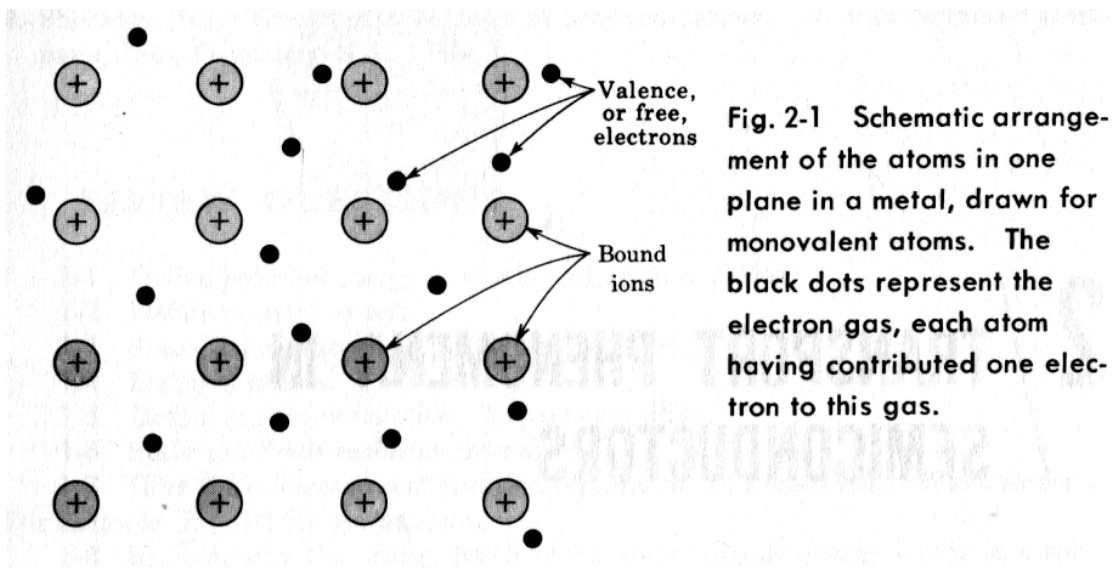


Bagian 2

FENOMENA TRANSPORT PADA SEMIKONDUKTOR

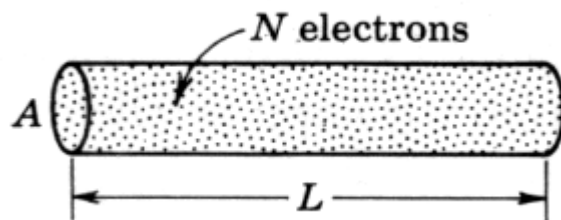
2.1. Mobilitas dan Konduktivitas

- Gambar berikut ini menunjukkan ilustrasi dua dimensi dari distribusi muatan di dalam logam. Lingkaran abu-abu menunjukkan muatan positif yang terdiri atas inti atom dan elektron-elektron dalam. Titik hitam menunjukkan *elektron bebas* (kadang-kadang disebut *gas elektron*).



- Tanpa pengaruh medan listrik luar, elektron-elektron-bebas bergerak secara kontinu hingga *bertumbukan* dengan ion, yang akan mengakibatkan perubahan arah gerak. Jarak rata-rata antara dua tumbukan dinamakan *mean free path*.
- Di dalam gas elektron, *arus rata-rata* bernilai nol, karena elektron bergerak pada arah yang acak.
- Jika pada metal diberikan medan listrik E , elektron akan mendapatkan percepatan ($a = qE/m$) dan kecepatannya akan terus meningkat selama belum bertumbukan dengan ion. Namun jika elektron menumbuk ion, elektron akan kehilangan energinya, dan masuk ke dalam kondisi *steady state* dan mendapatkan kecepatan tertentu yang disebut *kecepatan drift*, yang arahnya berlawanan dengan arah medan listrik. Kecepatan rata-rata elektron dalam keadaan ini :

$$v = \mu E$$
 μ disebut *mobilitas elektron*, dengan satuan : meter/Volt-detik
- Kecepatan *drift steady state* ini menjadi lebih dominan daripada gerakan termal elektron. Gerakan elektron yang terarah ini menghasilkan arus listrik.
- Perhitungan *rapat arus* dapat dilakukan dengan cara sbb. :



- Jumlah elektron yang mengalir per satuan waktu : N/T
- Besarnya arus listrik I (Ampere) :
$$I = \frac{Nq}{T} = \frac{Nqv}{L}$$
 karena L/T adalah v , yaitu *kecepatan rata-rata (kecepatan drift)*
- Rapat arus (*current density*) J (A/m^2) adalah :
$$J = I/A = \frac{Nqv}{LA}$$
- Jika $n = \frac{N}{LA}$ adalah *konsentrasi elektron* (jml. elektron per meter kubik), maka diperoleh : $J = nqv = \rho v$, dengan $\rho \equiv nq$ adalah rapat muatan (C/m^3)
- Nilai ρ dan v tidak konstan, melainkan bervariasi terhadap waktu dan tempat.
- Jika perhitungan dilanjutkan, $J = nqv = nq\mu E = \sigma E$, yang dikenal sebagai hukum Ohm. $\sigma = nq\mu$ adalah *konduktivitas logam* ($ohm\text{-meter}^{-1}$)
- Energi yang diperoleh elektron dari medan listrik E , diserap oleh kisi-kisi ion yang menimbulkan fenomena disipasi energi dalam logam oleh elektron. *Kerapatan daya (Joule heat)* dihitung dengan : $JE = \sigma E^2$ ($Watt/m^3$).

