



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τεχνολογία Υλικών II

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Ηλεκτρικές Ιδιότητες – Νόμος του Ohm

Ηλεκτρικές Ιδιότητες Υλικών

- Τα υλικά αποκρίνονται σε εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο
- Η ηλεκτρική αγωγή οφείλεται στην κίνηση φορτισμένων σωματιδίων
- Η αγωγιμότητα εξαρτάται από τη δομή των ενεργειακών ζωνών

Κατηγορίες υλικών:

- Αγωγοί
- Ημιαγωγοί
- Μονωτές

☐ Νόμος του Ohm

Συνδέει την ένταση ρεύματος με την εφαρμοζόμενη τάση

Η αντίσταση εκφράζει τη δυσκολία ροής του ρεύματος

Τύπος:

$$V = IR$$

Όπου:

V : τάση (Volt, V)

I : ένταση ρεύματος (Ampere, A)

R : αντίσταση (Ohm, Ω)

Ειδική Αντίσταση (ρ)

Ειδική Αντίσταση (ρ)

Χαρακτηριστική ιδιότητα υλικού

Ανεξάρτητη από τη γεωμετρία του δείγματος

• Εξαρτάται από:

- το είδος του υλικού
- τη θερμοκρασία

Σχέση με αντίσταση

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

ή

$$\rho = \frac{VA}{Il}$$

Όπου:

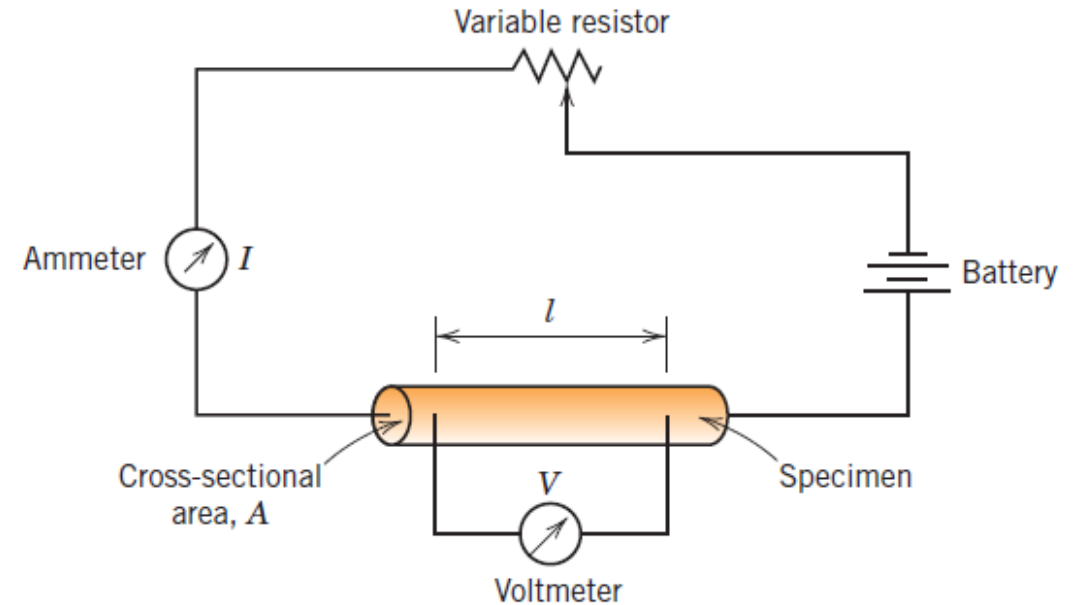
R : αντίσταση (Ω)

A : επιφάνεια διατομής (m^2)

l : μήκος δείγματος (m)

V : τάση (V)

I : ένταση ρεύματος (A)



Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

□ Ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ)

- Δείχνει πόσο εύκολα άγει ένα υλικό
- Είναι το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης

Τύπος:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Όπου:

σ : αγωγιμότητα ($(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ή S/m , $1 \text{ S} = \frac{1}{\Omega}$)

ρ : ειδική αντίσταση ($\Omega \cdot \text{m}$)

□ Εναλλακτική μορφή Ohm:

$$J = \sigma E$$

J : πυκνότητα ρεύματος (A/m^2)

σ : αγωγιμότητα (S/m)

E : ηλεκτρικό πεδίο (V/m)

□ Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου

$$E = \frac{V}{l}$$

Όπου:

E : ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

V : διαφορά δυναμικού / τάση (V)

l : απόσταση μεταξύ δύο σημείων (m)

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι:

$$E = \frac{F}{q}$$

Όπου:

F : δύναμη (N)

q : φορτίο (C)

Κατηγορίες Υλικών

☐ Τα υλικά διακρίνονται με βάση την αγωγιμότητα:

Μέταλλα → υψηλή αγωγιμότητα

$$\sigma \sim 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$$

Παραδείγματα: Cu, Al, Ag, Au, Fe

Ημιαγωγοί → ενδιάμεση

$$\sigma \sim 10^{-6} \text{ έως } 10^4 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$$

Παραδείγματα: Si, Ge, GaAs

Μονωτές → πολύ χαμηλή

$$\sigma \sim 10^{-10} \text{ έως } 10^{-20} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$$

Παραδείγματα: κεραμικά, γυαλί, πλαστικά

➤ Η διαφορά οφείλεται στη δομή των ενεργειακών ζωνών

Ηλεκτρονική & ιοντική αγωγή

Το ρεύμα προκύπτει από κίνηση φορτισμένων σωματιδίων

Ηλεκτρονική αγωγή:

- κίνηση ηλεκτρονίων

Ιοντική αγωγή:

- κίνηση ιόντων

Δομή Ενεργειακών Ζωνών

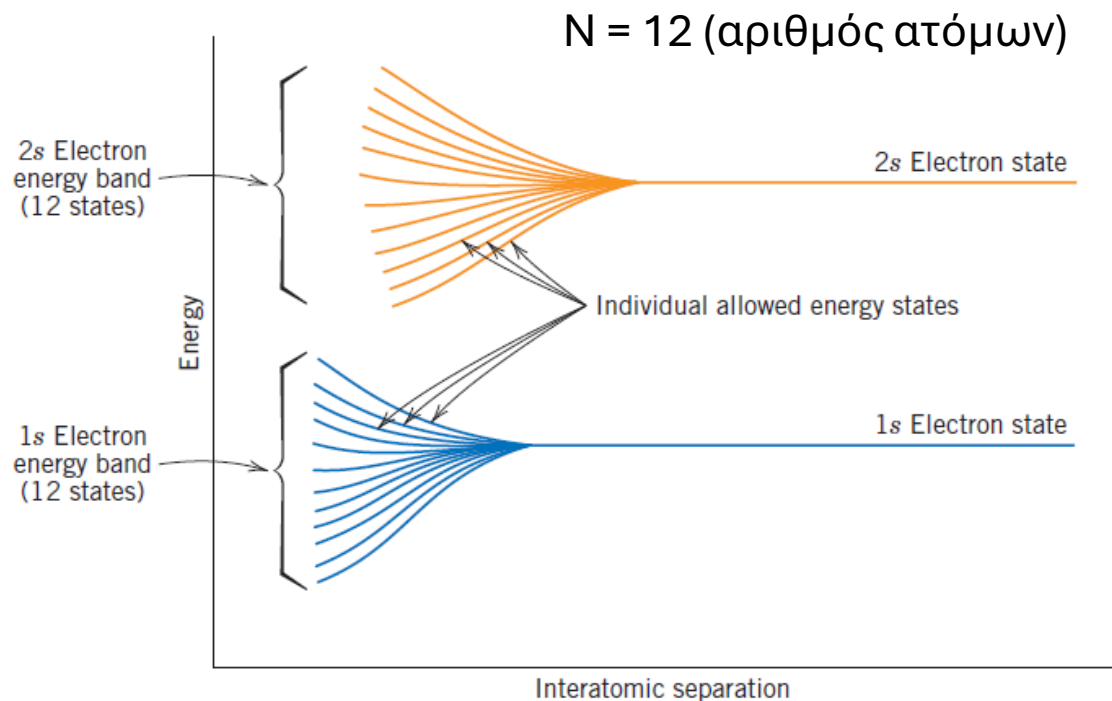
□ Δομή ζωνών ενέργειας

• Στα στερεά τα ενεργειακά επίπεδα σχηματίζουν ζώνες

• Υπάρχουν:

- ζώνη σθένους
- ζώνη αγωγιμότητας

Μεταξύ τους υπάρχει ενεργειακό χάσμα (band gap)



➤ Μεγάλη απόσταση ατόμων

Τα άτομα είναι **απομονωμένα**

Υπάρχουν **διακριτά ενεργειακά επίπεδα**

1s επίπεδο

2s επίπεδο

κάθε άτομο έχει συγκεκριμένες τιμές ενέργειας

➤ Καθώς τα άτομα πλησιάζουν (στερεό)

Τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν

Τα επίπεδα διαχωρίζονται σε πολλά κοντινά επίπεδα

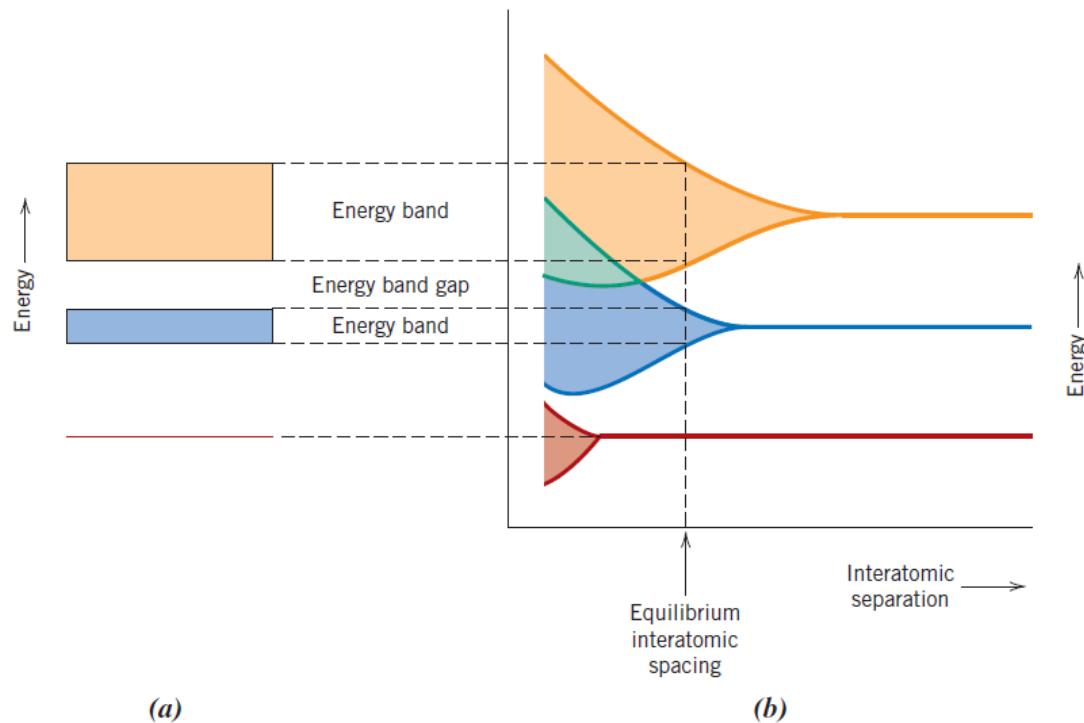
κάθε άτομο επηρεάζει τα γειτονικά του

➤ Σχηματισμός ζωνών

Τα πολλά κοντινά επίπεδα σχηματίζουν **ενεργειακές ζώνες (energy bands)**

Κάθε ζώνη περιέχει μεγάλο αριθμό ενεργειακών καταστάσεων

Δομή Ενεργειακών Ζωνών



Σχηματισμός Ενεργειακών Ζωνών

Καθώς τα άτομα πλησιάζουν (b)

Δημιουργούνται πολλές **κοντινές ενεργειακές καταστάσεις**
Η αλληλεπίδραση αυξάνεται

Σχηματισμός ζωνών (a)

Οι καταστάσεις συγκεντρώνονται σε:

- **κατώτερη ζώνη – ζώνη σθένους (valence band)**
- **ανώτερη ζώνη – ζώνη αγωγιμότητας (conduction band)**

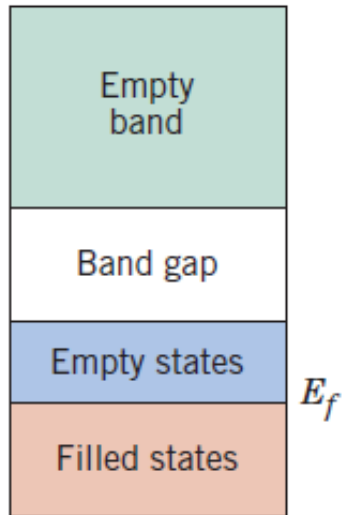
Στερεό

Τα επίπεδα → **ενεργειακές ζώνες (bands)**

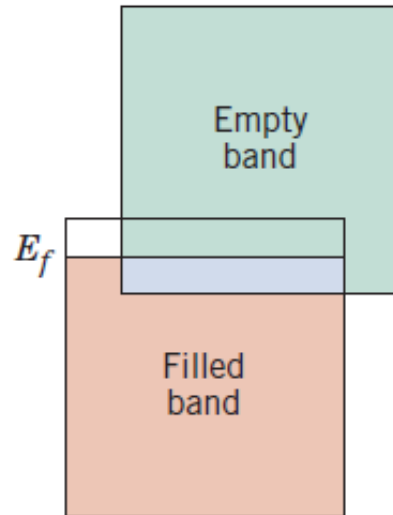
Μεταξύ τους υπάρχει **ενεργειακό χάσμα (band gap)**

