

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

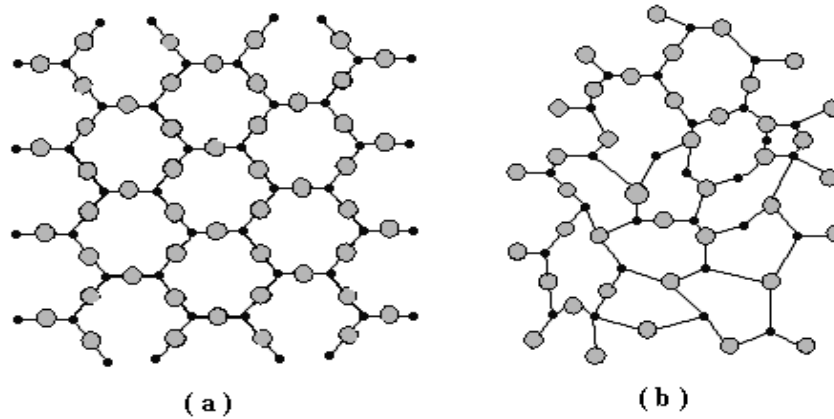
A. Kristal

Kristal terbentuk dari komposisi atom-atom, ion-ion atau molekul-molekul zat padat yang memiliki susunan berulang dan jarak yang teratur dalam tiga dimensi. Pada hubungan lokal yang teratur, suatu kristal harus memiliki rentang yang panjang pada koordinasi atom-atom atau ion dalam pola tiga dimensi sehingga menghasilkan rentang yang panjang sebagai karakteristik dari bentuk kristal tersebut.

Ditinjau dari struktur atom penyusunnya, bahan padat dibedakan menjadi tiga yaitu kristal tunggal (*monocrystal*), polikristal (*polycrystal*), dan *amorf* (Smallman, 2000: 13). Pada kristal tunggal, atom atau penyusunnya mempunyai struktur tetap karena atom-atom atau molekul-molekul penyusunnya tersusun secara teratur dalam pola tiga dimensi dan pola-pola ini berulang secara periodik dalam rentang yang panjang tak berhingga. Polikristal dapat didefinisikan sebagai kumpulan dari kristal-kristal tunggal yang memiliki ukuran sangat kecil dan saling menumpuk yang membentuk benda padat.

Struktur *amorf* menyerupai pola hampir sama dengan kristal, akan tetapi pola susunan atom-atom, ion-ion atau molekul-molekul yang dimiliki tidak teratur dengan jangka yang pendek. Amorf terbentuk karena proses pendinginan yang terlalu cepat sehingga atom-atom tidak dapat dengan tepat menempati lokasi kisinya. Bahan seperti gelas, nonkristalin ataupun vitrus

yaitu memiliki struktur yang identik dengan *amorf*. Susunan dua-dimensional simetris dari dua jenis atom yang berbeda antara kristal dan *amorf* ditunjukkan pada Gambar 1.

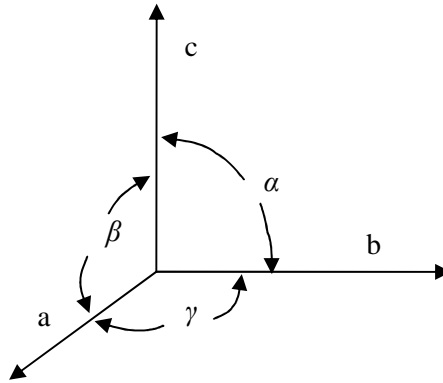


Gambar 1. (a). Susunan atom kristal, (b). Susunan atom amorf.
(Smallman, 1999: 13)

1. Struktur Kristal

Susunan khas atom-atom dalam kristal disebut struktur kristal. Struktur kristal dibangun oleh sel satuan (*unit cell*) yang merupakan sekumpulan atom yang tersusun secara khusus, secara periodik berulang dalam tiga dimensi dalam suatu kisi kristal (*crystal lattice*).

Geometri kristal dalam ruang dimensi tiga yang merupakan karakteristik kristal memiliki pola yang berbeda-beda. Suatu kristal yang terdiri dari jutaan atom dapat dinyatakan dengan ukuran, bentuk, dan susunan sel satuan yang berulang dengan pola pengulangan yang menjadi ciri khas dari suatu kristal.

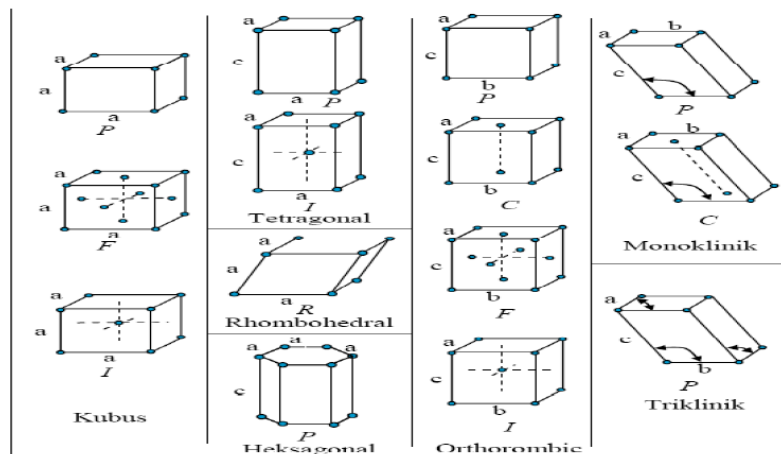


Gambar 2. Sumbu dan sudut antar sumbu kristal
(Edi Istiyono, 2000: 6)

Sumbu-sumbu a , b , dan c adalah sumbu-sumbu yang dikaitkan dengan parameter kisi kristal. Untuk α , β , dan γ merupakan sudut antara sumbu-sumbu referensi kristal. Menurut anggapan Bravais (1848), berdasarkan kisi bidang dan kisi ruang kristal mempunyai 14 kisi dan berdasarkan perbandingan sumbu-sumbu kristal dan hubungan sudut satu dengan sudut yang lain, kristal dikelompokkan menjadi 7 sistem kristal seperti yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tujuh sistem kristal dan empat belas kisi Bravais (Van Vlack, 2004: 62)

Sistem Kristal	Parameter Kisi	Kisi Bravais	Simbol
Kubik	$a = b = c$	Simpel	P
	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Pusat badan	I
		Pusat Muka	C
Monoklinik	$a \neq b \neq c$	Simpel	P
	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	Pusat Dasar	C
Triklinik	$a \neq b \neq c$	Simpel	P
	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$		
Tetragonal	$a = b \neq c$	Simpel	P
	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Pusat Badan	I
Orthorombik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simpel	P
		Pusat Dasar	C
		Pusat Badan	I
		Pusat Muka	F
Trigonal/ Rhombohedral	$a = b = c$	Simpel	P
	$a = \beta = \gamma \neq 90^\circ < 120^\circ$		
Hexagonal/ Rombus	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Simpel	P



Gambar 3. Tujuh sistem kristal dengan empat belas kisi Bravais.
(Van Vlack, 2004: 63)

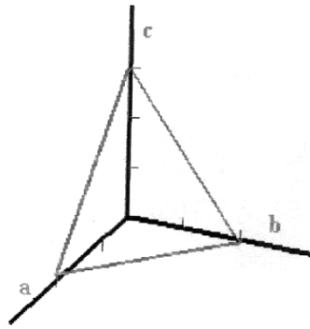
2. Indeks Miller

Dalam sistem tiga dimensi, kisi kristal akan membentuk pasangan bidang-bidang sejajar dan berjarak sama yang disebut bidang-bidang kisi. Bidang-bidang kisi inilah yang akan menentukan arah permukaan dari suatu kristal. Arah suatu bidang dapat dinyatakan dengan parameter numeriknya. Indeks Miller merupakan harga kebalikan dari parameter numerik yang dinyatakan dengan simbol $(h k l)$.

Pada Gambar 4, secara umum perpotongan bidang dengan sumbu dinyatakan dengan $2a$, $2b$, dan $3c$ sehingga parameter numeriknya adalah 2, 2, 3 dan indeks Miller dari bidang di bawah adalah:

$$(hkl) = h : k : l = \frac{1}{2} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3}.$$

$$(hkl) = (1/2 \ 1/2 \ 1/3) \text{ atau } (3 \ 3 \ 2).$$



Gambar 4. Perpotongan bidang dan sumbu

3. Jarak antar bidang-bidang kristal (hkl) (Cullity, 1956: 459)

a. Kubik : $\frac{1}{d^2} = \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2}$

b. Rombohedral : $\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2+k^2+l^2)\sin^2\alpha+2(hk+kl+hl)(\cos^2\alpha)}{a^2(1-3\cos^2\alpha+2\cos^3\alpha)}$

c. Tetragonal : $\frac{1}{d^2} = \frac{h^2+k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$

d. Orthorombik : $\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$

e. Monoklinik : $\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2\beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2\beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos\beta}{ac} \right)$

f. Heksagonal : $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$

g. Trikinik: $\frac{1}{d^2} = \frac{1}{V^2} (S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl)$

Dengan

V = volume satuan sel

$$S_{11} = b^2c^2\sin^2\alpha \quad S_{12} = abc^2(\cos\alpha \cos\beta - \cos\gamma)$$

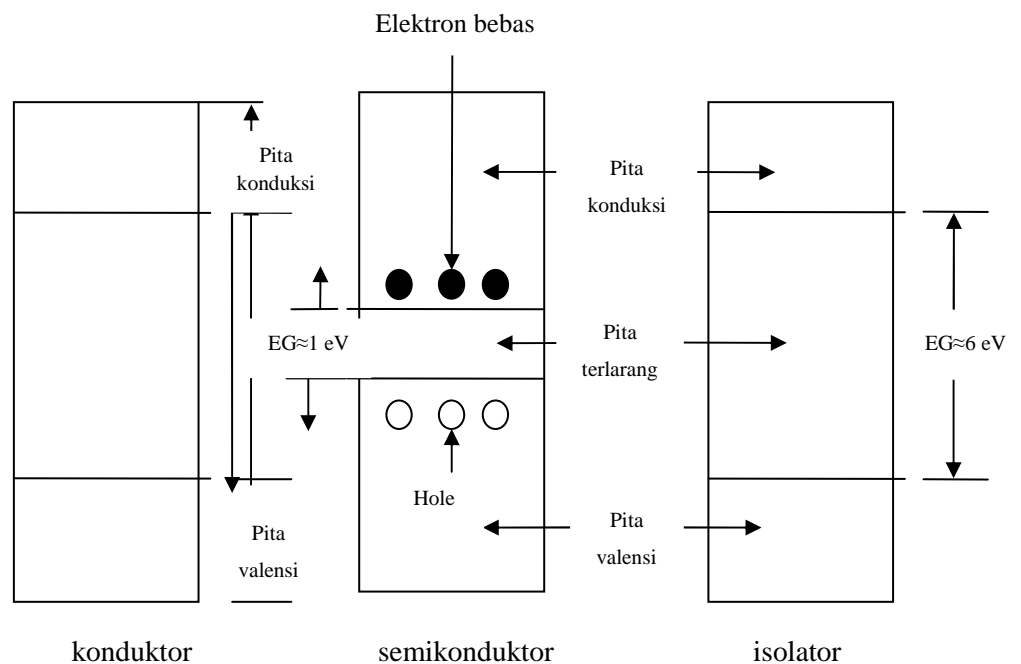
$$S_{22} = a^2c^2\sin^2\beta \quad S_{23} = a^2bc(\cos\beta \cos\gamma - \cos\alpha)$$

$$S_{33} = a^2b^2\sin^2\gamma \quad S_{31} = ab^2c(\cos\gamma \cos\alpha - \cos\beta)$$

