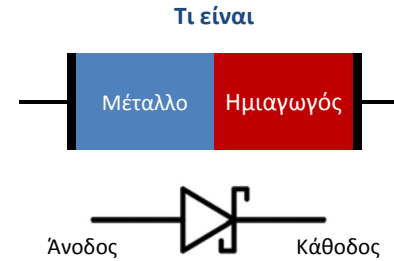


Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

Δ. Γ. Παπαγεωργίου
Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

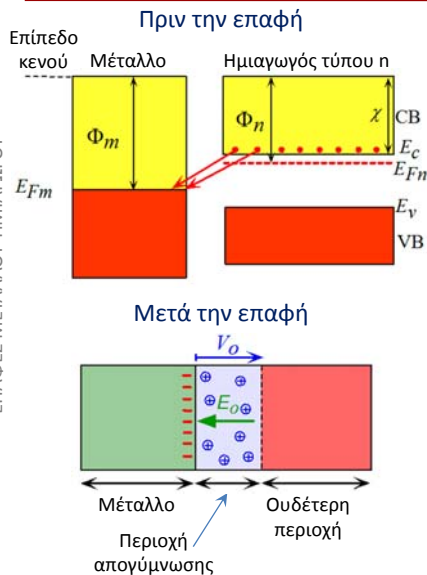
dparageo@uoi.gr
<http://pc164.materials.uoi.gr/dparageo>



Walter H. Schottky
1886-1976

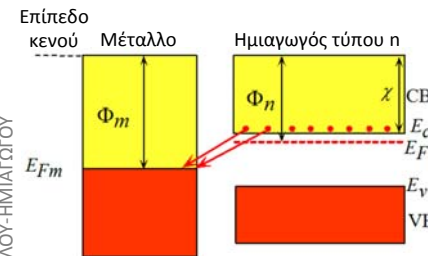
- Κατασκευάζεται με εξάχνωση μετάλλου το οποίο μεταφέρεται στην επιφάνεια του ημιαγωγού σε συνθήκες κενού.
- Βασική ηλεκτρική ιδιότητα: επιτρέπει στο ρεύμα να διέρχεται προς μια κατεύθυνση μόνο.
- Αντίθετα με τη δίοδο p-n, στις διόδους Schottky η αγωγιμότητα οφείλεται σε ένα μόνο είδος φορέων (μονοπολική διάταξη).
- Επίσης αντίθετα με τη δίοδο p-n η αγωγιμότητα οφείλεται στους φορείς πλειονότητας.

Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών (χωρίς πόλωση)



- Υποθέτουμε ότι το έργο εξόδου του μετάλλου είναι μεγαλύτερο από αυτό του ημιαγωγού $\Phi_m > \Phi_n$
- Ηλεκτρόνια από τη ΖΑ του ημιαγωγού μεταβαίνουν στο μέταλλο με το φαινόμενο σήραγγας.
- Καταλαμβάνουν ενεργειακά επίπεδα ακριβώς πάνω από το E_{Fm}
- Στον ημιαγωγό δημιουργείται μια περιοχή πλάτους W απογυμνωμένη από ηλεκτρόνια.
- Εκεί παραμένουν οι θετικά φορτισμένοι δότες.
- Δημιουργείται έτσι ηλεκτρικό πεδίο και εσωτερικό δυναμικό.

Φράγμα Schottky



- Τα ηλεκτρόνια που μεταβαίνουν από τον ημιαγωγό στο μέταλλο χρειάζονται ενέργεια: $\Phi_m - \Phi_n = eV_0$

- Τα ηλεκτρόνια που μεταβαίνουν από το μέταλλο στον ημιαγωγό χρειάζονται ενέργεια:

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi$$

- Όμως

$$\chi = \Phi_n - (E_c - E_{Fn})$$

- Συνεπώς

$$\Phi_B = \Phi_m - \Phi_n + (E_c - E_{Fn}) \Rightarrow$$

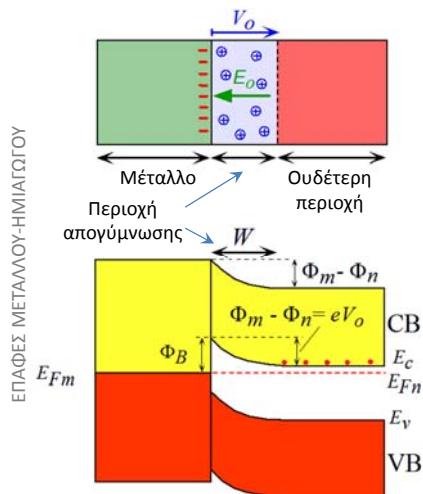
$$\Phi_B = eV_0 + E_c - E_{Fn}$$

Φράγμα Schottky

Απαιτείται περισσότερη ενέργεια για μετάβαση από το μέταλλο στον ημιαγωγό:

$$\Phi_B > eV_0$$

Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών (χωρίς πόλωση)



- Σε συνθήκες ισορροπίας το επίπεδο Fermi πρέπει να είναι ίδιο σε όλη τη διάταξη.
- Η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό είναι:

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}}$$
- Όταν η συγκέντρωση n μειωθεί θα πρέπει η διαφορά $E_c - E_{Fn}$ να αυξηθεί.

Το ρεύμα χωρίς πόλωση

ΕΠΑΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

- Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος δεν υπάρχει ροή ρεύματος.
- Το ρεύμα λόγω των ηλεκτρονίων που διεγείρονται θερμικά και κινούνται **από το μέταλλο προς τον ημιαγωγό** περνώντας το φράγμα Φ_B είναι:

$$J_1 = C_1 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}}$$
- Το ρεύμα λόγω των ηλεκτρονίων που διεγείρονται θερμικά και κινούνται **από τον ημιαγωγό προς το μέταλλο** περνώντας το φράγμα eV_0 είναι:

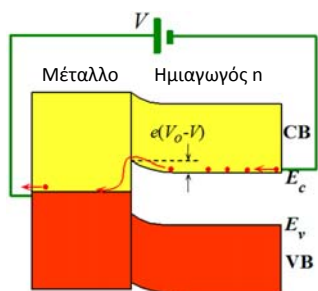
$$J_2 = C_2 e^{-\frac{eV_0}{kT}}$$

- Τα δύο ρεύματα είναι ίσα σε μέτρο και ρέουν προς αντίθετη κατεύθυνση:

$$J = J_2 - J_1 = 0$$

Το ρεύμα στην ορθή πόλωση

ΕΠΑΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ



- Η πτώση τάσης γίνεται στην περιοχή απογύμνωσης.
- Η εφαρμοζόμενη τάση μειώνει το δυναμικό σε $V_0 - V$

- Το φράγμα για τα ηλεκτρόνια που μεταβαίνουν **από τον ημιαγωγό στο μέταλλο** μειώνεται σε $e(V_0 - V)$
- Το φράγμα Φ_B για τα ηλεκτρόνια που μεταβαίνουν **από το μέταλλο στον ημιαγωγό** παραμένει ίδιο.

- Το ρεύμα εξαιτίας των ηλεκτρονίων που μεταβαίνουν **από τον ημιαγωγό στο μέταλλο** είναι:

$$J_2^{o\rho\theta} = C_2 e^{-\frac{e(V_0 - V)}{kT}}$$

- Επειδή το Φ_B δεν μεταβάλλεται, οπότε το ολικό ρεύμα είναι:

$$J^{o\rho\theta} = J_2^{o\rho\theta} - J_1$$

Το ρεύμα στην ορθή πόλωση

ΕΠΑΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

Σε συνθήκες ισορροπίας

$$J_1 = J_2 = C_2 e^{-\frac{eV_0}{kT}}$$

Το ολικό ρεύμα γράφεται:

$$J^{o\rho\theta} = J_2^{o\rho\theta} - J_1 \Rightarrow$$

$$J^{o\rho\theta} = C_2 e^{-\frac{e(V_0 - V)}{kT}} - C_2 e^{-\frac{eV_0}{kT}} \Rightarrow$$

$$J^{o\rho\theta} = C_2 e^{-\frac{eV_0}{kT}} \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

ή αλλιώς

$$J^{o\rho\theta} = J_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

$$J_0 = C_2 e^{-\frac{eV_0}{kT}}$$

Πυκνότητα
ανάστροφου
ρεύματος κορεσμού

Η σταθερά J_0 είναι ίδια με το ρεύμα J_1 σε κατάσταση ισορροπίας και εξαρτάται από τα δύο υλικά (μέταλλο, ημιαγωγός).

