



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Προπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Τμήματος ΗΜΜΥ  
Ακαδ. Έτος 2023-2024

## ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΥΛΙΚΩΝ

### Διάλεξη 8 : Ημιαγωγικά Υλικά

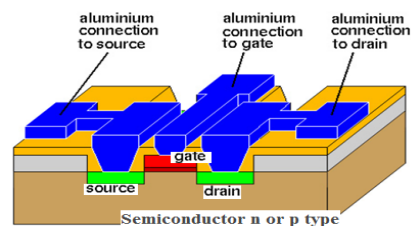
1

#### Σπουδαιότητα των ημιαγωγών

- Βιομηχανία ημιαγωγών: Πάνω από 95% των ηλεκτρονικών διατάξεων (διοδοί, τρανζίστορ, θυρίστορ) και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (π.χ. μικροεπεξεργαστές, μνήμες), βασίζονται στην τεχνολογία πυριτίου **Si**
- Ημιαγωγοί **Ge**, **GaAs** για ειδικές εφαρμογές: διοδοί LED, ηλεκτρονικά υψηλής ταχύτητας.
- Η πιο σημαντική διάταξη είναι το τρανζίστορ MOSFET

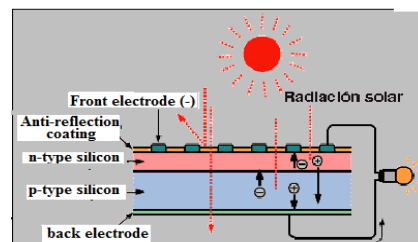
#### Τρανζίστορ MOSFET

Υλικά : ημιαγωγικά Si, Ge, GaAs, GaN, ...  
διηλεκτρικά για τη μόνωση της πύλης  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ...  
μέταλλα για τις μεταλλικές διασυνδέσεις, Cu, Al, Au...



#### Εφαρμογές στην ενέργεια

Φωτοβολταϊκό στοιχείο ή ηλιακή κυψελίδα: διάταξη (επαφή pn) που μετατρέπει απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική.  
φ/β ενέργεια: Ανανεώσιμη πηγή ενέργειας  
Λύση στην ενεργειακή και περιβαλλοντική κρίση. Αξιοπιστία και αντοχή, μηδενική περιβαλλοντική επίδραση



2

**Συνήθειες ημιαγωγοί**

**Periodic Table of the Elements**

Ημιαγωγικά στοιχεία: C, Si, Ge, Sn  
 Ημιαγωγικές ενώσεις III – V: GaAs, InP, InGaAs  
 Ημιαγωγικές ενώσεις II – VI :CdS, ZnS, CdSe

3

**Αγωγιμότητα σε ημιαγωγούς**

Το μοντέλο των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα μέταλλα δεν μπορεί να εφαρμοστεί στους ημιαγωγούς και μονωτές. Υπάρχει διαφορετικός μηχανισμός αγωγιμότητας στους ημιαγωγούς.

Αγωγός

(α)

Αγωγός (χαμηλές θερμοκρασίες)

(β)

Ημιαγωγός

(γ)

(α) και (β) :Ειδική αντίσταση  $\rho$  συναρτήσει της θερμοκρασίας μεταλλικού αγωγού. Για  $T > 100\text{K}$ , γραμμική αύξηση της  $\rho$  αυξανόμενης της  $T$ . Για  $T < 20\text{K}$  η ειδική αντίσταση είναι σχεδόν σταθερή και (β): καθώς  $T \rightarrow 0$  η  $\rho$  είναι ίση με την παραμένουσα ειδική αντίσταση  $\rho_0 = \rho_{\text{impurities}}$ . (γ) Ειδική αντίσταση ημιαγωγού συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η  $\rho$  αυξάνει δραματικά καθώς  $T \rightarrow 0$ .

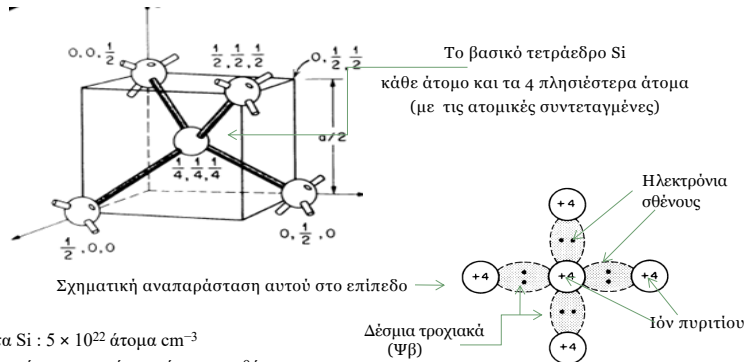
Η θεωρία των ενεργειακών ζωνών ερμηνεύει την αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς και μονωτές

4

**Αμιγείς ή ενδογενείς (intrinsic) ημιαγωγοί** (δηλ. δίχως προσμίξεις και πλεγματικές ατέλειες)

**Ο κρύσταλλος πυριτίου Si (ή γερμανίου Ge) :**

- Ηλεκτρονική δομή ατόμου Si:  $[1s^2 2s^2 2p^6] 3s^2 3p^2$
- Στο στερεό Si κάθε άτομο έχει 4 τροχιακά, υβριδικά του τύπου  $sp^3$  ( $\psi_{υβριδ}$ ), με ένα ηλεκτρόνιο ανά τροχιακό. Κάθε άτομο συνδέεται με τα τέσσερα πλησιέστερα γειτονικά άτομα στις κορυφές ενός τετραέδρου με ομοιοπολικούς δεσμούς που έχει ως κέντρο το εξεταζόμενο άτομο



