

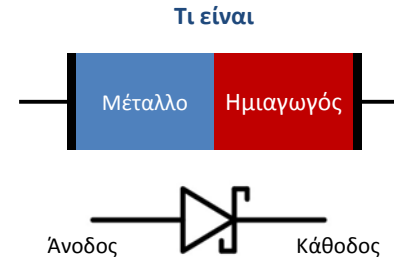
Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

Δ. Γ. Παπαγεωργίου
Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

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

1

Δίοδος Schottky



Walter H. Schottky
1886-1976

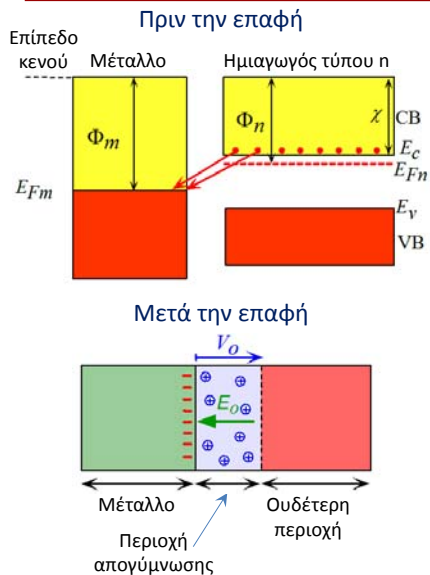
- Κατασκευάζεται με εξάχνωση μετάλλου το οποίο μεταφέρεται στην επιφάνεια του ημιαγωγού σε συνθήκες κενού.
- Βασική ηλεκτρική ιδιότητα: επιτρέπει στο ρεύμα να διέρχεται προς μια κατεύθυνση μόνο.
- Αντίθετα με τη δίοδο p-n, στις διόδους Schottky η αγωγιμότητα οφείλεται σε ένα μόνο είδος φορέων (μονοπολική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

Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

2

Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών (χωρίς πόλωση)



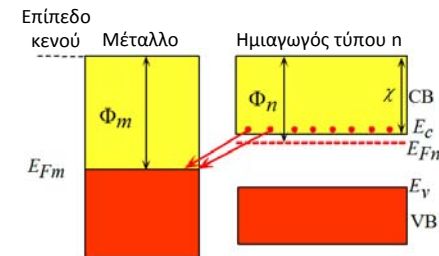
- Υποθέτουμε ότι το έργο εξόδου του μετάλλου είναι μεγαλύτερο από αυτό του ημιαγωγού $\Phi_m > \Phi_n$
- Ηλεκτρόνια από τη ΖΑ του ημιαγωγού μεταβαίνουν στο μέταλλο με το φαινόμενο σήραγγας.
- Καταλαμβάνουν ενεργειακά επίπεδα ακριβώς πάνω από το E_{Fm}
- Στον ημιαγωγό δημιουργείται μια περιοχή πλάτους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

Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

3

Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

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

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

$$\Phi_B = eV_0 + E_c - E_{Fn} \quad \text{Φράγμα Schottky}$$

Απαιτείται περισσότερη ενέργεια για μετάβαση από το μέταλλο στον ημιαγωγό:

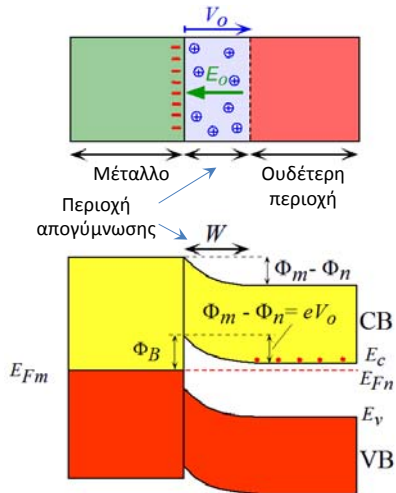
$$\Phi_B > eV_0$$

Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

4

Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

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

- Σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος δεν υπάρχει ροή ρεύματος.
- Τα δύο ρεύματα είναι ίσα σε μέτρο και ρέουν προς αντίθετη κατεύθυνση:

$$J = J_2 - J_1 = 0$$

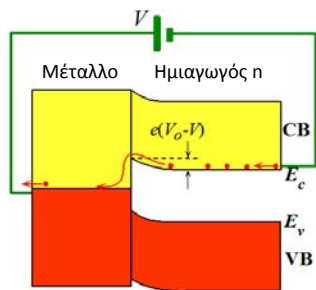
- Το ρεύμα λόγω των ηλεκτρονίων που διεγείρονται θερμικά και κινούνται **από το μέταλλο προς τον ημιαγωγό** περνώντας το φράγμα Φ_B είναι:

$$J_1 = C_1 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}}$$

- Το ρεύμα λόγω των ηλεκτρονίων που διεγείρονται θερμικά και κινούνται **από τον ημιαγωγό προς το μέταλλο** περνώντας το φράγμα eV_0 είναι:

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

Το ρεύμα στην ορθή πόλωση



- Η πτώση τάσης γίνεται στην περιοχή απογύμνωσης.
- Η εφαρμοζόμενη τάση μειώνει το εσωτερικό 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

Σε συνθήκες ισορροπίας

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

Το ολικό ρεύμα γράφεται:

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

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

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

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).

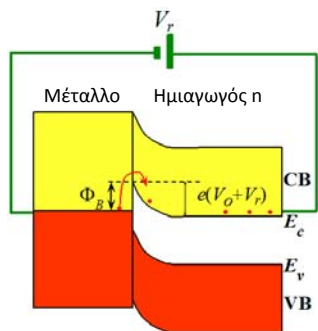
Σε περίπτωση που

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

το ρεύμα μπορεί να γραφεί ως:

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

Ανάστροφη πόλωση



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:

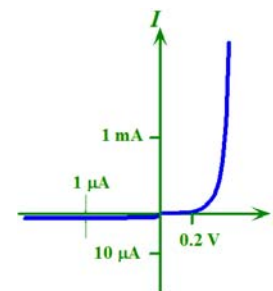
$$J_2^{\text{αναστ}} = C_2 e^{-\frac{e(V_0 + V_r)}{kT}}$$

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



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

Παράδειγμα #1 (Δίοδος Schottky)

Η σταθερά J_0 (ανάστροφο ρεύμα κορεσμού) δίνεται από τη σχέση Richardson-Dushman (θερμιοκική εκπομπή πάνω από φράγμα δυναμικού Φ_B).

$$J_0 = B_e T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}}$$

Η σταθερά B_e για επαφή μέταλλου και n-Si είναι **110 A K⁻² cm⁻²**

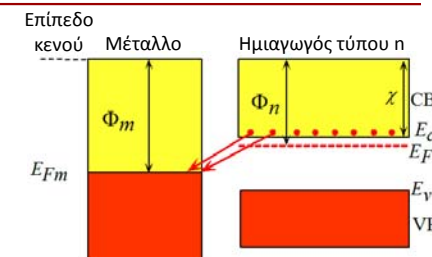
Θεωρήστε μια δίοδο Schottky από Βολφράμιο και n-Si με συγκέντρωση δοτών **10¹⁶cm⁻³**. Η διατομή είναι **1mm²**. Η ηλεκτρονική συγγένεια του Si είναι **4.01eV** και το έργο εξόδου του βολφραμίου είναι **4.55eV**.

- Ποιό είναι το θεωρητικό ύψος του φράγματος Schottky Φ_B ;
- Ποιο είναι το εσωτερικό δυναμικό (χωρίς πόλωση);
- Δεδομένου ότι το πειραματικό ύψος του φράγματος Φ_B είναι **0.66eV** ποιό είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού και το ρεύμα με ορθή πόλωση **0.2V**;

Παράδειγμα #1.a – Φράγμα Schottky

a. Ποιό είναι το θεωρητικό ύψος του φράγματος Schottky Φ_B ;

$$\begin{aligned} \Phi_B &= \Phi_m - \chi = \\ 4.55eV - 4.01eV &= \\ \mathbf{0.54eV} \end{aligned}$$



Η διαφορά από την πειραματική τιμή 0.66eV οφείλεται σε φαινόμενα στην διεπαφή μέταλλου-ημιαγωγού (ατέλειες, μη πλήρεις δεσμοί κ).