B. Bahan Semikonduktor

1. Definisi Semikonduktor

Berdasarkan struktur pita energi bahan digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu isolator, konduktor, dan semikonduktor. Perbedaan ketiga bahan tersebut dapat dilihat dari struktur pita energinya, seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar 5. Struktur pita energi pada konduktor, semikonduktor, dan isolator. (Ariswan, 2010: 3)

Isolator adalah penghantar listrik yang buruk. Bahan isolator memiliki energi *gap* sangat besar sekitar $\approx 6 \text{ eV}$, keberadaan pita terlarang ini memisahkan daerah pita valensi yang penuh dan pita konduksi yang kosong sehingga mengakibatkan terhambatnya serapan energi bagi elektron, oleh karena itu elektron tidak dapat melewati daerah

terlarang. Umumnya isolator memiliki dua sifat, yaitu (Nyoman Suwitra, 1989: 186):

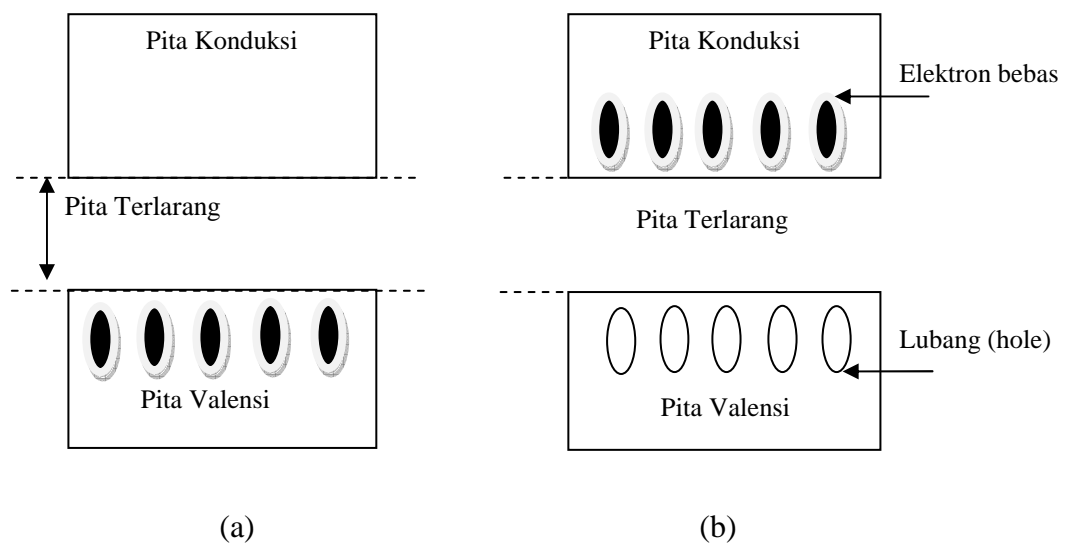
- a) Mempunyai celah energi yang cukup besar antara pita valensi dan pita konduksi, dan
- b) Tingkat energi fermi terletak pada celah energinya

Konduktor adalah bahan logam yang sangat mudah menghantarkan arus listrik. Konduktor mempunyai struktur pita energi konduksi dan valensi saling tumpang tindih sehingga pita energi konduksi terisi sebagian elektron. Jika medan listrik dikenai pada bahan logam, elektron memperoleh energi potensial dan dapat bergerak sehingga menimbulkan arus listrik.

Semikonduktor adalah bahan yang mempunyai celah pita energi terlarang yang relatif kecil (~ 1 eV), mempunyai *konduktivitas* dan *resistivitas* sekitar $\approx 10^{-4} \Omega\text{m}$ sampai dengan $10^{-7} \Omega\text{m}$ (Edi Istiyono, 2000: 131). Daerah terlarang pada bahan jenis ini memisahkan pita valensi yang penuh dengan elektron dari pita konduksi yang kosong, sehingga bahan semikonduktor pada temperatur rendah (~ 0 K) bersifat isolator. Jika temperatur dinaikkan dari energi termal ke energi yang lebih besar dari energi *gap*-nya, elektron-elektron tersebut akan meninggalkan pita valensi ke pita konduksi. Keadaan elektron sekarang menjadi elektron bebas dan mudah bergerak, meskipun hanya dipengaruhi oleh medan yang kecil dan dengan mudah dapat menghantarkan arus listrik.

Pada temperatur yang sangat rendah (0 K) elektron terikat kuat dengan ikatan kovalen dan tidak ada elektron yang bebas bergerak, sehingga keadaan pada pita valensi terisi penuh dan pita konduksi kosong sama sekali, bahan bersifat isolator. Jika suhu kristal dinaikkan maka kemungkinan terjadi eksitasi thermal sangat besar karena celah energi relatif kecil sehingga memudahkan elektron-elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi melewati daerah terlarang.

Elektron yang meninggalkan kekosongan pada pita valensi disebut lubang atau *hole*. *Hole* pada pita valensi dan elektron hampir bebas pada pita konduksi itulah yang berperan sebagai penghantar arus pada semikonduktor, elektron merupakan pembawa muatan negatif dan *hole* merupakan pembawa muatan positif.



Gambar 6. Memperlihatkan keadaan pita energi bahan semikonduktor (a) pada suhu 0 K dan (b) pada suhu diatas 0 K.
(Thomas Sri Widodo, 2002)

Fungsi distribusi elektron pada semikonduktor dapat dinyatakan dengan menggunakan fungsi distribusi Fermi-Dirac, yaitu:

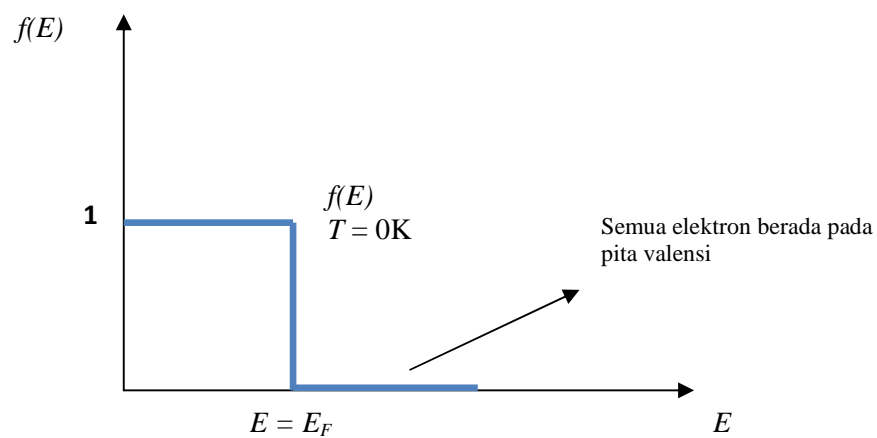
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (2.1)$$

a. Pada $T = 0$ K

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

Untuk $E < E_F$, maka $f(E) = \frac{1}{1 + e^{-\infty}} = 1$

Untuk $E > E_F$, maka $f(E) = \frac{1}{1 + e^{\infty}} = 0$



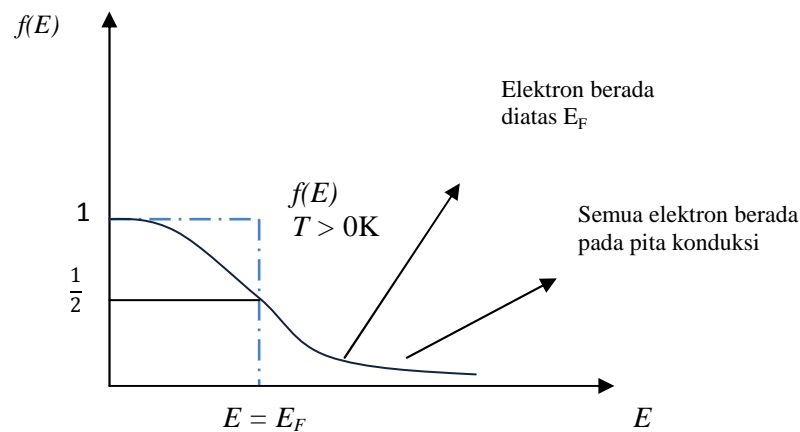
Gambar 7. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada $T = 0$ K.
(Ariswan, 2010)

b. Pada $T > 0$ K

Untuk $E < E_F$ maka $f(E) = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$

Untuk $E = E_F$ maka $f(E) = \frac{1}{1 + \exp(0)} = \frac{1}{2}$

Untuk $E > E_F$ maka $f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$



Gambar 8. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada $T > 0$ K.
(Ariswan, 2010)

2. Jenis-jenis Semikonduktor

Berdasarkan sifat kelistrikannya, ada dua jenis bahan semikonduktor, yaitu semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.

a. Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik adalah suatu bahan semikonduktor dalam bentuk yang sangat murni, dengan sifat-sifat kelistrikannya ditentukan oleh sifat-sifat asli yang melekat pada unsur itu sendiri (Nyoman Suwitra, 1989: 222).

Pada semikonduktor intrinsik, banyaknya *hole* di pita valensi sama dengan banyaknya elektron di pita konduksi. Gerakan termal terus menerus menghasilkan pasangan elektron-*hole* yang baru, sedangkan elektron-*hole* yang lain menghilang sebagai akibat proses

rekombinasi. Konsentrasi (rapat) *hole* p harus sama dengan konsentrasi (rapat) elektron n , sehingga:

$$n = p = n_i \quad (2.2)$$

dengan n_i disebut konsentrasi atau rapat intrinsik.

Energi fermi (E_f) pada semikonduktor intrinsik terletak antara pita konduksi dan pita valensi yang besarnya adalah:

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (2.3)$$

dengan E_c adalah energi pada pita konduksi, dan E_v adalah energi pada pita valensi.

Menurut Nyoman Suwitra (1989: 222-227), semikonduktor intrinsik mempunyai beberapa ciri sebagai berikut:

- 1) Jumlah elektron pada pita konduksi sama dengan jumlah *hole* pada pita valensi.
- 2) Energi fermi terletak ditengah-tengah energi *gap*.
- 3) Elektron memberikan sumbangan besar terhadap arus, tetapi *hole* juga berperan penting.
- 4) Ada 1 atom di antara 10^9 atom yang memberikan sumbangan terhadap hantaran listrik.