Ατομική πυκνότητα Si :  $5 \times 10^{22}$  άτομα  $cm^{-3}$   
 Πυκνότητα ηλεκτρονίων=ατομική πυκνότητα x σθένος=  
 $4 \times 5 \times 10^{22}$  ηλεκτρόνια/  $cm^3$

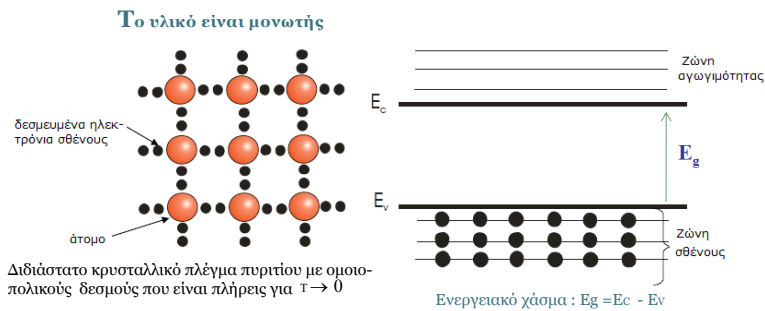
5

**Αμιγείς ή ενδογενείς ημιαγωγοί**

**Ο κρύσταλλος πυριτίου Si και το διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών**

Η έννοια της αγωγιμότητας με το ατομικιστικό μοντέλο και το μοντέλο των ενεργειακών ζωνών  $T \rightarrow 0$

Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες  $T \rightarrow 0$  δεν υπάρχουν κινούμενοι φορείς ηλεκτρικού φορτίου



Διδιάστατο κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με ομοιοπολικούς δεσμούς που είναι πλήρεις για  $T \rightarrow 0$

Στο μοντέλο των ενεργειακών ζωνών: Δεν είναι δυνατή η κίνηση των ηλεκτρονίων στη ζώνη σθένους εφαρμόζοντας ηλεκτρικό πεδίο.

Στην κβαντομηχανική σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια αποκτούν ελαφρώς μεγαλύτερη ενέργεια από το ηλεκτρικό πεδίο και μπορούν να μετακινηθούν σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις στη ζώνη σθένους. Ωστόσο δεν υπάρχουν τέτοιες κενές ενεργειακές καταστάσεις.

6

**Αμιγείς ή ενδογενείς ημιαγωγοί (Ηλεκτρόνια και οπές)**

Ο κρύσταλλος πυριτίου Si και το διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών για  $T > 0$

Η έννοια της ανωνιότητας με το ατομικιστικό μοντέλο και μοντέλο των ενεργειακών ζωνών

Καθώς αυξάνει η θερμοκρασία, προστίθεται θερμική ενέργεια στον κρύσταλλο (ή όταν απορροφάει φωτόνια που έχουν ενέργεια  $h\nu >$  του ενεργ. χάσματος  $E_g$ ) σπάζουν μερικοί δεσμοί Si-Si, τότε δημιουργείται ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο ανά δεσμό και στην περιοχή του δεσμού μία οπή που περιορίζεται να μετακινείται δια μέσου των ομοιοπολικών δεσμών.

Στην κβαντομηχανική σημαίνει ότι μερικά ηλεκτρόνια αποκτούν την ενέργεια που απαιτείται για να υπερπηδήσουν το ενεργειακό χάσμα, και μεταπηδούν από τη ζώνη σθένους σε ενεργειακές καταστάσεις στη ζώνη αγωγιμότητας. Κάθε ηλεκτρόνιο που μετακινείται δημιουργεί ένα ζεύγος ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας και μία κενή θέση, την οπή στη ζώνη σθένους

7

Τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να έχουν ενέργεια μέσα στο ενεργειακό χάσμα!

Το ενεργειακό χάσμα μεταξύ των ζωνών  $E_g$  είναι η ενέργεια που απαιτείται για το σπάσιμο του ομοιοπολικού δεσμού στον ημιαγωγικό, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ηλεκτρονίων για αγωγή. Στο διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών του ημιαγωγού ορίζεται ως η ενεργειακή απόσταση μεταξύ των άκρων των ζωνών σθένους  $E_v$  και αγωγιμότητας  $E_c$

$$E_g = E_c - E_v$$

Στους ημιαγωγούς δημιουργούνται δύο σωματίδια ηλεκτρικού φορτίου ένα ηλεκτρόνιο με αρνητικό φορτίο  $-q = 1,602 \times 10^{-19} \text{C}$  και μία οπή με ίσο αλλά θετικό φορτίο  $+q = 1,602 \times 10^{-19} \text{C}$  για κάθε δεσμό που σπάει. Ένα ηλεκτρόνιο με φορτίο  $-q$  μετακινείται μακριά από έναν ομοιοπολικό δεσμό και αφήνει πίσω του ένα κενό στη δομή του δεσμού από το οποίο προέρχεται. Το κενό αυτό μένει με ένα ενεργό φορτίο ίσο με  $+q$ . Ένα ηλεκτρόνιο από ένα παρακείμενο δεσμό μπορεί να γεμίσει αυτό το κενό και να δημιουργηθεί ένα άλλο κενό σε άλλη θέση. Το μετακινούμενο κενό συμπεριφέρεται όπως ένα σωματίδιο με φορτίο  $+q$  και λέγεται οπή. Στο διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών μερικά ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους διεγείρονται και μετακινούνται στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας κάθε ηλεκτρόνιο μία κενή θέση στη ζώνη σθένους, την οπή.

Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων στη μονάδα όγκου είναι η ενδογενής (ή αμιγής) πυκνότητα (ή συγκέντρωση) και συμβολίζεται με το  $n_i$ .

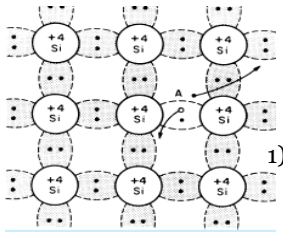
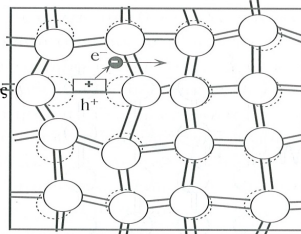
Ισχύει: Αριθμός ηλεκτρονίων = Αριθμός οπών  
 $n = p = n_i = p_i$  ( $p$  είναι η συγκέντρωση οπών)

8

**Αμιγείς ή ενδογενείς ημιαγωγοί (Ηλεκτρόνια και οπές)**

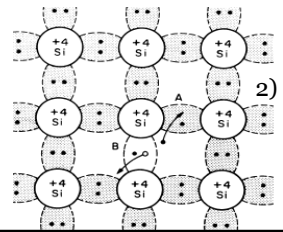
**Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου – οπής με θερμική διέγερση**

Οι θερμικές ταλαντώσεις των ατόμων μπορούν να προκαλέσουν το σπάσιμο των δεσμών δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών.



Σχήμα 1) Σπάσιμο του δεσμού A και δημιουργία ελεύθερου ηλεκτρονίου με ενεργό μάζα  $m_e^*$

Έλλειψη ενός ηλεκτρονίου, δηλαδή εμφάνιση οπής και θετικό φορτίο παραμένει στο δεσμό A.



Σχήμα 2) i «Ελεύθερο» ηλεκτρόνιο εξουδετερώνει την οπή του δεσμού A

Νέα οπή δημιουργείται στο δεσμό B με τη διέγερση ηλεκτρονίου, Έτσι και η οπή «κυκλοφορεί ελεύθερα» αλλά με διαφορετική ενεργό μάζα  $m_h^*$

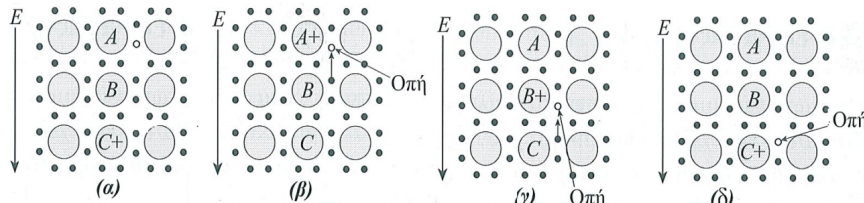
9

**Δημιουργία οπής –κίνηση οπής υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου**

•Για κάθε διεγειρόμενο ηλεκτρόνιο στην ζώνη αγωγιμότητας αφήνεται πίσω ένα έλλειμμα στη ζώνη σθένους, μία μη κατειλημμένη (κενή) κατάσταση στην ζώνη σθένους ή ένα έλλειμμα σε έναν από τους ομοιοπολικούς δεσμούς

•Κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, η θέση του απουσιάζοντος ηλεκτρονίου στο εσωτερικό του κρυσταλλικού πλέγματος μπορεί να θεωρηθεί ως μετακινούμενη, λόγω της κίνησης των άλλων ηλεκτρονίων σθένους που επαναλαμβανόμενα τοποθετούνται στον ασυμπλήρωτο δεσμό.

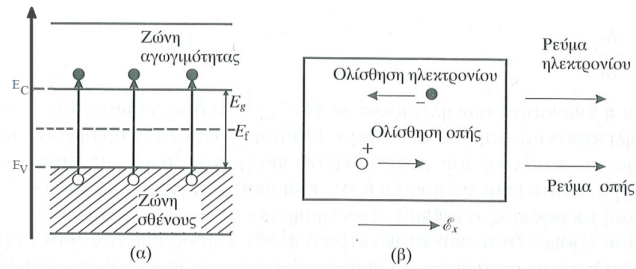
•Η διαδικασία διευκολύνεται με τη θεώρηση του απουσιάζοντος ηλεκτρονίου σθένους, ως ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο που ονομάζεται οπή.



Σχηματική παράσταση της κίνησης των οπών σε ενδογενές πυρίτιο στο μοντέλο του ομοιοπολικού δεσμού : α), β), γ), δ) μετά τη διέγερση για  $T > 0K$ , οι επακόλουθες κινήσεις της οπής ως απόκριση σε εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο ( δεν παριστάνεται η κίνηση του ελεύθερου ηλεκτρονίου).

10

### Δημιουργία ηλεκτρονίου-οπής και κίνηση υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου



Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών λόγω θερμικής διέγερσης των ηλεκτρονίων από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας (συνήθως λαμβάνεται  $E_V=0$ )  
 β) μετατόπιση ηλεκτρονίων και οπών με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου.

