

## Rangkuman.

1. Semikonduktor dikelompokkan menjadi dua kelompok besar, yaitu *semikonduktor murni* (*semikonduktor intrinsik*) dan *semikonduktor tak murni* (*semikonduktor ekstrinsik*).
2. Semikonduktor intrinsik (murni) adalah semikonduktor yang terbuat dari satu jenis unsur kimia.
3. Semikonduktor ekstrinsik adalah semikonduktor murni yang dicampur (dikotori) oleh atom-atom lain yang berasal baik dari golongan III-A ataupun dari golongan V-A.
4. Ada dua cara untuk mengukur nilai energi celah, yaitu dengan teknik penyerapan langsung dan teknik penyerapan tak langsung.
5. Pada teknik penyerapan langsung hanya melibatkan dua partikel yaitu elektron di pita konduksi dan lubang (hole) di pita valensi.
6. Pada teknik penyerapan tak langsung melibatkan tiga partikel yaitu elektron di pita konduksi, lubang (hole) di pita valensi dan fonon. Fonon mungkin diserap atau muncul di dalam kristal semikonduktor.
7. Massa efektif didefinisikan oleh persamaan

$$m^* = \hbar^2 \frac{1}{d^2 E / dk^2} .$$

8. Kelima alasan mengapa hole dianggap sebagai partikel yang bermuatan listrik positif adalah:
  - a.  $\mathbf{k}_h = - \mathbf{k}_e$
  - b.  $E_h(\mathbf{k}_h) = - E_e(\mathbf{k}_e)$ .
  - c.  $v_g(\mathbf{h}) = v_g(\mathbf{e})$
  - d.  $m_h^* = -m_e^*$
  - e.  $F_h = - F_e$ .

9. Konsentrasi elektron dalam pita konduksi semikonduktor intrinsik pada suhu 300 K adalah:

$$n = 2 \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_e \cdot m_h)^{3/4} \exp(-E_g/k_B T).$$

10. Konsentrasi hole dalam pita valensi semikonduktor intrinsik adalah:

$$p = 2 \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_e \cdot m_h)^{3/4} \exp(-E_g/k_B T).$$

### **Tes Formatif 1**

Petunjuk: Jawablah soal-soal di bawah ini pada lembar jawaban yang disediakan!

=====

1. Apakah yang dimaksud dengan semikonduktor intrinsik ? Berilah contohnya !
2. Apakah yang dimaksud dengan semikonduktor ekstrinsik ?
3. Jika sebuah semikonduktor murni dikotori oleh atom-atom dari golongan III-A, maka hasilnya adalah semikonduktor .....
4. Jika sebuah semikonduktor murni dikotori oleh atom-atom dari golongan V-A, maka hasilnya adalah semikonduktor .....
5. Pada pengukuran celah energi dengan teknik penyerapan tak langsung melibatkan tiga partikel. Apakah ketiga partikel tersebut ?
6. Persamaan yang menyatakan massa efektif sebuah elektron adalah .....
7. Jika sebuah elektron memiliki energi sebesar  $E(k) = \hbar^2 k^2 / 2m$  berapakah massa efektif elektron tersebut ?
8. Sebutkanlah lima alasan mengapa hole dianggap sebagai partikel yang bermuatan listrik positif.
9. Sebuah semikonduktor intrinsik memiliki celah energi sebesar 1,1 eV, massa efektif elektron  $m_e = 2 m_h = 0,5 m$ , dimana  $m =$  massa diam elektron Berapakah konsentrasi elektron di dalam semikonduktor tersebut ? Diketahui  $k_B = 8,61 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ,  $\hbar = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J.det} = (1,055/1,6) \times 10^{-15} \text{ eV.det} = 6,59 \times 10^{-16} \text{ eV.det}$
10. Sebuah semikonduktor intrinsik memiliki celah energi sebesar 0,7 eV, massa efektif elektron  $m_e = 5 m_h = 0,5 m$ , dimana  $m =$  massa diam elektron. Berapakah konsentrasi hole di dalam

semikonduktor tersebut pada suhu 500 K? Diketahui  $k_B = 8,61 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ,  $\hbar = 1,055 \times$

$$10^{-34} \text{ J}\cdot\text{det} = (1,055/1,6) \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{det} = 6,59 \times 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{det}$$