Contoh bahan semikonduktor intrinsik adalah silikon dan germanium, dengan atom-atomnya mempunyai empat elektron valensi sehingga dinamakan *tetravalent* dan membentuk kristal tetrahedral melalui ikatan kovalennya dengan atom-atom tetangga terdekat.

b. Semikonduktor Ekstrinsik

Semikonduktor ekstrinsik adalah bahan semikonduktor murni yang telah diberikan ketakmurnian (pengotor). Proses pemberian atom pengotor ini dinamakan *doping*, yaitu dengan memasukkan atom bervalensi 5 atau 3 pada bahan semikonduktor murni dengan tujuan untuk menambah jumlah elektron bebas maupun lubang (*hole*). Sifat kelistrikan dari semikonduktor ekstrinsik sangat ditentukan oleh jumlah atom pengotor yang ditambahkan ke dalam bahan semikonduktor tersebut.

Berdasarkan jenis atom pengotor yang ditambahkan (*doping*), semikonduktor ekstrinsik dibedakan menjadi semikonduktor tipe-*n* dan semikonduktor tipe-*p*.

1) Semikonduktor tipe-*n*

Semikonduktor tipe-*n* diperoleh jika ditambahkan atom-atom bervalensi 5 (*pentavalent*) seperti fosfor dan arsen ke dalam bahan semikonduktor murni yang mempunyai elektron valensi 4 (*tetravalent*). Empat dari lima elektron valensi akan mengisi ikatan kovalen, elektron yang kelima tidak berpasangan dan terikat sangat lemah sehingga akan mudah terlepas, dan dapat dipandang sebagai pembawa muatan yang bebas. Semikonduktor ini terbentuk dengan menambahkan unsur-unsur golongan V (N, P, As, dan Sb) pada golongan IV (Si, Ge, Sn, dan Pb).

Menurut Malvino (1981: 21), untuk kristal yang *didoping* oleh impuritas *pentavalent*, akan diperoleh:

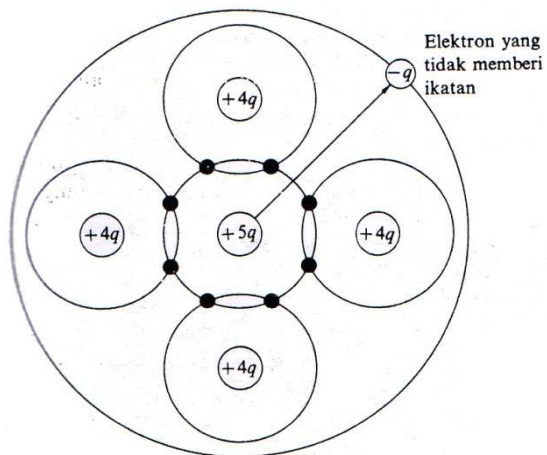
- a) Banyaknya elektron pita konduksi baru dihasilkan oleh doping karena tiap atom *pentavalent* menyokong 1 elektron pita konduksi, banyaknya elektron pita konduksi dapat dikontrol dari banyaknya penambahan impuritas.
- b) Energi thermal tetap menghasilkan pasangan elektron-*hole*. Ini jumlahnya sangat sedikit dibandingkan terhadap elektron-elektron pada pita konduksi yang dihasilkan oleh *doping*.

Perbedaan semikonduktor intrinsik dan semikonduktor tipe-*n* adalah pada semikonduktor intrinsik, terbentuknya elektron bebas disertai lubang yang dapat bergerak sebagai pembawa muatan. Sedangkan pada semikonduktor tipe-*n*, terbentuknya elektron bebas tidak disertai lubang tetapi berbentuk ion positif yang tidak dapat bergerak.

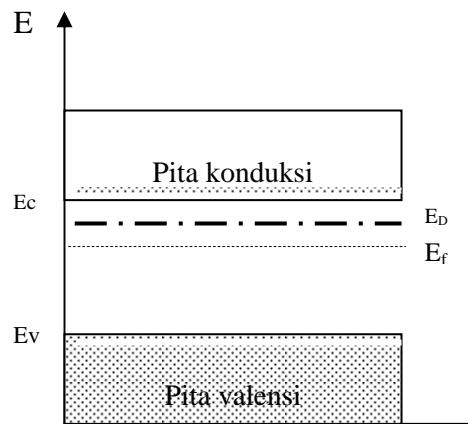
Pada diagram tingkat energi semikonduktor tipe-*n*, tingkat energi elektron yang kehilangan ikatan ini muncul sebagai tingkat diskrit dalam energi *gap* tepat di bawah pita konduksi, sehingga energi yang diperlukan elektron ini untuk bergerak menuju pita konduksi menjadi sangat kecil. Dengan demikian, akan sangat mudah terjadi eksitasi pada suhu kamar. Tingkat energi elektron ini dinamakan aras donor dan elektron pengotor disebut donor karena elektron dengan mudah diberikan ke pita

konduksi. Suatu semikonduktor yang telah *didoping* dengan pengotor donor dinamakan semikonduktor tipe-*n* atau negatif.

Apabila bahan semikonduktor intrinsik diisi dengan ketakmurnian tipe-*n*, maka banyaknya elektron akan bertambah dan jumlah *hole* berkurang daripada yang terdapat dalam semikonduktor intrinsik. Pada tipe ini, mayoritas pembawa muatan adalah elektron sedangkan *hole* merupakan pembawa minoritas. Berkurangnya *hole* ini disebabkan karena dengan bertambah banyaknya elektron maka kecepatan rekombinasi elektron dengan *hole* meningkat.



Gambar 9. Elektron dalam atom ketidakmurnian bervalensi 5 tidak memberikan ikatan. (Reka Rio, 1982: 12)



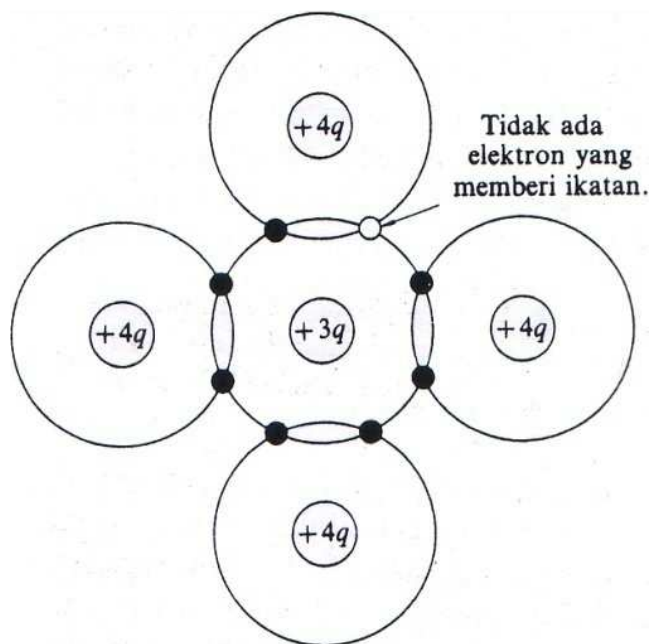
Gambar 10. Tingkat energi semikonduktor tipe-*n*.
(Ariswan, 2008)

2) Semikonduktor tipe-*p*

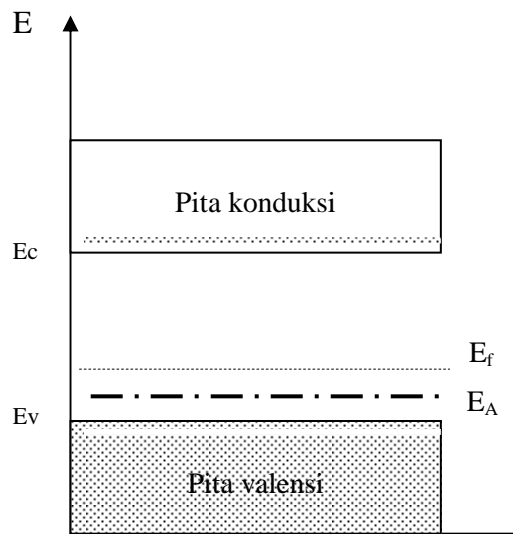
Semikonduktor intrinsik mempunyai empat ikatan kovalen. Ikatan kovalen adalah salah satu ikatan kimia yang dikarakterisasikan oleh pasangan elektron yang saling berbagi diantara atom-atom yang berikatan. Jadi ikatan kovalen terjadi karena adanya penggunaan elektron secara bersama. Apabila suatu ketakmurnian *trivalen* (valensi tiga) ditambahkan pada semikonduktor intrinsik hanya tiga ikatan kovalen yang diisi, kekosongan yang terjadi pada ikatan keempat membentuk *hole*. Ketakmurnian ini akan mengakibatkan pembawa muatan positif karena terbentuk sebuah *hole* yang dapat menerima sebuah elektron. Ketakmurnian seperti ini disebut sebagai *akseptor* karena mudah menerima sebuah elektron dari pita valensi.

Semikonduktor yang *didoping* dengan atom-atom *akseptor* dinamakan semikonduktor tipe-*p* (*p-type semiconductor*) di mana

"p" adalah kependekan dari "positif" karena pembawa muatan positif jauh melebihi pembawa muatan negatif. Di dalam semikonduktor tipe-p akan terbentuk tingkat energi yang diperbolehkan yang letaknya sedikit di atas pita valensi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 12. Oleh karena energi yang dibutuhkan elektron untuk meninggalkan pita valensi dan mengisi tingkatan energi *akseptor* kecil sekali, maka *hole-hole* yang dibentuk oleh elektron-elektron ini merupakan pembawa mayoritas di dalam pita valensi, sedangkan elektron pembawa minoritas di dalam pita valensi. Penambahan unsur-unsur dari golongan IIIB (B, Al, Ga, dan In) pada unsur-unsur golongan IV menghasilkan semikonduktor tipe-p.



Gambar 11. *Hole* ditimbulkan dalam orbit dari ketidakmurnian valensi tiga. (Reka Rio, 1982: 13)



Gambar 12. Tingkat energi semikonduktor tipe-*p*.
(Ariswan, 2008)

3. Arus pada Semikonduktor

Ada dua mekanisme yang menyebabkan arus pada semikonduktor dapat mengalir, yaitu karena adanya medan listrik (*arus drift*) dan karena adanya perbedaan konsentrasi pembawa muatan (*arus difusi*).

a. Arus *Drift*

Arus *drift* atau arus hanyut adalah aliran arus yang disebabkan oleh berjalannya partikel bermuatan karena adanya medan listrik, kecepatan pembawa muatan tersebut sebanding dengan besarnya medan listrik yang diberikan. Kecepatan untuk sebuah elektron bermuatan $-q$ dan *hole* yang bermuatan $+q$ adalah:

$$v_n = -\mu_n E \quad (2.4)$$

$$v_p = +\mu_p E \quad (2.5)$$

Dengan v_n, v_p adalah laju hanyut pada elektron dan *hole* (cm/s), μ_n, μ_p adalah *mobilitas* dari elektron dan *hole* (cm²/V.m). Tanda negatif pada persamaan menandakan bahwa kecepatan *drift* elektron berlawanan arah dengan medan listrik E yang diberikan.

