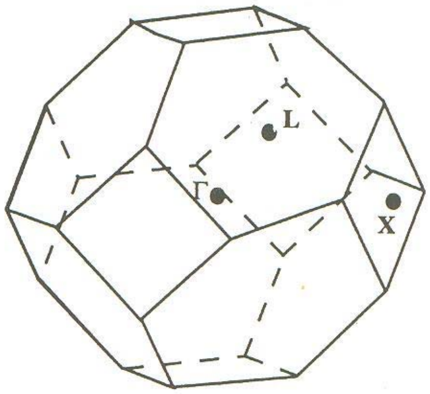
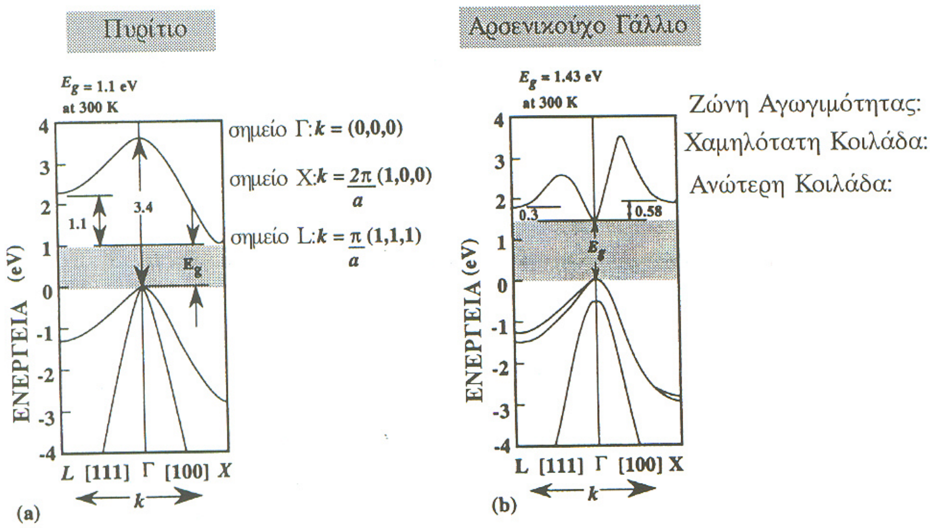




2.1

[**Σημείωση:** Το πρόβλημα θεωρεί παλμό διάρκειας 10 psec. Επίσης ο παλμός εφαρμόζεται στην κατεύθυνση (1,0,0)]

Έστω ότι έχουμε ηλεκτρόνια στη βάση της ζώνης αγωγιμότητας στο πυρίτιο και ένα παλμό ηλεκτρικού πεδίου 10kV/cm κατά μήκος της διεύθυνσης (1,0,0).

Τα ηλεκτρόνια με την απουσία σκέδασης υπακούουν στην σχέση $\hbar * d\mathbf{k} / dt = -e*\mathbf{F}$

Εφόσον το F είναι σταθερό και ίσο με 10kV/cm κατά την διάρκεια του παλμού, τότε στο τέλος του παλμού θα έχουμε:

$\Delta\mathbf{k} = (e*F*\Delta t / \hbar) *\hat{U}_x$ (όπου $\hat{U}_\chi$ το μοναδιαίο διάνυσμα στον άξονα των χ)

Τα ελάχιστα της Ζ.Α. για το Si βρίσκονται στα ακόλουθα σημεία k της ζώνης Brillouin:

$\mathbf{K}_{01} = (0.85*2\pi/\alpha ,0,0)$

$\mathbf{K}_{02} = (0,0.85*2\pi/\alpha ,0)$

$\mathbf{K}_{03} = (0,0,0.85*2\pi/\alpha)$

$\mathbf{K}_{04} = -\mathbf{K}_{01}$

$\mathbf{K}_{05} = -\mathbf{K}_{02}$

$\mathbf{K}_{06} = -\mathbf{K}_{03}$

Έτσι η ενέργεια είναι :

