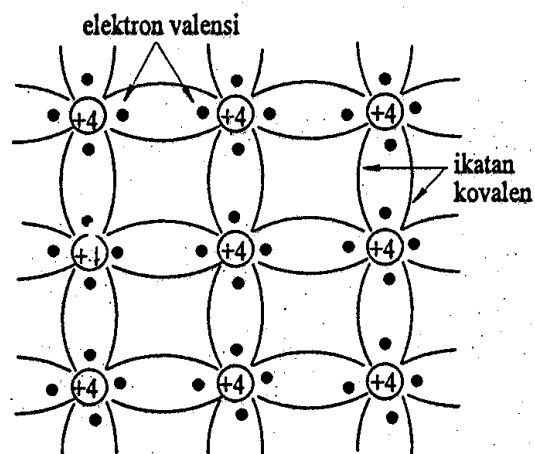


# 6

## BAHAN SEMIKONDUKTOR

### 6.1 Semikonduktor Intrinsik (murni)

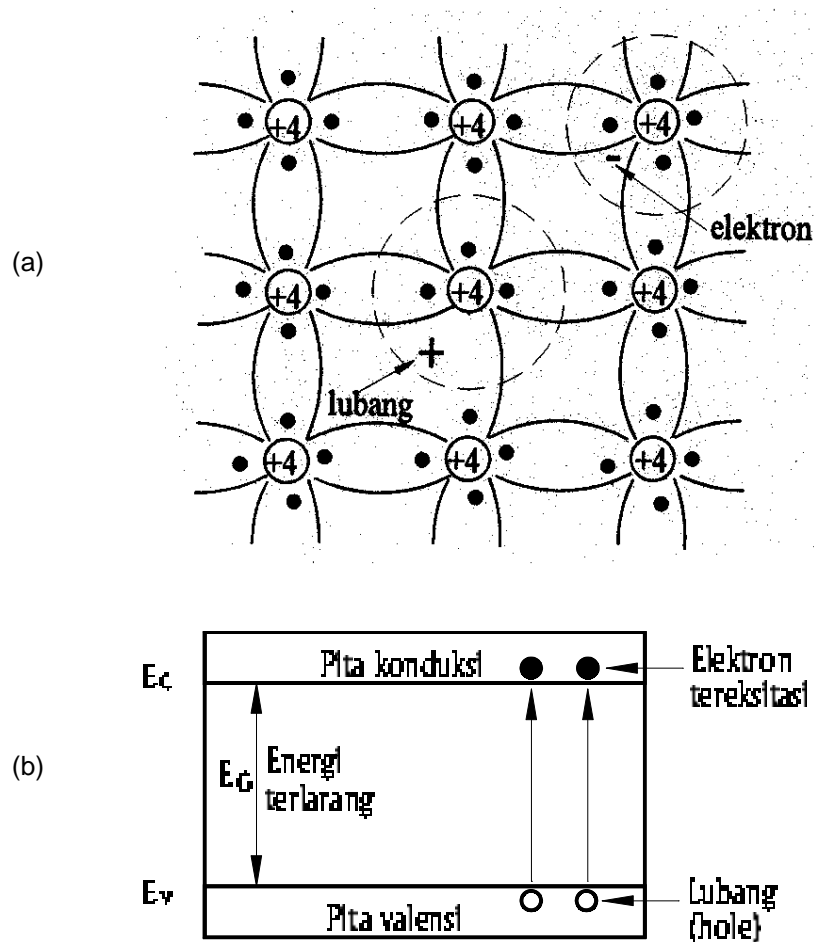
Silikon dan germanium merupakan dua jenis semikonduktor yang sangat penting dalam elektronika. Keduanya terletak pada kolom empat dalam tabel periodik dan mempunyai elektron valensi empat. Struktur kristal silikon dan germanium berbentuk tetrahedral dengan setiap atom memakai bersama sebuah elektron valensi dengan atom-atom tetangganya. Gambar 6.1 memperlihatkan bentuk ikatan kovalen dalam dua dimensi. Pada temperatur mendekati harga nol mutlak, elektron pada kulit terluar terikat dengan erat sehingga tidak terdapat elektron bebas atau silikon bersifat sebagai insulator.