Kecepatan *drift* ini sendiri lalu akan menghasilkan kerapatan arus *drift* untuk elektron dan *hole* yang besarnya adalah:

$$j_n = en\mu_n E \quad (2.6)$$

$$j_p = ep\mu_p E \quad (2.7)$$

dengan n adalah konsentrasi elektron, p adalah konsentrasi *hole*, dan e adalah besar (*magnitude*) muatan listriknya. Arus *drift* konvensional memiliki arah yang berlawanan dengan aliran muatan negatif, yang berarti arus *drift* pada sebuah semikonduktor tipe- n akan memiliki arah yang sama dengan medan listrik E yang diberikan.

Sebuah material semikonduktor selalu mengandung baik elektron maupun *hole*, maka kerapatan arus *drift* total ditentukan sebagai jumlah dari kedua komponen arus tersebut, sehingga:

$$j = en\mu_n E + ep\mu_p E = \sigma E = \frac{1}{\rho} E \quad (2.8)$$

dengan σ adalah konduktifitas dari semikonduktor (1/Ω.cm) dan $\rho=1/\sigma$ adalah resistivitas dari semikonduktor (Ω.cm). Konduktivitas berhubungan erat dengan konsentrasi elektron dan *hole*. Apabila medan listrik yang timbul dihasilkan akibat sebuah perbedaan potensial (tegangan), maka persamaan di atas akan menghasilkan

hubungan yang linier antara arus dan tegangan, sehingga akan sesuai dengan hukum Ohm.

b. Arus *Difusi*

Arus *difusi* adalah arus yang disebabkan karena adanya perbedaan konsentrasi pembawa muatan. Arus *difusi* terjadi akibat adanya perbedaan konsentrasi muatan pembawa. Arus *difusi* akan mengalir dari daerah yang konsentrasinya tinggi ke daerah yang konsentrasinya lebih rendah. Arus *difusi* untuk elektron dan *hole* akan sebanding dengan gradien konsentrasi yang dirumuskan:

$$j_p^{dif} = eD_p \left(-\frac{dp}{dx} \right) = -eD_p \left(\frac{dp}{dx} \right) \quad (2.9)$$

$$j_n^{dif} = -eD_n \left(-\frac{dp}{dx} \right) = eD_n \left(\frac{dn}{dx} \right) \quad (2.10)$$

dengan e adalah besar (*magnitude*) muatan elektron, dn/dx adalah gradien konsentrasi elektron, dp/dx sebagai gradien konsentrasi *hole*, D_p adalah koefisien difusi *hole*, dan D_n adalah koefisien difusi elektron. Perlu dicatat bahwa terjadi perubahan tanda pada kedua persamaan arus difusi ini. Hal ini dikarenakan perbedaan dalam penandaan muatan listrik antara muatan negatif elektron dengan muatan positif *hole*.

Nilai mobilitas dalam persamaan arus *drift* dan nilai koefisien difusi pada persamaan arus difusi bukanlah dua kuantitas yang saling bebas. Keduanya terikat pada hubungan Einstein (pada suhu kamar), yakni:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e} \cong 0,026 \text{ V} \quad (2.11)$$

Kerapatan arus total adalah hasil penjumlahan komponen arus *drift* dan *difusi*. Pada banyak kasus, hanya ada satu komponen yang dominan untuk setiap waktu pada daerah semikonduktor yang diberikan.

4. Bahan Semikonduktor Pb(Se_{0,6}Te_{0,4})

Paduan Pb(Se_{0,6}Te_{0,4}) merupakan bahan semikonduktor hasil paduan dari tiga unsur, yaitu Pb (golongan IV), Se dan Te (golongan VI). Bahan Pb(Se_{0,6}Te_{0,4}) identik dengan bahan semikonduktor PbSe dan PbTe. Plumbun (Pb) termasuk golongan IV pada tabel berkala mempunyai nomor atom 82, massa atom 207,2 gram/mol, titik lebur 327,4°C dan berstruktur kristal kubik pusat muka. Selenium (Se), termasuk golongan VI pada tabel berkala, nomor atom 34, massa atom 78,96 gram/mol, titik lebur 217°C (kelabu), titik didih 684,9°C dan berstruktur kristal hexagonal. Tellurium (Te), termasuk golongan VI pada tabel berkala, nomor atom 52, massa atom 127,6 gram/mol, titik lebur 449,5°C, titik didih 988°C dan berstruktur kristal hexagonal.

5. Penumbuhan Kristal Pb(Se_{0,6}Te_{0,4}) dengan Teknik Bidgman

Kemurnian dan kesempurnaan kristal merupakan syarat utama untuk memperoleh komponen semikonduktor yang berkualitas tinggi. Untuk mendapatkan kemurnian dan kesempurnaan kristal, peneliti harus

menggunakan metode yang benar dalam proses penumbuhan kristal. Kemurnian dan kesempurnaan kristal akan sangat mempengaruhi karakteristik dari komponen yang dihasilkan.

Metode yang sering digunakan dalam penumbuhan kristal semikonduktor adalah metode penarikan kristal atau teknik Czochralski dan teknik Bridgman. Penumbuhan kristal $\text{Pb}(\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{0,4})$ dilakukan dengan teknik Bridgman. Ada beberapa kelebihan teknik Bridgman, antara lain (E. Wahjuniati, 2002: 1-2):

- a. Temperatur dapat dikontrol secara teliti.
- b. Kecepatan pembekuan bahan dapat diatur.
- c. Kecepatan penurunan temperatur pada saat bahan berubah wujud dari cair ke padat dapat dikontrol secara teliti.
- d. Tekanan mekanisme didalam bahan juga dapat dikurangi untuk menghindari terjadinya keretakan pada polikristal atau pada ampul (menggunakan tabung *kuarsa*).
- e. Kenaikan suhu dapat diatur sedemikian rupa sehingga mengurangi timbulnya bahaya ledakan yang ditimbulkan unsur tertentu pada temperatur kritisnya.

Penumbuhan kristal dengan teknik Bridgman dilakukan dengan cara melelehkan bahan-bahan diatas titik leburnya, kemudian didinginkan hingga mengeras membentuk suatu kristal.

Ada beberapa tahapan yang perlu dilakukan sebelum melakukan pemanasan bahan, yaitu: penimbangan, pemvakuman, dan pengelasan.

Bahan-bahan yang akan dipergunakan sebagai bahan dasar kristal, ditimbang dengan perbandingan tertentu, kemudian dimasukkan ke dalam tabung *pyrex*. Tabung *pyrex* yang telah berisi bahan kemudian divakumkan hingga mencapai tekanan $\pm 5 \times 10^{-5}$ mbar dengan menggunakan pompa rotari dan pompa difusi. Pemvakuman tersebut dimaksudkan untuk memperkecil keberadaan gas-gas seperti oksigen, nitrogen, dan gas lainnya yang ada di dalam tabung *pyrex*. Hal ini perlu dilakukan agar unsur-unsur tersebut tidak ikut bereaksi ketika proses penumbuhan berlangsung karena akan mempengaruhi karakteristik dari kristal yang terbentuk.

Tabung berisi bahan yang telah divakumkan, kemudian dilas, dan selanjutnya dipanaskan di dalam *furnace*. Dalam proses ini temperatur pemanasan sangat perlu diperhatikan, karena akan mempengaruhi kualitas kristal yang terbentuk. Pada temperatur yang sangat tinggi, kristal dapat tumbuh dengan cepat, namun cacat kristal yang terbentuk juga akan lebih banyak. Akan tetapi jika temperaturnya sangat rendah, maka proses penumbuhan akan terjadi sangat lambat.

Pemilihan temperatur pemanasan biasanya berdasarkan diagram fasa dari bahan. Diagram fasa menyatakan keadaan kesetimbangan suatu sistem, dan dari diagram fasa ini dapat diketahui suhu kritis dari bahan. Dengan melihat diagram fasa diharapkan mampu merancang “peta” alur pemanasan untuk bahan. Selain dengan menggunakan diagram fasa, alur pemanasan bahan dapat dilakukan berdasarkan titik lebur bahan.

Pemanasan bahan tidak dilakukan secara langsung ke titik lebur bahan yang paling tinggi, namun dilakukan secara berkala berdasarkan titik lebur masing-masing bahan tersebut.

Bahan yang telah dipanaskan kemudian didinginkan secara perlahan agar atom-atom dalam bahan tersebut dapat tersusun secara teratur menempati kisi-kisinya membentuk suatu kristal. Kristal yang terbentuk dari hasil penumbuhan ini disebut ingot atau *massif*.

C. Ketidakteraturan dalam Kristal

Kristal ideal ialah kristal yang setiap atomnya memiliki tempat kesetimbangan tertentu pada kisi yang teratur (Beiser, 1992: 357). Namun pada kenyataannya, dalam kristal terdapat atom yang terletak tidak pada tempatnya, hilang ataupun tersisipi oleh atom asing, keadaan tersebut dinamakan ketidaksempurnaan kristal atau cacat kristal.

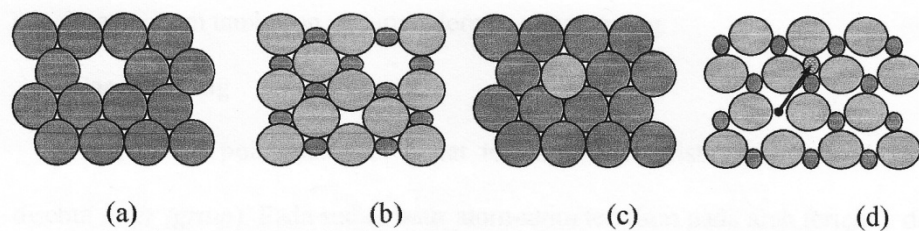
Meskipun kita menganggap kristal itu sempurna serta mengikuti aturan, kita tidak dapat mengabaikan ketidakteraturan yang ada. Pada berbagai situasi, ketidakteraturan ini bermanfaat bagi pengembangan sifat yang berguna dan memang dikehendaki (Van Vlack, 2004: 106). Ada beberapa macam cacat kristal, yaitu cacat titik, cacat garis, cacat volume, dan bidang.

1. Cacat Titik

Cacat titik merupakan ketidaksempurnaan kristal yang disebabkan penyimpangan posisi sebuah atau beberapa atom dalam kristal. Cacat titik yang kemungkinan sering terjadi adalah kekosongan (*vacancy*). Kekosongan terjadi jika suatu atom berpindah dari lokasi kisinya ke lokasi atomik terdekat yang dapat menampungnya, sehingga atom seakan-akan “hilang”. Kondisi tersebut disebabkan karena hasil dari penumpukan yang salah sewaktu kristalisasi atau dapat juga terjadi pada suhu tinggi oleh karena energi thermal meningkat. Bila energi thermal tinggi, kemungkinan bagi atom-atom untuk melompat meninggalkan tempatnya akan naik pula.