A) Για τα K_{01} , K_{04} $\quad E-E_c = \hbar^2*(\Delta\mathbf{k})^2 / 2m_l$ με $m_l=0{,}98m_0$

B) Για τα K_{02}, $K_{03,}$ K_{05} , K_{06} $\quad E-E_c = \hbar^2*(\Delta\mathbf{k})^2 / 2m_t$ με $m_t=0{,}19m_0$

2.2

Έστω ότι έχουμε φωτόνιο ενέργειας 2eV που προσπίπτει πάνω σε ημιαγωγό. Η ορμή που μεταφέρει το φωτόνιο είναι $p= \hbar*k$

Γνωρίζουμε ότι $k=2\pi/\lambda$ και $\lambda=c/v$

Έτσι $k= 2\pi*v/c = 2\pi*hv / h*c =2eV / \hbar*c$

Το $\hbar*c$ είναι $0.67(meV * psec) * 3*10^8$ m/sec

Άρα $k \approx 10^7$ m^{-1}

Αυτή η τιμή είναι αμελητέα σε σύγκριση με το εύρος της ζώνης Brillouin που είναι $2\pi/\alpha = 2\pi/5.61Å \approx 10^{10}$ m^{-1}.

2.3

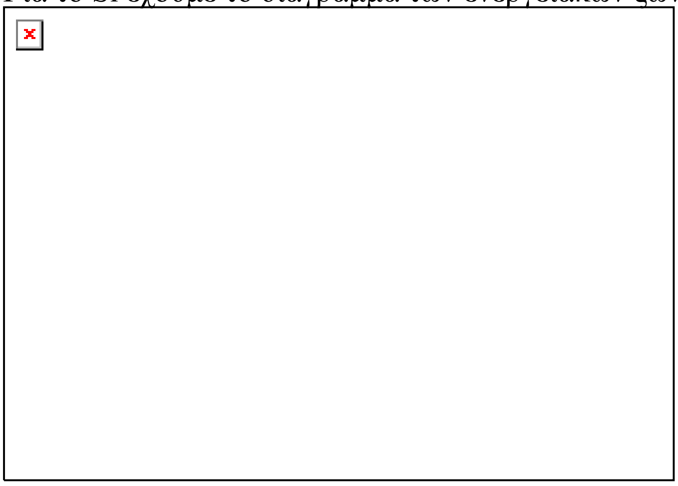
Γνωρίζουμε ότι η ενέργεια που αντιστοιχεί σε φωτόνια με μήκος κύματος 0.5μm είναι $E=h*c/\lambda= 12400eV*Å / 0.5\ \mu m = 2.48eV$

Έτσι ψάχνουμε ημιαγωγούς με ενεργειακό χάσμα μεγαλύτερο από 2.48eV

Από τον πίνακα B5 σελ. 746 παρατηρούμε ότι ο C με ενεργειακό χάσμα 5.5 eV και το SiC με 2.9 eV ικανοποιούν το πρόβλημά μας.

2.4

Για το Si έχουμε το διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών του σχήματος :



Η ζητούμενη διαφορά ορμής αντιστοιχεί στο Δ**k** μεταξύ των άκρων των ΖΣ και ΖΑ για το Si. Έτσι $\Delta \mathbf{k} = (0.85*2\pi/\alpha - 0,\ 0\text{-}0\ ,0\text{-}0) = (0.85*2\pi/\alpha,0,0)$

$[\Delta k] = 0.85 *2\pi / \alpha = 0.95 *10^{10}\ m^{-1}$ με $\alpha = 5.61$ Å (η πλεγματική σταθερά του Si)

2.5

Υποθέτουμε ότι στο συγκεκριμένο ημιαγωγό το ελάχιστο της Ζ.Α. βρίσκεται στο Γ (**k**=0) και ότι η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου είναι $m_e = 0.1m_0$.

