

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

Second Semester Examination
Academic Session 2006/2007

April 2007

ZAT 389E/3 - Low Dimensional Semiconductor Structures
[Struktur Semikonduktor Dimensi Rendah]

Duration: 3 hours
[Masa : 3 jam]

Please ensure that this examination paper contains **SEVEN** printed pages before you begin the examination.

[Sila pastikan bahawa kertas peperiksaan ini mengandungi TUJUH muka surat yang bercetak sebelum anda memulakan peperiksaan ini.]

Instruction: Answer any **FOUR** questions. Students are allowed to answer all questions in Bahasa Malaysia or in English.

Arahan: Jawab mana-mana **EMPAT** soalan. Pelajar dibenarkan menjawab semua soalan sama ada dalam Bahasa Malaysia atau Bahasa Inggeris.]

1. (a) The lowest energy band for a nearly free electron in a one-dimensional lattice with lattice constant a is given by
[Jalur tenaga paling rendah bagi elektron hampir bebas di dalam kekisi satu-dimensi dengan pemalar kekisi a diberi oleh]

$$E(k) = \frac{1}{2}W(1 + \cos ka)$$

where k is the electron wave vector and W is the full width energy of the band in the first Brillouin zone.

[dengan k ialah vektor gelombang elektron dan W ialah lebar penuh tenaga bagi jalur di dalam zon Brillouin pertama.]

- (i) Draw this energy band in the first Brillouin zone.
[Lukiskan dengan jelas jalur tenaga ini di dalam zon Brillouin pertama.]
- (ii) Determine an equation for the effective mass of the electron throughout the band.
[Tentukan persamaan jisim berkesan elektron bagi keseluruhan jalur.]
- (iii) Show that a broad band produces a small effective mass.
[Tunjukkan bahawa satu jalur yang lebar menghasilkan jisim berkesan yang kecil.]

(30/100)

- (b) (i) Discuss the arrangement of atoms in an AlAs semiconductor.
[Bincangkan susunan atom-atom di dalam semikonduktor AlAs.]
- (ii) Discuss the meaning of a monolayer in the AlAs structure if its lattice constant at room temperature is 5.6611 \AA .
[Terangkan dengan jelas maksud satu monolapisan di dalam struktur AlAs tersebut jika pemalar kekisinya pada suhu bilik ialah 5.6611 \AA .]

(20/100)

- (c) A rectangular Bravais lattice has lattice constants $\pi \text{ \AA}$ ($+x$ direction) and $\frac{\pi}{2} \text{ \AA}$ ($+y$ direction).
[Satu kekisi Bravais segiempat tepat mempunyai pemalar-pemalar kekisi $\pi \text{ \AA}$ (arah $+x$) dan $\frac{\pi}{2} \text{ \AA}$ (arah $+y$).]

- (i) Draw the first Brillouin zone for this Bravais lattice.
[Lukiskan dengan jelas zon Brillouin pertama bagi kekisi Bravais ini.]
- (ii) Determine the energy for a free electron at the center, at an edge (boundary) and at a corner of the first Brillouin zone.
[Tentukan tenaga bagi elektron bebas di pusat, di satu pinggir (sempadan) dan satu pepenjuru zon Brillouin pertama tersebut.]
- (iii) Draw accurate energy bands for a free electron moving from the center to an edge (boundary), then to a corner and back to the center of the first Brillouin zone.
[Lukiskan dengan jelas perubahan tenaga elektron bebas apabila ia bergerak dari pusat ke satu pinggir (sempadan), kemudian ke satu pepenjuru dan seterusnya kembali ke pusat zon Brillouin pertama.]
- (iv) Draw and discuss the shape of equivalent energy curves if the electron is now nearly free.
[Lukis dan bincangkan bentuk lengkung tenaga yang setara jika elektron tersebut adalah hampir bebas.]

(50/100)

2. (a) The first Brillouin zone of $Al_xGa_{1-x}As$ is a truncated octahedron with Γ at the center of the zone, X at the center of a square surface of the zone in the [100] direction and L at the center of a hexagonal surface of the zone in the [111] direction. Discuss the variation of the energy gaps at Γ , X and L when the Al composition changes from zero to unity.
[Zon Brillouin pertama $Al_xGa_{1-x}As$ ialah satu oktahedron terpankang dengan Γ berada di pusat zon, X berada di tengah permukaan segiempat sama zon dalam arah [100] dan L berada di tengah permukaan heksagon zon dalam arah [111]. Bincangkan perubahan jurang tenaga di Γ , X dan L apabila komposisi Al berubah dari sifar ke uniti.]
- (b) Discuss the types of native point defects in a binary semiconductor AB and explain how they can change the optoelectronic properties.
[Bincangkan jenis-jenis kecacatan titik asli di dalam satu semikonduktor binari AB dan jelaskan bagaimana mereka dapat menukar ciri-ciri optoelektronik.]
- (c) The energy band gap for a ternary alloy semiconductor of $Al_xGa_{1-x}Sb$ at Γ point is given as
[Jurang jalur tenaga bagi aloi ternari semikonduktor $Al_xGa_{1-x}Sb$ pada titik Γ diberi sebagai]