**Tindak Lanjut (Balikan):**

Cocokkanlah jawaban Anda dengan kunci jawaban tes formatif 1 pada akhir modul ini, dan berilah skor (nilai) sesuai dengan bobot nilai setiap soal yang dijawab dengan benar. Kemudian jumlahkan skor yang Anda peroleh lalu gunakan rumus di bawah ini untuk mengetahui tingkat penguasaan (TP) Anda terhadap materi KB-1 ini.

$$\text{Rumus (TP)} = (\text{jumlah skor/jumlah soal}) \times 100 \%$$

Arti TP yang Anda peroleh adalah sebagai berikut :

90 % - 100 % = baik sekali.

80 % - 89 % = baik

70 % - 79 % = cukup

< 70 % = rendah.

Apabila TP Anda  $\geq 80 \%$ , maka Anda boleh melanjutkan pada materi KB 2, dan Selamat !!,

Tetapi jika TP Anda  $< 80 \%$ , Anda harus mengulang materi KB-1 di atas terutama bagian-bagian yang belum Anda kuasai.

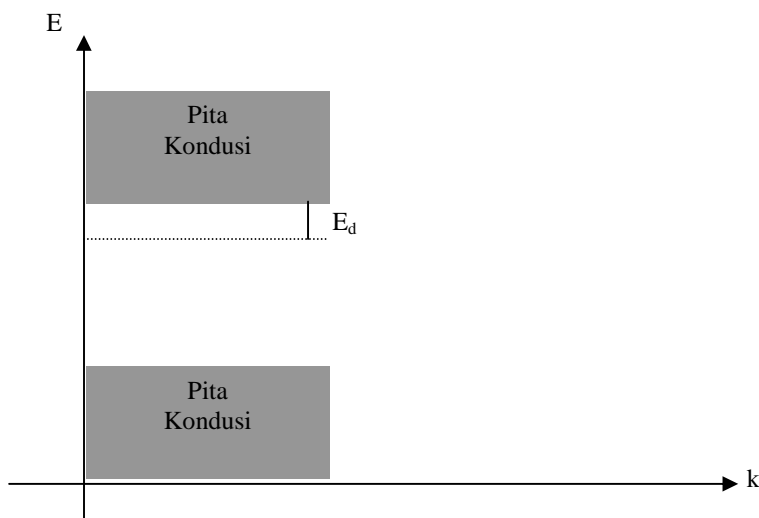
## **KB 2. Kristal Semikonduktor Ekstrinsik**

### **6.2.1. Tingkat energi donor.**

Dalam semikonduktor murni (intrinsik), konsentrasi elektron konduksi adalah sama dengankonsentrasi hole di dalam pita valensi. Baik elektron konsuksi maupun hole adalah berfungsi sebagai pembawa muatan listrik. Dalam teknologi industri elektronika, ternyata semikonduktor instrinsik jarang dipakai. Sebab dalam teknologi elektronika dibutuhkan hanya salah satu dari kedua pembawa muatan listrik tersebut. Dengan cara mengotori semikonduktor intrisik tersebut, kita dapat memperoleh semikomduktor yang hanya memiliki salah satu pembawa muatan listrik yang dominan. Sebagai contoh jika kita mengotori semikonduktor intrinsik itu dengan atom-atom dari golongan V-A, maka hasilnya adalah berupa semikonduktor ekstrinsik tipe-N (tipe negatif). Sebab atom-atom dari golongan V-A tersebut akan menyebabkan setiap atom semikonduktor intrinsik kelebihan satu elektron. Oleh karena itu, hasilnya disebut semikonduktor ekstrinsik tipe-N. Sebaliknya, jika kita mengotori (doping) semikonduktor intrinsik dengan atom-atom dari golongan III-A maka kita akan memperoleh semikonduktor tak murni (ekstrinsik) tipe-P (tipe positif), karena atom-atom dari golongan III-A tersebut akan menyebabkan setiap atom semikonduktor intrinsik seolah-olah kekurangan satu elektron. Kekurangan satu elektron ini diasumsikan sama dengan kelebeihan satu muatan listrik positif elektron. Oleh karena itu, hasilnya disebut semikonduktor ekstrinsik tipe-P.

