

BAB VIII

KRISTAL SEMIKONDUKTOR

Indikator :

1. Dapat membedakan jenis semikonduktor
2. Dapat menghitung konsentrasi elektron dan konsentrasi hole semikonduktor
3. Dapat membedakan antara elektron dengan hole

I. Pendahuluan

Semikonduktor merupakan bahan dengan konduktivitas listrik yang berada diantara isolator dan konduktor. Disebut semi atau setengah konduktor, karena bahan ini memang bukan konduktor murni. Semikonduktor, umumnya diklasifikasikan berdasarkan harga resistivitas listriknya pada suhu kamar, yakni dalam rentang 10^{-2} - $10^9 \Omega\text{cm}$. Sebuah semikonduktor akan bersifat sebagai isolator pada temperatur yang sangat rendah, namun pada temperatur ruang akan bersifat sebagai konduktor.

Semikonduktor sangat berguna dalam bidang elektronik, karena konduktivitasnya dapat diubah-ubah dengan menyuntikkan materi lain (biasa disebut doping). Semikonduktor merupakan elemen dasar dari komponen elektronika seperti dioda, transistor dan IC (*integrated circuit*). Semikonduktor sangat luas pemakaiannya, terutama sejak ditemukannya transistor pada akhir tahun 1940-an. Oleh karena itu semikonduktor dipelajari secara intensif dalam fisika zat padat. Namun dalam makalah ini hanya dibahas sifat fisis dasar semikonduktor saja.

Dalam menyajikan sifat fisis dasar semikonduktor, makalah ini membahas rapat elektron dan hole, yakni partikel pembawa muatan dalam semikonduktor. Makalah ini juga membahas pengaruh ketakmurnian pada rapat elektron dan hole.

Bahan semikonduktor yang banyak dikenal contohnya adalah silikon (Si), germanium (Ge) dan Galium Arsenida (GaAs). Germanium dahulu adalah bahan satu-satunya yang dikenal untuk membuat komponen semikonduktor. Namun belakangan, Silikon menjadi populer setelah ditemukan cara mengekstrak bahan

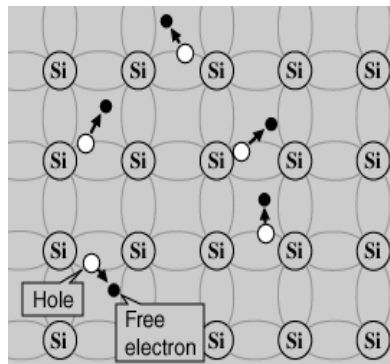
ini dari alam. Silikon merupakan bahan terbanyak ke-dua yang ada di bumi setelah oksigen (O_2). Pasir, kaca dan batu-batuan lain adalah bahan alam yang banyak mengandung unsur silikon.

II. Klasifikasi Semikonduktor

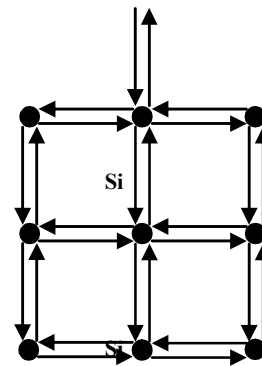
Berdasarkan murni atau tidak murninya bahan, semikonduktor dibedakan menjadi dua jenis, yaitu semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik.

1. Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik merupakan semikonduktor yang terdiri atas satu unsur saja, misalnya Si saja atau Ge saja. Pada kristal semikonduktor Si, 1 atom Si yang memiliki 4 elektron valensi berikatan dengan 4 atom Si lainnya, perhatikan gambar 1.



Gambar 1.a
Struktur kristal 2 dimensi kristal Si



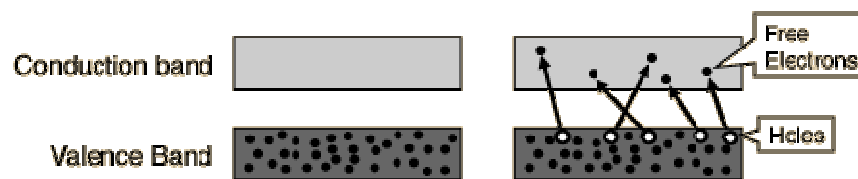
Gambar 1.b
Ikatan kovalen pada semikonduktor intrinsik (Si)

Pada kristal semikonduktor intrinsik Si, sel primitifnya berbentuk kubus. Ikatan yang terjadi antar atom Si yang berdekatan adalah ikatan kovalen. Hal ini disebabkan karena adanya pemakaian 1 buah elektron bersama (\longleftrightarrow) oleh dua atom Si yang berdekatan.

Menurut teori pita energi, pada $T = 0$ K pita valensi semikonduktor terisi penuh elektron, sedangkan pita konduksi kosong. Kedua pita tersebut dipisahkan oleh celah energi kecil, yakni dalam rentang 0,18 - 3,7

eV. Pada suhu kamar Si dan Ge masing-masing memiliki celah energi 1,11 eV dan 0,66 eV.

Bila mendapat cukup energi, misalnya berasal dari energi panas, elektron dapat melepaskan diri dari ikatan kovalen dan tereksitasi menyebrangi celah energi. Elektron valensi pada atom Ge lebih mudah tereksitasi menjadi elektron bebas daripada elektron valensi pada atom Si, karena celah energi Si lebih besar dari pada celah energi Ge. Elektron ini bebas bergerak diantara atom. Sedangkan tempat kekosongan elektron disebut hole. Dengan demikian *dasar pita konduksi dihuni oleh elektron, dan puncak pita valensi dihuni hole*. Sekarang, kedua pita terisi sebagian, dan dapat menimbulkan arus netto bila dikenakan medan listrik.



Gambar 2

Elektron dapat menyebrangi celah energi menuju pita konduksi sehingga menimbulkan hole pada pita valensi

2. Semikonduktor Ekstrinsik

Semikonduktor yang telah terkotori (tidak murni lagi) oleh atom dari jenis lainnya dinamakan semikonduktor ekstrinsik. Proses penambahan atom pengotor pada semikonduktor murni disebut pengotoran (doping). Dengan menambahkan atom pengotor (impurities), struktur pita dan resistivitasnya akan berubah.

