

# Ημιαγωγοί Εισαγωγικές έννοιες

Δ. Γ. Παπαγεωργίου  
Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών  
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

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

# Κβαντικοί αριθμοί

Κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από τέσσερις αριθμούς

$$n, l, m_l, m_s$$

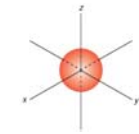
Κύριος κβαντικός αριθμός  $n$

- Προσδιορίζει την στιβάδα  
 $n = 1, 2, 3, 4, \dots$   
 $n = K, L, M, N, \dots$
- Σχετίζεται με τη μέση απόσταση του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα

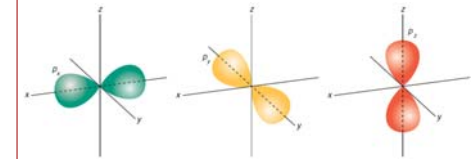
Δευτερεύων κβαντικός αριθμός  $l$

- Προσδιορίζει την υποστιβάδα  
 $l = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$   
 $l = s, p, d, f, \dots$
- Σχετίζεται με την τροχιακή στροφορμή του ηλεκτρονίου
- Το σχήμα των τροχιών εξαρτάται από τον αριθμό  $l$

Σχήμα τροχιακού  $s$

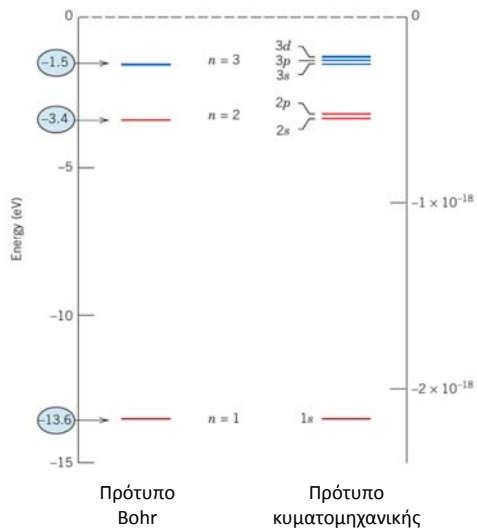


Σχήμα τροχιακού  $p$



# Κβαντικοί αριθμοί

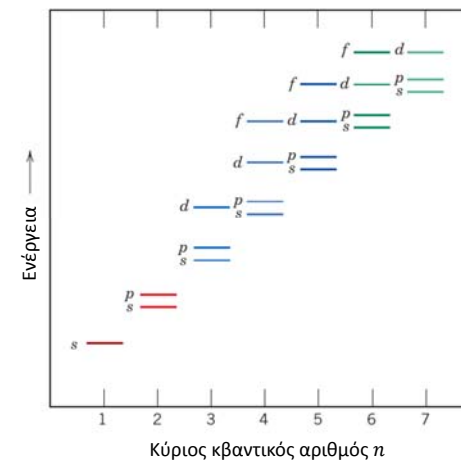
Ενεργειακές καταστάσεις του ατόμου του υδρογόνου



Μόνο μία ενεργειακή κατάσταση είναι κατειλημμένη

# Κβαντικοί αριθμοί

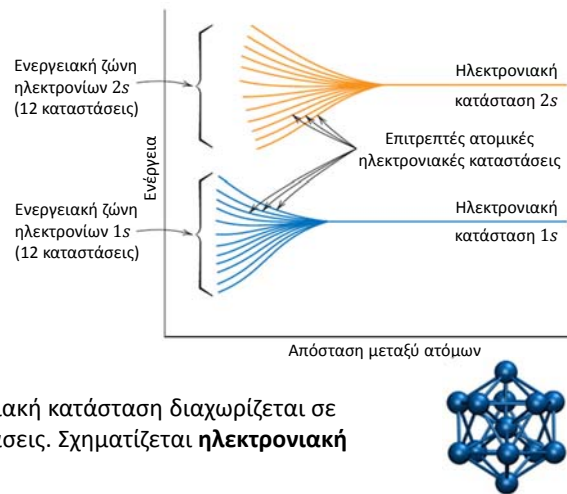
Ενεργειακές καταστάσεις ανά στιβάδα και υποστιβάδα



- Για συγκεκριμένο αριθμό  $n$  οι ενέργειες των υποστιβάδων αυξάνονται:  
 $E_s < E_p < E_d < E_f$
- Η ενέργεια της υποστιβάδας  $s$  αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο κύριος αριθμός  $n$ :  
 $E_{1s} < E_{2s} < E_{3s} < E_{4s}$