Συσχέτιση Δομής Ενεργειακών Ζωνών και Αγωγιμότητας

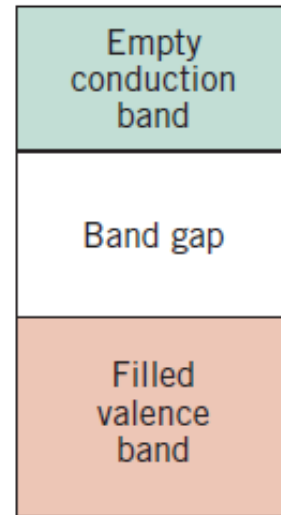
Τύποι Δομών Ζωνών



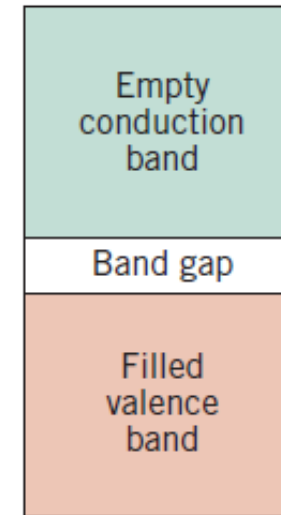
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Μέταλλο (μερικώς γεμάτη ζώνη)

Υπάρχουν

γεμάτες καταστάσεις και
κενές καταστάσεις

Τα ηλεκτρόνια μπορούν να
κινηθούν εύκολα εντός της ζώνης

Πολύ καλή αγωγιμότητα

(b) Μέταλλο (επικάλυψη ζωνών)

Δύο ζώνες **επικαλύπτονται**
Υπάρχουν πάντα διαθέσιμες
κενές καταστάσεις

Πολύ καλή αγωγιμότητα

(c) Μονωτής

Ζώνη σθένους πλήρης
Ζώνη αγωγιμότητας κενή
Μεγάλο **band gap**

Τα ηλεκτρόνια **ΔΕΝ** μπορούν
να περάσουν εύκολα

Μη αγωγίμο υλικό

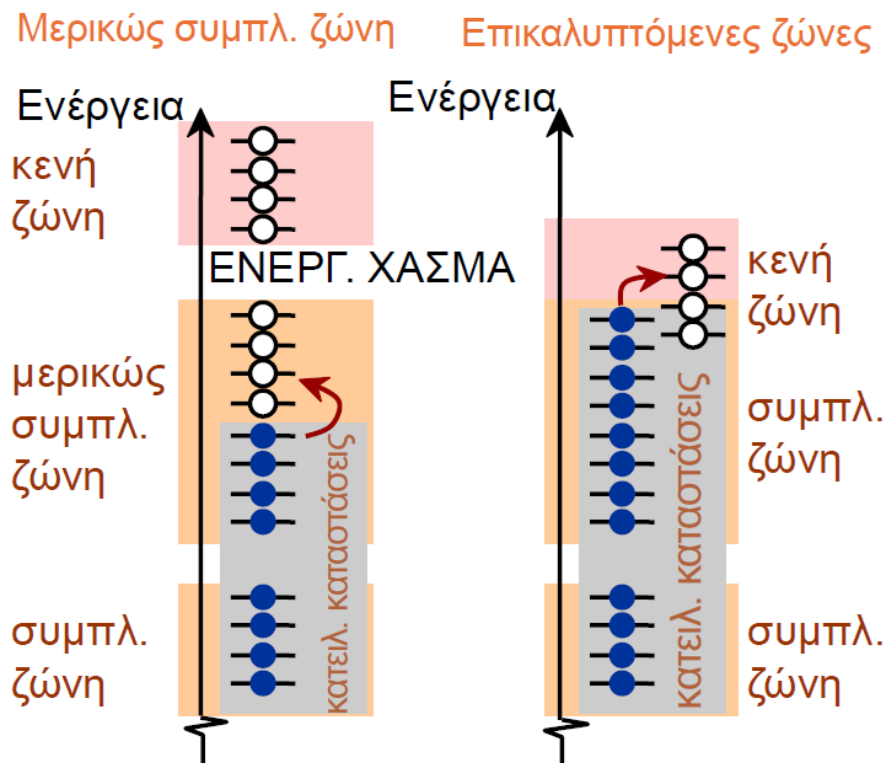
(d) Ημιαγωγός

Όμοιο με μονωτή αλλά:
Το **band gap** είναι μικρό
Με λίγη ενέργεια τα
ηλεκτρόνια ανεβαίνουν
στη CB

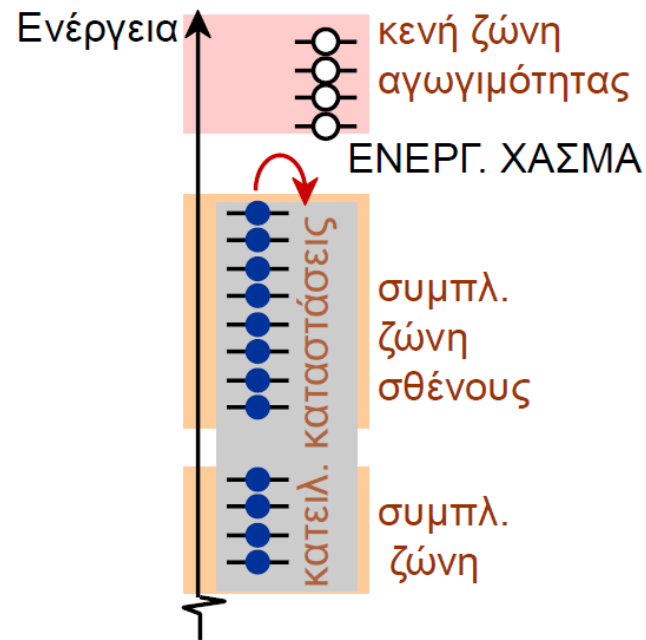
**Μέτρια / ελεγχόμενη
αγωγιμότητα**

Συσχέτιση Δομής Ενεργειακών Ζωνών και Αγωγιμότητας

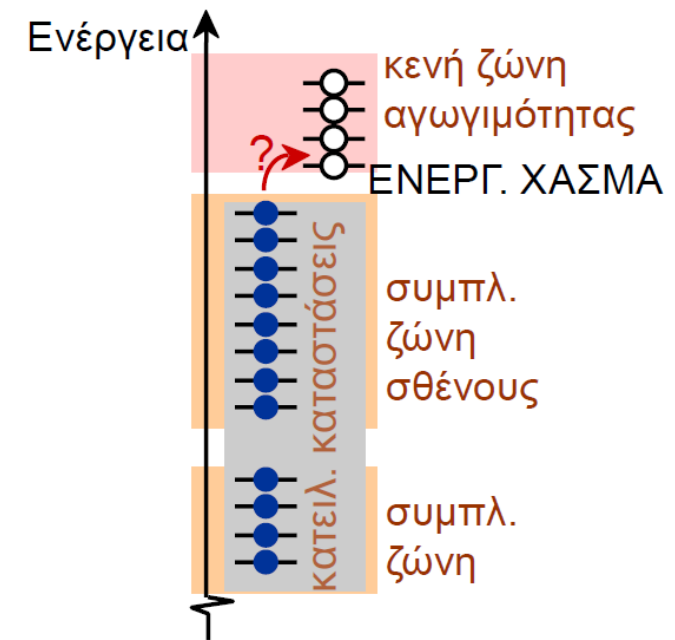
Μέταλλα



Μονωτής



Ημιαγωγός



Ημιαγωγοί

☐ Φορείς Φορτίου σε Ημιαγωγούς

Η αγωγή γίνεται μέσω:

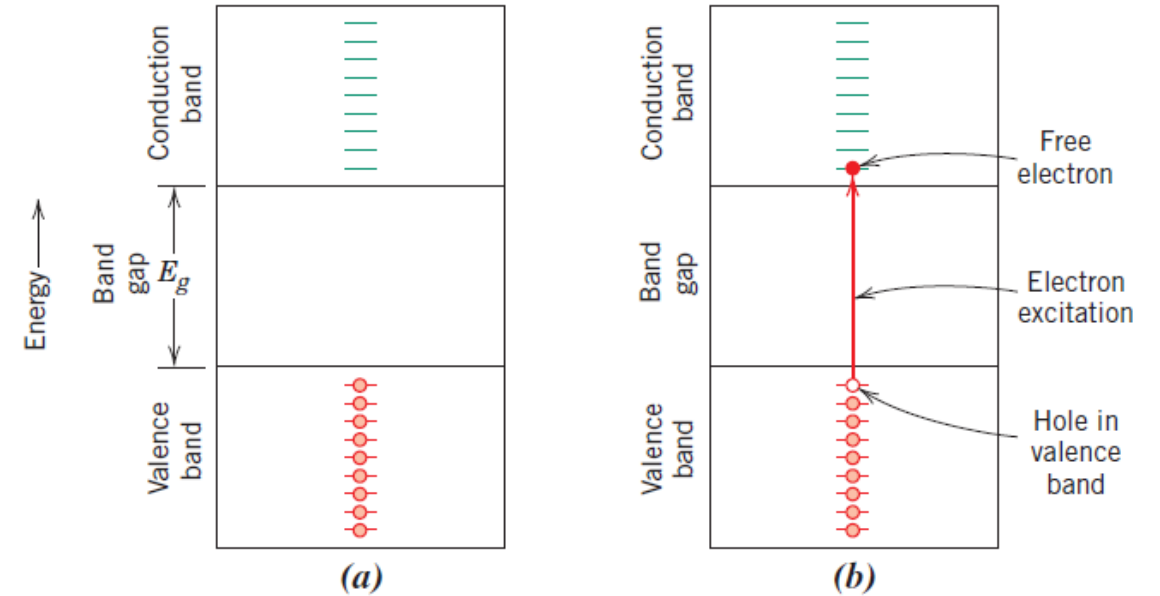
- **ελεύθερων ηλεκτρονίων** (conduction band)
- **οπών** (valence band)

Δημιουργία φορέων

Με παροχή ενέργειας (θερμική ή ακτινοβολία):

- ηλεκτρόνιο μεταβαίνει στη ζώνη αγωγιμότητας
- δημιουργείται **οπή** στη ζώνη σθένους

Δημιουργείται ζεύγος **ηλεκτρονίου-οπής**



Ηλεκτρόνια και Οπές είναι Φορείς Φορτίου στους Ημιαγωγούς

Επίδραση θερμοκρασίας και Ατελειών στα Μέταλλα

Μέταλλα: Επίδραση Θερμοκρασίας & Ατελειών

Η ειδική αντίσταση ρ αυξάνεται όταν αυξάνονται οι **ατέλειες**
Οι ατέλειες λειτουργούν ως **κέντρα σκέδασης ηλεκτρονίων**

Τύποι ατελειών

- όρια κόκκων
- διαταραχές πλέγματος
- άτομα προσμίξεων
- πλεγματικά κενά

Προκαλούν:

αλλαγή διεύθυνσης ηλεκτρονίων
απώλεια κινητικής ενέργειας

Εξάρτηση της ειδικής αντίστασης

$$\rho = \rho_t + \rho_i + \rho_d$$

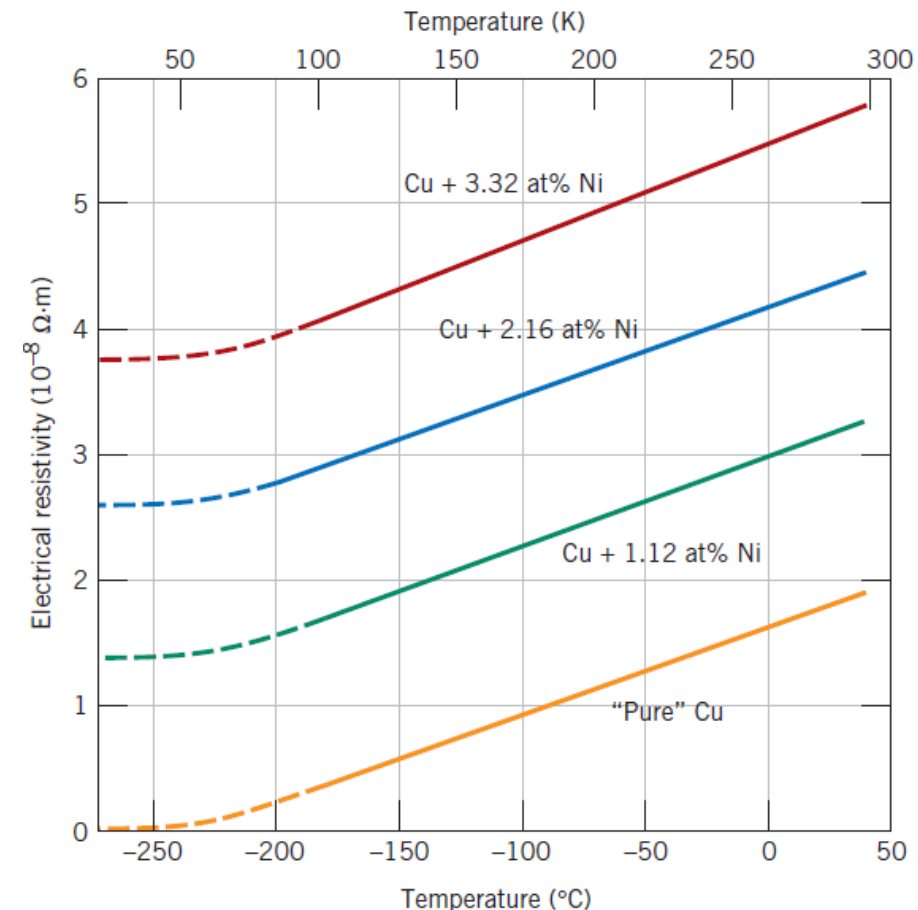
Όπου:

ρ : συνολική ειδική αντίσταση ($\Omega \cdot \text{m}$)

ρ_t : θερμική συνεισφορά ($\Omega \cdot \text{m}$)

ρ_i : λόγω προσμίξεων ($\Omega \cdot \text{m}$)

ρ_d : λόγω παραμόρφωσης ($\Omega \cdot \text{m}$)



Η ειδική αντίσταση είναι:

- **μεγαλύτερη** όταν έχουμε προσμίξεις
- **αυξάνεται** με τη θερμοκρασία

Ειδική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

□ Αγωγιμότητα και φορείς

Η αγωγιμότητα εξαρτάται από:

- αριθμό φορέων
- κινητικότητα – πόσο εύκολα κινούνται

Μέταλλα - Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

$$\sigma = n | e | \mu_e$$

σ : αγωγιμότητα (**S/m**)

n : συγκέντρωση ηλεκτρονίων (**1/m³**)

e : φορτίο ηλεκτρονίου (**1.6 · 10⁻¹⁹ C**)