Σε περίπτωση που

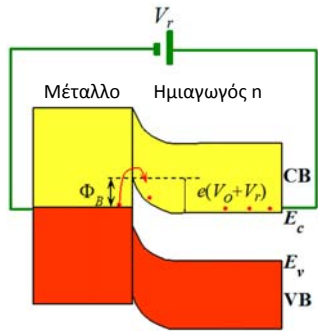
$$V > \frac{kT}{e}$$

το ρεύμα μπορεί να γραφεί ως:

$$J^{o\rho\theta} = J_0 e^{\frac{eV}{kT}}$$

Ανάστροφη πόλωση

ΕΠΑΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ



Η πτώση τάσης γίνεται στην περιοχή απογύμνωσης.

Η εφαρμοζόμενη τάση $V = -V_r$ αυξάνει το δυναμικό σε $V_0 + V_r$

Το ρεύμα εξαιτίας των ηλεκτρονίων που μεταβαίνουν **από τον ημιαγωγό στο μέταλλο** είναι:

$$J_2^{\text{αναστ}} = C_2 e^{-\frac{e(V_0 + V_r)}{kT}}$$

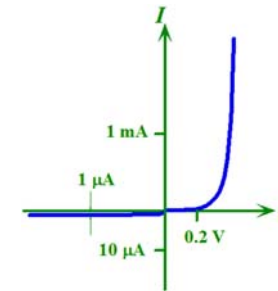
Επειδή $V_0 \approx 1V$ και $V_r >$ μερικά Volt

$$J_2^{\text{αναστ}} \ll C_2 e^{-\frac{eV_0}{kT}} = J_2 = J_1$$

Σε συνθήκες ανάστροφης πόλωσης το ρεύμα οφείλεται στη θερμική διέγερση ηλεκτρονίων πάνω από το φράγμα Schottky Φ_B και τη μετάβασή τους από το μέταλλο στη ΖΑ του ημιαγωγού.

Χαρακτηριστική διόδου Schottky

ΕΠΑΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ



Χαρακτηριστική I-V διόδου Schottky. (Ο αρνητικός άξονας ρεύματος είναι σε διαφορετική κλίμακα)

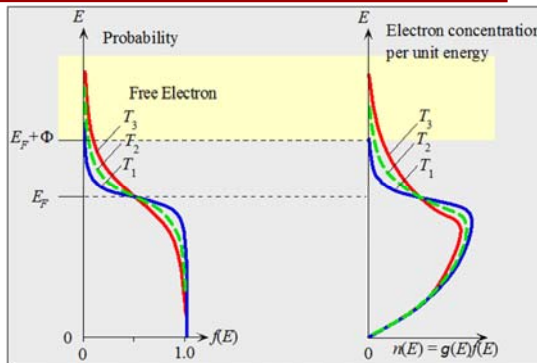
Θερμιοτική εκπομπή

ΕΠΑΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

- Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία η κατανομή Fermi-Dirac "απλώνει".

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

- Κάποια ηλεκτρόνια αποκτούν αρκετή ενέργεια και καταφέρνουν να διαφύγουν από το μέταλλο.
- Ηλεκτρόνια συσσωρεύονται έξω από το μέταλλο αφήνοντας πίσω θετικά φορτία.

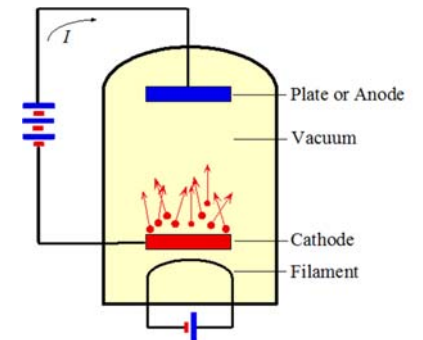


Αυτό δυσκολεύει επιπλέον ηλεκτρόνια να διαφύγουν από το μέταλλο.

