

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Υλικά Ηλεκτρονικής & Διατάξεις

5^η σειρά διαφανειών

Δημήτριος Λαμπάκης

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ

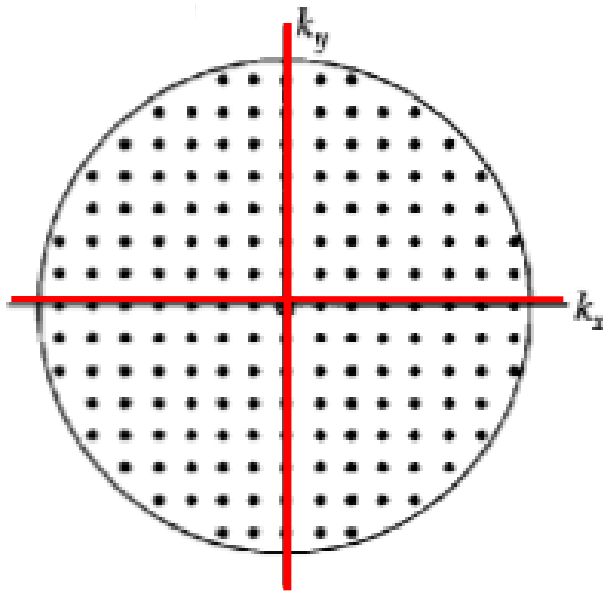
ΘΕΩΡΟΥΜΕ ΕΝΑ ΑΕΡΙΟ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΔΕΝ ΑΣΚΕΙΤΑΙ ΚΑΜΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΛΟΓΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ Ή ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.

ΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΤΩΝ k ΕΧΟΥΝ ΚΥΜΑΤΑΝΥΣΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΜΙΑ ΣΦΑΙΡΑ ΑΚΤΙΝΑΣ k_F , Η ΟΠΟΙΑ ΚΑΛΕΙΤΑΙ ΕΡΙΦΑΝΕΙΑ FERMI ΚΑΙ ΙΣΧΥΕΙ:

$$k \leq k_F$$

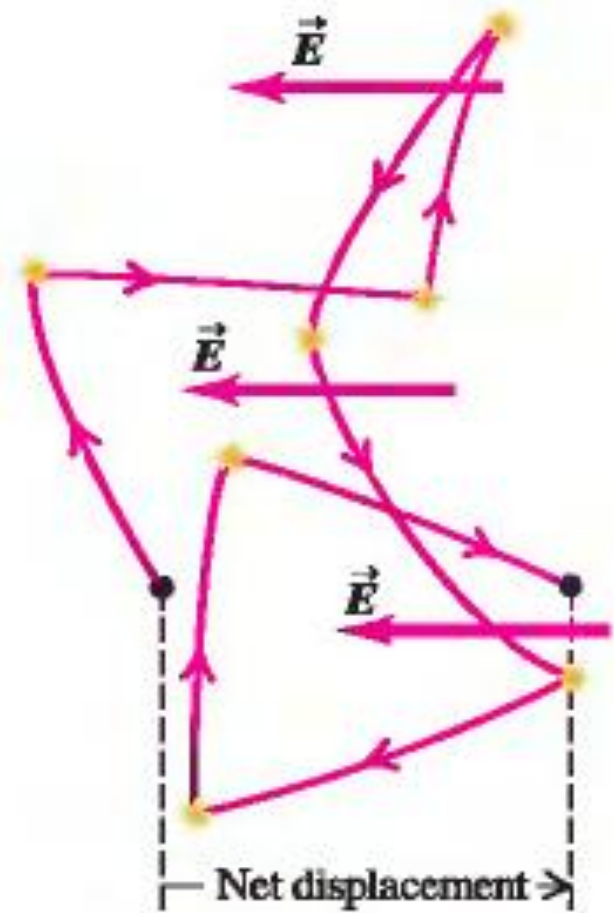
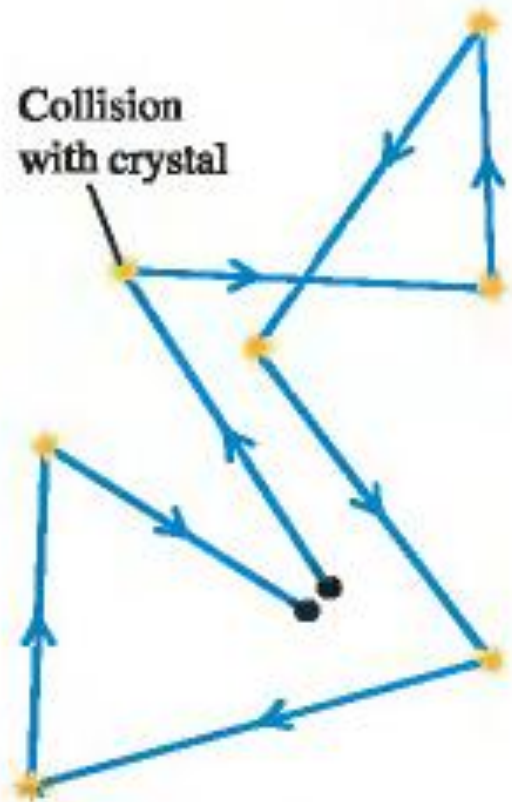
ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΗΣ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΦΑΝΕΙΑΣ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΗΝ ΤΟΜΗ ΤΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ FERMI ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ k_x ΚΑΙ k_y

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ



ΣΦΑΙΡΑ FERMI ΓΙΑ $F=0$

ΚΙΝΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ



ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ

ΕΞΕΤΑΖΟΥΜΕ ΤΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΣΥΜΒΑΙΝΕΙ ΕΧΟΝΤΑΣ ΥΠ' ΟΨΗ
ΟΣΑ ΓΝΩΡΙΖΟΥΜΕ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ FERMI-DIRAC.

Η ΟΡΜΗ ΚΑΘΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΔΙΝΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \hbar\vec{k}$$

ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΜΕ ΚΥΜΑΤΑΝΥΣΚΑ k ΥΠΑΡΧΕΙ ΕΝΑ
ΑΛΛΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΜΕ ΚΥΜΑΤΑΝΥΣΜΑ $-k$, ΜΕ ΣΥΝΕΠΕΙΑ ΤΟ
ΟΛΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΜΗΔΕΝ.

ΟΤΑΝ ΕΦΑΡΜΟΣΤΕΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ,
ΕΞΑΣΚΕΙΤΑΙ ΔΥΝΑΜΗ F ΠΟΥ ΔΙΝΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ

ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ Η ΣΦΑΙΡΑ FERMΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΖΕΤΑΙ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΡΥΘΜΟ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ k ΚΑΙ Η ΑΛΛΑΓΗ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ dk/dt ΔΙΝΕΤΑΙ ΑΠΌ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ:

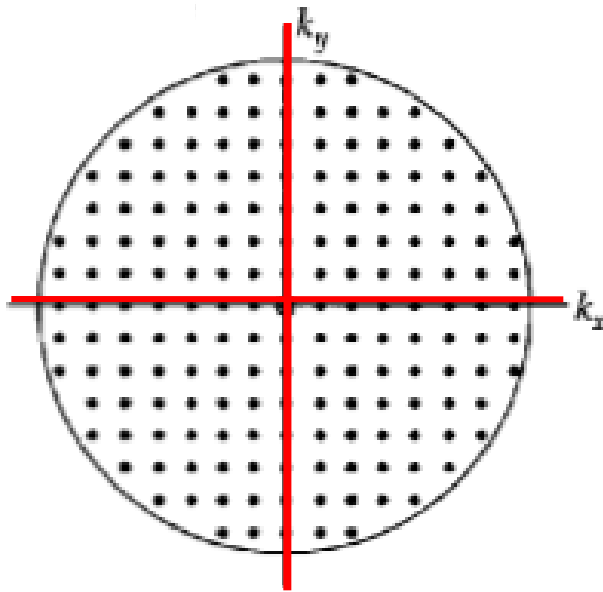
$$\vec{k}(t) - \vec{k}(0) = -\frac{e\vec{E}}{\hbar}t$$

ΛΟΓΩ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΕΠΙΤΥΓΧΑΝΕΤΑΙ ΜΙΑ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΟΙΑ ΘΑ ΙΣΧΥΕΙ $dp/dt = 0$ ΚΑΙ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΑΠΟΚΤΟΥΝ ΟΡΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ. Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΥΤΗ ΕΧΕΙ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΧΡΟΝΟΥ Ή ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΜΕ ΤΟΝ ΜΕΣΟ ΧΡΟΝΟ τ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ

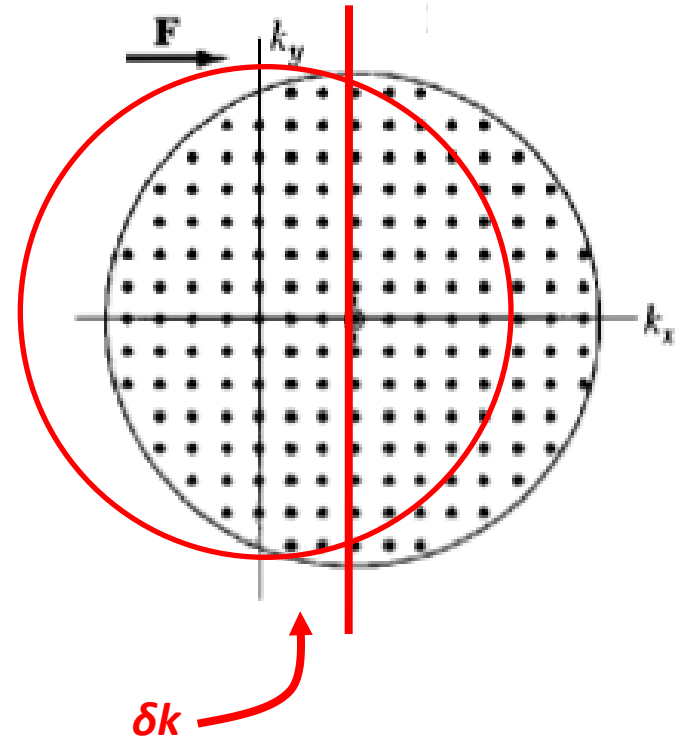
$$\delta\vec{k} = -\frac{e\vec{E}}{\hbar}\tau$$

Η ΣΦΑΙΡΑ FERMΙ ΘΑ ΠΑΡΑΜΕΙΝΕΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΜΕΝΗ ΚΑΤΑ δk ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ



ΣΦΑΙΡΑ FERMI ΓΙΑ $F=0$



$$\delta \vec{k} \cong 10^{-7} k_F$$

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ

ΑΝ Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΕΙΝΑΙ n , Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΙΝΑΙ ΙΣΗ ΠΡΟΣ

$$\vec{j} = nq\vec{v} = n(-e)(-e)\frac{\vec{E}}{m}\tau_F = \frac{ne^2\tau_F\vec{E}}{m}$$

τ_F ΕΊΝΑΙ Ο ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΣΥΦΚΡΟΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΜΕ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΧΕΔΟΝ ΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ FERMI v_F . ΕΠΟΜΕΝΩΣ Η ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΕΊΝΑΙ ΙΣΗ ΠΡΟΣ

$$\sigma = \frac{ne^2\tau_F}{m}$$

ΕΠΕΙΔΗ $\vec{j} = \sigma\vec{E}$

Η ΜΕΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΔΙΝΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ:

$$\ell_F = v_F\tau_F$$

ΚΑΤΑΛΗΓΟΥΜΕ ΣΤΗΝ ΣΧΕΣΗ $\sigma = \frac{1}{12\pi^3} \frac{e^2}{\hbar} S_F \ell_F$

ΌΠΟΥ $S_F = 4\pi k_F^2$

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ

ΤΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΕΙΝΑΙ ΟΤΙ Η ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΕΜΒΑΔΟΝ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΦΑΙΡΑΣ . Η ΣΧΕΣΗ ΑΥΤΗ ΕΙΝΑΙ ΓΕΝΙΚΗ ΑΠΟΔΕΙΚΝΥΕΤΑΙ ΟΤΙ Η ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ ΜΟΝΟ ΓΙΑ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ FERMI ΑΛΛΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΜΗ ΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ.