μ_e : κινητικότητα ηλεκτρονίων (**m²/(V·s)**)

Ειδική Αγωγιμότητα σε Ενδογενείς Ημιαγωγούς

□ Ειδική Αγωγιμότητα σε Ενδογενείς Ημιαγωγούς

$$\sigma = n | e | \mu_e + p | e | \mu_h$$

Ενδογενής ημιαγωγός

$$n = p = n_i$$

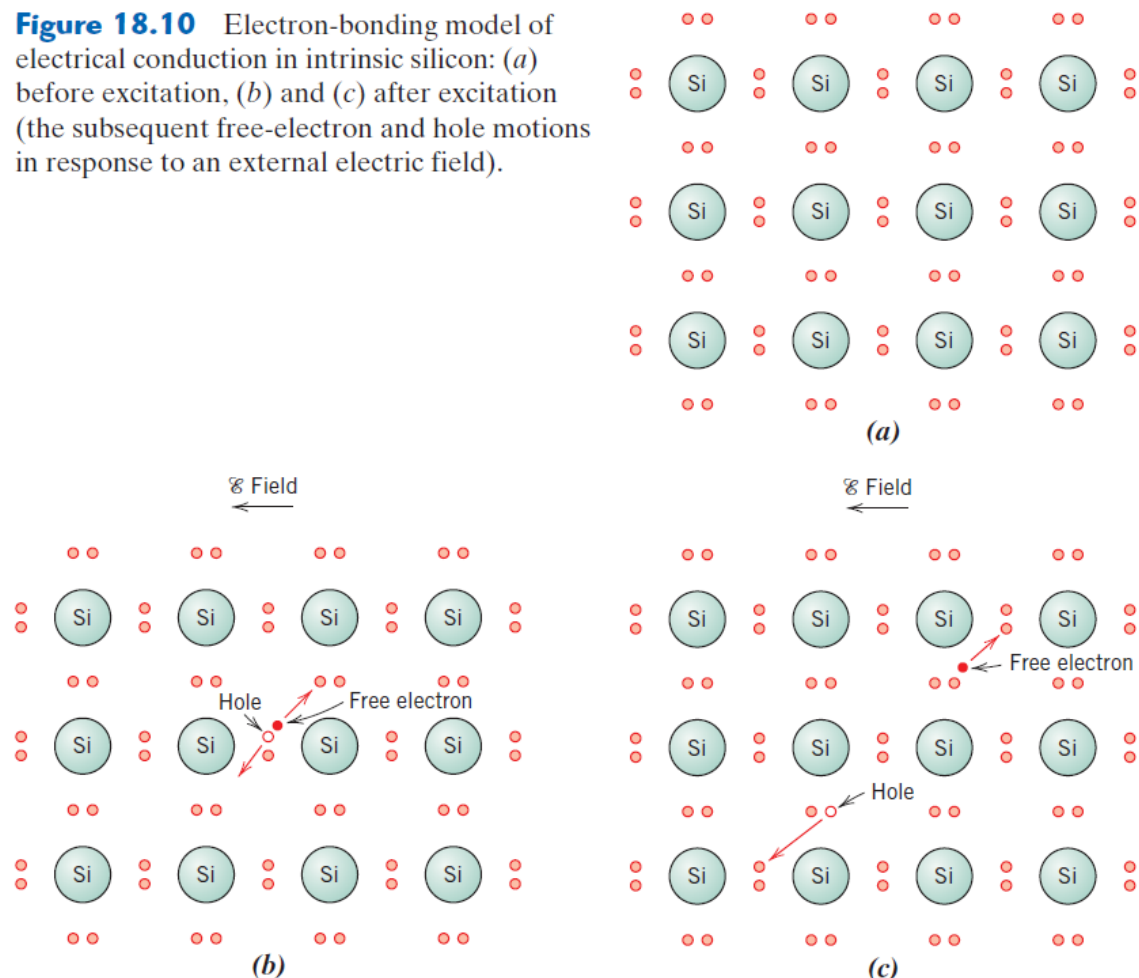
Τελική μορφή

$$\sigma = n_i | e | (\mu_e + \mu_h)$$

Όπου:

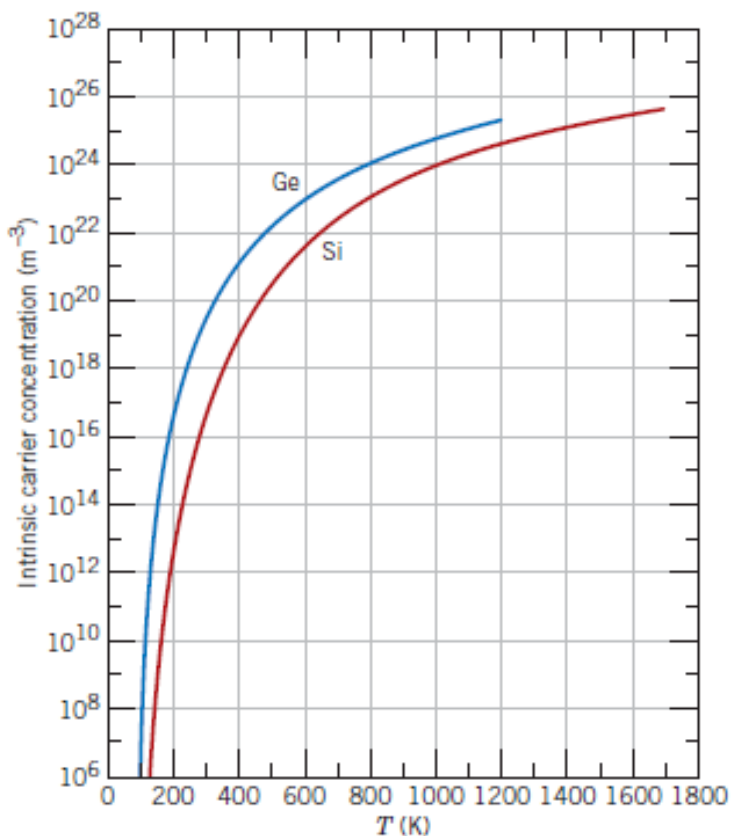
- σ : αγωγιμότητα (**S/m**)
- n : συγκέντρωση ηλεκτρονίων (**$1/m^3$**)
- p : συγκέντρωση οπών (**$1/m^3$**)
- n_i : ενδογενής συγκέντρωση φορέων (**$1/m^3$**)
- e : φορτίο ηλεκτρονίου (**$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$**)
- μ_e : κινητικότητα ηλεκτρονίων (**$m^2/(V \cdot s)$**)
- μ_h : κινητικότητα οπών (**$m^2/(V \cdot s)$**)

Figure 18.10 Electron-bonding model of electrical conduction in intrinsic silicon: (a) before excitation, (b) and (c) after excitation (the subsequent free-electron and hole motions in response to an external electric field).



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

➤ Συγκέντρωση ενδογενών φορέων n_i σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία



Επίδραση θερμοκρασίας

Με αύξηση της θερμοκρασίας:

- αυξάνεται η **θερμική ενέργεια**
- περισσότερα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν: από **valence band** → **conduction band**

δημιουργούνται:

ηλεκτρόνια και οπές

Συμπεριφορά του n_i

Το n_i αυξάνεται **εκθετικά** με τη θερμοκρασία

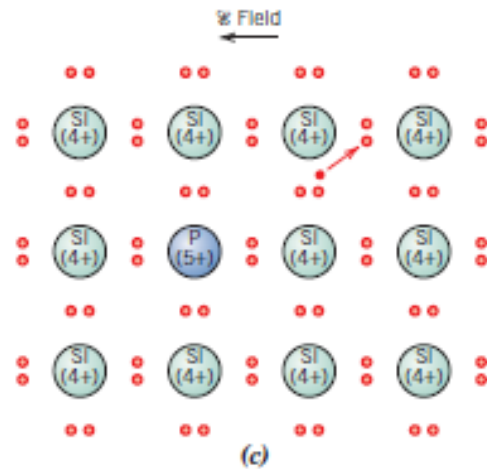
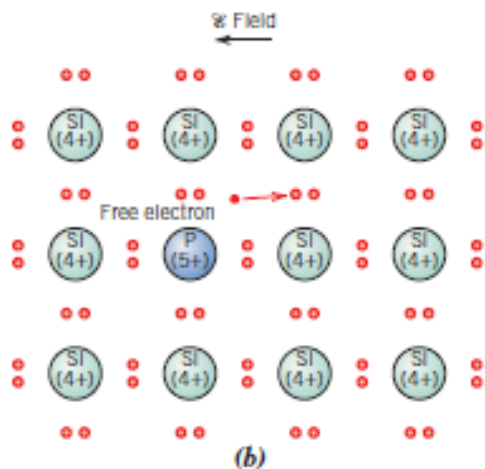
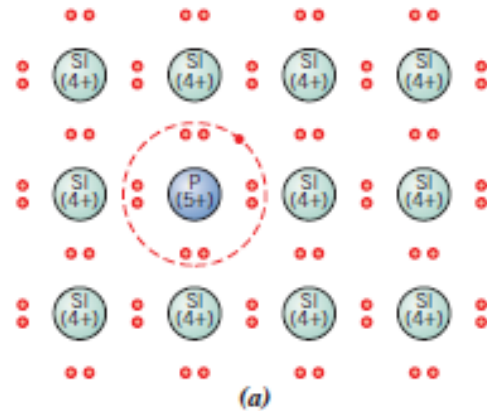
Σύγκριση υλικών

- **Ge > Si** σε ίδια θερμοκρασία λόγω **μικρότερου band gap**

Ειδική Αγωγιμότητα σε Εξωγενείς Ημιαγωγούς τύπου n

Εξωγενείς Ημιαγωγοί τύπου n (n-type)

Figure 18.11 Extrinsic *n*-type semiconduction model (electron bonding). (a) An impurity atom such as phosphorus, having five valence electrons, may substitute for a silicon atom. This results in an extra bonding electron, which is bound to the impurity atom and orbits it. (b) Excitation to form a free electron. (c) The motion of this free electron in response to an electric field.



(a) — Προσθήκη προσμίξεων (donor)

Ένα άτομο P (5 ηλεκτρόνια) αντικαθιστά Si (4 ηλεκτρόνια)
Τα 4 ηλεκτρόνια κάνουν δεσμούς
Το 5 είναι **χαλαρά δεσμευμένο** - δημιουργείται **περίσσιο ηλεκτρόνιο**

(b) Διέγερση

Το επιπλέον ηλεκτρόνιο αποκτά λίγη ενέργεια
φεύγει από το άτομο → γίνεται **free electron**
ΔΕΝ δημιουργείται οπή

(c) Υπό ηλεκτρικό πεδίο

Εφαρμόζεται E
το ηλεκτρόνιο κινείται - συμβάλλει στο ρεύμα
➤ αγωγή κυρίως από ηλεκτρόνια

Ειδική Αγωγιμότητα σε Εξωγενείς Ημιαγωγούς τύπου n

Εξωγενείς Ημιαγωγοί τύπου n (n-type)

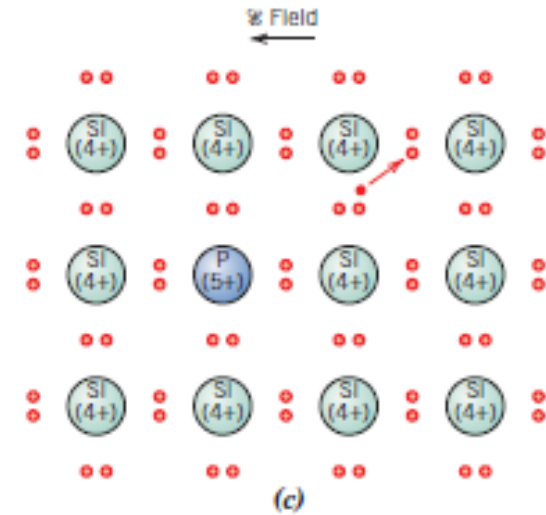
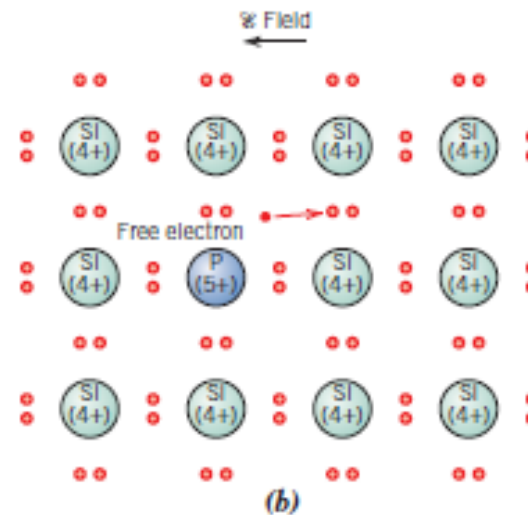
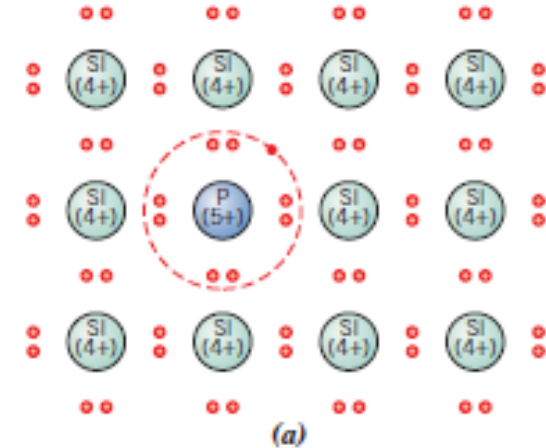
□ Τύπος αγωγιμότητας

$$\sigma = n | e | \mu_e$$

Όπου:

- n : συγκέντρωση ηλεκτρονίων ($1/m^3$)
- e : φορτίο (C)
- μ_e : κινητικότητα ($m^2/V \cdot s$)
- σ : αγωγιμότητα (S/m)

Figure 18.11 Extrinsic n-type semiconductor model (electron bonding). (a) An impurity atom such as phosphorus, having five valence electrons, may substitute for a silicon atom. This results in an extra bonding electron, which is bound to the impurity atom and orbits it. (b) Excitation to form a free electron. (c) The motion of this free electron in response to an electric field.



