

Pemanfaatan Devais Kristal Germanium Dan Silikon Dalam Perkembangan Alat-Alat Elektronik

Konferensi: 16 September 2023

Publish: 4 Desember 2023

Abstrak

Telah dilakakuan analisis penjararan elektron dalam kristal Germanium (Ge) dan kristal Silikon (Si) dengan menggunakan persamaan keadaan dengan asumsi partikel tidal berinteraksi. Dari analisis tersebut diperoleh : (1) energi penjararan elektron dalam kristal, tanpa empurity (tidak ada atom asing di dalam kristal) energi semakin besar apabila bilangan gelombangnya semakin besar, (2) besarnya massa efektif elektron tergantung dari arah penjararannya di dalam kristal, artinya semakin besar jarak atom dalam molekul maka massa efektif elektron semakin kecil dan semakin dekat jarak antar atom maka makin kecil massa efektifnya. Hasil temuan ini dapat dimanfaatkan oleh industri elektronik untuk menghasilkan alat-alat elektronik dengan kualitas tinggi.

Kata kunci : elektronik, germanium, silikon, massa efektif elektron, energi.

Muh. Tawil^{1*}

¹Program Studi Pendidikan IPA, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar

*email; muh.tawil@unm.ac.id

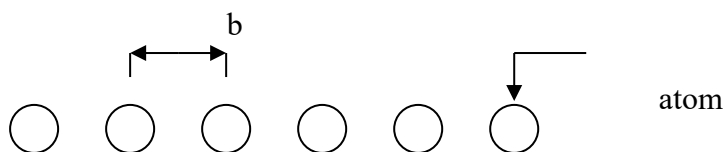
PENDAHULUAN

Telah diketahui bahwa elektron di dalam logam khususnya pada kristal Germanium (Ge) dan Silikon (Si) dapat bergerak dari suatu titik ke titik lain karena adanya pengaruh dari luar seperti misalnya tegangan tertentu. Gerak elektron di dalam kristal ini dapat dianggap bergerak bebas atau dapat dikatakan sebagai elektron bebas walaupun dalam hal ini ada interaksi antara satu elektron dengan elektron lainnya.

Penjalaran elektron dapat terjadi dalam satu dimensi, dua dimensi dan tiga dimensi, dengan melalui sistem n keadaan maka dapat diungkapkan tentang **penjalaran** elektron tersebut, walaupun dalam tulisan ini hanya diungkapkan perpindahan elektron pada tetangga terdekatnya. Demikian pula dengan melalui persamaan sistem dengan n keadaan ini dapat diperoleh **massa efektif** elektron (m^*) yang menjalar di dalam kristal, ternyata ditentukan oleh arah rambatan elektron tersebut.

Akhirnya dengan mengetahui konsep tentang persamaan sistem dengan n keadaan, maka dapat digunakan dalam cakupan yang lebih luas, seperti misalnya pemecahan perpindahan elektron pada tetangga terdekat dan tetangga terjauh, penjalaran elektron dalam kristal cacat, dan penjalaran elektron dalam sistem disorder.