Gambar 6.1 Ikatan kovalen silikon dalam dua dimensi

Energi yang diperlukan untuk memutus sebuah ikatan kovalen adalah sebesar 1,1 eV untuk silikon dan 0,7 eV untuk germanium. Pada temperatur ruang (300K), sejumlah elektron mempunyai energi yang cukup besar untuk melepaskan diri dari

ikatan dan tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi menjadi elektron bebas (gambar 6.2). Besarnya energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron dari pita valensi ke pita konduksi ini disebut energi terlarang (*energy gap*). Jika sebuah ikatan kovalen terputus, maka akan terjadi kekosongan atau lubang (*hole*). Pada daerah dimana terjadi kekosongan akan terdapat kelebihan muatan positif, dan daerah yang ditempati elektron bebas mempunyai kelebihan muatan negatif. Kedua muatan inilah yang memberikan kontribusi adanya aliran listrik pada semikonduktor murni. Jika elektron valensi dari ikatan kovalen yang lain mengisi lubang tersebut, maka akan terjadi lubang baru di tempat yang lain dan seolah-olah sebuah muatan positif bergerak dari lubang yang lama ke lubang baru.



Gambar 6.2 a) Struktur kristal silikon memperlihatkan adanya sebuah ikatan kovalen yang terputus dan b) Diagram pita energi menunjukkan tereksitasinya elektron ke pita konduksi dan meninggalkan lubang di pita valensi

Proses aliran muatan ini, yang biasa disebut sebagai “arus *drift*” dapat dituliskan sebagai berikut

“Peristiwa hantaran listrik pada semikonduktor adalah akibat adanya dua partikel masing-masing bermuatan positif dan negatif yang bergerak dengan arah yang berlawanan akibat adanya pengaruh medan listrik”

Akibat adanya dua pembawa muatan tersebut, besarnya rapat arus dinyatakan sebagai:

$$J = (n\mu_n + p\mu_p)q\mathcal{E} = \sigma\mathcal{E} \quad (6.1)$$

dimana  $n$  dan  $p$  = konsentrasi elektron dan lubang ( $\text{m}^{-3}$ )  
 $\mu_n$  dan  $\mu_p$  = mobilitas elektron dan lubang ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ )  
 $\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)q$  = konduktivitas ( $\text{S cm}^{-1}$ )

Karena timbulnya lubang dan elektron terjadi secara serentak, maka pada semikonduktor murni, jumlah lubang sama dengan jumlah elektron atau dituliskan sebagai

$$n = p = n_i \quad (6.2)$$

dimana  $n_i$  disebut sebagai konsentrasi intrinsik. Beberapa properti dasar silikon dan germanium diperlihatkan pada tabel 6.1.

Tabel 6.1 Beberapa properti dasar silikon dan germanium pada 300 K

Properti	Silikon	Germanium
Energi terlarang/gap (eV)	1,1	0,67
Mobilitas elektron, $\mu_n$ ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	0,135	0,39
Mobilitas lubang, $\mu_p$ ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	0,048	0,19
Konsentrasi intrinsik, $n_i$ ( $\text{m}^{-3}$ )	$1,5 \times 10^{16}$	$2,4 \times 10^{19}$
Resistivitas intrinsik, $\rho_i$ ( $\Omega \text{m}$ )	2300	0,46

## 6.2 Semikonduktor Ekstrinsik (Tak Murni)

Kita dapat memasukkan pengotor berupa atom-atom dari kolom tiga atau lima dalam tabel periodik (memberi doping) ke dalam silikon atau germanium murni (lihat gambar 6.3). Elemen semikonduktor beserta atom pengotor yang biasa digunakan diperlihatkan pada tabel 6.3.

