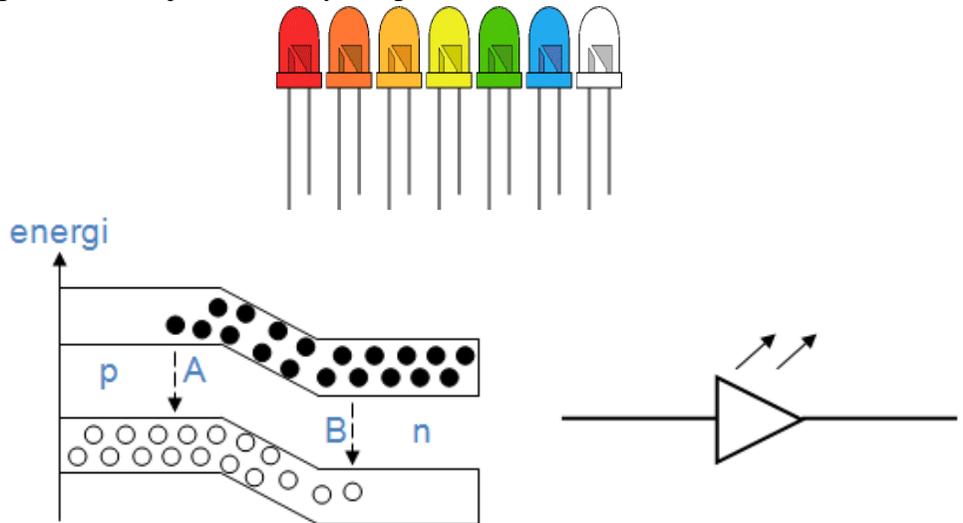
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T _{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)												
PART NUMBER	ZENER VOLTAGE RANGE ⁽¹⁾			TEST CURRENT		REVERSE LAEKAGE CURRENT		DYNAMIC RESISTANCE ⁽³⁾		TEMPERATURE COEFFICIENT OF ZENER VOLTAGE		ADMISSIBLE ZENER CURRENT ⁽²⁾
	V _Z at I _{ZT1}			I _{ZT1}	I _{ZT2}	I _R at V _R		Z _Z at I _{ZT1}	Z _{ZK} at I _{ZT2}	α _{VZ} at I _{ZT1}		I _Z
	V			mA		μA	V	Ω		%/°C		mA
	MIN.	NOM.	MAX.					MAX.	MAX.	MIN.	MAX.	
BZX85C2V7	2.5	2.7	2.9	80	1	< 150	1	< 20	< 400	- 0.08	- 0.05	360
BZX85C3V0	2.8	3.0	3.2	80	1	< 100	1	< 20	< 400	- 0.08	- 0.05	330
BZX85C3V3	3.1	3.3	3.5	80	1	< 40	1	< 20	< 400	- 0.08	- 0.05	300
BZX85C3V6	3.4	3.6	3.8	60	1	< 20	1	< 20	< 500	- 0.08	- 0.05	290
BZX85C3V9	3.7	3.9	4.1	60	1	< 10	1	< 15	< 500	- 0.07	- 0.02	280
BZX85C4V3	4	4.3	4.6	50	1	< 3	1	< 13	< 500	- 0.05	0.01	250
BZX85C4V7	4.4	4.7	5	45	1	< 3	1	< 13	< 600	- 0.03	0.04	215
BZX85C5V1	4.8	5.1	5.4	45	1	< 1	1.5	< 10	< 500	- 0.01	0.04	200
BZX85C5V6	5.2	5.6	6	45	1	< 1	2	< 7	< 400	0	0.045	190
BZX85C6V2	5.8	6.2	6.6	35	1	< 1	3	< 4	< 300	0.01	0.055	170
BZX85C6V8	6.4	6.8	7.2	35	1	< 1	4	< 3.5	< 300	0.015	0.06	155
BZX85C7V5	7	7.5	7.9	35	0.5	< 1	4.5	< 3	< 200	0.02	0.065	140
BZX85C8V2	7.7	8.2	8.7	25	0.5	< 1	6.2	< 5	< 200	0.03	0.07	130
BZX85C9V1	8.5	9.1	9.6	25	0.5	< 1	6.8	< 5	< 200	0.035	0.075	120

2. LED

Dioda yang paling sering dijumpai dalam keseharian adalah dioda pemancar cahaya, masyarakat lebih mengenal dengan istilah LED (*light-emitting diode*). Piranti ini sangat populer karena memiliki berbagai keunggulan diantaranya: 1) tegangan operasi rendah sehingga hemat daya, 2) umur penggunaan yang panjang (awet/tahan lama), 3) waktu sambung putus (*switching*) yang sangat cepat. Berkat keunggulan-keunggulan tersebut, LED berhasil menggantikan lampu pijar dengan sangat baik bahkan jauh lebih unggul.