Η ενέργεια για $k_e = 0.3Å^{-1}$ είναι :

$E\text{-}E_c = \hbar^2 * k_e^2 / 2\ m_e = 3.6\ eV$ με $m_0 = 0{,}511*10^6\ eV$

Η ηλεκτρονική συγγένεια μας δίνεται ίση με 10eV και αντιστοιχεί στην διαφορά ενέργειας κενού με το άκρο της ΖΑ. Έτσι η ενέργεια του ηλεκτρονίου μετρημένη από την στάθμη του κενού είναι $E= -(10\text{-}3.6)eV = -6.4eV$

2.6

Η πυκνότητα καταστάσεων δίδεται από τον τύπο:

$N(E) = [\sqrt{2} * (m^*)^{3/2} * (E\text{-}E_o)^{1/2}\ ] / \pi^2 \hbar^3$ όπου $E_o = E_C$ ή E_V ανάλογα αν πρόκειται για τη ΖΑ ή ΖΣ.

1. Για το GaAs έχουμε :

Z.A. $m^* = m_e^* = 0.067m_0$

Z.Σ $(m^*)^{3/2} = (m^*_{HH})^{3/2} + (m^*_{LH})^{3/2} = (0.5m_0)^{3/2} + (0.08m_0)^{3/2}$

2. Για το Si έχουμε :

Z.A. $m^* = (m_1*m_2*m_3)^{1/3}$ με $m_1 = 0.98m_0$, και $m_2 = m_3 = 0.19m_0$
Επίσης πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την N(E) με 6 γιατί έχουμε 6 ισοδύναμα ελάχιστα στην ζώνη αγωγιμότητας .
Z.Σ. $(m^*)^{3/2} = (m^*_{HH})^{3/2} + (m^*_{LH})^{3/2} = (0.49m_0)^{3/2} + (0.16m_0)^{3/2}$

3. Για το Ge έχουμε :

Z.A. $m^* = (m_1*m_2*m_3)^{1/3}$ με $m_1 = 1.64m_0$, και $m_2 = m_3 = 0.082m_0$

Z.Σ. $(m^*)^{3/2} = (m^*_{HH})^{3/2} + (m^*_{LH})^{3/2} = (0.29m_0)^{3/2} + (0.044m_0)^{3/2}$

2.7

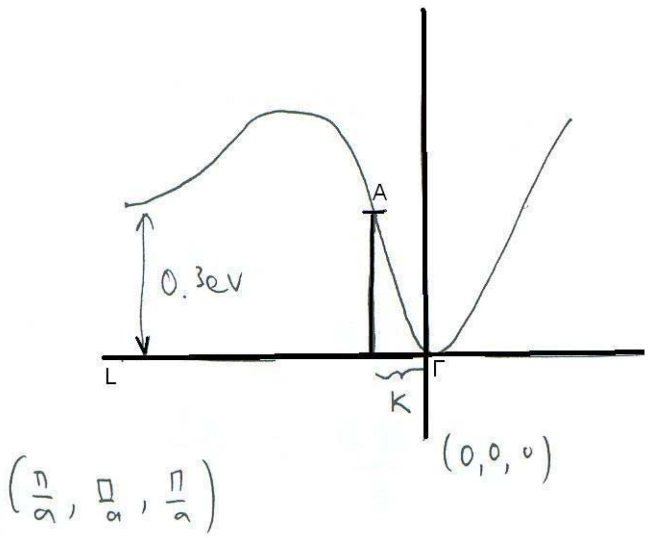
Έστω ότι το κυματοδιάνυσμα ενός ηλεκτρονίου ζώνης αγωγιμότητας στο GaAs είναι **k** = (0.1, 0.1, 0.0) $\AA^{-1}$. Το άκρο της ζώνης αγωγιμότητας είναι στο σημείο (0,0,0)
Έτσι το Δ**k** είναι (0.1, 0.1, 0) $\AA^{-1}$
Άρα η ενέργεια είναι

$E\text{-}E_c = (\hbar^2/2m_e)\,[\Delta k_x^2 + \Delta k_y^2 + \Delta k_z^2]$ με $m_e = 0.067m_0$