ΤΟ ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΑΠΟ ΟΣΑ ΑΝΑΦΕΡΘΗΚΑΝ ΜΕΧΡΙ ΤΩΡΑ ΣΥΓΚΡΙΝΟΝΤΑΣ ΤΑ ΔΥΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΝΑΦΕΡΘΗΚΑΝ, ΤΟ ΚΛΑΣΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ DRUDE ΜΕ ΤΗΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ MAXWELL-BOLTZMANN ΚΑΙ ΤΟ ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΜΕ ΤΗΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ FERMI-DIRAC, ΚΑΤΑΛΗΓΟΥΜΕ ΣΤΑ ΕΞΗΣ ΔΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

1. ΜΕ ΤΟ ΚΛΑΣΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΟΛΑ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΕΞ ΙΣΟΥ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.
2. ΜΕ ΤΟ ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ Η ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΕ ΠΟΛΥ ΛΙΓΟΤΕΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΠΟΥ ΚΙΝΟΥΝΤΑΙ ΜΕ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ $\vec{v} \cong \vec{v}_F$

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ -ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ

Η ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΙΝΑΙ ΙΣΗ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau}$$

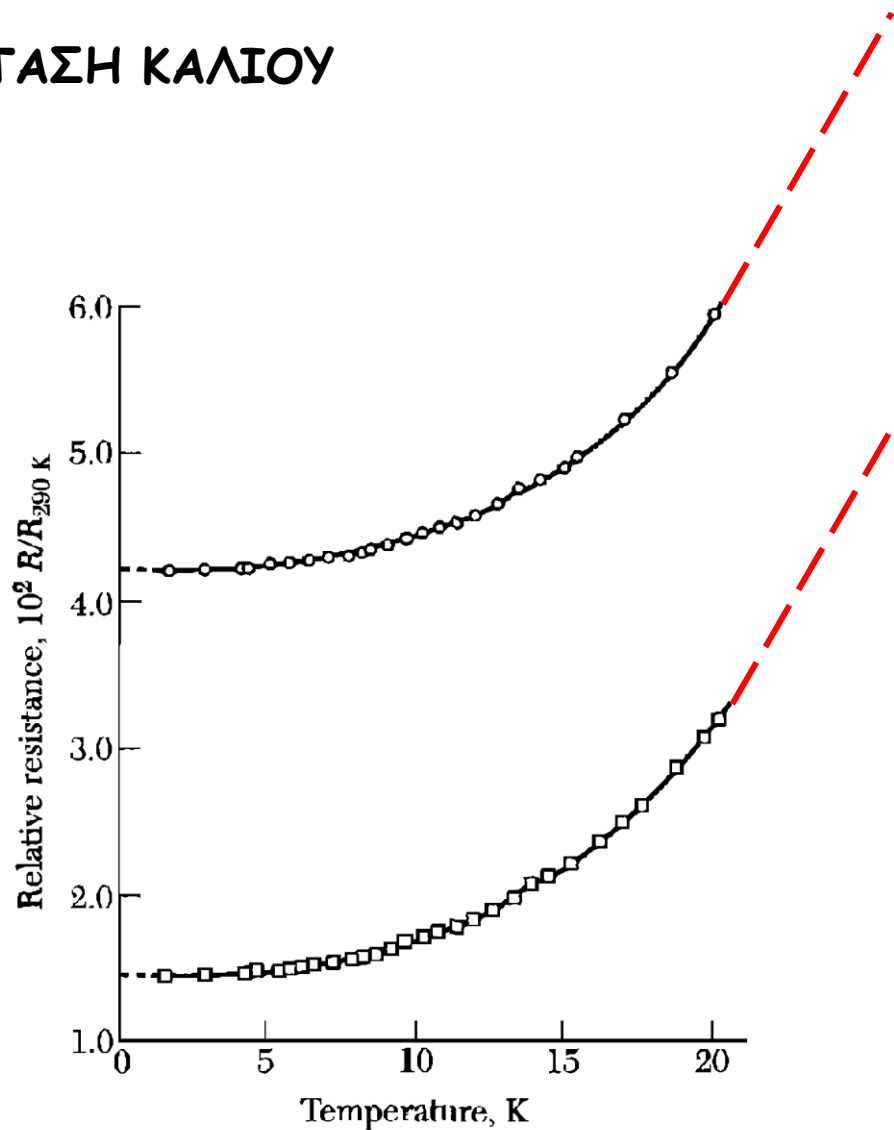
Η ΜΕΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ℓ_F ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΠΑΡΕΙ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ 10^2 ΕΩΣ ΚΑΙ 10^7 ΦΟΡΕΣ ΤΗΝ ΕΝΔΟΑΤΟΜΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ.

ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΓΙΑ ΤΟΝ Cu ΕΙΝΑΙ:

$$v_F = 1,57 \times 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad \ell_F(300 \text{ K}) \cong 3 \times 10^{-6} \text{cm} \quad \ell_F(4 \text{ K}) \cong 0,3 \text{cm}$$

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΛΙΟΥ



ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΕΡΜΗΝΕΥΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau}$$

ΟΙ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ ΕΙΣΑΓΟΝΤΑΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ τ , ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ.

ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΧΡΟΝΟΥ τ ΕΚΦΡΑΖΕΙ ΤΗΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΧΡΟΝΟΥ.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

ΟΙ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΤΑΣΣΟΝΤΑΙ ΣΕ ΔΥΟ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ:

1. ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΣΗ ΘΕΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΛΟΓΩ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ Ή ΤΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΤΟΥΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ ΜΕ **ΦΩΝΟΝΙΑ**.
2. ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΟΦΕΙΛΟΜΕΝΕΣ ΣΕ ΞΕΝΕΣ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΙΣ Ή ΑΛΛΕΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΣΤΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

ΘΕΩΡΟΥΜΕ ΤΟΥΣ ΔΥΟ ΑΥΤΟΥΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΟΥΣ ΜΕ ΣΥΝΕΠΤΕΙΑ ΝΑ ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ
ΓΡΑΨΟΥΜΕ:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_l}$$

τ_p  ΦΩΝΟΝΙΑ

τ_l  ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΙΣ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΓΡΑΨΟΥΜΕ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ:

$$\rho = \rho_i + \rho_p = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau_i} + \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau_p}$$

Η ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ ΕΙΝΑΙ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ
ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΝΩ Η ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΛΟΓΩ
ΦΩΝΟΝΙΩΝ ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ.

ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΟΥΣ

ΘΕΩΡΟΥΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΩΝ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΙΣ. ΤΟΤΕ ΘΑ ΙΣΧΥΕΙ

$$\tau_i = \frac{\ell_i}{v_F}$$

ΘΕΩΡΟΥΜΕ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟ ΔΙΑΤΟΜΗ ΣΚΕΔΑΣΗΣ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ

$$\ell_i = \frac{1}{n_i \sigma_i}$$

ΤΟΤΕ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ

$$\rho = \rho_i + \rho_p = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau_i} + \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau_p} = \frac{m}{ne^2} v_F n_i \sigma_i + \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau_p}$$

ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΦΩΝΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

ΓΙΑ ΦΩΝΟΝΙΑ ΘΑ ΙΣΧΥΕΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ

$$\ell_p = \frac{1}{n_{ion} \sigma_{ion}}$$

ΟΠΟΥ $\sigma_{ion} = \pi \langle x^2 \rangle$

ΘΕΩΡΩΝΤΑΣ ΤΟ ΙΟΝ ΣΑΝ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΤΑΛΑΝΤΩΤΗ Η
ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΊΝΑΙ ΊΣΗ ΠΡΟΣ

$$\frac{1}{2} D \langle x \rangle^2 = \langle E \rangle = \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}$$

ΟΡΙΖΟΥΜΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΕΒΥΕ ΑΠΌ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ: $\hbar \omega_D = k_B \Theta_D$
ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΑ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ Η ΣΧΕΣΗ

$$\rho_p(T) = \text{σταθ.} \cdot \frac{1}{e^{\Theta_D / T} - 1}$$

Ή ΓΙΑ $T \gg \Theta_D$

$$\rho_p(T) \cong \text{σταθ.} \cdot \frac{T}{\Theta_D}$$

ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ)

ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΒΑΝΤΟΜΗΤΗΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΘΕΩΡΟΥΜΕ ΩΣ ΑΦΕΤΗΡΙΑ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ) ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΟΠΟΙΑ Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΙΝΕΤΑΙ ΑΠΌ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ:

$$\kappa = \frac{1}{3} C v \ell$$

ΟΠΟΥ C ΕΊΝΑΙ Η ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΟΓΚΟΥ, v Η ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΩΝ ΚΑΙ ℓ Η ΜΕΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΩΝ.

ΑΝ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΗΣΟΥΜΕ ΣΤΗΝ ΣΧΕΣΗ ΑΥΤΉ ΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΌ ΤΗΝ ΘΕΩΡΙΑ FERMİ-DİRAC, ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ Η ΣΧΕΣΗ:

$$\kappa = \frac{\pi^2 N k_B^2 T}{3m} \tau_F$$

ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΥΜΕ ΤΟ ΠΗΛΙΚΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ Η ΣΧΕΣΗ:

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{\frac{\pi^2 n k_B^2 T}{3m} \tau_F}{\frac{ne^2 \tau_F}{m}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\pi k_B}{e} \right)^2 T = LT$$

Η ΣΧΕΣΗ ΑΥΤΗ ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΤΟΝ ΝΟΜΟ WIEDEMANN-FRANZ ΟΠΟΥ L ΕΙΝΑΙ Ο ΑΡΙΘΜΟΣ LORENZ ΚΑΙ ΕΙΝΑΙ Ο ΙΔΙΟΣ ΓΙΑ ΟΛΑ ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ.

$$\frac{1}{3} \left(\frac{\pi k_B}{e} \right)^2 = 2,443 \times 10^{-8} \frac{\text{W} \cdot \Omega \text{m}}{\text{K}^2}$$

Ο ΛΟΓΟΣ κ/σ ΔΕΝ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΤΟ τ ΕΠΕΙΔΗ ΥΠΟΘΕΤΟΥΜΕ ΟΤΙ Ο ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΕΊΝΑΙ Ο ΙΔΙΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ, ΠΡΑΓΜΑ ΠΟΥ ΙΣΧΥΕΙ ΓΙΑ $T > \Theta_D$

ΟΜΩΣ ΓΙΑ $T < \Theta_D$ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ ΓΙΑ ΤΙ ΟΙ ΧΡΟΝΟΙ τ_p ΚΑΙ τ_l ΕΙΝΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

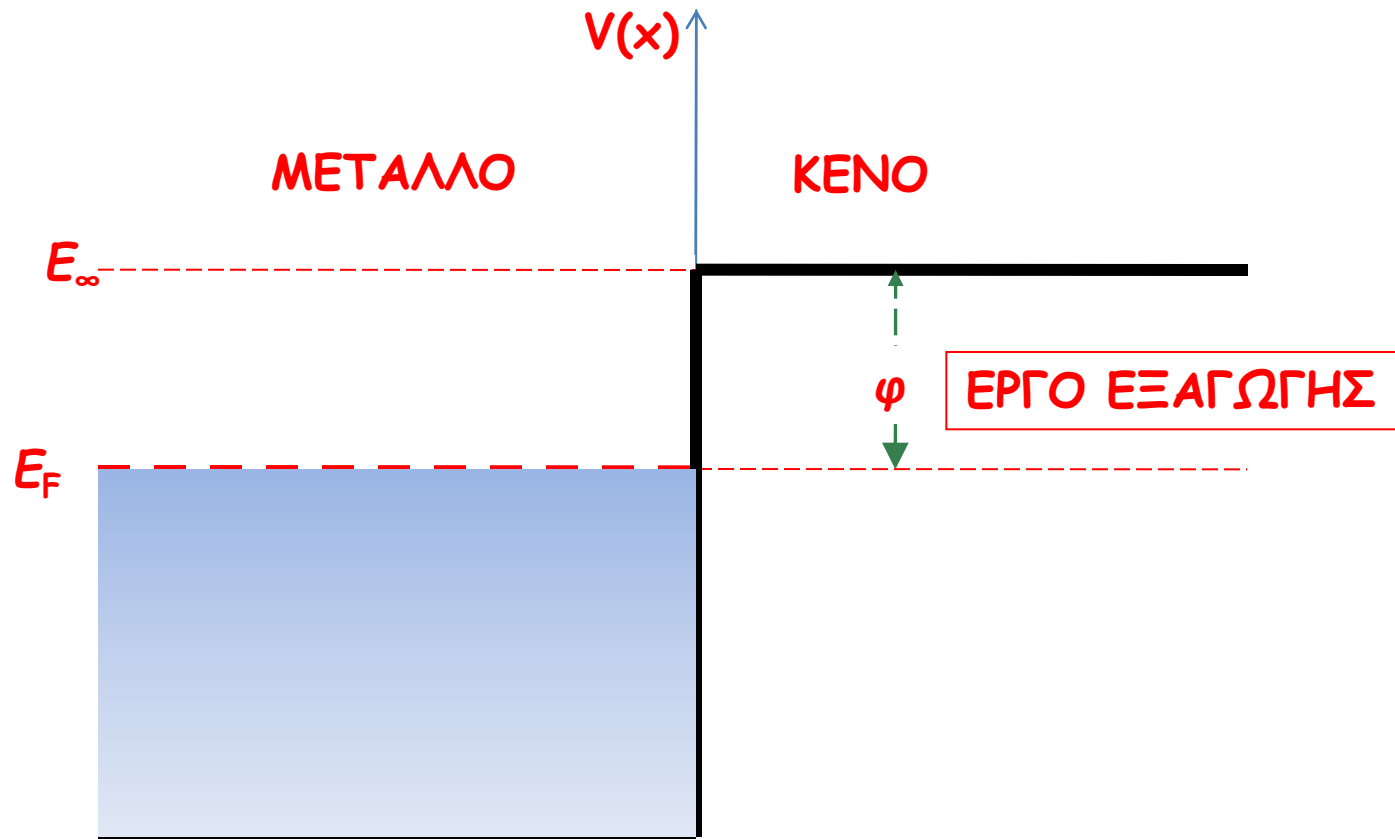
ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΜΕΧΡΙ ΤΩΡΑ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΓΙΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΑΠΕΙΡΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ.

Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΟΜΩΣ ΠΑΡΑΜΕΝΕΙ ΑΝ ΘΕΩΡΗΣΟΥΜΕ ΠΕΤΤΕΡΑΣΜΕΝΟ ΟΓΚΟ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΟ ΑΕΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΘΕΩΡΕΙΤΑΙ ΟΤΙ ΠΕΡΙΕΧΕΤΑΙ ΣΕ ΚΙΒΩΤΙΟ ΜΕ ΑΔΙΑΠΕΡΑΣΤΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ.

ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΔΗΓΟΥΝ ΣΤΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΟΤΙ Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΕΊΝΑΙ ΑΡΚΕΤΗ ΩΣΤΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΝΑ ΕΓΚΑΤΑΛΕΙΨΟΥΝ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΕΙΝΑΙ Η ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΕΛΚΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ



ΕΙΔΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

1. ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (THERMIONIC EMISSION)
2. ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (PHOTOEMISSION)
3. ΕΚΠΟΜΠΗ ΠΕΔΙΟΥ (FIELD EMISSION) (α) ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ SCHOTTKY (β) ΨΥΧΡΗ ΕΚΠΟΜΠΗ
4. ΕΚΠΟΜΠΗ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (SECONDARY ELECTRON EMISSION)

ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (THERMIONIC EMISSION)

ΤΟ ΒΑΣΙΚΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΙΤΙΟ ΠΟΥ ΑΙΤΙΟΛΟΓΕΙ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΕΝΑ ΜΕΤΑΛΛΟ ΣΕ ΔΟΘΕΙΣΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΙΝΑΙ ΟΤΙ ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΙΝΑΙ ΑΡΚΕΤΑ ΜΕΓΑΛΗ ΩΣΤΕ ΝΑ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΘΟΥΝ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΗ ΌΤΙ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΠΟΛΥ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΦΕΝΟΣ ΚΑΙ ΚΙΝΟΥΝΤΑΙ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ.

Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΟΝΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΟΔΗΓΕΙ ΣΤΗΝ ΣΧΕΣΗ RICHARDSON- DUSHMAN:

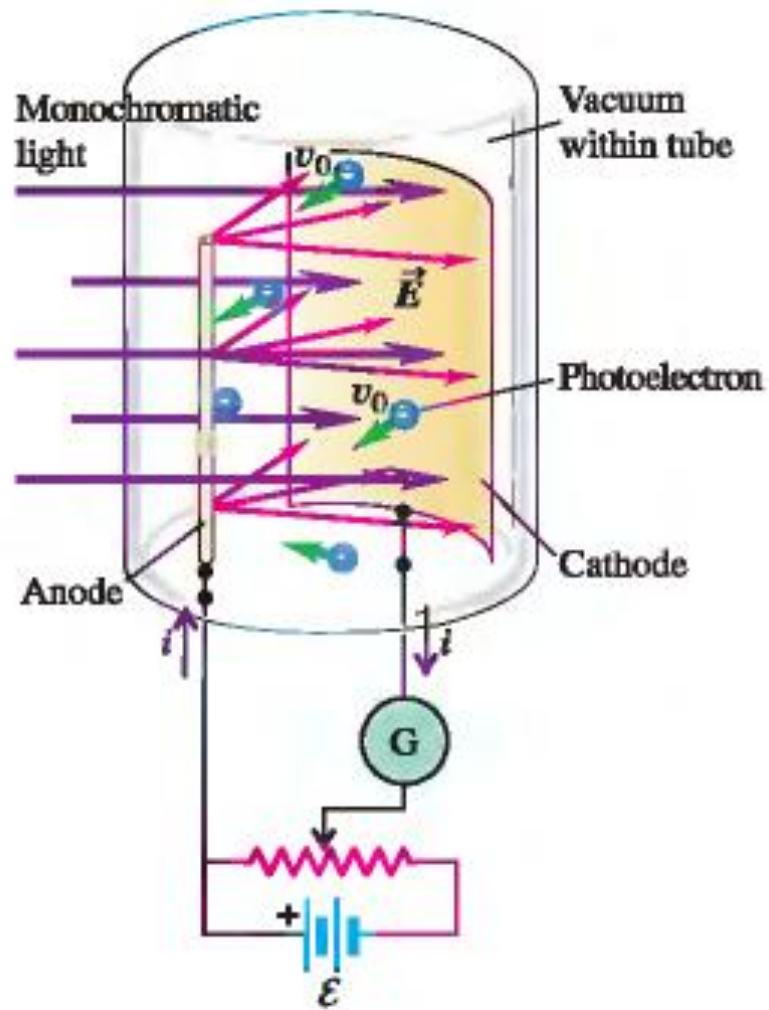
$$I = \frac{4\pi me}{h^3} (k_B T)^2 e^{-e\phi/k_B T}$$

Η ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ

$$\ln \frac{I}{T^2} = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

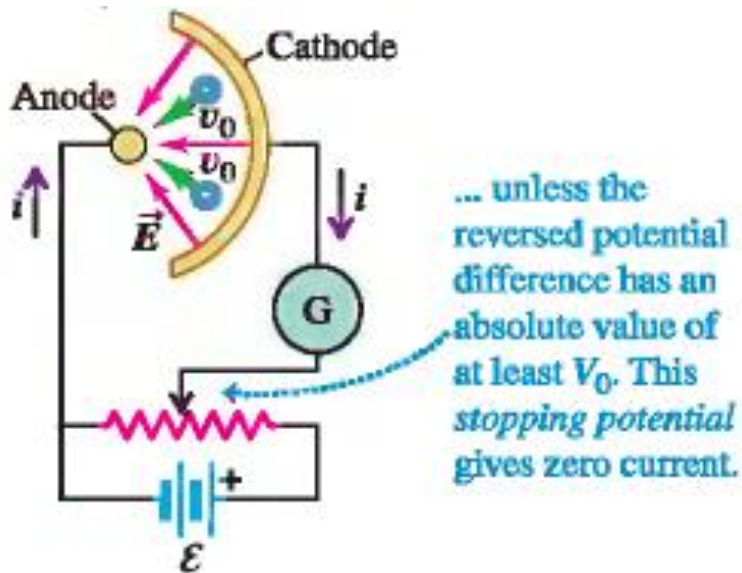
ΕΙΝΑΙ ΕΥΘΕΙΑ ΓΡΑΜΜΗ.

ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (PHOTOEMISSION)



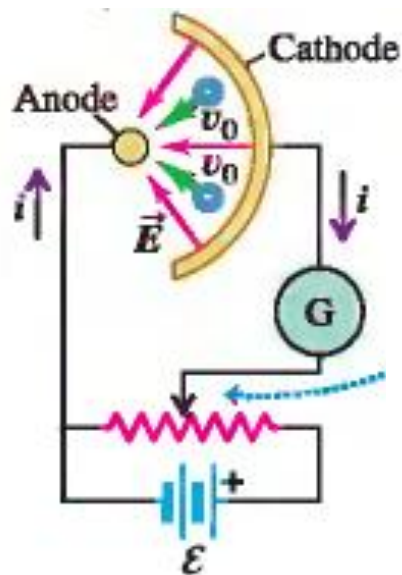
ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (PHOTOEMISSION)

ΟΤΑΝ Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΝΑΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΟ ΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ, ΠΑΡΑΤΗΡΕΙΤΑΙ Η ΕΚΠΟΜΠΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΘΟΔΟ. ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ Η ΔΥΝΑΜΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΑΣΚΕΙΤΑΙ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΕΦΕΤΑΙ. Ο ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΤΑΙ ΑΠΌ ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΠΟΚΟΠΗΣ V_0 , ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΜΗΔΕΝΙΖΕΤΑΙ ΤΟ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ. ΘΑ ΙΣΧΥΕΙ:



ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (PHOTOEMISSION)

ΟΤΑΝ Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΕΙΝΑΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΌ ΤΟ ΚΑΤΩΦΛΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ, ΠΑΡΑΤΗΡΕΙΤΑΙ Η ΕΚΠΟΜΠΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΘΟΔΟ. ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ Η ΔΥΝΑΜΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΑΣΚΕΙΤΑΙ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΕΦΕΤΑΙ. Ο ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΤΑΙ ΑΠΌ ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΠΟΚΟΠΗΣ V_0 , ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΜΗΔΕΝΙΖΕΤΑΙ ΤΟ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ. ΘΑ ΙΣΧΥΕΙ:



$$W_{\text{tot}} = -eV_0 = \Delta K = 0 - K_{\text{max}}$$

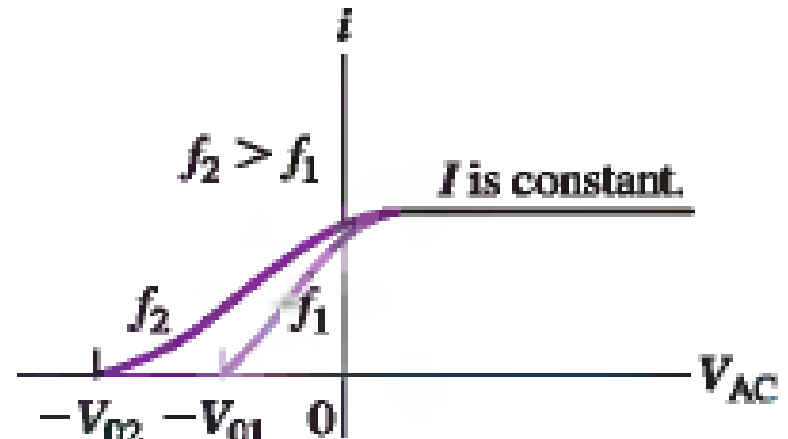
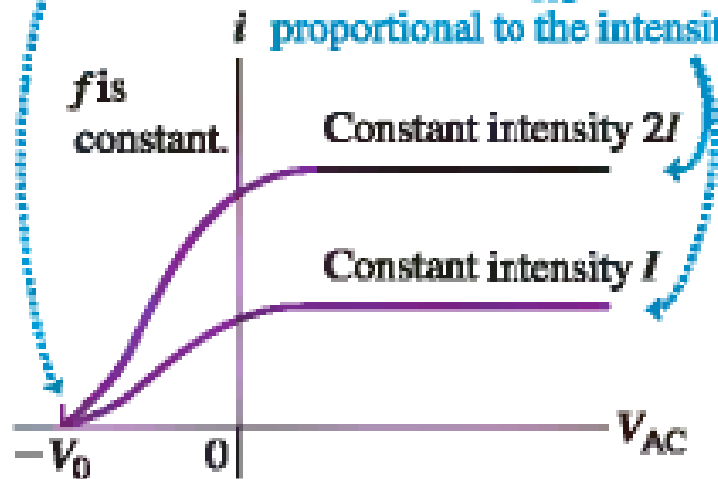
$$K_{\text{max}} = \frac{1}{2}mv_{\text{max}}^2 = eV_0$$

ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΠΟΚΟΠΗΣ

ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (PHOTOEMISSION)

The stopping potential V_0 is independent of the light intensity ...

... but the photocurrent i for large positive V_{AC} is directly proportional to the intensity.



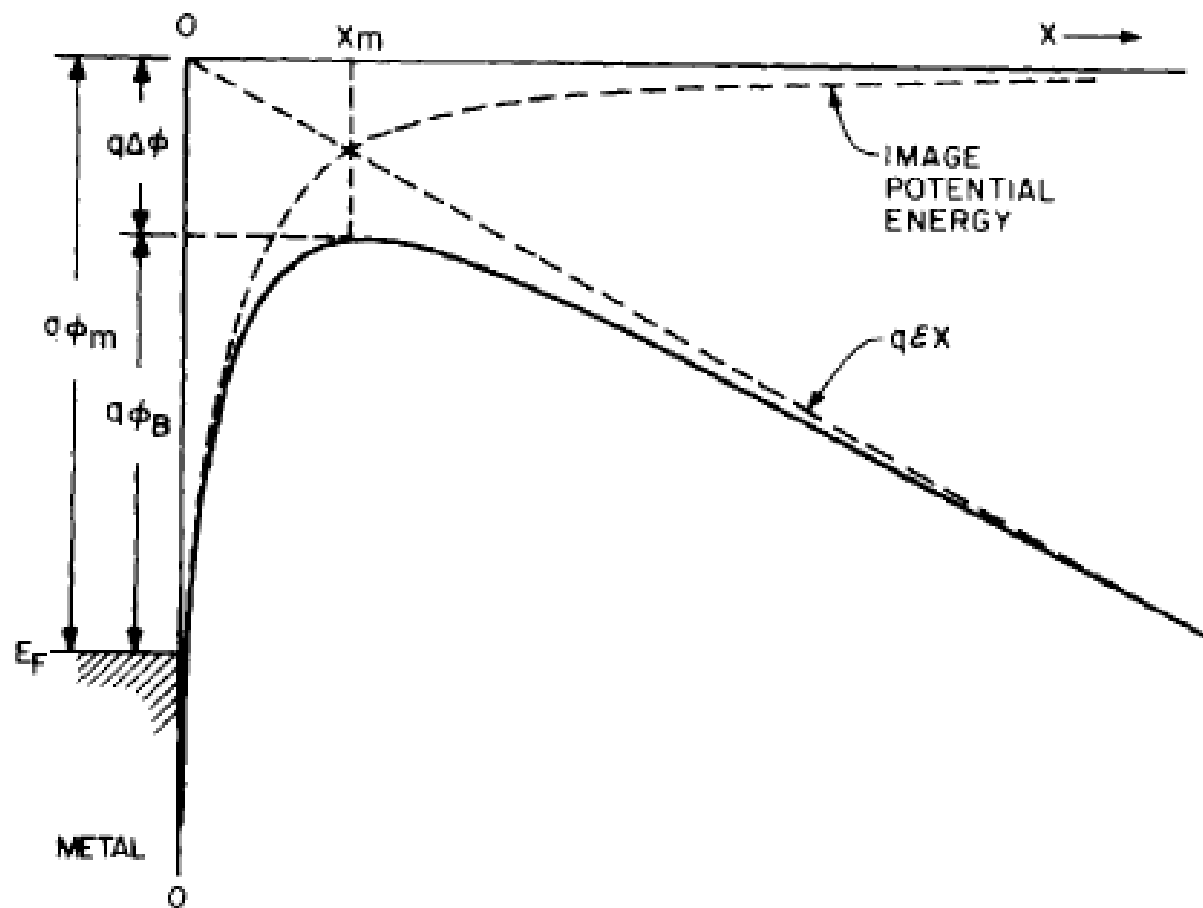
The stopping potential V_0 (and therefore the maximum kinetic energy of the photoelectrons) increases linearly with frequency: since $f_2 > f_1$, $V_{02} > V_{01}$.

