

**ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ – ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**  
**ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΧΕΙΜΕΡΙΝΟΥ ΕΞΑΜΗΝΟΥ 2007-08**  
**Ημιαγωγοί και Ημιαγώγιμες Δομές (7<sup>ο</sup> Εξάμηνο Σπουδών)**

Συνολική Διάρκεια εξέτασης 2,5 ώρες

Δ. Παπαδημητρίου, Ι. Σ. Ράπτης

- 1) Απαντήστε σε 2 θέματα, από τα (1, 2, 3), και στα 4 και 5
- 2) Επιτρέπεται μόνο η χρήση του φυλλαδίου με τις βασικές σχέσεις, που αφορούν το πρώτο μέρος του μαθήματος, και το οποίο διανέμεται μαζί με τα θέματα

**Θέμα 1.** Ημιαγωγός τύπου IV έχει, σε  $T=300K$ , ενεργειακό χάσμα  $E_g=1.2 eV$ , και ενεργές πυκνότητες καταστάσεων:  $N_V = 1 \times 10^{19} cm^{-3}$ ,  $N_C = 4 \times 10^{19} cm^{-3}$ . Η ενδοχασματική κατάσταση προσμείξεων τύπου αποδέκτη απέχει 37.5 meV από το μέγιστο της ζώνης σθένους, και η συγκέντρωση προσμείξεων-αποδεκτών είναι  $N_A = 2 \times 10^{16} cm^{-3}$ . (α) Δείξτε ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου  $kT \ll E_A - E_F$ , η συγκέντρωση φορέων τύπου  $p$  δίνεται, με καλή προσέγγιση, από τη σχέση  $p = \sqrt{\frac{N_V N_A}{2}} \exp\left(-\frac{E_A - E_V}{2kT}\right)$ .

(β) Συνδυάζοντας το, προσεγγιστικό, αποτέλεσμα του ερωτήματος (α) με την γενική μορφή της πυκνότητας φορέων τύπου  $p$ , εκφράστε, για το παραπάνω σύστημα, την τιμή του επιπέδου Fermi, σε χαμηλές θερμοκρασίες, συναρτήσει των  $T, N_V, E_V, N_A, E_A$ . (γ) Προσδιορίστε, για το ίδιο σύστημα, την οριακή τιμή του επιπέδου Fermi, όταν η θερμοκρασία τείνει στους  $0^{\circ}K$ . (δ) Δείξτε ότι, απουσία προσμείξεων, η οριακή τιμή του επιπέδου Fermi, σε χαμηλές θερμοκρασίες, τείνει στο μέσον του ενεργειακού χάσματος. (ε) Σχολιάστε τα αποτελέσματα των ερωτημάτων (γ) και (δ).

**Θέμα 2.** Εστω ότι  $E_{κενού}$  είναι η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου που έχει εξαχθεί από ίνα υλικό (μέταλλο ή ημιαγωγό) και έχει μηδενική ταχύτητα. Ορίζουμε ως έργο εξαγωγής  $\Phi$  του αντίστοιχου υλικού την διαφορά  $\Phi = E_{κενού} - E_{Fermi}$ . Στην περίπτωση του ημιαγωγού ορίζουμε, επιλέον, ως ηλεκτρική συγγένεια  $\chi$  την διαφορά  $\chi \equiv E_{κενού} - E_C$ , όπου  $E_C$  το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας. Θεωρήστε ότι έχετε δημιουργήσει μία ετεροεπαφή ανάμεσα σε ένα μέταλλο και σε έναν ημιαγωγό τύπου- $n$ , με αντίστοιχα έργο εξαγωγής  $\Phi_m$  και  $\Phi_n$ , και ηλεκτρική συγγένεια  $\chi$ . (α) Διατυπώστε τους βασικούς κανόνες που ισχύουν, για τα ενεργειακά μεγέθη, κατά τον ορματισμό της επαφής. (β) Σχεδιάστε ένα ενεργειακό διάγραμμα της ετεροεπαφής, σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, για την περίπτωση  $\Phi_m > \Phi_n$ , σημειώνοντας όλα τα ενεργειακά μεγέθη, και εξηγείστε αν έχουμε ωμική επαφή ή φραγμό Schottky. (γ) Σχεδιάστε ένα ενεργειακό διάγραμμα της ετεροεπαφής, σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, για την περίπτωση  $\Phi_m < \Phi_n$ , σημειώνοντας όλα τα ενεργειακά μεγέθη, και εξηγείστε αν έχουμε ωμική επαφή ή φραγμό Schottky. (δ) Εξηγείστε σε λίγες γραμμές, και με τη βοήθεια ενός ενεργειακού διαγράμματος, τη λεπτομέρεια μία ηλιακής κυψελίδας που αποτελείται από μία λεπτή (φωτοδιαπερατή) μεταλλική επίσφωση, σε επαφή τύπου Schottky, με έναν ημιαγωγό τύπου- $n$ .

διατήρηση καραϊτριεζικών θεωριών από την διαφή!

**Θέμα 3.** Επαφή  $p-n$  αποτελείται από ημιαγωγό ενεργειακού χάσματος  $E_g = 1.2 eV$ , σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon = 12$ , και ενεργές πυκνότητες καταστάσεων:  $N_V = 8 \times 10^{18} cm^{-3}$ ,  $N_C = 4 \times 10^{17} cm^{-3}$ . Οι δύο πλευρές της επαφής έχουν δημιουργηθεί με προσμείξεις των ποίων οι συγκεντρώσεις είναι  $N_A = 5 \times 10^{14} cm^{-3}$  και  $N_D = 1 \times 10^{15} cm^{-3}$ , αντίστοιχα.

(α) Να υπολογιστεί η απόσταση του επιπέδου Fermi από το μέγιστο της ζώνης σθένους, σε κάθε μία από τις δύο περιοχές  $p$  και  $n$ , υποθέτοντας ότι και οι δύο περιοχές έχουν χαρακτηριστικά εξωγενούς ημιαγωγού, και ότι έχουμε ολικό ιονισμό των προσμείξεων. (β) Να υπολογιστεί η συγκέντρωση φορέων μειοψηφίας σε κάθε περιοχή. (γ) Να υπολογιστεί το δυναμικό επαφής. (δ) Να υπολογιστεί το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης. (ε) Να υπολογιστεί το επιμέρους πλάτος της περιοχής απογύμνωσης, σε κάθε πλευρά της επαφής. (στ) Σχεδιάστε, υπό κλίμακα, ενεργειακό διάγραμμα της επαφής, για την έκταση των  $\pm 2\mu m$  περί την επίπεδη της μεταλλουργικής επαφής Θεωρήστε ότι το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας σε  $T=300K$ .

**Θέμα 4.** α) Να περιγράψετε τη δομή της ανώτατης ζώνης σθένους ενός μεμονωμένου κβαντικού πηγαδιού από ημιαγώγιμα υλικά με δομή θειούχου ψευδαργύρου.

β) Να υπολογίσετε την ενεργειακή θέση των δύο ανωτέρων υποζωνών της ζώνης σθένους σε κβαντικό πηγάδι  $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ -GaAs-Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As με πέντε ατομικές στρώσεις GaAs.

γ) Να περιγράψετε (ποιοτικά) τις διαδικασίες απορρόφησης/εκπομπής που μπορούν να παρατηρηθούν σ' αυτή την ημιαγώγιμη δομή.

Δίνονται:

$$E_g(\text{bulk-GaAs}) = 1.424 \text{ eV}$$

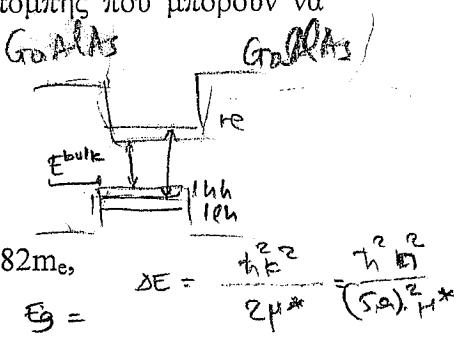
$$E_g(Ga_{1-x}Al_xAs) = (1.42 + 1.26x) \text{ eV}, x < 0.45,$$

$$\alpha(GaAs) = 5.653 \text{ Å}^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

$$m_e = 0.911 \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$GaAs: m_e^* = 0.067 m_e, m_{hh}^* = 0.51 m_e, m_{lh}^* = 0.082 m_e,$$

$$\frac{1}{\mu^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_{hh}^*}$$



**Θέμα 5.** α) Σε σύγκριση με τις ενεργειακές στάθμες ενός απλού (μεμονωμένου) κβαντικού πηγαδιού, ποιό αποτέλεσμα έχει (σε μία δομή πολλαπλών κβαντικών πηγαδιών) η αλληλεπίδραση ενός κβαντικού πηγαδιού με τα γειτονικά του;

β) Να περιγράψετε (με τη βοήθεια διαγράμματος) τη μεταβολή στις ενέργειες των ηλεκτρονίων μη αλληλεπιδρώντων κβαντικών πηγαδιών (πεπερασμένου βάθους) με την προθευτική μείωση του εύρους του φράγματος και τη μετάβαση σε υπερδομή (superlattice).

γ) Πως ορίζεται η νέα περιοδικότητα του πλέγματος σε αλληλεπιδρώντα κβαντικά πηγάδια εύρους  $d$ ;

Δίνονται:

$$\text{Φορτίο ηλεκτρονίου: } e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C, Ταχύτητα φωτός στο κενό: } c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\text{Διηλεκτρική σταθερά του κενού: } \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} (\text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}) = 8.85 \times 10^{-12} (\text{F/m})$$

$$\text{Σταθερά του Plank: } h = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV s} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s,}$$

$$kT(300K) \approx 25 \text{ meV, } 1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Ниңүүрдөй таң ниңүүрдөй дөлөр

( 11-01-08 )

## ПАПА ОНЧИТРЮ

$$E \approx \frac{1}{L^2} \quad (\text{L: ευθύνη διάστασης του αναπτυγμένου})$$

E(K)

સ્તોત્રાય

(σχέση στον αυτόπτη τύπο)

did you know? reptiles

ouanges: *Thlaspi perfoliatum*

Εργασίας: ανεργία ή γετησμένη και τοι 3-ο σημείο

सुवासनः

$L \geq 100\text{nm}$  → outliers

100 - 1000 Å → heterobatirn

(neoporfíras é a classe de 1D, 2D e 3D, aliadas à nanoporosidade)

\* → Εάντι των ενδεξιακών γυνών ⇒ δηση των εκπαιδευτών

we're the experts

bañadero heredado (aprovechado)

founder's opposition & enmity (source's idiosyncrasies)

$$j(a) L = 1 \text{ mm} \Rightarrow E = 10^{-10} \text{ meV} \quad (E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}) \quad \left\{ E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left(\frac{1}{L}\right)^2 \right.$$

$$E(\vec{k}) = \frac{\hbar^2}{2m_e} \left( \frac{k_x^2 + k_y^2}{2m_e^*} + \frac{k_z^2}{2m_e^*} \right)$$