11

### Συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών

Πυκνότητα ηλεκτρονίων  $n(E)dE = g(E)f(E)dE$

12

### Συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών

Πυκνότητα ηλεκτρονίων  $n(E)dE = g(E)f(E)dE$

Πυκνότητα καταστάσεων  $g(E) = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m_e^{*3/2} (E - E_C)^{1/2}$

13

### Συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών

Πυκνότητα ηλεκτρονίων  $n(E)dE = g(E)f(E)dE$

Πυκνότητα καταστάσεων  $g(E) = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m_e^{*3/2} (E - E_C)^{1/2}$

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

14

### Συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών

Πυκνότητα ηλεκτρονίων  $n(E)dE = g(E)f(E)dE$

Πυκνότητα καταστάσεων  $g(E) = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m_e^{*3/2} (E - E_C)^{1/2}$

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

$$n = \int_{E_C}^{\infty} g(E)f(E)dE = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} (m_e^*kT)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

15

### Συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών

Πυκνότητα ηλεκτρονίων  $n(E)dE = g(E)f(E)dE$

Πυκνότητα καταστάσεων  $g(E) = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} m_e^{*3/2} (E - E_C)^{1/2}$

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

$$n = \int_{E_C}^{\infty} g(E)f(E)dE = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} (m_e^*kT)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad N_C = \frac{8\pi\sqrt{2}}{h^3} (m_e^*kT)^{3/2}$$

16



**Συγκέντρωση ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας  $n_o$ , οπών στη ζώνη σθένους  $p_o$**   
**Θέση της στάθμης Fermi  $E_F$**

Ποσοτικοποίηση; Πόσα ηλεκτρόνια; Πόσες οπές; Σε ποιες στάθμες ενέργειας; Αγωγιμότητα

Πυκνότητα φορέων = πυκνότητα καταστάσεων x πιθανότητα κατάληψης

**M** **Συγκέντρωση ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας:**  $n_i = n_o = \int_{E_c}^{\infty} g(E) \cdot f(E) \cdot d(E)$

$n_i = p_i \Rightarrow E_F \approx \frac{E_c + E_v}{2} \Rightarrow E - E_F \gg kT \Rightarrow f(E) = e \cdot x \cdot p \left( \frac{E_F - E}{kT} \right)$

Η πιθανότητα κατάληψης μειώνεται εκθετικά, ουσιαστικά μας ενδιαφέρει ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας  $n_i = n_o = N_c \cdot f(E_c) \Rightarrow$

**Συγκέντρωση ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας:**

**$n_i = n_o = N_c \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right)$  για  $E_c \gg E_F$  και  $\frac{n_o}{N_c} < 0,15$**

όπου  $N_c = 2 \cdot \left(\frac{m_e^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} = 4,83 \times 10^{21} \cdot \left(\frac{T \cdot m_e^*}{m_o}\right)^{3/2} \text{ cm}^{-3}$   $N_c$  είναι η ενεργός πυκνότητα των καταστάσεων της ζώνης αγωγιμότητας, χαρακτηριστική του ημιαγωγού

17

**Αναπαράσταση στο ενεργειακό διάγραμμα:**

α) πυκνότητα καταστάσεων  $g(E)$ ,  
 β) κατανομή Fermi  $F(E)$   
 γ) συγκέντρωση φορέων (δεξιά) για ενδογενή ημιαγωγό σε θερμική ισορροπία

Ηλεκτρόνια:  $n = g(E) F(E)$       Οπές:  $p = g(E) [1 - F(E)]$

The diagram consists of three vertically aligned plots sharing a common energy axis (E) with levels  $E_c$ ,  $E_F$ , and  $E_v$  marked.   
 Plot (α) shows the density of states  $g(E)$  with a curve rising from  $E_c$  and falling to  $E_v$ .   
 Plot (β) shows the Fermi distribution  $F(E)$  as a decreasing curve from  $E_c$  to  $E_v$ .   
 Plot (γ) shows carrier concentrations. The top curve is  $g(E)F(E)$  (electrons), with a shaded area under it from  $E_c$  to  $E_F$  labeled 'Εμβαδό περιοχής ίσο με την πυκνότητα των ηλεκτρονίων,  $n_i$ '. The bottom curve is  $g(E)[1 - F(E)]$  (holes), with a shaded area under it from  $E_F$  to  $E_v$  labeled 'Εμβαδό περιοχής ίσο με την πυκνότητα των οπών,  $p_i$ '. The x-axis for (γ) is labeled 'Πυκνότητα φορέων'.

18

ομοίως η συγκέντρωση των οπών στη ζώνη σθένους

$$p_i = p_o = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right) \text{ για } E_F \gg E_v, \frac{p_o}{N_v} < 0.15$$

όπου  $N_v = 2 \cdot \left(\frac{m_h^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} = 4,83 \times 10^{21} \cdot \left(\frac{T \cdot m_h^*}{m_o}\right)^{3/2} \text{ cm}^{-3}$   $N_v$  είναι η ενεργός πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων της ζώνης σθένους

Η εξάρτηση της συγκέντρωσης  $n_i$  από τη θερμοκρασία είναι ισχυρή και δίνεται από τη σχέση :

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{E_v - E_c}{2kT}\right) = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \text{ cm}^{-3}$$