Pada semikonduktor tipe-N, atom-atom dari golongan V-A seolah menyumbang kelebihan satu elektron. Oleh karena itu, atom-atom dari golongan V-A ini sering disebut sebagai atom-atom donor.

Elektron-elektron yang berasal dari atom donor dalam semikonduktor tipe-N akan mengorbit atom donor itu sendiri mirip seperti orbit elektron dalam atom hidrogen tetapi dengan interaksi coulomb yang sangat lemah, karena adanya efek penghalang interaksi (screening effect) yang ditimbulkan oleh adanya polarisasi dalam kristal semikonduktor yang berfungsi sebagai medium untuk donor. Elektron-elektron tersebut sangat mudah melepaskan diri dari atom donor dan pindah ke pita konduksi untuk berfungsi sebagai elektron konduksi, dan atom donor akan menjadi ion positif. Dengan sedikit saja tambahan energi dari luar, maka elektron itu akan mampu loncat ke pita konduksi. Dengan demikian, kita dapat dengan mudah untuk memahami bahwa tingkat energi donor adalah sangat dekat ke pita konduksi, seperti ditunjukkan dalam Gambar 7.



Gambar 7. Posisi tingkat energi atom donor ( $E_d$ ) pada bagan pita energi.

Agar elektron itu berpindah dari atom donor ke pita konduksi, maka kita harus mengionisasi atom donor itu dengan energi dari luar. Karena orbit dari elektron dalam atom donor ini mirip dengan orbit elektron dalam atom hidrogen, maka nilai energi ionisasinya pun dapat menggunakan

persamaan energi ionisasi untuk atom hidrogen, tetapi dengan sedikit modifikasi karena adanya efek screening tadi. Energi ionisasi atom hidrogen ( $E_h$ ) adalah sebesar:

$$E_h = - e^4 m / 2 \hbar^2 \quad - \text{ dalam CGS} \quad (45)$$

$$E_h = - e^4 m / 2 (4\pi\epsilon_0 \hbar)^2 \quad - \text{ dalam SI,} \quad (46)$$

dimana  $e$  = muatan listrik elektron, dan  $m$  = massa diam elektron.

Dalam semikonduktor tipe-N, energi ionisasi atom donor ( $E_d$ ) adalah sama dengan energi ionisasi atom hidrogen tetapi dengan mengganti massa diam ( $m$ ) oleh massa efektif elektron ( $m_e$ ), dan mengganti  $e^4$  dengan  $e^4/\epsilon$  akibat adanya efek screening. Jadi

$$E_d = \frac{e^4 m_e}{2\epsilon^2 \hbar^2} = (1/\epsilon^2) \left( \frac{m_e}{m} \right) \left( \frac{e^4 m}{2\hbar^2} \right) \quad - \text{ dalam CGS} \quad (47)$$

$$E_d = 1/(4\pi\epsilon_0)^2 \frac{e^4 m_e}{2\epsilon^2 \hbar^2} = (1/\epsilon^2) \left( \frac{m_e}{m} \right) \left( \frac{e^4 m}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \right) \quad - \text{ dalam SI} \quad (48)$$

Suku terakhir di ruas kanan pada persamaan-persamaan (47) dan (48) adalah sama dengan energi ionisasi atom hidrogen yang nilainya adalah 13,6 eV. Jadi dari persamaan (47) dan (48) dapat kita lihat bahwa energi ionisasi atom donor adalah  $m_e/m\epsilon^2$  kali  $E_h$ . Karena nilai  $m_e/m\epsilon^2$  jauh

lebih kecil dari satu, maka  $E_d < E_h$ , yaitu  $E_d = \frac{m_e}{\epsilon^2 m} E_h$ .