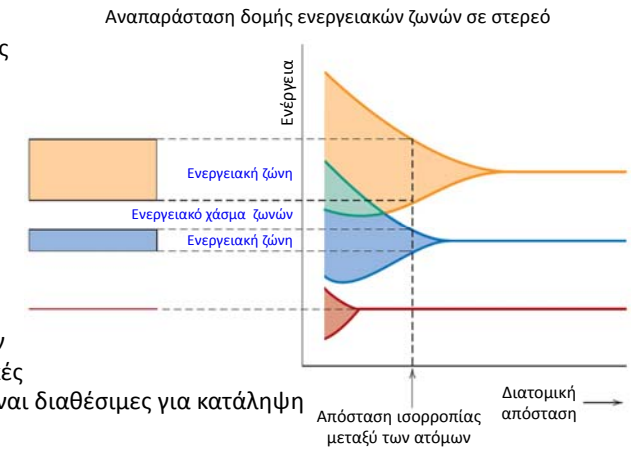
## Δομή ενεργειακών ζωνών στα στερεά

- Κάθε στερεό αποτελείται από μεγάλο αριθμό ατόμων.
- Όταν τα άτομα είναι σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, έχουν ενεργειακές καταστάσεις σαν να είναι απομονωμένα άτομα.
- Καθώς τα άτομα πλησιάζουν δέχονται την επίδραση των γειτονικών ατόμων.
- Κάθε διακριτή ηλεκτρονική κατάσταση διαχωρίζεται σε πολλές κοντινές καταστάσεις. Σχηματίζεται **ηλεκτρονική ενεργειακή ζώνη**.

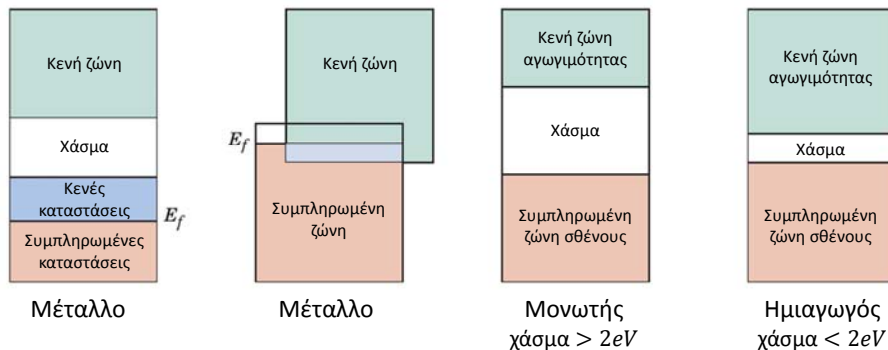


## Δομή ενεργειακών ζωνών στα στερεά

- Στο εσωτερικό κάθε ζώνης οι ενεργειακές καταστάσεις είναι διακριτές.
- Οι διαφορές μεταξύ γειτονικών καταστάσεων είναι υπερβολικά μικρές.
- Μεταξύ των ενεργειακών ζωνών μπορεί να υπάρχουν **χάσματα** (ενεργειακές περιοχές που δεν είναι διαθέσιμες για κατάληψη από ηλεκτρόνια).
- Για τις στιβάδες που είναι κοντινότερες στον πυρήνα μπορεί να μην υπάρχει σχηματισμός ενεργειακών ζωνών.

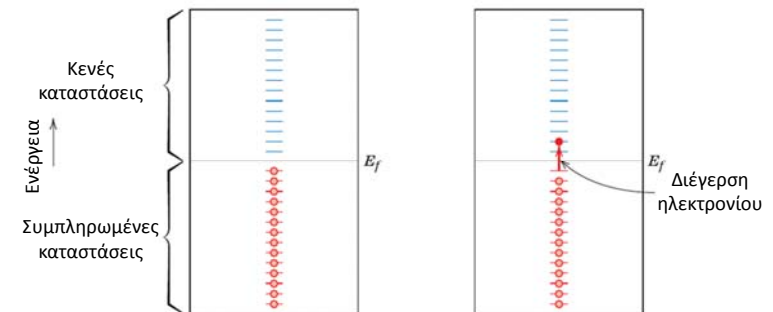


## Οι βασικοί τύποι ενεργειακών ζωνών



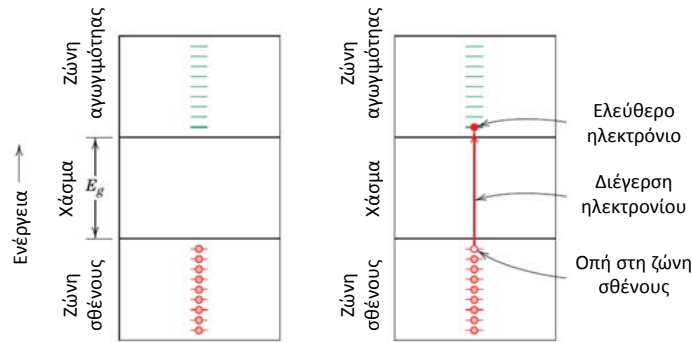
- Μέταλλα: Η ενέργεια που αντιστοιχεί στην υψηλότερη συμπληρωμένη κατάσταση σε  $T = 0 \text{ K}$  ονομάζεται **ενέργεια Fermi** και συμβολίζεται  $E_f$
- Μόνο ηλεκτρόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια Fermi είναι ελεύθερα να επιταχυνθούν από το ηλεκτρικό πεδίο και έτσι να συμμετέχουν στην αγωγιμότητα.