Terdapat pula kekosongan ion (cacat Schottky), yang terjadi pada senyawa yang harus mempunyai keseimbangan muatan. Cacat ini mencakup kekosongan ion dengan muatan berlawanan.

Jenis cacat yang lainnya yaitu sisipan (*intersisial*) dan cacat Frenkel. Sisipan terjadi jika ada atom lain yang masuk ke dalam struktur kristal. Cacat Frenkel terjadi jika ion berpindah dari kisinya ke tempat sisipan (Van Vlack, 1989: 123-124).

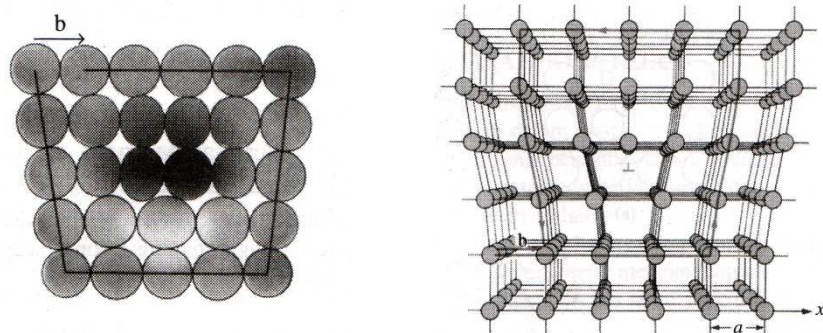


Gambar 13. Berbagai macam cacat titik. a) Vacancy, b) Cacat Schottky, c) Intersisi, dan d) cacat Frenkel

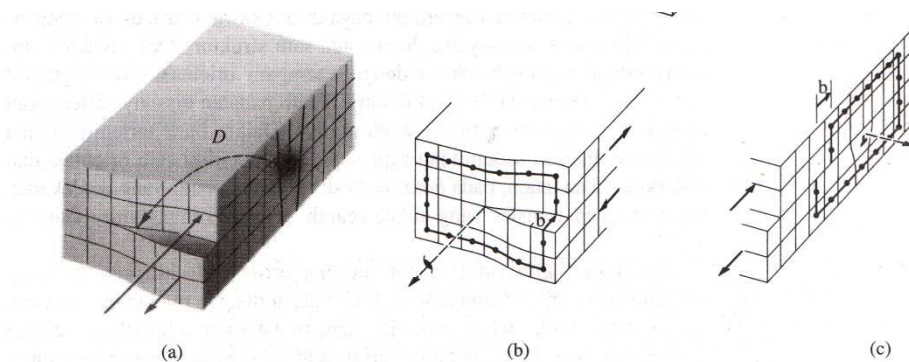
2. Cacat Garis

Cacat garis terjadi akibat diskontinuitas struktural sepanjang lintasan kristal (dislokasi). Pada cacat ini terdapat sebaris atom dalam kristal yang tidak berada pada tempatnya. Ada dua macam dislokasi, yaitu dislokasi garis atau sisi dan dislokasi ulir. Dislokasi sisi terjadi akibat adanya sisipan bidang atom tambahan dalam struktur kristal. Sedangkan dislokasi ulir menyerupai spiral dengan garis cacat sepanjang sumbu ulir.

Kedua macam dislokasi tersebut karena ada ketimpangan dalam orientasi bagian-bagian yang berdekatan dalam kristal yang tumbuh sehingga ada deretan atom tambahan ataupun deretan yang kurang.



Gambar 14. Slip yang ditimbulkan oleh dislokasi sisi.
(Van Vlack, 2004: 108)



Gambar 15. Slip yang ditimbulkan oleh pergerakan dislokasi ulir.
(Van Vlack, 2004: 109)

3. Cacat Volume

Cacat yang menempati volume dalam kristal berbentuk void, gelembung gas, dan rongga. Cacat ini dapat terjadi akibat perlakuan pemanasan, iradiasi atau deformasi, dan sebagian besar energinya berasal dari energi permukaan ($1-3 \text{ J/m}^2$) (Arthur Beiser, 1992: 361).

Iradiasi menghasilkan intersisi dan kekosongan melebihi konsentrasi keseimbangan. Keduanya bergabung membentuk loop dislokasi, dan akhirnya loop intersisi kemudian membentuk struktur dislokasi.

Loop intersisi merupakan cacat intrinsik stabil, sedangkan loop kekosongan merupakan cacat tidak stabil. Loop yang terbentuk dari penggabungan antara kekosongan dan intersisi akan menimbulkan penyusutan ketika intersisi menghilang.

Ada dua faktor penting yang menunjang pembentukan void, yaitu:

- a. Derajat bias kerapatan dislokasi (hasil penumbuhan loop dislokasi) terhadap penarikan intersisi, yang mengurangi kandungan intersisi dibandingkan kekosongan.
- b. Peran penting gas pada nukleasi void, baik gas permukaan aktif seperti oksigen, nitrogen, dan hidrogen yang seringkali hadir sebagai pengotor residual, dan gas inert seperti helium yang terbentuk secara kontinu selama iradiasi.

4. Cacat Bidang

Pada bahan polikristal, zat padat tersusun oleh kristal-kristal kecil yang disebut butir (*grain*). Pada setiap butir atom tersusun pada arah

tertentu. Pada daerah antar butir terjadi perbedaan arah keteraturan atom dan ini menimbulkan cacat pada daerah batas butir, sehingga disebut cacat batas butir.

D. Karakterisasi Material

Penentuan karakter struktur material, baik dalam bentuk pejal atau partikel, kristalin atau mirip gelas merupakan salah satu kegiatan inti dari ilmu material (Smallman, 2000: 137). Dalam penelitian ini, karakterisasi bahan dilakukan dengan tiga (3) teknik, yaitu *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Energy Dispersive Analysis X-Ray (EDAX)* dan *Scanning Elektron Microscopy (SEM)*.

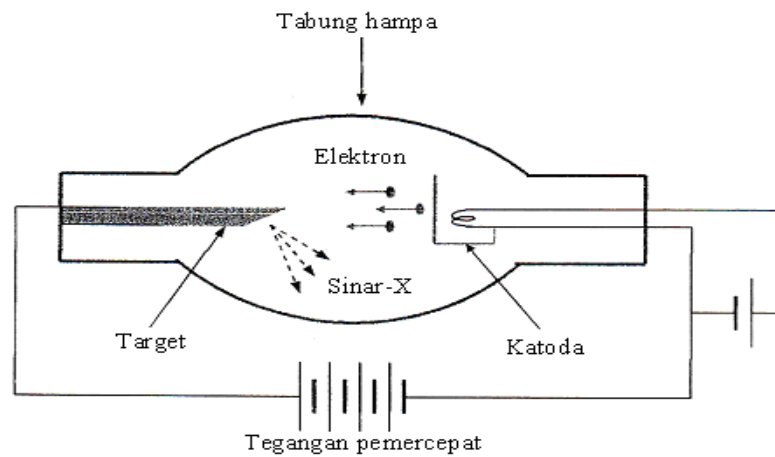
1. Analisis X-Ray Diffraction (XRD)

a. Pembangkitan Sinar-X

Teknik *X-Ray Diffraction (XRD)* berperan penting dalam proses analisis padatan kristalin. XRD adalah metode karakterisasi yang digunakan untuk mengetahui ciri utama kristal, seperti parameter kisi dan tipe struktur. Selain itu, juga dimanfaatkan untuk mengetahui rincian lain seperti susunan berbagai jenis atom dalam kristal, kehadiran cacat, orientasi, dan cacat kristal (Smallman, 2000: 145).

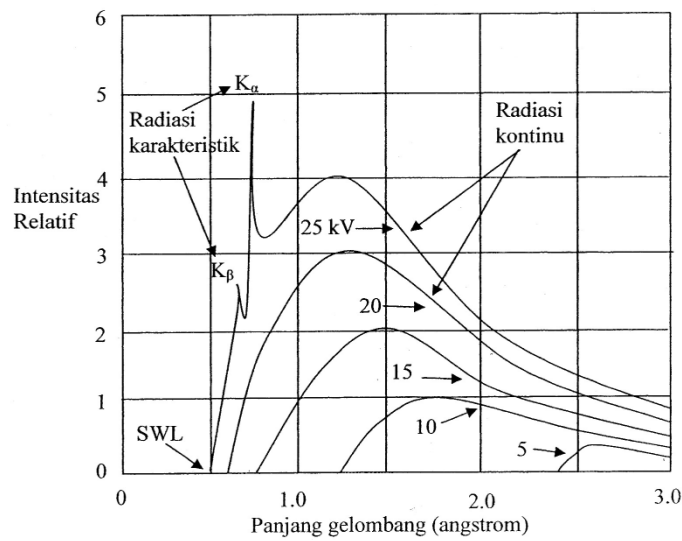
Sinar-X pertama kali ditemukan oleh Wilhelm Rontgen pada tahun 1895. Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang ($\lambda \approx 0,1 \text{ nm}$) yang lebih pendek dibanding gelombang cahaya ($\lambda = 400\text{-}800 \text{ nm}$) (Smallman, 2000: 145). Panjang

gelombang sinar-X ini merupakan dasar digunakannya teknik difraksi sinar-X (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui struktur mikroskopis suatu bahan.



Gambar 16. Diagram sinar X (Arthur Beiser, 1992: 62)

Sinar-X dihasilkan apabila elektron-elektron dengan laju tinggi menumbuk suatu bahan (Gambar 16). Peristiwa pembentukan sinar-X dapat dijelaskan secara makroskopik yaitu sebuah katoda yang dipanasi oleh filamen panas berdekatan yang dilalui arus listrik menyediakan elektron secara terus-menerus dengan emisi termionik. Beda potensial V yang tinggi diantara katoda dengan target logam mempercepat elektron ke arah target dan menghasilkan sinar-X.

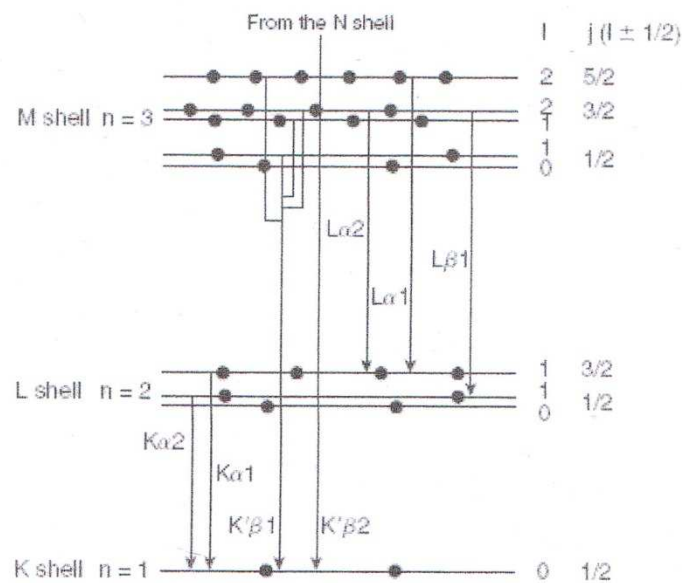


Gambar 17. Spektrum sinar-X molybdenum (Cullity, 1978:7).

