

Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

- *Ενδογενείς (καθαροί) ημιαγωγοί*
- *Εξωγενείς (νοθευμένοι) ημιαγωγοί*
- *Συγκεντρώσεις φορέων φορτίου*
- *Αντιστάθμιση ατόμων νόθευσης*

Λευτέρης Καπετανάκης

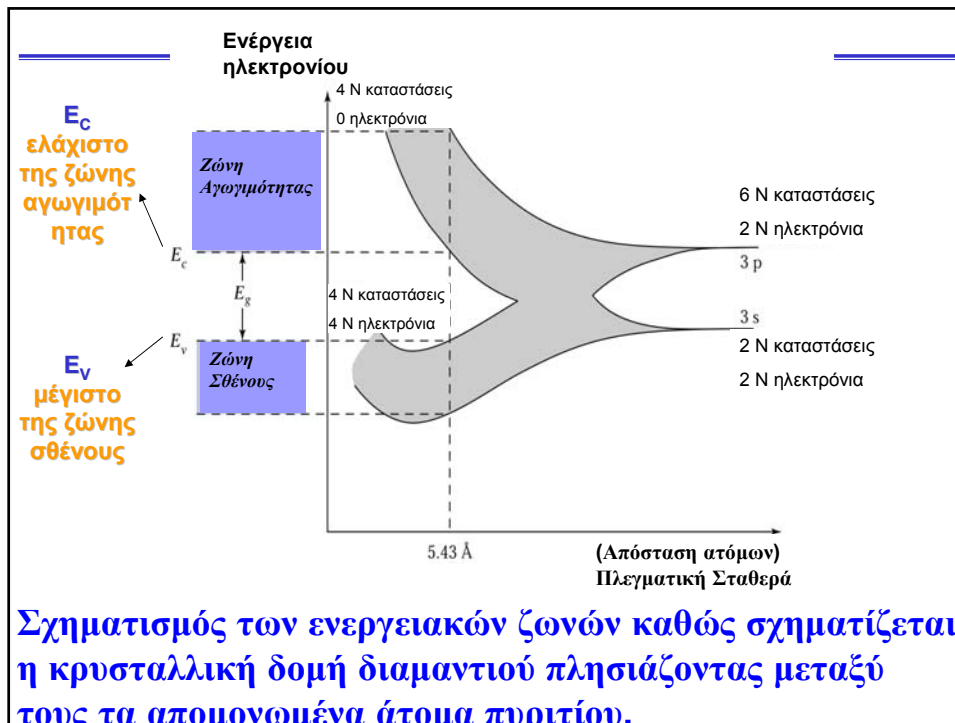


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

Άνοιξη 2010

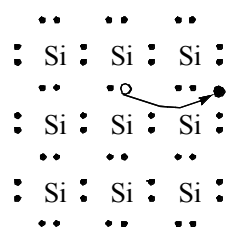
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες είναι κτήμα διαφόρων συγγραφέων και παρέχονται στον αντίστοιχο δικτυότόπό τους.



Ζεύγος Ηλεκτρονίου-Οπής (ΖΗΟ)

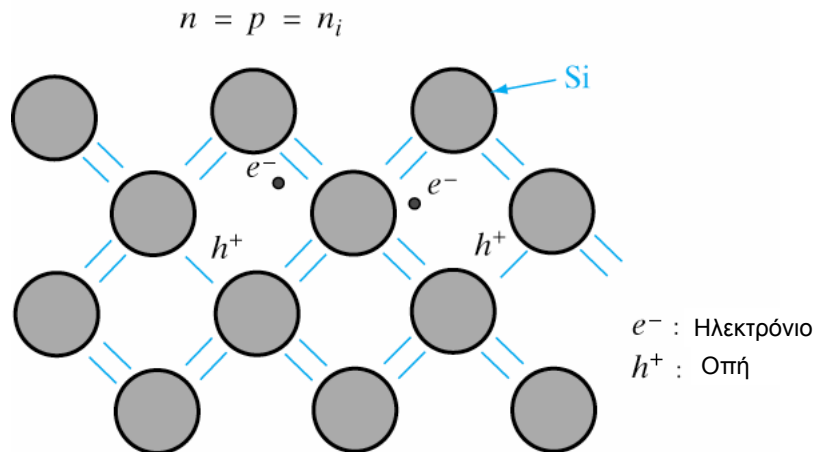
Όταν ελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο σθένους και γίνεται **ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας**, μία **οπή** δημιουργείται επίσης

2-D αναπαράσταση



Σημείωση: Η οπή (μαζί με το συνδεδεμένο θετικό φορτίο της) είναι ευκίνητη!

Ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στο μοντέλο ομοιοπολικού δεσμού του κρυστάλλου Si



ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Ορισμοί συγκέντρωσης φορέων φορτίου

n = αριθμός ευκίνητων ηλεκτρονίων ανά cm^3

p = αριθμός των οπών ανά cm^3

n_i = ενδογενής συγκέντρωση φορέων ανά cm^3

Στους καθαρούς ημιαγωγούς (**μόνο θερμική γένεση ΖΗΟ**) ,

$$n = p = n_i$$

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Γένεση (Generation)

- ❑ Οι ευκίνητοι φορείς, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και οι οπές μπορούν να δημιουργηθούν στο καθαρό (ενδογενές, intrinsic) πυρίτιο με θερμική γένεση (**thermal generation**).
 - Ο ρυθμός θερμικής γένεσης g_i είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας (δηλ. $g_i = g_i(T)$) και αυξάνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία T
- ❑ Επισημαίνεται ότι τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και οι οπές δημιουργούνται συνεχώς, αν $T > 0$.

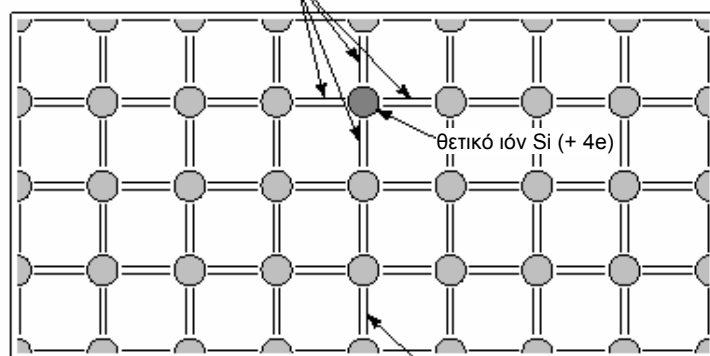
Στη θερμική γένεση, η **ενέργεια χάσματος (E_g)** είναι η **ενέργεια η οποία απαιτείται για να σπάσει ο δεσμός**

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Θερμοκρασία $T = 0\text{K}$

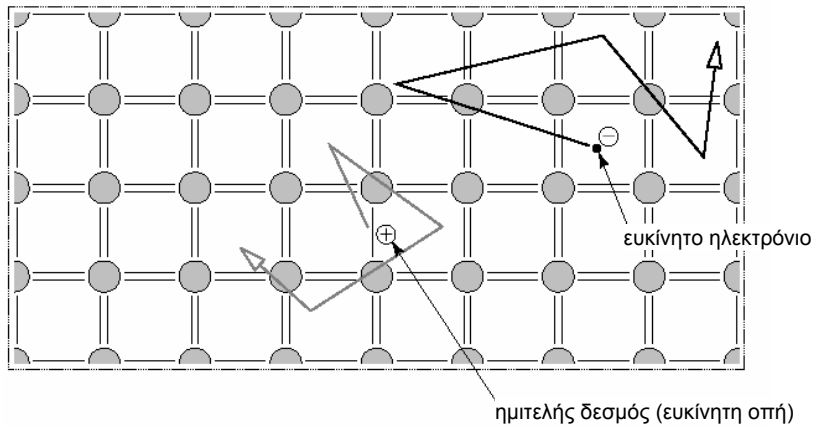
κάθε θετικό ιόν Si συνεισφέρει 4 ηλεκτρόνια σθένους (- 4e)