Λυχνία κενού

ΕΠΑΦΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

- Θάλαμος κενού για να μη συγκρούονται τα ηλεκτρόνια με τα μόρια αέρα.
- Θερμαινόμενη κάθοδος για να διευκολύνεται η εξαγωγή ηλεκτρονίων.
- Πηγή για αναπλήρωση των ηλεκτρονίων της καθόδου.
- Τα ηλεκτρόνια εξάγονται από την κάθοδο και επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο προς την άνοδο.
- Έχει ανορθωτική δράση.



Εξίσωση Richardson-Dushman

- Μέσα στο μέταλλο η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι κινητική

$$KE = \frac{1}{2} m_e v_x^2 + \frac{1}{2} m_e v_y^2 + \frac{1}{2} m_e v_z^2$$

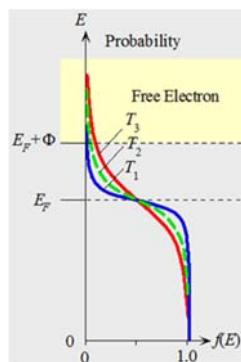
- Όταν διαφύγει του μετάλλου η ενέργεια είναι δυναμική

$$\Delta E = E_F + \Phi$$

- Για να διαφύγει το ηλεκτρόνιο θα πρέπει

$$\frac{1}{2} m_e v_x^2 > E_F + \Phi$$

(Υποθέτουμε διαφυγή κατά τον άξονα x)



Εξίσωση Richardson-Dushman

- Έστω $n(v_x)$ το πλήθος ηλεκτρονίων με ταχύτητα v_x
 - Το πλήθος ηλεκτρονίων με ταχύτητα μεταξύ v_x και dv_x είναι $dn(v_x)$
 - Σε υψηλές ενέργειες η στατιστική Fermi-Dirac προσεγγίζεται από την κατανομή Boltzmann:
- $$f(E) \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$
- Η θερμοϊονική εκπομπή δίνει ρεύμα $dJ = ev_x dn(v_x)$
 - Το συνολικό ρεύμα είναι

$$J = \int dJ$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται για όλες τις ταχύτητες που ικανοποιούν τη σχέση

$$\frac{1}{2} m_e v_x^2 > E_F + \Phi$$

Η ολοκλήρωση δίνει:

Εξίσωση Richardson-Dushman

$$J = B_o T^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right)$$

$$B_o = \frac{4\pi e m_e k^2}{h^3} = 1.2 \times 10^6 \frac{A}{m^2 K^2}$$

Εξίσωση Richardson-Dushman

Κατά την έξοδο από το μέταλλο υπάρχει πιθανότητα τα ηλεκτρόνια να ανακλαστούν από την επιφάνεια πίσω στο εσωτερικό του μετάλλου.

$$J = B_e T^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right)$$

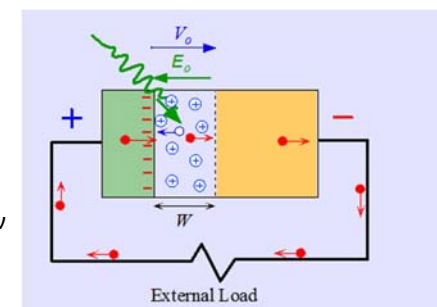
όπου

$$B_e = B_o (1 - R)$$

R Συντελεστής ανάκλασης

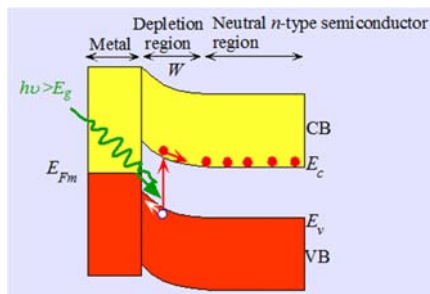
Ηλιακό κύτταρο Schottky

- Για ενέργειες φωτονίων $> E_g$ γεννώνται ΖΗΟ στην περιοχή απογύμνωσης.
- Το ηλεκτρικό πεδίο διαχωρίζει τα ΖΗΟ.
- Οι σπές ολισθαίνουν προς το μέταλλο και τα ηλεκτρόνια προς τον ημιαγωγό.
- Οι σπές που φτάνουν στο μέταλλο επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια του μετάλλου κάνοντας την περιοχή αυτή πιο θετική (σε σχέση με την κατάσταση σκότους).
- Τα ηλεκτρόνια θωρακίζουν τους εκτεθειμένους θετικούς δότες στο όριο της περιοχής απογύμνωσης.