Ειδική Αγωγιμότητα σε Εξωγενείς Ημιαγωγούς τύπου n

❑ Ρόλος προσμίξεων

Οι προσμίξεις (donors) δημιουργούν:

- ενεργειακό επίπεδο μέσα στο band gap

Πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας (CB)

Διέγερση ηλεκτρονίων

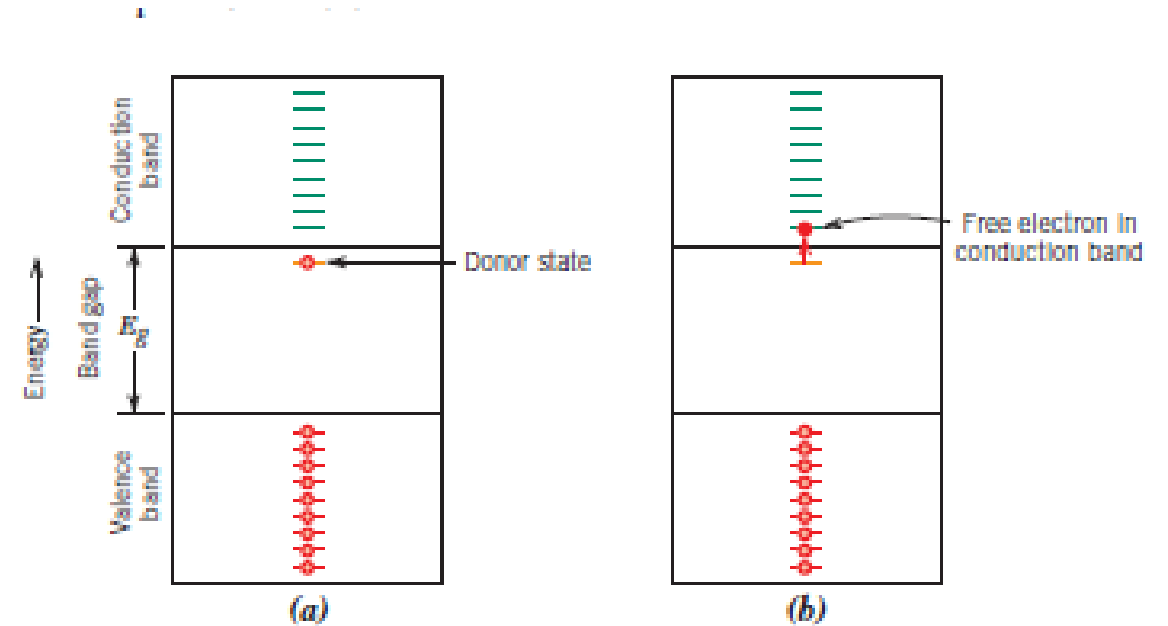
Με μικρή ενέργεια:

Τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από donor επίπεδο → CB
δημιουργούνται **ελεύθερα ηλεκτρόνια**

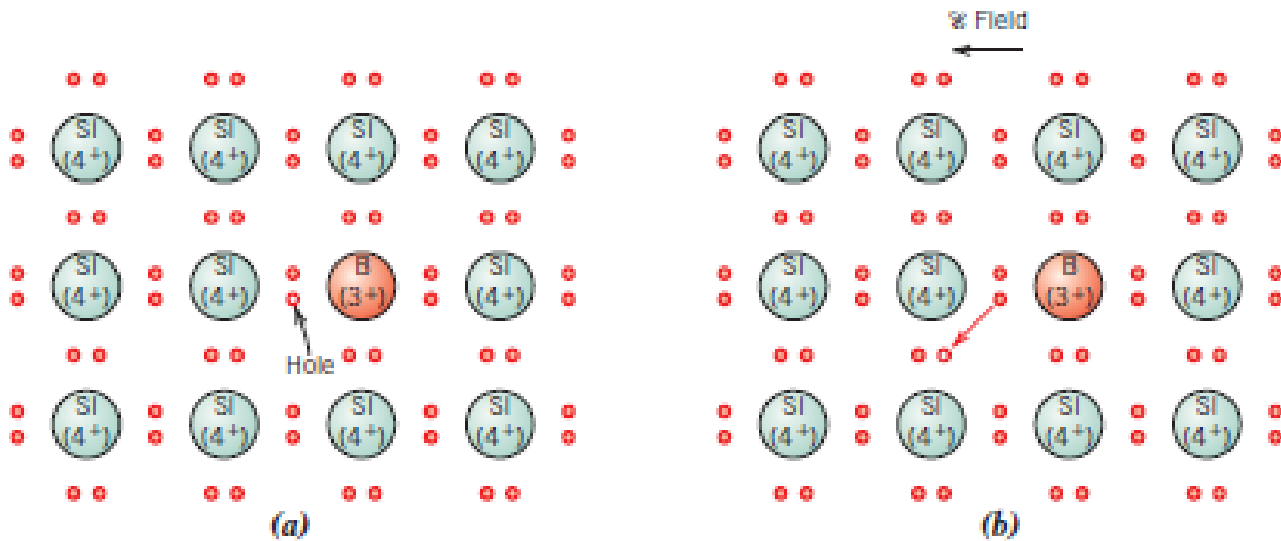
Αποτέλεσμα

Αυξημένη συγκέντρωση ηλεκτρονίων

Υψηλότερη αγωγιμότητα



Ειδική Αγωγιμότητα σε Εξωγενείς Ημιαγωγούς τύπου p



Προσμίξεις αποδέκτη (acceptors)

- Άτομα με **3 ηλεκτρόνια σθένους** (π.χ. B, Al)
 - Αντικαθιστούν άτομα Si
- Δημιουργείται **έλλειψη ηλεκτρονίου** → **οπή (hole)**

Φορείς φορτίου

Κύριοι φορείς: οπές

Μηχανισμός αγωγής

Εφαρμόζεται E

- Ένα ηλεκτρόνιο μετακινείται για να καλύψει την οπή
- Δημιουργείται νέα οπή σε γειτονική θέση

Ειδική Αγωγιμότητα σε Εξωγενείς Ημιαγωγούς τύπου p

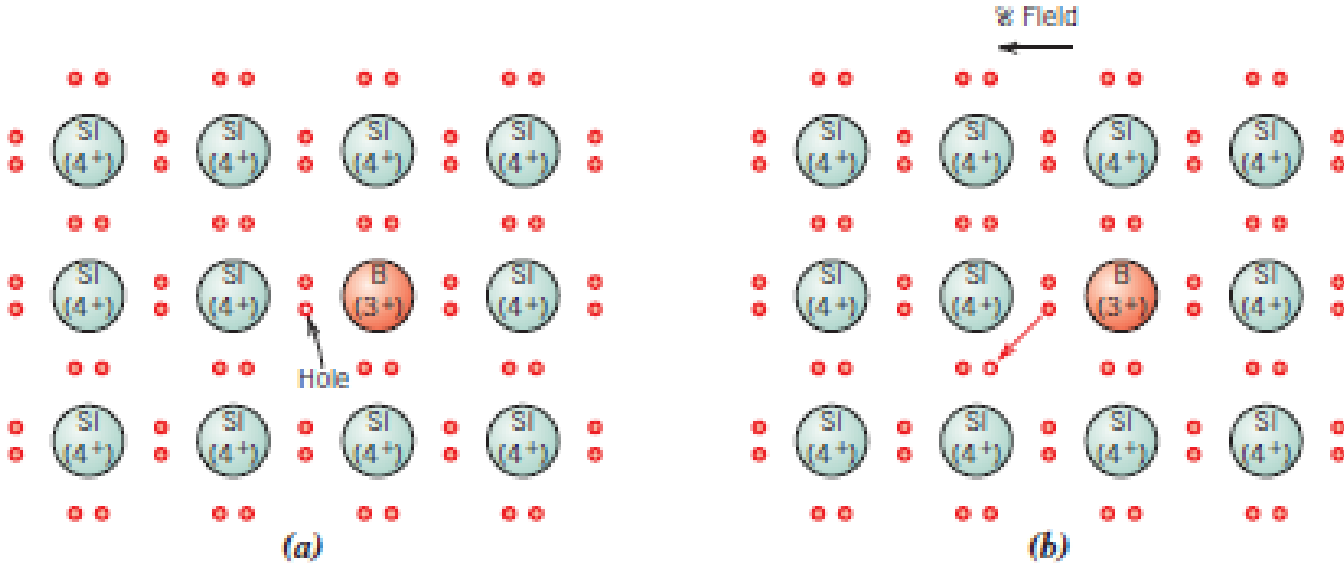
□ Εξωγενείς Ημιαγωγοί Τύπου p

Τύπος

$$\sigma = p | e | \mu_h$$

Όπου:

- p : συγκέντρωση οπών ($1/m^3$)
- μ_h : κινητικότητα οπών ($m^2/V \cdot s$)



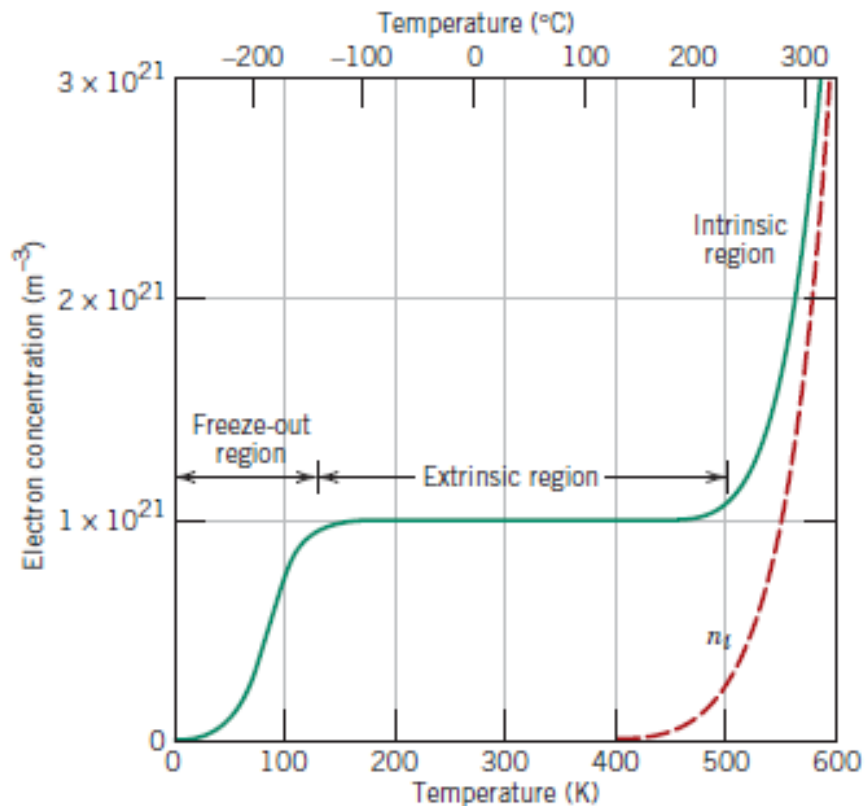
Συγκέντρωση φορέων σε n τύπου Ηιαγωγό συναρτήση της Θερμοκρασίας

Τη συγκέντρωση ηλεκτρονίων (n) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

για έναν **n-type ημιαγωγό (Si με doping)**

• άξονας x → θερμοκρασία T

• άξονας y → συγκέντρωση ηλεκτρονίων ($1/m^3$)



1. Περιοχή κατάψυξης (Freeze-out region) - χαμηλές T

Πολύ χαμηλή θερμοκρασία

τα ηλεκτρόνια είναι δεσμευμένα στα άτομα προσμίξεων δεν έχουν αρκετή θερμική ενέργεια να ελευθερωθούν πολύ μικρή αγωγιμότητα

2. Εξωγενείς περιοχή (Extrinsic region) -ενδιάμεση T

Ενδιάμεση θερμοκρασία

σχεδόν όλα τα donor άτομα έχουν δώσει ηλεκτρόνια

η συγκέντρωση είναι περίπου **σταθερή**

$n = N_D$ (συγκέντρωση προσμίξεων)

Η αγωγιμότητα καθορίζεται από το doping

3. Ενδογενείς περιοχή (Intrinsic region) - υψηλές T

Υψηλή θερμοκρασία

δημιουργούνται πολλοί **ενδογενείς φορείς**

n_i το υλικό συμπεριφέρεται σαν **ενδογενής ημιαγωγός**

Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει την ενδογενή συγκέντρωση φορέων στο καθαρό πυρίτιο.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Να αποδειχθεί ότι οι δύο μορφές του νόμου του Ohm είναι ισοδύναμες:

Μακροσκοπική μορφή:

$$V = IR$$

Μικροσκοπική μορφή:

$$J = \sigma E$$

όπου:

V : τάση (Volt)

I : ένταση ρεύματος (A)

R : αντίσταση (Ω)

J : πυκνότητα ρεύματος (A/m^2)

σ : αγωγιμότητα (S/m)

E : ηλεκτρικό πεδίο (V/m)

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Απάντηση:

$$J = \sigma E \quad (1)$$

Η πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$J = \frac{I}{A}$$

Το ηλεκτρικό πεδίο:

$$E = \frac{V}{l}$$

Άρα αντικατάσταση στην (1)

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{l}$$

$$I = \sigma \frac{A}{l} V$$

Γνωρίζουμε ότι:

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

Άρα:

$$\sigma \frac{A}{l} = \frac{1}{R}$$

Τελική μορφή

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

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

(α) Να υπολογιστεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός κυλινδρικού δοκιμίου πυριτίου με διάμετρο 5.1 mm και μήκος 51 mm το οποίο Διαρρέεται από ρεύμα $I = 0.1 \text{ A}$ κατά τον άξονά του. Η τάση στα άκρα των δύο ακροδεκτών που απέχουν 38 mm μετρήθηκε να είναι 12.5 V .

(α) Να βρεθεί η αγωγιμότητα σ

(β) Υπολογίστε την αντίσταση ολόκληρου του δοκιμίου μήκους 51 mm .