δύο ηλεκτρόνια σε κάθε δεσμό

- ❑ Όλοι οι δεσμοί είναι συμπληρωμένοι
- ❑ Δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια
- ❑ Η ζώνη σθένους είναι γεμάτη
- ❑ Η ζώνη αγωγιμότητας είναι άδεια

Σε πεπερασμένη Θερμοκρασία $T > 0K$



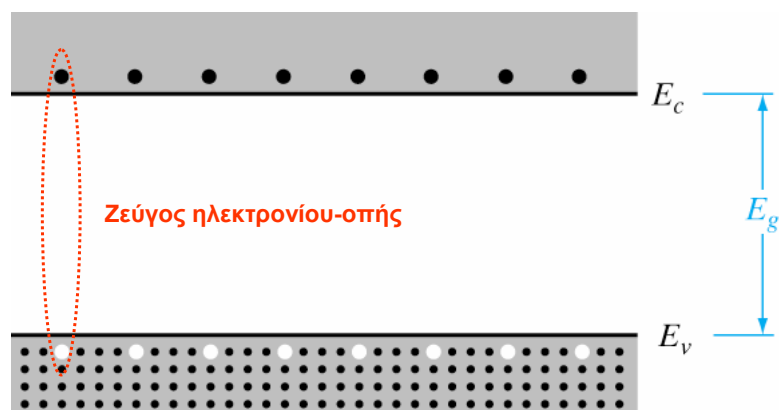
- ☐ Μερικοί δεσμοί σπάνε
- ☐ Ελεύθερα ηλεκτρόνια (ευκίνητο αρνητικό φορτίο, $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)
- ☐ Ελεύθερες οπές (ευκίνητο θετικό φορτίο, $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Ηλεκτρόνια & οπές στους ημιαγωγούς

Τυπική δομή ζώνης σε $T > 0 \text{ K}$



ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Επανασύνδεση (Recombination)

- Όταν ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας και μία οπή συναντηθούν, καθένα εξαφανίζεται, διαδικασία η οποία καλείται “επανασύνδεση”. Η απώλεια της ενέργειας του ηλεκτρονίου αγωγιμότητας (όταν αυτό “πέφτει” ξανά μέσα στον ομοιοπολικό δεσμό) μπορεί να απελευθερωθεί με δύο τρόπους:
 1. στο κρυσταλλικό πλέγμα του ημιαγωγού (δονήσεις)
“θερμική επανασύνδεση” → ο ημιαγωγός θερμαίνεται
 2. Με εκπομπή φωτονίου
“οπτική επανασύνδεση” → εκπομπή φωτός
 - Η οπτική επανασύνδεση είναι αμελητέα στο Si. Αυτή είναι σημαντική στα υλικά των ημιαγωγικών ενώσεων, και αποτελεί τη βάση των διόδων εκπομπής φωτός (light-emitting diodes, LED) και των διόδων laser.

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Ρυθμοί γένεσης και επανασύνδεσης

- Ο ρυθμός γένεσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία T , αλλά είναι ανεξάρτητος από τα n και p :
$$g = g_{i(thermal)}(T) + g_{optical} + g_{electrical}$$
- Ο ρυθμός επανασύνδεσης είναι ανάλογος αμφοτέρων των n και p :
$$r \propto np$$
- Στη σταθερή κατάσταση (steady state), υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ των ρυθμών γένεσης και επανασύνδεσης.
$$g = r \quad \Rightarrow \quad np = f(T)$$
- Μία ειδική περίπτωση για τη συνθήκη σταθερής κατάστασης είναι η **θερμική ισορροπία (thermal equilibrium)**: απουσία ηλεκτρικών και οπτικών πηγών

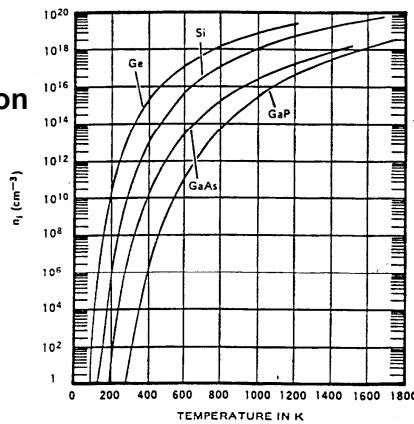
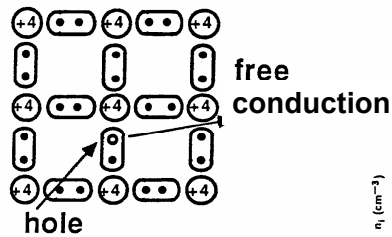
$$np = n_i^2(T)$$

(“Νόμος δράσης των μαζών”, “Law of Mass Action”)

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Καθαρό Si



$$\underline{Si}: n_i = 3.9 \times 10^{16} T^{3/2} e^{-\frac{0.605 \text{ eV}}{kT}} / \text{cm}^3$$

□ Για το πυρίτιο σε θερμοκρασία δωματίου ($T=300\text{K}$):

$$n_i \simeq 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

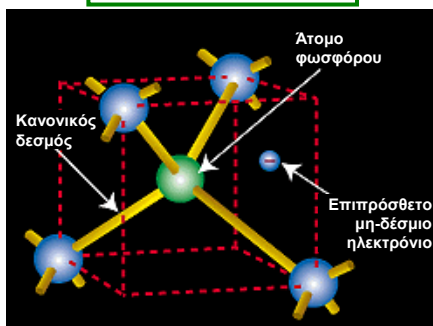
ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

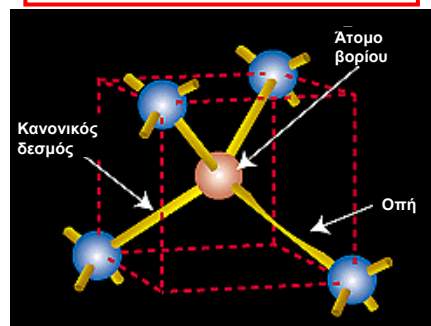
Νόθευση (Doping)

Με την αντικατάσταση ενός ατόμου Si με ειδικό άτομο πρόσμιξης (στοιχείο της Στήλης V ή της Στήλης III), δημιουργείται ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας ή μία οπή.

Δότες: P, As, Sb



Αποδέκτες: B, Al, Ga, In



Η τυπική περιοχή της συγκέντρωσης νόθευσης κυμαίνεται από 10^{14} cm^{-3} έως 10^{20} cm^{-3}

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Ενέργεια πρόσδεσης δότη

Προσεγγιστικά, η ενέργεια που απαιτείται για να διεγείρει το 5^ο ηλεκτρόνιο του ατόμου του δότη στην Ζ.Α μπορεί να υπολογισθεί θεωρώντας ότι το άτομο έχει 4 ηλεκτρόνια δεμένα ισχυρά σε ομοιοπολικούς δεσμούς και ένα 5^ο ηλεκτρόνιο προσδεμένο χαλαρά στο άτομο. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του Bohr, το μέγεθος της θεμελιώδους ενεργειακής κατάστασης ($n = 1$) ενός τέτοιου ηλεκτρονίου δίνεται σαν:

$$E = \frac{mq^4}{2K^2\hbar^2} \Rightarrow \frac{m^*q^4}{2K^2\hbar^2} \quad K = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r$$

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

The figure illustrates the energy levels and carrier generation in doped silicon. Part (a) shows donor levels (Ed) in the conduction band (Ec) for T=0K and T=50K. Part (b) shows acceptor levels (Ea) in the valence band (Ev) for T=0K and T=50K. Part (c) shows the crystal structure of Si with B and As dopants.