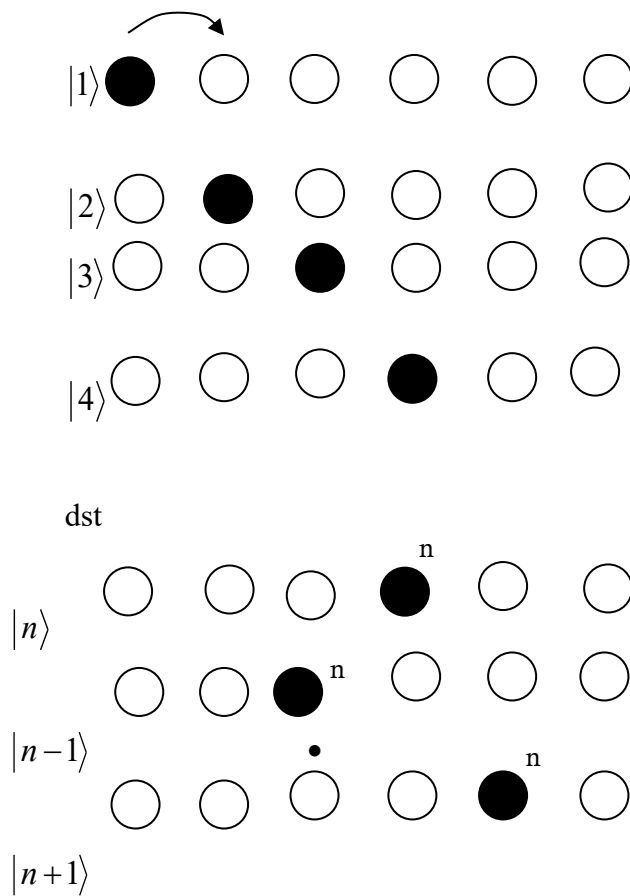
Tinjaulah suatu keadaan dimana atom-atom terletak dalam suatu garis lurus. Hal ini dapat dinyatakan seperti pada gambar 1.1. berikut ini.



Gambar 1. Susunan atom dalam bentuk satu dimensi

Elektron-elektron valensi dari atom-atom dalam kristal bisa berpindah-pindah dari atom yang satu ke atom yang lain mentransfer ion negatif ke tempat lain.

Elektron dapat melompat ke tetangga terdekatnya atau melompat melewati tetangga terdekat. Seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Sistem n keadaan

Keadaan untuk sistem dengan n keadaan dinyatakan dengan persamaan.

$$|\alpha, t\rangle = \sum_n C_n(t) |n\rangle \quad (1)$$

$$i\hbar \frac{dC_n}{dt} = \sum_{k,n} H_{kn} C_n \quad (2)$$

persamaan (1-2) dapat dinyatakan sebagai.

$$i\hbar \frac{dC_n}{dt} = E_o C_n - AC_{n-1} - AC_{n+1} \quad (3)$$

dalam hal ini

C_n , C_{n-1} , dan C_{n+1} adalah amplitudo kemungkinan untuk transisi elektron terdekat.

$\left| \frac{A}{\hbar} \right|^2$ kemungkinan transisi ke tetangga terdekat persatuan waktu.

Sedangkan untuk keadaan $|n-1\rangle$ dan keadaan $|n+1\rangle$ dapat dinyatakan sebagai.

$$i\hbar \frac{dC_{n-1}}{dt} = E_o C_{n-1} - AC_{n-2} - AC_{n-3} \quad (4)$$

dan

$$i\hbar \frac{dC_{n+1}}{dt} = E_o C_{n+1} - AC_n - AC_{n+2} \quad (5)$$

untuk menyelesaikan persamaan (3) maka digunakan nilai eigen dari fungsi tersebut.

$$C_n = a_n e^{-i\omega t} \quad (6)$$

dengan mensubstitusi persamaan (6) ke persamaan (1) maka didapat persamaan

$$E a_n = E_o a_n - A a_{n-1} - A a_{n+1} \quad (7)$$

Dalam hal ini $E = \omega \hbar$, pada persamaan (7) dapat pula dinyatakan sebagai berikut.

$$E a(x_n) = E_o a(x_n) - A a(x_{n+1}) - A a(x_{n-1}) \quad (8)$$

Untuk $X_n = bn$, maka koefisien persamaan (1-8) dapat dinyatakan sebagai

$$\begin{aligned} a_n &= a(x_n) = \exp(ikx_n) \\ a_{n+1} &= a(x_{n+b}) = \exp(ikx_{(n+b)}) \\ a_{n-n} &= a(x_{n-1}) = \exp(ikx_{(n-b)}) \end{aligned}$$

Solusi persamaan (8) adalah

$$E(k) = E_o - 2A \cos(kb) \quad (9)$$

Persamaan (6) dapat dinyatakan sebagai persamaan gelombang datar, yakni

$$C_n = e^{i(kx_n - \omega t)} \quad (10)$$

ω nilai ini tidak boleh sebarang, ia harus memenuhi persamaan. Persamaan (9) apabila memenuhi $|kb| < 1$, maka diperoleh.