Radiasi yang dipancarkan oleh sinar-X terbagi menjadi dua komponen, yaitu spektrum kontinu dan spektrum garis. Spektrum kontinu mempunyai rentang panjang gelombang yang lebar sedangkan spektrum garis merupakan karakteristik dari logam yang ditembak (Smallman, 2000: 145). Spektrum sinar-X kontinu dihasilkan dari peristiwa *bremsstrahlung*. Pada saat elektron menumbuk logam, elektron dari katoda (elektron datang) menembus kulit atom dan mendekati kulit inti atom. Pada saat mendekati inti atom, elektron ditarik mendekati inti atom yang bermuatan positif, sehingga lintasan elektron berbelok dan kecepatan elektron berkurang atau diperlambat. Karena perlambatan ini, maka energi elektron berkurang. Energi yang hilang ini dipancarkan dalam bentuk sinar-X. Proses inilah yang dikenal dengan proses *bremsstrahlung*.

Sedangkan spektrum karakteristik terjadi apabila elektron terakselerasi mempunyai cukup energi untuk mengeluarkan satu elektron dalam dari kulitnya. Misalnya level 1s yang kosong, kemudian akan diisi dengan elektron lain yang berasal dari level energi yang lebih tinggi. Pada waktu transisi, terjadi emisi radiasi sinar-X. Panjang gelombang radiasi sinar-X dapat diketahui dari persamaan:

$$h\nu = E_L - E_K \quad (2.12)$$



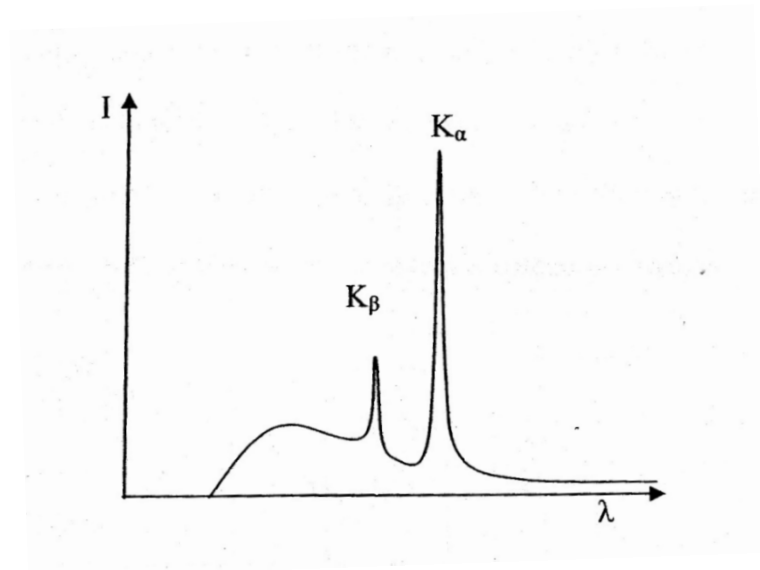
Gambar 18. Transisi elektron dan karakteristik radiasinya (Shmueli, 2007: 93)

Apabila elektron mengalami transisi dari kulit yang berdekatan misalnya dari kulit L ke kulit K maka radiasi emisi ini disebut radiasi K_α sedangkan bila elektron mengalami transisi dari kulit M ke kulit K maka radiasi emisinya disebut radiasi K_β . (Gambar 18).

Dalam pemanfaatannya dibutuhkan sinar-X monokromatik, namun pada kenyataannya eksitasi keduanya yaitu K_α dan K_β muncul bersama-sama. Ketika sinar-X dilewatkan pada bahan maka sinar-X tersebut akan ditransmisikan dan ada yang diabsorpsi sesuai dengan persamaan:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.13)$$

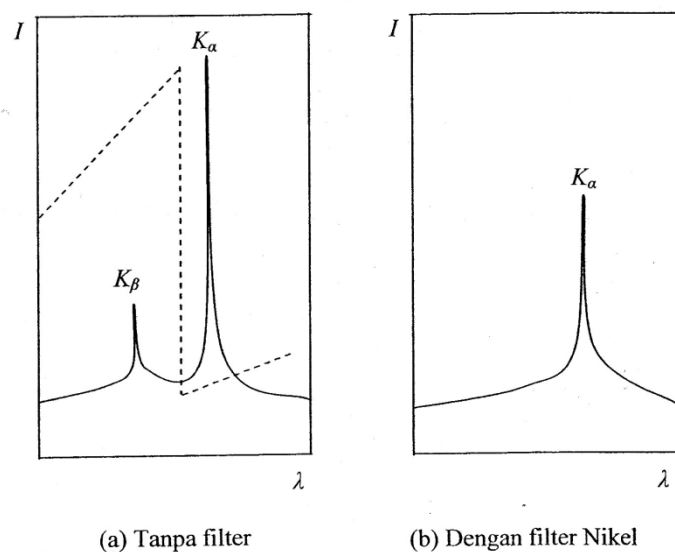
Dengan I_0 adalah intensitas awal sinar-X, I_x adalah intensitas transmisi sinar-X setelah melewati bahan, μ disebut koefisien absorpsi linear yang bergantung pada panjang gelombang sinar-X dan jenis material pengabsorpsi dan x adalah tebal bahan (Smallman, 2000: 145-146).



Gambar 19. Spektrum karakteristik sinar-X (Smallman, 2000: 146)

Sumber sinar-X dengan menggunakan tembaga (Cu) sebagai anoda memiliki panjang sinar-X yang karakteristik 145 \AA untuk K_α dan 138 \AA untuk K_β . Untuk menganalisa struktur kristal, dibutuhkan

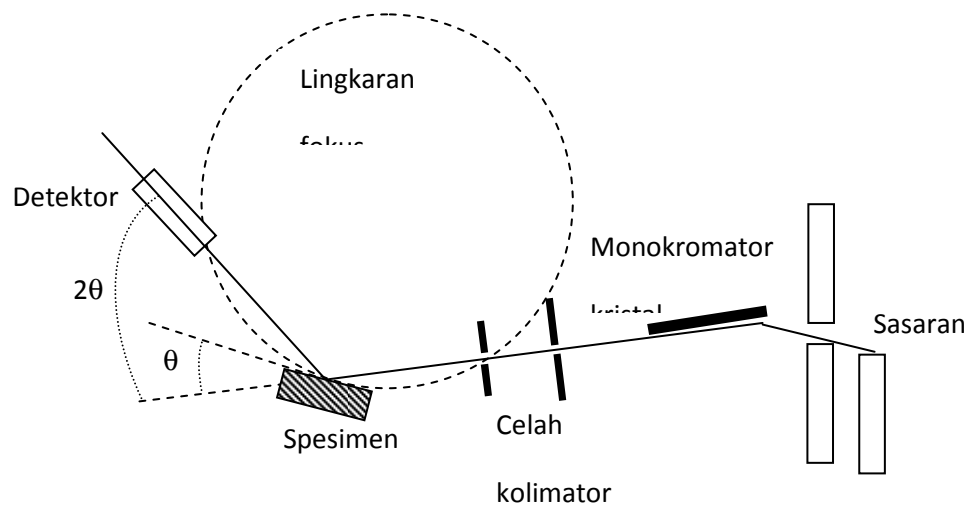
sinar-X yang monokromatik atau hanya memiliki satu panjang gelombang saja. Namun pembangkitan sinar-X tidak hanya radiasi K_α yang kuat tetapi juga timbul radiasi K_β yang lemah dan spektrum kontinu. Dalam hal ini peran filter sangat dibutuhkan. Filter digunakan untuk mengabsorpsi radiasi K_β supaya hasil keluaran sinar-X menjadi monokromatik. Dengan melewati sinar-X tersebut pada material filter maka radiasi K_β yang tidak diinginkan akan terabsorpsi, sedangkan radiasi K_α yang cukup kuat akan diteruskan, sehingga diperoleh spektrum sinar-X monokromatik. Beberapa material yang digunakan sebagai filter adalah material yang memiliki nomor atom yang lebih kecil dari nomor atom target.



Gambar 20. Perbandingan radiasi Cu dengan filter dan tanpa filter (Smallman, 2000: 146)

Teknik difraksi sinar-X dapat digunakan untuk analisis struktur kristal, karena setiap unsur atau senyawa mempunyai pola yang sudah

tertentu. Apabila dalam analisis ini pola difraksi unsur diketahui maka unsur tersebut dapat ditentukan (Smallman, 2000: 146-147). Rancangan skematik spektrometer sinar-X yang didasarkan atas analisis Bragg diperlihatkan pada Gambar 21. Seberkas sinar-X terarah jatuh pada kristal dengan sudut θ dan sebuah detektor diletakkan untuk mencatat sinar yang sudut hamburannya sebesar θ . Ketika θ diubah, detektor akan mencatat puncak intensitas yang bersesuaian dengan orde n yang divisualisasikan dalam difraktogram.



Gambar 21. Skema dasar XRD (Smallman, 2000 : 150)

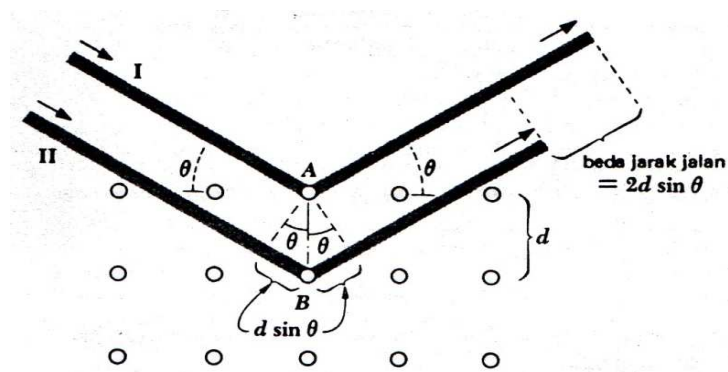
Jika sinar-X mengenai suatu bahan, maka intensitas sinar yang ditransmisikan akan lebih rendah dibandingkan dengan intensitas sinar yang datang, karena terjadi penyerapan oleh bahan dan penghamburan atom-atom dalam bahan tersebut. Berkas difraksi diperoleh dari berkas sinar-X yang saling menguatkan karena mempunyai fase yang

sama. Untuk berkas sinar-X yang mempunyai fase berlawanan maka akan saling menghilangkan. Syarat yang harus dipenuhi agar berkas sinar-X yang dihamburkan merupakan berkas difraksi maka dapat dilakukan perhitungan secara matematis sesuai dengan hukum Bragg.

b. Difraksi Bragg

Menurut Bragg berkas yang terdifraksi oleh kristal terjadi jika pemantulan oleh bidang sejajar atom menghasilkan interferensi konstruktif.