Σε συνάρτηση της T :  $n_i = A_o \cdot T^{3/2} \cdot \exp(-E_g/2kT)$

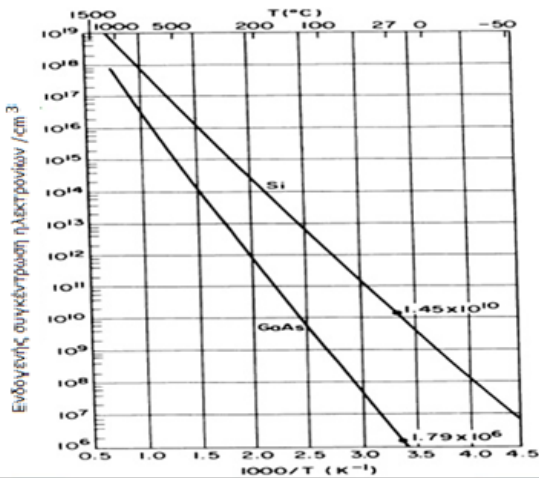
Το επίπεδο Fermi βρίσκεται με την παρακάτω σχέση:

$$E_F = E_v + \frac{E_g}{2} - \frac{kT}{2} \ln \frac{N_c}{N_v}$$

19

T= 300K	Si	Ge	GaAs
$N_c \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$2,80 \times 10^{19}$	$1,04 \times 10^{19}$	$4,7 \times 10^{17}$
$N_v \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$1,04 \times 10^{19}$	$6,0 \times 10^{18}$	$7,0 \times 10^{18}$
$n_i \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$1,02 \times 10^{10}$	$2,4 \times 10^{13}$	$1,8 \times 10^6$
$E_g \text{ (eV)}$	1,12	0,67	1,42

Τιμές των  $N_c, N_v, n_i, E_g$  για τους ημιαγωγούς Si, Ge, GaAs



Η εξάρτηση της ενδογενούς συγκέντρωσης φορέων από τη θερμοκρασία για το Si και το GaAs

1/1.000.000.000.000

20

# Περιοδικός Πίνακας

**THE PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS**

The periodic table shows elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og). It is color-coded by groups: Alkali Metals (red), Alkaline Earths (orange), Transition Metals (various colors), Main Group Metals (green), Semimetals (yellow), Nonmetals (blue), Halogens (purple), Noble Gases (grey), Lanthanides (light green), and Actinides (dark green).

21

## Ημιαγωγοί προσμιξέων (Αντικατάσταση ατόμων με άλλα άτομα διαφορετικού σθένους Προσφορά ή απορρόφηση ηλεκτρονίων)

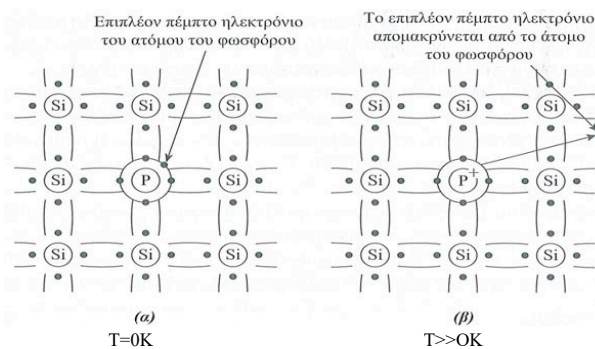
Ανάλογα με τον τύπο πρόσμιξης μπορούμε να έχουμε **ημιαγωγό τύπου n** με αγωγιμότητα που οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά σε ηλεκτρόνια ή **ημιαγωγό τύπου p** με αγωγιμότητα που οφείλεται στις οπές.

### Ημιαγωγοί τύπου n

#### Εξήγηση στο μοντέλο του ομοιοπολικού δεσμού

Άτομα Si έχουν αντικατασταθεί από πεντασθενή άτομα φωσφόρου (P) με συγκέντρωση  $N_D$  :

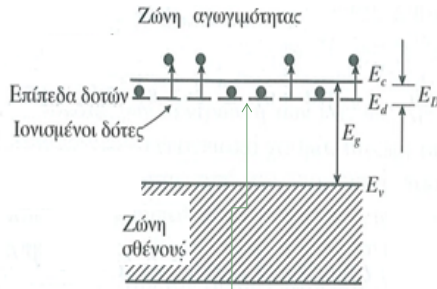
- α) Για  $T \sim 0\text{K}$  το πέμπτο ηλεκτρόνιο του P είναι δεσμευμένο στο άτομο P και
  - β) Με λίγη ενέργεια ( $T \gg 0\text{K}$ ) είναι ελεύθερο, συμμετέχει στην αγωγιμότητα.
- Το άτομο P είναι ιονισμένο (θετικό ιόν).



22

**Ημιαγωγοί προσμίξεων : Τύπου n (φορείς πλειονότητας : ηλεκτρόνια)**

• Εξήγηση στο μοντέλο των ενεργειακών ζωνών



Ενεργειακά επίπεδα μη ιονισμένων δοτών (δηλ. T=0K).

Τυπικές τιμές  $N_D$  για το Si  
 $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
 στο ενδογενές Si  $n_i = 1.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

- Δότες: Πεντασθενή στοιχεία με συγκέντρωση  $N_D$ :
- ✓ Υπάρχουν επιπλέον κατειλημμένες καταστάσεις δοτών με ενέργεια  $E_D$  πολύ κοντά στην  $E_C$
- ✓ Με λίγη ενέργεια ( $E_D - 0,02 \text{ eV}$ ): μεταπήδηση των ηλεκτρονίων των δοτών στη ζώνη αγωγιμότητας
- ✓ Ενεργοποίηση / Ιονισμός ατόμου πρόσμιξης

□ Δότες ή προσμίξεις τύπου n π.χ. P, As, Sb : κάθε άτομο πρόσμιξης δίνει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας. Υπάρχει περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων σε σχέση με τις οπές στη ζώνη σθένους (δηλαδή τις ενδογενείς οπές p)

Η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων  $n \gg n_i = p$

Ονομασία: ημιαγωγοί τύπου n (από τα αρχικά του negative του κινούμενου αρνητικού φορτίου)