**Contoh:** Jika  $\epsilon = 10$ , dan  $m_e/m = 0,2$ , berapakah energi ionisasi donor ( $E_d$ ) ?

jawab: dari persamaan (47) peroleh:

$$E_d = \frac{m_e}{\epsilon^2 m} E_h.$$

$$E_d = (1/500) E_h = 13,6/500 \text{ eV}$$

$$E_d = 0,0272 \text{ eV} = 27,2 \text{ meV}.$$



**Latihan.** Berapakah energi ionisasi atom donor, jika diketahui nilai-nilai  $\epsilon = 5,5$  dan  $m_e = 0,1 m$  ?

Petunjuk: Gunakan persamaan (47) atau (48).

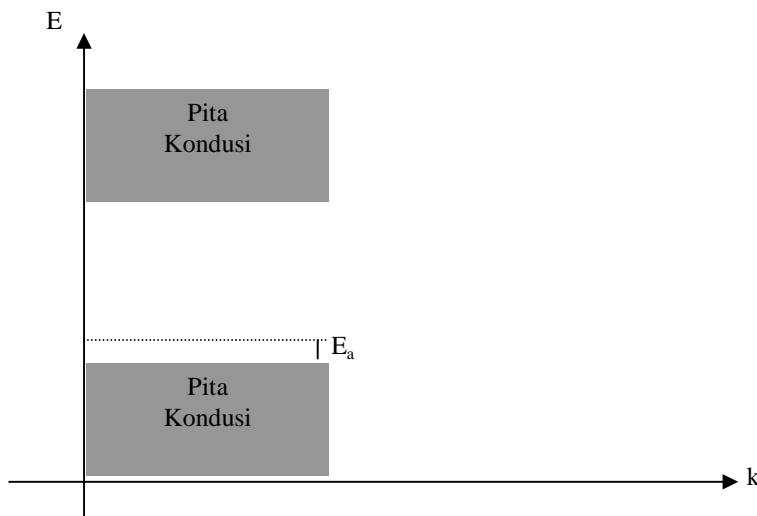
### 6.2.2. Tingkat energi akseptor.

Pada semikonduktor ekstrinsik tipe-P, setiap atom dari golongan III-A agar dapat berikatan secara kovalen dari dengan setiap atom dari semikonduktor murni maka ia “meminjam/menerima” satu elektron. Oleh karena itu, atom-atom dari golongan III-A sering disebut sebagai *atom akseptor*.

Pindahnya elektron dari semikonduktor murni ke atom donor menimbulkan lubang (hole) di dalam kristal semikonduktor. Lubang-lubang ini bebas bergerak di sepanjang kristal. Dengan demikian, dengan cara mengotori semikonduktor murni oleh atom akseptor dalam jumlah yang cukup besar akan menghasilkan semikonduktor tipe-P dengan konsentrasi hole yang cukup tinggi.

Dengan adanya tambahan satu elektron pada setiap atom akseptor, maka atom-atom akseptor tersebut sudah terionisasi dan menjadi ion negatif. Oleh karena itu, maka hole-hole yang bermuatan positif akan ditarik oleh atom-atom akseptor. Besarnya energi ikat hole oleh atom akseptor dapat dihitung dengan cara yang sama seperti pada atom donor. Nilai energi ikat ini pun adalah sangat kecil, yaitu memiliki orde sekitar 0,01 eV.