(α) Μοντέλο ενεργειακής ζώνης και μοντέλο χημικού δεσμού των ατόμων νόθευσης σε ένα ημιαγωγό :

(α) χορηγία ηλεκτρονίων από το ενεργειακό επίπεδο του δότη στη ζώνη αγωγιμότητας.

(β) αποδοχή ηλεκτρονίων της ζώνης σθένους από ένα ενεργειακό επίπεδο αποδέκτη, και η συνακόλουθη δημιουργία οπών στη ζώνη σθένους.

(γ) άτομα δότη και αποδέκτη στο μοντέλο ομοιοπολικού δεσμού του κρυστάλλου Si.

τους ημιαγωγούς

Ορολογία

ενδογενής (intrinsic) ημιαγωγός: “μη-νοθευμένος” ημιαγωγός
οι ηλεκτρικές ιδιότητες είναι οι έμφυτες του υλικού

εξωγενής (extrinsic) ημιαγωγός: νοθευμένος ημιαγωγός
οι ηλεκτρικές ιδιότητες καθορίζονται από τα πρόσθετα άτομα πρόσμιξης

δότης (donor): άτομο πρόσμιξης που αυξάνει τη συγκέντρωση των ηλεκτρον.
στοιχεία της ομάδας V (P, As)

αποδέκτης (acceptor): άτομο πρόσμιξης που αυξάνει τη συγκέντρ. των οπών
στοιχεία της ομάδας III (B, In)

n-τύπου υλικό: ημιαγωγός που περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια από οπές

p-τύπου υλικό: ημιαγωγός που περιέχει περισσότερες οπές από ηλεκτρόνια

φορέας πλειονότητας (majority carrier): ο φορέας με την περισσότερη
αφθονία μέσα στο ημιαγωγικό δείγμα

φορέας μειονότητας (minority carrier): ο φορέας με την ελάχιστη αφθονία
μέσα στο ημιαγωγικό δείγμα

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Σημαντικές Έννοιες

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Συγκέντρωση φορέων

- $n \equiv$ συγκέντρωση (ελεύθερων) ηλεκτρονίων [cm^{-3}]
- $p \equiv$ συγκέντρωση οπών [cm^{-3}]

Γένεση και Επανασύνδεση

ΓΕΝΕΣΗ = σπάσιμο ομοιοπολικού δεσμού και δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής (ZHO)

- Απαιτεί ενέργεια από διάφορες πηγές (πχ, θερμική, οπτική)
- Ρυθμός Γένεσης: $G = G(\text{θερμ}) + G_{\text{οπτ}} + \dots [\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$
- Γενικά, ατομική πυκνότητα $\gg n, p \Rightarrow$

$$G \neq f(n, p)$$

- ουσιαστικά, η παροχή δεσμών για σπάσιμο είναι ανεξάντλητη

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗ = σχηματισμός ομοιοπολικού δεσμού με προσέγγιση ενός ηλεκτρονίου και μιας οπής

- Απελευθέρωση ενέργειας (με τη μορφή θερμότητας ή φωτός)
- Ρυθμός Επανασύνδεσης: $R = [\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$
- 1 γεγονός επανασύνδεσης απαιτεί 1 ηλεκτρόνιο + 1 οπή

$$\Rightarrow R \propto n \cdot p$$

Ενδογενής Ημιαγωγός

ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ (Θ.Ι.)

Σταθερή κατάσταση + απουσία εξωτερικών πηγών ενέργειας

Ο ρυθμός γένεσης στη Θ. Ι. : $G_o = f(T)$

Ο ρυθμός επανασύνδεσης στη Θ. Ι. : $R_o \propto n_o \cdot p_o$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: ο δείκτης “ο” δηλώνει Θ.Ι.

(π.χ., n_o = συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε θερμική ισορροπία)

“Νόμος δράσης των μαζών” (“Law of Mass Action”)

Στη Θερμική Ισορροπία κάθε διαδικασία εξισώνεται με την αντίστροφη της:

$$G_o(T) = R_o \Rightarrow n_o p_o = k_o G_o(T)$$

$$n_o p_o = n_i^2(T) \quad \text{Συνάρτηση MONO της θερμ. (T)}$$

$T \uparrow \Rightarrow n_i \uparrow$

Στο Si για $T = 300K$ (θερμοκρασία δωματίου)

$$n_o = p_o = n_i \approx 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$n_i \equiv$ ενδογενής συγκέντρωση φορέων [cm^{-3}]
(*intrinsic carrier concentration*)

Νόθευση = διαδικασία ελεγχόμενης εισαγωγής ξένων ατόμων με σκοπό την μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του ημιαγωγού

Δότης (donor): άτομο πρόσμιξης που αυξάνει τη συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων

στοιχεία της ομάδας V (P, As)

Ορισμός: N_d (ή N_d^+) $\equiv$ συγκέντρωση ιονισμένων δοτών [cm^{-3}]

• Αν $N_d \ll n_i$, η νόθευση δεν παίζει κανένα ρόλο

– Ενδογενής ημιαγωγός $\rightarrow n_o = p_o = n_i$

• Αν $N_d \gg n_i$, η νόθευση ελέγχει τη συγκέντρωση των φορέων

– **Εξωγενής ημιαγωγός** $\Rightarrow n_o = N_d \quad p_o = \frac{n_i^2}{N_d}$
Για 100% ιονισμένους δότες

Παρατήρηση: $n_o \gg p_o$: ημιαγωγός **n-τύπου**

Παράδειγμα:

$$N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \rightarrow n_o = 10^{17} \text{ cm}^{-3}, p_o = 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

• **Ηλεκτρόνια** = φορείς πλειονότητας • **Οπές** = φορείς μειονότητας

Αποδέκτης (acceptor): άτομο πρόσμιξης που αυξάνει τη συγκέντρωση των οπών

στοιχεία της ομάδας III (B, In)

Ορισμός: N_a (ή N_a^-) $\equiv$ συγκέντρωση ιονισμένων αποδεκτών [cm^{-3}]

• Αν $N_a \ll n_i$, η νόθευση δεν παίζει κανένα ρόλο

– Ενδογενής ημιαγωγός $\rightarrow n_o = p_o = n_i$

• Αν $N_a \gg n_i$, η νόθευση ελέγχει τη συγκέντρωση των φορέων

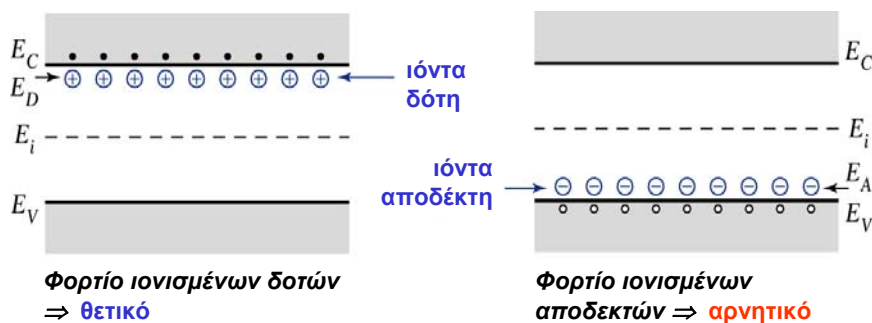
– **Εξωγενής ημιαγωγός** $\Rightarrow$ $p_o = N_a$ $n_o = \frac{n_i^2}{N_a}$
Για 100% ιονισμένους αποδέκτες