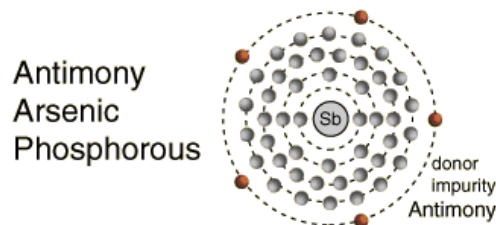
Ketidakh murnian dalam semikonduktor dapat menyumbangkan elektron maupun hole dalam pita energi. Dengan demikian, konsentrasi elektron dapat menjadi tidak sama dengan konsentrasi hole, namun masing-masing bergantung pada konsentrasi dan jenis bahan ketidakh murnian.

Dalam aplikasi terkadang hanya diperlukan bahan dengan pembawa muatan elektron saja, atau hole saja. Hal ini dilakukan dengan doping ketidakmurnian ke dalam semikonduktor.

Terdapat tiga jenis semikonduktor ekstrinsik yaitu semikonduktor tipe-n, semikonduktor tipe-p, dan semikonduktor paduan.

Semikonduktor Ekstrinsik Tipe-n

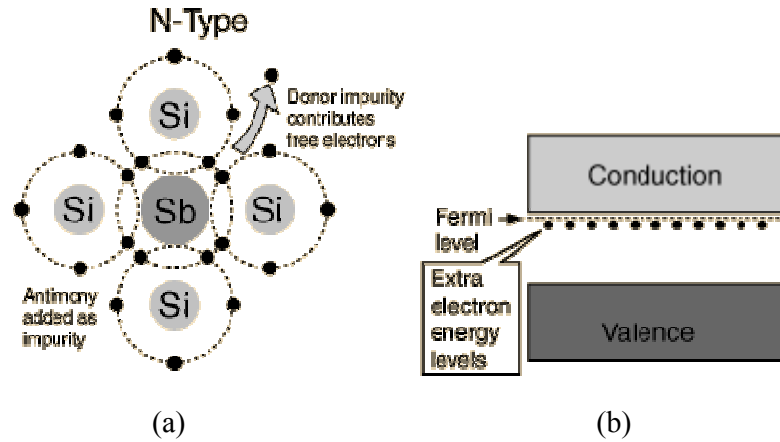
Semikonduktor dengan konsentrasi elektron lebih besar dibandingkan konsentrasi hole disebut semikonduktor ekstrinsik tipe-n. Semikonduktor tipe-n menggunakan semikonduktor intrinsik dengan menambahkan atom donor yang berasal dari kelompok V pada susunan berkala, misalnya Ar (arsenic), Sb (Antimony), phosphorus (P). Atom campuran ini akan menempati lokasi atom intrinsik didalam kisi kristal semikonduktor.



Gambar 3

Atom pengotor untuk menghasilkan semikonduktor ekstrinsik tipe-n

Konsentrasi elektron pada Si dan Ge dapat dinaikkan dengan proses doping unsur valensi 5. Sisa satu elektron akan menjadi elektron bebas, jika mendapatkan energi yang relatif kecil saja (disebut sebagai energi ionisasi). Elektron ini akan menambah konsentrasi elektron pada pita konduksi. Elektron yang meninggalkan atom pengotor yang menjadi ion disebut dengan elektron ekstrinsik. Keberadaan impuriti donor digambarkan dengan keadaan diskrit pada energi gap pada posisi didekat pita konduksi.



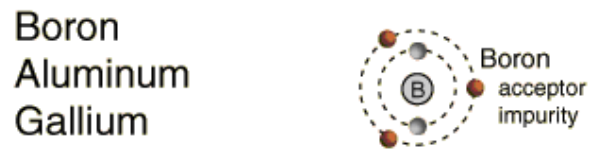
Gambar 4
 (a) Kristal semikonduktor ekstrinsik tipe-n dua dimensi
 (b) Pita energi semikonduktor ekstrinsik tipe-n

Penambahan atom donor telah menambah level energi pada pita konduksi yang berada diatas energi gap sehingga mempermudah elektron untuk menyebrang ke pita konduksi.

Pada suhu kamar sebagian besar atom donor terionisasi dan elektronnya tereksitasi ke dalam pita konduksi. Sehingga jumlah elektron bebas (elektron intrinsik dan elektron ekstrinsik) pada semikonduktor tipe-n jauh lebih besar dari pada jumlah hole (hole intrinsik). Oleh sebab itu, elektron di dalam semikonduktor tipe-n disebut pembawa muatan mayoritas, dan hole disebut sebagai pembawa muatan minoritas.

Semikonduktor Ekstrinsik Tipe-p

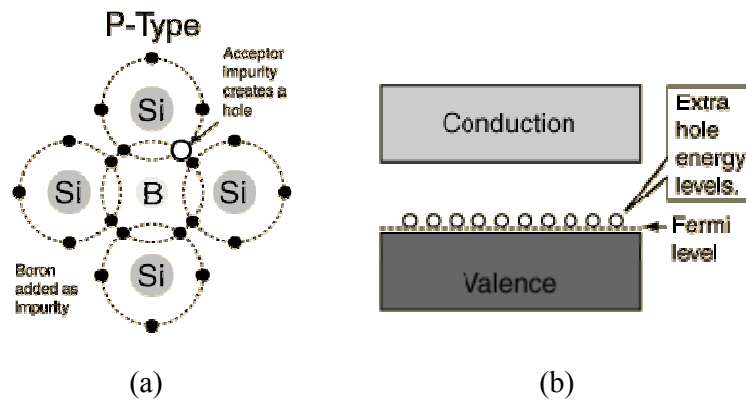
Semikonduktor tipe-p, dimana konsentrasi lubang lebih tinggi dibandingkan elektron, dapat diperoleh dengan menambahkan atom akseptor. Pada Si dan Ge, atomnya aseptor adalah unsur bervalensi tiga (kelompok III pada susunan berkala) misalnya B (boron), Al (aluminium), atau Ga (galium).



Gambar 5

Atom pengotor untuk menghasilkan semikonduktor ekstrinsik tipe-p

Karena unsur tersebut hanya memiliki tiga elektron valensi, maka terdapat satu kekosongan untuk membentuk ikatan kovalen dengan atom induknya. Atom tersebut akan mengikat elektron dari pita valensi yang berpindah ke pita konduksi. Dengan penangkapan sebuah elektron tersebut, atom akseptor akan menjadi ion negatif. Atom akseptor akan menempati keadaan energi dalam energi gap di dekat pita valensi.