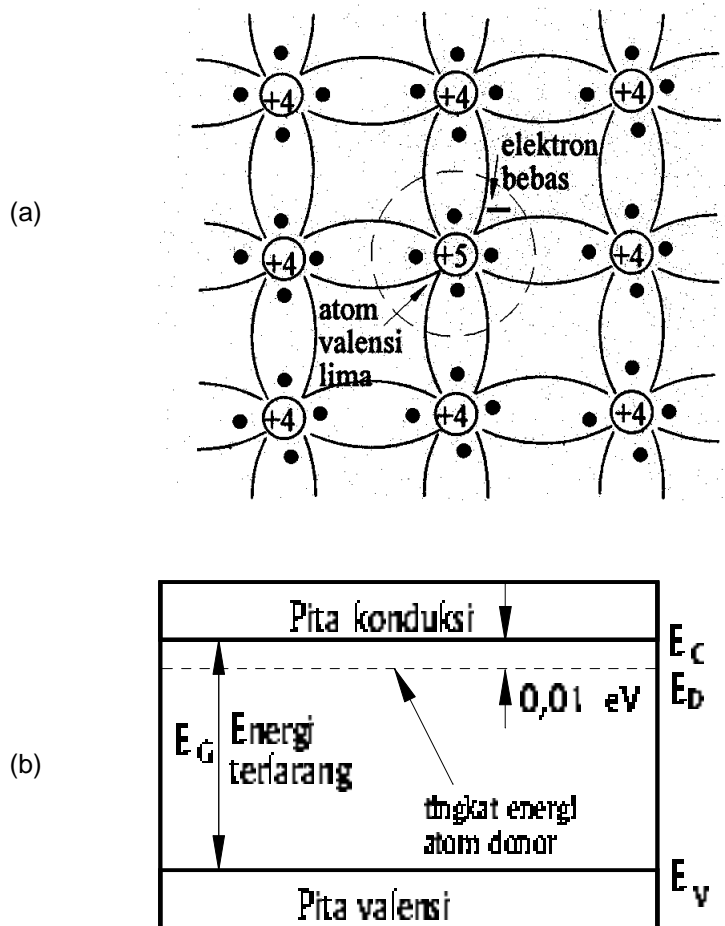
Tabel 6.3 Elemen semikonduktor pada tabel periodik

KOLOM III		KOLOM IV		KOLOM V	
5	<b>B</b> BORON 10,82	6	<b>C</b> CARBON 12,01	7	<b>N</b> NITROGEN 14,008
13	<b>Al</b> ALUMINUM 26,97	14	<b>Si</b> SILICON 28,09	15	<b>P</b> PHOSPHORUS 31,02
31	<b>Ga</b> GALLIUM 69,72	32	<b>Ge</b> GERMANIUM 72,60	33	<b>As</b> ARSENIC 74,91
49	<b>In</b> INDIUM 114,8	50	<b>Sn</b> TIN 118,7	51	<b>Sb</b> ANTIMONY 121,8

### 6.2.1 Semikonduktor tipe-n

Semikonduktor tipe-*n* dapat dibuat dengan menambahkan sejumlah kecil atom pengotor pentavalen (antimony, phosphorus atau arsenic) pada silikon murni. Atom-atom pengotor (dopan) ini mempunyai lima elektron valensi sehingga secara efektif memiliki muatan sebesar  $+5q$ . Saat sebuah atom pentavalen menempati posisi atom silikon dalam kisi kristal, hanya empat elektron valensi yang dapat membentuk ikatan kovalen lengkap, dan tersisa sebuah elektron yang tidak berpasangan (lihat gambar 6.3). Dengan adanya energi thermal yang kecil saja, sisa elektron ini akan menjadi elektron bebas dan siap menjadi pembawa muatan dalam proses hantaran listrik. Material yang dihasilkan dari proses pengotoran ini disebut semikonduktor tipe-*n* karena menghasilkan pembawa muatan negatif dari kristal yang netral. Karena atom pengotor

memberikan elektron, maka atom pengotor ini disebut sebagai atom donor. Secara skematik semikonduktor tipe-*n* digambarkan seperti terlihat pada gambar 6.3.