Timbulnya hole dalam semikonduktor tipe-P adalah akibat pindahnya elektron dari pita valensi semikonduktor intrinsik ke dalam atom akseptor untuk berikatan secara kovalen dengan atom-atom tetangganya (dalam hal ini Si atau Ge murni). Oleh karena itu, letak tingkat energi akseptor adalah sedikit di atas pita valensi, seperti ditunjukkan dalam Gambar 8.



Gambar 8. Posisi tingkat energi atom Akseptor ( $E_a$ ) pada bagan pita energi.

Ketika elektron pindah dari pita valensi ke atom akseptor, sehingga atom akseptor terionisasi menjadi ion negatif, maka di dalam pita valensi timbul hole yang bertanggung-jawab dalam hal pengaliran muatan listrik. Jadi dalam hal ini jumlah hole akan lebih banyak dari pada jumlah elektron, sehingga  $p > n$ .

Karena dekatnya tingkat energi akseptor, maka pada suhu kamar pun akan ada banyak elektron yang akan mampu loncat ke tingkat energi akseptor itu. Hasilnya adalah bahwa pada suhu kamar akan ada banyak hole di dalam pita valensi.

### 6.2.3. Konsentrasi elektron pada semikonduktor ekstrinsik.

Konsentrasi elektron di dalam semikonduktor ekstrinsik tipe-N merupakan gabungan dari konsentrasi elektron yang secara termal tereksitasi dalam semikonduktor intrinsik dengan konsentrasi atom-atom donor ( $N_d$ ). Sebab sumber elektron di dalam semikonduktor ekstrinsik adalah elektron konduksi yang tereksitasi secara termal dan elektron-elektron yang berasal dari atom donor. Setiap satu atom donor (atom golongan V-A) menyumbang satu elektron konduksi ke dalam semikonduktor ekstrinsik. Oleh karena itu, konsentrasi elektron ini (yang berasal dari donor saja) sama dengan konsentrasi atom donor itu sendiri.

Cara menentukan konsentrasi elektron konduksi yang berasal dari atom donor yang terionisasi adalah sama dengan cara yang digunakan dalam mekanika statistika untuk menentukan konsentrasi elektron atom hidrogen yang terionisasi secara termal. Jika di dalam semikonduktor ekstrinsik ini hanya ada atom-atom donor dan tidak ada atom-atom akseptor, maka secara matematika konsentrasi elektron konduksi secara keseluruhan di dalam semikonduktor ekstrinsik tersebut adalah

$$n = (n_0 N_d)^{1/2} \exp(-E_d/2k_B T), \quad (49)$$

dimana  $n_0 = 2 (m_e k_B T / 2\pi \hbar^2)^{3/2}$ ,  $N_d$  = konsentrasi atom donor,  $m_e$  = massa efektif elektron dan  $E_d$  = energi ionisasi donor.

#### **6.2.4. Konsentrasi hole pada semikonduktor ekstrinsik.**

Sama halnya dengan konsentrasi konsentrasi elektron konduksi dalam semikonduktor tipe-N, konsentrasi hole dalam semikonduktor tipe-P juga merupakan gabungan dari hole yang timbul secara termal akibat elektron loncat ke pita konduksi dengan hole yang berasal dari

atom-atom akseptor (golongan III-A). Dengan argumen yang sama, secara matematika konsentrasi hole ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$p = (p_0 N_a)^{1/2} \exp(-E_a/2k_B T), \quad (50)$$

dimana  $p_0 = 2 (m_h k_B T / 2\pi \hbar^2)^{3/2}$ ,  $N_a$  = konsentrasi atomakseptor,  $m_h$  = massa efektif hole, dan  $E_a$  = energi ionisasi akseptor.