Gambar 6

(a) Kristal semikonduktor ekstrinsik tipe-p dalam dua dimensi

(b) Pita energi semikonduktor ekstrinsik tipe-p

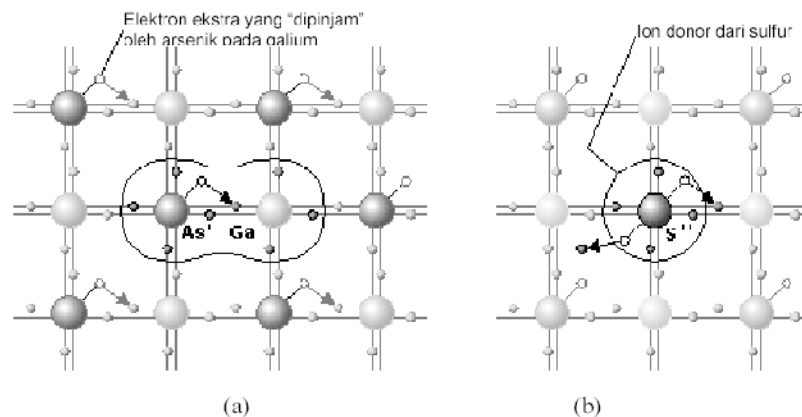
Pada semikonduktor tipe-p, atom dari golongan III dalam sistem periodik unsur misalnya Ga, dibubuhkan kedalam kristal semikonduktor intrinsik. Oleh karena galium termasuk golongan III dalam sistem periodik unsur, atom Ga memiliki tiga buah elektron valensi. Akibatnya, dalam berikatan dengan atom silikon di dalam kristal, Ga memerlukan satu elektron lagi untuk berpasangan dengan atom Si. Oleh sebab itu atom Ga

mudah menangkap elektron, sehingga disebut akseptor. Jika ini terjadi atom akseptor menjadi kelebihan elektron sehingga menjadi bermuatan negatif. Dalam hal ini dikatakan atom akseptor terionkan. Ion akseptor ini mempunyai muatan tak bebas, oleh karena tak bergerak dibawah medan listrik luar. Ion Si yang elektronnya ditangkap oleh atom akseptor terbentuk menjadi lubang, yang disebut lubang ekstrinsik.

Jelaslah bahwa pada semikonduktor tipe-p, lubang merupakan pembawa muatan yang utama, sehingga disebut pembawa muatan mayoritas. Disini elektron bebas merupakan pembawa muatan minoritas.

Semikonduktor Paduan

Semikonduktor paduan (*compound semiconductor*) dapat diperoleh dari unsur valensi tiga dan valensi lima (paduan III-V, misalnya GaAs atau GaSb) atau dari unsur valensi dua dan valensi enam (paduan II-VI, misalnya ZnS). Ikatan kimia terbentuk dengan peminjaman elektron oleh unsur dengan valensi lebih tinggi kepada unsur dengan valensi lebih rendah (lihat gambar 1.6). Atom donor pada semikonduktor paduan adalah unsur dengan valensi lebih tinggi dibandingkan dengan unsur yang diganti. Atom akseptor adalah unsur dengan valensi lebih rendah dibandingkan dengan unsur yang diganti (ditempati).



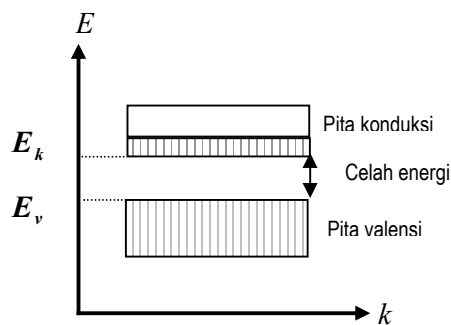
Gambar 7

- (a) Kristal semikonduktor paduan GaAs dalam dua dimensi
- (b) Kristal semikonduktor paduan GaAs tipe-n dua dimensi

III. Mengukur Celah Energi (E_g) dengan Metode Optik

Sifat konduktivitas dan konsentrasi ditentukan oleh faktor $\frac{E_g}{K_B T}$, perbandingan celah energi dengan temperatur. Ketika perbandingan ini besar, konsentrasi sifat instrinsik akan rendah dan konduktivitasnya juga akan rendah. Nilai terbaik dari celah energi diperoleh dari penyerapan optik. Celah energi (E_g) merupakan selisih antara energi terendah pada pita konduksi (E_k) dengan energi tertinggi pada pita valensi (E_v). Atau secara matematis dapat ditulis:

$$E_g = E_k - E_v \quad (1)$$



Gambar 8
Pita Energi pada Semikonduktor

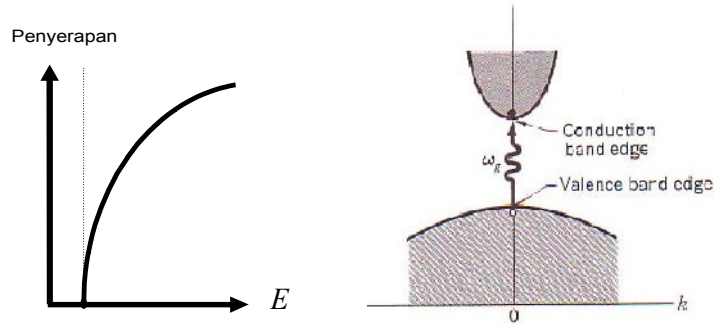
Untuk mengukur besarnya celah energi (E_g) dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu penerapan langsung dan penyerapan tidak langsung.

1. Penyerapan Langsung

Pada penyerapan langsung ini, elektron mengabsorpsi foton dan langsung meloncat ke dalam pita konduksi. Besarnya celah energi (E_g) sama dengan besarnya energi foton (gelombang elektromagnetik). Secara matematis dapat dituliskan

$$E = \hbar\omega = E_g \quad (2)$$

Dimana ω merupakan frekuensi angular dari foton (gelombang ektromagnetik). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dari diagram berikut.