## Διέγερση ηλεκτρονίων στα μέταλλα



- Υπάρχουν κενές ενεργειακές καταστάσεις γειτονικές στη υψηλότερη συμπληρωμένη κατάσταση  $E_f$
- Απαιτείται πολύ λίγη ενέργεια ώστε να διεγερθούν ηλεκτρόνια στις χαμηλότερες κενές καταστάσεις.

## Διέγερση ηλεκτρονίων σε μονωτές και ημιαγωγούς



- Δεν υπάρχουν διαθέσιμες κενές καταστάσεις, γειτονικές στη ζώνη σθένους.
- Για να διεγερθεί ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας πρέπει να προσφερθεί ενέργεια (πχ. θερμότητα ή φως) τουλάχιστον ίση με  $E_g$ .
- Όσο μεγαλύτερη η  $E_g$  τόσο μικρότερη η πιθανότητα διέγερσης και άρα λιγότερα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας.
- Αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση της προσφερόμενης θερμικής ενέργειας, συνεπώς περισσότερα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας.

## Ημιαγώγιμα υλικά

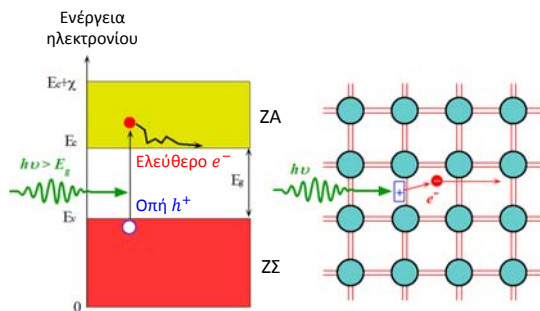
Ο σημαντικότερος ημιαγωγός είναι το πυρίτιο - Si ( $E_g = 1.1eV$ )

Άλλοι ημιαγωγοί:

- Γερμάνιο - Ge ( $E_g = 0.67eV$ )
- Αρσενικούχο Γάλλιο - GaAs ( $E_g = 1.42eV$ )
- Φωσφορούχο Γάλλιο - GaP ( $E_g = 2.25eV$ )
- Αντιμονούχο Ίνδιο - InSb ( $E_g = 0.17eV$ )
- Θειούχο Κάδμιο - CdS ( $E_g = 2.40eV$ )
- Τελλουριούχος Ψευδάργυρος - ZnTe ( $E_g = 2.26eV$ )

## Δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών

### Φωτονική διέγερση



Ενέργεια φωτονίου:  $E_{ph} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$

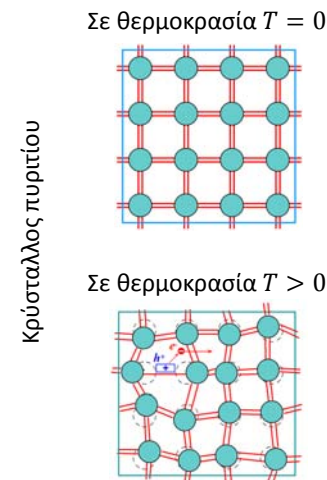
$\nu$ Συχνότητα	$h$ Σταθερά του Planck
$c$ Ταχύτητα φωτός	$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$
$\lambda$ Μήκος κύματος	$h = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs}$

- Το φωτόνιο απορροφάται. Το ηλεκτρόνιο αποκτά επιπλέον ενέργεια και μεταβαίνει από τη ΖΣ στη ΖΑ.
- Η κενή ενεργειακή κατάσταση στη ΖΣ ονομάζεται **οπή** και συμβολίζεται  $h^+$
- Η περιοχή της οπής στη ΖΣ είναι **θετικά φορτισμένη**.
- Δημιουργείται έτσι ένα ζεύγος ηλεκτρονίου (στη ΖΑ) και οπής (στη ΖΣ).

Τι γίνεται αν το φωτόνιο δεν έχει επαρκή ενέργεια;

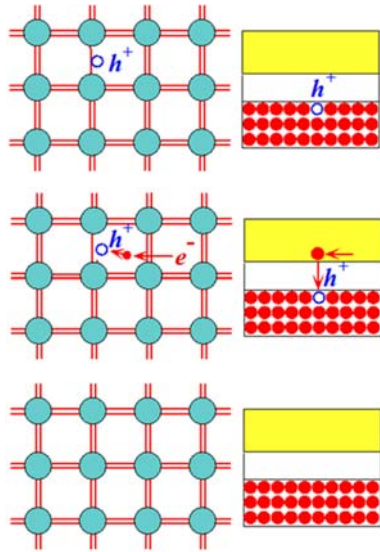
## Δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών

### Θερμική διέγερση



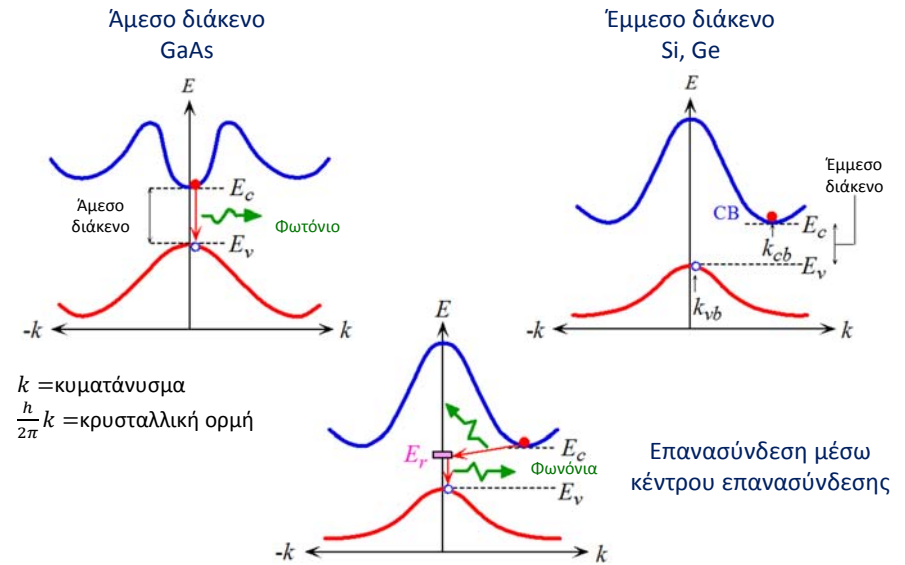
- Λόγω της θερμικής ενέργειας τα άτομα στον κρύσταλλο βρίσκονται σε διαρκή ταλάντωση.
- Οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων παραμορφώνονται.
- Είναι δυνατόν ένας δεσμός να παραμορφωθεί τόσο ώστε να σπάσει.
- Ελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο που μεταβαίνει από τη ΖΣ στη ΖΑ.
- Δημιουργείται επίσης μια **οπή** στη ΖΣ (κενή ενεργειακή κατάσταση).

## Επανασύνδεση

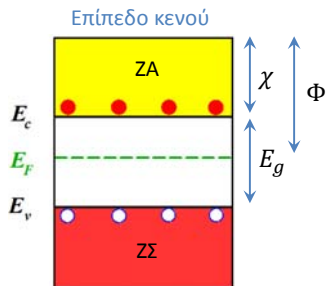


- Ένα ηλεκτρόνιο στη ΖΑ μπορεί να συναντήσει μια οπή στη ΖΣ, δηλαδή να βρει μια κενή ενεργειακή κατάσταση με χαμηλότερη ενέργεια την οποία και καταλαμβάνει.
- Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **επανασύνδεση**.
- Η επιπλέον ενέργεια του ηλεκτρονίου:
  - απορροφάται από τις ταλαντώσεις του πλέγματος, δηλαδή μετατρέπεται σε θερμότητα (Si, Ge).
  - μετατρέπεται σε φωτόνιο (GaAs, InP).

## Ημιαγωγοί άμεσου/έμμεσου διάκενου



## Βασικά χαρακτηριστικά



$E_g$	Διάκενο
$\Phi$	Έργο εξόδου
$E_F$	Ενέργεια Fermi
$\chi$	Ηλεκτροσυγγένεια
$E_c$	Κάτω όριο ΖΑ
$E_v$	Άνω όριο ΖΣ

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

## Συγκέντρωση ηλεκτρονίων

Σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας η συγκέντρωση ηλεκτρονίων δίνεται από τον τύπο:

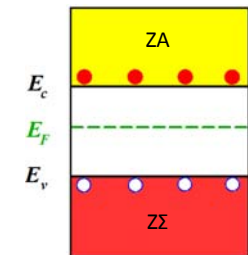
$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T}}$$

$N_c$  Ενεργός πυκνότητα καταστάσεων στην άκρη της ΖΑ.

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$m_e^*$  Ενεργός μάζα ηλεκτρονίου (προσοχή: διαφορετική από την ενεργό μάζα για την αγωγιμότητα).

Ισχύει και για **εξωγενείς** ημιαγωγούς.



Συγκέντρωση ηλεκτρονίων  
 $n = \frac{\text{πλήθος ηλεκτρονίων}}{\text{όγκος}}$

Μονάδες συγκέντρωσης:

$$\frac{1}{m^3} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{cm^3}$$

## Συγκέντρωση οπών

Σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας η συγκέντρωση ηλεκτρονίων δίνεται από τον τύπο:

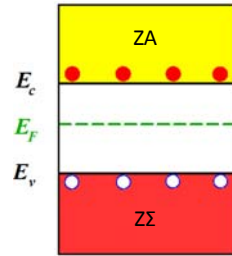
$$p = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{k_B T}}$$

$N_v$  Ενεργός πυκνότητα καταστάσεων στην άκρη της ΖΣ.

$$N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$m_h^*$  Ενεργός μάζα οπής (προσοχή: διαφορετική από την ενεργό μάζα για την αγωγιμότητα).