$$\cos(kb) = 1 - \frac{(kb)^2}{2} + \dots \quad (11)$$

sehingga persamaan (9) menjadi

$$E(k) = (E_o - 2A) + Ak^2 b^2 \quad (12)$$

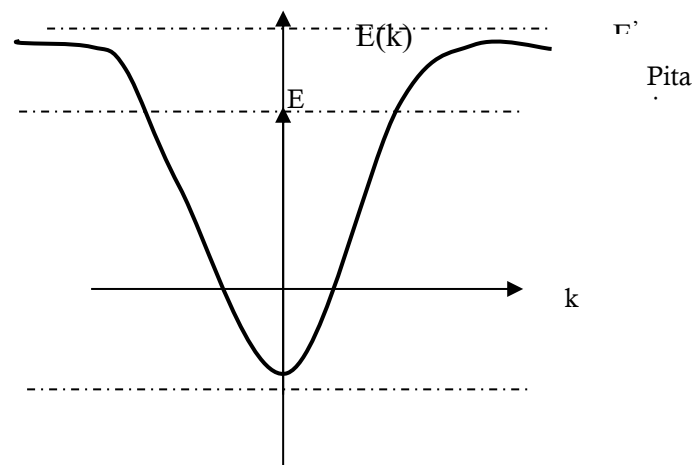
Persamaan (12) dapat dinyatakan sebagai

$$E(k) = \text{konstanta} + \frac{k^2 \hbar^2}{2m^*} \quad (13)$$

dalam hal ini : $\frac{\hbar^2}{2m^*} = b^2 A$, m^* adalah massa efektif elektron. Secara fisis elektron di

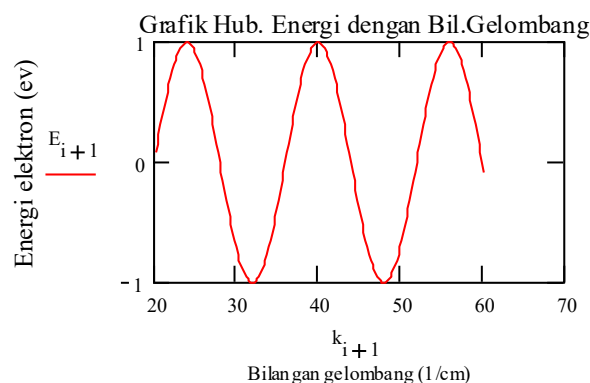
dalam kristal dapat dianggap sebagai elektron bebas, dengan massa efektif m^* , massa elektron tidak lagi sama dengan massanya semula, karena adanya interaksi elektron dengan atom interaksinya terkandung dalam A (kemungkinan interaksi). Walaupun ada interaksi kelakuan elektron tetap seperti elektron bebas.

Selanjutnya apabila yang ditinjau kristal sempurna maka tidak ada hambatan listrik dan sebaliknya apabila kristal yang ditinjau adalah kristal cacat (terdapat atom-atom asing) maka akan timbul hambatan listrik. Dalam hal ini apabila potensialnya berbeda maka massa efektifnya berbeda pula. Massa efektif menggambarkan kelakuan elektron yang bergerak. Untuk gerak elektron dalam kristal satu dimensi, hubungan antara energi terhadap bilangan gelombang adalah sebagai berikut.