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Απάντηση:

(α) Ισχύει:

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{VA}{Il}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{Il}{VA} = \frac{Il}{V\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

$$\sigma = \frac{(0.1 \text{ A})(38 \times 10^{-3} \text{ m})}{(12.5 \text{ V})(\pi)\left(\frac{5.1 \times 10^{-3} \text{ m}}{2}\right)^2} = 14.9 \text{ } (\Omega\text{-m})^{-1}$$

(β)

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\sigma A} = \frac{l}{\sigma\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} \\ &= \frac{51 \times 10^{-3} \text{ m}}{\left[14.9 \text{ } (\Omega\text{-m})^{-1}\right](\pi)\left(\frac{5.1 \times 10^{-3} \text{ m}}{2}\right)^2} = 168 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Ένα σύρμα αλουμινίου διαμέτρου 4 mm πρέπει να έχει αντίσταση όχι μεγαλύτερη από 2.5 Ω.

Δίνεται ότι για το αλουμίνιο η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι:

$$\sigma = 3.8 \times 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$$

Να υπολογιστεί το μέγιστο μήκος του σύρματος.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Απάντηση:

Η αντίσταση δίνεται από:

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

Άρα

$$L = \frac{RA}{\rho}$$

επειδή $\rho = \frac{1}{\sigma}$:

$$L = R\sigma A$$

Για κυλινδρικό σύρμα:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$A = \pi \left(\frac{4 \times 10^{-3}}{2}\right)^2$$

$$A = 1.256 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Οπότε:

$$L = (2.5\Omega)(3.8 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1})(1.256 \times 10^{-5} \text{ m}^2)$$

$$L = 1194 \text{ m}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Πώς διαφέρει η ηλεκτρονική δομή ενός μεμονωμένου ατόμου από αυτή ενός στερεού υλικού;

Απάντηση:

- Για ένα μεμονωμένο άτομο, υπάρχουν διακριτές ενεργειακές καταστάσεις ηλεκτρονίων (οργανωμένες σε στιβάδες και υποστιβάδες), κάθε κατάσταση μπορεί να καταληφθεί το πολύ από δύο ηλεκτρόνια, τα οποία πρέπει να έχουν αντίθετα spin.
- Αντίθετα, στα στερεά υλικά εμφανίζεται δομή ενεργειακών ζωνών· μέσα σε κάθε ζώνη υπάρχουν ενεργειακές καταστάσεις ηλεκτρονίων που είναι πολύ κοντά μεταξύ τους αλλά παραμένουν διακριτές, καθεμία από τις οποίες μπορεί να καταληφθεί το πολύ από δύο ηλεκτρόνια με αντίθετα spin.
- Ο αριθμός των ενεργειακών καταστάσεων σε κάθε ζώνη είναι ίσος με το συνολικό πλήθος των αντίστοιχων καταστάσεων που συνεισφέρουν όλα τα άτομα του στερεού.

- Στο άτομο, τα ηλεκτρόνια κατανέμονται σε ενεργειακές στάθμες και υποστάθμες, όπως s, p, d και f, όπου κάθε τροχιακό μπορεί να φιλοξενήσει έως δύο ηλεκτρόνια με αντίθετο spin.
- Στο στερεό, οι διακριτές ενεργειακές στάθμες των ατόμων μετατρέπονται σε ενεργειακές ζώνες λόγω της αλληλεπίδρασης πολλών ατόμων.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Σε θερμοκρασία δωματίου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η ευκινησία ηλεκτρονίων για τον χαλκό είναι $6.0 \times 10^7 \text{ } (\Omega \cdot m)^{-1}$ και $0.0030 \text{ } m^2 / (V \cdot s)$ αντίστοιχα.

(α) Να υπολογιστεί ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά κυβικό μέτρο.

(β) Να υπολογιστεί ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά άτομο χαλκού.

Δίνεται: πυκνότητα $\rho_{\text{Cu}} = 8.9 \text{ } g/cm^3$, ατομικό βάρος $\text{Cu} = 63.55 \text{ } g/mol$.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

(α) Αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων

$$n = \frac{\sigma}{|e| \mu_e}$$

$$n = \frac{6.0 \times 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}}{(1.602 \times 10^{-19} C) (0.0030 m^2 / (V \cdot s))}$$

$$n = 1.25 \times 10^{29} m^{-3}$$

(β) Άτομα Cu ανά m^3

$$N_{Cu} = \frac{N_A \rho}{A_{Cu}}$$

$$N_{Cu} = \frac{(6.022 \times 10^{23} atoms/mol) (8.9 g/cm^3) (10^6 cm^3/m^3)}{63.55 g/mol}$$

$$N_{Cu} = 8.43 \times 10^{28} m^{-3}$$

Αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά άτομο Cu

$$\frac{n}{N_{Cu}} = \frac{1.25 \times 10^{29} m^{-3}}{8.43 \times 10^{28} m^{-3}} = 1.48$$

N → 1 ηλεκτρόνιο/άτομο

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

(α) Χρησιμοποιώντας τα παρακάτω δεδομένα, να υπολογιστεί ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά άτομο για ενδογενές Ge και Si σε θερμοκρασία δωματίου (298 K).

(β) Να εξηγηθεί η διαφορά των τιμών.

Δίνονται:

$$n_i(\text{Ge}) = 5 \times 10^{19} \text{ electrons}/\text{m}^3$$

$$n_i(\text{Si}) = 7 \times 10^{16} \text{ electrons}/\text{m}^3$$

$$\rho'_{\text{Ge}} = 5.32 \text{ g}/\text{cm}^3, A_{\text{Ge}} = 72.64 \text{ g}/\text{mol}$$

$$\rho'_{\text{Si}} = 2.33 \text{ g}/\text{cm}^3, A_{\text{Si}} = 28.09 \text{ g}/\text{mol}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

(α) Για Ge

Άτομα ανά m^3

$$N = \frac{N_A \rho'}{A}$$

$$N_{Ge} = \frac{(6.022 \times 10^{23} \text{ atoms/mol})(5.32 \text{ g/cm}^3)(10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3)}{72.64 \text{ g/mol}}$$

$$N_{Ge} = 4.41 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$$

Ηλεκτρόνια ανά άτομο

$$\frac{n_i}{N} = \frac{5 \times 10^{19} \text{ electrons/m}^3}{4.41 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3}$$

$$= 1.13 \times 10^{-9} \text{ electron/atom}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

(α) Για Si

Άτομα ανά m^3

$$N_{Si} = \frac{(6.022 \times 10^{23} \text{ atoms/mol})(2.33 \text{ g/cm}^3)(10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3)}{28.09 \text{ g/mol}}$$
$$N_{Si} = 5.00 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$$

Ηλεκτρόνια ανά άτομο

$$\frac{n_i}{N} = \frac{7 \times 10^{16} \text{ electrons/m}^3}{5.00 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3}$$
$$= 1.40 \times 10^{-12} \text{ electron/atom}$$

(β) Η διαφορά οφείλεται στα μεγέθη των ενεργειακών χασμάτων.

Το ενεργειακό χάσμα σε θερμοκρασία δωματίου για το Si (1.11 eV) είναι μεγαλύτερο από αυτό του Ge (0.67 eV), και, κατά συνέπεια, η πιθανότητα διέγερσης ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους διαμέσου του ενεργειακού χάσματος είναι πολύ μικρότερη για το Si.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Με βάση τη δομή των ενεργειακών ζωνών των ηλεκτρονίων, να συζητηθούν οι λόγοι για τη διαφορά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών.

Λύση

- Για τα μεταλλικά υλικά, υπάρχουν κενές ενεργειακές καταστάσεις ηλεκτρονίων ακριβώς δίπλα στην υψηλότερη κατειλημμένη κατάσταση συνεπώς, απαιτείται πολύ μικρή ενέργεια για να διεγερθεί μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων σε αγωγή καταστάσεις. Τα ηλεκτρόνια αυτά είναι εκείνα που συμμετέχουν στη διαδικασία αγωγής και, επειδή είναι τόσο πολλά, τα μέταλλα είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί.
- Για τους ημιαγωγούς και τους μονωτές δεν υπάρχουν κενές ενεργειακές καταστάσεις ακριβώς δίπλα και πάνω από τις κατειλημμένες, αλλά υπάρχει ένα ενεργειακό χάσμα ζωνών (band gap), το οποίο πρέπει να υπερπηδήσουν τα ηλεκτρόνια για να συμμετάσχουν στη διαδικασία αγωγής. Η θερμική διέγερση ηλεκτρονίων λαμβάνει χώρα, και ο αριθμός των διεγερμένων ηλεκτρονίων είναι μικρότερος σε σχέση με τα μέταλλα και εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα.
- Για τους ημιαγωγούς, το ενεργειακό χάσμα είναι μικρότερο από ό,τι για τους μονωτές· συνεπώς, σε μια δεδομένη θερμοκρασία, περισσότερα ηλεκτρόνια διεγείρονται στους ημιαγωγούς, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

□ p-n επαφή (δίοδος – ανορθωτής)

Επαφή ημιαγωγού **p-type** και **n-type**

Δημιουργείται **ζώνη απογύμνωσης (depletion region)**

Επιτρέπει ροή ρεύματος **μόνο προς μία κατεύθυνση**

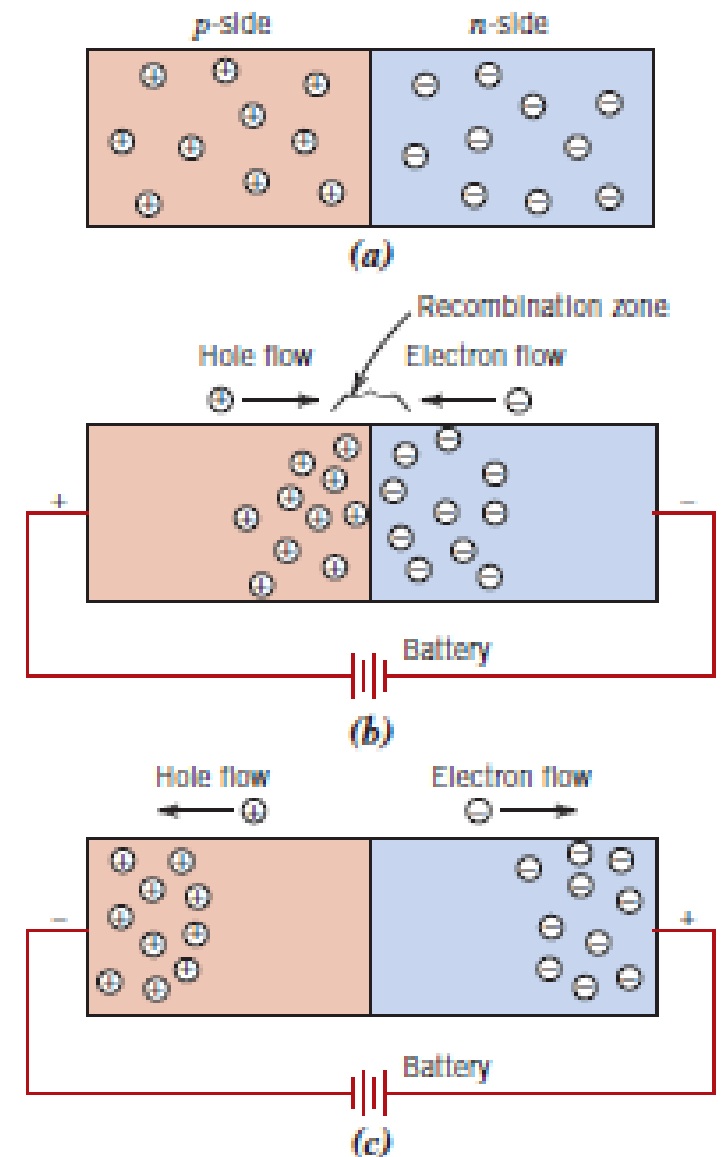
Βασική διάταξη: **δίοδος (rectifier)**

Φορείς φορτίου:

p-περιοχή → **οπές (holes)**

n-περιοχή → **ηλεκτρόνια (electrons)**

Η μπαταρία εφαρμόζει εξωτερική τάση που είτε μειώνει είτε αυξάνει το ενεργειακό φράγμα της επαφής, επιτρέποντας ή εμποδίζοντας τη ροή ρεύματος.