↓   ↓  
 енергия на  
диполарна кояба

Si, GaAs

$$n=0, 1, 2, \dots$$

$$k = \frac{n \cdot n}{L}$$

## Ещё одно изображение

- $E_g(300K) = 1.14 \text{ eV}$  Si } unipolar
  - $E_g(300K) = 1.42 \text{ eV}$  GaAs }

$$E_g^{LD} = E_g^{\text{bulk}} + \Delta E \quad \text{dove } \Delta E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}, \quad k = \frac{n\pi}{L}, \quad n=1$$

xanthodidato      orr ripetizione

Tenendo conto  $\Delta E = 0$

dai viveri: kvantitativi / periori disegni

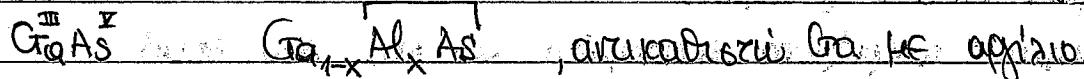
Sì: effetto esperimentale visto

da un'approssimazione con orbiti (Waves)

{ bandstructure

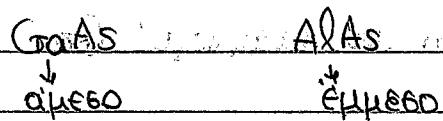
vantaggi/disadvantage: metacalorica e effetto di effetto ??  
effetto energetico

$\downarrow$  determinato

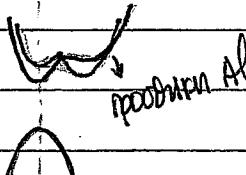


$$(E_g^{\text{GaAs}} + 1,26 \times) \text{ eV} = E_g^{\text{GaAlAs}}$$

nella parte Al



$Ga_x Al_{1-x} As$   
↳ addizionare la sostanza si tratta di effetto perturbatore  
di effetto Energetico!



per arrivare al vivero effetto, mantenendo lo stesso

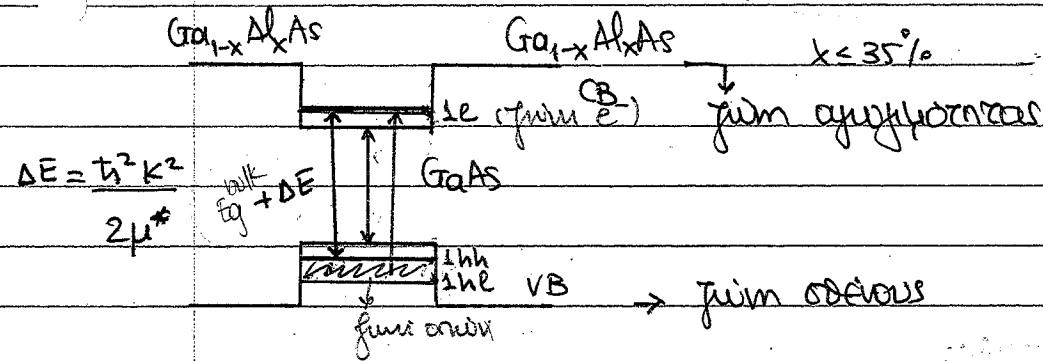
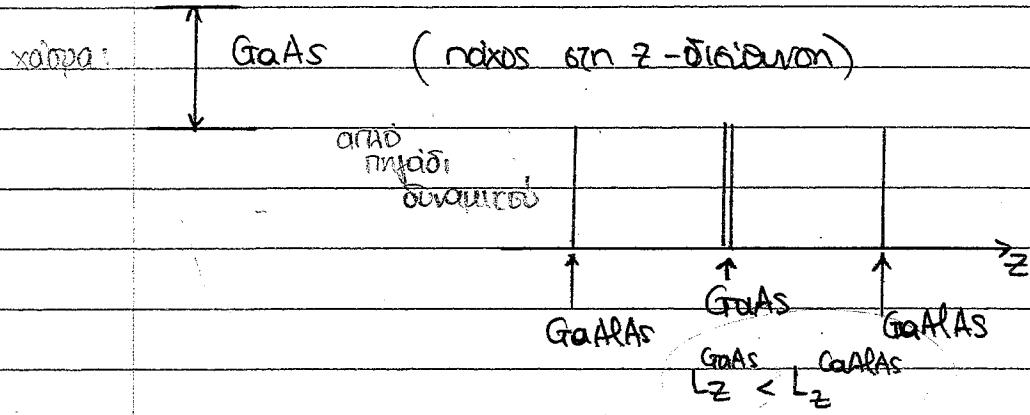
in dimensione!

interfaccia fine misura di fisi, ciò è tipo disegni  
ottiche comprendendo ...

xanthodidato

heavyhole & lighthole

- δούρι την ενέργειαν φυσική  $\leftarrow$  από του επιφανειαντού στα σύμμετρα hh & lh διαφορετικές τιπές ενέργειας



jum hh... Εάν νω έχει αριθμόν  $\pm \frac{3}{2}$  (Bapies ίσης).

- Είχαν την ραπισματική παρασταση της διαφορετικής αριθμητικής θεωρίας

$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$$

	<u>S</u>			<u>J</u>		
$\rightarrow$ av	$l=0$	$1/2$	$\pm 1/2$			
$\rightarrow$ av	$l=1$	$1/2$	$3/2$	$\pm \frac{3}{2}$	$\pm \frac{1}{2}$	

$$S: \vec{j} = \frac{1}{2}, \vec{j}_m = \pm 1/2$$

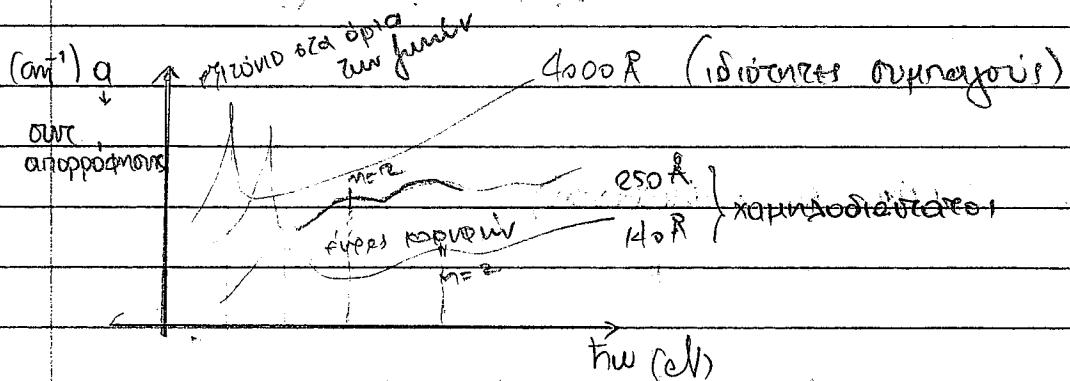
$$P: \vec{j} = \frac{3}{2}, \vec{j}_m = \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}$$

σταυρώσεις:

• Η jum αγγελτών σε κέρκυρα την jum Brillouin έχει συμμετρία S-πολυκαρπίνη

• Η jum οδίου σε κέρκυρα την jum Brillouin σε σταυρώσεια p-πρωξιακών.

αργής και λαμπρός χρυσός διάστασης  $\rightarrow$  heavy hole



To xarxos διεύρυνσης προστίθεται στην ΗΗΝΟΝ διαστάσεων  
απέταξη εκπλαγών

αφού το σύνολο κορυφών και μετανιώσεων  
είναι μηδενικό

ανά κορυφή ~~μετανιώσεις παρατητικές~~ ~~επενδυτικές~~

$$\text{η. } n=3 \quad n=2 \\ \Delta E =$$

$$\text{το } \Delta E \text{ που παρατητικές είναι } \Delta E = \frac{eV}{2L}$$

Αριθμοί επενδυτικών φυσιών:

1) διάρροια του καταρράκτου

2) διαρροής επενδυτικής στάθμης

3) αριθμοί των εκπλαγών

# Τηλεοπτική και Τηλεφωνική Αρχές

(16-01-08)

σημειούμενοι επεξιτατικοί γυμνοί (με τον μεταπολογικό και την κάντρα διάστημα)

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2\mu^*}, \quad k = \frac{n\pi}{L}, \quad n=1,2,\dots$$

$$\frac{1}{\mu^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$$

• belly  
Yu-Cardon

μεταπολογικός  
τοποί

3-D συνήθειες

$\geq 100\text{nm}$

• επιφανειακή αντίδραση

2-D "

$< 100\text{nm}$

• επιφανειακή μηχανισμός

1-D "

$< 100\text{nm}$

• επιφανειακή αντίδραση

0-D "

$< 100\text{nm}$

• επιφανειακή αντίδραση

• Μεταβολή GE:

1) σημειούμενοι επεξιτατικοί γυμνοί (upon excitation) band structure

2) πυκνότητα καραστάσεων

density of states

3) δομές, οριζόντιες, μακριπολικές διαδικασίες

(μακριπολικές διαδικασίες  $\rightarrow$  πυκνότητα λεπτοπολογίας)

(πυκνότητας διαδικασίες) transport & optical properties

• ↓ τα πυκνότητα και αύξηση GE:

Τοπικό ευτοπισμός πορών GE διαριτετες επεξιτατικές στοιχείων

κυρικό επεξιτατικό των πυκνοτήτων

spatial correlation effect

L<sub>zad</sub>, L<sub>z</sub>

τα πυκνότητα  
επιφανειακή μεταπολογική  
πορών καραστάση  
τα 1, 2 & 3)

Να υπολογίσετε την περιστολή των επιφανειών για n=1, σαν περιορισμένη

σούπερ

εραλδικής?