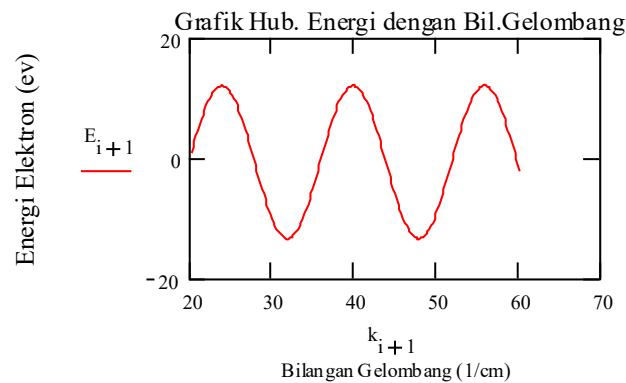


Gambar 3. Hubungan antara energi elektron bebas terhadap bilangan gelombang

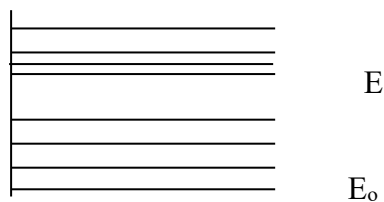
Elektron diizinkan berada pada pita energi dalam potensial. Kemungkinan meloncatnya elektron ada dua jenis, yakni dari keadaan dasar ke keadaan dasar dan dari keadaan dasar ke keadaan eksitasi. Pada gambar 4 s.d gambar 7 menunjukkan sifat kelakuan elektron bebas di dalam kristal.



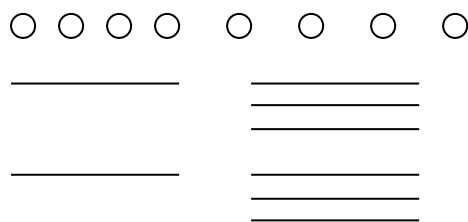
Gambar 4. Loncatan elektron dari keadaan dasar ke keadaan dasar dengan energi sekitar E_0



Gambar 5. Loncatan elektron dari keadaan dasar ke keadaan eksitasi



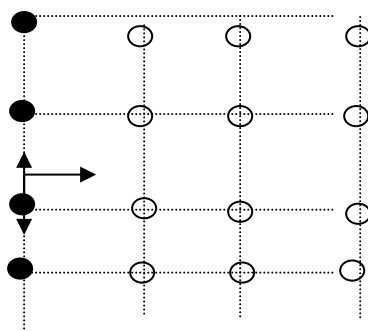
Gambar 6. Pita-pita pada tingkat eksitasi dari tingkat dasar



Gambar 7. Atom-atom yang berdekatan menimbulkan pelebaran pita energi

Pelebaran pita-pita energi timbul disebabkan karena beberapa atom letaknya saling berdekatan, sehingga terdapat interaksi antara elektron dengan inti atom yang lain disekitarnya.

Penjalaran elektron dua dimensi dapat digambarkan model penjalarannya seperti berikut ini.



Gambar 8. Model penjalaran elektron dua dimensi

Panjang sisi sama, maka dapat ditulis persamaan dalam bentuk dua keadaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} |n_x, n_y\rangle \\ b n_x &= X_{nx} \\ b n_y &= Y_{ny} \end{aligned} \quad (14)$$

Selanjutnya persamaan untuk gerak elektron dua dimensi dapat dinyatakan sebagai.

$$C(X_n, Y_m, t) = C_{nm} \text{ atau} \quad (15)$$

$$i\hbar \frac{dC_{nm}}{dt} = \sum_{n,m} H_{nm} C_{nm} \quad (16)$$

solusi persamaan (16) adalah.

$$E = E_0 - 2A \cos(bk_x) - 2A \cos(ak_y) \quad (17)$$

Untuk, $bk_x < 1$ dan $ak_y < 1$, maka dari persamaan (17) diperoleh persamaan.

$$\cos(bk_x) = 1 - \frac{(bk_x)^2}{2!} + \dots \quad (19)$$

$$\cos(bk_y) = 1 - \frac{(bk_y)^2}{2!} + \dots$$

selanjutnya persamaan (16) menjadi

$$E(k_x, k_y) = \text{konstanta} + A(ak_x)^2 + A(bk_y)^2 \quad (20)$$

Atau

$$E = \text{konstanta} + \frac{(k_x \hbar)^2}{2m_x^*} + \frac{(k_y \hbar)^2}{2m_y^*} \quad (21)$$