## Rangkuman

1. Jika kita mengotori semikonduktor intrinsik itu dengan atom-atom dari golongan V-A, maka hasilnya adalah berupa semikonduktor ekstrinsik tipe-N (tipe negatif). Sebab atom-atom dari golongan V-A tersebut akan menyebabkan setiap atom semikonduktor intrinsik kelebihan satu elektron.
2. Atom-atom dari golongan V-A ini sering disebut sebagai *atom-atom donor*.
3. Tingkat energi donor adalah sangat dekat ke pita konduksi, dan sedikit di bawahnya.
4. Energi ionisasi atom hidrogen ( $E_h$ ) adalah sebesar:

$$E_h = - e^4 m / 2 \hbar^2 \quad - \text{ dalam CGS}$$

$$E_h = - e^4 m / 2 (4 \pi \epsilon_0 \hbar)^2 \quad - \text{ dalam SI.}$$

5. Energi ionisasi atom donor ( $E_d$ ) adalah:

$$E_d = \frac{e^4 m_e}{2 \epsilon^2 \hbar^2} = (1/\epsilon^2) \left( \frac{m_e}{m} \right) \left( \frac{e^4 m}{2 \hbar^2} \right) \quad - \text{ dalam CGS}$$

$$E_d = 1/(4\pi\epsilon_0)^2 \frac{e^4 m_e}{2 \epsilon^2 \hbar^2} = (1/\epsilon^2) \left( \frac{m_e}{m} \right) \left( \frac{e^4 m}{2 (4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \right) \quad - \text{ dalam SI.}$$

6. jika kita mengotori (doping) semikonduktor intrinsik dengan atom-atom dari golongan III-A maka kita akan memperoleh semikonduktor tak murni (ekstrinsik) tipe-P (tipe positif), karena atom-atom dari golongan III-A tersebut akan menyebabkan setiap atom semikonduktor intrinsik seolah-olah kekurangan satu elektron. Kekurangan satu elektron ini diasumsikan sama dengan kelebihan satu muatan listrik positif elektron.
7. Atom-atom dari golongan V-A ini sering disebut sebagai *atom-atom donor*.
8. Letak tingkat energi akseptor adalah sedikit di atas pita valensi.

9. Konsentrasi elektron konduksi secara keseluruhan di dalam semikonduktor ekstrinsik tersebut adalah:

$$n = (n_0 N_d)^{1/2} \exp(-E_d/2k_B T),$$

dimana  $n_0 = 2 (m_e k_B T / 2\pi \hbar^2)^{3/2}$ ,  $N_d$  = konsentrasi atom donor,  $m_e$  = massa efektif elektron dan  $E_d$  = energi ionisasi donor.

10. Konsentrasi hole ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$p = (p_0 N_a)^{1/2} \exp(-E_a/2k_B T),$$

dimana  $p_0 = 2 (m_h k_B T / 2\pi \hbar^2)^{3/2}$ ,  $N_a$  = konsentrasi atom akseptor,  $m_h$  = massa efektif hole, dan  $E_a$  = energi ionisasi akseptor.

## **Tes Formatif 2**

Petunjuk: Jawablah soal-soal di bawah ini pada lembar jawaban yang disediakan!

=====

1. Atom-atom dari golongan berapa yang berfungsi sebagai atom donor pada proses pengotoran semikonduktor intrinsik ? Berilah contohnya !
2. Atom-atom dari golongan berapa yang berfungsi sebagai atom akseptor pada proses pengotoran semikonduktor intrinsik? Berilah contohnya !
3. Pada Bagan pita energi, dimanakah letak tingkat energi donor ? Lukiskanlah Bagannya !
4. Pada Bagan pita energi, dimanakah letak tingkat energi atom akseptor ? Lukiskanlah Bagannya !
5. Sebuah atom donor memiliki massa efektif elektron  $m_e = 0,3 m$ , dimana  $m =$  massa diam elektron. Jika tetapan dielektrik semikonduktor itu  $\epsilon = 15,8$  berapakah nilai energi ionisasi atom donor tersebut dalam satuan CGS ?