ΕΚΠΟΜΠΗ ΠΕΔΙΟΥ (FIELD EMISSION)

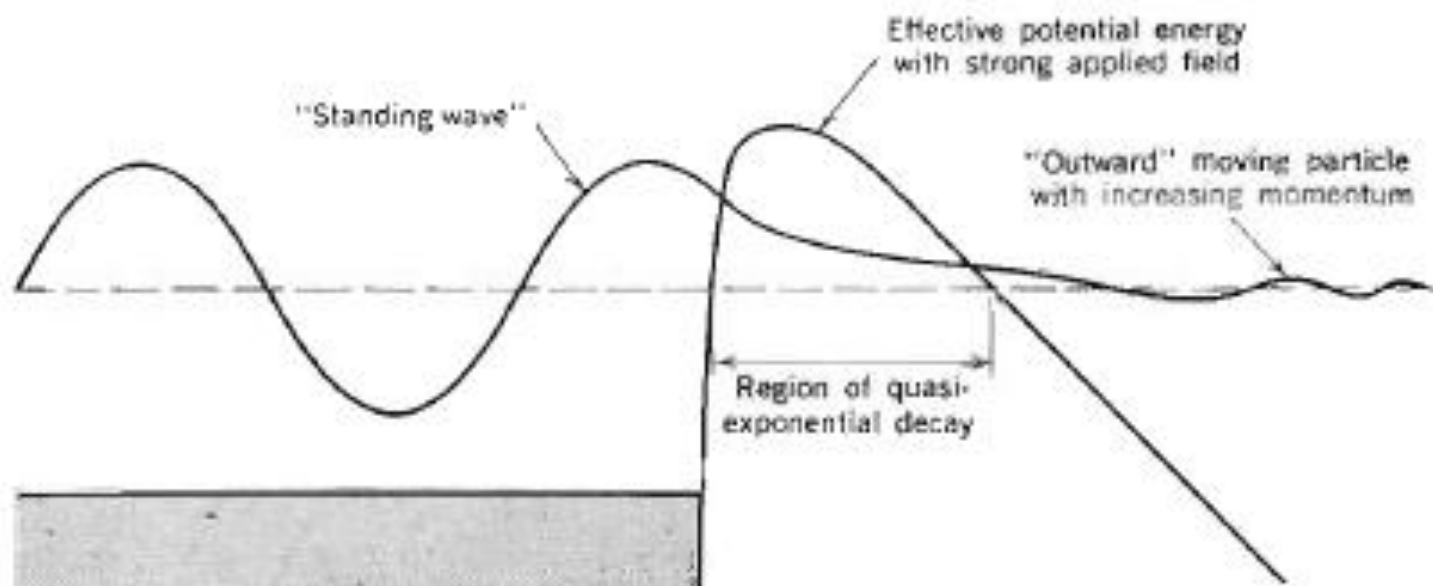
(α) ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ SCHOTTKY

(β) ΨΥΧΡΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

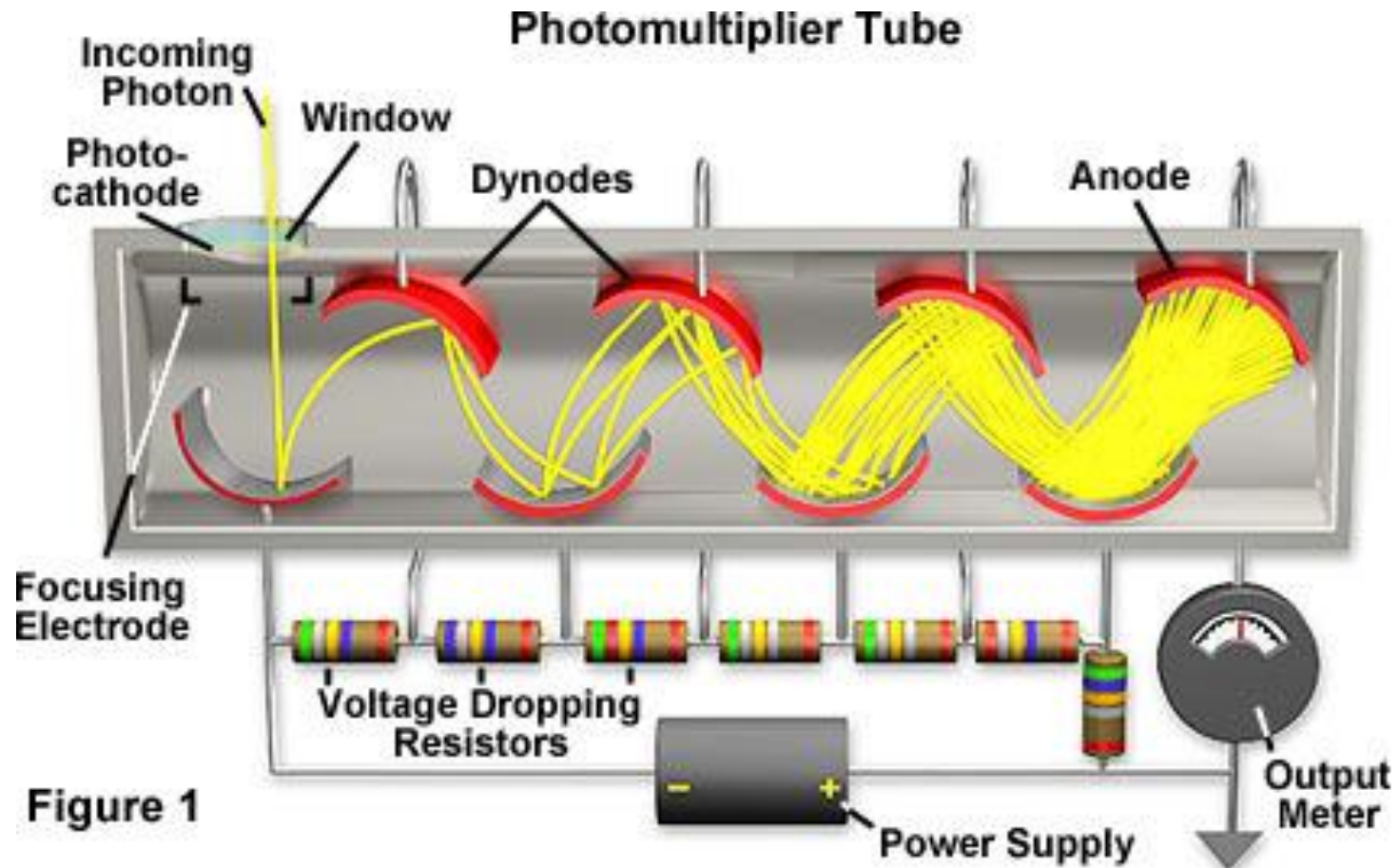
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ SCHOTTKY



ΨΥΧΡΗ ΕΚΠΟΜΠΗ



ΕΚΤΟΜΠΗ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (SECONDARY ELECTRON EMISSION)



ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

ΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΤΗΝ ΠΛΕΟΝ ΧΡΗΣΙΜΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΟΛΑ ΤΑ ΣΤΕΡΕΑ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ.

ΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΕΧΟΥΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ή ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ) ΠΟΥ ΚΥΜΑΙΝΕΤΑΙ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΛΩΝ ΜΟΝΩΤΩΝ ΚΑΙ ΚΑΛΩΝ ΑΓΩΓΩΝ. Η ΠΟΛΥ ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΣΤΗΝ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ΓΕΓΟΝΟΣ ΟΤΙ ΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΥΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΙΝΑΙ ΠΟΛΥ ΕΥΑΙΣΘΗΤΕΣ ΣΕ ΠΟΛΥ ΜΙΚΡΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΗΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ.

ΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑ ΙΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΕΊΝΑΙ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ Si ΚΑΙ Ge. ΠΑΝΤΩΣ Η ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΥΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΑΣΧΟΛΟΥΝΤΑΙ ΠΑΡΑ ΠΟΛΛΟΙ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΕΣ ΣΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΕ ΟΛΟ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ.

Group 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Period

1																	2	
	1 H 1.008															2 He 4.003		
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012										5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180	
	11 Na 22.990	12 Mg 24.305										13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.078	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
	87 Fr (223)	88 Ra (226)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo

Lanthanoids	57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
Actinoids	89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)

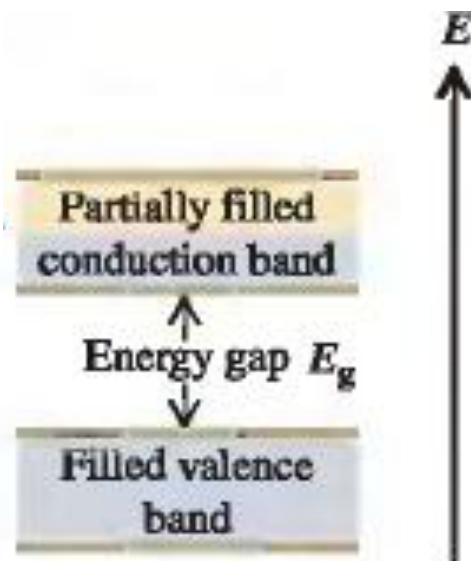
ΤΟ Si ΚΑΙ ΤΟ Ge ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΤΗΝ ΟΜΑΔΑ IV ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΧΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΞΩΤΑΤΗ ΑΤΟΜΙΚΗ ΣΤΙΒΑΔΑ ΤΕΣΣΕΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ



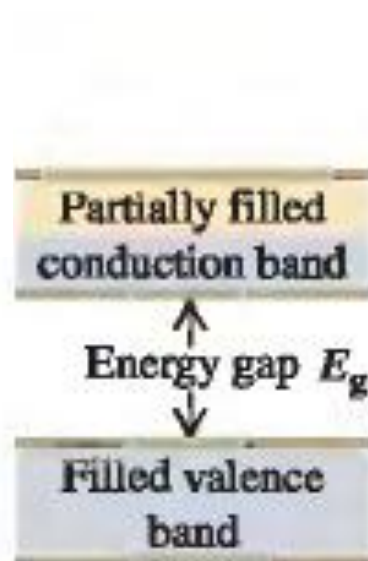
ΚΑΙ ΤΑ ΔΥΟ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΔΑΜΑΝΤΑ.

ΕΠΕΙΔΗ ΚΑΙ ΤΑ ΤΕΣΣΕΡΑ ΕΞΩΤΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΣΤΟΥΣ ΔΕΣΜΟΥΣ, Η ΣΤΙΒΑΔΑ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΙΝΑΙ ΠΛΗΡΩΣ ΑΔΕΙΑ Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΣΤΙΒΑΔΩΝ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΣΕ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΝΑ ΜΗ ΜΠΟΡΟΥΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΝΑ ΜΕΤΑΠΗΔΗΣΟΥΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ, ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΥΤΑ ΝΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΕΡΟΝΤΑΙ ΩΣ ΜΟΝΩΤΕΣ.

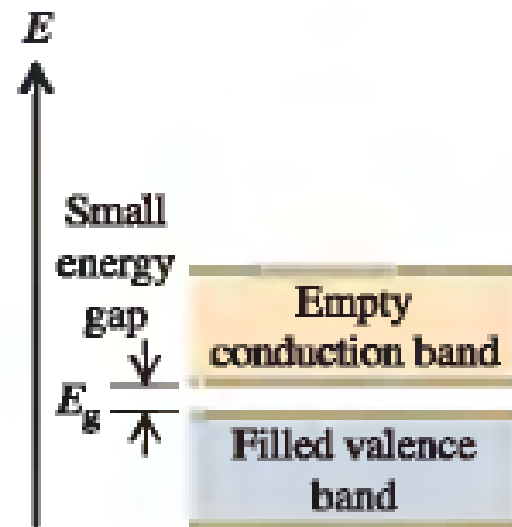
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΑ ΓΡΑΜΜΑ ΖΩΝΩΝ



ΜΕΤΑΛΛΟ



ΜΟΝΩΤΗΣ



ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ

ΑΣΚΗΣΗ: Θεωρούμε υλικό με ενέργεια Fermi στη μέση του ενεργειακού κενού. Υπολογίστε την πιθανότητα να είναι κατειλημμένη μια κατάσταση στην βάση της ζώνης αγωγιμότητας σε θερμοκρασία 300 K αν το ενεργειακό κενό είναι (α) 0,200 eV, (b) 1,00 eV και (c) 5,00 eV. Να επαναλάβετε τους υπολογισμούς για θερμοκρασία 310 K.