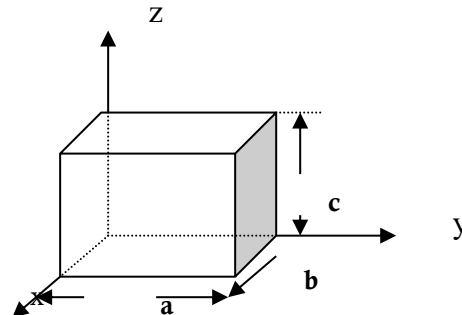
dalam hal ini berlaku

$$\begin{aligned} Aa^2 &= \frac{\hbar^2}{2m_x^*} \quad \text{atau} \quad m_x^* = \frac{\hbar^2}{Aa^2} \\ Ab^2 &= \frac{\hbar^2}{2m_y^*} \quad \text{atau} \quad m_y^* = \frac{\hbar^2}{Ab^2} \end{aligned} \quad (22)$$

dalam hal ini m_x^* adalah massa efektif dalam arah x dan m_y^* adalah massa efektif dalam arah y.

Berdasarkan dari persamaan (22) terlihat bahwa massa efektif bergantung pada arah penjaran elektron, artinya makin besar jarak atom dalam molekul maka massa efektif elektron semakin kecil dan semakin dekat jarak antar atom maka makin kecil massa efektifnya.

Penjalaran elektron dalam kristal dalam tiga dimensi dapat digambarkan model penjalarannya seperti berikut ini.



Gambar 9. Model penjalaran elektron tiga dimensi

Elektron dianggap berada pada titik O dan mempunyai kemungkinan bergerak terhadap sumbu (x,y,z) dan sisi a,b,dan c. Dalam hal ini berlaku persamaan berikut ini.

$$C(x_n, y_n, z_p, t) = C_{nmp} \quad (23)$$

Atau dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$i\hbar \frac{dC_{nmp}}{dt} = \sum_{nmp} |H_{nmp}| C_{nmp} \rangle \quad (24)$$

solusi persamaan (24) adalah :

$$E(k_x, k_y, k_z) = E_0 - 2A \cos(ak_x) - 2A \cos(bk_y) - 2A \cos(ck_z) \quad (25)$$

Untuk : $ak_x < 1$; $bk_y < 1$; dan $ck_z < 1$, maka persamaan (1-25) menjadi.

$$E(k_x, k_y, k_z) = \text{kons} \tan t a + \frac{(ak_x)^2}{2m_x^*} + \frac{(bk_y)^2}{2m_y^*} + \frac{(ck_z)^2}{2m_z^*} \quad (26)$$

dalam hal ini berlaku :

$$\begin{aligned} Aa^2 &= \frac{\hbar^2}{2m_x^*} \quad \text{atau} \quad m_x^* = \frac{\hbar^2}{Aa^2} \\ Ab^2 &= \frac{\hbar^2}{2m_y^*} \quad \text{atau} \quad m_y^* = \frac{\hbar^2}{Ab^2} \end{aligned} \quad (27)$$

$$Ac^2 = \frac{\hbar^2}{2m_z^*} \quad \text{atau} \quad m_z^* = \frac{\hbar^2}{Ac^2}$$

METODE

Penelitian ini menggunakan metode analisis numerik dengan tahapan: 1) mengidentifikasi parameter-parameter persamaan gerak elektron, 2) menyelesaikan persamaan keadaan penjalaran elektron di kristal si dan Ge secara eksak, 3) menguji coba data-data ke dalam persamaan keadaan penjalaran elektron di kristal si dan Ge secara eksak, dan 4) menganalisis hasil numerik penjalaran elektron satu, dua, dan tiga dimensi.