Ισχύει και για **εξωγενείς** ημιαγωγούς.



Συγκέντρωση οπών

$$p = \frac{\text{πλήθος οπών}}{\text{όγκος}}$$

Μονάδες συγκέντρωσης:

$$\frac{1}{m^3} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{cm^3}$$

## Νόμος δράσης των μαζών

Σε ένα ενδογενή ημιαγωγό λόγω θερμικής διέγερσης δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων (στη ΖΑ) και οπών (στη ΖΣ).

$$n = p = n_i$$

$n_i$  Ενδογενής συγκέντρωση. Είναι χαρακτηριστική ιδιότητα του υλικού.

Σχηματίζουμε το γινόμενο:

$$np =$$

$$N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T}} N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{k_B T}} =$$

$$N_c N_v e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T} - \frac{E_F - E_v}{k_B T}} =$$

$$N_c N_v e^{-\frac{E_c - E_v}{k_B T}} =$$

$$N_c N_v e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \Rightarrow$$

$$np = n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{k_B T}} = \text{σταθερό}$$

Νόμος δράσης των μαζών

Ισχύει σε **θερμική ισορροπία**, δηλαδή όταν δεν εφαρμόζεται εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο και ο ημιαγωγός δεν ακτινοβολείται.

Ισχύει και για **εξωγενείς** ημιαγωγούς.

## Ενέργεια Fermi ενδογενούς ημιαγωγού

Σε ένα ενδογενή ημιαγωγό ισχύει

$$n = p$$

Αντικαθιστούμε τις εκφράσεις:

$$N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T}} = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{k_B T}} \Rightarrow$$

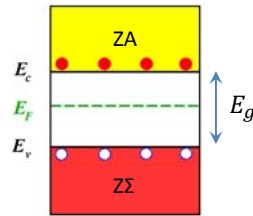
$$\frac{N_c}{N_v} = \frac{e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T}}}{e^{-\frac{E_F - E_v}{k_B T}}} \Rightarrow$$

$$\frac{N_c}{N_v} = e^{-\frac{E_c - E_F}{k_B T} + \frac{E_F - E_v}{k_B T}} \Rightarrow$$

$$\frac{N_c}{N_v} = e^{-\frac{2E_F - E_v - E_c}{k_B T}} \Rightarrow$$

$$\text{Όμως } E_c = E_v + E_g$$

$$\frac{N_c}{N_v} = e^{-\frac{2E_F - E_v - E_v - E_g}{k_B T}} \Rightarrow$$



$$\frac{N_c}{N_v} = e^{-\frac{2E_F - 2E_v - E_g}{k_B T}} \Rightarrow$$

$$\ln \frac{N_c}{N_v} = -\frac{2E_F - 2E_v - E_g}{k_B T} \Rightarrow$$

$$E_F = E_v + \frac{1}{2} E_g - \frac{1}{2} k_B T \ln \frac{N_c}{N_v}$$

Ενέργεια Fermi ενδογενούς ημιαγωγού

## Ενέργεια Fermi ενδογενούς ημιαγωγού

Βρήκαμε ότι:

$$E_F = E_v + \frac{1}{2} E_g - \frac{1}{2} k_B T \ln \frac{N_c}{N_v}$$

Συνεπώς η **ενέργεια Fermi δεν βρίσκεται στη μέση του χάσματος**.

Εξαρτάται από τα  $N_c$  και  $N_v$ .

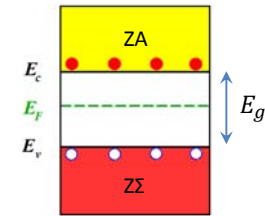
Ξέρουμε ότι:

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Αντικαθιστώντας βρίσκουμε:

$$E_F = E_v + \frac{1}{2} E_g - \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{m_e^*}{m_h^*}$$



**Μόνο** αν  $N_c = N_v$  ή  $m_e^* = m_h^*$  τότε η ενέργεια Fermi βρίσκεται στο μέσον του χάσματος:

$$E_F = E_v + \frac{1}{2} E_g$$

## Εξωγενείς ημιαγωγοί

Είναι ημιαγωγοί στους οποίους έχουν προστεθεί προσμίξεις.