Παράδειγμα #1.b – Εσωτερικό δυναμικό

β. Ποιο είναι το εσωτερικό δυναμικό (χωρίς πόλωση);

Το φράγμα Schottky δίνεται από

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

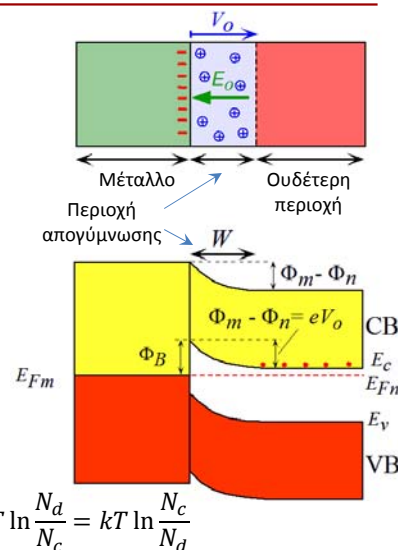
$$V_0 = \frac{\Phi_B - (E_c - E_{Fn})}{e}$$

Μπορούμε να βρούμε τη διαφορά $E_c - E_{Fn}$ από τη συγκέντρωση δοτών του ημιαγωγού.

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

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

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



Παράδειγμα #1.b – Εσωτερικό δυναμικό

	E_g (eV)	χ (eV)	N_c (cm^{-3})	N_v (cm^{-3})	n_i (cm^{-3})	μ_e ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	μ_h ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	m_e^*/m_e	m_h^*/m_e	ϵ_r
Ge	0.66	4.13	1.04×10^{19}	6.0×10^{18}	2.3×10^{13}	3900	1900	0.12a	0.23a	16
Si	1.10	4.01	2.8×10^{19}	1.2×10^{19}	1.0×10^{10}	1350	450	0.26a	0.38a	11.9
GaAs	1.42	4.07	4.7×10^{17}	7×10^{18}	2.1×10^6	8500	400	0.067a,b	0.40a	13.1
								0.56b	0.40b	
								1.08b	0.60b	
								0.40a	0.50b	

Χρειαζόμαστε:

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

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

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

$$0.0259 \text{ eV} \ln(2.8 \times 10^3) = \mathbf{0.205 \text{ eV}}$$

Παράδειγμα #1.b – Εσωτερικό δυναμικό

Αφού βρήκαμε τη διαφορά $E_c - E_{Fn}$ μπορούμε να υπολογίσουμε το εσωτερικό δυναμικό

$$V_0 = \frac{\Phi_B - (E_c - E_{Fn})}{e} =$$

$$\frac{0.54 \text{ eV} - 0.205 \text{ eV}}{e} =$$

$$\frac{0.335 \text{ eV}}{e} =$$

$$\mathbf{0.335 \text{ V}}$$

Παράδειγμα #1.c – Ρεύμα

γ. Δεδομένου ότι το πειραματικό ύψος του φράγματος Φ_B είναι 0.66eV ποιά είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού και το ρεύμα με ορθή πόλωση 0.2V;

Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού είναι:

$$I_0 = A J_0 = A B_e T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}} =$$

$$(0.01 \text{ cm}^2) \left(110 \frac{\text{A}}{\text{K}^2 \text{ cm}^2}\right) (300\text{K})^2 e^{-\frac{0.66 \text{ eV}}{(8.62 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}})(300\text{K})}} =$$

$$8.2 \times 10^{-7} \text{ A} =$$

$$\mathbf{0.82 \mu\text{A}}$$

Το ορθό ρεύμα για τάση 0.2V είναι:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1\right) =$$

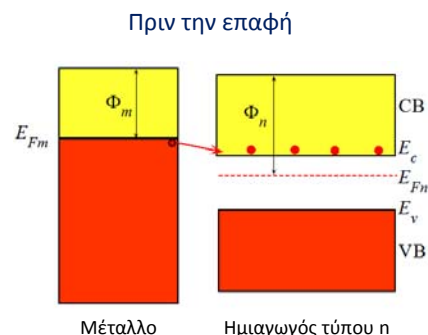
$$(8.2 \times 10^{-7} \text{ A}) \left(e^{\frac{0.2\text{V}}{0.0259\text{V}}} - 1\right) =$$