\*Σημείωση: (θερμική ενέργεια ηλεκτρονίων στους 300K : 26 meV,  $E_g$  του Si=1,1eV)

23

**Ημιαγωγοί προσμίξεων: τύπου p**

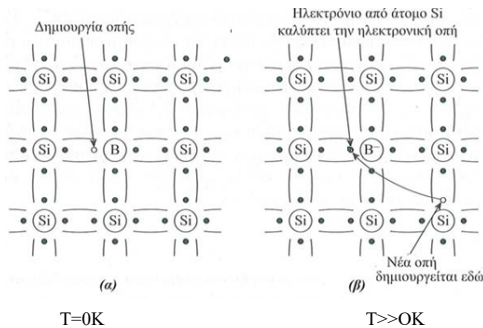
Εξήγηση στο μοντέλο του ομοιοπολικού δεσμού

Άτομα Si έχουν αντικατασταθεί από τρισθενή άτομα βορίου

- α) Λείπει ένα ηλεκτρόνιο από καθένα από αυτά τα άτομα
- β) Με λίγη ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί ένα ηλεκτρόνιο από γειτονικό δεσμό Si-Si
- γ) Δημιουργία οπής, σωματίδιο με θετικό φορτίο. Συμμετοχή οπών στην αγωγιμότητα
- δ) Το άτομο βορίου είναι ιονισμένο (αρνητικό ιόν)

Ημιαγωγοί τύπου p (από τα αρχικά του positive του κινούμενου θετικού φορτίου)

γιατί η συγκέντρωση οπών  $p \gg n_i$  ( $n_i$ : ενδογενή ηλεκτρόνια)



Τυπικές τιμές  $N_A$  για το Si  
 $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$   
 στο ενδογενές Si  $n_i = 1.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

24

**Ημιαγωγοί προσμίξεων : Τύπου p (φορείς πλειονότητας :οπές)**

**Εξήγηση στο μοντέλο των ενεργειακών ζωνών**  
 Τρισθενή στοιχεία με συγκέντρωση NA:  
 Επιπλέον κενές καταστάσεις με ενέργεια EA πολύ κοντά στην ζώνη σθένους  
 Με λίγη ενέργεια ( $E_A \sim 0,045eV$ ): μεταπήδηση ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στο ενεργειακό επίπεδο του αποδέκτη  
 Ενεργοποίηση / Ιονισμός πρόσμιξης (αρνητικά)  
 Δημιουργία οπής στη ζώνη σθένους

Αποδέκτες ή προσμίξεις τύπου p π.χ. B, In,Ga :  
 κάθε άτομο δίνει μία οπή στη ζώνη σθένους,  
 (υπάρχει έλλειμμα ελεύθερων ηλεκτρονίων),  
 περίσσεια οπών; προσφορά αγωγίων οπών

**Γενικά:** Ατομικές συγκεντρώσεις προσμίξεων της τάξεως του  $10^{-6}$ , δηλαδή ένα άτομο δότη ή αποδέκτη για ένα εκατομμύριο άτομα Si, είναι αρκετές για να αλλάξουν σημαντικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες του ημιαγωγού.

**!! Οι φορείς πλειονότητας** καθορίζουν την αγωγιμότητα του ημιαγωγού στην οποία ελάχιστα συμβάλουν οι **φορείς μειονότητας** χωρίς αυτό να σημαίνει ότι πρέπει να τους αγνοούμε πάντα.

25

**Ημιαγωγοί προσμίξεων: Παραγωγή (γένεση) και επανασύνδεση φορέων**

Η επανασύνδεση πραγματοποιείται όταν ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας μεταβαίνει σε μία κενή κατάσταση στη ζώνη σθένους. Η ενέργεια που απελευθερώνεται στην επανασύνδεση, είναι περίπου ίση με το  $E_g$ , μπορεί να εκπεμφθεί ως φωτόνια ή να δοθεί ως θερμότητα στο κρυσταλλικό πλέγμα υπό μορφή κβαντισμένων δονήσεων πλέγματος, δηλαδή δημιουργούνται φωνόνια πλέγματος

**1. Θερμική ισορροπία:** Ισορροπία μεταξύ συγκέντρωσης ηλεκτρονίων και οπών  
 Ρυθμός δημιουργίας ζευγών ηλεκτρονίων/οπών:  $g$  (generation)  
 Ρυθμός επανασύνδεσης ηλεκτρονίων/οπών:  $r$  (recombination)  
 ισχύει :  $g=r$   
 Ρυθμός επανασύνδεσης : ανάλογος των δύο συγκεντρώσεων  
 $r = an_i^2 = g$

Αναπαράσταση της επανασύνδεσης ηλεκτρονίου-οπής από α) ζώνη σε ζώνη και β) μέσω ατέλειας

**2. Εισαγωγή προσμίξεων :** Διατάραξη του σημείου θερμικής ισορροπίας  
 Ρυθμός δημιουργίας  $g$ : αμετάβλητος  $g = an_i^2$   
 Ρυθμός επανασύνδεσης: ανάλογος των δύο νέων συγκεντρώσεων  $n$  και  $p$   
 $r = \alpha n.p$

**!!!** οπότε προκύπτει ο **νόμος δράσης μαζών για τα ηλεκτρόνια και τις οπές:**  $n.p = n_i^2$

26

**Ημιαγωγοί προσμίξεων**

**Θέση της στάθμης Fermi  $E_F$**

(a) σε ημιαγωγό τύπου n  $E_F > E_{Fi}$       (b) σε ημιαγωγό τύπου p,  $E_F < E_{Fi}$