**Tindak Lanjut (Balikan):**

Cocokkanlah jawaban Anda dengan kunci jawaban tes formatif 1 pada akhir modul ini, dan berilah skor (nilai) sesuai dengan bobot nilai setiap soal yang dijawab dengan benar. Kemudian jumlahkan skor yang Anda peroleh lalu gunakan rumus di bawah ini untuk mengetahui tingkat penguasaan (TP) Anda terhadap materi KB-1 ini.

$$\text{Rumus (TP)} = (\text{jumlah skor/jumlah soal}) \times 100 \%$$

Arti TP yang Anda peroleh adalah sebagai berikut :

90 % - 100 % = baik sekali.

80 % - 89 % = baik

70 % - 79 % = cukup

< 70 % = rendah.

Apabila TP Anda  $\geq 80 \%$ , maka Anda boleh melanjutkan pada materi KB 2, dan Selamat !!,

Tetapi jika TP Anda  $< 80 \%$ , Anda harus mengulang materi KB-1 di atas terutama bagian-bagian yang belum Anda kuasai.



### Kunci Jawaban Tes Formatif 1.

1. Semikonduktor intrinsik (murni) adalah semikonduktor yang hanya terbuat dari satu jenis unsur kimia dan belum dikotori oleh atom lain. Contoh Si dan Ge. (skor = 0,5)
2. Semikonduktor ekstrinsik adalah semikonduktor murni yang dicampur (dikotori) oleh atom-atom lain yang berasal baik dari golongan III-A ataupun dari golongan V-A. (skor = 0,5).
3. Semikonduktor ekstrinsik tipe-P. (skor = 0,5)
4. Semikonduktor ekstrinsik tipe-N. (skor = 0,5)
5. Elektron, hole, dan fonon. (skor = 0,5)

6.  $m^* = \hbar^2 \frac{1}{d^2E/dk^2}$ . (skor = 1)

7. Karena  $m^* = \hbar^2 \frac{1}{d^2E/dk^2}$ , dan  $E(k) = \hbar^2 k^2/2m$ , serta  $d^2E/dk^2 = \hbar^2/m$ , maka massa

efektifnya adalah:

$$m^* = \hbar^2 (m/\hbar^2)$$

$$m^* = m.$$

$$(skor = 1,5)$$

8. a.  $\mathbf{k}_h = -\mathbf{k}_e$   
b.  $E_h(k_h) = -E_e(k_e)$ .  
c.  $v_g(h) = v_g(e)$   
d.  $m_h^* = -m_e^*$   
e.  $F_h = -F_e$ . (skor = 1)

9. Diketahui :  $E_g = 1,1 \text{ eV}$ .

$$T = 300 \text{ K}$$

$$m_e = 2 m_h$$

$$k_B = 8,61 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$\hbar = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J.det} = (1,055/1,6) \times 10^{-15} \text{ eV.det} = 6,59 \times 10^{-16} \text{ eV.det}$$

Ditanyakan : konsentrasi elektron (n)

Jawab :

substitusikan nilai-nilai tersebut di atas ke dalam persamaan berikut:

$$n = 2 \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_e \cdot m_h)^{3/4} \exp(-E_g/k_B T). \text{ (Skor} = 2)$$

10. Diketahui :  $E_g = 0,7 \text{ eV}$ .

$$T = 500 \text{ K}$$

$$m_e = 5 m_h = 0,5 m$$

$$k_B = 8,61 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$\hbar = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J.det} = (1,055/1,6) \times 10^{-15} \text{ eV.det} = 6,59 \times 10^{-16} \text{ eV.det}$$

Ditanyakan : konsentrasi hole (p)