η πυκνότητα;

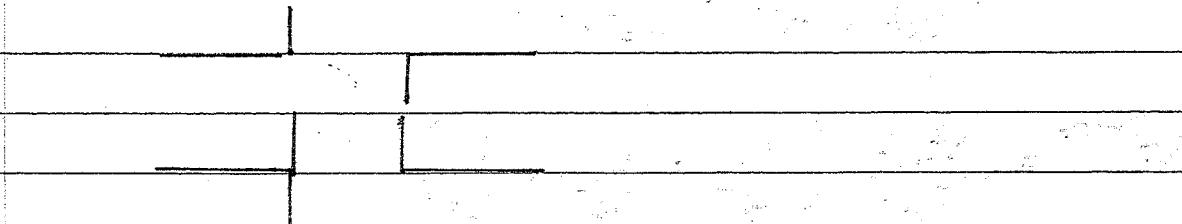
GaAs / Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As

Si - plotters / writer

InAs / GaAs

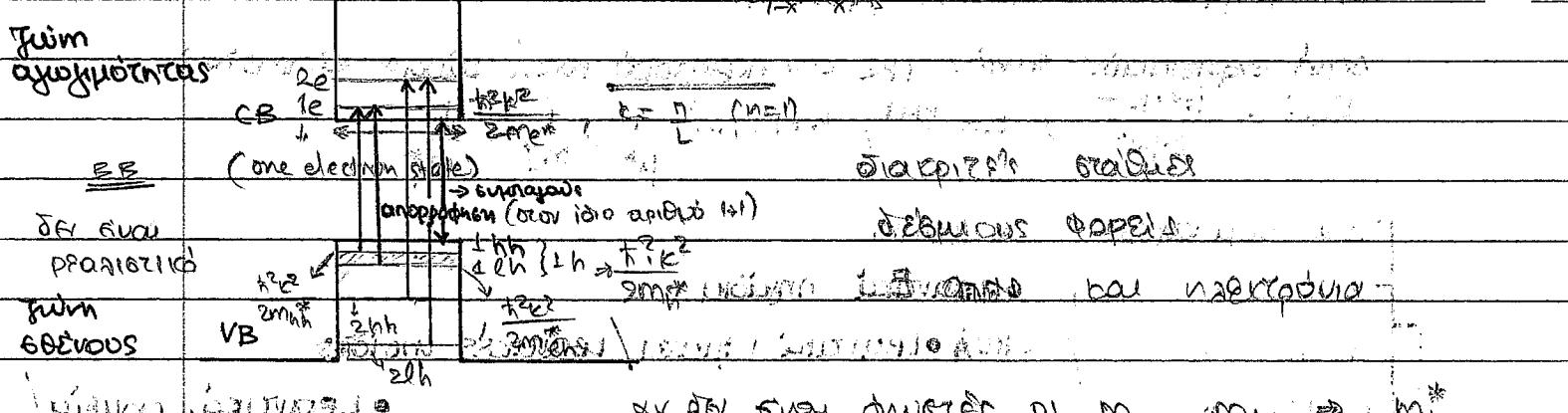
δίβετη λέιζερ σε 1.6 nm

οπερατορικός θερμοκύλινδρος



διαρπίζεις επιφάνειες ορθίτης και κεραδίσεις (εκπομπή ενέργειας)

(GaAs ή ανάλογη σε περιβάλλοντα μηχανισμού)



ορίζεται στη συνθήκη  $e = h$

επιφάνεια εκπομπής (εκπομπής κατανοούσας γεωμετρίας)

επιφάνεια εκπομπής

Εγκώδη (θερμού ενέργειας κατανοούσας γεωμετρίας)

$$E_g^{ew} = E_g^{bulk} + \Delta E$$

$$\Delta E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

αν υπάρχουν και  $m_h^*$  και  $m_{el}^*$

$$\rightarrow \text{αντίστοιχη} : \frac{1}{\mu^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$$

$$\Delta E^{Q-well} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} - \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* L_3^2}$$

υποπομπήση ...

$$\Delta E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left( \frac{1}{L_1^2} + \frac{1}{L_2^2} \right)$$

$$\Delta E^{Q-dot} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left( \frac{1}{L_1^2} + \frac{1}{L_2^2} + \frac{1}{L_3^2} \right)$$

Ημιαρχοί και Ημιαρχήσεις λόγω

(18-01-08)

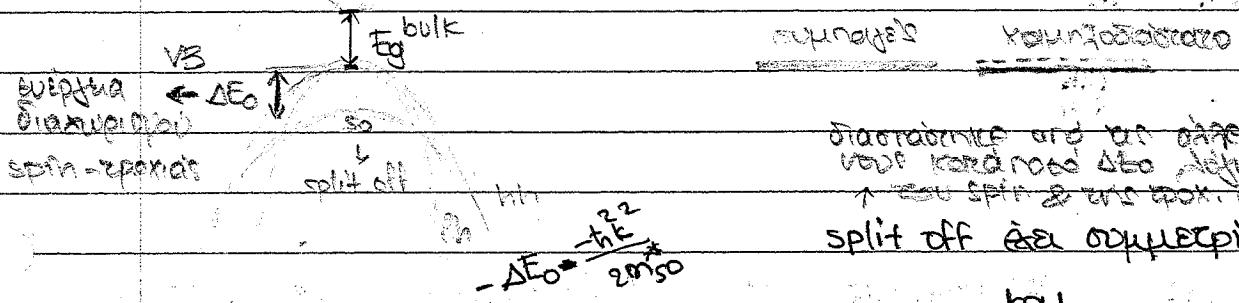
διεύρυνσης καθημάτων (conduction conduction)

συμπλήρωση:

CB

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2}$$

ενέργεια πολλα



$$hh: j = \frac{3}{2} \text{ & } j_2 = \pm \frac{3}{2} \quad (\text{conduction p-type})$$

$$j = l + s \quad l = 0, 1 \quad s = \pm \frac{1}{2}$$

$$so: j = \frac{1}{2} \text{ & } j_2 = \pm \frac{1}{2}$$

$$\bullet l=0, j = \frac{1}{2}, j_2 = \pm 1/2 \quad so$$

$$\bullet l=1, j = \frac{3}{2}, j_2 = \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}$$

$$lh: j = \frac{1}{2} \text{ & } j_2 = \pm \frac{1}{2} \quad (\text{conduction s-type})$$

Διεύρυνσης δόσης λεπτών ενέργειας μόνιμη!!!  
(Eg)

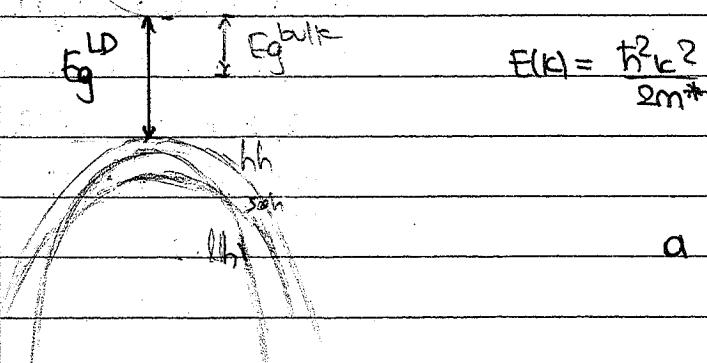
καρβονιδούρων:

Για να λειτουργεί οι δύο αυτοί πορές

(εξόπλιση λόγω)

nx Si ( $E_g = 114 \text{ eV}$ )

$$\Delta_0 = 0,044 \text{ eV}$$

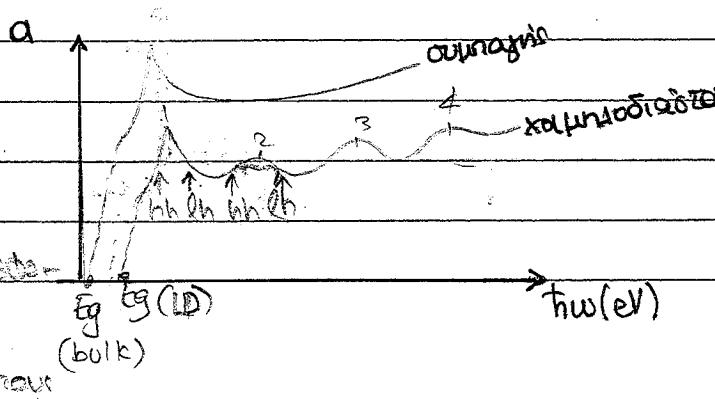


λεπτών δόσης για δεσμό!

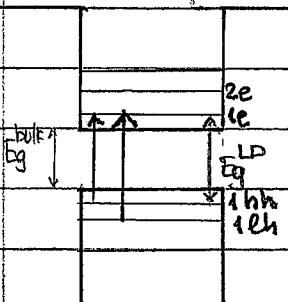
Στα σύγχρονα μηχανήματα στην παραγ-

ρα των hh και lh

από την επιφάνεια στους καρβονιδούρων



είτε ανησυχεί των προηγούμενων καθημάτων  $\Rightarrow$  διαρρήξ ευρηκών  
 ανησυχείς σταθεράς  
 διαρρήξ καίσαρας (δήλων περιορισμός &  
 απόν εκπαιδεύοντος (κατατίνει απειλήσιμο!)



ΑΣΚΗΣΗ 1 GaAs,  $E_g^{\text{bulk}} = 1,519 \text{ eV}$ ,  $m_e^* = 0,0665 m_e$ ,  $m_h^* = 0,45 m_e$

(ΚΑΝΟΝΙΚΑ) Ανεργό καίσαρα  $\Rightarrow n=1$

ΕΞΤΑΣΗ 2004)  $E(4000 \text{ Å})=?$ ,  $E(210 \text{ Å})=?$ ,  $E(140 \text{ Å})=?$

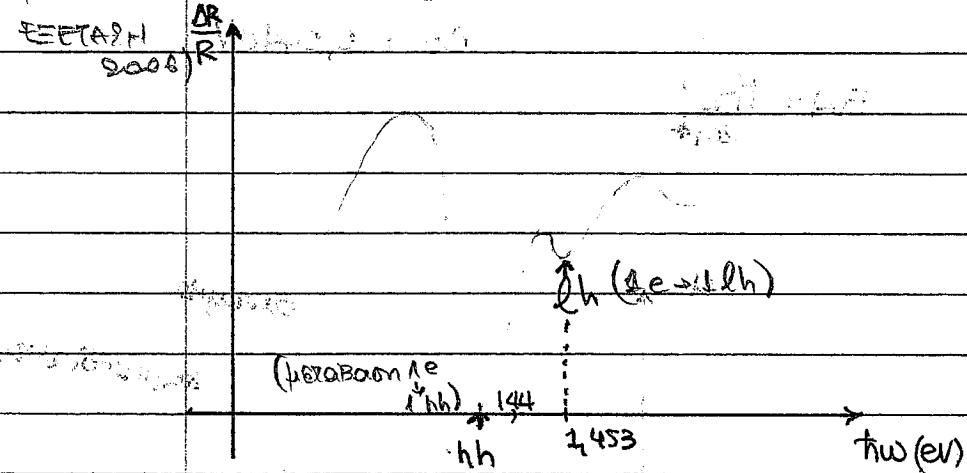
$$E = E_g^{\text{bulk}} + \Delta E = E_g^{\text{bulk}} + \frac{\hbar^2 \cdot \pi^2}{2m^* \cdot L^2} \quad (1000 \text{ Å} \text{ και } n=1 \Rightarrow \text{επιτύχεις συνημένους})$$

παραπρόπτευτο:

$\rightarrow$  για  $L=4000 \text{ Å}$  ανησυχεί προσθετική  $\Delta E$

$\rightarrow$  μεγαλύτερο σύρος το ενεργητικό καίσαρα για  $L=140 \text{ Å}$  από  $L=210 \text{ Å}$   
 δήλων σημειώνεις από την παραπρόπτευτη προσθετική  $\Delta E$

(ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΑΡΧΗΣΗ)



Ταυτονομονούσιο καίσαριν  
 Υπολογίστε την περιοριζή του  
 καίσαρας  $\Delta E$ , σημειώνετε  
 πινακίδα της  $\Delta E$  και βρείτε  
 το  $L$ !