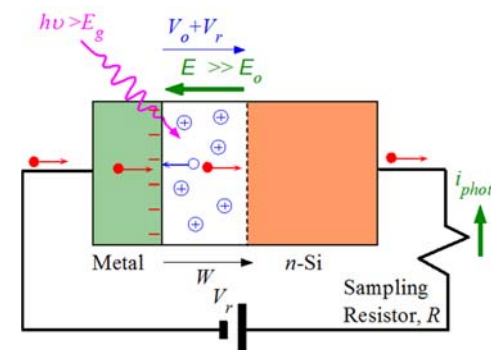
Ηλιακό κύτταρο Schottky

- Στο σημείο που συμβαίνει φωτογένεση τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε καθοδική καμπύλη ενέργειας.
- Φτάνουν στην ουδέτερη περιοχή μειώνοντας την ενέργειά τους.
- Όμοια οι οπές ακολουθούν την καμπύλη ενέργειας μέχρι την επιφάνεια του μετάλλου όπου επανασυνδέονται με ηλεκτρόνια.
- Για ενέργειες φωτονίων $h\nu < E_g$ η διάταξη μπορεί πάλι να ανταποκριθεί διεγείροντας ένα ηλεκτρόνιο από τη στάθμη E_{Fm} του μετάλλου. Αρκεί $h\nu > \Phi_B$



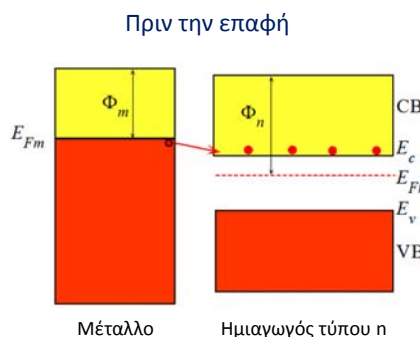
Φωτοανιχνευτής Schottky ταχείας απόκρισης

- Ανάστροφα πολωμένες διόδους Schottky μπορούν να λειτουργήσουν ως φωτοανιχνευτές.
- Η ανάστροφη πόλωση αυξάνει το εσωτερικό δυναμικό και το εσωτερικό πεδίο.
- Το αυξημένο πεδίο αυξάνει την ταχύτητα ολίσθησης $v_d = \mu E$ στην περιοχή απογύμνωσης.
- Μειώνεται έτσι ο χρόνος που χρειάζονται οι φορείς για να διασχίσουν την περιοχή απογύμνωσης.
- Το φωτορεύμα i_{photo} στο εξωτερικό κύκλωμα μπορεί εύκολα να μετρηθεί.



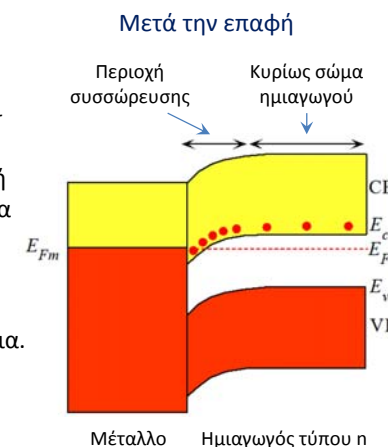
Ωμικές επαφές

- **Ωμική επαφή:** Ένωση μετάλλου-ημιαγωγού που δεν περιορίζει τη ροή του ρεύματος.
- Η ροή του ρεύματος περιορίζεται από την αντίσταση του κυρίως σώματος του ημιαγωγού.
- Το έργο εξόδου του μετάλλου πρέπει να είναι μικρότερο από του ημιαγωγού:
 $\Phi_m < \Phi_n$
- Ηλεκτρόνια από μέταλλο μεταβαίνουν στη ΖΑ του ημιαγωγού (χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο)