Παρατήρηση: $p_o \gg n_o$: ημιαγωγός **p-τύπου**

πχ: $N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \rightarrow p_o = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $n_o = 10^3 \text{ cm}^{-3}$

• **Ηλεκτρόνια** = φορείς μειονότητας • **Οπές** = φορείς πλειονότητας

Φορτίο ιονισμένων ατόμων νόθευσης



Σημαντικές εξισώσεις στη Θερμική Ισορροπία

Ουδετερότητα φορτίου

Ο ημιαγωγός παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερος ακόμα και όταν έχει νοθευτεί

Συνολικό φορτίο στον ημιαγωγό = 0

$$p_o - n_o + N_d - N_a = 0$$

Νόμος δράσης των μαζών

$$n_o p_o = n_i^2$$

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Συγκεντρώσεις φορέων φορτίου

Λύνοντας τις δύο αυτές εξισώσεις ως προς n_o και p_o έχουμε:

Για 100% ιονισμένα άτομα νόθευσης, δηλαδή όταν:

N_d^+ (ή N_d) = συνολική συγκέντρωση ατόμων δοτών (= N_D)

N_a^- (ή N_a) = συνολική συγκέντρωση ατόμων αποδεκτών (= N_A)

$$n_o = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

$$p_o = \frac{N_A - N_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A - N_D}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

Παρατήρηση: Οι συγκεντρώσεις των φορέων εξαρτώνται από την καθαρή συγκέντρωση των προσμίξεων ($N_D - N_A$) !

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ (COMPENSATION)

(Λεπτομέρειες παρακάτω)

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Υλικά N-τύπου και P-τύπου

Αν $N_D \gg N_A$ (ώστε $N_D - N_A \gg n_i$):

$$n_0 \cong N_D - N_A \quad \text{και} \quad p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_D - N_A}$$

$n_0 \gg p_0 \rightarrow$ το υλικό είναι “n-τύπου”

Αν $N_A \gg N_D$ (ώστε $N_A - N_D \gg n_i$):

$$p_0 \cong N_A - N_D \quad \text{και} \quad n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_A - N_D}$$

$p_0 \gg n_0 \rightarrow$ το υλικό είναι “p-τύπου”

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Εξάρτηση της Συγκέντρωσης Φορέων από τη Θερμοκρασία, για νοθευμένο ημιαγωγό

(α) Σε χαμηλή θερμοκρασία, ο αριθμός των ΖΗΟ είναι αμελητέος και τα ηλεκτρόνια των δοτών είναι ακόμα δεσμευμένα στα άτομα των δοτών (“παγωμένες καταστάσεις”).

(β) Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, τα ηλεκτρόνια των δοτών αρχίζουν να παρέχονται στη ζώνη αγωγιμότητας, και σε θερμοκρασία $\sim 100\text{K}$, όλα τα άτομα δοτών είναι ιονισμένα (**περιοχή ιονισμού**) όπου $n_0 = N_d$ αφού ένα ηλεκτρόνιο παρέχεται για κάθε άτομο δότη.

(γ) Όταν κάθε διαθέσιμο εξωγενές ηλεκτρόνιο έχει μεταφερθεί στη Ζ.Α., η συγκέντρωση n_0 παραμένει ουσιαστικά σταθερή με τη θερμοκρασία έως ότου η ενδογενής συγκέντρωση (n_i) γίνει συγκρίσιμη με την εξωγενή συγκέντρωση (N_d) (**Εξωγενής περιοχή**).

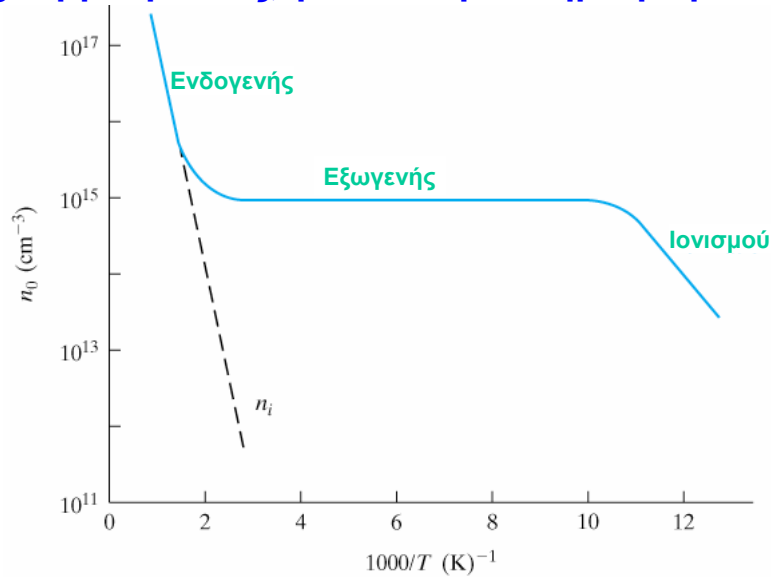
(δ) Σε ψηλότερες θερμοκρασίες, καθώς $n_i \gg N_d$, οι ενδογενείς φορείς κυριαρχούν (**Ενδογενής περιοχή**). Στις περισσότερες διατάξεις, είναι επιθυμητό να ελέγχεται η συγκέντρωση με νόθευση παρά με με θερμική γένεση ΖΗΟ. **Επομένως, τα ημιαγώγιμα υλικά είναι συνήθως νοθευμένα με τέτοιο τρόπο ώστε η εξωγενής περιοχή να εκτίνεται πέρα από τις ψηλές θερμοκρασίες στις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η διάταξη.**

(Δείτε επόμενη διαφάνεια)

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Περιοχές Συγκέντρωσης Φορέων σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, για νοθευμένο ημιαγωγό

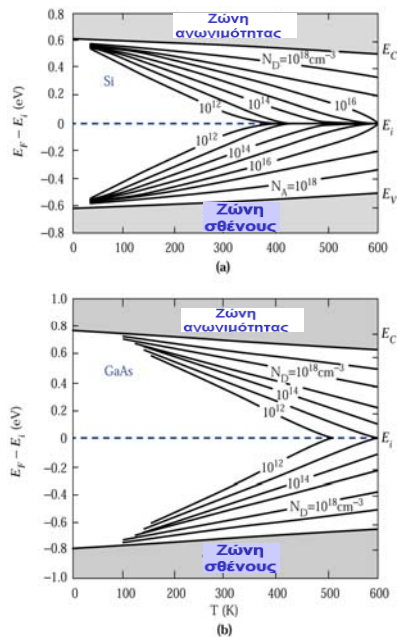


ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Εξάρτηση της Ενέργειας Fermi από τη Θερμοκρασία, για νοθευμένο ημιαγωγό

Επίπεδο Fermi για το Si και το GaAs σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης νόθευσης. Επίσης απεικονίζεται, η εξάρτηση του ενεργειακού χάσματος από τη θερμοκρασία