ταυτονόμην δρυπήν

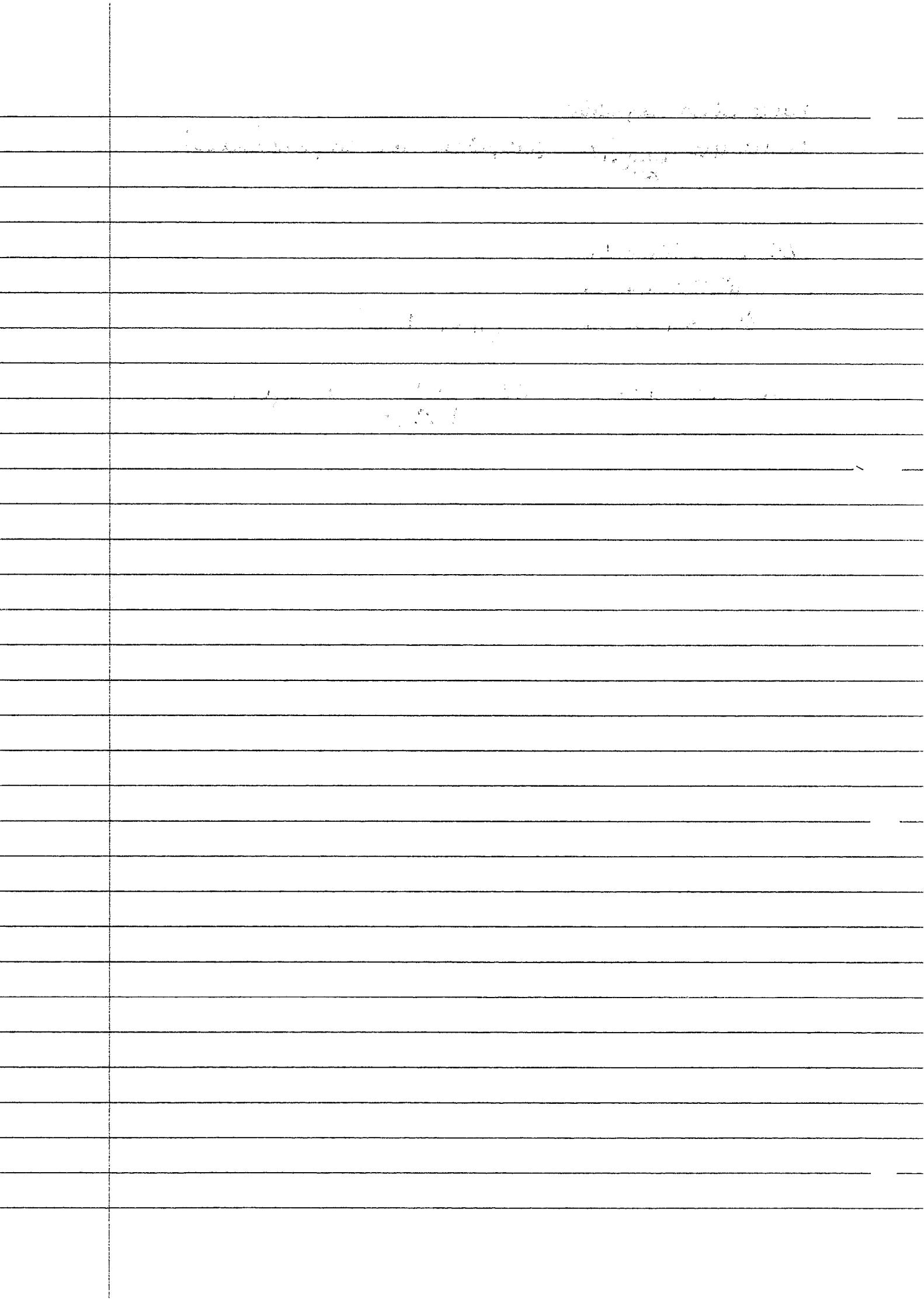
οι δρυπές αναποτελούνται από ταχύτητας!

$\Delta E : 1\text{hh} \rightarrow 1e$

$$E_{\text{g}}^{\text{bulk}} = 1,42 \text{ eV}$$

$$\Delta E = 0,020 \text{ eV} \quad (1,44 - 1,42)$$

and τον πύρο  $\Delta E = \frac{\hbar^2 n^2}{2\mu^* L^2} \rightarrow$  είσοδον L



Huayu: can Huayu per Lopez

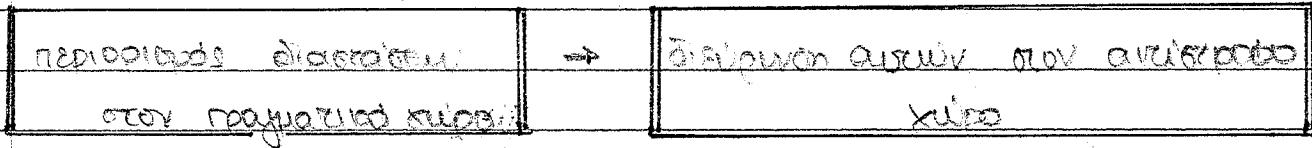
( 25-01-08 )

## ΟΝΤΙΚΕΣ ιδιότητες

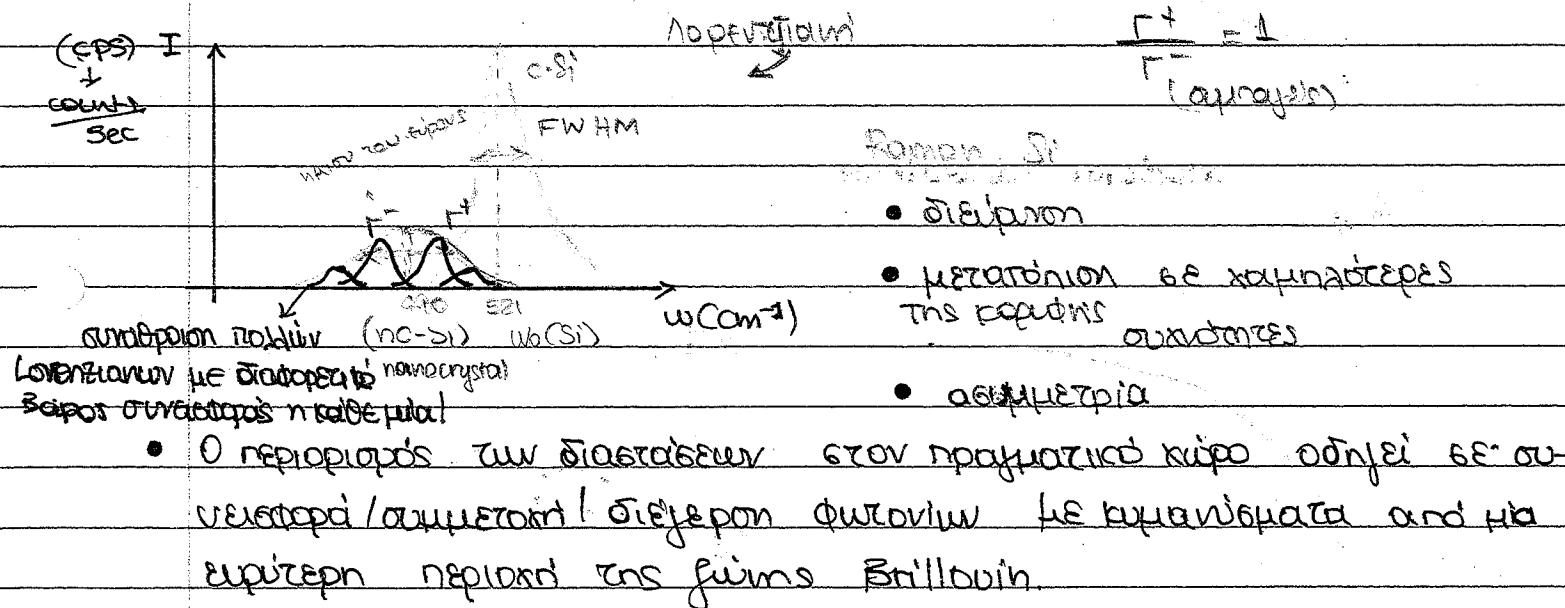
ONCIKS İDİOMİS  
Metabolizmamın obür tür maekropiyoletin formu komplekslerdir  
maekropiyolet metabolizmelerdir.

Metabolites / neuropeptides can stimulate or inhibit neurons depending on the circumstances they find themselves.

- This epiphysis is also known as the **Growth Plate** or **Zone of Chondrocyte Proliferation** (or zone of chondrocyte division).

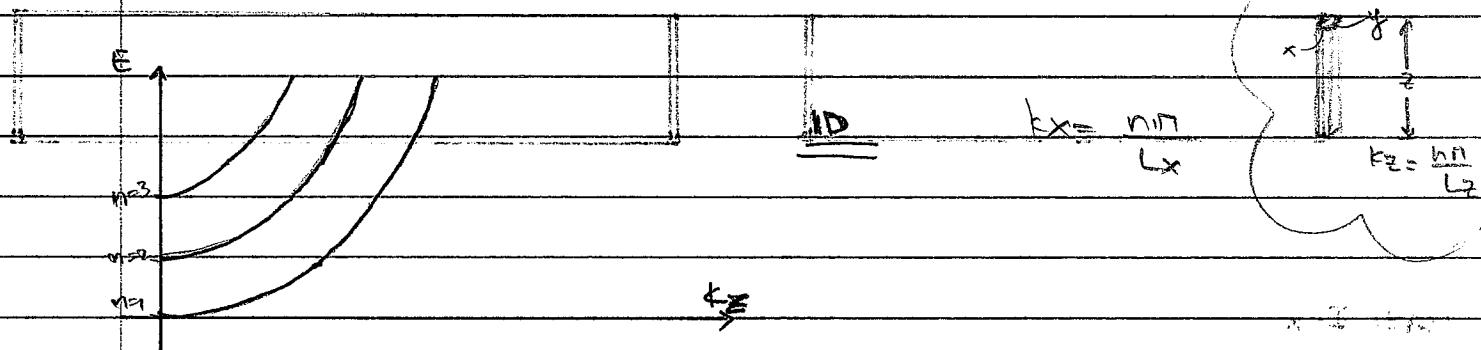
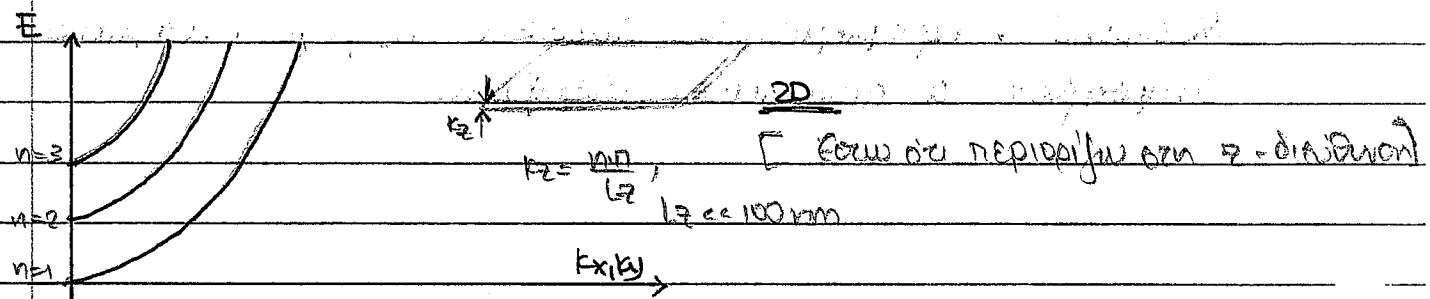
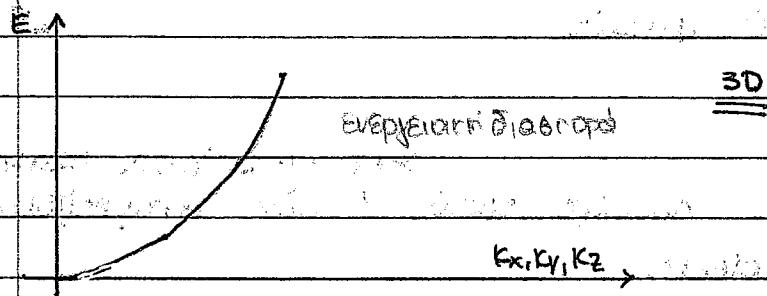