Λύση

Η συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac παίρνει την μορφή

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} = \frac{1}{e^{\frac{E_g/2}{kT}} + 1}$$

Επειδή εξ ορισμού ισχύει

$$E = E_F + \frac{E_g}{2} \rightarrow E - E_F = \frac{E_g}{2}$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές και έχουμε

(α)

$$\frac{E - E_F}{kT} = \frac{0,100 \text{ eV}}{\left(8,617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (300 \text{ K})} = 3,87$$

και

$$f(E) = \frac{1}{e^{3,87} + 1} = 0,0205$$

Στους 310 K η συνάρτηση κατανομής δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα.

$$\frac{E - E_F}{kT} = \frac{0,100 \text{ eV}}{\left(8,617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (310 \text{ K})} = 3,74$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{3,74} + 1} = 0,0231$$

Παρατηρούμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 K προκαλεί μεταβολή της συνάρτησης Fermi-Dirac κατά

$$\frac{0,0231 - 0,0205}{0,0205} = 0,127 = 12,7\%$$

(b) Για ενεργειακό χάσμα 1,00 V έχουμε για 300 K

$$\frac{E - E_F}{kT} = \frac{0,500 \text{ eV}}{\left(8,617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (300 \text{ K})} = 19,3$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{19,3} + 1} = 4,15 \times 10^{-9}$$

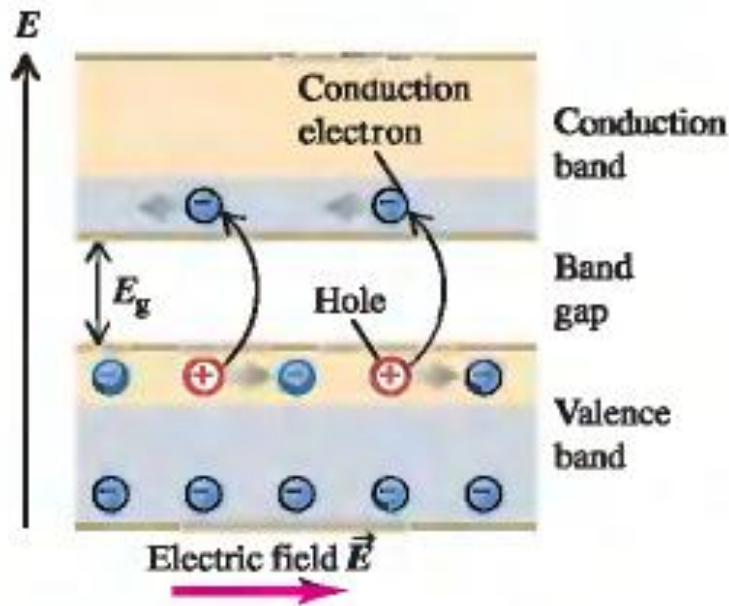
(c) Για ενεργειακό χάσμα 5,00 V έχουμε για 300 K

$$\frac{E - E_F}{kT} = \frac{2,50 \text{ eV}}{\left(8,617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (300 \text{ K})} = 96,7$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{96,7} + 1} = 1,01 \times 10^{-42}$$

ΑΚΟΛΟΥΘΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΙΔΙΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΟΠΩΣ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ
ΘΑ ΜΠΟΡΟΥΣΕ ΚΑΝΕΙΣ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΕΙ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ n ΤΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΠΟΙΑΔΗΠΟΤΕ
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ. ΘΑ ΕΠΡΕΠΕ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΕΙ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ
ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ $g(E)$ ΣΤΑ ΟΡΙΑ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.
ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΞΕΦΕΥΓΟΥΝ ΑΠΌ ΤΑ
ΟΡΙΑ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΑΥΤΟΥ. ΟΤΑΝ ΟΜΩΣ ΓΝΩΡΙΖΟΥΜΕ ΤΗΝ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ n ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΟΥΜΕ ΤΗΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΑ ΓΝΩΣΤΑ ΑΠΌ ΤΟΝ
ΚΛΑΣΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ, ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ.
ΟΜΩΣ ΟΠΩΣ ΘΑ ΔΟΥΜΕ ΣΤΗΝ ΣΥΝΕΧΕΙΑ Η ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΟΥΣ
ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ ΔΕΝ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΜΟΝΟ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ.
Η ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ΟΤΙ ΣΤΗΝ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΔΕΝ
ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΜΟΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΑΛΛΑ ΚΑΙ ΟΠΕΣ.

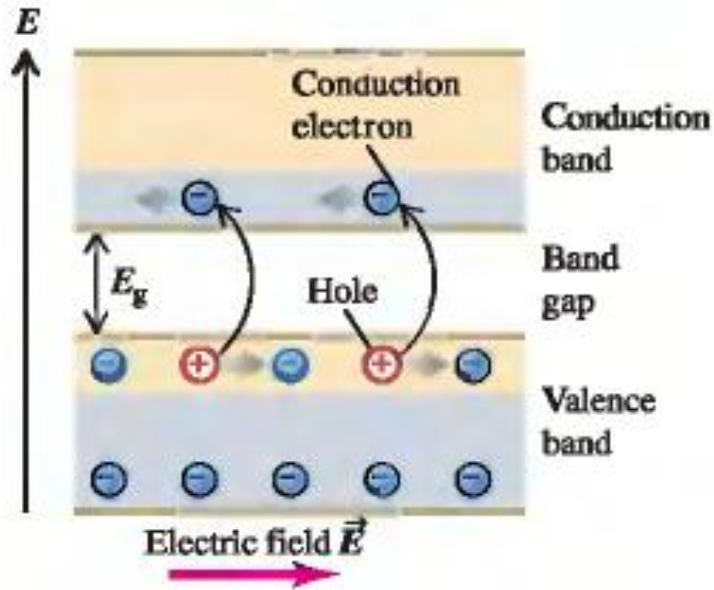
ΟΤΕΣ



ΟΤΑΝ ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΜΕΤΑΦΕΡΘΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙ ΜΙΑ ΚΕΝΗ ΘΕΣΗ. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΑΠ'Ο ΓΕΙΤΟΝΙΚΗ ΘΕΣΗ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΜΕΤΑΠΗΔΗΣΕΙ ΣΤΗΝ ΚΕΝΗ ΘΕΣΗ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΗΚΕ ΚΑΙ ΝΑ ΕΜΦΑΝΙΣΤΕΙ ΝΕΑ ΚΕΝΗ ΘΕΣΗ, Η ΟΠΟΙΑ ΚΑΛΕΙΤΑΙ **ΟΤΗ** ΚΑΙ Η ΟΠΟΙΑ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΕΠΤΟΜΕΝΩΣ ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΦΟΡΕΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.

ΟΙ ΑΜΙΓΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΟΙ ΟΠΟΙΟΙ ΔΕΝ ΕΧΟΥΝ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΙΣ ΚΑΛΟΥΝΤΑΙ **ΕΝΔΟΓΕΝΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ**. ΚΥΡΙΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ Ε'ΙΝΑΙ ΟΤΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΟΤΕΣ Ε'ΙΝΑΙ **ΙΣΑ** ΣΕ ΑΡΙΘΜΟ.

ΟΠΕΣ



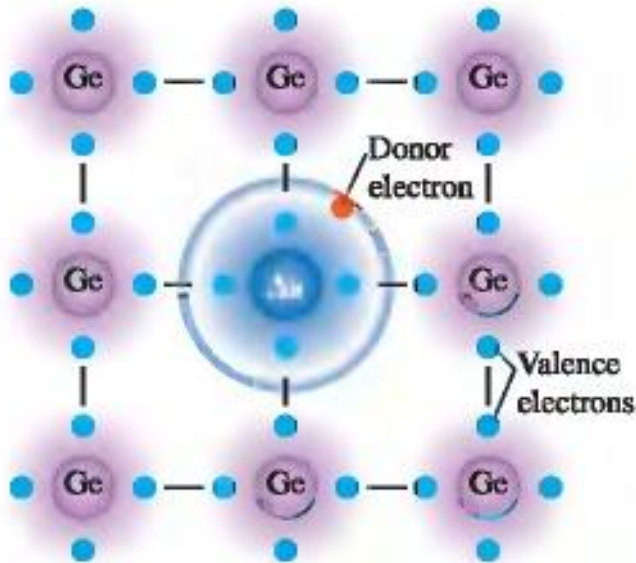
ΟΤΑΝ ΕΦΑΡΜΟΣΤΕΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΟΠΕΣ ΚΙΝΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΑΝΤΙΘΕΤΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ. ΕΠΟΜΕΝΩΣ, ΜΙΑ ΟΠΗ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΕΡΕΤΑΙ ΩΣ ΕΝΑ ΘΕΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΑΝ ΚΑΙ ΤΟ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ ΕΙΝΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ.

Η ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΛΕΙΤΑΙ **ΕΝΔΟΓΕΝΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ**.

ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΣΤΗΝ ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ ΑΥΤΗ ΔΕΙΧΝΕΙ ΚΑΘΑΡΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΠΩΝ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ

(a) A donor (*n*-type) impurity atom has a fifth valence electron that does not participate in the covalent bonding and is very loosely bound.



ΥΠΟΘΕΤΟΥΜΕ ΌΤΙ ΣΕ ΤΗΓΜΑ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ($Z=32$) ΠΡΟΣΘΕΤΟΥΜΕ ΜΙΚΡΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ($Z=33$), ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΕΠΟΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΜΕΤΑ ΤΟ ΓΕΡΜΑΝΙΟ ΣΤΗΝ ΙΔΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟ. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ ΣΕ ΈΝΑ ΗΜΙΑΓΩΓΟ ΚΑΛΕΙΤΑΙ **DOPING**.

ΤΟ ΑΡΣΕΝΙΚΟ ΑΝΗΚΕΙ ΣΤΗΝ ΟΜΑΔΑ V ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΚΑΙ ΕΧΕΙ ΠΕΝΤΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΣΘΕΝΟΥΣ. ΌΤΑΝ ΑΦΑΙΡΕΘΕΙ ΕΝΑ ΑΠΟ ΤΑ ΠΕΝΤΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ, Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΝ ΕΊΝΑΙ Η ΙΔΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ.

Η ΜΟΝΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΝΑΙ ΟΤΙ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΟΥ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥ ΕΊΝΑΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟ ΕΠΕΙΔΗ Ο ΠΥΡΗΝΑΣ ΕΧΕΙ 33 ΠΡΩΤΟΝΙΑ ΑΝΤΙ ΤΩΝ 32 ΤΟΥ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΜΕ ΣΥΝΕΠΕΙΑ ΝΑ ΕΛΚΕΙ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΛΙΓΑΚΙ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΟ. ΣΥΝΕΠΕΙΑ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΕΙΝΑΙ ΝΑ ΑΝΤΙΚΑΘΙΣΤΑ ΕΥΚΟΛΑ ΕΝΑ ΑΤΟΜΟ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ ΩΣ **ΠΡΟΣΜΕΙΞΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**.

Group 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Period

1																	2	
1	1 H 1.008																	2 He 4.003
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.078	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo

Lanthanoids

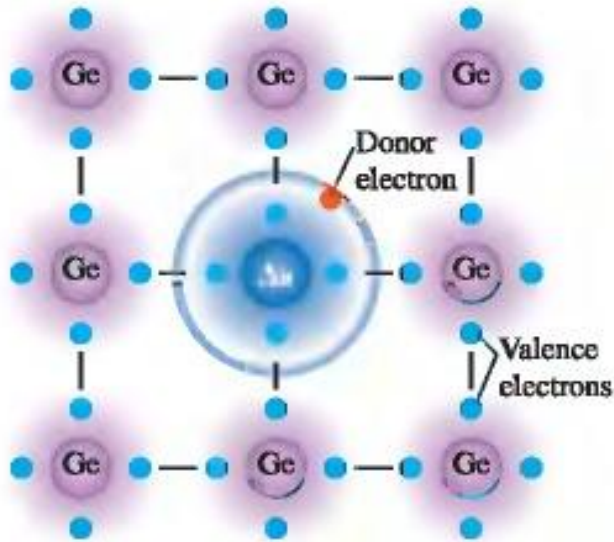
57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
----------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------

Actinoids

89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)
--------------------------	--------------------------	--------------------------	-------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ

(a) A donor (*n*-type) impurity atom has a fifth valence electron that does not participate in the covalent bonding and is very loosely bound.



ΤΑ ΤΕΣΣΕΡΑ ΑΠΟ ΤΑ ΠΕΝΤΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΣΘΕΝΟΥΣ ΣΧΗΜΑΤΙΖΟΥΝ ΟΜΟΙΟΠΟΛΙΚΟΥΣ ΔΕΣΜΟΥΣ ΜΕ ΤΑ ΠΛΗΣΙΕΣΤΕΡΑ ΓΕΙΤΟΝΙΚΑ ΑΤΟΜΑ.