$$(8.2 \times 10^{-7} \text{ A}) (2257 - 1) = \mathbf{1.8 \text{ mA}}$$

Ωμικές επαφές

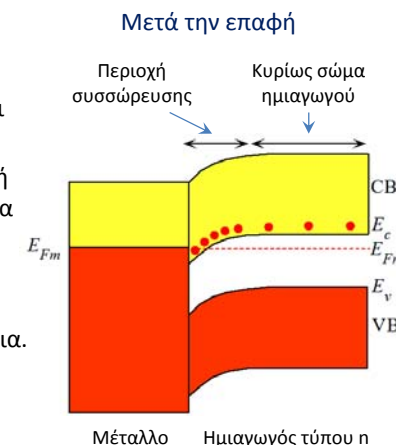
- **Ωμική επαφή:** Ένωση μετάλλου-ημιαγωγού που δεν περιορίζει τη ροή του ρεύματος.
- Η ροή του ρεύματος περιορίζεται από την αντίσταση του κυρίως σώματος του ημιαγωγού.
- Το έργο εξόδου του μετάλλου πρέπει να είναι μικρότερο από του ημιαγωγού:

$$\Phi_m < \Phi_n$$
- Ηλεκτρόνια από μέταλλο μεταβαίνουν στη ΖΑ του ημιαγωγού (χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο)



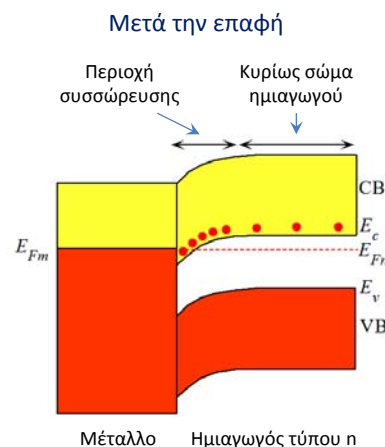
Ωμικές επαφές

- Δημιουργείται περιοχή συσσώρευσης ηλεκτρονίων κοντά στην επαφή.
- Ως αποτέλεσμα έχουμε ηλεκτρόνια αγωγιμότητας από την μεταλλική μέχρι την ημιαγωγίμη 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

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

Για επαφή Schottky πρέπει να έχουμε $\Phi_m > \Phi_n$

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

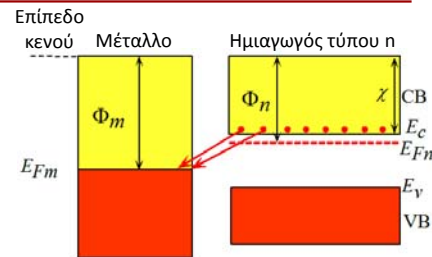
Η διαφορά $E_c - E_{Fn}$ βρίσκεται από τη συγκέντρωση δοτών του ημιαγωγού.

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

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

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

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



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

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

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

$$0.0259 \text{ eV} \ln(2.8 \times 10^3) =$$

$$0.205 \text{ eV}$$

Το έργο εξόδου του n-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

β. 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.

Παράδειγμα #2.c – Χαρακτηριστική IV με ωμικές επαφές

γ. Σχεδιάστε την χαρακτηριστική I-V όταν και οι δύο άκρες είναι ωμικές επαφές. Ποια είναι η σχέση μεταξύ I και V;

Το κυρίως σώμα του ημιαγωγού παρουσιάζει ωμική αντίσταση

$$R = \frac{L}{\sigma A}$$

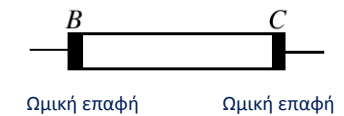
Η αγωγιμότητα δίνεται από:

$$\sigma = eN_d \mu_e$$

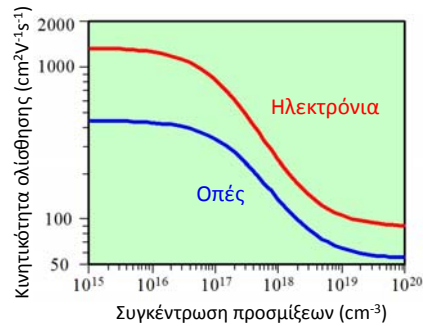
Συνεπώς:

$$R = \frac{L}{eN_d \mu_e A}$$

Χρειαζόμαστε την τιμή του μ_e



Παράδειγμα #2.c – Χαρακτηριστική IV με ωμικές επαφές



	E_g (eV)	χ (eV)	N_c (cm ⁻³)	N_v (cm ⁻³)	n_i (cm ⁻³)	μ_e (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	μ_h (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	m_e^*/m_e	m_h^*/m_e	ϵ_r
Ge	0.66	4.13	1.04×10^{19}	6.0×10^{18}	2.3×10^{13}	3900	1900	0.12a 0.56b	0.23a 0.40b	16
Si	1.10	4.01	2.8×10^{19}	1.2×10^{19}	1.0×10^{10}	1350	450	0.26a 1.08b	0.38a 0.60b	11.9
GaAs	1.42	4.07	4.7×10^{17}	7×10^{18}	2.1×10^6	8500	400	0.067a,b	0.40a 0.50b	13.1

Ημιαγώγια και διηλεκτρικά υλικά

25

Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

Παράδειγμα #2.c – Χαρακτηριστική IV με ωμικές επαφές

Χρειαζόμαστε:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\mu_e = 1350 \text{ cm}^2/\text{V/s}$$

Γράφουμε τα L, N_d, μ_e, A σε μονάδες του διεθνούς συστήματος:

$$L = 100 \mu\text{m} = 100 \times 10^{-6} \text{ m} = 10^{-4} \text{ m}$$

$$N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3} = 10^{16} \times (10^{-2} \text{ m})^{-3} = 10^{16} \times 10^6 \text{ m}^{-3} = 10^{22} \text{ m}^{-3}$$

$$\mu_e = 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} = 1350 \frac{(10^{-2} \text{ m})^2}{\text{Vs}} = 1350 \frac{10^{-4} \text{ m}^2}{\text{Vs}} = 0.135 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$$

$$A = 10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} = 10^{-5} \text{ m} \times 10^{-5} \text{ m} = 10^{-10} \text{ m}^2$$

Αντικαθιστούμε στον τύπο:

$$R = \frac{L}{e N_d \mu_e A} = \frac{10^{-4} \text{ m}}{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(10^{22} \text{ m}^{-3})(0.135 \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}})(10^{-10} \text{ m}^2)} =$$

$$4630 \frac{\text{V}}{\text{C}} = 4630 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 4630 \Omega$$

Ημιαγώγια και διηλεκτρικά υλικά

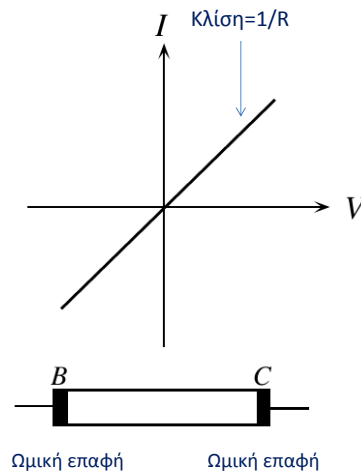
26

Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

Παράδειγμα #2.c – Χαρακτηριστική IV με ωμικές επαφές

Η σχέση ρεύματος-τάσης δίνεται από
από το νόμο του Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$



Ημιαγώγια και διηλεκτρικά υλικά

27

Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

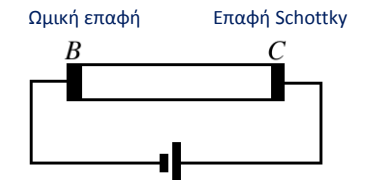
Παράδειγμα #2.d – Χαρακτηριστική IV με επαφή Schottky/ωμική

d. 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;



Ανάστροφη πόλωση της επαφής Schottky

Το ρεύμα περιορίζεται από την
ανάστροφη πόλωση της επαφής
Schottky (θερμιονική εκπομπή πάνω
από το φράγμα Φ_B)



Ορθή πόλωση της επαφής Schottky

Το ρεύμα περιορίζεται από την
αντίσταση του σώματος του
ημιαγωγού, εκτός αν αυτή είναι πολύ
μικρή οπότε το ρεύμα περιορίζεται
από την ορθή πόλωση της επαφής
Schottky.