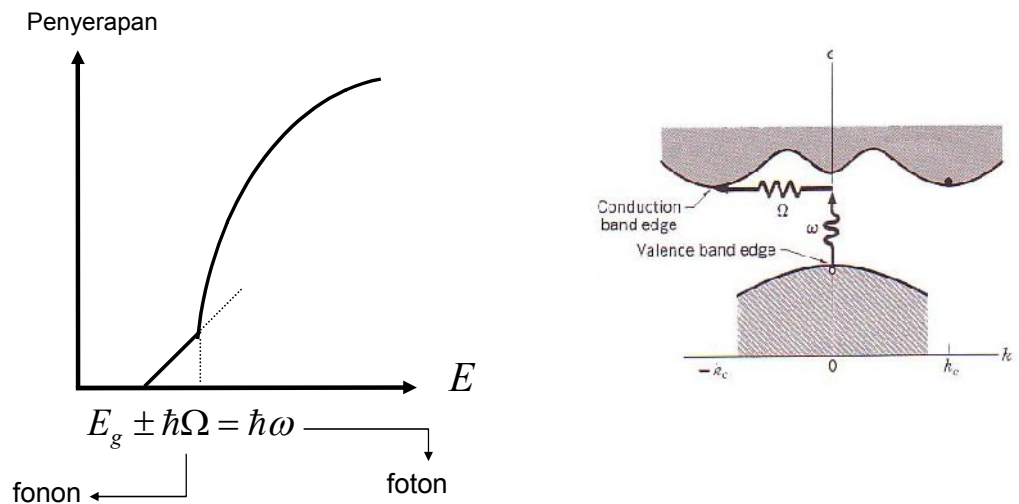
Gambar 9
Penyerapan Langsung

2. Penyerapan Tidak Langsung

Pada penyerapan tidak langsung, elektron mengabsorpsi foton sekaligus fonon. Proses ini memenuhi hukum kekekalan energi. Sehingga selain energi foton (partikel dalam gelombang elektromagnetik) terdapat juga fonon (partikel dalam gelombang elastik) yang dipancarkan maupun diserap, dapat ditulis

$$E_g \pm \hbar\Omega = \hbar\omega \quad (3)$$

Dimana tanda \pm menunjukkan bahwa dalam proses penyerapan tidak langsung ini keberadaan fonon ada yang dipancarkan (+) atau diserap (-). Jika digambarkan, akan diperoleh gambar sebagai berikut.



Gambar 10
Penentuan celah energi dengan penyerapan tidak langsung

IV. Persamaan Gerak Elektron dalam Sebuah Pita Energi

Sekarang kita akan menentukan persamaan gerak untuk sebuah elektron dalam pita energi. Kecepatan kelompok untuk beberapa fungsi gelombang dengan vektor gelombang k adalah :

$$V_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (4)$$

dengan ω merupakan frekuensi sudut. Jika frekuensi sudut ini dihubungkan dengan energi dari fungsi gelombang ϵ adalah $\omega = \frac{\epsilon}{\hbar}$. Dengan mensubstitusi

$\omega = \frac{\epsilon}{\hbar}$ kedalam persamaan untuk kecepatan grup maka akan diperoleh:

$$V_g = \frac{1}{\hbar} \nabla E(k) \text{ atau}$$

$$V_g = \frac{d}{dk}(\omega) = \frac{d}{dk}\left(\frac{\epsilon}{\hbar}\right) = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dk}(\epsilon) \quad (5)$$

Pengaruh kristal di dalam gerak elektron diberikan dalam hubungan dispersi $\epsilon(k)$. Usaha yang dilakukan oleh medan listrik pada elektron adalah:

$$\delta \epsilon = F \cdot x = -e E v_g \delta t \quad (6)$$

Pada saat belajar Matematika Fisika, kita mengetahui bahwa $\delta \epsilon$ dapat ditulis dalam bentuk

$$\frac{\delta \epsilon}{\delta k} = \frac{d \epsilon}{d k} \text{ atau}$$

$$\delta \epsilon = \frac{d \epsilon}{d k} \delta k \quad (7)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 5) ke persamaan 6), maka kita mendapatkan

$$\frac{d \epsilon}{d k} = V_g \hbar$$

$$\delta \epsilon = \hbar V_g \delta k \quad (8)$$

Dengan membandingkan persamaan 6) dan persamaan 8) maka

$$\frac{\delta \epsilon}{\delta k} = \frac{-e \vec{E} V_g \delta t}{\hbar V_g \delta k}$$

Maka $\hbar \frac{\delta k}{\delta t} = \hbar \frac{dk}{dt} = -eE$ atau

$$\delta k = -\frac{eE}{\hbar} \delta t \quad (9)$$

Persamaan 9) diatas merupakan persamaan untuk gaya listrik yang dialami oleh elektron karena berada dalam medan listrik E . Akhirnya diperoleh:

$$\vec{F} = \hbar \frac{dk}{dt} \quad (10)$$

Iniilah persamaan gerak elektron dalam pita energi.

V. Massa Efektif

Pada pembahasan sebelumnya, kita telah mengetahui persamaan gerak elektron dalam pita energi dan kecepatan grup yang dihubungkan dengan energi. Sekarang kita akan mengetahui berapa besarnya massa efektif. Massa efektif elektron merupakan massa elektron dalam pita energi ketika mengalami gaya atau percepatan. Besarnya massa efektif elektron ditentukan dari persamaan gerak yang telah dibahas sebelumnya. Adapun langkah-langkah menentukan besarnya massa efektif adalah sebagai berikut.

Dari persamaan sebelumnya kita tahu bahwa perumusan untuk kecepatan elektron adalah

$$V_g = \frac{d}{dk}(\omega) = \frac{d}{dk} \left(\frac{\epsilon}{\hbar} \right) = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dk}(\epsilon) \quad (11)$$

Apabila kecepatan grup ini kita turunkan terhadap waktu, maka akan kita peroleh

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2 \epsilon}{dk dt} \quad (12)$$

Atau dapat dituliskan dalam bentuk

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2 \epsilon}{dk^2} \frac{dk}{dt} \quad (13)$$

Dari persamaan gerak kita ketahui bahwa

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\vec{F}}{\hbar} \quad (14)$$

Dengan mensubstitusi persamaan gerak ini ke persamaan sebelumnya, sehingga diperoleh

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2 \epsilon}{dk^2} F$$

atau dapat ditulis menjadi

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 \epsilon}{dk^2} F \quad (15)$$

Dari persamaan ini, ruas kiri merupakan percepatan, dan ruas kanan merupakan sesuatu dikalikan gaya F . Berdasarkan hukum II Newton kita ketahui bahwa:

$$F = ma \text{ atau } a = \frac{F}{m}$$

Sehingga dari persamaan tersebut didefinisikanlah massa efektif yang besarnya

$$m^* = \hbar^2 \frac{1}{\frac{d^2 \epsilon}{dk^2}} \quad (16)$$

Inilah persamaan yang menunjukkan definisi massa efektif.