ΤΟ ΠΕΜΠΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΕΙΝΑΙ ΧΑΛΑΡΑ ΠΡΟΣΑΡΤΗΜΕΝΟ ΣΤΟ ΑΤΟΜΟ, ΟΠΩΣ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ. ΕΠΟΜΕΝΩΣ, ΤΑ 32 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΙΣΧΥΡΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΠΛΕΓΜΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΘΩΡΑΚΙΖΟΥΝ ΤΟ ΘΕΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ $+33e$ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΑΦΗΝΟΝΤΑΣ ΕΝΑ ΚΑΘΑΡΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ $+e$.

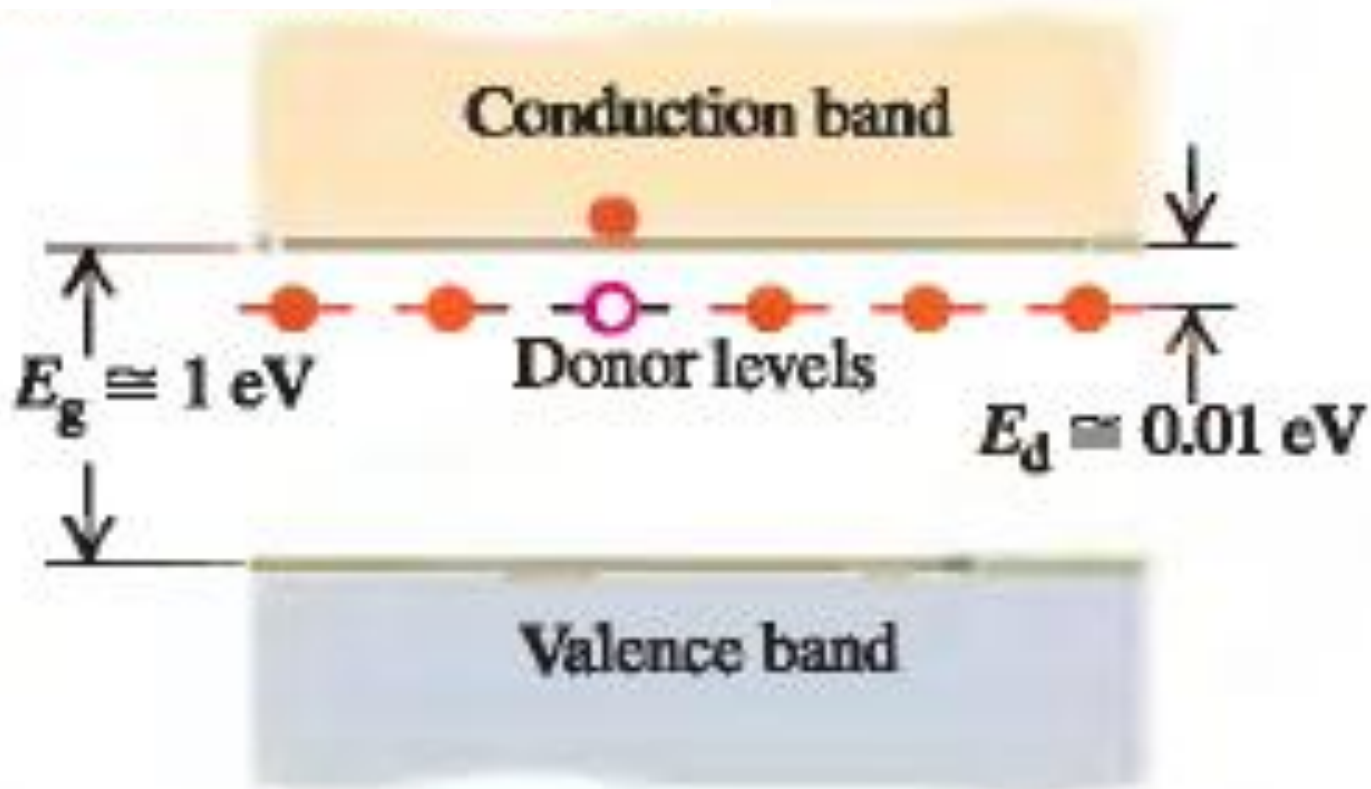
ΘΑ ΜΠΟΡΟΥΣΕ ΚΑΝΕΙΣ ΝΑ ΠΕΙ ΟΤΙ Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΙΝΑΙ ΤΗΣ ΙΔΙΑΣ ΤΑΞΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΕΙΔΟΥΣ ΑΤΟΜΟΥ ΜΕ $n = 4$.

$$\frac{1}{4} (13,6 \text{ eV}) = 0,85 \text{ eV}$$

ΛΟΓΩ ΟΜΩΣ ΤΗΣ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΑΠΟ ΓΕΙΤΟΝΙΚΑ ΑΤΟΜΑ, Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΙΝΑΙ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ $0,01 \text{ eV}$.

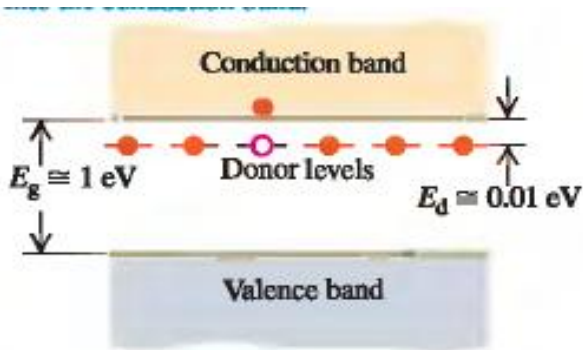
ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΟ ΤΥΠΟΥ n ΣΕ ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ. ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΤΟΥ ΔΟΤΗ ΕΧΕΙ ΔΙΕΓΕΡΘΕΙ ΑΠΌ ΤΙΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΤΟΥ ΔΟΤΗ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ



ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ

Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΟΥ ΠΕΜΠΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΣΕ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ ΩΣ ΜΙΑ ΣΤΑΘΜΗ $0,01 \text{ eV}$ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.



Η ΣΤΑΘΜΗ ΑΥΤΗ ΚΑΛΕΙΤΑΙ ΣΤΑΘΜΗ ΔΟΤΗ ΚΑΙ ΤΟ ΑΤΟΜΟ ΠΡΟΣΜΕΙΞΗΣ ΚΑΛΕΙΤΑΙ ΔΟΤΗΣ.

(ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΚΙΤΡΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΣΤΗΝ ΜΕΘΕΤΟΜΕΝΗ ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΟΥΝ ΩΣ ΔΟΤΕΣ).

ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΩΜΑΤΙΟΥ Η ΠΟΣΟΤΗΤΑ $kT \approx 0,025 \text{ eV}$, ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΟ ΤΗΝ $0,01 \text{ eV}$. ΕΠΟΜΕΝΩΣ, ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΑ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΤΩΝ ΑΠΟΚΤΟΥΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΡΚΕΤΗ ΩΣΤΕ ΝΑ ΜΕΤΑΠΗΔΗΣΟΥΝ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΝΑ ΣΥΜΒΑΛΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.

$$f(E) = \frac{1}{e^{3,87} + 1} = 0,0205$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{19,3} + 1} = 4,15 \times 10^{-9}$$

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΔΟΤΩΝ , ΔΗΛΑΔΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ , ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ 1 ΠΡΟΣ 10^8 ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΑΥΞΗΣΟΥΝ ΤΗΝ ΑΓΩΓΜΟΤΗΤΑ ΤΟΣΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΩΣΤΕ ΝΑ ΘΕΩΡΕΙΤΑΙ Η ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΩΣ ΟΦΕΙΛΟΜΕΝΗ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ . ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΠΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΦΕΡΕΤΑΙ ΜΕ ΑΥΤΟΝ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΚΑΛΕΙΤΑΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΤΥΠΟΥ n .

Group 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Period

1																	2	
1	1 H 1.008																	2 He 4.003
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.078	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo

Lanthanoids

57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
----------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------

Actinoids

89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)
--------------------------	--------------------------	--------------------------	-------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΑΤΟΜΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΤΗΝ ΟΜΑΔΑ ΙΙΙ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΟΝΟ ΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΕΧΕΙ ΑΝΑΛΟΓΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.

Group 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Period

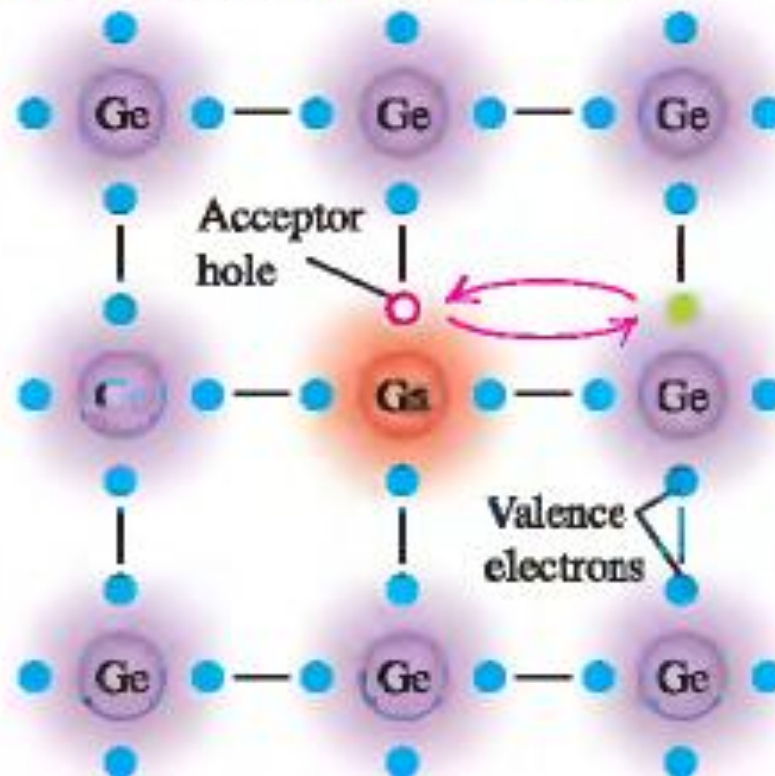
1																	2	
1	1 H 1.008																	2 He 4.003
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.078	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo

Lanthanoids	57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
Actinoids	89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)

ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΑΤΟΜΟΥ Ge ΜΕ ΕΝΑ ΑΤΟΜΟ Ga.

42.29 A *p*-type semiconductor.

(a) An acceptor (*p*-type) impurity atom has only three valence electrons, so it can borrow an electron from a neighboring atom. The resulting hole is free to move about the crystal.



Η ΔΙΑΜΟΡΦΩΘΕΙΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΧΕΙ ΩΣ ΕΞΗΣ: Η ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΑΤΟΜΟ Ge ΣΤΟ ΑΤΟΜΟ Ga ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙ ΜΙΑ **ΟΠΗ**, Η ΟΠΟΙΑ ΕΧΕΙ ΘΕΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΣΤΟΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟ.

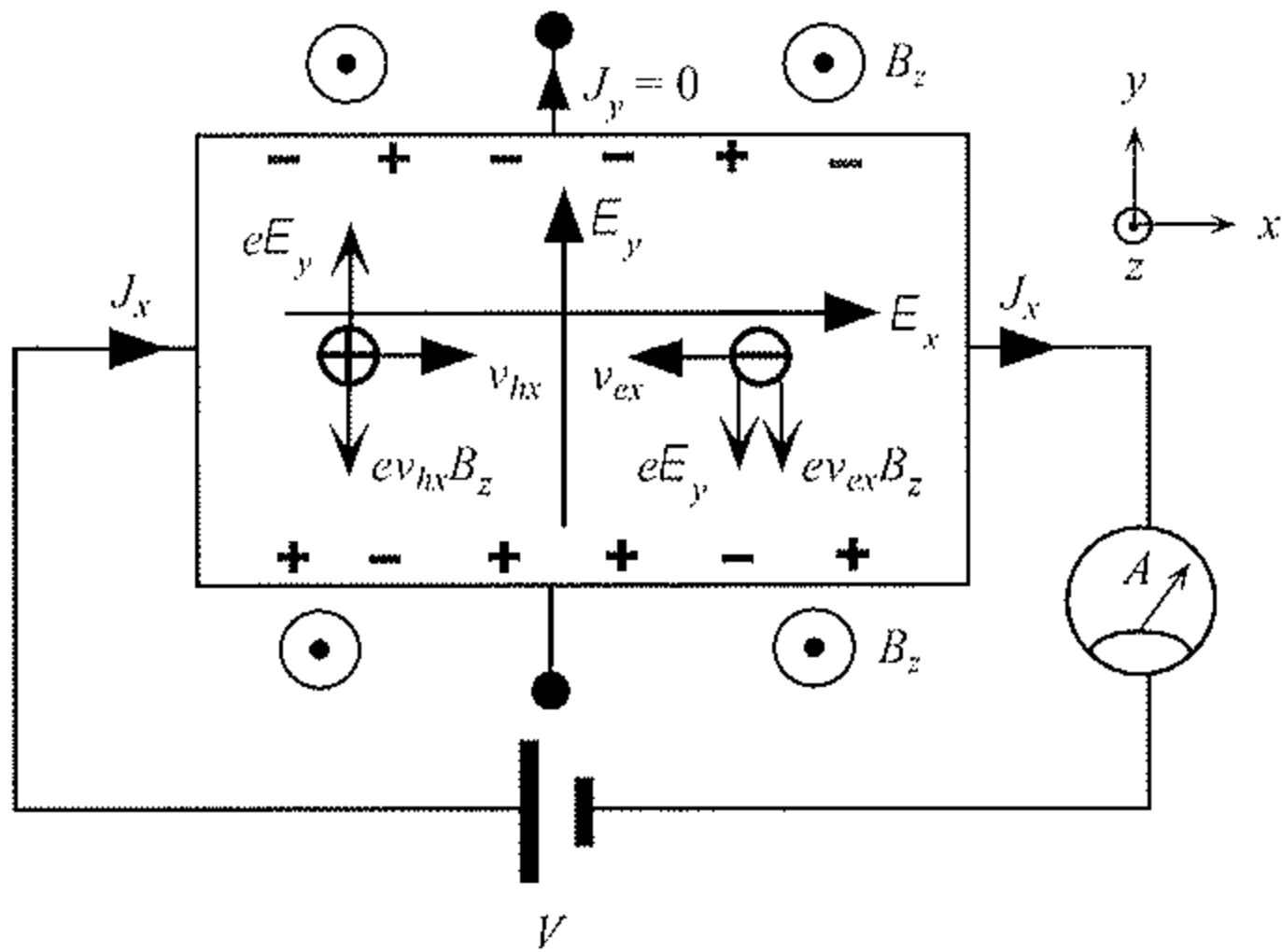
ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΠΟΥ ΠΑΓΙΔΕΥΤΗΚΕ ΑΠΟ ΤΟ Ga ΔΕΣΜΕΥΕΤΑΙ ΣΕ ΜΙΑ ΣΤΑΘΜΗ ΠΟΥ ΚΑΛΕΙΤΑΙ **ΣΤΑΘΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΗ** ΚΑΙ Η ΟΠΟΙΑ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ $0,01 \text{ eV}$ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΘΕΝΟΥΣ. ΤΟ ΑΤΟΜΟ Ga ΚΑΛΕΙΤΑΙ **ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ**.

ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ Ge ΣΤΟ Ga , ΤΟ ΤΕΛΕΥΤΑΙΟ ΓΙΝΕΤΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΙΟΝ ΚΑΙ ΔΕΝ ΕΊΝΑΙ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΝΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ. Η ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΜΕΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ **ΘΕΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ (ΟΠΩΝ)**.

ΤΟ ΠΡΟΚΥΠΤΟΝ ΥΛΙΚΟ ΚΑΛΕΙΤΑΙ **ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΤΥΠΟΥ p**. ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΥΛΙΚΑ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΕΙΝΑΙ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕ ΟΠΕΣ ΚΑΙ ΜΕ ΔΟΤΕΣ. ΤΕΤΟΙΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΚΑΛΟΥΝΤΑΙ **ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ**.

Η ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΗ ΑΝ ΕΝΑΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΕΙΝΑΙ ΤΥΠΟΥ n Ή ΤΥΠΟΥ p ΓΙΝΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL.

ΤΟ ΠΡΟΣΗΜΟ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ HALL ΕΙΝΑΙ ΓΙΑ ΜΕΝ ΤΟΥ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ n ΘΕΤΙΚΟ ΚΑΙ ΓΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ p ΑΡΝΗΤΙΚΟ.



ΑΝ μ_e ΕΙΝΑΙ Η ΕΥΚΙΝΗΣΙΑ ΚΑΙ v_e Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ , ΤΟΤΕ ΙΣΧΥΕΙ Η ΣΧΕΣΗ

$$v_e = \mu_e E$$

ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

$$F_{net} = eE$$

ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ E .
ΕΠΤΟΜΕΝΩΣ

$$v_e = \frac{\mu_e}{e} F_{net}$$

ΠΑΡΟΜΟΙΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΥΝ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΕΣ

$$v_p = \mu_p E$$

$$v_p = \frac{\mu_p}{e} F_{net}$$

ΘΕΩΡΟΥΜΕ ΟΤΙ v_{ey} ΚΑΙ v_{py} ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΟΠΩΝ ΚΑΤ' ΑΜΦΟΤΕΡΑ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ $-y$ ΚΑΙ $+y$ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ. ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΘΑ ΙΣΧΥΕΙ

$$J_y = J_h + J_e = epv_{hy} + env_{ey} = 0$$

ΕΠΟΜΕΝΩΣ, $pv_{hy} = -nv_{ey}$

ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΑΚΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΟΠΕΣ ΕΙΝΑΙ

$$F_{hy} = eE - ev_{hx}B_z \qquad -F_{ey} = eE_y + ev_{ex}B_z$$

ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΟΤΙ $F_{hy} = \frac{ev_{hy}}{\mu_h} \qquad -F_{ey} = \frac{ev_{ey}}{\mu_e}$

ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΤΕΛΙΚΑ

$$\frac{v_{hy}}{\mu_h} = E_y - \mu_h E_x B_z \qquad \frac{v_{ey}}{\mu_e} = E_y + \mu_e E_x B_z$$

ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΟΤΙ

$$p\mu_n E_y - p\mu_n^2 E_x B_z = -n\mu_e E_y - n\mu_e^2 E_x B_z$$

$$E_y(p\mu_n + n\mu_e) = B_z E_x (p\mu_n^2 - n\mu_e^2)$$

ΤΟ ΟΛΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ x ΕΙΝΑΙ

$$J_x = epv_{nx} + env_{ex} = (p\mu_n + n\mu_e)eE_x$$

ΑΝΤΙΚΑΘΙΣΤΩΝΤΑΣ ΤΟ E_x ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ

$$eE_y(p\mu_n + n\mu_e)^2 = B_z J_x (p\mu_n^2 - n\mu_e^2)$$

ΚΑΙ ΕΠΕΙΔΗ $R_H = \frac{E_y}{J_x B_x}$ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΤΕΛΙΚΑ

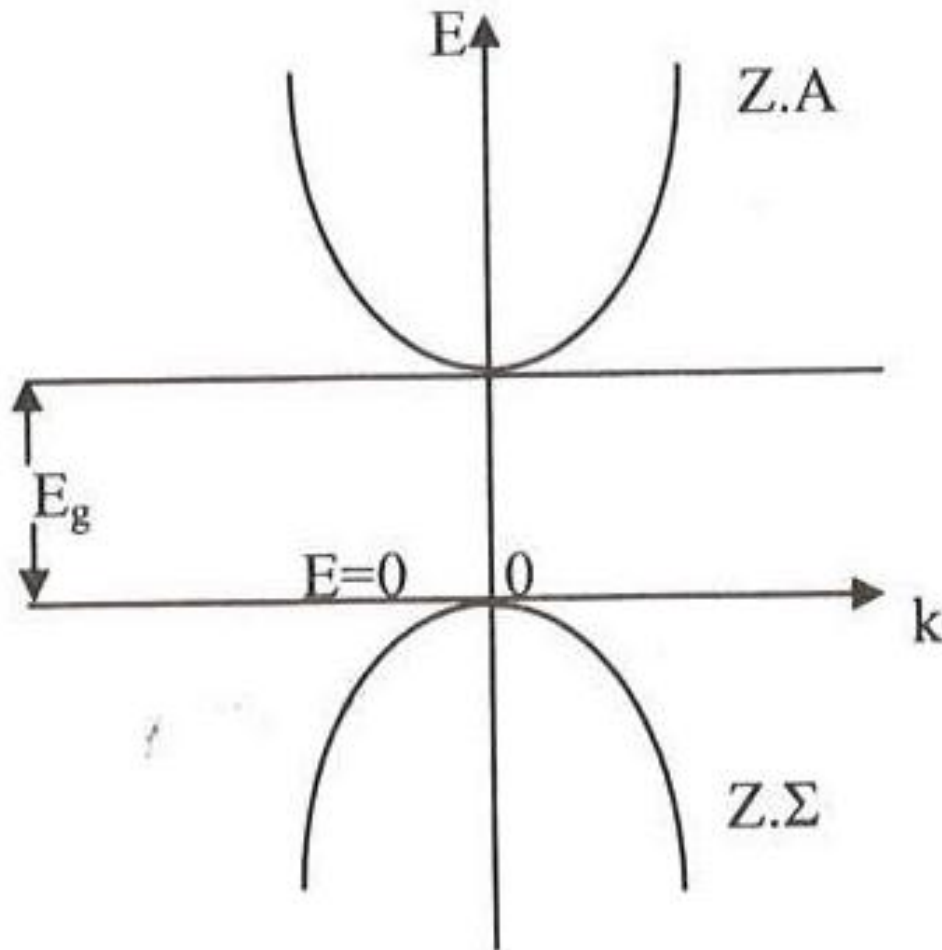
$$R_H = \frac{p\mu_n^2 - n\mu_e^2}{e(p\mu_n + n\mu_e)}$$

ΔΟΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ

ΕΝΑ ΣΤΕΡΕΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΕΤΑΙ ΩΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΟΤΑΝ Η ΑΝΩΤΕΡΗ ΚΑΤΕΙΛΗΜΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ) ΕΊΝΑΙ ΕΝΤΕΛΩΣ ΚΑΤΕΙΛΗΜΜΕΝΗ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ $T=0K$ ΑΛΛΑ Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΙΝΑΙ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ $TΩΝ 2,0 \text{ eV}$.

ΔΟΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ

Η ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΗ ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ, ΑΠΟ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΟΤΙ:



$$E_c(\vec{k}) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}$$

$$E_v(\vec{k}) = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h}$$

m_e ΕΙΝΑΙ Η ΕΝΕΡΓΟΣ ΜΑΖΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ Ε'ΙΝΑΙ

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

ΕΝΔΟΓΕΝΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΟΠΕΣ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΤΟΥΣ ΦΟΡΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΝΤΙΔΙΑΣΤΟΛΗ ΜΕ ΤΟΥΣ ΦΟΡΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΜΟΝΟ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ. Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΘΟΡΙΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΠΛΗΘΟΣ ΤΩΝ ΦΟΡΕΩΝ, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΓΙΑ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΘΑ ΚΑΘΟΡΙΣΤΕΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ FERMI-DIRAC.

ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ. ΓΙΑ ΝΑ ΒΡΕΘΟΥΝ ΟΜΩΣ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΥΤΗ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΧΟΥΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ FERMI, Η ΟΠΟΙΑ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΣΜΑ ΜΕΤΑΞΥ ΖΩΝΗΣ ΣΘΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΖΩΝΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ. ΠΟΥ ΑΚΡΙΒΩΣ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΘΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΙ ΣΤΗΝ ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ FERMI FERMI-DIRAC ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ.

Η ΒΑΣΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ ΕΙΝΑΙ ΟΤΙ Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΕΊΝΑΙ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ FERMI ΕΠΕΙΔΗ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΥΠΕΡΤΗΔΗΣΟΥΝ ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΣΜΑ E_g . ΘΑ ΠΡΕΠΕΙ ΕΠΙΣΗΣ ΝΑ ΙΣΧΥΕΙ $E - E_F \gg k_b T$

ΜΕ ΑΥΤΗΝ ΤΗΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ FERMI-DIRAC ΠΑΙΡΝΕΙ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ:

$$f(E) = \left(e^{\frac{E_F}{k_B T}} \right) \left(e^{-\frac{E}{k_B T}} \right)$$

Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΔΙΝΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ:

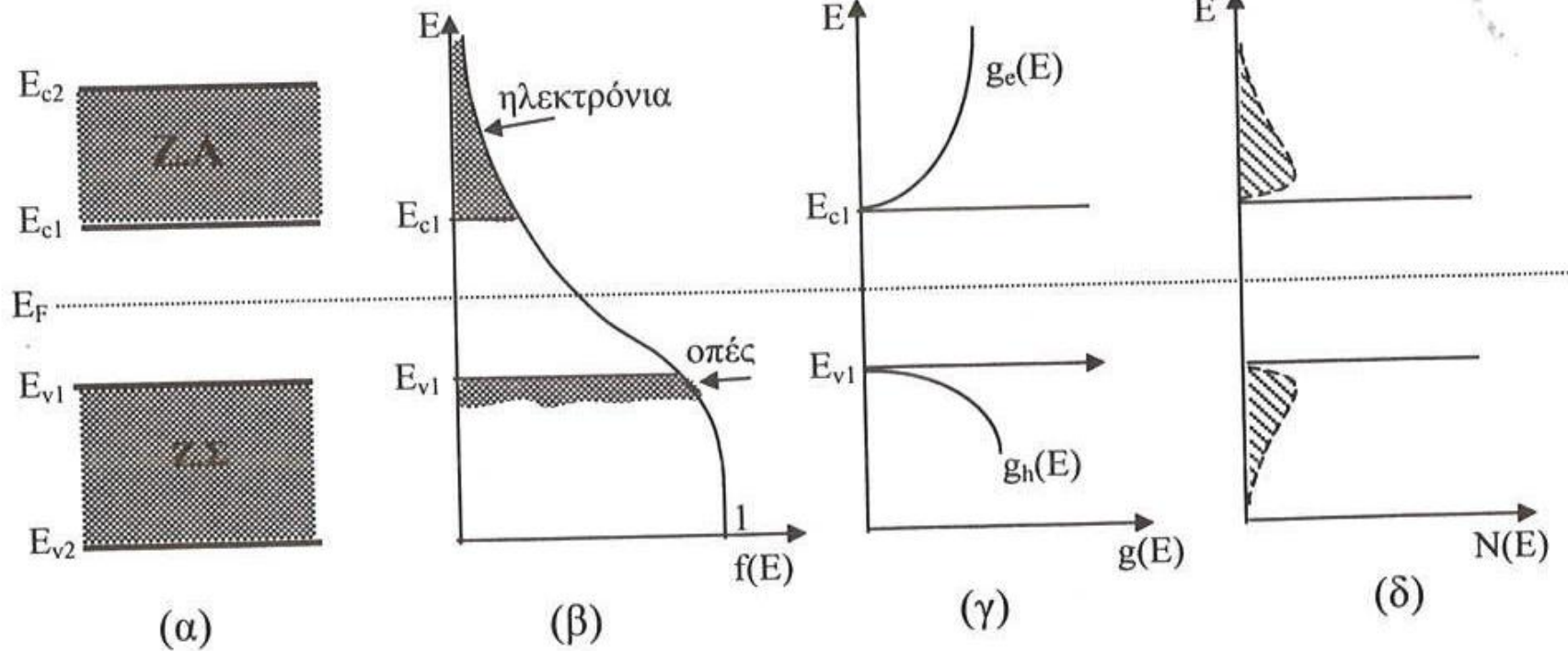
$$g_e(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$$