ΤΛ1001 – 2010

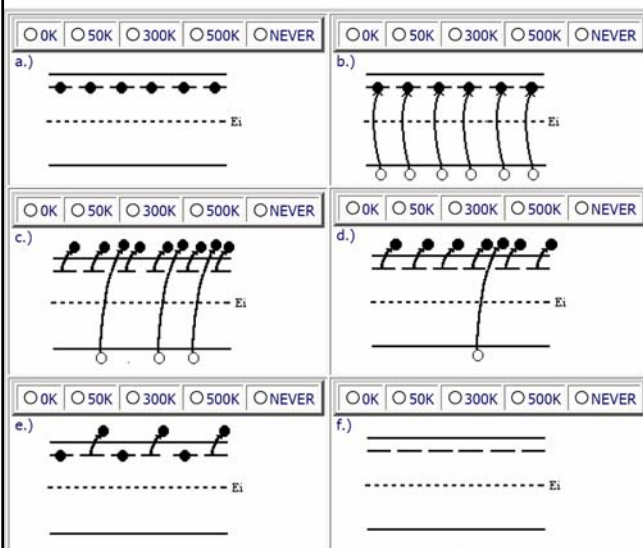
L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

4) (20 μονάδες) Ένα δισκίο πυριτίου είναι ομοιόμορφα νοθευμένο με προσμίξεις p-τύπου με $N_A = 10^{15}/\text{cm}^3$. α) Ποια είναι η συγκέντρωση των οπών και των ηλεκτρονίων σε θερμοκρασία $T = 0\text{K}$. Αν η ενδογενής συγκέντρωση ηλεκτρονίων-οπών σε θερμοκρασία $T=300\text{K}$ και $T=1150\text{K}$ είναι $n_i(300\text{K}) \sim 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ και $n_i(1150\text{K}) \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ποια είναι η συγκέντρωση των οπών και των ηλεκτρονίων σε αυτές τις θερμοκρασίες;

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Άσκηση 1 Δότες έχουν προστεθεί σε έναν ημιαγωγό για να τον κάνουν n-τύπου (υποθέστε ότι $N_D \gg n_i$). Τα ενεργειακά διαγράμματα δίπλα παριστάνουν στιγμιότυπα του νοθευμένου ημιαγωγού σε διάφορες θερμοκρασίες.



Σημειώστε τη θερμοκρασία στην οποία αντιστοιχεί κάθε ενεργειακό διάγραμμα δίπλα

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Απάντηση

0K

50K

300K

500K

Αυτές οι περιπτώσεις δεν μπορούν να συμβούν ποτέ (Γιατί;)

0K

50K

ΤΛ1001 – 2010
L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Άσκηση 2 Αποδέκτες έχουν προστεθεί σε έναν ημιαγωγό για να τον κάνουν p-τύπου (υποθέστε ότι $N_A \gg n_i$). Τα ενεργειακά διαγράμματα δίπλα παριστάνουν στιγμιότυπα του νοθευμένου ημιαγωγού σε διάφορες θερμοκρασίες.

a.)

0K 50K 300K 500K NEVER

b.)

0K 50K 300K 500K NEVER

c.)

0K 50K 300K 500K NEVER

d.)

0K 50K 300K 500K NEVER

e.)

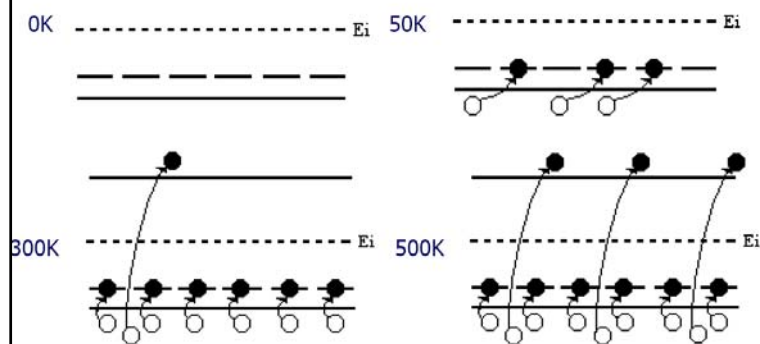
0K 50K 300K 500K NEVER

f.)

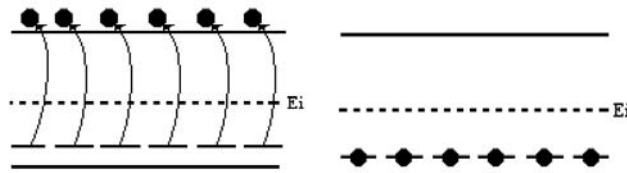
0K 50K 300K 500K NEVER

Σημειώστε τη θερμοκρασία στην οποία αντιστοιχεί κάθε ενεργειακό διάγραμμα δίπλα

Απάντηση



Αυτές οι περιπτώσεις δεν μπορούν να συμβούν ποτέ (Γιατί;)



Αντιστάθμιση νόθευσης

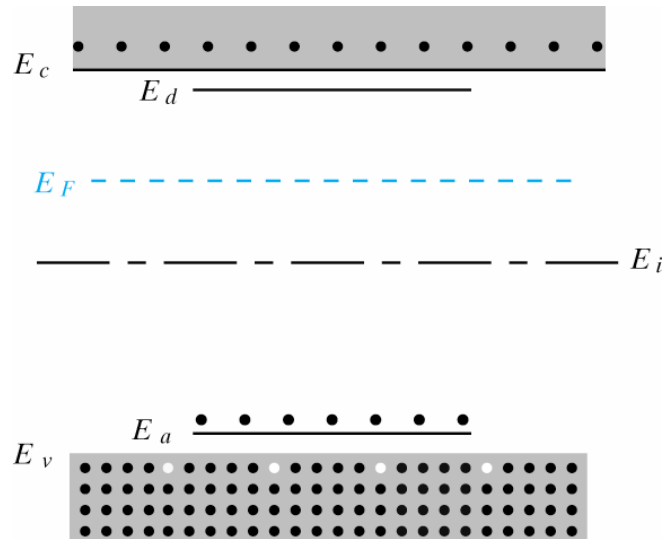
Με τη νόθευση, το υλικό περιέχει N_d δότες ή N_a αποδέκτες έτσι ώστε η εξωγενής συγκέντρωση φορέων να είναι $n_0 = N_d$ ή $p_0 = N_a$, αντίστοιχα για υλικό **n-τύπου** ή **p-τύπου**.

Συχνά, ο ημιαγωγός περιέχει και τα δύο είδη νόθευσης, δότες και αποδέκτες. Αν $N_d > N_a$ η επικράτηση των δοτών κάνουν το υλικό **n-τύπου**, και έτσι το επίπεδο Fermi (E_F) βρίσκεται στο επάνω μέρος του ενεργειακού χάσματος (δηλ. πάνω από το ενδογενές επίπεδο E_i).

Με το επίπεδο E_F πολύ υψηλότερα από το ενεργειακό επίπεδο των αποδεκτών E_a , αυτό το επίπεδο E_a είναι ουσιαστικά γεμάτο με ηλεκτρόνια. Όμως, επειδή η ενέργεια E_F βρίσκεται πολύ πάνω από το επίπεδο E_i , η συγκέντρωση των οπών στη **Ζ.Σ.** δεν μπορεί να είναι η ίδια με τη συγκέντρωση των αποδεκτών επειδή η κατάληψη των καταστάσεων του αποδέκτη (E_a) συμβαίνει με δαπάνη των ηλεκτρονίων δότη που παρέχονται στη ζώνη αγωγιμότητας.