$10^4$  Hz  $\rightarrow$  on the azimuthal

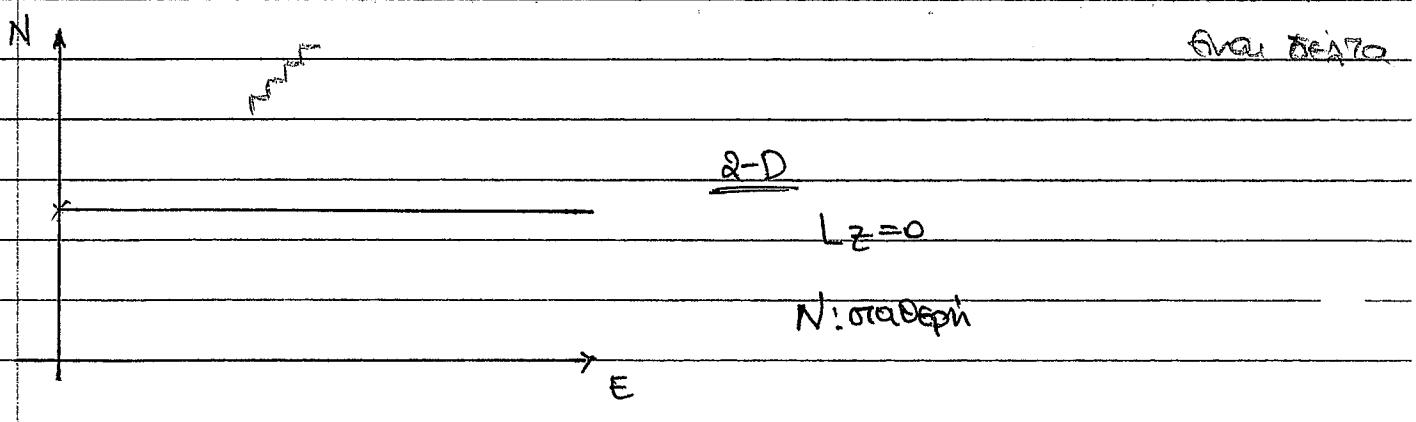
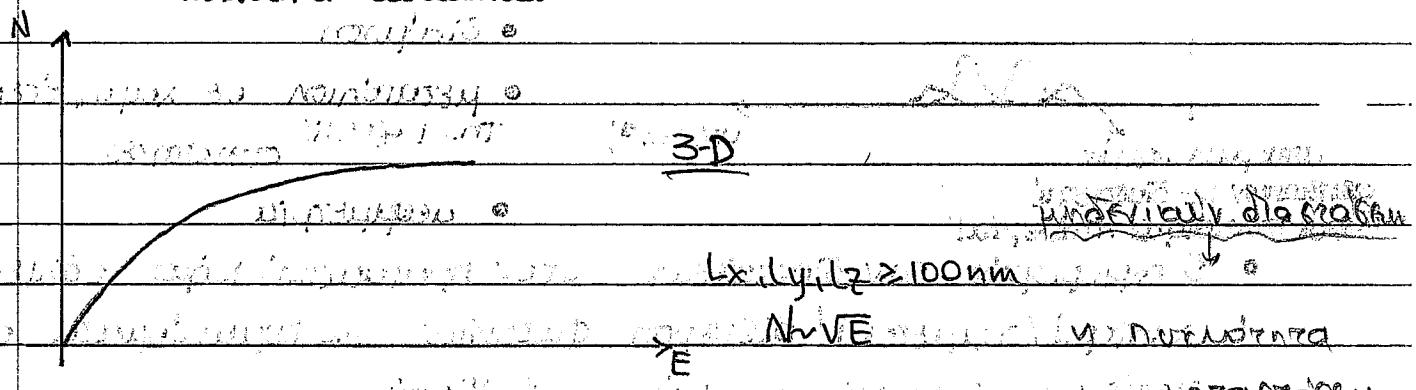


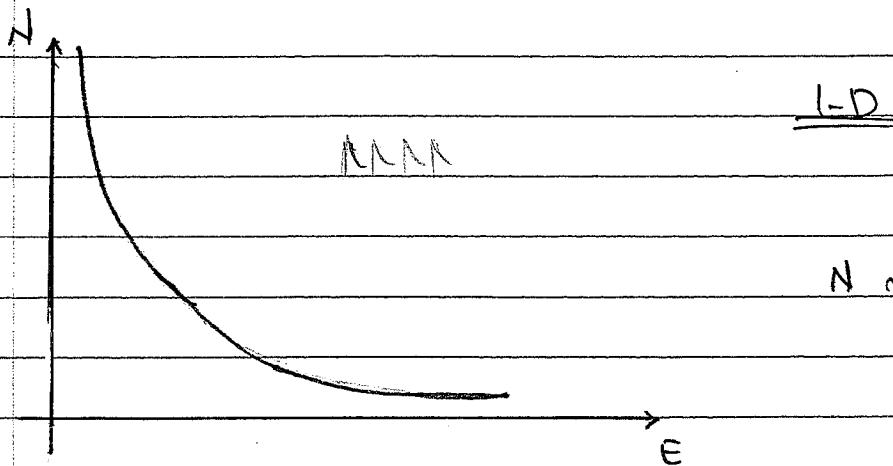
nc-Si  $\rightarrow$  Donors-Si : Volumetrische Analyse Silicon

## EVEPFIA



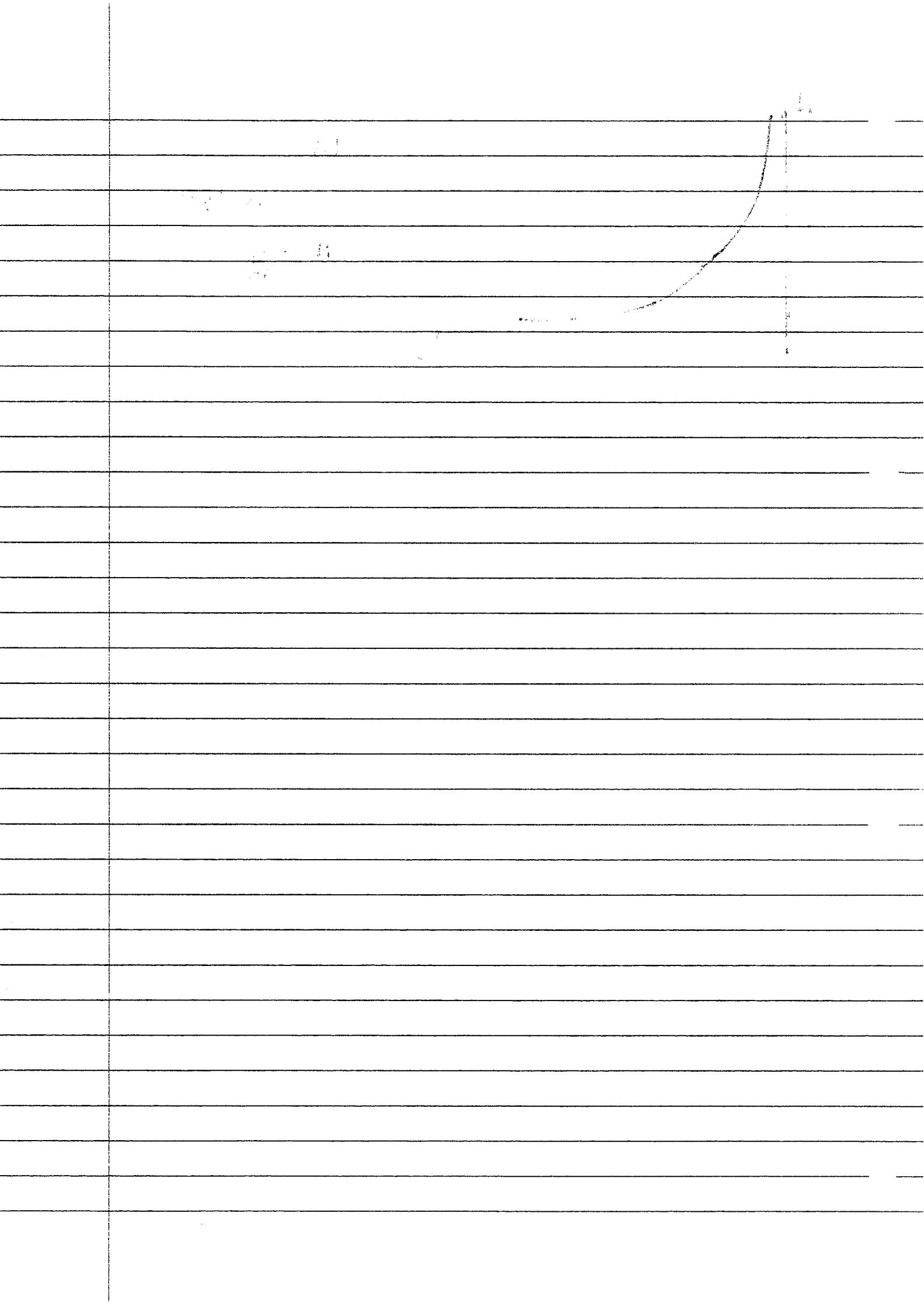
## NUKÖÖRTEKÄÄRÄT





$$Lx = Ly = 0$$

$$N \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$$



Ηματύριοι και Ηματύρινες δόρες

(06-01-08)

αρέων επινεοί φύτευση / αναπαραγωγή καρπών σημαδιά  
αναπαραγόμενης δόρεων από τους αρέων αγρούς αλλά και αλλού...