Pemantulan sinar-X oleh sekelompok bidang paralel dalam kristal pada hakekatnya merupakan gambaran dari difraksi atom-atom kristal. Difraksi atom-atom kristal sebagai pantulan sinar-X oleh sekelompok bidang-bidang paralel dalam kristal seperti terlihat pada Gambar 22. Arah difraksi sangat ditentukan oleh geometri kisi, yang bergantung pada orientasi dan jarak antar bidang kristal.



Gambar 22. Difraksi Bragg (Arthur Beiser, 1992: 68)

Gambar 22 menunjukkan seberkas sinar mengenai atom A pada bidang pertama dan B pada bidang berikutnya. Jarak antara

bidang A dengan bidang B adalah d , sedangkan θ adalah sudut difraksi. Berkas-berkas tersebut mempunyai panjang gelombang λ , dan jatuh pada bidang kristal dengan jarak d dan sudut θ . Agar mengalami interferensi konstruktif, kedua berkas tersebut harus memiliki beda jarak $n\lambda$. Sedangkan beda jarak lintasan kedua berkas adalah $2d \sin \theta$. Interferensi konstruktif terjadi jika beda jalan sinar adalah kelipatan bulat panjang gelombang λ , sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.14)$$

Pernyataan ini adalah hukum Bragg. Pemantulan Bragg dapat terjadi jika $\lambda \leq 2d$, karena itu tidak dapat menggunakan cahaya kasat mata, dengan n adalah bilangan bulat = 1,2,3, ... (Arthur Beiser, 1992: 66).

Arah berkas yang dipantulkan oleh atom dalam kristal ditentukan oleh geometri dari kisi kristal yang bergantung pada orientasi dan jarak bidang kristal. Suatu kristal yang memiliki simetri kubik ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) dengan ukuran parameter kisi, $a = b = c$, maka sudut-sudut berkas yang didifraksikan dari bidang-bidang kristal (hkl) dapat dihitung dengan rumus jarak antarbidang sebagai berikut:

$$\frac{1}{d^2} = \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) \quad (2.15)$$

Dengan menerapkan hukum Bragg dari Persamaan (2.14) dan mensubstitusikan ke Persamaan (2.15), sehingga diperoleh persamaan:

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) \quad (2.16)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2) \quad (2.17)$$

a , b , dan c adalah parameter kisi dan $h k l$ adalah indeks untuk menyatakan arah bidang kristal (indeks miller). Dari Persamaan (2.17), parameter kisi dan kristal dapat ditentukan. Untuk menentukan parameter kisi $a = b = c$, akan diperoleh persamaan :

$$\sin^2 \theta \cdot 4a^2 = \lambda^2 (h^2 + k^2 + l^2) \quad (2.17)$$

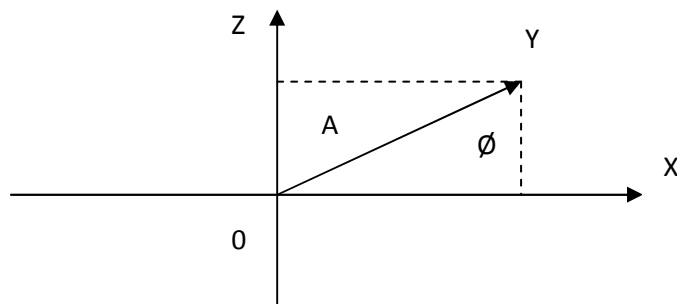
$$a = \frac{\lambda}{\sin \theta} \sqrt{\left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{4} \right)} \quad (2.18)$$

Struktur kristal ditentukan dengan difraksi sinar-X. Jarak interplanar dapat dihitung hingga empat atau lebih angka signifikan dengan mengukur sudut difraksi. Ini merupakan dasar untuk menentukan jarak interatomik dan menghitung jari-jari (Lawrence H. Van Vlack, 2004: 94).

Penentuan orientasi kristal dilakukan dengan mengamati pola berkas difraksi sinar-X yang dipantulkan oleh kristal. Untuk XRD, pola difraksi diamati sebagai fungsi sudut 2θ . Pola difraksi yang terjadi kemudian dibandingkan dengan JCPDS sebagai data standar (Dwi Fefiana K, 2010: 24).

c. Faktor Struktur dan Intensitas Difraksi

Untuk menentukan intensitas hamburan oleh struktur atom tertentu maka harus ditentukan intensitas yang dihamburkan oleh satu atom kemudian menentukan kontribusi atom-atom lainnya dalam struktur tersebut.



Gambar 23. Vektor gelombang dalam bidang kompleks.

Dengan menganalisa vektor gelombang dalam bidang kompleks yang dinyatakan dalam Gambar 23 dengan A adalah amplitudo gelombang dan fase gelombang dan ϕ adalah sudut antara vektor A dengan sumbu x , maka diperoleh persamaan:

$$Ae^{i\phi} = A \cos \phi + A i \sin \phi \quad (2.19)$$

Intensitas sebanding dengan kuadrat amplitudo, persamaan (2.19) dikalikan dengan harga kompleks konjugatnya diperoleh persamaan :

$$|Ae^{i\phi}|^2 = Ae^{i\phi} Ae^{-i\phi} = A^2 \quad (2.20)$$

Bentuk lain dari persamaan (2.20) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$A(\cos \phi + i \sin \phi)A(\cos \phi - i \sin \phi) = A^2(\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) = A^2 \quad (2.21)$$

Fase gelombang dari unit atom adalah $\phi = 2\pi(hu + kv + lw)$ dengan uvw adalah koordinat dari atom dan f adalah faktor hamburan maka gelombang hamburan dalam bentuk eksponensial kompleks dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$Ae^{i\phi} = f e^{2\pi i(hu + kv + lw)} \quad (2.22)$$

Penjumlahan dari gelombang terhambur oleh tiap-tiap atom individu disebut dengan *faktor struktur* (F) dan dinyatakan dengan persamaan:

$$F_{hkl} = \sum_1^N f_n e^{2\pi i(hu_n + kv_n + lw_n)} \quad (2.23)$$

Bila dinyatakan dalam persamaan trigonometri, *faktor struktur* (F) dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$F = \sum_1^N f_n [\cos 2\pi(hu_n + kv_n + lw_n) + i \sin 2\pi(hu_n + kv_n + lw_n)] \quad (2.24)$$

Persamaan umum untuk bilangan kompleks dinyatakan dalam bentuk:

$$F = a + ib \quad (2.25)$$

Nilai a dan b adalah riil, harga keduanya masing-masing dinyatakan dalam persamaan:

$$a = \sum_1^N f_n \cos 2\pi(hu_n + kv_n + lw_n) \quad (2.26)$$

$$b = \sum_1^N f_n \sin 2\pi(hu_n + kv_n + lw_n) \quad (2.27)$$

$$|F|^2 = (a + ib)(a - ib) = a^2 + b^2 \quad (2.28)$$

Substitusi persamaan a dan b ke dalam Persamaan (2.28) sehingga diperoleh persamaan:

$$|F|^2 = [f_1 \cos 2\pi(hu_1 + kv_1 + lw_1) + f_2 \cos 2\pi(hu_2 + kv_2 + lw_2)]^2 + [f_1 \sin 2\pi(hu_1 + kv_1 + lw_1) + f_2 \sin 2\pi(hu_2 + kv_2 + lw_2)]^2 \quad (2.29)$$

1) Faktor struktur pada kubik sederhana (*simplest cubic*)

Simplest case adalah sebuah bagian sel yang hanya memiliki satu atom asli, dengan kata lain mempunyai fraksi koordinat 0 0 0. Faktor strukturnya adalah

$$F = f e^{2\pi i(0)} = f$$

$$F^2 = f^2 \quad (2.30)$$

2) Faktor struktur pada sel kubik pusat badan (*body centered cubic cell*)

Sel ini mempunyai dua atom yang sejenis berada pada 0 0 0 dan $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$

$$F = f e^{2\pi i(0)} + f e^{2\pi i(h/2 + k/2 + l/2)} = f[1 + e^{\pi i(h+k+l)}] \quad (2.31)$$

Ketika $(h+k+l)$ genap

$$F = 2f$$

$$F^2 = 4f^2 \quad (2.32)$$

Ketika $(h+k+l)$ ganjil

$$F = 0$$

$$F^2 = 0 \quad (2.33)$$

Kesimpulan dari perbandingan geometrikal, bahwa pusat dasar sel akan memproduksi refleksi 0 0 1. Hal ini sebagai akibat adanya faktor struktur untuk dua sel.

3) Faktor struktur pada sel kubik pusat muka (*face centered cubic cell*)

Sel ini berisi empat atom sejenis berada pada 000 , $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$, $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$, dan $0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$.

$$F = fe^{2\pi i(0)} + fe^{2\pi i(\frac{h}{2} + \frac{k}{2})} + fe^{2\pi i(\frac{h}{2} + \frac{l}{2})} + fe^{2\pi i(\frac{k}{2} + \frac{l}{2})}$$

$$F = f[1 + e^{\pi i(h+k)} + e^{\pi i(h+l)} + e^{\pi i(k+l)}] \quad (2.34)$$

Jika h , k , dan l sama, maka ada tiga kesimpulan $(h + k)$, $(h + l)$, dan $(k + l)$ merupakan bilangan bulat genap dan setiap syarat pada persamaan di atas bernilai 1.

$$F = 4f$$

$$F^2 = 16f^2 \text{ untuk indeks sama} \quad (2.35)$$

Jika h , k , dan l tidak sama, maka jumlah dari tiga eksponensial adalah -1, baik dua dari indeks gasal dan satu genap atau dua genap dan satu gasal. Sebagai contoh h dan l genap dan k gasal, misalnya 012. Maka $F = f(1 - 1 + 1 - 1) = 0$ dan tidak terjadi refleksi.

$$F = 0$$

$$F^2 = 0 \text{ untuk indeks tidak sama} \quad (2.36)$$

Jadi Refleksi akan terjadi untuk bidang seperti (111), (200) dan (220) tetapi tidak untuk bidang (100), (210), (112) dan sebagainya.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa faktor struktur berbentuk dan berukuran bebas dari bagian sel, sebagai contoh sel

pusat badan yang mana saja akan kehilangan refleksi untuk bidang yang mempunyai $(h+k+l)$ sama untuk angka gasal baik itu sel kubik, tetragonal atau orthohombik (Cullity, 1978: 119)

Posisi atom pada kristal dengan struktur kisi pusat badan (I) adalah (x_j, y_j, z_j) dan $(\frac{1}{2} + x, \frac{1}{2} + y, \frac{1}{2} + z)$. Faktor struktur dinyatakan oleh persamaan:

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^N f_j \{ \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) \exp \pi i (h + k + l) \}$$

$$= \sum f_j \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) [1 + \exp(\pi i \{h + k + l\})]$$

$$F_{hkl} = 2 \{ \sum f_j \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) \} ; \text{jika } h + k + l = \text{genap}$$

$$F_{hkl} = 0 ; \text{jika } h + k + l = \text{ganjil}$$

(2.37)

(Ariswan, 2010 : 4)

Faktor struktur menentukan intensitas yang muncul pada difraktogram yang berperan penting dalam menentukan karakteristik dari kisi kristal. Nilai faktor struktur bergantung pada arah difraksi.

a) Faktor struktur pada kristal kubik sederhana.