Η αντιστάθμιση μπορεί να γίνει περισσότερο κατανοητή αν θεωρήσουμε ότι μια ενεργειακή κατάσταση ενός ατόμου αποδέκτη καταλαμβάνεται από ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους, γεγονός που δημιουργεί μια οπή στη ζώνη σθένους, οπότε αυτή η οπή 'γεμίζει' με ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας **μέσω επανασύνδεσης**. Τελικά, εξετάζοντας όλα τα άτομα του αποδέκτη, η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων που προκύπτει στη **Ζ.Α.** θα είναι $N_d - N_a$ αντί της συνολικής N_d .

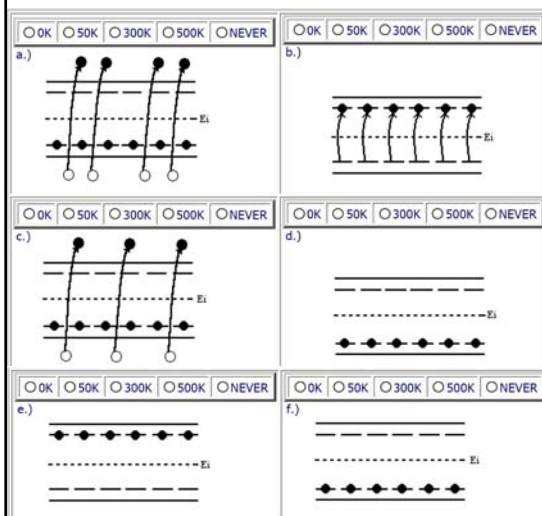
Αντιστάθμιση νόθευσης $N_d > N_a$



ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Άσκηση 3 Δότες και αποδέκτες έχουν προστεθεί σε έναν ημιαγωγό για να τον αντισταθμίσουν. Σε αυτήν τη περίπτωση οι συγκεντρώσεις των ατόμων νόθευσης N_D και N_A είναι περίπου ίσες και τείνουν να εξουδετερώνουν η μία την άλλη έτσι ώστε ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σχεδόν σαν να ήταν ενδογενής. Τα ενεργειακά διαγράμματα δίπλα παριστάνουν στιγμιότυπα του νοθευμένου ημιαγωγού σε διάφορες θερμοκρασίες.



Σημειώστε τη θερμοκρασία στην οποία αντιστοιχεί κάθε ενεργειακό διάγραμμα δίπλα

ημιαγωγούς

Απάντηση

0K

50K

300K

500K

Αυτές οι περιπτώσεις δεν μπορούν να συμβούν ποτέ (Γιατί;)

ΤΛ1001 – 2010 L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Άσκηση 4 Δότες και αποδέκτες έχουν προστεθεί σε έναν ημιαγωγό για να τον αντισταθμίσουν. Σε αυτήν τη περίπτωση η συγκέντρωση των ατόμων δότη N_D είναι τετραπλάσια από τη συγκέντρωση των ατόμων αποδέκτη N_A . Τα ενεργειακά διαγράμματα δίπλα παριστάνουν στιγμιότυπα του νοθευμένου ημιαγωγού σε διάφορες θερμοκρασίες.

☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☐ 500K ☐ NEVER

a.)

☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☐ 500K ☐ NEVER

b.)

☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☐ 500K ☐ NEVER

c.)

☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☐ 500K ☐ NEVER

d.)

☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☐ 500K ☐ NEVER

e.)

☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☐ 500K ☐ NEVER

f.)

Σημειώστε τη θερμοκρασία στην οποία αντιστοιχεί κάθε ενεργειακό διάγραμμα δίπλα

ος ημιαγωγούς

Απάντηση

0K

300K

50K

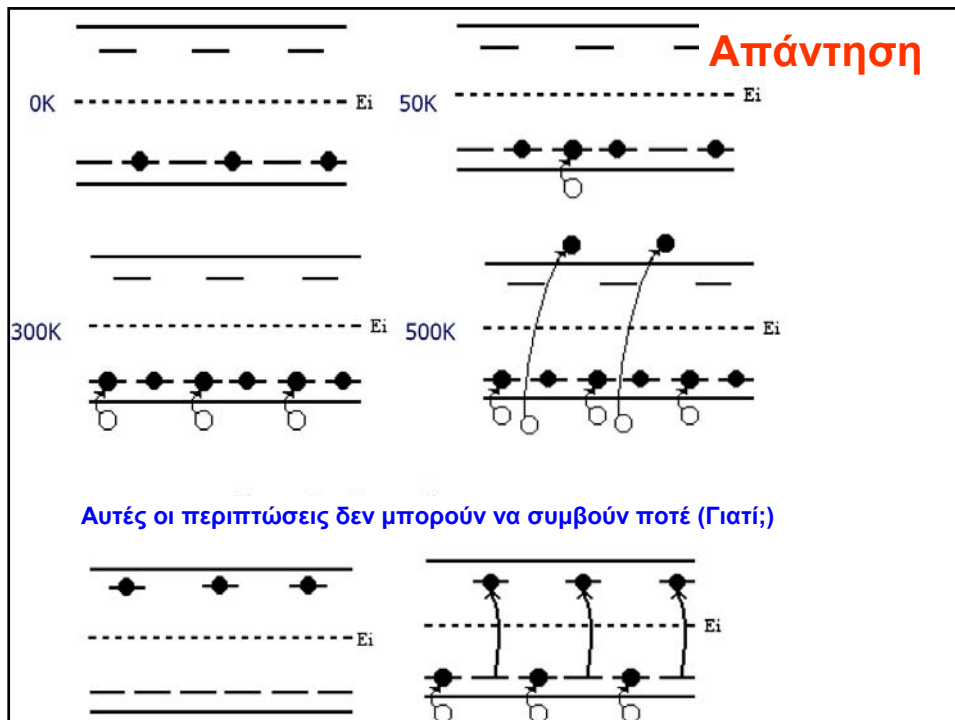
500K

Αυτές οι περιπτώσεις δεν μπορούν να συμβούν ποτέ (Γιατί;)

Άσκηση 5 Δότες και αποδέκτες έχουν προστεθεί σε έναν ημιαγωγό για να τον αντισταθμίσουν. Σε αυτήν τη περίπτωση η συγκέντρωση των αποδεκτών N_A είναι περίπου διπλάσια από τη συγκέντρωση των ατόμων δότη N_D . Τα ενεργειακά διαγράμματα δίπλα παριστάνουν στιγμιότυπα του νοθευμένου ημιαγωγού σε διάφορες θερμοκρασίες.

a.) ☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☒ 500K ☐ NEVER	b.) ☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☒ 500K ☐ NEVER
c.) ☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☒ 500K ☐ NEVER	d.) ☐ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☒ 500K ☐ NEVER
e.) ☒ 0K ☐ 50K ☐ 300K ☐ 500K ☐ NEVER	f.) ☐ 0K ☒ 50K ☐ 300K ☐ 500K ☐ NEVER

τους ημιαγωγούς



Ενεργειακό Επίπεδο Fermi (E_F)

- Στατιστική Fermi-Dirac για ηλεκτρόνια μέσα σε στερεά (Maxwell-Boltzman για κλασικά σωματίδια (π.χ., μόρια αερίου), Bose-Einstein για φωτόνια).

- Κατανομή ηλεκτρονίων μέσα σε μια περιοχή επιτρεπόμενων ενεργειακών επιπέδων στη θερμική ισορροπία = *Συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac*

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

Όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann $= 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

Παρατήρηση : Η παραπάνω συνάρτηση δίνει την πιθανότητα ένα διαθέσιμο ενεργειακό επίπεδο, ενέργειας E , να καταλειφθεί από ένα ηλεκτρόνιο σε απόλυτη θερμοκρασία T .