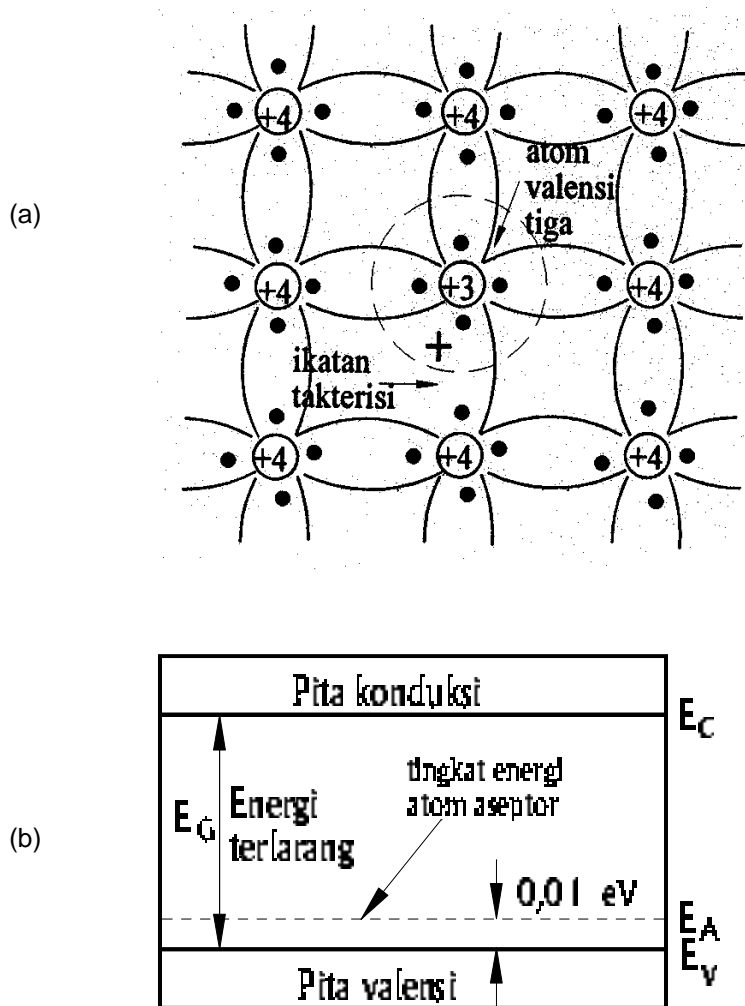


Gambar 6.3 a) Struktur kristal silikon dengan sebuah atom pengotor valensi lima menggantikan posisi salah satu atom silikon dan b) Struktur pita energi semikonduktor tipe-*n*, perhatikan letak tingkat energi atom donor.

### 6.2.2 Semikonduktor tipe-*p*

Dengan cara yang sama seperti pada semikonduktor tipe-*n*, semikonduktor tipe-*p* dapat dibuat dengan menambahkan sejumlah kecil atom pengotor trivalen (aluminium, boron, galium atau indium) pada semikonduktor murni, misalnya silikon murni. Atom-atom pengotor (dopan) ini mempunyai tiga elektron valensi sehingga secara efektif hanya dapat membentuk tiga ikatan kovalen. Saat sebuah atom trivalen menempati posisi atom silikon dalam kisi kristal, terbentuk tiga ikatan kovalen lengkap, dan tersisa

sebuah muatan positif dari atom silikon yang tidak berpasangan (lihat gambar 6.4) yang disebut lubang (*hole*). Material yang dihasilkan dari proses pengotoran ini disebut semikonduktor tipe-*p* karena menghasilkan pembawa muatan negatif pada kristal yang netral. Karena atom pengotor menerima elektron, maka atom pengotor ini disebut sebagai atom aseptor (*acceptor*). Secara skematik semikonduktor tipe-*p* digambarkan seperti terlihat pada gambar 6.4.



Gambar 6.4 a) Struktur kristal silikon dengan sebuah atom pengotor valensi tiga menggantikan posisi salah satu atom silikon dan b) Struktur pita energi semikonduktor tipe-*p*, perhatikan letak tingkat energi atom aseptor.

### 6.3 Generasi dan Rekombinasi

Proses generasi (timbulnya pasangan elektron-lubang per detik per meter kubik) tergantung pada jenis bahan dan temperatur. Energi yang diperlukan untuk proses generasi dinyatakan dalam elektron volt atau eV. Energi dalam bentuk temperatur  $T$  dinyatakan dengan  $kT$ , dimana  $k$  adalah konstanta Boltzmann. Analisa secara statistik menunjukkan bahwa probabilitas sebuah elektron valensi menjadi elektron bebas adalah sebanding dengan  $e^{-eV_G/kT}$ . Jika energi gap  $eV_G$  berharga kecil dan temperatur  $T$  tinggi maka laju generasi termal akan tinggi.