Ουκαρίες → τα μαρτυρόντα und λαριθή νέρων (ουκαρίες της φρεζιών  
καταναλωτών)

μεταποιητικός διαδικασμός → διαφορετικές αναπαραγόμενες

+  
Τοπικός εργονομός φόρμων

μεταποιητικός

αντησί ή τοπικό

εργονομός φόρμων

(διακρίσεις σε υπόχρεωση  
αρθρώσεις)

(A) d: Επός του φρέζωνος

οίκια ή αναπαραγωγή

εργονομός φόρμων

μη αναπαραγωγή → local

αναπαραγωγή →  $\frac{1}{2}$  local

barrier

εί ορικοί κατόπιν → εργονομός φόρμων

μη ορική barrier (μηράγα) → αναπαραγωγή → αρέων ως στα λιβάδια

των ηματιών

μετατόπιση σε εργονομός

α $\rightarrow$ ο: έναντιστε τις διατάξεις των ουκαρίων

$\rightarrow$  τα ζεύγη να σημαντάνε την τα μετατόπιση, να πρέπει συνεχείς

τηλεσ...

(1D, 2D, 3D)

$N(E)$

(3D)

nurdimensional

Kontinuum

$$N \propto E^{1/2}$$

$E$

$N(E)$

(2D)

$N: \text{const.}$

$E$

$N(E)$

(1D)

$$N \propto \frac{1}{E^{1/2}}$$

$E$

$N(E)$

(0D)

$E$

no periodicities, boundaries:

quasi-low-dimensional

$N$

$$\frac{dN}{dE} = \frac{A}{2\pi\hbar^2}$$

(2D)

1/2 spin

$$\frac{Am^*}{\pi\hbar^2}$$

$$\frac{m^*}{\pi\hbar^2} \cdot 2m^*$$

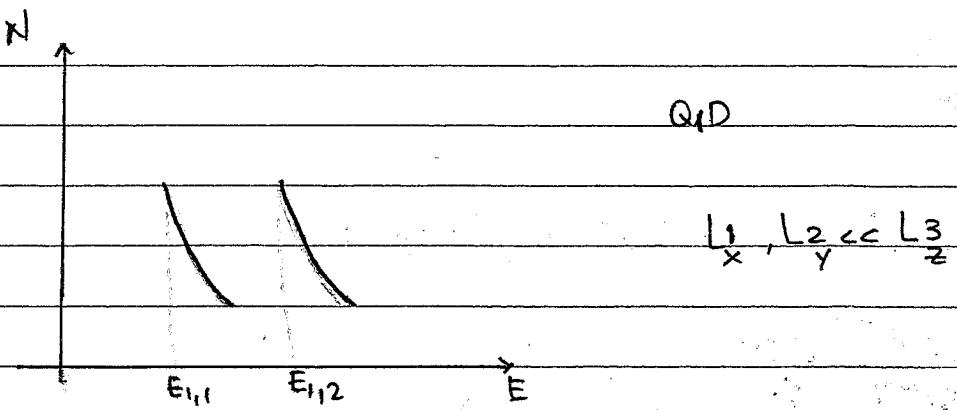
$$\frac{L_3}{2} \ll L_1, L_2$$

$E_1, E_2, E_3$

$E$

discrete energy migration not across  $L_3$

$$\text{Energy can be shown or deduced from obvious: } E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m\hbar^2}, \quad k = \frac{\hbar\pi}{L_2}, \quad n=1$$

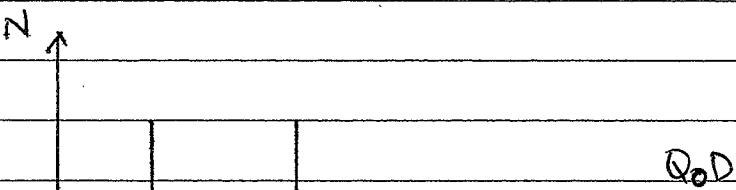


K80112WON 6E 2D

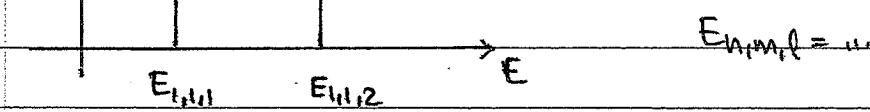
## 2) <sup>↓</sup> savourous aphrodisiacs

\* be now able again to write:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{nh}^*}, \text{ jika } n=1 \Rightarrow E_{n,m} = \frac{\hbar^2 n^2}{2m_{nh}^*} \left( \frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} \right)$$

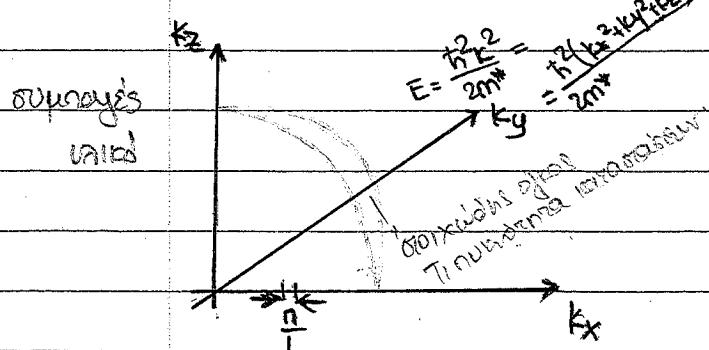


QoD



↓  
ఈ ప్రాంతము లేదా ఆ

## Dwarfs neopinnaeformis



$$\text{Δείχνουμε : } \frac{dN}{dE} = \frac{(2m*)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3} \cdot E^{1/2}$$

↓  
ανίμονάδα οἴκου

ein Kugelzylinder aus Stahl mit  $\frac{\pi}{L} \rightarrow V_k = \left(\frac{\pi}{L}\right)^3 \rightarrow$  Øjros am 1. Karabiner...

$$dN = \frac{\frac{1}{8} \cdot 4\pi k^2 dk}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^3}, \quad k = (2m^* E)^{1/2} / \hbar$$

$$dE = \frac{\hbar^2 k dk}{m^*}$$

- fréνωσ σημείωσις πάρα τέλον, έκουψε:

$$\frac{dN}{dE} = \frac{L^3 (2m^*)^{3/2}}{h^2 \pi^3} \cdot E^{1/2}$$

↑      ↑  
 $h^2 \pi^3$        $(2m^*)^{3/2}$

Tis leuvi/leuvioule ws gos zt monida b'γou

Ημικύριοι και Ημιαριτίνες λόγω

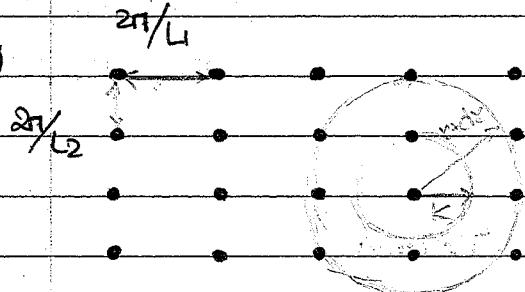
(08-02-08)

αλιεοδος ευφέρων καισηα σε αντίρρεια μεταβολές  $(1/2)$ ,  $\alpha \sim E^{1/2}$   
 " " " του μη αντίρρεια  $(3/)$   
 ευφέρων καισηα επιπέδο, προτίθεται σε πλήρη κατανοή των  
 πανούνιων (δύσκολη ρύθμιση)

$$\left(\frac{1}{\text{cm}}\right) \quad d \sim E^{1/2} \quad , \quad \text{θαυ} \quad a = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad \begin{array}{l} \text{γιατί } \mu \text{ μέσο} \\ \text{τα φανάρια αποτελούν} \\ \text{έχουν αυτήν την} \\ \text{επιρροή επίγειας} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{με } k: \text{δέκτης} \\ \text{επανεπέλευσης} \\ \text{ρεαλικούς} \\ \text{αριθμούς} \end{array}$$

$$n_c = n + ik$$

(2D)



$$\frac{dN}{dE} = \sigma \text{στρ}^2$$

Από την πρώτη διάταξη

$$\text{αποδοτικό: } dN = \frac{2\pi k \cdot dk}{2\pi \cdot \frac{2\pi}{L_2}}$$

$$E_1 = n^2 - k^2$$

$$E_2 = 2nk$$

$$E = E_1 + iE_2$$

$$\frac{dE}{dk} = \frac{2k^2 \cdot k}{2m^*} \Rightarrow k \cdot dk = \frac{m^* \cdot dE}{k^2}$$

$$E = \frac{k^2 \cdot k^2}{2m^*}$$

σταθερότητα της  
σημείωσης

$$\text{Εποκένως } dN = \frac{2\pi m^* \cdot dE}{4\pi^2 \cdot k^2} \Rightarrow \frac{dN}{dE} = \frac{4 \cdot L_2 \cdot 2\pi \cdot m^*}{4\pi^2 \cdot k^2} = \frac{A \cdot m^*}{2\pi k^2} = \text{const}$$

(κωρις spin)

(1D)

$$N(E) = \frac{dN}{dE} = \frac{dN(k)}{dk} \cdot \frac{dk}{dE} = \frac{L_1}{2\pi} \cdot \frac{1}{dE/dk}$$

Γνωρίσατε ότι  $k = \frac{n\pi}{L}$ , θέτουμε  $n=N$ , επομένως:

$$k = \frac{2N\pi}{L} \Rightarrow N = \frac{L \cdot k}{2\pi} \text{ και } dN = \frac{L \cdot k}{2\pi} dk \text{ και } \frac{dN}{dk} = \frac{L}{2\pi}$$

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \Rightarrow k = \left( \frac{2m^* E}{\hbar^2} \right)^{1/2}, \quad \frac{dE}{dk} = \frac{\hbar^2 k}{2m^*}$$

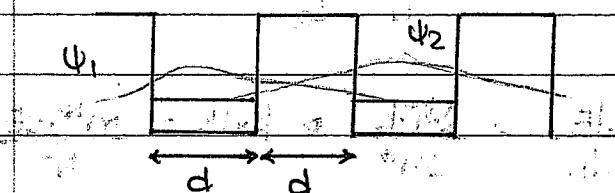
$$\text{Άριθμος } \frac{dN}{dE} = \frac{L}{2\pi} \cdot \left( \frac{m^*}{2\hbar^2} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{E^{1/2}}$$

επίσημον από το αυτόχθονο  $E^{1/2}$

- heavy holes : σύνολον ορθοφορμή 3/2 (μεγάλερη ενέργεια και)  
στο σημείο 1 στη διαδικασία
- light holes : " " 1/2 (μεγάλερη ενέργεια και)  
στο σημείο 1 στη διαδικασία