Jika sebuah dioda diberi prategangan maju, elektron-elektron bebas di sekitar persambungan akan bergabung kembali dengan *hole* (gambar 2.15). Saat meluruh dari tingkat energi yang lebih tinggi menuju tingkat energi yang lebih rendah, elektron-elektron bebas tersebut akan mengeluarkan energinya (terjadi pembebasan energi) dalam bentuk radiasi. Pada dioda biasa (dioda penyearah), hampir seluruh energi ini dilepaskan dalam bentuk panas, tetapi pada LED sebagian besar dari energi ini dilepaskan dalam bentuk cahaya. Oleh

karena itu, LED dilambangkan seperti gambar 2.15 dengan tanda panah menunjukkan cahaya terpancar.



Gambar 2.15. LED, diagram energi dan lambang LED

Pemasangan LED dalam rangkaian menimbulkan penurunan tegangan maju sekitar 1,5 sampai 2,6 volt tergantung pada arus, warna cahaya, dan toleransi. Namun demikian, untuk analisis dan pemecahan kesulitan secara cepat yang tidak membutuhkan ketelitian tinggi, dapat digunakan harga penurunan sebesar 2 volt.

<p>Contoh soal 2.7. Gambar berikut adalah rangkaian LED dan sebuah hambatan yang dipasang secara seri. Berapakah besarnya arus yang mengalir dalam LED?</p>	
<p>Penyelesaian: Memperhatikan penurunan tegangan maju oleh LED sebesar 2 volt, maka arus yang mengalir melalui LED adalah:</p> $I_{dioda} = \frac{V_{in} - V_K}{R_S + r_B} = \frac{12 \text{ volt} - 0,7 \text{ volt}}{1 \text{ k}\Omega + 20 \Omega} = 11,08 \text{ mA}$	

INDEKS

A

Aplikasi, 98

C

Clamper, 106

Clipper, 105, 106

D

Dioda, 2, 23, 25, 29, 33, 34, 37, 39, 41,
43, 44, 46, 47, 50, 53, 54, 63, 82, 85,
86, 89, 93, 94, 110, 111

H

Hukum Kirchhoff, 84

Hukum Ohm, 84

K

Kurva, 34, 36, 38

P

Penyearah Gelombang, 64

Prategangan, 25, 27, 31, 32

S

Semikonduktor, 15, 16, 17, 19, 21, 112

PROFIL PENULIS



Erawan Kurniadi, S.Si., M.Pd. adalah dosen mata kuliah Elektronika I dan Elektronika II pada program studi pendidikan fisika Universitas PGRI Madiun. Lulus S1 program studi fisika Universitas Brawijaya Malang tahun 1997. Lulus S2 program studi pendidikan sains Universitas Sebelas Maret tahun 2008. Saat ini sedang menempuh studi S3 pendidikan fisika di Universitas Negeri Malang. Pada tahun 2003-2011 menjabat sebagai ketua program studi pendidikan fisika. Pada tahun 2011-2015 menjabat sebagai sekretaris lembaga penjaminan mutu. Saat ini menjabat sebagai kepala Unit Inventarisasi Aset dan Dokumentasi di Universitas PGRI Madiun.



Dr. Jeffry Handhika, M.Pd., M.Si. lahir di Banyuwangi. Menyelesaikan pendidikan di Al-Irsyad Al-Islamiah Banyuwangi, SMP 1 Glagah Banyuwangi, dan SMAN 1 Glagah Banyuwangi. Menyelesaikan program S1 di Universitas Negeri Malang lulus tahun 2006. Program S2 ditempuh pada Universitas Sebelas Maret Program Studi Pendidikan Sains lulus tahun 2008 dan S2 Ilmu Fisika lulus tahun 2012. Program Doktor di tempuh di Program studi pendidikan IPA lulus tahun 2018. Saat ini penulis aktif di sebagai dosen di Program Studi Pendidikan Fisika Universitas PGRI Madiun. Kepakaran dalam bidang pengajaran adalah pembelajaran Fisika dasar, Media Pembelajaran, dan Fisika Kuantum. Penelitian dan publikasi selama 3 tahun terakhir mengarah pada tema pengembangan model, miskonsepsi, dan penggunaan e-learning dalam pembelajaran. Selain aktif di bidang penelitian, penulis juga aktif dalam bidang pengabdian masyarakat. Kegiatan pengabdian masyarakat yang dilakukan berkaitan dengan pembelajaran fisika di sekolah dan workshop media pembelajaran di sekolah. Penulis juga aktif dalam membimbing kegiatan kemahasiswaan seperti Program Kreativitas Mahasiswa, ONMIPA, dan Lomba karya tulis ilmiah.

Google Scholar ID: [zu3MgHIAAAAJ](https://scholar.google.com/citations?user=zu3MgHIAAAAJ); SCOPUS ID: [55668704900](https://orcid.org/0000-0001-9000-0000)