Συγκέντρωση ηλεκτρονίων

$$n = \frac{\text{πλήθος ηλεκτρονίων}}{\text{όγκος}}$$

Συγκέντρωση οπών

$$p = \frac{\text{πλήθος οπών}}{\text{όγκος}}$$

Μονάδες συγκέντρωσης:

$$\frac{1}{m^3} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{cm^3}$$

Ημιαγωγοί τύπου n

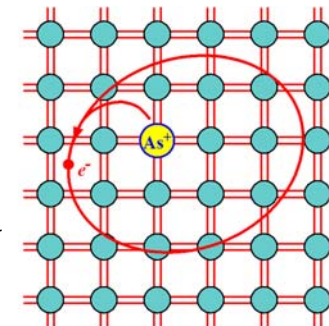
Προσθέτοντας προσμίξεις ενός **πεντασθενούς** στοιχείου, πχ. As, P, Sb δημιουργούμε ημιαγωγούς όπου η συγκέντρωση ηλεκτρονίων είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση οπών, δηλαδή  $n \gg p$

Ημιαγωγοί τύπου p

Προσθέτοντας προσμίξεις ενός **τρισθενούς** στοιχείου πχ. B, Al, Ga δημιουργούμε ημιαγωγούς όπου η συγκέντρωση οπών είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση ηλεκτρονίων, δηλαδή  $p \gg n$

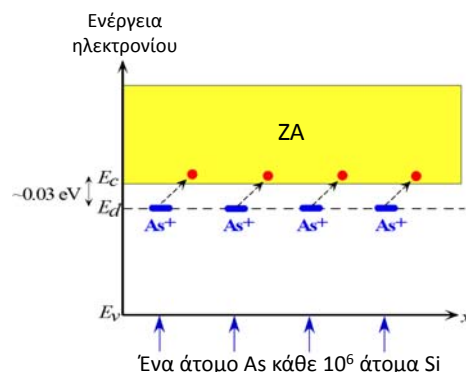
## Νόθευση τύπου n

- Εισάγουμε προσμίξεις πεντασθενούς στοιχείου πχ As.
- Κάθε άτομο πρόσμιξης πρέπει να περιβάλλεται από πολλά (εκατομμύρια) άτομα Si έτσι ώστε να δημιουργεί δεσμούς μόνο με άτομα Si.
- Το As σχηματίζει δεσμούς με 4 άτομα Si και ένα ηλεκτρόνιο του παραμένει εκτός δεσμών σε τροχιά γύρω από το άτομο As.
- Για να απελευθερώσουμε το ηλεκτρόνιο (ιονισμός) απαιτείται ενέργεια  $0.032eV$ .
- Η ενέργεια αυτή είναι συγκρίσιμη με τη θερμική ενέργεια σε θερμοκρασία δωματίου  $\sim 3k_B T \approx 0.07eV$ .
- Το πέμπτο ηλεκτρόνιο σθένους του As μπορεί να αποδεσμευτεί και να βρεθεί "ελεύθερο" στη ΖΑ.



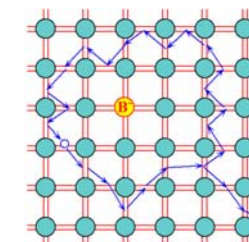
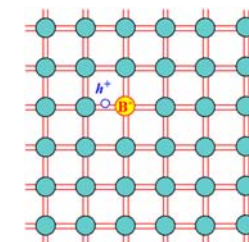
## Νόθευση τύπου n

- Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία **ελεύθερων ηλεκτρονίων** αλλά και **ακίνητων ιόντων  $As^+$** .
- Επειδή το άτομο As προσφέρει ένα ηλεκτρόνιο στη ΖΑ, λέμε ότι λειτουργεί ως **δότης**.
- Τυπικές συγκεντρώσεις νόθευσης  $N_d = 10^{15} \dots 10^{19} cm^{-3}$
- Επειδή  $N_d \gg n_i$  (πχ για το Si είναι  $n_i = 10^{10} cm^{-3}$ ) η συγκέντρωση ηλεκτρονίων είναι  $n = N_d$
- Όμως προσοχή: Σε χαμηλές θερμοκρασίες **δεν ιονίζονται όλοι οι δότες**, δηλαδή  $n < N_d$



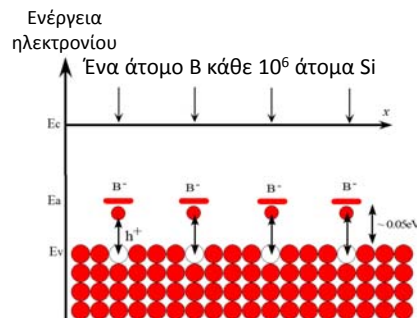
## Νόθευση τύπου p

- Εισάγουμε προσμίξεις τρισθενούς στοιχείου πχ B.
- Κάθε άτομο πρόσμιξης πρέπει να περιβάλλεται από πολλά (εκατομμύρια) άτομα Si έτσι ώστε να δημιουργεί δεσμούς μόνο με άτομα Si.
- Το B σχηματίζει δεσμούς με 3 άτομα Si.
- Ο τέταρτος δεσμός έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο, που ισοδυναμεί με τη δημιουργία οπής.
- Ένα γειτονικό ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταβεί στη θέση της οπής μέσω του φαινομένου σήραγγας.
- Με τον τρόπο αυτό η οπή μετακινείται μέσα στον κρύσταλλο γύρω από το ιόν  $B^-$
- Για να απελευθερωθεί η οπή από το ιόν  $B^-$  απαιτείται ενέργεια  $0.05eV$ .
- Η ενέργεια αυτή είναι συγκρίσιμη με τη θερμική ενέργεια σε θερμοκρασία δωματίου  $\sim 3k_B T \approx 0.07eV$ .