$E_{Fi} \approx \frac{E_g}{2}$

Στους ντοπαρισμένους ημιαγωγούς η συγκέντρωση των ενδογενών ηλεκτρονίων και οπών μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σύγκριση με τους φορείς που προέρχονται από τις ιονισμένες προσμίξεις τύπου n (ηλεκτρόνια) ή τύπου p (οπές)

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις βασίζονται στους ημιαγωγούς προσμίξεων (ντοπαρισμένοι ημιαγωγοί)

27

**Ημιαγωγοί προσμίξεων : Συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών- θέση της στάθμης Fermi**

Στην πράξη:

A) Εισαγωγή προσμίξεων με  $N_D \gg n_i$  : Ημιαγωγός τύπου n (μικρή συγκέντρωση οπών)

- Φορείς πλειονότητας: ηλεκτρόνια, Φορείς μειονότητας: οπές

B) Εισαγωγή προσμίξεων με  $N_A \gg n_i$  : Ημιαγωγός τύπου p (μικρή συγκέντρωση ηλεκτρονίων)

- Φορείς πλειονότητας: οπές, Φορείς μειονότητας: ηλεκτρόνια

A) Ημιαγωγός τύπου n, η συγκέντρωση των δοτών είναι  $N_D \gg n_i$  και  $E_D \ll E_C$

μπορούμε να παραλείψουμε τα «ενδογενή» ηλεκτρόνια (αυτά που διεγείρονται θερμικά από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας)

Για τους φορείς πλειονότητας  $n = N_D$

Για τη συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας n, ισχύει η σχέση:  $n \cong N_D = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right)$

Η συγκέντρωση των φορέων μειονότητας p:  $n \cdot p = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D}$

Η θέση της στάθμης  $E_F$  :  $E_F - E_c = kT \ln(N_D / N_c)$  ή  $E_F - E_{Fi} = kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$

Σε ημιαγωγό τύπου-p με με συγκέντρωση αποδεκτών  $N_A$  ( $N_D = 0$ ) έχουμε:  $p = N_A$  και  $n = \frac{n_i^2}{N_A} \text{ cm}^{-3}$

$p \cong N_A = N_v e^{-\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)}$  οπές /cm<sup>3</sup>  $\Rightarrow E_F - E_v = kT \ln \frac{N_v}{N_A} \text{ eV}$

28

**ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ**

Στην κατασκευή των ημιαγωγικών διατάξεων, επαφές pn, διπολικά τρανζίστορ pnp, τρανζίστορ MOSFET κ.λ.π. έχουμε παρουσία και δοτών  $N_D$  και αποδεκτών  $N_A$ . Γίνεται αλληλοεξουδετέρωση μέχρι την εξάντληση των προσμίξεων με τη μικρότερη συγκέντρωση.

1) όταν  $N_D = N_A$  έχουμε πλήρη αντιστάθμιση

η θέση της στάθμης Fermi είναι η ίδια με τον ενδογενή ημιαγωγό.

2) όταν  $N_D \neq N_A$  δηλαδή διαφορετικές συγκεντρώσεις, τότε η αντιστάθμιση δεν είναι πλήρης. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ενεργό συγκέντρωση προσμίξεων που ορίζεται σαν :

$$N_{D, ενεργός} = N_D - N_A \quad \text{άν } N_D > N_A \gg n_i \Rightarrow n_d = N_{D, ενεργός} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_{A, ενεργός} = N_A - N_D \quad \text{άν } N_A > N_D \gg n_i \Rightarrow p_p = N_{A, ενεργός} \text{ cm}^{-3}$$

Υπολογίζουμε τη θέση της στάθμης Fermi για ημιαγωγό τύπου n με αναφορά την  $E_C$  (ή την  $E_{Fi}$ ) άν  $N_D > N_A \gg n_i$  από τις σχέσεις :

$$E_C - E_F = -kT \ln \frac{n}{N_C} = -kT \ln \frac{N_{D, ενεργός}}{N_C}$$

ή παρόμοια τη θέση της στάθμης Fermi για ημιαγωγό τύπου p από τις σχέσεις:

$$E_F - E_V = -kT \ln \frac{p}{N_V} = -kT \ln \frac{N_{A, ενεργός}}{N_V}$$

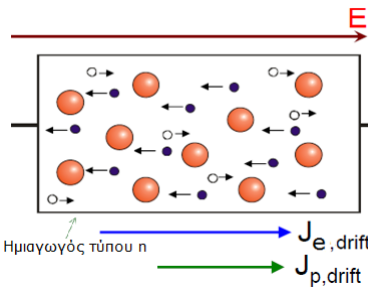
29

**Ημιαγωγοί προσμίξεων : Ρεύματα ολίσθησης - Αγωγιμότητα**

Συμμετοχή ηλεκτρονίων και οπών

Διαφορετική κινητικότητα  $\mu$  για κάθε φορέα και για κάθε υλικό ( $\mu_e, \mu_h$ )

Προκύπτει από: Διαφορετική ενεργό μάζα  $m$  και Διαφορετικό μέσο χρόνο ηρεμίας  $\tau$