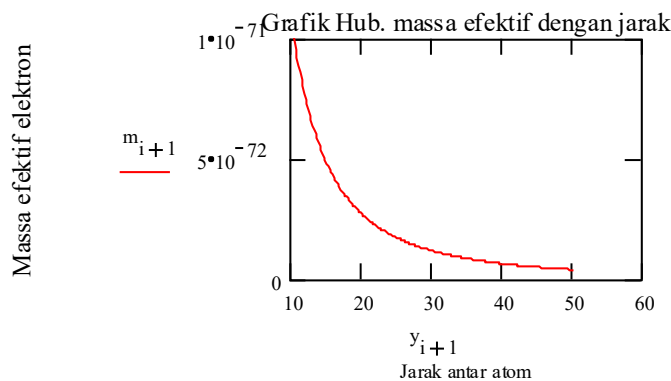
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

Program yang digunakan dalam menganalisis penjalaran elektron bebas pada kristal Germanium dan Silikon dengan menggunakan program Matcad 7.0 dengan menggunakan iterasi 20 dan konstanta-konstanta yang digunakan adalah : untuk $\hbar = 6.579 \times 10^{-26}$ ev, massa * (Ge) = 0.082 m_o , $m^*(Si) = 11.19m_o$ (m_o = massa diam elektron 9.11×10^{-28} gram).

1. Analisis hubungan antara massa efektif dengan jarak penjalaran elektron

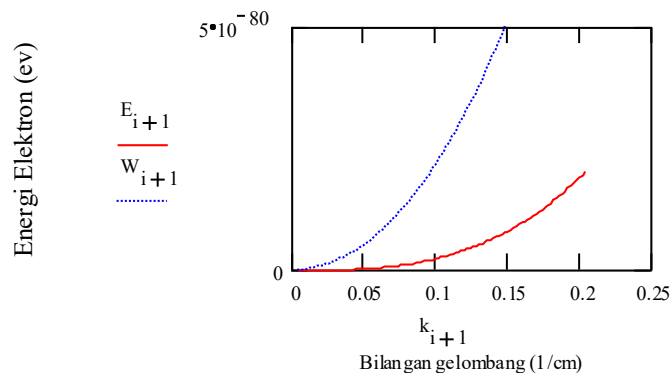
Dalam analisis ini ditunjukkan secara umum hubungan antara massa efektif terhadap jarak penjalaran elektron bebas di dalam kristal.



Gambar 10. Grafik hubungan antara massa efektif terhadap jarak penjalaran elektron

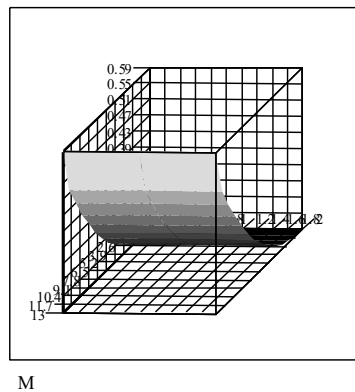
2. Analisis hubungan antara energi penjalaran elektron dengan bilangan gelombang pada penjalaran satu dimensi.

Dalam analisis ini menggunakan konstanta-konstanta yang telah disebutkan sebelumnya. Pada gambar 11 menunjukkan hasil analisis hubungan antara energi elektron bebas dengan bilangan gelombang pada penjalaran elektron satu dimensi baik pada kristal germanium maupun pada kristal **silikon**. Untuk kristal germanium ditunjukkan dengan garis merah dan kristal silikon dengan garis biru.



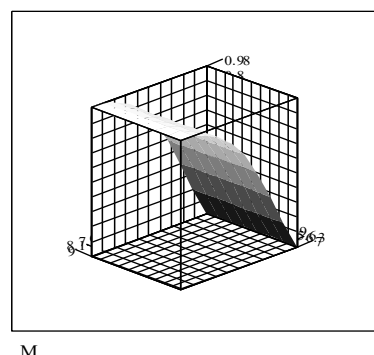
Gambar 11. Hubungan antara energi penjalaran elektron dengan bilangan gelombang

- Analisis hubungan antara energi penjalaran elektron dengan bilangan gelombang pada kristal **germanium** dalam dua dimensi