VI. Perbedaan Elektron dan Hole

Keadaan orbital kosong dalam sebuah pita yang terisi dan keadaan elektron pada zat padat adalah penting. Orbital kosong dalam sebuah pita dikenal dengan nama hole. Hole dalam medan listrik dan medan magnet mempunyai harga positif $+e$. Alasannya ada dalam lima tahap berikut yang sekaligus menjadi pembeda antara elektron dan hole:

1. $k_h = -k_e$

Vektor gelombang total untuk elektron dalam pita yang terisi adalah nol : $\sum k = 0$. Kesimpulan ini diambil dari simetri daerah Brillouin: setiap tipe kisi dasar adalah simetri pada $r \rightarrow -r$ untuk kebanyakan kisi. Hal itu berdasarkan daerah Brillouin. Jika pita terisi oleh

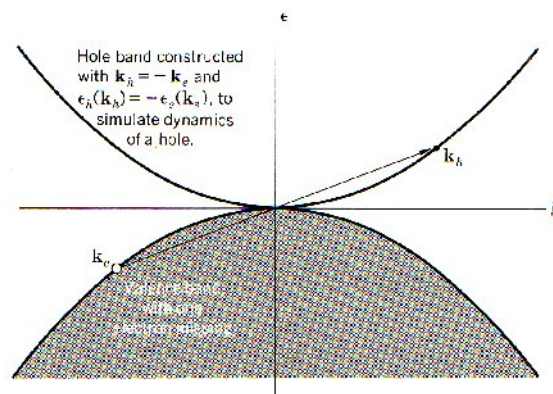
semua pasangan orbital k dan $-k$, maka total vektor gelombang adalah nol. Jika elektron hilang dari sebuah orbital vektor gelombang k_e , total vektor gelombang dari sistem adalah $-k_e$ dan ditandai dengan munculnya hole. Hasil yang mengherankan: elektron yang hilang dari posisi hole selalu menunjukkan keadaan di k_e . Tapi vektor gelombang yang benar k_h dari hole adalah $-k_e$. Hole adalah salah satu gambaran sebuah pita yang kehilangan satu elektron, kita dapat mengatakan hole memiliki vektor gelombang $-k_e$, atau pita yang kehilangan satu elektron vektor gelombang totalnya $-k_e$.

$$2. \epsilon_h(k_h) = -\epsilon_e(k_e)$$

Energi dari hole berlawanan tanda dengan energi elektron yang hilang, karena itu diambil dari kerja untuk memindahkan sebuah elektron dari orbital rendah ke orbital tinggi. Jika pitanya simetri, maka $\epsilon_e(k_e) = \epsilon(-k_e) = -\epsilon_h(-k_e) = -\epsilon_h(k_e)$. Jika digambarkan akan terlihat sebuah skema pita energi yang menggambarkan hole.

$$3. v_h = v_e$$

Kecepatan hole sama dengan kecepatan elektron yang hilang. Dari gambar 11 kita lihat $\nabla \epsilon_h(k_h) = \nabla \epsilon_e(k_e)$, jadi $v_h(k_h) = v_e(k_e)$.



Gambar 11

4. $m_h = -m_e$

Massa efektif berbanding terbalik dengan kemiringan kurva $d^2 \epsilon / dk^2$, dan untuk pita hole berlawanan tanda dengan elektron pada pita valensi. Di bagian atas dekat pita valensi m_e adalah negatif, jadi m_h adalah positif.

$$\left. \begin{aligned} 5. \quad \hbar \frac{d\vec{K}_h}{dt} = \vec{F}_h &= e(E + \frac{1}{c} V_h \times B) \\ \hbar \frac{d\vec{K}_e}{dt} = \vec{F}_e &= -e(E + \frac{1}{c} V_e \times B) \end{aligned} \right\} \vec{F}_h = -\vec{F}_e$$

Hal ini terkait dengan gaya yang dialami oleh elektron dan hole yang berada dalam pengaruh medan listrik dan medan magnet.

VII. Konsentrasi Pembawa dalam Semikonduktor Intrinsik

Dalam semikonduktor μ disebut tingkat Fermi. Pada temperatur tinggi kita bisa mendapatkan pita konduksi dari semikonduktor $e-\mu \gg k_B T$, dan fungsi distribusi fermi Dirac, dapat ditulis

$$f \approx e^{(\mu-\epsilon)/k_B T} \tag{17}$$

Berlaku ketika $f \ll 1$. Energi elektron di pita konduksi adalah:

$$\epsilon_K = E_g + \hbar^2 k^2 / 2m_e \tag{18}$$

dimana m_e adalah massa efektif elektron, maka rapat orbital di ϵ adalah

$$D\epsilon(\epsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (\epsilon - E_g)^{1/2} \tag{19}$$

Konsentrasi elektron dalam pita konduksi adalah

$$n = \int_{E_g}^{\infty} D_e(\epsilon) f_e(\epsilon) d\epsilon = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\mu - k_B T} \int_{E_g}^{\infty} (\epsilon - E_g)^{1/2} e^{-\epsilon/k_B T} d\epsilon \tag{20}$$

Dengan hasil integral

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{(\mu - k_B T)/k_B T} \tag{21}$$

Ini berfungsi untuk menghitung konsentrasi keseimbangan hole p. Fungsi distribusi f_h untuk hole berhubungan dengan fungsi distribusi elektron f_e dengan $f_h = 1 - f_{es}$ yaitu

$$f_h = 1 - \frac{1}{e^{(\epsilon - \mu)/k_B T} + 1} = \frac{1}{e^{(\epsilon - \mu)/k_B T} + 1} \cong e^{(\epsilon - \mu)/k_B T} \quad (22)$$