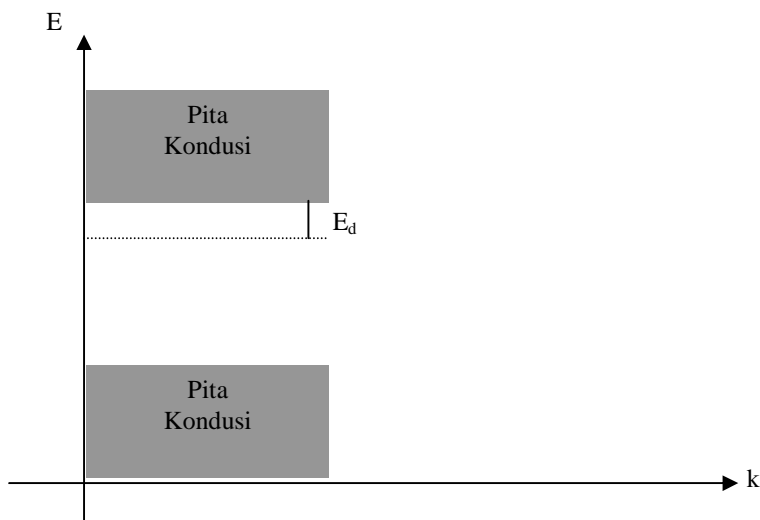
Jawab:

Substitusikan nilai-nilai tersebut di atas ke dalam persamaan berikut:

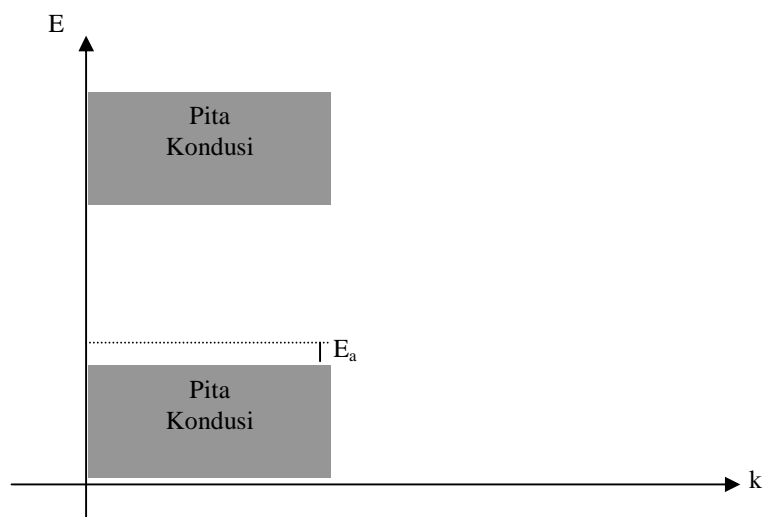
$$p = 2 \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_e \cdot m_h)^{3/4} \exp(-E_g/k_B T). \text{ (skor} = 2)$$

### Kunci Jaaban Tes Formatif 2

1. Atom dari golongan V-A. Contoh : P, As, Sb, dan Bi. (skor = 1)
2. Atom dari golongan III-A. Contoh : Al, Ga, In, dan Tl. (skor = 1)
3. Letak tingkat energi atom donor adalah sedikit di bawah pita konduksi. (skor = 2,5)



4. Letak tingkat energi atom donor adalah sedikit di bawah pita konduksi. (skor = 2,5)



5. Diketahui  $m_e = 0,3 \text{ m}$

$$\epsilon = 15,8$$

Ditanyakan  $E_d$ .

Jawab: Substitusikan nilai-nilai tersebut di atas ke dalam persamaan berikut:

$$E_d = (1/\epsilon^2) \left( \frac{m_e}{m} \right) \left( \frac{e^4 m}{2\hbar^2} \right) - \text{dalam CGS}$$

$$= (1/15,8)^2 (0,3) (13,6) \text{ eV}$$

$$= 0,0163 \text{ eV} = 16,3 \text{ meV.}$$

## **Daftar Pustaka**

1. Charle Kittel, Introduction to Solid State Physics, sixth ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986.
2. R. K. Puri dan V. K. Babbar, Solid State Physics, S. Chand & Company Ltd., Ram Nagar, New Delhi, 1997.
3. M. A. Omar, Elementary Solid State Physics, Addison-Wesley Publ. Company, London, 1975.
4. Ashcroft/Mermin, Solid State Physics, Saunders College, Philadelphia, 1976.