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

p-n επαφή – επαφή ανόρθωσης (δίοδος)

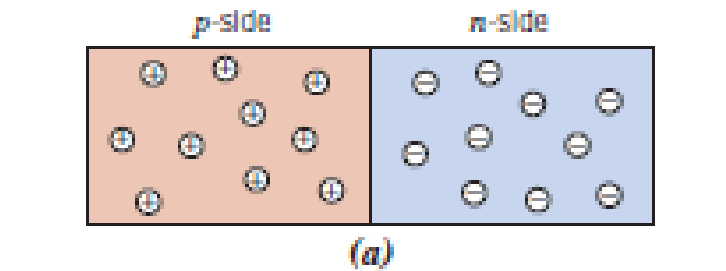
(α) Χωρίς τάση (ισορροπία)

Ηλεκτρόνια και οπές διαχέονται

Γίνεται **επανάσυνδεση (recombination)**

Δημιουργείται **ζώνη απογύμνωσης (depletion region)**

Δεν υπάρχει καθαρό ρεύμα

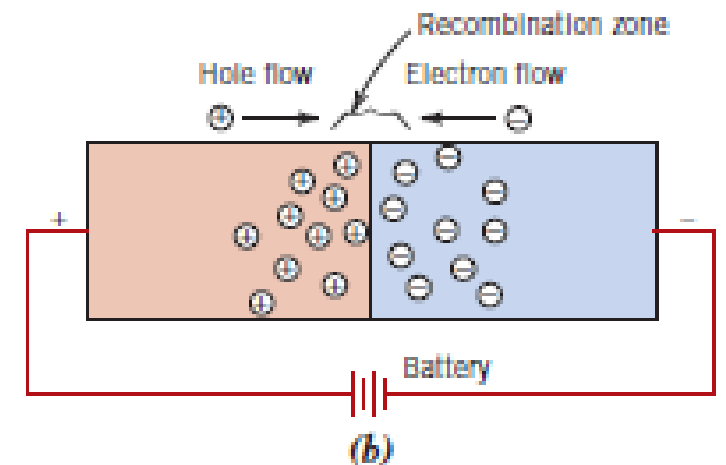


(β) Ορθή πόλωση (forward bias)

Οι φορείς κινούνται προς την επαφή p-n

Το δυναμικό φράγμα **μειώνεται**

Αυξάνεται η επανάσυνδεση όμως συνεχής ροή → ρεύμα



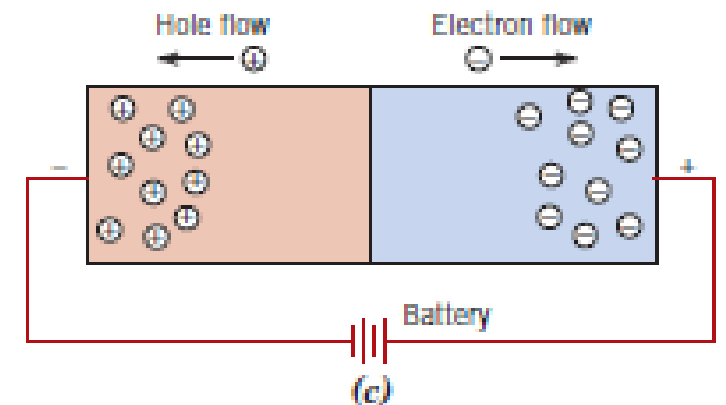
(γ) Ανάστροφη πόλωση (reverse bias)

Οι φορείς απομακρύνονται από την επαφή

Το δυναμικό φράγμα **αυξάνεται**

Η ζώνη απογύμνωσης μεγαλώνει

Ελάχιστο (σχεδόν μηδενικό) ρεύμα



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Καμπύλη I-V διόδου

• Σχέση ρεύματος-τάσης

Ορθή πόλωση (Forward bias)- Δεξιά πλευρά

Θετική τάση (+V)

το ρεύμα αυξάνεται πολύ απότομα

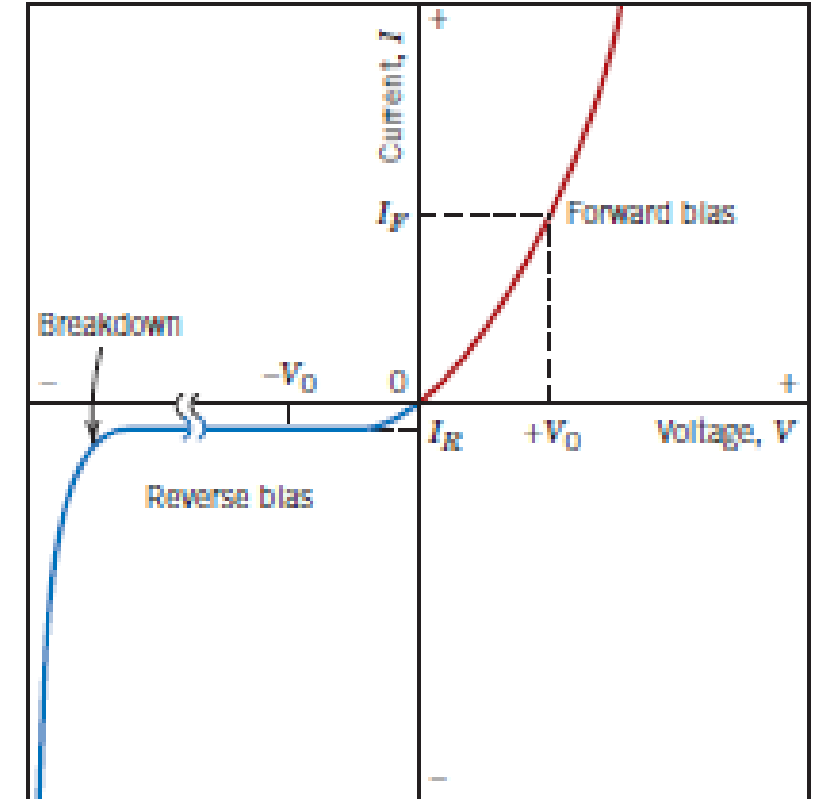
Ανάστροφη πόλωση (Reverse bias)

Αρνητική τάση (-V)

σχεδόν δεν περνά ρεύμα, μόνο πολύ μικρό I_R

Σε υψηλή τάση → κατάρρευση (**breakdown**)

Αν αυξήσεις πολύ την αρνητική τάση ξαφνικά περνά μεγάλο ρεύμα



- I_F → ρεύμα ορθής πόλωσης
- I_R → μικρό ρεύμα ανάστροφης πόλωσης
- V_0 → τάση έναρξης

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Ανόρθωση σήματος – Δίοδος

Η δίοδος μετατρέπει **AC** → **DC**

Επιτρέπει ρεύμα **μόνο σε μία κατεύθυνση**

(a) Είσοδος τάσης

Εναλλασσόμενη τάση (AC)

Εναλλάσσεται:

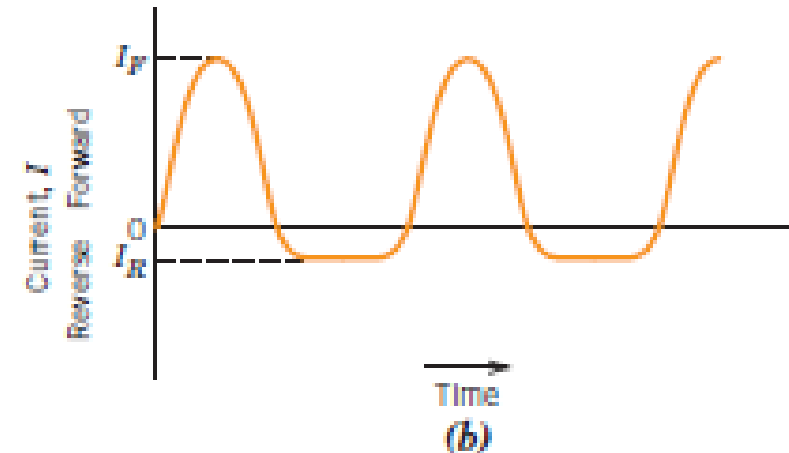
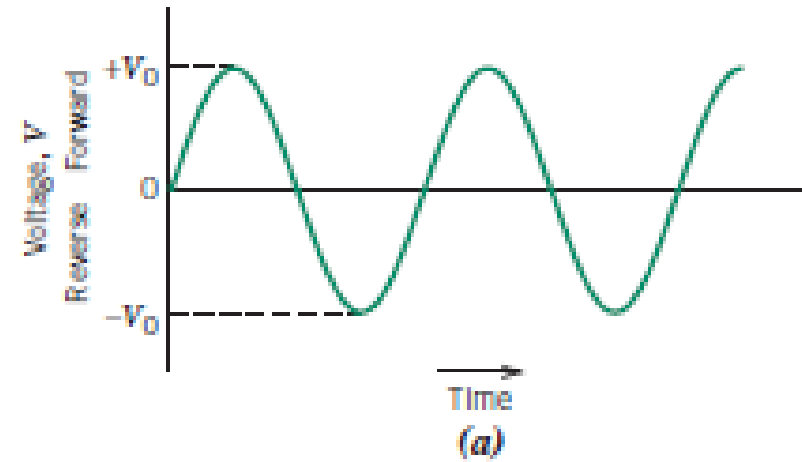
- θετική (+)
- αρνητική (-)

(b) — Ρεύμα εξόδου

όταν η τάση είναι θετική περνά ρεύμα

όταν η τάση είναι αρνητική δεν περνά ρεύμα

Η δίοδος που χρησιμοποιείται στην ανόρθωση είναι μια p-n επαφή, η οποία επιτρέπει τη ροή ρεύματος στην ορθή πόλωση και την εμποδίζει στην ανάστροφη.



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

□ Το τρανζίστορ είναι μια **ημιαγώγιμη διάταξη** που:

- ενισχύει σήματα
- λειτουργεί ως διακόπτης

Χρησιμοποιείται

ηλεκτρονικά κυκλώματα

υπολογιστές

αποθήκευση & επεξεργασία δεδομένων

Κύριες λειτουργίες

1. Ενίσχυση (amplification)

μικρό σήμα → μεγάλο σήμα

2. Διακοπή (switching)

ON / OFF λειτουργία

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Τρανζίστορ (Bipolar Junction Transistor-BJT)

Δομή p-n-p

3 περιοχές:

- Εκπομπός p - δίνει φορείς
- Βάση n - λεπτή βάση
- Συλλέκτης p - συλλέγει φορείς

Λειτουργία

- Ενίσχυση σήματος
- Μικρό σήμα → μεγάλο σήμα

Έχεις 2 τάσεις:

Είσοδος (input voltage)

- μικρό σήμα στη βάση

Τροφοδοσία (μπαταρίες)

- δημιουργούν σωστή πόλωση

Από τον εκπομπό:

εισέρχονται οπές στη βάση
περνούν σχεδόν όλες στον συλλέκτη
Γιατί η βάση είναι πολύ λεπτή

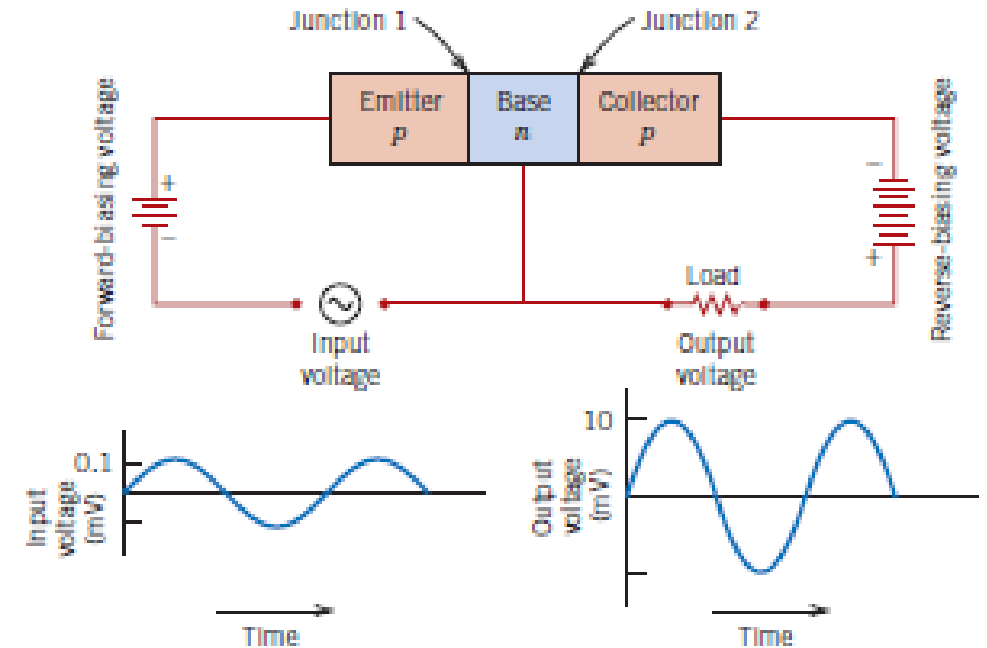


Figure 18.23 Schematic diagram of a $p-n-p$ junction transistor and its associated circuitry, including input and output voltage-time characteristics showing voltage amplification.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Διηλεκτρικά υλικά

Διηλεκτρικό = **μονωτικό υλικό**

Δεν άγει ρεύμα

Περιέχει **δίπολα** (θετικά–αρνητικά φορτία)

Όταν εφαρμόζεται τάση:

Δημιουργείται **ηλεκτρικό πεδίο**

Τα φορτία μέσα στο υλικό:

μετατοπίζονται ελαφρά

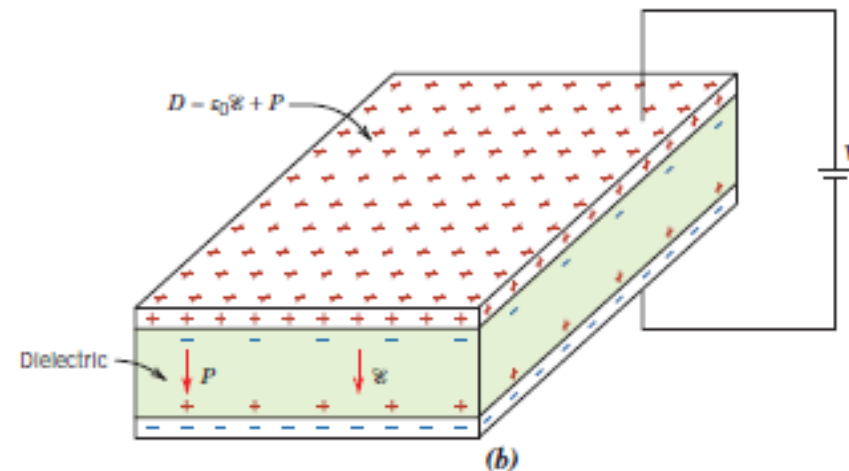
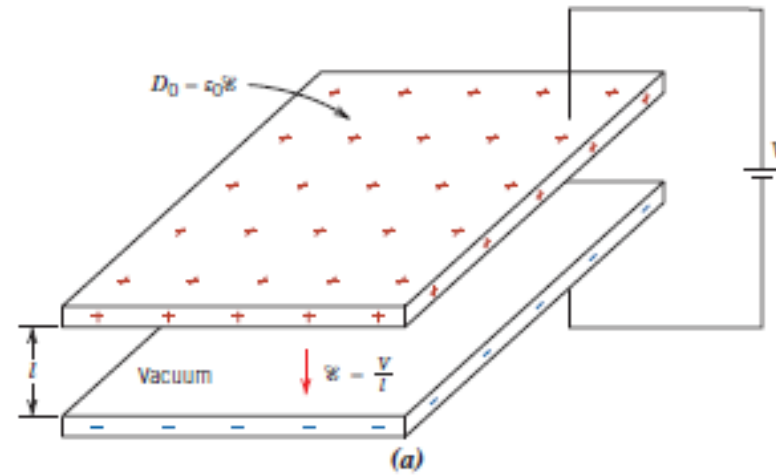
προσανατολίζονται

Το φαινόμενο αυτό λέγεται **πόλωση (polarization)**

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Πυκνωτής (Capacitor)

- Αποτελείται από 2 μεταλλικές πλάκες
- Ανάμεσα υπάρχει:
 - αέρας ή
 - διηλεκτρικό υλικό
- Αποθηκεύει φορτίο / ενέργεια



