

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 digunakan 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

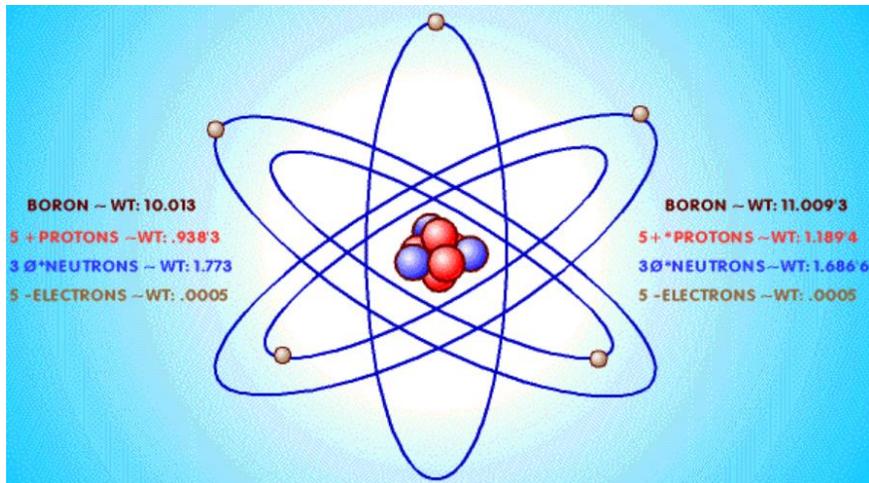
BAB I

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.

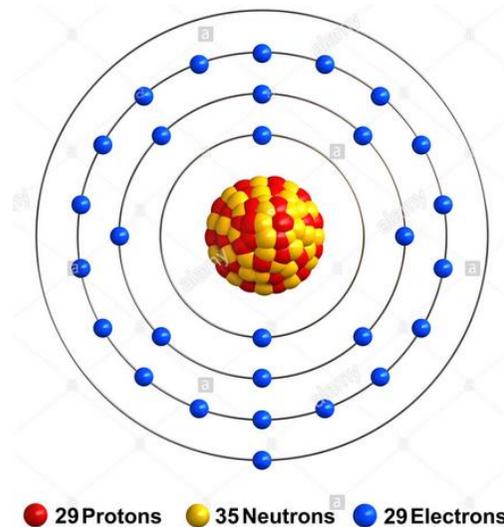
Gaya-gaya dalam sebuah atom membatasi gerak elektron dalam suatu daerah tiga dimensi yang disebut kulit-kulit. Sesuai dengan kenyataan, model atom seharusnya digambarkan dengan pola tiga dimensi. Gambar 1.1 memperlihatkan sebuah atom boron dalam pola tiga dimensi dengan dua elektron berada pada kulit 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)

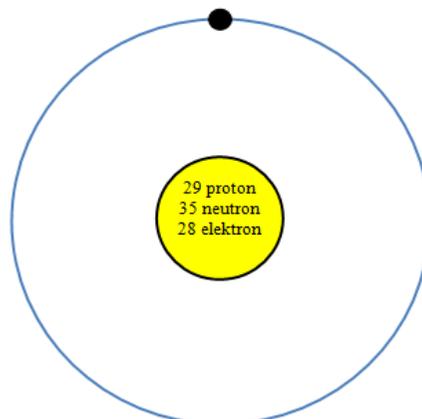
Pola tiga dimensi untuk memodelkan suatu atom akan sangat menyulitkan untuk atom-atom kompleks dengan banyak elektron. Untuk mempermudah penggambaran model atom kompleks digunakan pola dua dimensi. Gambar 1.2 memperlihatkan sebuah atom tembaga dalam pola dua dimensi dengan dua atom pada orbit pertama,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

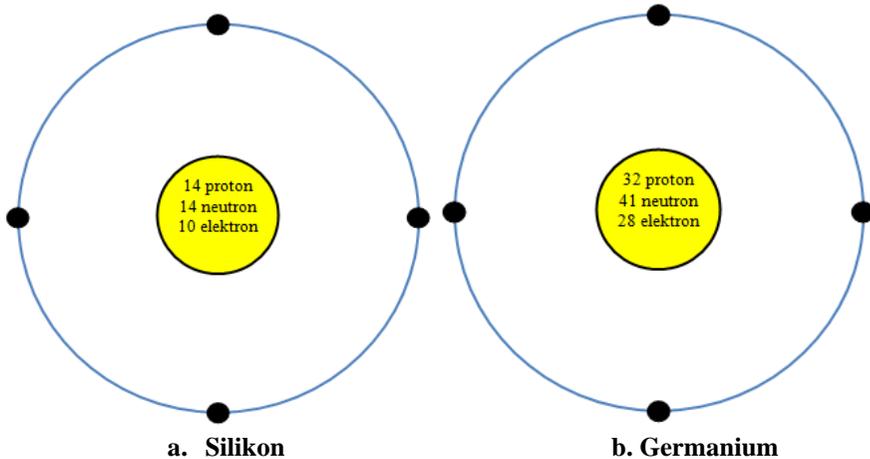
Besar kecilnya daya hantar (konduktivitas) listrik dipengaruhi oleh banyaknya sedikitnya elektron bebas yang dihasilkan. Banyak sedikitnya elektron bebas pada konduktor dipengaruhi oleh jumlah elektron pada lintasan terluar dan seberapa kuat gaya tarik oleh inti atom. Semakin banyak elektron bebas, maka 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).