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^N f_j \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) \quad (2.38)$$

Intensitas selalu muncul pada sembarang nilai hkl .

b) Faktor struktur pada kristal kubik pusat badan.

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^N f_j \{ \exp[-\pi i(h+k+l)] + 1 \} \quad (2.39)$$

Intensitas muncul jika nilai $h+k+l$ bilangan ganjil, dan intensitas tidak muncul ketika nilai $h+k+l$ bilangan genap.

c) Faktor struktur pada kristal kubik pusat muka.

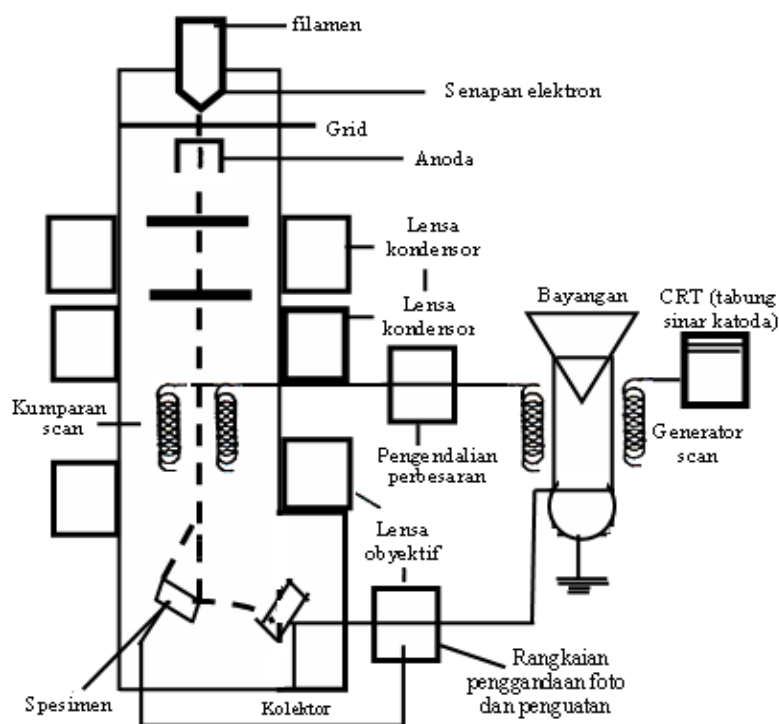
$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^N f_j \{ 1 + \exp(-\pi i(h+l)) + \exp(-\pi i(h+k)) + \exp(-\pi i(k+l)) \} \quad (2.40)$$

Intensitas muncul jika $h+k+l$ semua gasal atau semua genap, dan intensitas tidak muncul ketika $h+k+l$ campuran antara gasal dan genap.

2. Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) dapat digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan bahan. Karakterisasi bahan menggunakan SEM dimanfaatkan untuk melihat struktur topografi permukaan, ukuran butiran, cacat struktural, dan komposisi pencemaran suatu bahan. Hasil yang diperoleh dari karakterisasi ini dapat dilihat secara langsung pada hasil SEM berupa *Scanning Electron Micrograph* yang menyajikan bentuk tiga dimensi berupa gambar atau foto. Mikroskop ini digunakan untuk mempelajari struktur permukaan obyek, yang secara umum diperbesar antara 1.000-40.000 kali. Hasil SEM yang berupa gambar topografi menyajikan bentuk permukaan bahan dengan berbagai lekukan dan tonjolan.

Prinsip kerja dari alat ini adalah sumber elektron dari filamen yang terbuat dari tungsten memancarkan berkas elektron. Jika elektron tersebut berinteraksi dengan bahan (spesimen) maka akan menghasilkan elektron sekunder dan sinar-X karakteristik. *Scanning* pada permukaan bahan yang dikehendaki dapat dilakukan dengan mengatur *scanning generator* dan *scanning coils*. Elektron sekunder hasil interaksi antara elektron dengan permukaan spesimen ditangkap oleh detektor SE (*Secondary Electron*) yang kemudian diolah dan diperkuat oleh *amplifier* dan kemudian divisualisasikan dalam monitor sinar katoda (CRT). Skema dasar SEM disajikan pada Gambar 24.

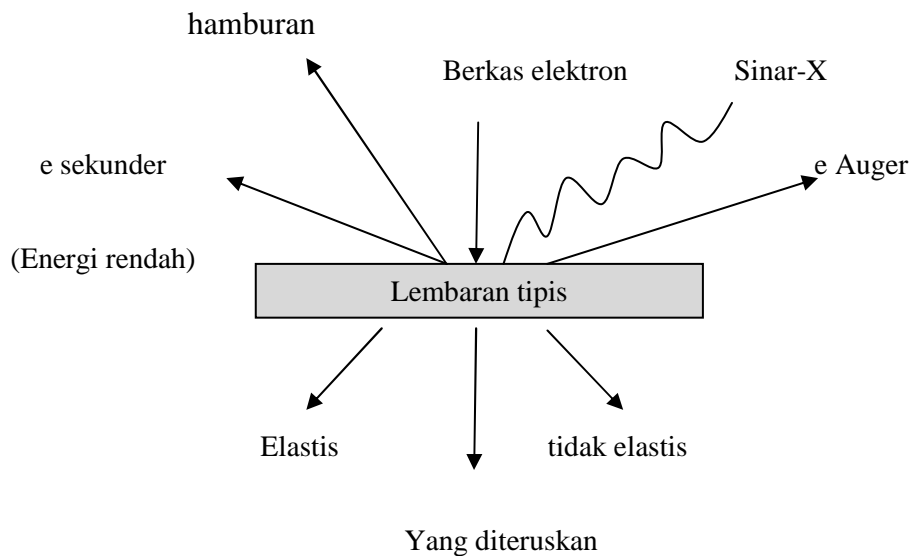


Gambar 24. Skema dasar SEM.
(Smallman,2000:157)

3. Analisis EDAX (*Energy Dispersive Analysis X-Ray*)

Salah satu karakterisasi bahan semikonduktor dapat dilakukan menggunakan *Energy Dispersive Analysis X-Ray* (EDAX). EDAX merupakan instrumen yang digunakan untuk menentukan komposisi kimia suatu bahan. Sistem analisis EDAX bekerja sebagai fitur yang terintegrasi dengan SEM dan tidak dapat bekerja tanpa *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Prinsip kerja dari teknik ini adalah menangkap dan mengolah sinyal *fluoresensi* sinar-X yang keluar apabila berkas elektron mengenai daerah tertentu pada bahan (*specimen*). Sinar-X tersebut dapat dideteksi dengan detektor zat padat, yang dapat menghasilkan pulsa intensitas sebanding dengan panjang gelombang sinar-X.

Struktur suatu material dapat diketahui dengan cara melihat interaksi yang terjadi jika suatu *specimen* padat dikenai berkas elektron. Berkas elektron yang jatuh tersebut sebagian akan dihamburkan sedang sebagian lagi akan diserap dan menembus spesimen. Bila *specimennya* cukup tipis, sebagian besar ditransmisikan dan beberapa elektron dihamburkan secara elastis tanpa kehilangan energi, sementara sebagian lagi dihamburkan secara tidak elastis. Interaksi dengan atom dalam spesimen menghasilkan pelepasan elektron energi rendah, foton sinar-X dan elektron auger, yang semuanya dapat digunakan untuk mengkarakterisasi material. Berikut ini adalah gambaran mengenai hamburan elektron-elektron apabila mengenai spesimen.



Gambar 25. Hamburan dari elektron yang jatuh pada lembaran tipis (Smallman, 2000: 155)

Interaksi antara elektron dengan atom pada sampel akan menghasilkan pelepasan elektron energi rendah, foton sinar-X, dan elektron auger, yang kesemuanya bisa digunakan untuk mengkarakterisasi material. (Smallman, 2000: 156). Elektron sekunder adalah elektron yang dipancarkan dari permukaan kulit atom terluar yang dihasilkan dari interaksi berkas elektron jatuh dengan padatan sehingga mengakibatkan terjadinya loncatan elektron yang terikat lemah dari pita konduksi. Elektron auger adalah elektron dari kulit orbit terluar yang dikeluarkan dari atom ketika elektron tersebut menyerap energi yang dilepaskan oleh elektron lain yang jatuh ke tingkat energi yang lebih rendah.

Apabila berkas elektron mengenai sampel padat, maka sebagian berkas yang jatuh tersebut akan dihamburkan kembali dan sebagian lagi akan menembus sampel. Untuk sampel yang tipis maka sebagian besar

elektron akan diteruskan, beberapa elektron akan dihamburkan secara elastis tanpa kehilangan energi dan sebagian lagi akan dihamburkan secara tak elastis.

Teknik ini juga dapat dimanfaatkan untuk mengamati unsur-unsur pada daerah kecil permukaan bahan secara kualitatif dan semi kuantitatif. Hal ini karena masing-masing unsur menyebar pada panjang gelombang spesifik. Jika teknik SEM dan EDAX digabungkan maka keduanya dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang dimiliki oleh fase yang terlihat pada struktur mikro (Prafit Wiyantoko, 2009: 34).

E. Kerangka Berfikir

Suhu sangat berpengaruh pada proses preparasi karena atom-atom tidak bergerak pada suhu 0 K. Pada temperatur yang sangat tinggi, kristal dapat tumbuh dengan sangat cepat, namun cacat kristal yang terbentuk juga akan banyak. Bila suhu dinaikkan maka energinya akan meningkat sehingga akan menyebabkan atom-atom bergetar dan menimbulkan jarak antar atom yang lebih besar. Jarak antar atom yang lebih besar akan memungkinkan atom-atom yang memiliki energi tinggi atau berada di atas energi ikatannya akan bergerak mendobrak ikatannya dan melompat ke posisi yang baru dan akan mengakibatkan jumlah kekosongan meningkat dengan cepat. Pada suhu tinggi memungkinkan atom-atom asing menyusup lebih dalam diantara celah-celah atom. Hal ini akan menyebabkan atom-atom asing terikat dan semakin kuat menempel pada bahan, sehingga kristal yang terbentuk akan memiliki

karakteristik yang baik (Van Vlack, 2004: 106). Karakteristik kristal semakin baik jika struktur kristalnya mendekati tidak cacat (parameter kisiinya semakin kecil atau rapat).

Proses pemanasan bahan yang baik untuk menghasilkan kristal ada hal yang perlu diperhatikan dalam menaikkan suhu, yaitu dengan cara menaikkan suhu saat pemanasan secara bertahap hingga mencapai pada suhu optimal atau titik lebur bahan itu. Hal ini dilakukan agar proses pengkristalan yang terjadi sempurna sehingga akan menghasilkan suatu kristal yang sempurna.