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

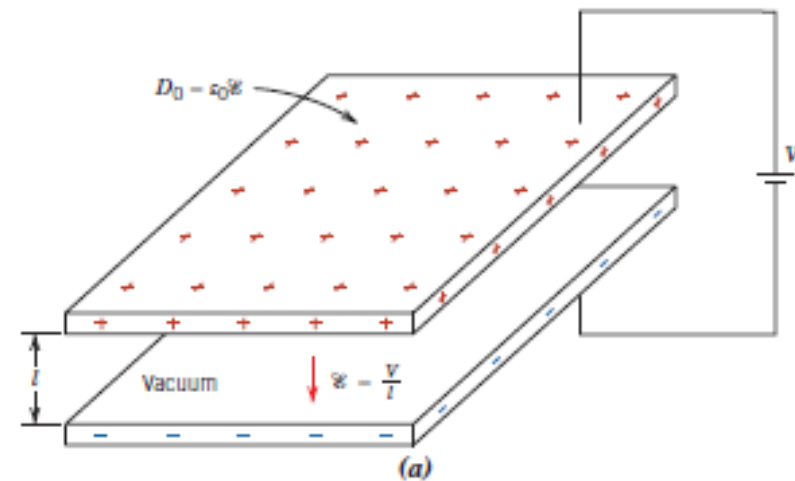
(a) Χωρίς διηλεκτρικό

Ανάμεσα στις πλάκες: **κενό (vacuum)**

Εφαρμόζεται τάση \rightarrow δημιουργείται **ηλεκτρικό πεδίο**

Αποτέλεσμα:

- αποθήκευση φορτίου στις πλάκες
- **μικρή χωρητικότητα**



(b) Με διηλεκτρικό

Τοποθετείται **διηλεκτρικό υλικό** ανάμεσα στις πλάκες

Το υλικό **πολώνεται** (τα φορτία μετατοπίζονται)

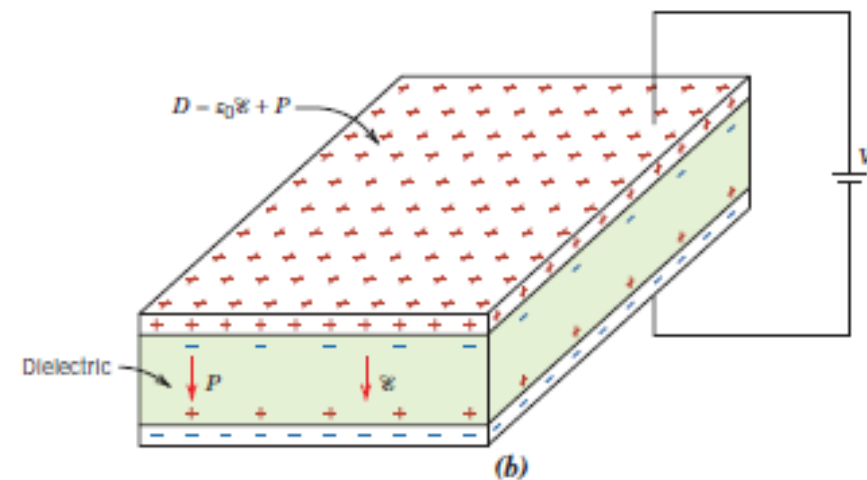
Στην επιφάνεια του διηλεκτρικού:

κοντά στην **+ πλάκα** \rightarrow εμφανίζεται **- φορτίο**

κοντά στην **- πλάκα** \rightarrow εμφανίζεται **+ φορτίο**

μειώνεται το εσωτερικό πεδίο

- **Αποτέλεσμα: αποθηκεύεται περισσότερο φορτίο \rightarrow μεγαλύτερη χωρητικότητα**



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Χωρητικότητα (capacitance)

$$C = \frac{Q}{V}$$

όπου:

- **C**: χωρητικότητα (Farad, F)
- **Q**: φορτίο (Coulomb, C)
- **V**: τάση (Volt, V)

Πυκνωτής παράλληλων πλακών

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{l}$$

όπου:

- **ϵ_0** : διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά κενού (F/m)
- **A**: εμβαδό πλακών (m^2)
- **l**: απόσταση (m)

Με διηλεκτρικό

$$C = \epsilon \frac{A}{l}$$

όπου:

- **ϵ** = διηλεκτρική σταθερά
- **l**: απόσταση (m)

Σχετική διηλεκτρική σταθερά

- χωρίς μονάδες
- Λέει πόσο καλύτερο είναι το υλικό από το κενό

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

ϵ_0 (epsilon zero) - διηλεκτρική σταθερά του κενού:

$$8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Διανύσματα πεδίου & Πόλωση

Ηλεκτρικό πεδίο (E) και φορτία

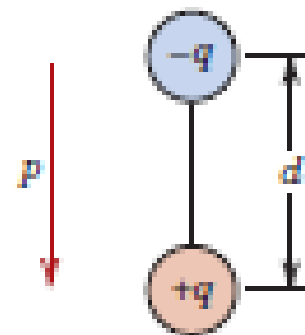
Σε ηλεκτρικό πεδίο, ένα φορτίο δέχεται δύναμη:

(+): προς τη φορά του πεδίου

(-): αντίθετα από το πεδίο

Προκύπτει **διαχωρισμός φορτίων**

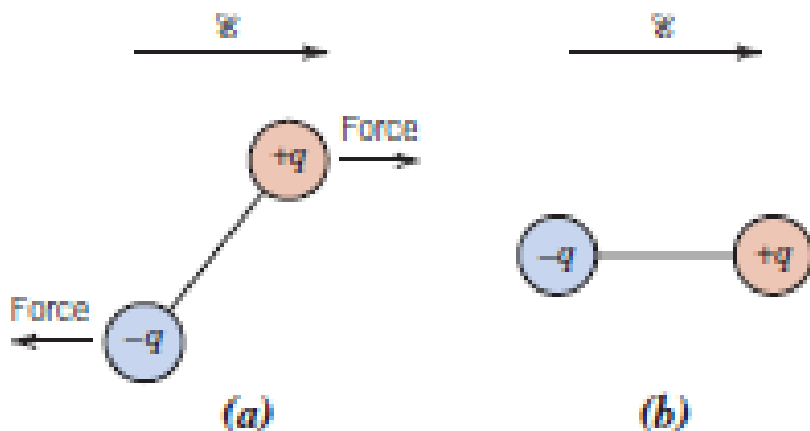
δημιουργείται **δίπολο (+ / -)**



Διπολική ροπή (dipole)

Περιγράφει τον διαχωρισμό φορτίων μέσα στο υλικό

Όσο μεγαλύτερος ο διαχωρισμός \rightarrow τόσο ισχυρότερη πόλωση



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Πόλωση (Polarization)

Σε διηλεκτρικό υλικό, τα φορτία:

- δεν κινούνται ελεύθερα
- αλλά μετατοπίζονται ελαφρά

• Δημιουργούνται εσωτερικά + και -
δηλαδή πόλωση (**P**)

Ηλεκτρική μετατόπιση (**D**)

Ορισμός:

$$D = \frac{Q}{A}$$

Με διηλεκτρικό

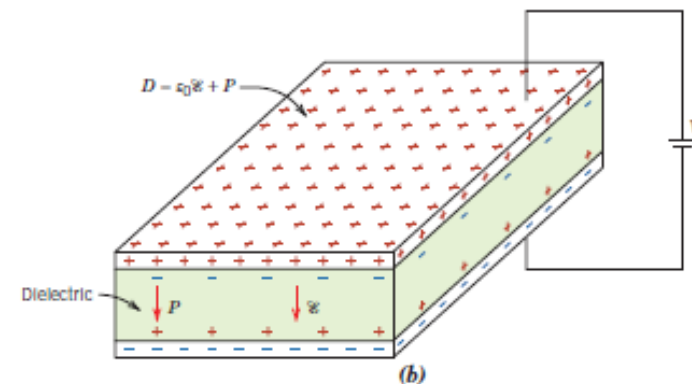
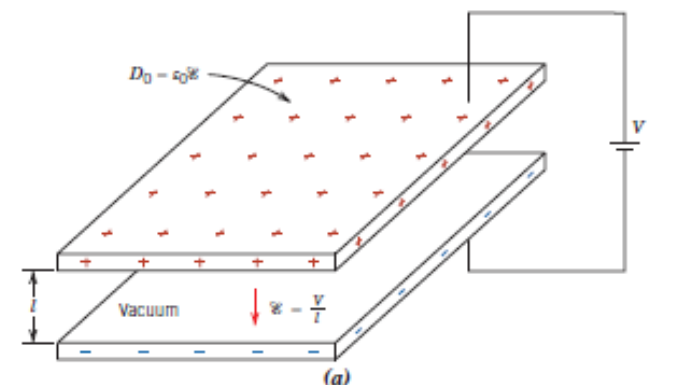
$$D = E\epsilon$$

χωρίς διηλεκτρικό (στο κενό)

$$D_0 = \epsilon_0 E$$

Σχέση με πόλωση

$$D = \epsilon_0 E + P$$



Πόλωση και υλικό

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E$$

• όσο μεγαλύτερο ϵ_r τόσο μεγαλύτερη πόλωση

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Σιδηροηλεκτρικά υλικά (Ferroelectrics)

- Ειδική κατηγορία διηλεκτρικών
- Εμφανίζουν **αυθόρμητη πόλωση** (χωρίς εξωτερικό πεδίο) υπάρχει **μόνιμη διπολική ροπή**

Τα ιόντα **δεν είναι συμμετρικά τοποθετημένα**

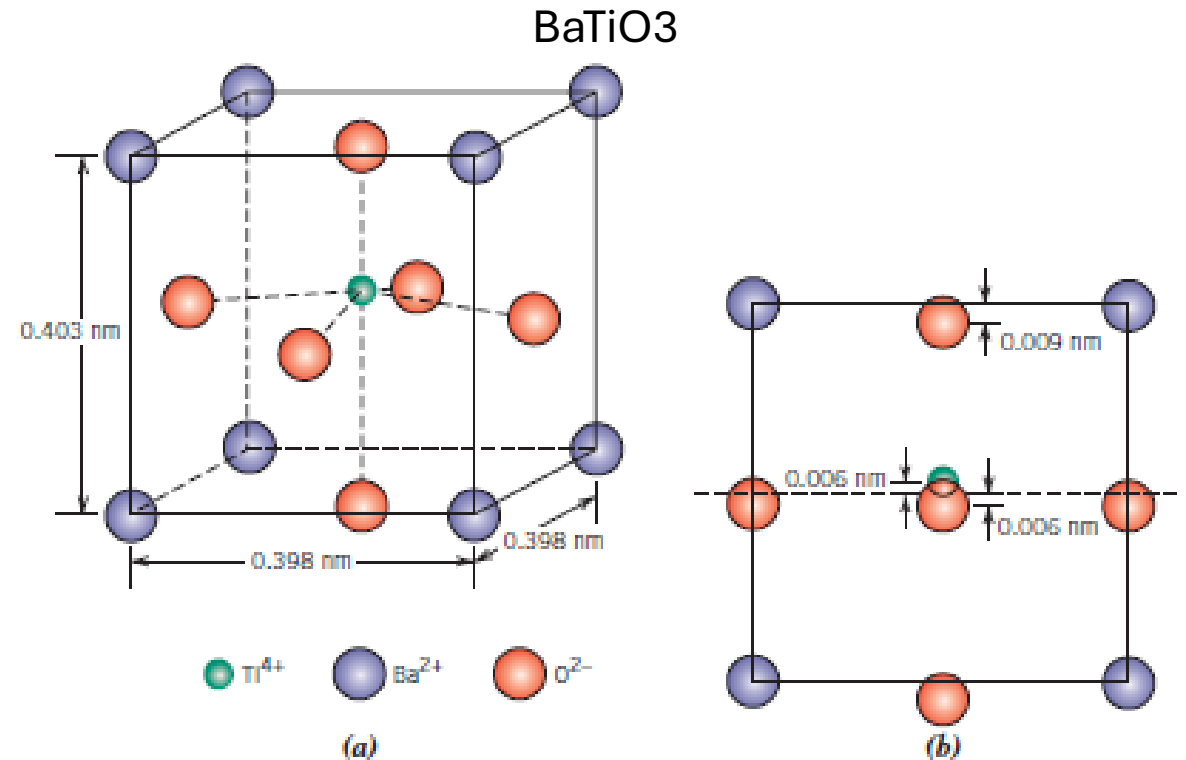
Μετατοπίζονται μέσα στο πλέγμα

Δημιουργείται **δίπολο σε κάθε κυψελίδα**

Όταν τα δίπολα είναι τυχαία προσανατολισμένα, η συνολική πόλωση είναι μηδενική. Όταν όμως ευθυγραμμιστούν, τα αποτελέσματά τους προστίθενται και προκύπτει μακροσκοπική πόλωση.