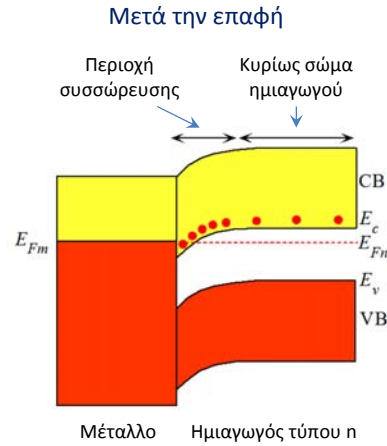
Ωμικές επαφές

- Δημιουργείται περιοχή συσσώρευσης ηλεκτρονίων κοντά στην επαφή.
- Ως αποτέλεσμα έχουμε ηλεκτρόνια αγωγιμότητας από την μεταλλική μέχρι την ημιαγωγική πλευρά.
- Αντίθετα: στη δίοδο Schottky η περιοχή απογύμνωσης διαχωρίζει τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας του μετάλλου από αυτά του ημιαγωγού.
- Τα ηλεκτρόνια στις δύο πλευρές της επαφής έχουν περίπου την ίδια ενέργεια.
- Όταν τα ηλεκτρόνια υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου κινηθούν από το μέταλλο προς τον ημιαγωγό ή αντίστροφα δεν χρειάζεται να υπερπηδήσουν κάποιο (σημαντικό) φράγμα δυναμικού.



Ωμικές επαφές

- Το μέταλλο και η περιοχή συσσώρευσης έχουν υψηλή συγκέντρωση ηλεκτρονίων.
- Όταν στη διάταξη εφαρμοστεί τάση τότε η πτώση τάσης γίνεται στην περιοχή υψηλής αντίστασης, δηλαδή στο κυρίως σώμα του ημιαγωγού.
- Συνεπώς το ρεύμα καθορίζεται από την αντίσταση του κυρίως σώματος του ημιαγωγού.



Παράδειγμα #2 (Ωμικές επαφές)

Ένας ημιαγωγός n-Si είναι νοθευμένος με συγκέντρωση δοτών 10^{16}cm^{-3} . Το μήκος του είναι $L=100 \mu\text{m}$ και η διατομή του $A=10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$. Η ηλεκτρονική συγγένεια του Si είναι 4.01eV και τα έργα εξόδου (σε eV) τεσσάρων πιθανών μετάλλων για επαφές στα δύο άκρα του ημιαγωγού δίνονται παρακάτω.

Cs	Li	Al	Au
1.8	2.5	4.25	5.0

- Ποια μέταλλα θα δημιουργήσουν επαφή Schottky με τον ημιαγωγό;
- Ποια μέταλλα θα δημιουργήσουν ωμική επαφή με τον ημιαγωγό;
- Σχεδιάστε την χαρακτηριστική I-V όταν και οι δύο άκρες είναι ωμικές επαφές. Ποια είναι η σχέση μεταξύ I και V;
- Σχεδιάστε την χαρακτηριστική I-V όταν η μία άκρη είναι ωμική επαφή και η άλλη επαφή Schottky. Ποια είναι η σχέση μεταξύ I και V;
- Σχεδιάστε την χαρακτηριστική I-V όταν και οι δύο άκρες είναι επαφές Schottky. Ποια είναι η σχέση μεταξύ I και V;

Παράδειγμα #2.a – Επαφή Schottky

a. Ποια μέταλλα θα δημιουργήσουν επαφή Schottky με τον ημιαγωγό;

Για επαφή Schottky πρέπει να έχουμε

$$\Phi_m > \Phi_n$$

$$\Phi_n = \chi + E_c - E_{Fn}$$

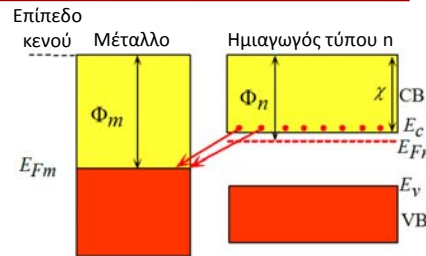
Η διαφορά $E_c - E_{Fn}$ βρίσκεται από τη συγκέντρωση δοτών του ημιαγωγού.