Pada semikonduktor, elektron atau lubang yang bergerak cenderung mengadakan rekombinasi dan menghilang. Laju rekombinasi ( $R$ ), dalam pasangan elektron-lubang per detik per meter kubik, tergantung pada jumlah muatan yang ada. Jika hanya ada sedikit elektron dan lubang maka  $R$  akan berharga rendah; sebaliknya  $R$  akan berharga tinggi jika tersedia elektron dan lubang dalam jumlah yang banyak. Sebagai contoh misalnya pada semikonduktor tipe- $n$ , didalamnya hanya tersedia sedikit lubang tapi terdapat jumlah elektron yang sangat besar sehingga  $R$  akan berharga sangat tinggi. Secara umum dapat dituliskan:

$$R = r n p \quad (6.3)$$

dimana  $r$  menyatakan konstanta proporsionalitas bahan.

Dalam kondisi setimbang, besarnya laju generasi adalah sama dengan besarnya laju rekombinasi. Pada semikonduktor murni (silikon atau germanium) berlaku

$$g = g_i = R_i = r n_i p_i = r n_i^2 \quad (6.4)$$

atau

$$n p = n_i^2 \quad (6.5)$$

atau dengan kata lain perkalian konsentrasi elektron dan lubang menghasilkan suatu konstanta, jika salah satu dinaikkan (melalui proses doping), yang lain harus berkurang.

Jika kita menambahkan atom pengotor pada semikonduktor murni, praktis semua atom donor atau aseptor terionisasi pada suhu ruang. Pada semikonduktor tipe-*n*, konsentrasi atom donor  $N_D \gg n_i$ , dengan konsentrasi elektron sebesar

$$n_n \cong N_D \quad (6.6)$$

Dengan demikian konsentrasi lubang akan menjadi mengecil, yaitu sebesar

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \cong \frac{n_i^2}{N_D} \quad (6.7)$$

Dengan cara yang sama pada semikonduktor tipe-*p* berlaku

$$p_p \cong N_A \quad \text{dan} \quad n_p \cong \frac{n_i^2}{N_A} \quad (6.8)$$

dimana  $p_p$  = konsentrasi lubang pada tipe-*p*

$n_p$  = konsentrasi elektron pada tipe-*p*

$N_A$  = konsentrasi atom aseptor

## 6.4 Difusi

Jika konsentrasi doping tidak merata (*nonuniform*) maka akan didapat konsentrasi partikel yang bermuatan yang tidak merata juga, sehingga kemungkinan terjadi mekanisme gerakan muatan tersebut melalui difusi. Dalam hal ini gerakan partikel harus random dan terdapat gradien konsentrasi. Misalnya konsentrasi elektron pada salah satu sisi bidang lebih besar dibandingkan sisi yang lain, sedangkan elektron bergerak secara random, maka akan terjadi gerakan elektron dari sisi yang lebih padat ke sisi yang kurang padat. Gerakan muatan ini menghasilkan “arus difusi” yang besarnya sebanding dengan gradien konsentrasi  $dn/dx$ . Kerapatan arus difusi karena aliran elektron diberikan oleh



$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (6.9)$$

dimana  $D_n$  = konstanta difusi untuk elektron ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ). Jika  $dn/dx$  berharga positif, gerakan elektron pada arah  $-x$  menghasilkan arus positif pada arah  $+x$ . Dengan cara yang sama untuk lubang diperoleh

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (6.10)$$

Perlu dicatat bahwa masing-masing partikel yang bermuatan bergerak menjauhi bagian yang mempunyai konsentrasi lebih tinggi, namun gerakan tersebut bukan karena adanya gaya tolak. Seperti halnya pada mobilitas, difusi merupakan fenomena statistik sehingga berlaku persamaan Einstein

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{\mu_p}{D_p} = \frac{q}{kT} \quad (6.11)$$