(20/100)

(20/100)

$$E_g(x) = 0.726 + 1.129x + 0.368x^2 \quad (\text{eV})$$

Determine the wavelength and the colour of light that could be emitted by a light emitting diode of this type if $x = 0.10$.

[Tentukan jarak gelombang dan warna cahaya yang mungkin dapat dipancarkan oleh diod pemancar cahaya jenis ini jika $x = 0.10$.]

(20/100)

- (d) The lattice constants for $GaAs$, InP and $InAs$ are 5.6419 \AA , 5.8687 \AA dan 6.0584 \AA , respectively.

[Pemalar-pemalar kekisi bagi $GaAs$, InP dan $InAs$ masing-masing ialah 5.6419 \AA , 5.8687 \AA dan 6.0584 \AA .]

- (i) Draw on the same graph the changes in lattice constants for alloys of $In_xGa_{1-x}As$ dan $InAs_xP_{1-x}$ as a function of x .

[Lukiskan perubahan pemalar kekisi bagi aloi $In_xGa_{1-x}As$ dan $InAs_xP_{1-x}$ sebagai fungsi x di atas graf yang sama.]

- (ii) Discuss the possibilities of growing a thin film of $InAs_xP_{1-x}$ on a substrate of $In_xGa_{1-x}As$ without the introduction of significant strains.

[Bincangkan kemungkinan memumbuh saput tipis $InAs_xP_{1-x}$ di atas substrat $In_xGa_{1-x}As$ tanpa kewujudan tegasan yang ketara.]

(40/100)

3. (a) Describe the important components of a Molecular Beam Epitaxy reactor and their functions in the growth of semiconductor thin films.

[Perihalkan komponen-komponen penting bagi satu reaktor Epitaksi Alur Molekul dan fungsi-fungsi mereka dalam penumbuhan saput tipis semikonduktor.]

(20/100)

- (b) Explain Anderson's Rule for the alignment of energy bands at a semiconductor heterojunction.

[Terangkan dengan jelas Peraturan Anderson bagi penjajaran jalur tenaga pada satu heterosimpang semikonduktor.]

(20/100)

- (c) Table 1 shows the electron affinity χ and the energy gap E_g at 300 K for binary semiconductors of $GaSb$, $AlSb$ and $InAs$.

[Jadual 1 menunjukkan afiniti elektron χ dan jurang tenaga E_g pada 300 K bagi semikonduktor binari $GaSb$, $AlSb$ dan $InAs$.]

Table 1 [Jadual 1]

| Semiconductor [Semikonduktor] | Electron Affinity (eV) [Afiniti Elektron (eV)] | E_g at 300 K (eV) [E_g pada 300 K (eV)] |
|----------------------------------|---|---|
| GaSb | 4.06 | 0.75 |
| AlSb | 3.65 | 1.62 |
| InAs | 5.05 | 0.35 |

- (i) What are the values of the band offsets in the conduction and valence bands for heterojunctions of GaSb-AlSb, AlSb-InAs and InAs-GaSb?

[Berapakah offset jalur bagi jalur konduksi dan jalur valens bagi heterosimpang-heterosimpang GaSb-AlSb, AlSb-InAs dan InAs-GaSb?]

- (ii) Draw and identify the types of band alignments for these heterojunctions.

[Lukis dan camkan jenis penjajaran jalur bagi heterosimpang-heterosimpang tersebut.]

(40/100)

- (d) An active layer of Si_xGe_{1-x} semiconductor was found to have a larger lattice constant along the growth direction when deposited on a particular substrate. Discuss the behaviour of its valence bands as a function of the wavevector k .

[Satu lapisan aktif semikonduktor Si_xGe_{1-x} diketahui mempunyai pemalar kekisi yang lebih besar di sepanjang arah pertumbuhan apabila diendap ke atas satu substrat tertentu. Bincangkan kelakuan jalur valensnya sebagai fungsi vektor gelombang k .]