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}} = N_d \Rightarrow$$

$$e^{-\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}} = \frac{N_d}{N_c} \Rightarrow$$

$$-\frac{E_c - E_{Fn}}{kT} = \ln \frac{N_d}{N_c} \Rightarrow$$

$$E_c - E_{Fn} = -kT \ln \frac{N_d}{N_c} = kT \ln \frac{N_c}{N_d}$$



Χρειαζόμαστε:

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$N_c = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

Παράδειγμα #2.a – Επαφή Schottky

$$E_c - E_{Fn} = kT \ln \frac{N_c}{N_d} =$$

$$\left(8.62 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (300\text{K}) \ln \frac{2.8 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}}{10^{16} \text{cm}^{-3}} =$$

$$0.02585 \text{ eV} \ln(2.8 \times 10^3) =$$

$$0.205 \text{ eV}$$

Το έργο εξόδου του Si είναι:

$$\Phi_n = \chi + E_c - E_{Fn} =$$

$$4.01 \text{ eV} + 0.205 \text{ eV} = 4.215 \text{ eV}$$

Το μέταλλο με έργο εξόδου μεγαλύτερο του Φ_n είναι ο χρυσός

$$\Phi_{Au} = 5.0 \text{ eV}$$

Παράδειγμα #2.b – Ωμική επαφή

b. Ποια μέταλλα θα δημιουργήσουν ωμική επαφή με τον ημιαγωγό;

Για ωμική επαφή χρειαζόμαστε:

$$\Phi_m < \Phi_n$$

Συνεπώς τα Cs και Li θα δημιουργήσουν ωμικές επαφές.

Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού. Σύνοψη

Δίοδος Schottky

Με ημιαγωγό τύπου n

$$\Phi_m > \Phi_n$$

Με ημιαγωγό τύπου p

$$\Phi_m < \Phi_p$$

Ωμική επαφή

Με ημιαγωγό τύπου n

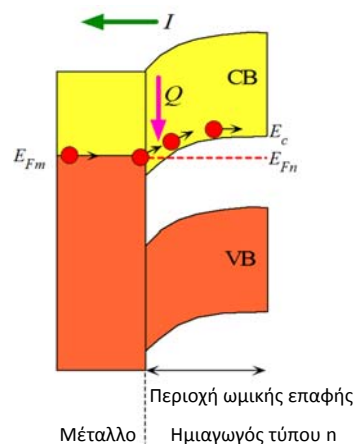
$$\Phi_m < \Phi_n$$

Με ημιαγωγό τύπου p

$$\Phi_m > \Phi_p$$

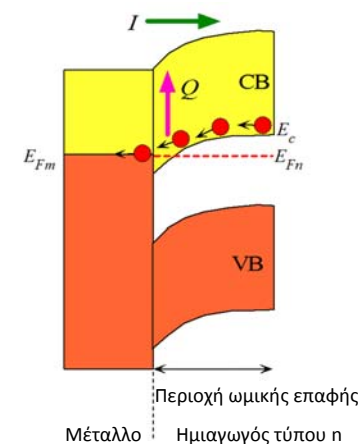
Θερμοηλεκτρικές διατάξεις (διατάξεις Peltier)

- **Διατάξεις Peltier:** Διατάξεις μετάλλου ημιαγωγού (ωμικές επαφές) με τις οποίες επιτυγχάνουμε ψύξη μέσω ηλεκτρικού ρεύματος.
- Στην ένωση μετάλλου ημιαγωγού ανάλογα με την κατεύθυνση του ρεύματος εκλύεται ή απορροφάται θερμότητα.
- Όταν η κατεύθυνση του ρεύματος είναι **από την ημιαγωγό προς το μέταλλο** τα ηλεκτρόνια κινούνται από το μέταλλο προς τον ημιαγωγό.
- Τα ηλεκτρόνια καταφέρνουν να διασχίσουν την ένωση αποκτώντας επιπλέον κινητική ενέργεια.
- Η ενέργεια που απαιτείται απορροφάται από το περιβάλλον (πλεγματικές ταλαντώσεις). Έχουμε **ψύξη** της επαφής.



Θερμοηλεκτρικές διατάξεις (διατάξεις Peltier)

- Όταν η κατεύθυνση του ρεύματος είναι **από το μέταλλο προς τον ημιαγωγό** τα ηλεκτρόνια κινούνται από τον ημιαγωγό προς το μέταλλο.
- Τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από τη ΖΑ του ημιαγωγού στο επίπεδο Fermi του μετάλλου.
- Αφού η E_{Fm} είναι χαμηλότερα από την E_c το ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια.
- Η ενέργεια μετατρέπεται σε πλεγματικές ταλαντώσεις, δηλαδή θερμότητα. Έχουμε **θέρμανση** της επαφής.