Ημιαγώγια και διηλεκτρικά υλικά

28

Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού

Παράδειγμα #2.d – Χαρακτηριστική IV με επαφή Schottky/ωμική

Το ρεύμα στην επαφή Schottky δίνεται από

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

Όταν έχουμε ανάστροφη πόλωση ($V \ll 0$)

$$J = -J_0$$

Η σταθερά J_0 δίνεται από τη σχέση Richardson-Dushman:

$$J_0 = B_e T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}}$$

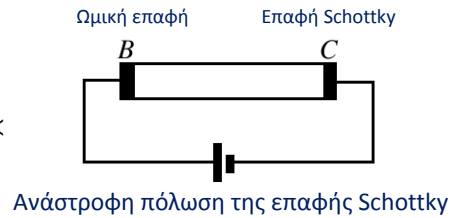
Συνεπώς το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού είναι:

$$I_0 = AB_e T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}}$$

Χρειάζεται να βρούμε το Φ_B

$$\Phi_B = \Phi_{Au} - \chi =$$

$$5.0eV - 4.01eV = 0.99eV$$



Παράδειγμα #2.d – Χαρακτηριστική IV με επαφή Schottky/ωμική

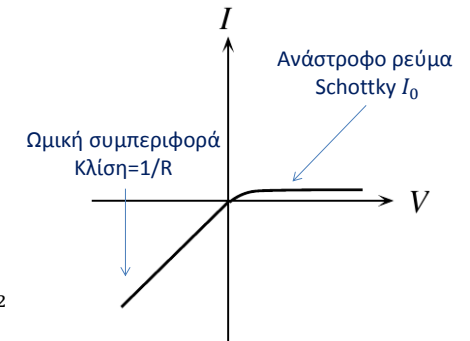
Θα χρησιμοποιήσουμε

$$B_e = 110 \frac{A}{K^2 cm^2} = 110 \frac{A}{K^2 (10^{-2}m)^2} \\ = 1.1 \times 10^6 \frac{A}{K^2 m^2}$$

Αντικαθιστούμε στον τύπο:

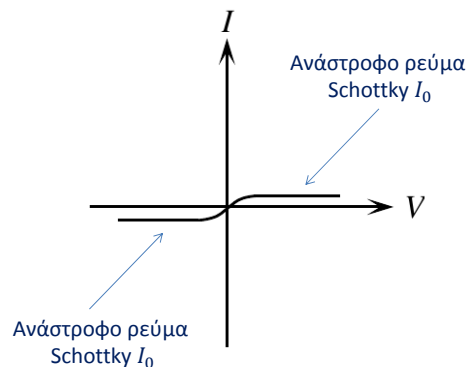
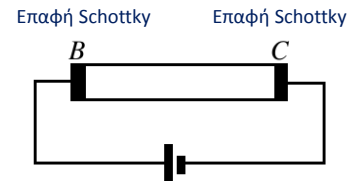
$$I_0 = AB_e T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}} = \\ (10^{-10}m^2) \left(1.1 \times 10^6 \frac{A}{K^2 m^2} \right) (300K)^2$$

$$= \frac{0.99eV}{(8.62 \times 10^{-5} \frac{eV}{K})(300K)} = \\ 2.3 \times 10^{-16}A$$



Παράδειγμα #2.d – Χαρακτηριστική IV με επαφές Schottky

Μία από τις δύο επαφές είναι πάντα ανάστροφα πολωμένη και περιορίζει τη ροή του ρεύματος.



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

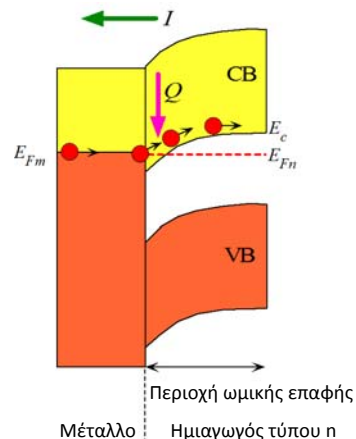
$$\Phi_m < \Phi_n$$

Με ημιαγωγό τύπου p

$$\Phi_m > \Phi_p$$

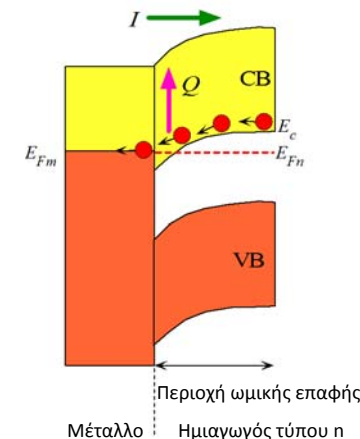
Θερμοηλεκτρικές διατάξεις (διατάξεις Peltier)