2.8

Έχουμε ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στην ζώνη αγωγιμότητας στο Si στην (100) κοιλάδα και έχει διάνυσμα **k** =2π/α (1.0, 0.1, 0.1).
Το άκρο της ζώνης αγωγιμότητας στο Si είναι το $\mathbf{k_0}$ = 2π/α (0.85, 0, 0)
Έτσι το $\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k} - \mathbf{k_0}$ = 2π/α (0.15, 0.1, 0.1)
Οπότε η διαφορά ενέργειας θα είναι :
$E\text{-}E_c = \hbar^2 * \Delta k_x^2 /2m_l + \hbar^2 * \Delta k_y^2 /2m_t + \hbar^2 * \Delta k_z^2 /2m_t$
με $m_l = 0.98m_0$ και $m_t = 0.19m_0$.

2.9



Μετρώντας από το άκρο της ΖΑ, η ενέργεια στο σημείο L του GaAs είναι 0.3eV. Για να έχουμε την ελάχιστη μεταβολή του κυματανύσματος k πρέπει το ηλεκτρόνιο της κοιλάδας Γ να βρίσκεται στην ίδια ενέργεια με το σημείο L .Έτσι θα βρίσκεται στο σημείο Α του γραφήματος.
Γνωρίζουμε ότι στο σημείο Α ισχύει $E-E_c = 0.3eV = ħ^2*k^2 / 2*m_e$ όπου $m_e=0.067m_o$
Έτσι $E-E_c = C * k$ όπου $C = ħ^2/ 2*m_e$
Οπότε το μέτρο του k είναι $[k] = \sqrt{}\,(0.3eV / C)$.

Για να έχουμε την μικρότερη μεταβολή του κυματανύσματος κατά την μετάβαση από το Α στο L, θα πρέπει το Α να βρίσκεται στην διαγώνια κατεύθυνση από το σημείο Γ =(0,0,0) στο σημείο L =π/α*(1,1,1). Με άλλα λόγια θα έχει συνιστώσες (k_1, k_2, k_3) με $k_1=k_2=k_3$. Επίσης πρέπει να ισχύει $k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 = k^2$ ➔
$3* k_1^2 = k^2$ ➔ $k_1 = k/\sqrt{3}$
Επομένως η $\Delta \mathbf{k}_{\mathbf{min}} = (\mathbf{k}_\mathbf{L} – \mathbf{k}_\mathbf{A}) = π/α*(1,1,1) - k/\sqrt{3}*(1,1,1)$

2.10

Η ενέργεια των ηλεκτρονίων στη ΖΑ με κυματοδιάνυσμα k = (0.01, 0.01, 0.01) Ǻ δίδεται από τον τύπο $E-E_c = ħ^2 * Δk^2 / 2m_e$ όπου Δk = (0.01, 0.01, 0.01)Ǻ – (0, 0, 0)Ǻ και m_e οι μάζες $m_{e\ GaAs}= 0.067m_0$ και $m_{e\ InAs}= 0.027m_0$ για κάθε περίπτωση.

2.11

Υποθέτουμε ότι ο παλμός ηλεκτρικού πεδίου 10^4 eV/cm εφαρμόζεται παράλληλα στην κατεύθυνση (- χ).
Γνωρίζουμε ότι για τα ηλεκτρόνια ισχύει:

$ħd\mathbf{k} /dt = -e\mathbf{F}$ => $dk * \hat{U}_x = e*F*dt*\hat{U}_x / ħ$ => $Δt = (ħ / e*F)* Δk$

Το Δk είναι η διαφορά του κυματανύσματος από την βάση της ζώνης αγωγιμότητας στο άκρο της ζώνης Brillouin κατά την διεύθυνση χ. Έτσι $Δ\mathbf{k}$ = 2π/α (1,0,0)
Οπότε Δt = 6.7 psec
[**Σημείωση:** Αφού το ηλεκτρόνιο φτάσει στο σημείο Χ θα επιστρέψει πίσω στο Γ.]