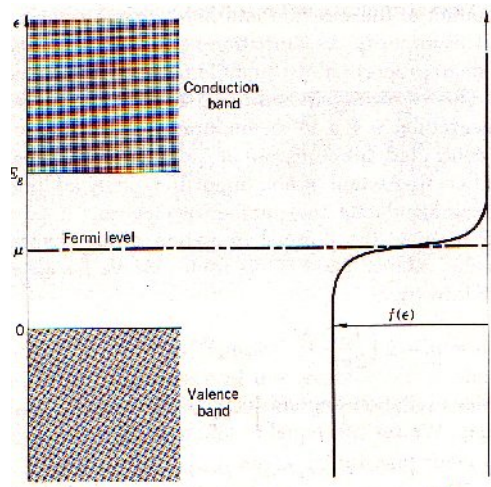
pada kondisi $(\mu - \epsilon) \gg k_B T$. Jika hole dekat pita valensi teratas berlaku sebagai partikel dengan massa efektif m_h , maka rapat orbital hole adalah:

$$D_h(\epsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_h}{\hbar^2} \right)^{3/2} (-\epsilon)^{1/2} \quad (23)$$

dengan mengukur energi positif ke atas dari pita valensi teratas didapat:

$$p = \int_{-\infty}^0 D_h(\epsilon) f_h(\epsilon) d\epsilon = 2 \left(\frac{m_h k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\mu/k_B T} \quad (24)$$

dimana p konsentrasi hole dalam pita valensi.



Gambar 12.

Skala energi untuk perhitungan statistik, fungsi distribusi Fermi terlihat pada skala yang sama, untuk sebuah temperatur $k_B T \ll E_g$. Level fermi μ tergantung pada celah pita, sebagai sebuah semikonduktor murni. Jika $\epsilon = \mu$, maka $f = 1/2$.

Kita mengalikan n dan p untuk membuktikan hubungan keseimbangan:

$$np = 4 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^3 (m_e m_h)^{3/2} e^{-E_g/k_B T} \quad (25)$$

bentuk persamaan tersebut merupakan hukum aksi massa. Dimana hasil kali np konstan pada temperatur tertentu. Jarak tingkat Fermi dari kedua ujung pita harus sama dengan $k_B T$. Pada 300 K nilai np adalah $3.6 \times 10^{27} \text{ cm}^{-6}$ untuk Ge dan $4.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-6}$ untuk Si, semuanya dihitung dengan $m_e = m_h = m$.

Dalam semikonduktor intrinsik, jumlah elektron sama dengan jumlah hole.

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} e^{-E_g/2k_B T} \quad (26)$$

pembawa intrinsik tergantung pada $\frac{E_g}{2k_B T}$, dimana E_g adalah celah energi. Kita

jumlahkan persamaan (21) dan (24) untuk mendapatkan

$$e^{2\mu/k_B T} = \left(\frac{m_h}{m_e} \right)^{3/2} e^{E_g/k_B T} \quad (27)$$

atau untuk level fermi,

$$\mu = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{m_h}{m_e} \right) \quad (28)$$

jika $m_h = m_e$, maka $\mu = \frac{1}{2} E_g$ dan tingkat Fermi berada ditengah-tengah celah.

1. Mobilitas dalam Daerah Intrinsik

Mobilitas adalah besarnya kecepatan drift per satuan energi:

$$\mu = \frac{|v|}{E} \quad (29)$$

Mobilitas didefinisikan berharga positif untuk elektron maupun hole. Meskipun kecepatan driftnya berlawanan. Dengan menuliskan μ_e atau μ_h untuk mobilitas elektron dan hole kita dapat membedakan antara μ sebagai potensial

kimia dan sebagai mobilitas. Dalam semikonduktor intrinsik ideal, mobilitas ditentukan dengan tumbukan diantara elektron dan fonon.

Konduktivitas elektrik adalah jumlah kontribusi elektron dan hole:

$$\sigma = (ne\mu_e + pe\mu_h) \quad (30)$$

dimana n dan p adalah konsentasi elektron dan hole. Pada Bab 6 perubahan

kecepatan pada muatan q telah ditemukan menjadi $v = \frac{q\tau E}{m}$, dimana:

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e}; \mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h} \quad (31)$$

2. Mobilitas dengan Adanya Pengotor

Sejumlah kecil fonon akan menentukan mobilitas pembawa ketika secara relatif ada sedikit atom pengotor pada temperatur tinggi. Sejumlah kecil atom pengotor mungkin penting pada konsentrasi pengotor yang lebih tinggi. Sejumlah kecil itu akan menentukan apakah pengotor netral atau terionisasi. Masalah atom netral ekuivalen dengan sejumlah kecil elektron dalam atom hidrogen. Kita catat bahwa daerah orbit **Bohr** pertama dinaikan sebesar $(\epsilon m / m^*)^2$.

VIII. Pengaruh Termoelektrik pada Semikonduktor.

Anggap sebuah semikonduktor dengan suhu yang dipertahankan konstan sementara medan listrik dapat menembusnya dengan kecepatan arus j_a . Jika arus hanya dibawa oleh elektron maka fluks muatan yaitu

$$j_a = n(-e)(-\mu_e)E = ne\mu_e E \quad (32)$$

Energi rata-rata yang ditransformasikan oleh elektron menunjukkan tingkat energi Fermi μ ,

$$(E_c - \mu) + \frac{3}{2}k_b T,$$

Dimana E_c adalah energi pada pita konduksi. Kita menunjukkan tingkat energi Fermi karena permukaan kontak yang berbeda pada konduktor memiliki tingkat energi yang sama. Fluks energi yang disertai fluks muatan yaitu

$$j_U = n \left(E_c - \mu + \frac{3}{2} k_B T \right) (-\mu_e) E \quad (33)$$

Koefisien Peltier Π didefinisikan oleh hubungan $j_U = \Pi j_a$, yaitu energi yang dibawa setiap oleh tiap satuan muatan. Untuk elektron,

$$\Pi_e = - \left(E_c - \mu + \frac{3}{2} k_B T \right) / e \quad (34)$$

Dan negatif karena fluks energi berlawanan arah dengan fluks muatan. Untuk hole

$$j_q = pe\mu_h E; \quad j_U = p \left(\mu - E_v + \frac{3}{2} k_B T \right) \mu_h E \quad (35)$$

dimana E_v adalah energi pada pita valensi. Dan

$$\Pi_h = - \left(\mu - E_v + \frac{3}{2} k_B T \right) / e \quad (36)$$

Dan positif. Persamaan (34) dan (36) merupakan hasil yang sederhana dari teori kecepatan drift; perlakuan dari persamaan transformasi Boltzmann memberikan perbedaan yang kecil.