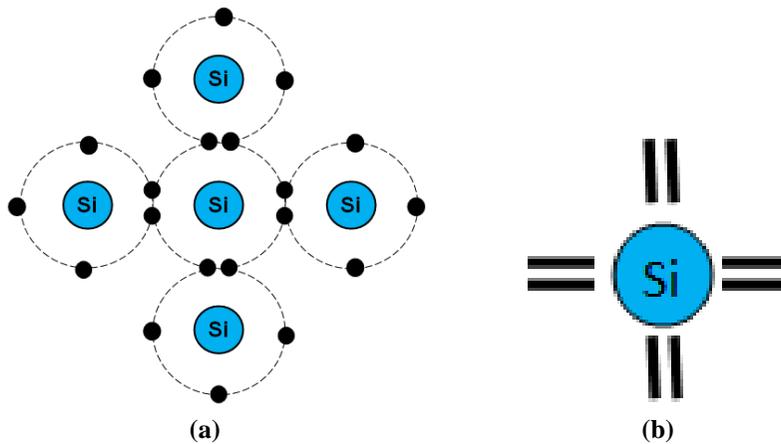


Gambar 1.4. Atom semikonduktor. (a) silikon. (b) germanium

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.

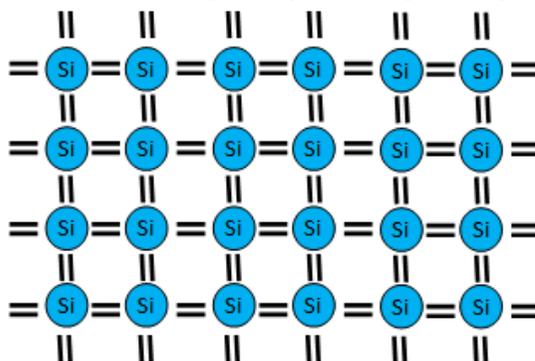
Ikatan bersama antara sebuah atom dengan tetangga terdekatnya disebut sebagai ikatan kovalen. Dalam bahan semikonduktor (contohnya silikon), sebuah atom berikatan bersama dengan empat tetangga terdekatnya (gambar 1.5.a). Masing-masing atom silikon memiliki kerak dengan 14 proton dan 10 elektron di dalamnya (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 memiliki 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.

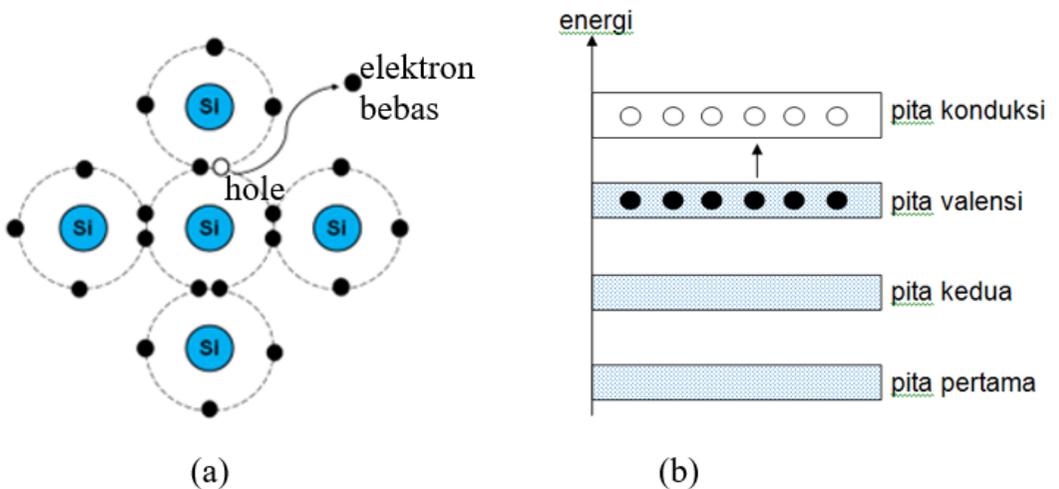
Penggambaran terpadu pola kristal memberikan bentuk keteraturan dan menunjukkan diagram ikatan dalam sebuah kristal silikon (gambar 1.6). Sesuai pola ini, masing-masing atom memiliki 8 elektron yang bergerak pada lintasan valensinya dan menghasilkan stabilitas kimia pada kristal. Lintasan valensi ini 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)