Ανάλογα με την κατεύθυνση ροής του ρεύματος σε μια ωμική επαφή έχουμε παραγωγή ή απορρόφηση ενέργειας.

Θερμοηλεκτρικές διατάξεις (διατάξεις Peltier)

Επαφή μετάλλου-ημιαγωγού p

- Σε επαφή μετάλλου με ημιαγωγό τύπου p έχουμε αντίστροφη συμπεριφορά.

- Για να έχουμε ωμική επαφή θα πρέπει

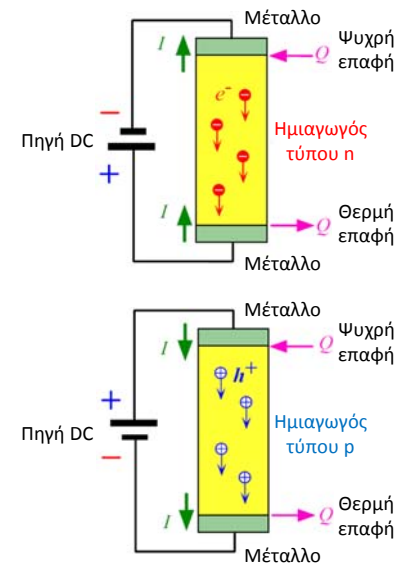
$$\Phi_m > \Phi_p$$

- Ρεύμα από το **μέταλλο προς τον ημιαγωγό**: απορρόφηση θερμότητας (**ψύξη**).
- Ρεύμα από τον **ημιαγωγό προς το μέταλλο**: έκλυση θερμότητας (**θέρμανση**).

- Προσοχή: Δεν πρέπει να συγχέουμε το φαινόμενο Peltier (κατά τη θέρμανση) με το φαινόμενο Joule.
- Στη θέρμανση Joule τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας σκεδάζονται από τα ταλαντούμενα άτομα.
- Κατά τις σκεδάσεις τα ηλεκτρόνια χάνουν ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα.

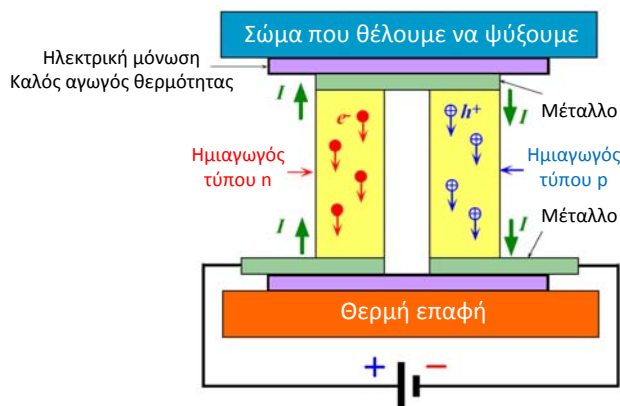
Θερμοηλεκτρικές διατάξεις (διατάξεις Peltier)

- Μια πραγματική διάταξη χρειάζεται δύο μεταλλικές επαφές.
- Στη μία επαφή το ρεύμα εισέρχεται στο μέταλλο ενώ στην άλλη εξέρχεται από το μέταλλο.
- Η μία επαφή θερμαίνεται, ενώ η άλλη ψύχεται.
- Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ψυχρή επαφή για να ψύξουμε ένα σώμα.
- Πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι η θερμότητα απάγεται από τη θερμή επαφή (πχ. με ψύκτρες, ανεμιστήρες κα) ώστε να μην καταστραφεί.



Θερμοηλεκτρικές διατάξεις (διατάξεις Peltier)

Απλοποιημένο διάγραμμα θερμοηλεκτρικής ψυκτικής διάταξης.



Δύο ημιαγωγοί τύπου n και p συνδεδεμένοι στη σειρά, που σχηματίζουν ωμικές επαφές. Ο ημιαγωγός είναι συνήθως Bi_2Te_3 ή Bi_2Se_3 ή SbTe_3 . Το μέταλλο είναι συνήθως χαλκός.

Θερμοηλεκτρικές διατάξεις (διατάξεις Peltier)

Δομή εμπορικής θερμοηλεκτρικής ψυκτικής διάταξης