Για $E = E_F$, $f(E=E_F) = 1/2$: υπονοεί ότι ένα ενεργειακό επίπεδο στο επίπεδο Fermi έχει πιθανότητα $1/2$ να είναι κατειλημμένο από ένα ηλεκτρόνιο.

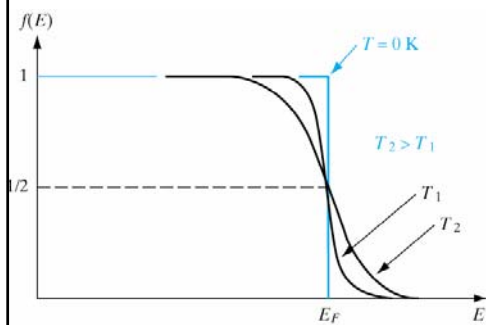
Συνάρτηση Κατανομής Fermi-Dirac

At $T = 0\text{K}$,

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

if $E < E_F$: $f(E) = \frac{1}{1 + e^{-\infty}} = 1$

if $E > E_F$: $f(E) = \frac{1}{1 + e^{\infty}} = 0$



Για $T=0\text{K}$: Οι διαθέσιμες καταστάσεις κάτω από το επίπεδο E_F είναι γεμάτες με ηλεκτρόνια, και όλες οι ενεργειακές καταστάσεις πάνω από το επίπεδο E_F είναι άδειες.

Για $T > 0\text{K}$: υπάρχει η πιθανότητα $f(E)$ κάποιες καταστάσεις πάνω από το επίπεδο E_F να είναι γεμάτες με ηλεκτρόνια, και υπάρχει η αντίστοιχη πιθανότητα $[1-f(E)]$ κάποιες καταστάσεις κάτω από το επίπεδο E_F να είναι άδειες.

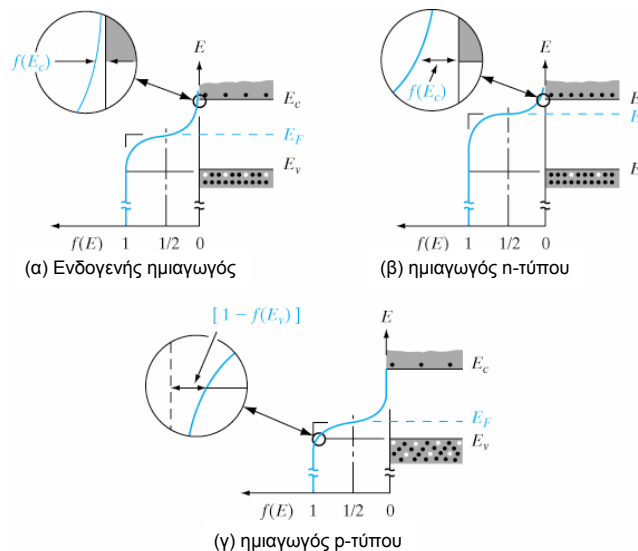
Η πιθανότητα μια κατάσταση σε ενέργεια $E_F + \Delta E$ να είναι γεμάτη είναι η ίδια με την πιθανότητα μια κατάσταση σε ενέργεια $E_F - \Delta E$ να είναι άδεια επειδή η συνάρτηση Fermi είναι συμμετρική γύρω από την E_F για όλες τις θερμοκρασίες.

$$f(E_F + \Delta E) = [1 - f(E_F - \Delta E)]$$

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Συνάρτηση Κατανομής Fermi-Dirac στους ημιαγωγούς



ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

-Ενδογενής ημιαγωγός: Το επίπεδο E_F πρέπει να βρίσκεται κοντά στο μέσο του ενεργειακού χάσματος ($E_i = E_F$).

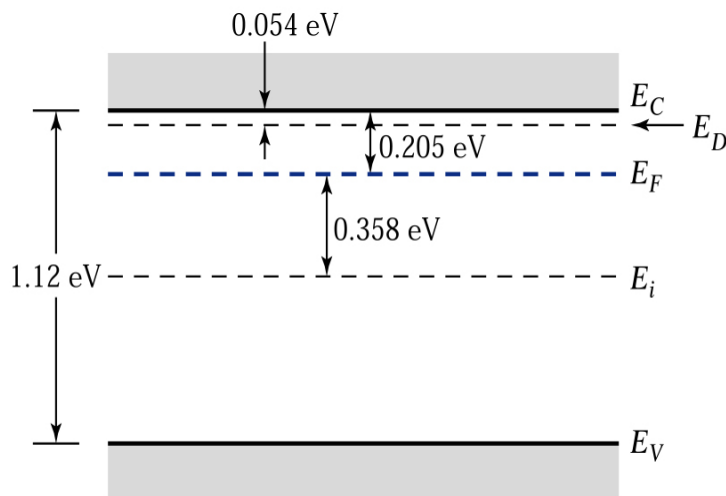
-n-τύπου ημιαγωγός: το επίπεδο E_F πρέπει να βρίσκεται πάνω από το ενδογενές ενεργειακό επίπεδο E_i . Επειδή η $f(E)$ διατηρεί την μορφή της για δοσμένη θερμοκρασία T , η μεγαλύτερη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην E_C στον ημιαγωγό **τύπου- n** υπονοεί μια αντιστοίχως μικρότερη συγκέντρωση οπών στην E_V . έτσι, η διαφορά $E_C - E_F$ δηλώνει ένα μέτρο του **πόσο ισχυρά νοθευμένο είναι το υλικό τύπου-n** !

-p- τύπου ημιαγωγός: το επίπεδο E_F πρέπει να βρίσκεται κάτω από το ενδογενές ενεργειακό επίπεδο E_i , κοντά στη ζώνη σθένους έτσι ώστε η **ουρά της συνάρτησης $[1 - f(E)]$** κάτω από την E_V να είναι μεγαλύτερη από την **ουρά της $f(E)$** πάνω από την E_C . Έτσι, $E_F - E_V$ δηλώνει ένα μέτρο του **πόσο ισχυρά νοθευμένο είναι το υλικό τύπου-p** !

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Παράδειγμα ενεργειακού διαγράμματος το οποίο δείχνει το επίπεδο Fermi E_F , το ενδογενές επίπεδο Fermi E_i και το ενεργειακό επίπεδο των ατόμων δότη E_D ενός ημιαγωγού τύπου-n



ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Συγκεντρώσεις Ηλεκτρονίων και Οπών (n, p) σε Θερμική Ισορροπία

Αν, $N(E)$ = η πυκνότητα καταστάσεων & $f(E)$ = η πιθανότητα κατάληψης, τότε η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας είναι:

$$n_0 = \int_{E_c}^{\infty} f(E) N(E) dE$$

$N(E)$ αυξάνει με την ενέργεια E ($N(E) \propto \sqrt{E}$) ενώ η συνάρτηση $f(E)$ γίνεται εξαιρετικά μικρή καθώς αυξάνει η E . Έτσι, $f(E)N(E)$ ελαττώνεται γρήγορα πάνω από την E_c έτσι ώστε πολύ λίγα ηλεκτρόνια μπορούν να καταλάβουν ενεργειακά επίπεδα πολύ ψιλότερα από το άκρο της ζώνης αγωγιμότητας

Ενεργός πυκνότητα καταστάσεων της ζώνης αγωγιμότητας (N_c): όλες οι κατανεμημένες ηλεκτρονικές καταστάσεις της Ζ.Α. παριστάνονται από μία ενεργό πυκνότητα καταστάσεων (N_c) η οποία βρίσκεται στο άκρο της Ζ.Α. (E_c).