ΤΟ ΠΛΗΘΟΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΜΕΤΑΞΥ E ΚΑΙ $E+de$ ΕΙΝΑΙ:

$$dn_E = f(E)g_e(E)dE$$

ΚΑΙ

$$n = \int_{E_{c1}}^{E_{c2}} f(E)g_e(E)dE$$



ΑΝΤΙΚΑΘΙΣΤΟΥΜΕ ΤΟ ΑΝΩ ΟΡΙΟ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ∞
ΕΠΕΙΔΗ ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑ ΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ΕΚΘΕΤΙΚΑ. ΤΕΛΙΚΑ
ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ:

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \left(e^{\frac{E_F}{k_B T}} \right) \int_{E_c}^{\infty} (E - E_c)^{1/2} e^{-\frac{E}{k_B T}} dE$$

ΑΛΛΑΓΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ: $x = E - E_c$

ΚΑΙ ΤΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑ ΓΙΝΕΤΑΙ

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \left(e^{\frac{E_F}{k_B T}} \right) \left(e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \right) \int_0^{\infty} x^{1/2} e^{-\frac{x}{k_B T}} dx$$

ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ

$$\int_0^{\infty} x^{1/2} e^{-ax} dx = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{a}}$$

ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΕΙΝΑΙ

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \left(e^{\frac{E_F}{k_B T}} \right) \left(e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \right) = N_c e^{\frac{E_F - E}{k_B T}}$$

Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΝΑ ΚΑΤΑΛΑΜΒΑΝΕΙ ΜΙΑ ΟΤΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ ΕΊΝΑΙ ΙΣΗ ΠΡΟΣ

$$f_h(E) = 1 - f(E)$$

ΕΠΟΜΕΝΩΣ, ΑΝ ΛΑΒΟΥΜΕ ΥΠΟΨΗ ΟΤΙ

$$E_F - E \gg k_B T$$

ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΤΕΛΙΚΑ

$$f_h(E) = 1 - \frac{1}{e^{\frac{E - E_F}{k_B T}} + 1} = \frac{1}{e^{\frac{E_F - E}{k_B T}}} \cong e^{-\frac{E_F - E}{k_B T}}$$

Η ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ ΔΙΝΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ

$$g_n(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (-E)^{1/2}$$

ΚΑΙ Η ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΟΠΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΧΕΣΗ

$$p = \int_{-\infty}^0 f_n(E) g_n(E) dE$$

ΟΠΟΤΕ ΑΚΟΛΟΥΘΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΙΔΙΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΟΠΩΣ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΤΕΛΙΚΑ

$$p = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_F}{k_B T}} = N_v e^{-\frac{E_F}{k_B T}}$$

ΟΜΩΣ ΣΕ ΕΝΑΝ ΕΝΔΟΓΕΝΗ ΗΜΙΑΓΩΓΟ

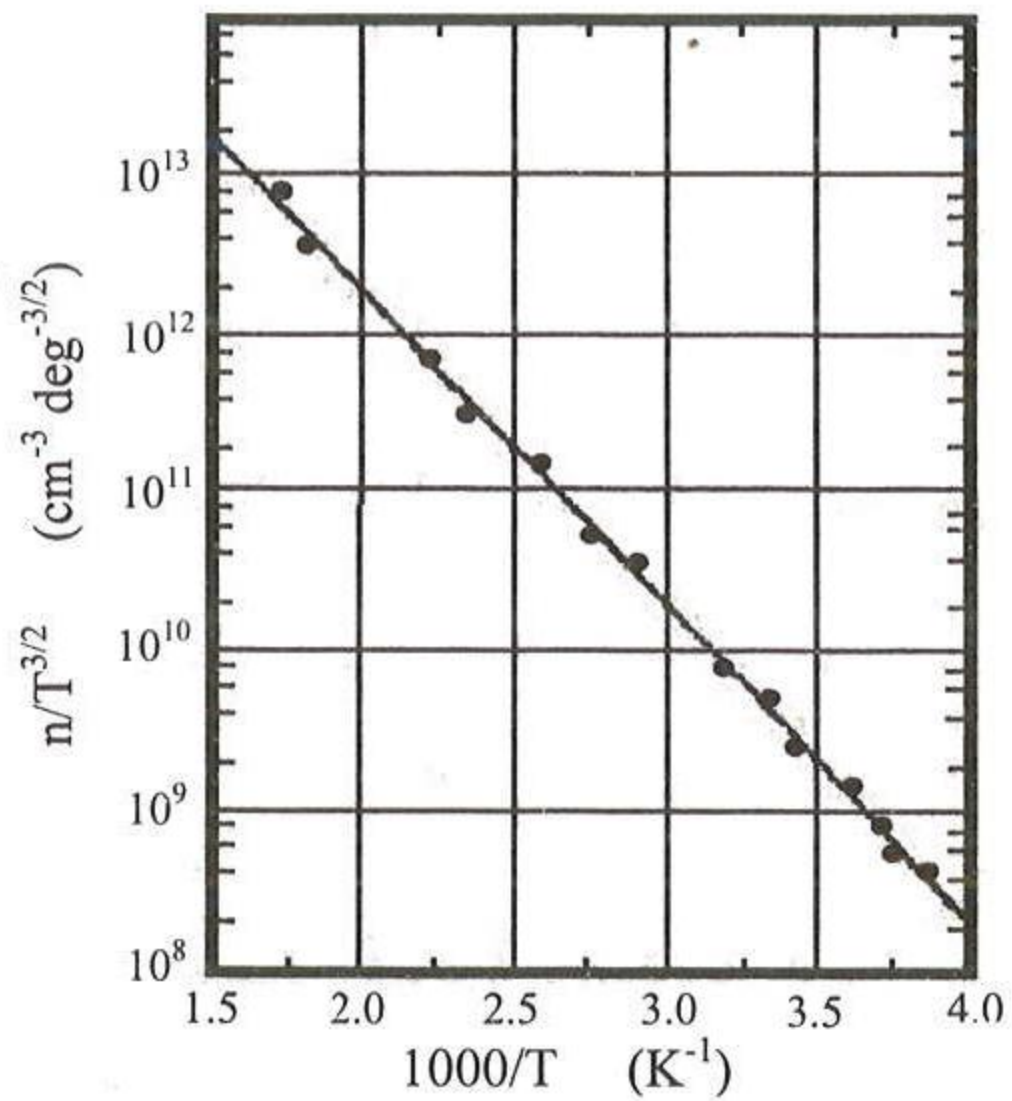
$$n = p$$

$$2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \left(e^{\frac{E_F}{k_B T}} \right) \left(e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \right) = 2 \left(\frac{m_h k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_F}{k_B T}}$$

$$\left(\frac{m_e}{m_h} \right)^{3/2} = \exp \left[-\frac{E_F}{k_B T} - \frac{E_F - E_g}{k_B T} \right] = \exp \left[\frac{2E_F + E_g}{k_B T} \right]$$

$$\ln \left(\frac{m_e}{m_h} \right)^{3/2} = \frac{2E_F + E_g}{k_B T}$$

$$E_F = \frac{1}{2} E_g - \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{m_e}{m_h} \right) = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{m_h}{m_e} \right)$$



ΑΣΚΗΣΗ: Ενδογενές πυρίτιο έχει συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών

$n = p = n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ και ευκινησίες $\mu_e = 1350 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ και

$\mu_h = 450 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ αντίστοιχα. Υπολογίστε τον συντελεστή Hall και να τον

συγκρίνετε με τον συντελεστή Hall ενός μετάλλου.

Λύση: Χρησιμοποιούμε την σχέση

$$R_H = \frac{p - nb^2}{e(p + nb)^2}$$

Αφού μετατρέψουμε τα δεδομένα στο SI.

$$\mu_e = 1350 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$$

$$\mu_h = 450 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$$

Υπολογίζουμε τον λόγο b

$$b = \frac{\mu_e}{\mu_h} = \frac{1350 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}}{450 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}} = 3$$

και στην συνέχεια τον συντελεστή Hall

$$R_H = \frac{1,5 \times 10^{16} \text{m}^{-3} - (1,5 \times 10^{16} \text{m}^{-3})(3^2)}{(1,6 \times 10^{-19} \text{C})(1,5 \times 10^{16} \text{m}^{-3} + 1,5 \times 10^{16} \text{m}^{-3} \times 3)^2} = 208 \text{m}^3 \text{C}^{-1}$$

$$R_H = 208 \text{m}^3 \text{C}^{-1} = 208 \text{m}^3 \text{A}^{-1} \text{s}^{-1}$$

Ο συντελεστής Hall για τον χαλκό είναι

$$R_{H_{\text{Cu}}} = -0.55 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}^3}{\text{C}} = -0.55 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^3}{\text{C}}$$

ΑΣΚΗΣΗ:

Βρείτε την συγκέντρωση των ηλεκτρονίων ενός ημιαγωγού όταν ο συντελεστής Hall είναι ίσος προς μηδέν. Δίνεται ότι $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ και οι ευκινησίες είναι ίσες προς $\mu_e = 1350 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ $\mu_h = 450 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. Υπολογίστε τις συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών.

Λύση.

Ο συντελεστής Hall όταν υπάρχουν ηλεκτρόνια και οπές δίνεται από την σχέση

$$R_H = \frac{p - nb^2}{e(p + nb)^2} = \frac{\frac{n_i^2}{n} - nb^2}{e \left(\frac{n_i^2}{n} + nb \right)^2} = \frac{u}{v}$$

όπου $np = n_i^2$. Για να είναι μηδέν ο συντελεστής Hall θα πρέπει να μηδενίζεται ο αριθμητής, δηλαδή θα πρέπει να ισχύει

$$\frac{n_i^2}{n} - nb^2 = 0$$

Από την σχέση αυτή προκύπτει

$$n = \frac{n_i}{b} = n_i \frac{\mu_h}{\mu_e}$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές οπότε προκύπτει η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων.

$$n = (1.5 \times 10^{16} \text{m}^3) \left(\frac{450 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}}{1350 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}} \right) = 0.33 \times 1.5 \times 10^{16} \text{m}^3 = 4.95 \times 10^{15} \text{m}^{-3}$$

Για την συγκέντρωση των οπών έχουμε

$$p = n_i b = n_i \frac{\mu_e}{\mu_h}$$

οπότε προκύπτει τελικά

$$n = (1.5 \times 10^{16} \text{m}^3) \left(\frac{1350 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}}{450 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}} \right) = 3 \times 1.5 \times 10^{16} \text{m}^3 = 4.5 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$$

ΑΣΚΗΣΗ: Υποθέτοντας ότι οι ευκινήσιες δε μεταβάλλονται ουσιαστικά μεταβάλλοντας την συγκέντρωση των ηλεκτρονίων λόγω doping προσδιορίστε την συγκέντρωση των ηλεκτρονίων για την οποία ο συντελεστής Hall λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή ή και αρνητική. Οι τιμές των ευκινήσιών είναι οι ίδιες με αυτές της προηγούμενης άσκησης.

Λύση.

Χρησιμοποιούμε και πάλι την σχέση

$$R_H = \frac{p - nb^2}{e(p + nb)^2} = \frac{\frac{n_i^2}{n} - nb^2}{e\left(\frac{n_i^2}{n} + nb\right)^2} = \frac{u}{v}$$

και υπολογίζουμε την παράγωγο $\frac{dR_H}{dn}$

$$\frac{dR_H}{dn} = \frac{u'v - uv'}{v^2} = 0$$

$$u'v - uv' = 0$$

$$\left[-\frac{n_i^2}{n^2} - b^2\right] \left[e\left(\frac{n_i^2}{n} + nb\right)^2\right] - \left[\frac{n_i^2}{n} - nb^2\right] \left[2e\left(\frac{n_i^2}{n} + nb\right)\left(-\frac{n_i^2}{n} + b\right)\right] = 0$$

$$b^3n^4 - [3n_i^2b(1+b)]n^2 + n_i^4 = 0$$

$$b^3x^2 - [3b(1+b)]x + 1 = 0$$

$$x = \frac{n^2}{n_i^2} = \frac{3b(1+b) \pm \sqrt{9b^2(1+b)^2 - 4b^3}}{2b^3}$$

$$b = 3$$

$$\frac{n}{n_i} = 1.14$$

$$\frac{n}{n_i} = 0.169$$

$$\frac{p}{n_i} = \frac{1}{0.169} = 5.92$$

$$\frac{p}{n_i} = \frac{1}{1.14} = 0.88$$