- Τι είναι οι υπερδομές;

### ΥΠΕΡΔΟΜΕΣ - ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΩΤΑ ΚΕΒΑΝΤΙΚΑ ΜΗΓΑΔΙΑ



H κυριαρχώνταν του είσος διαστάση (και διαστάση των αναγραφής μεταξύ) στην κυριαρχίαν του σασου

(μεταβαλλόμενη στην απόσταση) είναι σταθερότητα της αντανακλαστικής στάσης

$$E = E_0 + V_1 \pm V_{12} \quad (\rightarrow \text{μεταβολή της ενέργειας} + \text{μεταβολή της διαστάσης})$$

στο "αντανακλαστικό" το  $e^-$

στο "αντανακλαστικό" το  $e^-$

ταρασσία του σασου

$e^-$  στο είσοντα μηδέδι

αυτήν την περίπτωση

αλληλεπίδρωσης

(την ίδια τοποθεσία)

separation

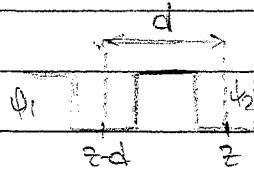
N QU

(ετα μηχανισμοί που βειρέται στη δύση & τα αλληλεπιδρά μεταξύ των ηλεκτρονίων στην σύνθετη σύσταση)

$V_{12}$  αντιστοιχεί σε  $T = \psi^*(z) \cdot V_{12}(z) \cdot \psi(z-d) dz$  ενέργεια αλληλεπιδράς (transfer) αλληλεπιδράς

$V_1$  αντιστοιχεί σε  $S = \psi^*(z-d) \cdot V_1(z) \cdot \psi(z-d) dz$

$$\Psi_E(z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n e^{iknd} \cdot \psi(z-nd)$$



$$E(k) = E_0 + S + 2 \cdot T \cdot \cos(kd)$$

(Σύνθετη ανταντιπίνεται στη σύνθετη ενέργεια...)

$V_1$ : Δημιουργία αλληλεπιδράς

$$k = \frac{h \cdot n}{N \cdot d}$$

$V_1$ : αποδίζει την μηχανισμό

self-energy



μηχανισμός της ελαστικότητας

shift integral



$\approx E_0$ : αδιαρίσπατο

αδιαρίσπατο διατήρηση μηχανισμός

αλληλεπιδράς

$$\epsilon_i$$

$$\epsilon_i + \epsilon_{Si}$$

$$\epsilon_i + \epsilon_{Si} - \epsilon_{Ti}$$

$$\epsilon_i + \epsilon_{Ti} + \epsilon_{Si}$$

$$\psi_S$$

$$\psi_{Si}$$

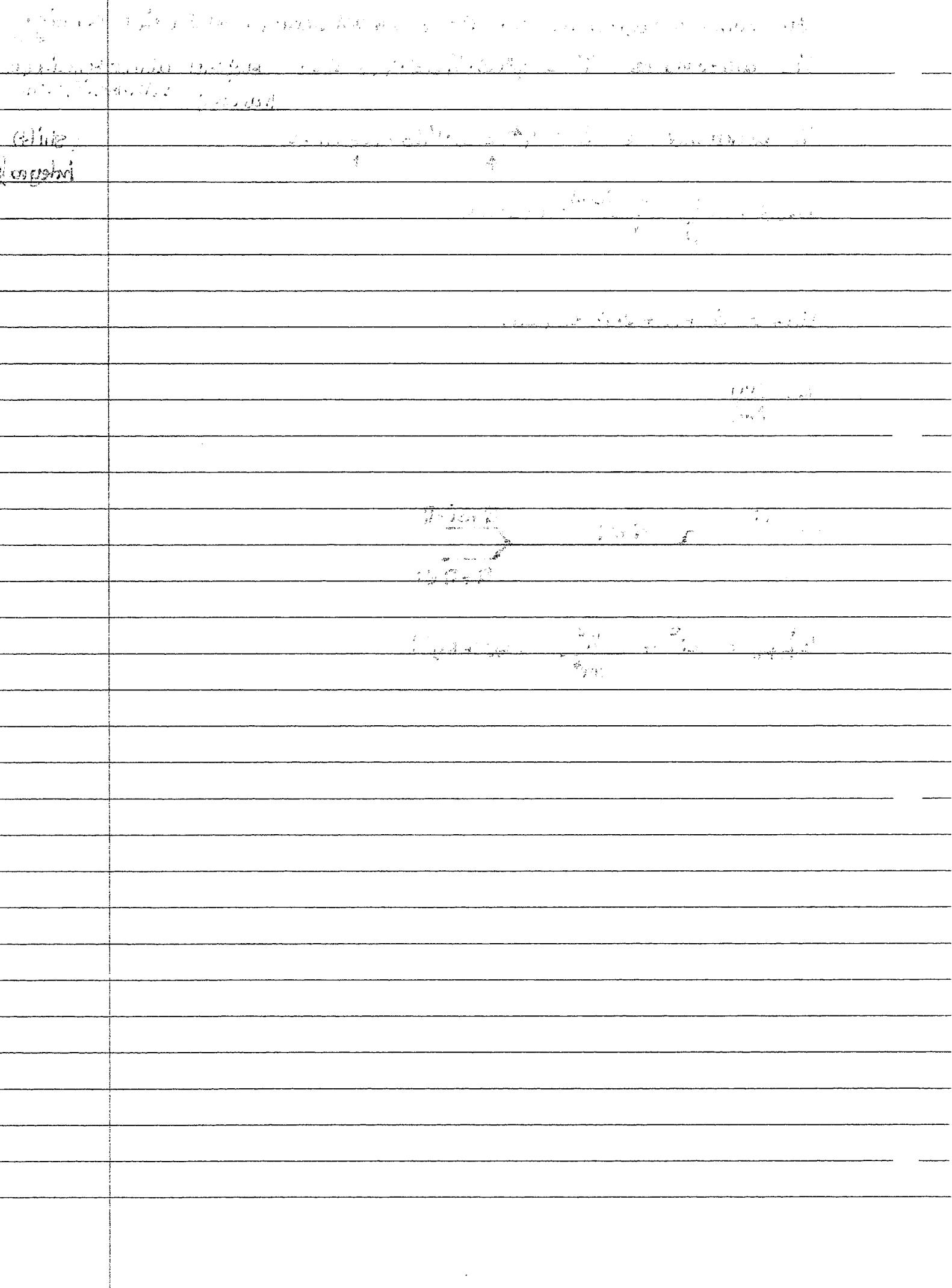
τοποθετείται στη σύνθετη ενέργεια

σε ευθεία γραμμή στη σύνθετη ενέργεια

επανασύνταξη

$$E_{\text{total}}^{\pm} = \epsilon_i^{\pm} + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2)$$

ημιπολαρό παραλλαγή στη σύνθετη ενέργεια



# Μέθοδοι χαρακτηρισμού Υλικών

(15-02-08)

## ΥΠΕΡΔΟΜΕΣ

Θέση: Είναι σχετικά επιζητήσιμη μηδένα, στον υπερδομή περιοχή των  $\epsilon^+$  και  $\epsilon^-$

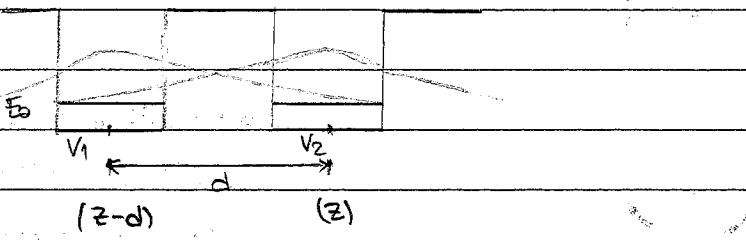
$$E_{tot} = E_0 + V_1 \mp |V_{12}|$$

↑  
μετανεμόντας  
↓  
τοχυτή αντιτεταρτού  
  
N-QW (single quantum well)

$$E(k) = E_0 + S + 2 \cdot T \cdot \cos(kd), \quad k = \frac{n \cdot \pi}{Nd}, \quad -\frac{N}{2} < n < N/2$$

$$S = \int \psi^*(z-d) \cdot V_1(z) \cdot \psi(z-d) dz$$

$$T = \int \psi^*(z) \cdot V_{12}(z) \cdot \psi(z-d) dz$$



- Πρόσθιας κοριφούς για να σχετίσει με single quantum well;

ελαστικούς αριθμούς στην είναι 3!

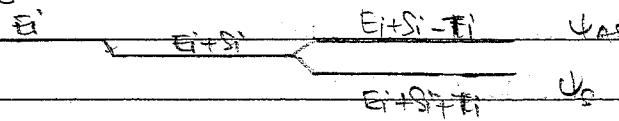
GaAlAs

GaAs

GaAlAs

υπερώμβη GaAs ⇒ κατά την παραγόντης δύο

} μη κατά την παραγόντης δύο  
(τελευταία αριθμούς)  
επεκτείνεται:



$$E_{tot}^{\pm} = E_i^{\pm} + \frac{\hbar^2}{2m^*} (kx^2 + ky^2)$$

→ Εάν χρειάζεται ούτε ένα ή τέσσερα μηδένια για να αποκαλύψει την  
δύο φυσικές του γεννήσεις ή

$$\hookrightarrow 2 \times 2 T = 4T : \text{miniband}$$

↑ γεωμετρίας (sub-bands in unoccupied  
states)

δύο με  $e^- \rightarrow$  ούτε παντού σε δύο

ευκαμπτία  $e^-$  λογούνται από την θεώρη της επιφανείας.