$$n_0 = N_c f(E_c)$$

Υποθέστε ότι $E_c - E_F \geq 3 kT$ όπου $kT = 0.026 \text{ eV}$ στη θερμοκρασία δωματίου

$$f(E_c) = \frac{1}{1 + e^{(E_c - E_F)/kT}} \approx e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

ΤΛ1001 – 2010

Συγκέντρωση ηλεκτρονίων στη Ζ.Α. = (ενεργός πυκνότητα καταστάσεων) x (συνάρτηση Fermi):

$$n_0 = N_c f(E_c) = N_c e^{-(E_c - E_F)/kT} \quad \text{όπου} \quad N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Παρόμοια, η συγκέντρωση των οπών στην Ζ.Σ. θα είναι : $p_0 = N_v [1 - f(E_v)]$

Πιθανότητα εύρεσης
μια άδειας
κατάστασης στο
επίπεδο E_v

$$[1 - f(E_v)] = 1 - \frac{1}{1 + e^{(E_v - E_F)/kT}} =$$

$$\approx e^{-(E_F - E_v)/kT}$$

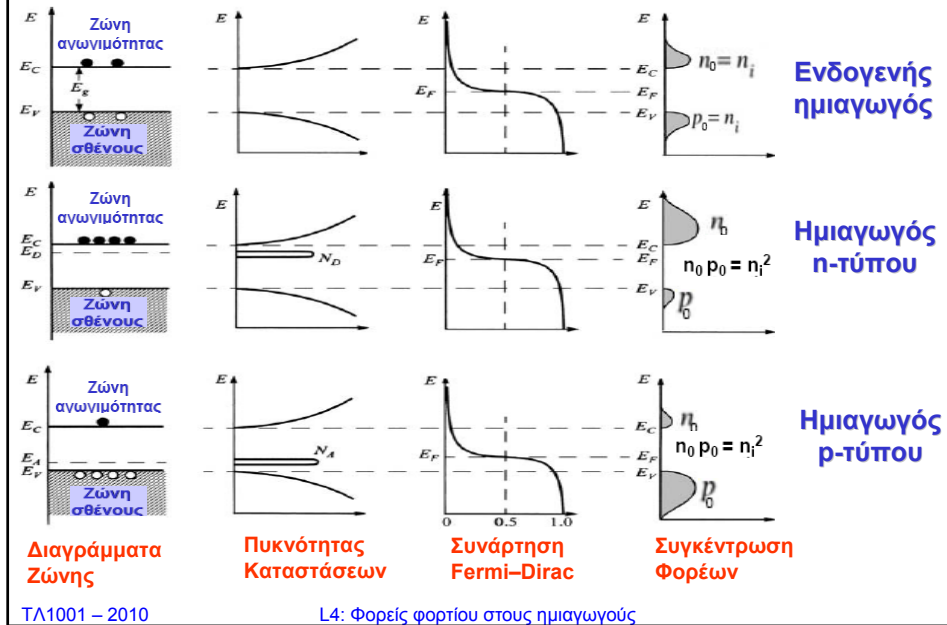
$$p_0 = N_v [1 - f(E_v)] = N_v e^{-(E_F - E_v)/kT}$$

ενεργός πυκνότητα
καταστάσεων στην Ζ.Σ. $N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Θερμική Ισορροπία



Θυμηθείτε αυτές τις δύο εξισώσεις, που ισχύουν για χαμηλά επίπεδα νόθευσης

$$n_0 = N_c f(E_c) = N_c e^{-(E_c - E_F)/kT} \quad (\text{για, } E_c - E_F \geq 3kT)$$

$$p_0 = N_v [1 - f(E_v)] = N_v e^{-(E_F - E_v)/kT} \quad (\text{για, } E_F - E_v \geq 3kT)$$

- Ενδογενές πυρίτιο: $E_F = E_i$,

$$\left. \begin{aligned} n_i &= N_c e^{-(E_c - E_i)/kT} \\ p_i &= N_v e^{-(E_i - E_v)/kT} \\ n_i &= p_i \end{aligned} \right\} \begin{aligned} E_i &= (E_c + E_v)/2 + (kT/2) \ln(N_v/N_c) \\ \text{Αν, } N_c &= N_v, \quad E_F = E_i = E_g/2 \\ &(\text{δηλ. } E_F \text{ στο μέσο του ενεργειακού χάσματος}) \end{aligned}$$

- Γενική περίπτωση

$$\begin{aligned} n_0 p_0 &= (N_c e^{-(E_c - E_F)/kT}) (N_v e^{-(E_F - E_v)/kT}) = \\ &N_c N_v e^{-(E_c - E_v)/kT} = N_c N_v e^{-E_g/kT} \\ n_i p_i &= (N_c e^{-(E_c - E_i)/kT}) (N_v e^{-(E_i - E_v)/kT}) = \\ &N_c N_v e^{-(E_c - E_v)/kT} = N_c N_v e^{-E_g/kT} \end{aligned}$$

Άρα, η ενδογενής συγκέντρωση εκφράζεται ως:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_g / 2kT}$$

Επίσης, $n_o p_o = n_i^2$

Δύο πολύ εύχρηστες εκφράσεις :

$$n = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = N_C e^{-(E_C - E_i)/kT} e^{(E_F - E_i)/kT} = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p = N_V e^{-(E_F - E_V)/kT} = N_V e^{-(E_i - E_V)/kT} e^{(E_i - E_F)/kT} = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

Επομένως,

$$n_o = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$p_o = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

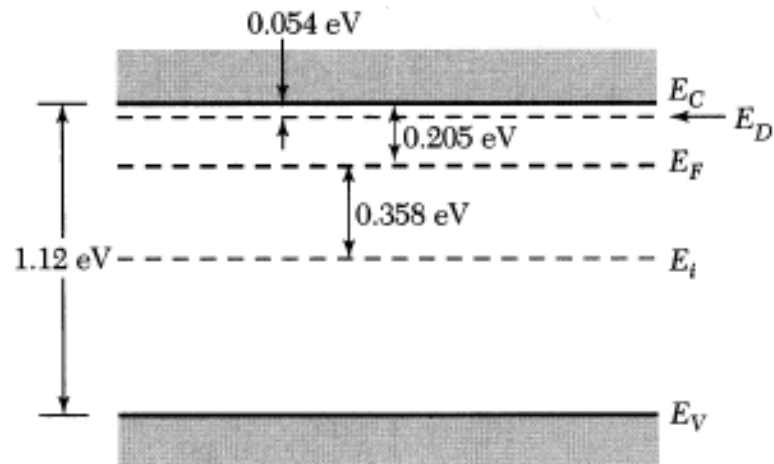
Άσκηση 6 Βρείτε τη μετατόπιση του ενδογενούς ενεργειακού επιπέδου Fermi E_i από το μέσο του ενεργειακού χάσματος ($E_g = 1.12$ eV). Κάντε υπολογισμούς για το πυρίτιο στη θερμοκρασία δωματίου (300 K), όπου $N_C = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ και $N_V = 2.65 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς

Άσκηση 7 Ένα κομμάτι πυριτίου είναι νοθευμένο με 10^{16} άτομα αρσενικού / cm^3 . Βρείτε τη συγκέντρωση των φορέων και την ενεργειακή θέση του επιπέδου Fermi στη θερμοκρασία δωματίου (300 K).

Απάντηση



ΤΛ1001 – 2010

L4: Φορείς φορτίου στους ημιαγωγούς