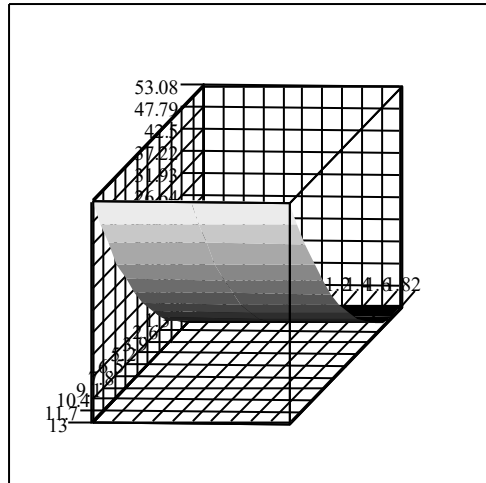
Gambar 12. Hubungan antara energi penjalaran elektron dengan bilangan gelombang 2 dimensi (Germanium)

- Analisis hubungan antara energi penjalaran elektron dengan bilangan gelombang dalam dua dimensi untuk kristal **silikon**



Gambar 13. Hubungan antara energi penjalaran elektron dengan bilangan gelombang

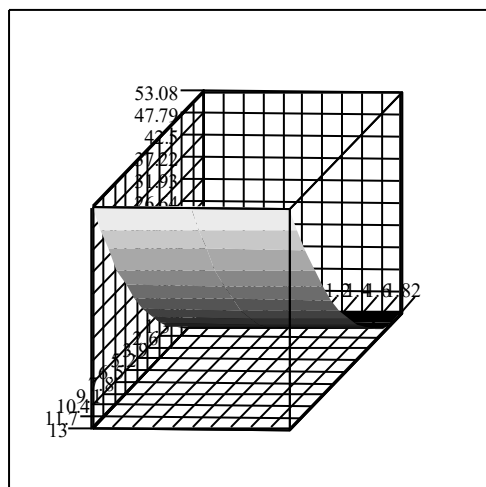
5. Analisis hubungan antara energi elektron bebas dengan bilangan gelombang pada penjaran tiga dimensi dimensi untuk kristal **germanium**.



M

Gambar 14. Hubungan antara energi penjaran elektron dengan bilangan gelombang

6. Analisis hubungan antara energi elektron bebas dengan bilangan gelombang pada penjaran tiga dimensi dimensi untuk kristal **silikon**.



M

Gambar 15. Hubungan antara energi penjaran elektron dengan bilangan gelombang

B. Pembahasan

Berdasarkan dari hasil analisis tersebut di atas pada gambar 1.10 terlihat bahwa massa efektif bergantung pada arah penjalaran elektron, artinya makin besar jarak atom dalam molekul maka massa efektif elektron semakin kecil dan semakin dekat jarak antar atom maka makin kecil massa efektifnya. Demikian pula diperoleh bahwa penjalaran elektron baik pada satu dimensi, dua dimensi dan tiga dimensi menunjukkan bahwa penjalaran elektron pada kristal silikon kenaikan energi penjalarannya terhadap bilangan gelombangnya lebih cepat dibandingkan dengan energi penjalaran elektron pada kristal germanium, atau dengan kata lain bahwa energi penjalaran elektron di dalam kristal semakin besar apabila bilangan gelombangnya semakin besar. Hal ini dapat dimengerti, karena massa efektif elektron semakin kecil apabila jarak antar atom semakin besar, menyebabkan energinya semakin besar karena bilangan gelombangnya semakin besar.

SIMPULAN

Penjalaran elektron di dalam kristal tanpa cacat dapat diungkapkan dengan melalui persamaan sistem dengan n keadaan. Massa efektif elektron yang menjalar di dalam kristal dipengaruhi oleh arah rambatannya dan energi penjalaran elektron dipengaruhi oleh bilangan gelombang. Temuan ini dapat dimanfaatkan oleh industri elektronik dalam pengembangan alat-alat elektronik.

DAFTAR PUSTAKA

- Davydov, A.S. 1973. *Quantum Mechanics*. Pergamon Press. Oxford New York. Toronto. Sydney. Paris Frankfurt.
- Feynman, R. C, Robert B. Leighton, and Matthew Sand. 1965. *Lecture On Physics, Quantum Mechanics*. Addison- Wesley.
- Reka Rio,S & Masamori. 1982. *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*. P.T. Pradya Paramita: Jakarta.