Kekuatan Termoelektrik absolut Q didefinisikan dari rangkaian terbuka medan listrik yang diciptakan oleh gradien temperatur.

$$E = Q \text{ grad } T \quad (37)$$

Koefisien Peltier dihubungkan dengan kekuatan termoelektrik oleh

$$\Pi = QT \quad (38)$$

Ini merupakan hubungan Kelvin yang terkenal tentang kesetimbangan dalam Termodinamika.

IX. Semikonduktor Amorf

Semikonduktor amorf dapat diperoleh dari bentuk selaput tipis dengan penguapan atau dari supercooling. Apa yang terjadi jika model pita dalam zat padat tanpa kristal yang teratur? Meskipun keadaan elektron tidak dapat dideskripsikan dengan baik, pendefinisian nilai k mengizinkan pita dan celah energi masih terjadi.

Dalam semikonduktor amorf, baik elektron maupun hole dapat membawa arus namun pembawa ditujukan untuk memperkuat sejumlah kecil struktur yang acak. Artinya lintasan bebas menjadi terurut dari jarak antar atom rata-rata. Dekat pita dengan keadaan yang sangat berbeda terjadi lokalisasi dan konduksi oleh proses termal.

Sambungan p-n

Apa yang terjadi jika kita sambungkan dua potong semikonduktor tipe n dan tipe p seperti gambar. 13? Pada sambungan sisi p terdapat hole bebas dan (-) atom pengotor akseptor yang diionisasi dengan konsentrasi sama dan secara keseluruhan bersifat netral. Pada sambungan sisi n terdapat elektron bebas dan sejumlah atom pengotor donor yang diionisasi. Pembawa mayoritas pada sisi p adalah hole dan pada sisi n adalah elektron Gambar 14a. Dalam keadaan kesetimbangan termal dengan konsentrasi pembawa mayoritas kecil dibanding pembawa minoritas. Konsentrasi hole dalam sisi p seperti berbaur memenuhi kristal secara uniform. Elektron akan segera berdifusi dari sisi n tetapi difusi balik listrik terjadi secara netral. Seseegera mungkin muatan kecil ditransfer oleh difusi yang terjadi, yaitu di belakang sebelah kiri pada sisi p kelebihan atom akseptor yang diionisasi dan pada sisi n kelebihan atom donor yang diionisasi (Gambar. 14b). Lapisan ganda pada uatan menciptakan medan listrik secara langsung dari sisi n ke sisi p yang mencegah terjadinya difusi dan mempertahankan pemisahan kedua jenis pembawa muatan. Karena lapisan ganda potensial elektrostatis dalam kristal naik pada daerah sambungan.

Potensial elektrokimia^{*)} untuk kristal dan sambungan adalah konstan sekalipun pada sambungan terdapat kenaikan potensial elektrosatatis. Pada kesetimbangan termal partikel neto yang mengalir (baik hole maupun elektron) adalah nol. Untuk arus disesuaikan dengan gradien potensial kimia dan bukan dengan gradien potensial listrik saja. Gradien konsentrasi tepatnya akan menghilangkan gradien potensial elektrostatis. Voltmeter mengukur perbedaan potensial elektrokimia sehingga voltmeter yang dihubungkan dengan kristal terbaca nol.

Bahkan dalam kesetimbangan termal aliran arus elektron akan sangat kecil j_{nr} dari daerah n ke daerah p dimana elektron mengakhiri hidupnya dengan cara rekombinasi dengan hole. Arus rekombinasi ini setimbang oleh arus j_{ng} elektron yang dihasilkan secara termal dalam daerah p dan yang berdifusi ke daerah n:

$$j_{nr}(0) + j_{ng}(0) = 0; \quad (39)$$

Sebaliknya elektron akan menumpuk pada salah satu sisi penghalang.

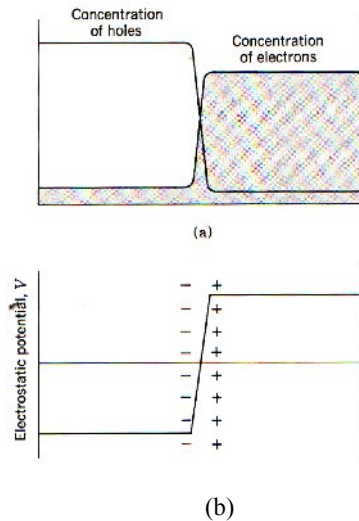
*)potensial elektrokimia untuk masing-masing pembawa dimana-mana konstan dalam kesetimbangan termal. Untuk hole $k_B T \ln p(r) + e\phi(r) = \text{konstan}$, dimana p konsentrasi hole dan ϕ potensial elektrostatik. Kita dapat melihat p akan rendah jika ϕ tinggi. Sama halnya untuk elektron $k_B T \ln n(r) - e\phi(r) = \text{konstan}$, n akan rendah jika ϕ rendah.



Gambar 13

Sebuah sambungan p-n yang terbuat dari kristal tunggal yang diubah menjadi dua bagian yang terpisah. Atom pengotor akseptor dimasukkan ke dalam salah satu bagian untuk menghasilkan daerah p dimana pembawa muatannya adalah hole. Atom pengotor donor dimasukkan ke dalam satu bagianya lagi untuk menghasilkan daerah n dimana pembawa muatannya adalah elektron. Tebal daerah pemisah mungkin kurang dari 10^{-4} cm.

Gambar 14



- (a) Perbedaan konsentrasi elektron dan hole pada sambungan (voltase nol diterapkan). Pembawa berada dalam kesetimbangan termal dengan atom pengotor akseptor dan donor sehingga konsentrasi elektron dan hole adalah konstan di seluruh bagian kristal sesuai dengan hukum aksi massa.
- (b) potensial elektrostatik dari ion akseptor (-) dan ion donor (+) dekat sambungan. Gradien potensial memisahkan difusi hole dari sisi p ke sisi n dan memisahkan elektron dari sisi n ke sisi p. Medan listrik di daerah sambungan disebut medan listrik pembangunan.