2.2. Elektron dan Hole dalam Semikonduktor Intrinsik

- *Semikonduktor intrinsik* adalah semikonduktor yang dibuat dengan metode khusus untuk meningkatkan kemurniannya setinggi mungkin, sehingga hasilnya bisa dianggap sebagai *semikonduktor murni*.

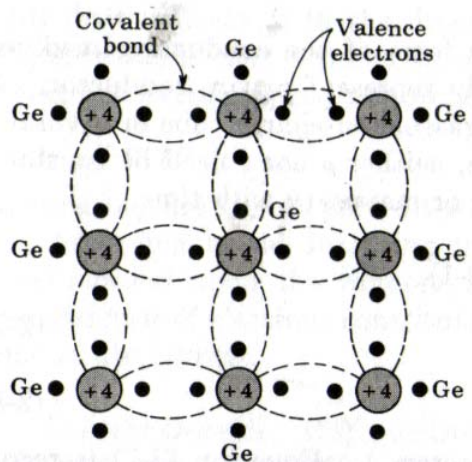


Fig. 2-3 Crystal structure of germanium, illustrated symbolically in two dimensions.

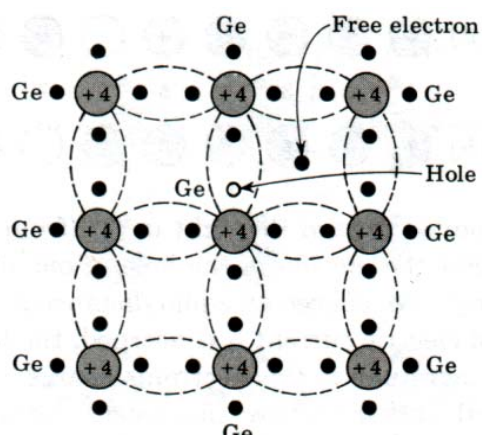


Fig. 2-4 Germanium crystal with a broken covalent bond.

- Pada suhu yang sangat rendah (mis. 0°K) struktur ideal pada gb.2.3 bisa tercapai dan kristal berperilaku seperti *insulator*, karena tidak ada pembawa muatan (*carrier*) yang bergerak bebas.
- Pada suhu kamar (25°C), dengan energi sebesar $0,72 \text{ eV}$ untuk *germanium* dan $1,1 \text{ eV}$ untuk *silikon*, elektron bisa terlepas dari ikatan kovalen (Gb. 24). Elektron tersebut menjadi elektron bebas dan meninggalkan bekas yang disebut *hole*.

Dalam keadaan seperti ini, kristal memiliki kemampuan untuk melakukan konduksi.

Dalam kondisi ini, *jumlah elektron bebas = jumlah hole*.

2.3. Donor dan Akseptor

Jika germanium atau silikon intrinsik diberi tambahan sejumlah kecil atom *trivalen* atau *pentavalen*, maka akan terbentuk *semikonduktor ekstrinsik* (ter-doping, tidak murni).

2.3.a. Donor

- Zat pendoping dengan lima elektron valensi (pentavalen), seperti *antimon*, *fosfor*, dan *arsen* disebut *donor* atau *pendoping tipe-n*. Atom-atom pendoping ini akan menggantikan posisi sejumlah atom asli germanium atau silikon.
- Elektron ke lima dari donor tidak terikat kemanapun dan dapat mengantarkan arus atau melakukan *rekombinasi* dengan *hole semikonduktor intrinsik*.
- Energi yang diperlukan untuk membebaskan elektron ke lima ini dari atom hanya sebesar $0,01 \text{ eV}$ untuk Ge dan $0,05$ untuk Si.
- Penambahan donor akan menambah satu tingkat energi baru di bawah pita konduksi, dengan jarak $0,01 \text{ eV}$ untuk germanium dan $0,05 \text{ eV}$ untuk silikon.

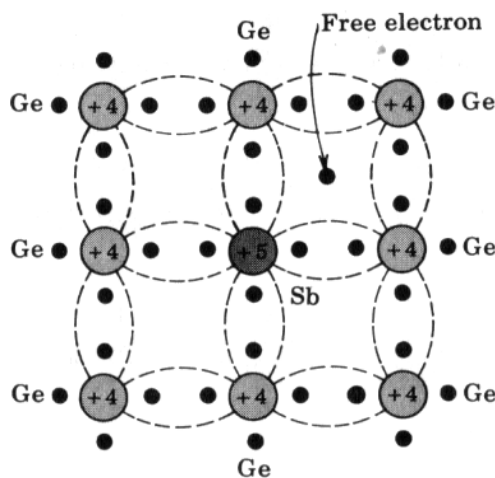


Fig. 2-6 Crystal lattice with a germanium atom displaced by a pentavalent impurity atom.