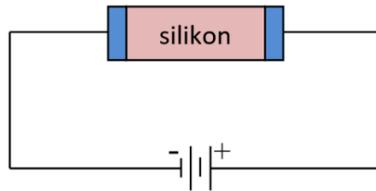
Gambar 1.7. a) Sebuah elektron bebas dan sebuah lubang (hole) terbentuk oleh energi termal., b) Pita energi pada suhu > 0 mutlak

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.

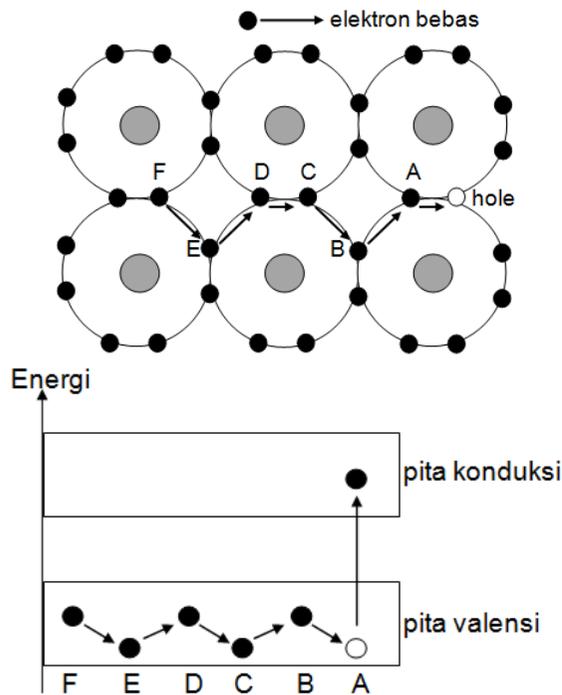
Sebuah eksperimen dengan melibatkan bahan kristal silikon dengan ujung-ujung dilapisi logam dapat menjelaskan konduktivitas bahan semikonduktor. Suatu sumber tegangan luar akan menghasilkan medan listrik diantara kedua ujung kristal tersebut (gambar 1.8). Pada suhu nol mutlak, masing-masing atom penyusun 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.



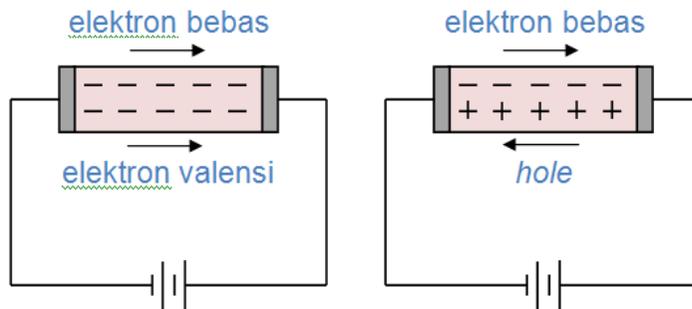
Gambar 1.9. Aliran elektron bebas dan lubang

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.



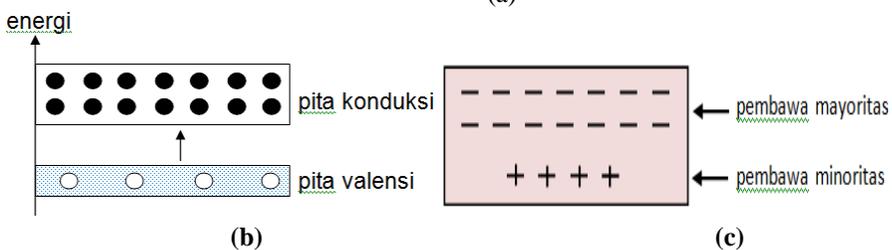
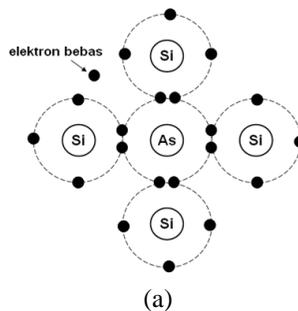
Gambar 1.10. Jejak atomik dalam semikonduktor

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.