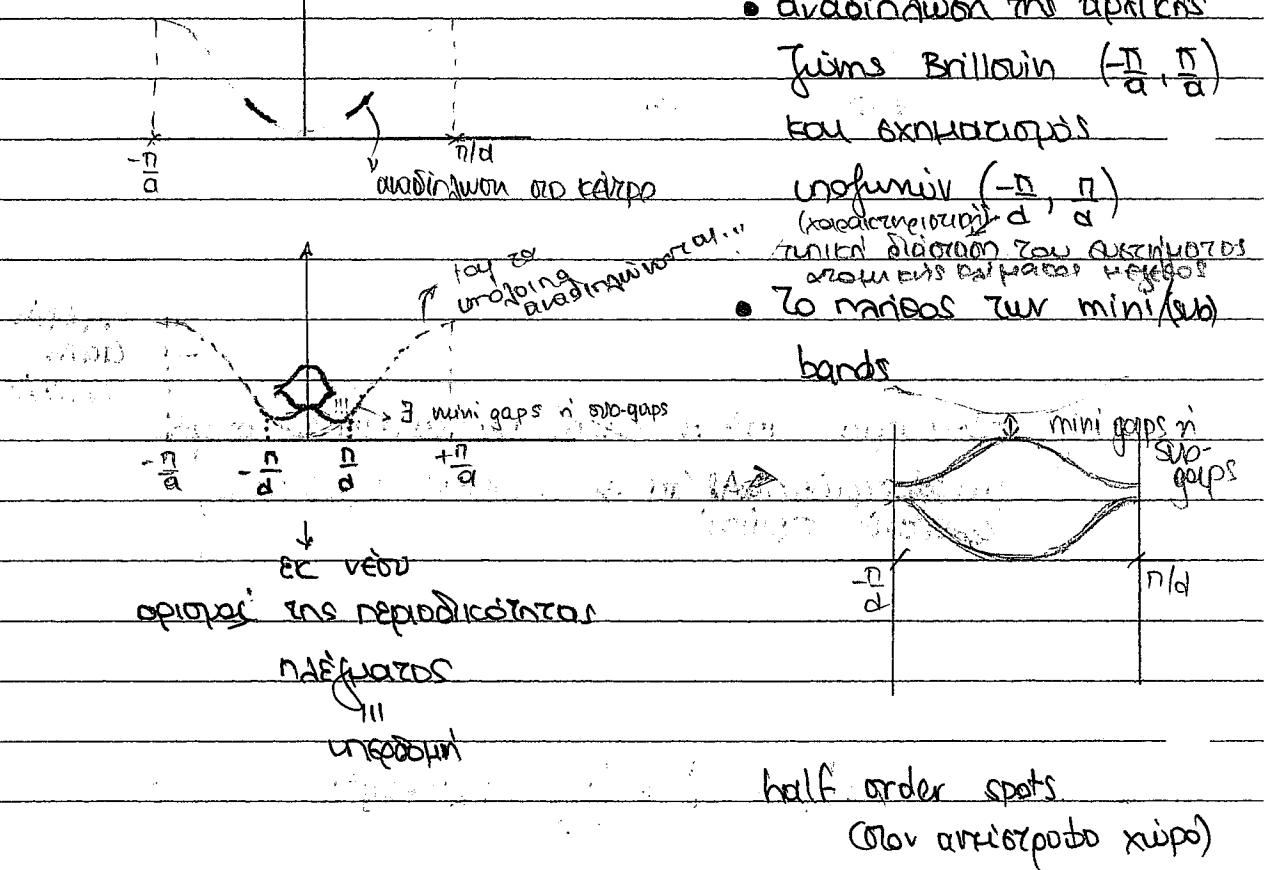
Η τυχερή διάσταση του  $e^-$

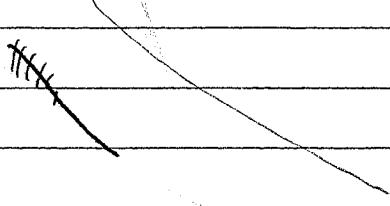
... νίσιον διαδούμενη

→ Τέλος απλανεύσιμην  $\Rightarrow$  αύξεση η επιφανεία του αριθμού επιπλέοντων  
τοπίων του αντικεμένου μειώνεται.

Zum Brillouin  $-\frac{\pi}{a}, \frac{\pi}{a}$

Υπερδομή



$E_1$ 

εύρος φράγματος  
(barrier width)  $d$  (Å)

( $\text{d}t \text{ μέτων}$ )

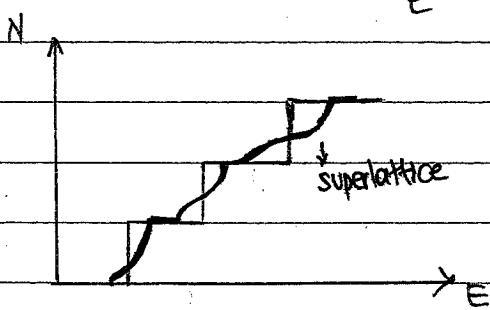
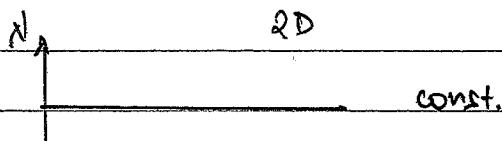
ενόμιμη απόδοση  $\rightarrow$  εξασθένηση του τοπίου  
εναντίον

$\rightarrow$  Παραπομπή στη μέτων  
του εύρους φράγματος έχουν  
διμερίσια εμφάνιση  $\rightarrow$

doubleton της

διακρίσεις επίσημης  
of wavefunctions

Όταν το εύρος φράγματος μειώνεται  $\rightarrow$  ιδιότητες αυτονεύουσας  
και υπόλοιπο



με αλλαγή περιοχών  
(periodic) (single - multiple quantum well)  
(αλλαγή περιοχών)

Σημαντικό: μεταβολή διακρίσεων  $\rightarrow$  διαφορετικές υπόδια αλλαγές περιοχών

• What is the relationship between the two types of energy?

• What is the relationship between the two types of energy?

• What is the relationship between the two types of energy?

• What is the relationship between the two types of energy?

• What is the relationship between the two types of energy?

• What is the relationship between the two types of energy?

• What is the relationship between the two types of energy?

• What is the relationship between the two types of energy?

• What is the relationship between the two types of energy?

Τα φαινόμενα κύανου της προπορικής καθορίζουν:

1. Έφερε ενέργειας μηχανισμός , band structure
2. πυκνότητα καταστάσεων , density of states
3. οπαρίτες ιδιότητες και φαινόμενα λειτουργίας

transport & optical properties



αντ' τα φαινόμενα απογειών οι:

1. Τονική ενεργούρη πορεία ή διαρίτες ενέργειας πορείας  
carrier localization
2. χωρικό συστατικό των φυνονιών  
spatial correlation effect



τα αντεπαρθέτα αινιάλ:

- Εμφάνιση ενίσχυσης καρυδιών ή φασμάτων απόστροφων και αντιστροφών αποδίδοται σε μεταβολές λειτουργίας εργαλίων (hh) & ελαστρίων (lh) ανών (στην πυμ αρέσκεις) και ε' (στην αγγυρότητας).

Υπερδομές - Πολλαπλή αλληλεπίδρυση μηχανισμός (superlattice)

υπερδομή<sup>+</sup>  
well

$$E = E_0 + V_1 \pm |V_{12}|, \text{ έτου:}$$



- $E_0$ : η ενέργεια που έχει το άνοιγμα της αλληλεπίδρυσης, οποιονδεν κύανο κύανο μηχανισμός
- $V_{12}$ : ενέργεια αλληλεπίδρυσης  
→ ο οποιος έχει στην πορεία της αλληλεπίδρυσης μηχανισμό..
- $V_1$ : η ιδιοεργεία της μηχανισμής παρουσία της 2<sup>η</sup> αλληλεπίδρυσης.  
δίκινη ως "αντιτακτικότητα" ή ε' το τι παρουσιάζει η μηχανισμή ε' από την πορεία της αλληλεπίδρυσης.

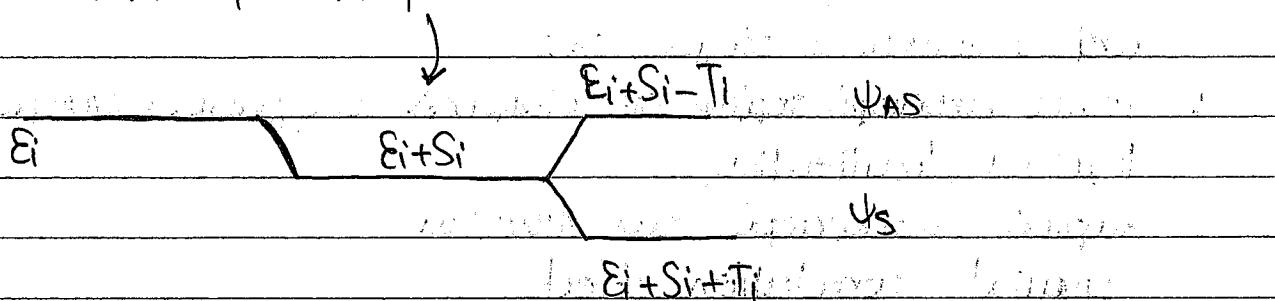
To  $V_1$  ανυποτίκει σε  $S$ : shift+integral  
 (self-energy)

To  $V_{12}$  ανυποτίκει σε  $T$ : transfer energy

αλλισ:  $E = E_0 + S + 2 \cdot T \cos(kd)$ , όπου  $k = \frac{\pi n}{d}$

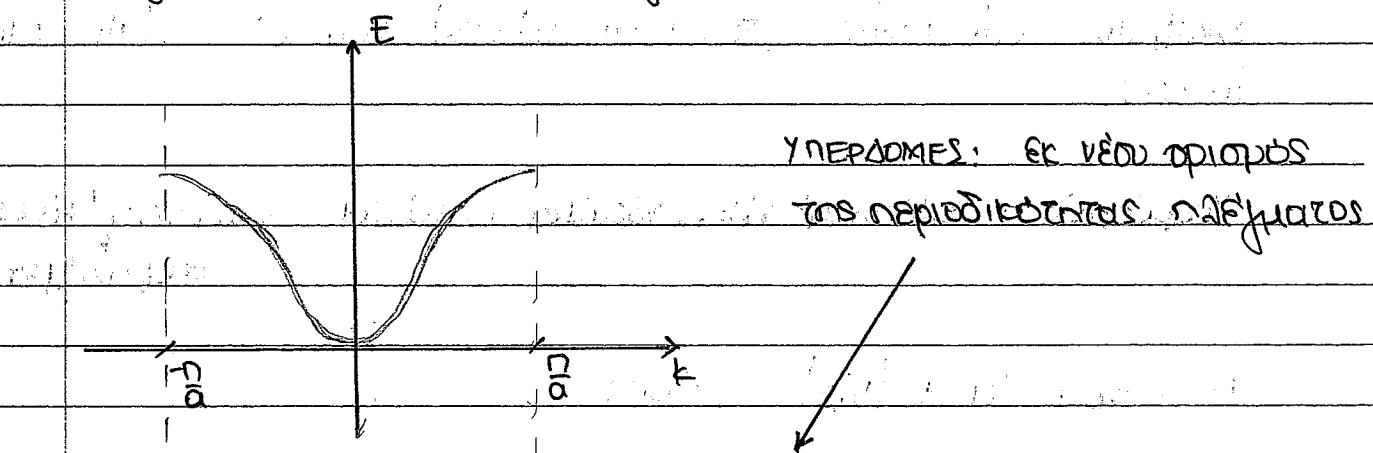
### ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

To Shift... προβλεψη πεταράνων



- $T$ : εύρεση αλλαγμάτων της θέσης στην πορεία
- $S$ : εύρεση πεταράνων στρώματος

H γιαν: Brillouin zones αναφερισ!



Στις υπερδομές στοχεύει αναζήτων της 2. Brillouin → μονοπάτια (π/2, 0), (0, π/2)