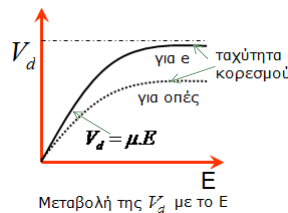


Ταχύτητα ολίσθησης (drift) ελεύθερου φορέα (ηλεκτρόνιο ή οπή)  $v_d$  παρουσία ηλεκτρικού πεδίου  $E$  :

$$v_d = \mu \cdot E = \frac{e\tau}{m^*} E \text{ (m/s)}$$

όπου  $\mu$  είναι η κινητικότητα ή ευκινησία του φορέα του ηλεκτρικού φορτίου ( $\mu_e \neq \mu_h$ )

$$\mu = \frac{V_d}{E} \quad \mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad [\mu] = \left[ \frac{cm}{V-sec} \right]$$



Η ευκινησία  $\mu$  μειώνεται με α) την αύξηση της θερμοκρασίας β) την αύξηση της συγκέντρωσης των προσμίξεων

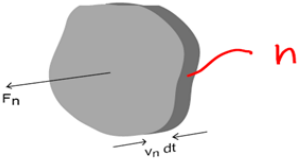
Διατάξεις υψηλής ταχύτητας, τα *High Electron Mobility Transistors (HEMTs)*, τα ηλεκτρόνια κινούνται σε μη ντοπαρισμένα υλικά για επίτευξη μεγάλης ευκινησίας

30

**Γενικές σχέσεις που συνδέουν την ταχύτητα  $u$ , ροή  $F$  και ρεύμα  $J$**

Στους ημιαγωγούς οι φορτισμένοι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρόνια-οπές) κινούνται  $\Rightarrow$  ροή φορέων  $\Rightarrow$  ηλεκτρικό ρεύμα

**Ροή των φορέων  $F$ :** αριθμός των φορέων που περνάει από τη μονάδα της επιφάνειας που είναι κάθετη στη ροή των φορέων στη μονάδα του χρόνου, ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )



Σχέσεις που συνδέουν τη ροή με την ταχύτητα φορέων:  $F_n = n v_n$  και  $F_p = p v_p$

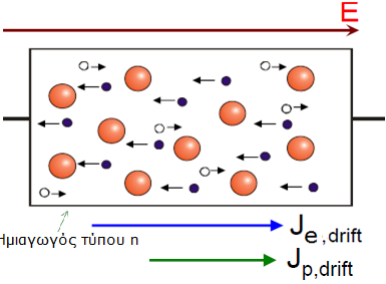
**Πυκνότητα ρεύματος:** το ποσό του φορτίου που περνάει από τη μονάδα της επιφάνειας που είναι κάθετη στη ροή των φορέων στη μονάδα του χρόνου, ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$$J_e = -q F_n = -q n v_n \quad \text{και} \quad J_h = q F_p = q p v_p$$

Σημείωση: Ο δείκτης  $n$  παριστάνεται και με το σύμβολο  $e$ , για τα ηλεκτρόνια  
 Παρόμοια ο δείκτης  $p$  παριστάνεται και με το σύμβολο  $h$ , για τις οπές

31

**Ημιαγωγοί προσμίξεων : Ρεύματα ολίσθησης - Αγωγιμότητα**



Το ρεύμα που οφείλεται στην επίδραση του πεδίου  $E$  ονομάζεται ρεύμα ολίσθησης και είναι  $J = J_e + J_h$ , όπου  $J_e/J_h$  πυκνότητα ρεύματος ολίσθησης ηλεκτρονίων/οπών

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

Η συνολική πυκνότητα ρεύματος (ολίσθησης) που οφείλεται στην επίδραση του πεδίου  $E$  είναι:

$$J = J_e + J_h = e n \mu_e E + e p \mu_h E = e (n \mu_e + p \mu_h) E$$

Η αγωγιμότητα  $\sigma$  ημιαγωγού προσμίξεων είναι  $\sigma = e (n \mu_e + p \mu_h)$   $J_{drift} = \sigma E$

Η αγωγιμότητα  $\sigma_i$  ενδογενούς ημιαγωγού είναι  $\sigma_i = e n_i (\mu_e + \mu_h)$

Εξάρτηση από τη θερμοκρασία  $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

32

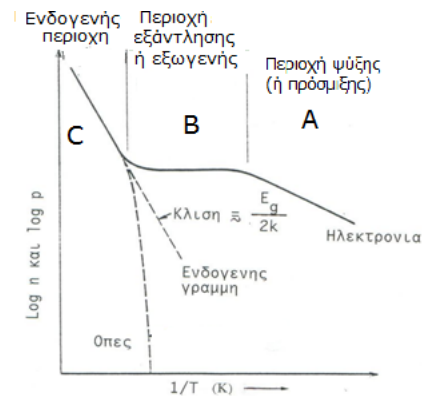


## Εξάρτηση της αγωγιμότητας από την T

Παρόμοια με την εξάρτηση της συγκέντρωσης φορέων από την T

Η αγωγιμότητα  $\sigma_i$  ενδογενούς ημιαγωγού είναι  $\sigma_i = e n_i (\mu_e + \mu_h)$

Εξάρτηση αυτής από τη θερμοκρασία  $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}$



Συγκέντρωση των φορέων σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας για έναν ημιαγωγό τύπου- n.

**A: Περιοχή «ψύξης»**  
(εξάρτηση από T, μέχρι να ιονιστούν όλοι οι Δότες)

**B: Περιοχή εξωγενούς αγωγιμότητας**  
(ανεξαρτησία από T λόγω ιονισμού όλων των Δοτών και ασήμαντης συνεισφοράς των ενδογενών φορέων)

**C: Περιοχή ενδογενούς αγωγιμότητας**  
(εξάρτηση από T λόγω σημαντικής συνεισφοράς των ενδογενών φορέων)