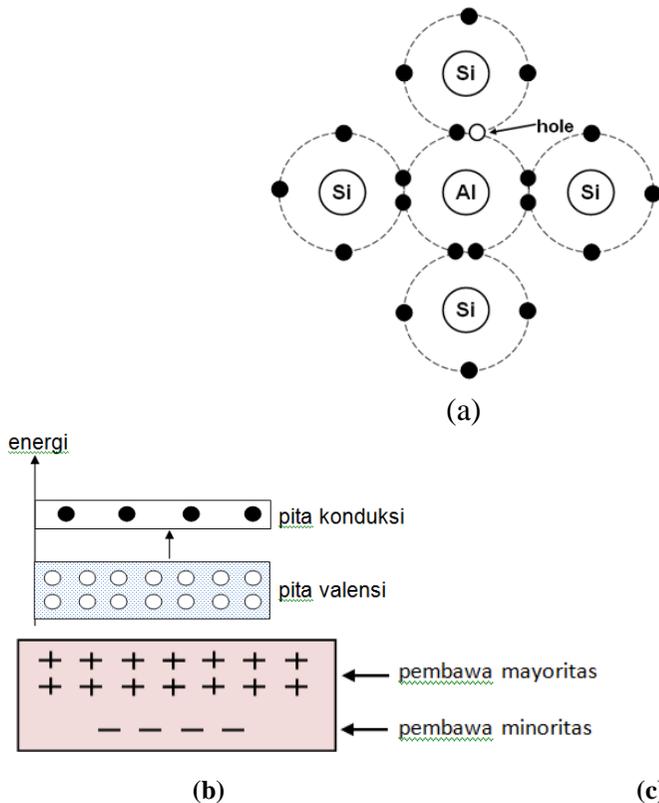
Pencampuran atom-atom bervaleksi lima (contoh: antimonium, arsenikum, dan fosfor) pada lelehan silikon akan menghasilkan ikatan bersama (kovalen) dengan pola tiap 1 atom tak murnian berikatan kovalen dengan 4 atom silikon di dekatnya dan menyisakan/menghasilkan 1 elektron bebas (gambar 1.11.a). Apabila 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

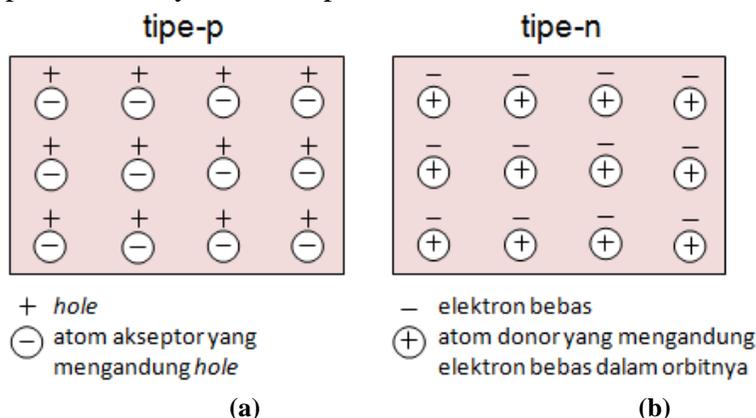
A. SEMIKONDUKTOR TIPE-P DAN TIPE-N

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.

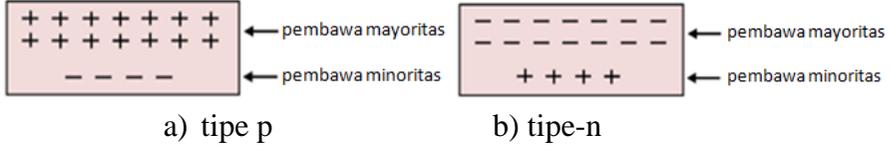


Gambar 2.1. Gambaran atom-atom netral pada: a) bahan tipe-p, dan b) tipe-n

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

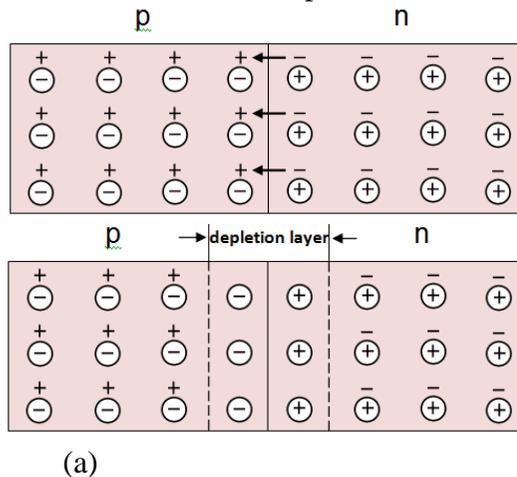
(memiliki jumlah banyak) dan pembawa minoritas (memiliki jumlah sedikit) pada bahan tipe-p. Pada bahan ini pembawa mayoritasnya adalah lubang, sedangkan pembawa minoritasnya adalah elektron bebas.



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.