(20/100)

4. (a) The total energy for electrons that are free to move in the x - y plane of an infinitely deep square quantum well (potential energy depends only on the z coordinate) is given as

[Jumlah tenaga bagi elektron yang bebas bergerak dalam satah x - y satu perigi kuantum segiempat sama tak terhingga dalam (tenaga keupayaan hanya bersandar kepada koordinat z) diberi sebagai]

$$E_n(k) = \varepsilon_n + \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

where $n (= 1, 2, 3 \dots)$ is the subband index, ε_n is the energy of a n bound state in the z direction, and $k (= k_x, k_y)$ is the electrons wave vector.

[dengan $n (= 1, 2, 3 \dots)$ ialah indeks subjalur, ε_n ialah tenaga bagi satu keadaan terikat n dalam arah z , dan $k (= k_x, k_y)$ ialah vektor gelombang elektron.]

Sketch and describe this total energy for the first three subbands in an infinitely deep well of GaAs with width 10 nm (in the z direction) and their corresponding density of states.

[Lukis dan terangkan jumlah tenaga ini bagi tiga subjalur terawal di dalam satu perigi tak terhingga dalam GaAs dengan lebar 10 nm (dalam arah z) dan ketumpatan keadaan mereka yang sepadan.]

(50/100)

- (b) (i) Discuss the energy for electrons which are free to move in one-dimension (such as in a quantum wire) by assuming the confining potential to be a function of $r (= x, y)$ so that the electrons remain free to move along z .

[Bincangkan tenaga bagi elektron yang bebas bergerak dalam satu-dimensi (seperti di dalam satu dawai kuantum) dengan mengangap kemampuan pengurungan sebagai satu fungsi $r (= x, y)$ supaya elektron kekal bebas bergerak dalam arah z .]

- (ii) Draw and describe the density of states of the resulting energy subbands.

[Lukis dan bincangkan ketumpatan keadaan bagi subjalur-subjalur tenaga yang terhasil.]

(50/100)

5. (a) Discuss the Fermi's Golden Rule for a harmonic perturbation given by [Bincangkan Peraturan Emas Fermi bagi usikan harmonik yang diberi sebagai]

$$\hat{V}(t) = 2\hat{V}\cos\omega_0 t = \hat{V}(e^{-i\omega_0 t} + e^{+i\omega_0 t})$$

where \hat{V} is the amplitude and ω_0 is the frequency.

[dengan \hat{V} ialah amplitud dan ω_0 ialah frekuensi.]

(40/100)

- (b) Figure 1 shows energy levels of bound states (with wave functions along z) in a quantum well formed by the conduction bands of a heterostructure.

[Rajah 1 menunjukkan paras-paras tenaga bagi keadaan-keadaan terikat (dengan fungsi-fungsi gelombang di sepanjang z) di dalam satu perigi kuantum yang dibentuk oleh jalur-jalur konduksi satu heterostruktur.]

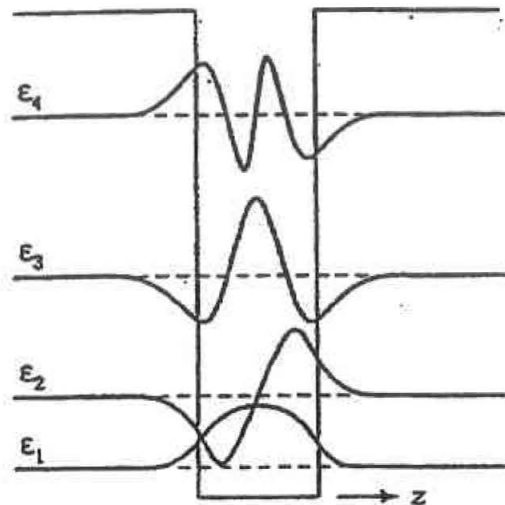


Figure 1 [Rajah 1]

Consider photons propagating in the plane of the well such that its electric field is normal to the quantum well. By considering the matrix element between two bound states in the transition rate equation, show that

[Pertimbangkan foton-foton merambat di dalam satah perigi supaya medan elektriknya adalah normal kepada perigi kuantum. Gunakan unsur matriks di antara dua keadaan terikat dalam persamaan kadar peralihan bagi menunjukkan]

- (i) optical transitions are vertical,
[peralihan-peralihan optik adalah menegak,]
- (ii) absorptions occur at frequencies corresponding to the separation of bound states in the well, and
[penyerapan-penyerapan berlaku pada frekuensi yang sepadan dengan pemisahan keadaan-keadaan terikat di dalam perigi, dan]
- (iii) selection rule for optical absorption is if one state is even the other must be odd.
[petua pemilihan bagi penyerapan optik ialah jika satu keadaan adalah genap maka keadaan yang satu lagi mestilah ganjil.]

(60/100)