- **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)

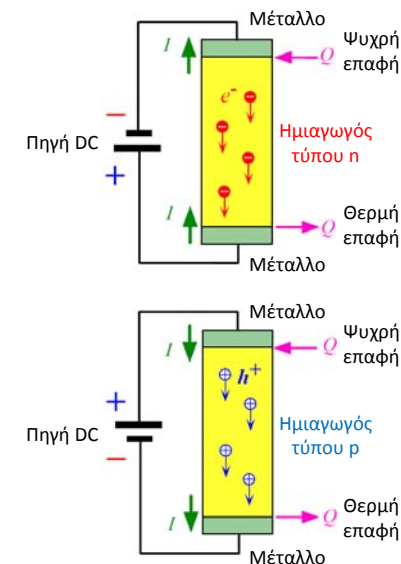
Επαφή μετάλλου-ημιαγωγού p

- 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.

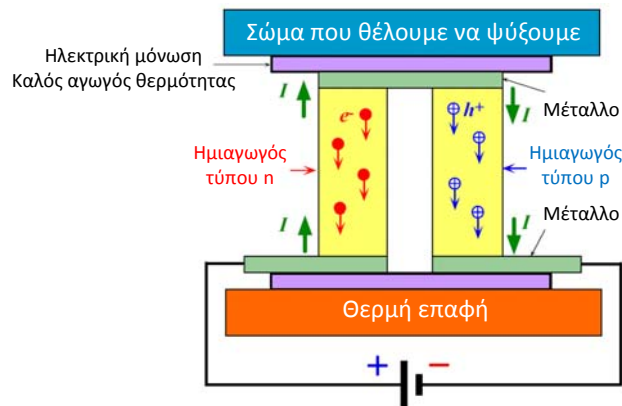
Θερμοηλεκτρικές διατάξεις (διατάξεις Peltier)

- 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)

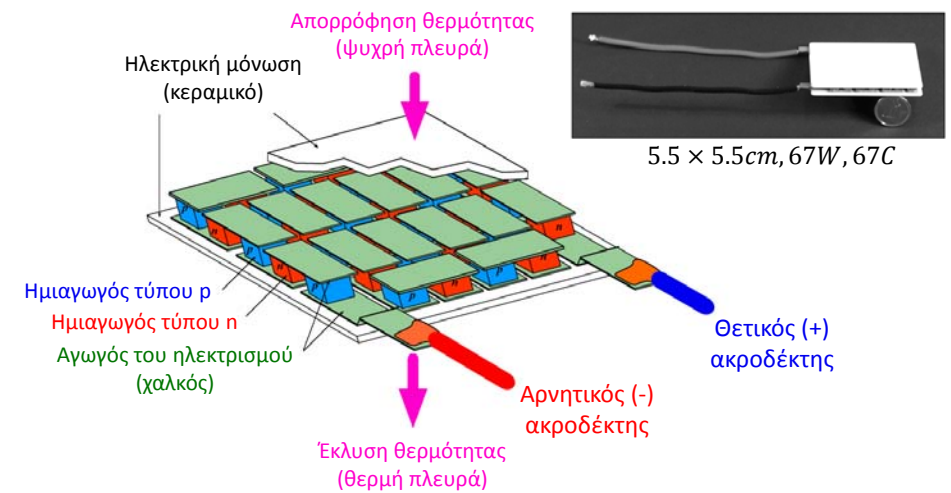
Απλοποιημένο διάγραμμα θερμοηλεκτρικής ψυκτικής διάταξης.



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



Σύνοψη

Φράγμα Shottky

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

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

Ρεύμα στη δίοδο Shottky

$$J^{\text{orth}} = J_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

Θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων
πάνω από φράγμα δυναμικού

$$J_0 = B_e T^2 e^{-\frac{\Phi_B}{kT}}$$