## Νόθευση τύπου p

- Η οπή αποσπάται από το ιόν B<sup>-</sup> και περιφέρεται ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο.
- Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία **οπών** αλλά και **ακίνητων ιόντων B<sup>-</sup>**.
- Επειδή το άτομο B δεσμεύει ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό δεσμό Si-Si, λέμε ότι λειτουργεί ως **αποδέκτης**.
- Τυπικές συγκεντρώσεις νόθευσης  $N_a = 10^{15} \dots 10^{19} \text{cm}^{-3}$
- Επειδή  $N_a \gg n_i$  (πχ για το Si είναι  $n_i = 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ) η συγκέντρωση οπών είναι  $p = N_a$



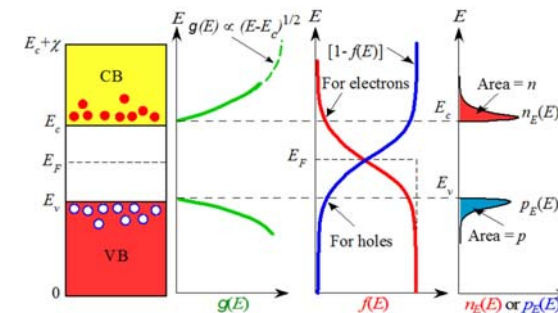
## Συγκέντρωση φορέων και πυκνότητα καταστάσεων

Πλήθος ηλεκτρονίων μεταξύ  $E$  και  $E + dE$

$$n_E(E)dE = g_{cb}(E)f(E)dE$$

Σύνολο ηλεκτρονίων

$$n = \int_{E_c}^{E_c+\chi} n_E(E)dE = \int_{E_c}^{E_c+\chi} g_{cb}(E)f(E)dE$$



## Συγκέντρωση φορέων και πυκνότητα καταστάσεων

Πυκνότητα καταστάσεων

$$g_{cb} = \frac{(\pi 8\sqrt{2})m_e^{*3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c}$$

Κατανομή Fermi-Dirac

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

Κατανομή Boltzmann

$$f(E) \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

Μέγιστο του  $n_E(E)$

$$\text{Βρίσκεται στο } E_c + \frac{kT}{2}$$

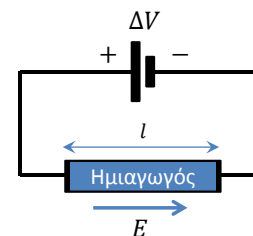
Μέση ενέργεια ηλεκτρονίων στη ΖΑ

$$\bar{E}_{CB} = \int_{E_c}^{E_c+\chi} E n_E(E) dE =$$

$$\int_{E_c}^{E_c+\chi} E g_{cb}(E) f(E) dE =$$

$$E_c + \frac{3}{2} kT$$

## Αγωγή του ηλεκτρισμού



Στους ημιαγωγούς έχουμε δύο φορείς φορτίου (φορείς αγωγιμότητας)

- Ηλεκτρόνια (φορτίο:  $-e$ )
- Οπές (φορτίο:  $+e$ )

Έχουμε δηλαδή **αμφιπολική ή διπολική αγωγιμότητα**.

Και οι δύο φορείς συνεισφέρουν στην πυκνότητα ρεύματος:

$$J = env_{de} + epv_{dh}$$

$v_{de}$  ταχύτητα ολίσθησης ηλεκτρονίων

$$v_{de} = \mu_e E_x$$

$v_{dh}$  ταχύτητα ολίσθησης οπών

$$v_{dh} = \mu_h E_x$$

$n$  συγκέντρωση ηλεκτρονίων

$p$  συγκέντρωση οπών

## Αγωγή του ηλεκτρισμού

Η πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$J = env_{de} + epv_{dh}$$

$$v_{de} = \mu_e E_x \quad v_{dh} = \mu_h E_x$$

Η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να γραφεί ως

$$J = (en\mu_e + ep\mu_h)E_x$$

$$J = \sigma E_x$$

$$\mu_e = \frac{e \tau_e}{m_e^*}$$

Ευκίνησια  
(κινητικότητα)  
ηλεκτρονίων

$$\mu_h = \frac{e \tau_h}{m_h^*}$$

Ευκίνησια  
(κινητικότητα)  
οπών

$\tau$  μέσος ελεύθερος χρόνος μεταξύ σκεδάσεων.