Παράδειγμα: BaTiO₃

- Το **Ti⁴⁺** δεν βρίσκεται στο κέντρο
- μετατοπίζεται ελαφρά
- δημιουργείται **διπολική ροπή στην κυψελίδα**



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Θερμοκρασία (Curie temperature)

Σε χαμηλή θερμοκρασία ($T < T_C$)

✓ υπάρχει πόλωση

✓ Σιδηροηλεκτρική συμπεριφορά

Σε υψηλή θερμοκρασία ($T > T_C$)

χάνεται η πόλωση

το υλικό γίνεται κανονικό διηλεκτρικό

Χαρακτηριστικά

πολύ μεγάλη διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r)

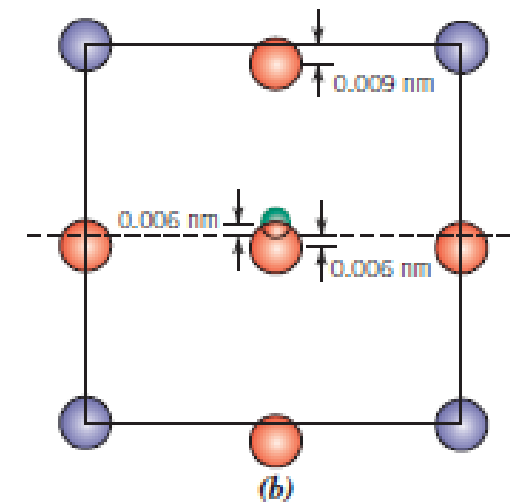
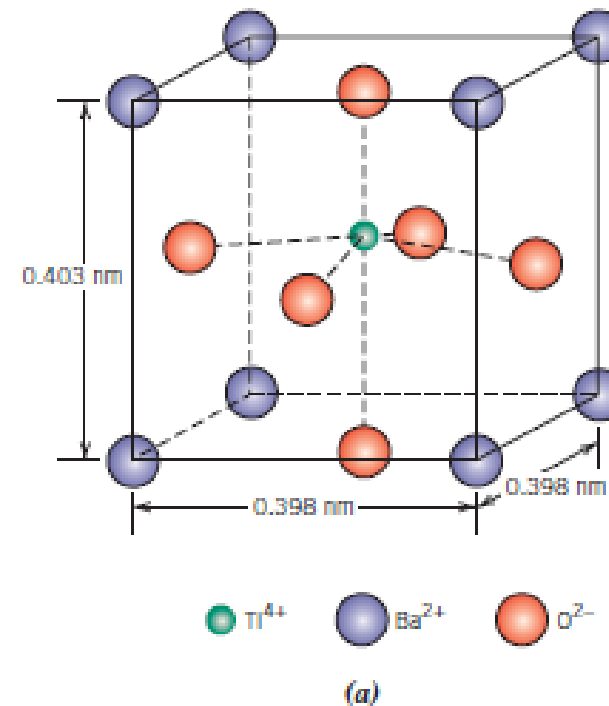
ισχυρή απόκριση σε πεδίο

Εφαρμογές

• πυκνωτές υψηλής απόδοσης

• αισθητήρες

• μνήμες



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Πιεζοηλεκτρικά υλικά (Piezoelectricity)

Υλικά (κυρίως κεραμικά) που:
μετατρέπουν **μηχανική πίεση** → **ηλεκτρικό σήμα**

Όταν ασκηθεί δύναμη:

Παραμορφώνεται το πλέγμα

Μετατοπίζονται τα φορτία

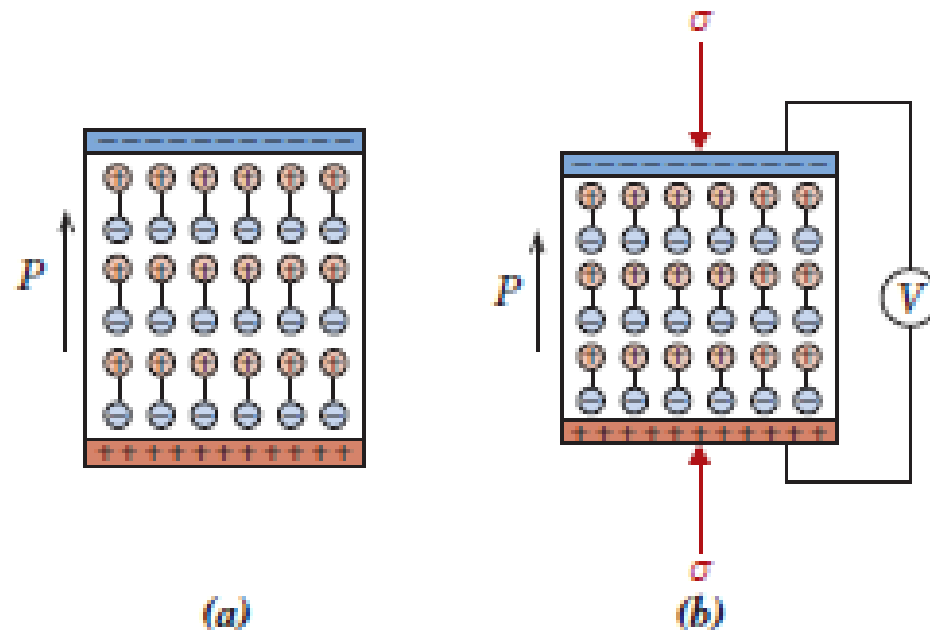
Δημιουργείται **πόλωση**

Εμφανίζεται **τάση**

Αντίστροφα

Αν εφαρμόσω τάση δημιουργείται πόλωση

το υλικό **παραμορφώνεται**



➤ Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν μηχανική πίεση σε ηλεκτρική τάση και αντίστροφα.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Μηχανισμός πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

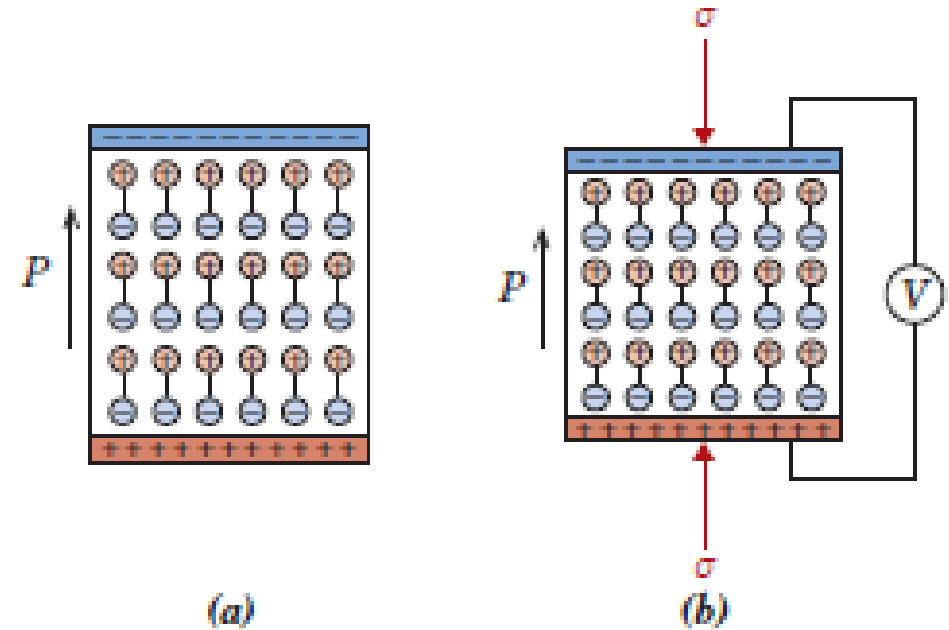
(α) Χωρίς πίεση

Τα φορτία είναι **συμμετρικά κατανεμημένα**
Δεν υπάρχει καθαρή πόλωση
Δεν εμφανίζεται τάση

(β) Με πίεση

- Το πλέγμα **παραμορφώνεται**
- Τα ιόντα **μετατοπίζονται**

Δημιουργείται **διαχωρισμός φορτίων (+ / -)**
Εμφανίζεται **πόλωση**
Μετράμε **τάση**



Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Να υπολογιστεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου, το οποίο είναι εμπλουτιστεί με $5 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ άτομα Βορίου.

Δίνεται κινητικότητα οπών $\mu_h = 0.028 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

Απάντηση:

Το **Si (πυρίτιο)** είναι στην **ομάδα 14** → έχει **4 ηλεκτρόνια σθένους**

Το **B (βόριο)** είναι στην **ομάδα 13** → έχει **3 ηλεκτρόνια σθένους**

Όταν το B μπει στο Si:

το Si θέλει 4 δεσμούς

το B μπορεί να κάνει μόνο 3

Άρα λείπει ένα ηλεκτρόνιο δημιουργείται **οπή (hole)** οπότε το **Βόριο** αποδέκτης (acceptor) δίνει p-type

άρα

$$\begin{aligned}\sigma &= p \cdot e \cdot \mu_h \\ \sigma &= (5 \times 10^{22})(1.602 \times 10^{-19})(0.028) \\ \sigma &= 224 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}\end{aligned}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Η απόσταση των οπλισμών ενός πυκνωτή με επίπεδους και παράλληλους οπλισμούς, στον οποίο έχει τοποθετηθεί διηλεκτρικό υλικό με διηλεκτρική σταθερά ϵ_r ίση με 2.5, είναι 1 mm. Εάν χρησιμοποιηθεί ένα άλλο υλικό με διηλεκτρική σταθερά 4.0, ποια πρέπει να είναι η απόσταση των οπλισμών ώστε η χωρητικότητα να παραμείνει αμετάβλητη?

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Απάντηση:

Ισχύει: $C = \varepsilon \frac{A}{l}$

Για πυκνωτή με διηλεκτρικό:

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{l}$$

Ίδια χωρητικότητα

$$C_1 = C_2$$

Άρα:

$$\frac{\varepsilon_{r1} \varepsilon_0 A}{l_1} = \frac{\varepsilon_{r2} \varepsilon_0 A}{l_2}$$

Λύνω ως προς d_2

$$d_2 = \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} \cdot d_1$$

$$d_2 = 1.6 \text{ mm}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Να θεωρηθεί ένας πυκνωτής παράλληλων πλακών που έχει εμβαδό 2500 mm^2 και απόσταση μεταξύ των πλακών 2 mm , και ένα υλικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά 4.0 τοποθετημένο μεταξύ των πλακών.

(α) Ποια είναι η χωρητικότητα αυτού του πυκνωτή;

(β) Να υπολογιστεί το ηλεκτρικό πεδίο που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να αποθηκευτεί φορτίο $8.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ σε κάθε πλάκα.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Απάντηση:

(α) Χωρητικότητα

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

$$C = \frac{(4.0)(8.85 \times 10^{-12})(2.5 \times 10^{-3})}{2 \times 10^{-3}}$$

$$C = 4.43 \times 10^{-11} \text{ F}$$

(β) Ηλεκτρικό πεδίο

Τάση

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$V = \frac{8 \times 10^{-9}}{4.43 \times 10^{-11}} = 181 \text{ V}$$

Ηλεκτρικό πεδίο

$$E = \frac{V}{d}$$
$$E = \frac{181}{2 \times 10^{-3}} = 9.1 \times 10^4 \text{ V/m}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Να εξηγήσετε τον μηχανισμό με τον οποίο η ικανότητα αποθήκευσης φορτίου αυξάνεται όταν εισάγεται ένα διηλεκτρικό υλικό μεταξύ των πλακών ενός πυκνωτή.

Απάντηση:

Όταν εισάγεται διηλεκτρικό υλικό στον πυκνωτή, τα φορτία του υλικού μετατοπίζονται ελαφρά λόγω του ηλεκτρικού πεδίου και δημιουργείται πόλωση. Η πόλωση αυτή προκαλεί την εμφάνιση επαγόμενων φορτίων στις επιφάνειες του διηλεκτρικού, τα οποία δημιουργούν ένα αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο.

Το αντίθετο αυτό πεδίο μειώνει το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των πλακών. Έτσι, για την ίδια εφαρμοζόμενη τάση, ο πυκνωτής μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερο φορτίο. Συνεπώς, η χωρητικότητα αυξάνεται.

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Η πόλωση P ενός διηλεκτρικού υλικού μέσα σε πυκνωτή παράλληλων πλακών είναι $1.0 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$.

(α) Ποια πρέπει να είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r αν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο $5 \times 10^4 \text{ V/m}$

(β) Ποια είναι η ηλεκτρική μετατόπιση D ;

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

(α) Υπολογισμός ϵ_r

$$P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E$$

Άρα

$$\epsilon_r = \frac{P}{\epsilon_0 E} + 1$$

$$\epsilon_r = \frac{1.0 \times 10^{-6}}{(8.85 \times 10^{-12})(5 \times 10^4)} + 1$$

$$\epsilon_r = 3.26$$

(β) Υπολογισμός D

$$D = \epsilon_0 E + P$$

$$D = (8.85 \times 10^{-12})(5 \times 10^4) + 1.0 \times 10^{-6}$$

$$D = 1.44 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Άσκηση:

Ένα φορτίο $3.5 \times 10^{-11} \text{ C}$ πρέπει να αποθηκευτεί σε κάθε οπλισμό πυκνωτή με επίπεδους και παράλληλους οπλισμούς εμβαδού 160 mm^2 που απέχουν 3.5 mm

(α) Ποια τάση απαιτείται αν τοποθετηθεί διηλεκτρικό υλικό με διηλεκτρική σταθερά 5.0;

(β) Ποια τάση απαιτείται αν χρησιμοποιηθεί κενό;

(γ) Ποιες είναι οι χωρητικότητες για τις περιπτώσεις (α) και (β);

(δ) Να υπολογιστεί η ηλεκτρική μετατόπιση D για την περίπτωση (α);

(ε) Να υπολογιστεί η πόλωση P για την περίπτωση (α);

Δίνεται $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

(α) Χωρητικότητα με διηλεκτρικό:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

$$C = \frac{5(8.85 \times 10^{-12})(1.6 \times 10^{-4})}{3.5 \times 10^{-3}}$$

$$C = 2.02 \times 10^{-12} \text{ F}$$

Χωρητικότητα χωρίς διηλεκτρικό:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

$$C_0 = 4.04 \times 10^{-13} \text{ F}$$

Τάση με διηλεκτρικό

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$V = \frac{3.5 \times 10^{-11}}{2.02 \times 10^{-12}} = 17.3 \text{ V}$$

(β) Τάση χωρίς διηλεκτρικό

$$V_0 = \frac{Q}{C_0}$$

$$V_0 = \frac{3.5 \times 10^{-11}}{4.04 \times 10^{-13}} = 86.6 \text{ V}$$

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

(δ) Ηλεκτρική μετατόπιση D

$$D = \frac{Q}{A}$$

$$D = \frac{3.5 \times 10^{-11}}{1.6 \times 10^{-4}} = 2.19 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$$

$$P = 1.75 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$$

(ε) Πόλωση P

$$D = \epsilon_0 E + P$$

Βρίσκω E :

$$E = \frac{V}{d} = \frac{17.3}{3.5 \times 10^{-3}} = 4.94 \times 10^3 \text{ V/m}$$

$$P = D - \epsilon_0 E$$

$$P = 2.19 \times 10^{-7} - (8.85 \times 10^{-12})(4.94 \times 10^3)$$

Figures adapted from:

Materials Science and Engineering: An Introduction (W. D. Callister Jr. & D. Rethwisch),
10th ed., Chapter 18.