X. Rektifikasi

Sebuah sambungan p-n dapat berlaku sebagai sebuah rektifier. Arus yang besar akan mengalir jika kita menggunakan beda potensial melewati sambungan dalam satu arah, tetapi jika beda potensialnya dalam arah yang berlawanan maka arus yang mengalir sangat kecil. Jika sebuah beda potensial alternatif dipasang melewati sambungan p-n maka arus akan mengalir dalam satu arah. Untuk beda potensial panjar mundur (ke belakang) sebuah potensial negatif digunakan untuk bagian p dan beda potensial positif bagian n, dengan cara demikian akan meningkatkan perbedaan potensial diantara dua bagian. Sekarang praktisnya tidak ada elektron yang dapat menempuh bukit energi potensial dari perintang sisi rendah menuju sisi yang lebih tinggi. Arus dikombinasi kembali dihasilkan dari faktor Boltzman:

$$J_{nr}(V_{back}) = J_{nr}(0) \exp\left(\frac{-e|V|}{k_B T}\right) \quad (40)$$

Faktor Boltzman ditentukan oleh banyaknya elektron dengan energi yang cukup untuk melewati perintang. Arus generasi termal dari elektron tidak khusus disebabkan oleh beda potensial balik, karena generasi elektron mengalir ke bukit yang rendah (dari p ke n) dimana

$$J_{ng}(V_{back}) = J_{ng}(0) \quad (41)$$

Kita lihat pada persamaan (39) bahwa $J_{nr}(0) = -J_{ng}(0)$; kemudian dari persamaan (40) arus generasi mendominasi rekombinasi arus.

Ketika voltage maju digunakan, rekombinasi arus meningkat karena energi potensial perintang lebih rendah. Dengan demikian memungkinkan banyak elektron dapat mengalir dari bagian n ke bagian p.

$$J_{nr}(V_{forward}) = J_{nr}(0) \exp\left(\frac{e|V|}{k_B T}\right) \quad (42)$$

Lagi-lagi arus generasi tidak berubah.

$$J_{ng}(V_{forward}) = J_{ng}(0) \quad (43)$$

Arus hole yang mengalir melewati sambungan akan berkelakuan sama dengan arus elektron. Penggunaan voltage yang rendah ke tinggi dari penghalang elektron

juga rendah untuk hole, sehingga banyak elektron mengalir dari bagian n dengan kondisi voltage yang sama. Total arus listrik maju, termasuk pengaruh yang berasal dari hole dan elektron, diberikan oleh

$$I = I_s (e^{eV/K_B T} - 1) \quad (44)$$

Dimana I_s adalah jumlah dari dua generasi arus. Persamaan ini cukup baik untuk sambungan p-n dalam germanium.

XI. Aplikasi Bahan Semikonduktor

Untuk mendapatkan alat-alat semikonduktor yang bermutu tinggi, soal yang terpenting adalah mendapatkan “kemurnian” dan “kesempurnaan dari kristal tunggal” dari semikonduktor yang dipergunakan sebagai bahan untuk pembuatan alat-alat tersebut. Hal ini disebabkan bahwa secara umum penambahan sedikit ketidakmurnian mempengaruhi pembawa muatan, sehingga mempengaruhi komponen yang akan dibuatnya. Sebaliknya, semakin sempurna kristalnya yang berarti mempunyai kerusakan lapisan kristal yang sangat sedikit, kesempurnaan kristal ini sangat menentukan karakteristik dari komponen yang dibuatnya.

Jadi syarat utamanya adalah bagaimana mendapatkan semikonduktor yang cukup murni dan bagaimana menambahkan sejumlah ketidakmurnian dengan tepat untuk mendapatkan komponen semikonduktor kualitas tinggi. Sejak ditemukannya transistor, teknologi pembuatan kristal maju dengan pesat, yang memungkinkan produsen dapat membuat bahan semikonduktor elementair seperti Ge dan Si, juga bahan semikonduktor komponen seperti Ga As dan CdTe yang sangat khas.

1. Transistor

Transistor adalah alat semikonduktor yang dipakai sebagai penguat, pemotong (switching), stabilisasi tegangan, modulasi sinyal atau fungsi lainnya. Transistor dapat berfungsi semacam kran listrik, dimana berdasarkan arus inputnya (BJT) atau tegangan inputnya (FET), memungkinkan pengaliran listrik yang sangat akurat dari sirkuit sumber listriknya.

2. Dioda

Sebuah dioda berfungsi sebagai versi elektronik dari katup searah. Dengan membatasi arah pergerakan muatan listrik, dioda hanya mengizinkan arus listrik untuk mengalir ke satu arah saja dan menghalangi aliran ke arah yang berlawanan.

3. Sel Surya

Sel surya atau sel photovoltaic, adalah sebuah alat semikonduktor yang terdiri dari sebuah wilayah-besar dioda p-n junction, di mana, dalam hadirnya cahaya matahari mampu menciptakan energi listrik yang berguna. Pengubahan ini disebut *efek photovoltaic*. Bidang riset berhubungan dengan sel surya dikenal sebagai photovoltaics.

Sel surya memiliki banyak aplikasi. Mereka terutama cocok untuk digunakan bila tenaga listrik dari grid tidak tersedia, seperti di wilayah terpencil, satelit pengorbit [[bumi], kalkulator genggam, pompa air, dll. Sel surya (dalam bentuk modul atau panel surya) dapat dipasang di atap gedung di mana mereka berhubungan dengan inverter ke grid listrik dalam sebuah pengaturan net metering.

4. Mikroprosesor

Sebuah mikroprosesor (disingkat μP atau uP) adalah sebuah central processing unit (CPU) elektronik komputer yang terbuat dari transistor mini dan sirkuit lainnya di atas sebuah sirkuit terintegrasi semikonduktor.

DAFTAR PUSTAKA

Kittel, C.1976.*Introduction to Solid State Physics*.USA.John wiley & Sons.

Parno, Drs. 2002. *Pendahuluan Fisika Zat Padat*. Malang: FMIPA Universitas Negeri Malang.

Sutrisno. 1986. *Elektronika Teori Dan Penerapannya*. Bandung: ITB.

Wiendartun. *Diktat Fisika Zat Padat I*. UPI Bandung.