$m_e^*$  ενεργός μάζα ηλεκτρονίου

$m_h^*$  ενεργός μάζα οπής

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

## Εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία

Η αγωγιμότητα σε ημιαγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = en\mu_e + ep\mu_h$$

Μέχρι τώρα υπολογίσαμε την αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου (T=300K) θεωρώντας ότι:

- Η συγκέντρωση των προσμίξεων είναι μεγαλύτερη από  $n_i$
- Ισχύει  
 $n = N_d$  για ημιαγωγούς τύπου n  
 $p = N_a$  για ημιαγωγούς τύπου p

Για να υπολογίσουμε την αγωγιμότητα σε άλλες θερμοκρασίες πρέπει να λάβουμε υπόψη μας:

- Την εξάρτηση της **συγκέντρωσης των φορέων** από τη θερμοκρασία.
- Την εξάρτηση της **ευκίνησιας των φορέων** από τη θερμοκρασία.

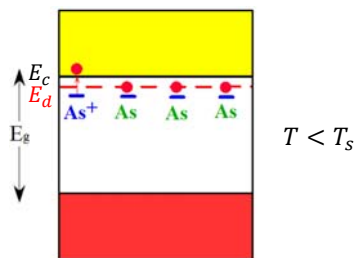
Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία για **ημιαγωγό τύπου n**.

Διακρίνουμε τρεις περιοχές θερμοκρασιών:

- Χαμηλές θερμοκρασίες
- Ενδιάμεσες θερμοκρασίες
- Υψηλές θερμοκρασίες.

## Εξάρτηση της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων από τη θερμοκρασία

Περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών



Σε θερμοκρασία T=0 κανένας δότης δεν είναι ιονισμένος.

Η ενέργεια ιονισμού ενός δότη  $\Delta E = E_c - E_d$  είναι μικρή ( $\ll E_g$ ).

Όσο αυξάνει η θερμοκρασία όλο και περισσότεροι δότες ιονίζονται.

Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων δίνεται από τον τύπο:

$$n = \left(\frac{1}{2} N_c N_d\right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\Delta E}{2k_B T}}$$

Είναι αντίστοιχος με

$$n_i = (N_c N_v)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

από το νόμο δράσης των μαζών.

Επειδή

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

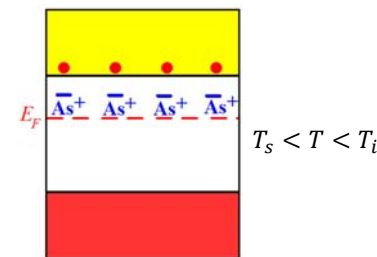
Μπορούμε να γράψουμε:

$$n(T) \propto T^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{\Delta E}{2k_B T}}$$

Κυρίαρχος όρος είναι ο εκθετικός.

## Εξάρτηση της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων από τη θερμοκρασία

Περιοχή ενδιάμεσων θερμοκρασιών



Στην περιοχή αυτή όλοι δότες έχουν ιονιστεί, δηλαδή

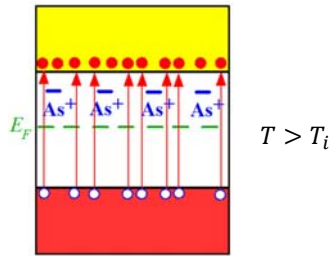
$$n = N_d$$

Η συγκέντρωση  $n$  παραμένει σταθερή σε όλη την περιοχή.



## Εξάρτηση της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων από τη θερμοκρασία

Περιοχή υψηλών θερμοκρασιών



Ηλεκτρόνια από τη ΖΣ διεγείρονται θερμικά και μεταβαίνουν στη ΖΑ.

Ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν ενδογενής ημιαγωγός.

Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι

$$n_i = n(T) \gg N_d$$

Σε ενδογενή ημιαγωγό:

$$n = p$$

Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων δίνεται από:

$$n = (N_c N_v)^{1/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

Επειδή:

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

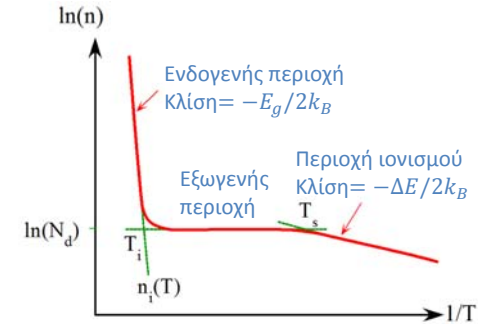
Μπορούμε να γράψουμε:

$$n(T) \propto T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

Κυρίαρχος όρος είναι ο εκθετικός.

## Εξάρτηση της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων από τη θερμοκρασία

$$n(T) \begin{cases} \propto T^{3/4} e^{-\frac{\Delta E}{2k_B T}} & T < T_s & \text{Περιοχή ιονισμού} \\ = N_d & T_s < T < T_i & \text{Εξωγενής περιοχή} \\ \propto T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} & T > T_i & \text{Ενδογενής περιοχή} \end{cases}$$



## Εξάρτηση της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων από τη θερμοκρασία

Θερμοκρασιακή εξάρτηση της ενδογενούς συγκέντρωσης  $n_i$