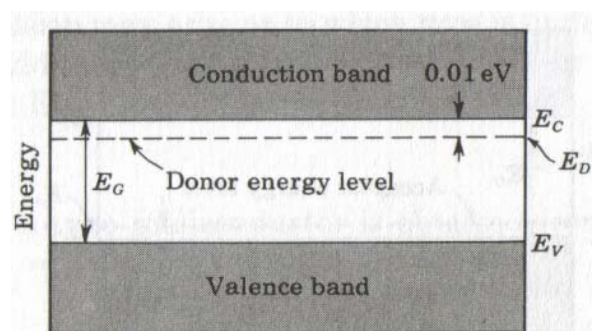


Fig. 2-7 Energy-band diagram of n-type semiconductor.

2.3.a. Akseptor

- Jika semikonduktor intrinsik di-*doping* dengan sejumlah kecil *atom trivalen*, maka setiap atom doping akan berkontribusi tiga elektron dan menyisakan satu *hole* pada ikatan kovalen.

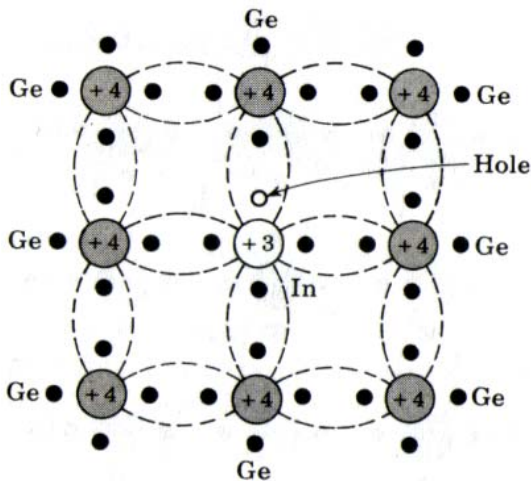


Fig. 2-8 Crystal lattice with a germanium atom displaced by an atom of a trivalent impurity.

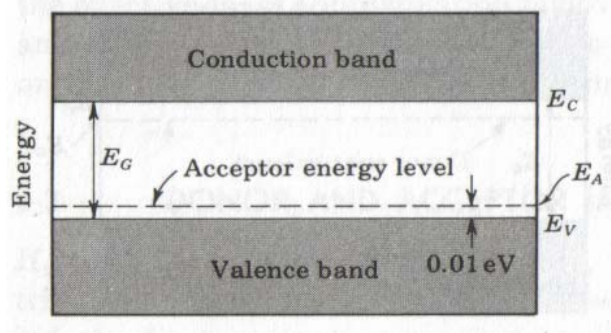


Fig. 2-9 Energy-band diagram of p-type semiconductor.

- Zat pen-*doping* seperti ini disebut *akseptor* atau *ketidakmurnian tipe-p*.
- Jumlah ketidakmurnian yang harus diberikan, untuk menimbulkan efek konduktivitas, relatif sangat kecil. Contoh : ketidakmurnian sebanyak 1 untuk 10^8 germanium pada suhu 30° akan meningkatkan konduktivitas sebesar 12 kali lipat.
- Penambahan akseptor (ketidakmurnian tipe-p) pada semikonduktor intrinsik akan menimbulkan tambahan tingkat energi sedikit di atas pita valensi, seperti pada gambar 2.9 di atas.
- Kecilnya selisih tingkat energi pita valensi dan pita akseptor menyebabkan banyak elektron naik ke pita akseptor, meninggalkan *hole* pada pita valensi, yang menjadi *carrier* terbesar pada semikonduktor.

Hukum Mass-action

Penambahan ketidakmurnian tipe-*n* mengurangi jumlah *hole*. Sebaliknya, *doping* ketidakmurnian tipe-*p* menurunkan konsentrasi elektron bebas pada semikonduktor intrinsik. Analisis teoritis menunjukkan hasil, di mana dalam kesetimbangan termis, hasil kali antara konsentrasi elektron bebas (*n*) dan hole (*p*) adalah *konstan* dan *independen* terhadap jumlah donor dan akseptor. Hubungan seperti ini dinamakan *hukum mass-action*, yang diekspresikan sbb. :

$$np = n_i^2 \quad (2.10)$$

Konsentrasi intrinsik n_i merupakan fungsi temperatur.

Kesimpulan penting : pemberian *doping* pada semikonduktorn intrinsik tidak hanya meningkatkan konduktivitas, tetapi juga menghasilkan konduktor, dengan *carrier* dominan elektron maupun *hole*.

Pada semikonduktor tipe-*n*, elektron merupakan *majority carrier* dan *hole* merupakan *minority carrier*.