

**ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ
ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΝΟΤΗΤΑ
ΟΜΟΓΕΝΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ
ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

- 1. Μηχανισμοί σκέδασης των φορέων (ηλεκτρόνια-οπές)**
- 2. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα**
- 3. Ολίσθηση φορέων (ρεύμα ολίσθησης)**
- 4. Διάχυση φορέων (ρεύμα διάχυσης)**

Ειδικότερα, θα αναπτύξουμε

- Πως συμπεριφέρονται τα ηλεκτρόνια και οι οπές υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου
- Ποιοι μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος στους ημιαγωγούς
- Πως συμπεριφέρονται τα ηλεκτρόνια και οι οπές αν η συγκέντρωσή τους δεν είναι ομοιόμορφη, δηλαδή αν υπάρχει κλίση στη συγκέντρωσή τους

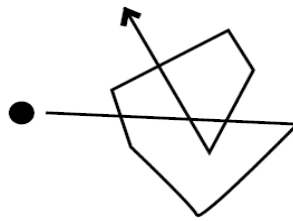
Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

1. Θερμική κίνηση φορέων

Σε θερμική ισορροπία οι φορείς υφίστανται:

- σκεδάσεις (κρούσεις) με τα άτομα πυριτίου που ταλαντώνονται
- Ηλεκτροστατική δράση με τα φορτισμένα άτομα προσμίξεων (θετικά ιόντα δοτών και αρνητικά ιόντα αποδεκτών)
- Σκέδαση με τις πλεγματικές ατέλειες

Χαρακτηριστική σταθερά χρόνου της θερμικής κίνησης είναι ο μέσος ελεύθερος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών σκεδάσεων $\equiv \tau$ (s)



Τυχαία θερμική κίνηση ηλεκτρονίου

Μεταξύ των σκεδάσεων οι φορείς αποκτούν ταχύτητα $v_{th} \equiv$ θερμική ταχύτητα [cm/s]

(Θερμική ενέργεια ανά βαθμό ελευθερίας $1/2kT$, τρεις βαθμοί ελευθερίας (x,y,z) \Rightarrow

$$\frac{1}{2} m^* v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT \Rightarrow v_{th} = \left(\frac{3kT}{m^*} \right)^{1/2}$$

Χαρακτηριστικό μήκος κίνησης η μέση ελεύθερη διαδρομή λ [cm]

$$\lambda = v_{th} \tau$$

Για το Si στους 300K : $\tau_e \sim 10^{-12} - 10^{-13}$ s ($\ll 1$ ps), $v_{th} \sim 10^7$ cm/s, $\Rightarrow \lambda \sim 10 - 100$ nm

2. Ολίσθηση φορέων

Εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο E [V/cm]

\Rightarrow ασκείται δύναμη στους φορείς

$$F = \pm qE \quad (- \text{ για τα ηλεκτρόνια και } + \text{ για τις οπές})$$



Κίνηση ηλεκτρονίου υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου

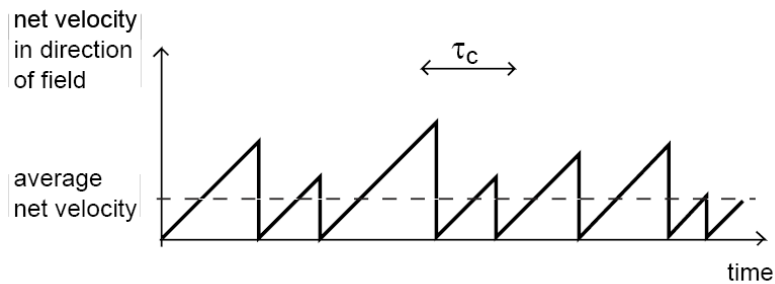
Μεταξύ των σκεδάσεων, οι φορείς επιταχύνονται στην κατεύθυνση του πεδίου

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

$$v(t) = at = -\frac{qE}{m_e}t \quad \text{για τα ηλεκτρόνια}$$

$$v(t) = at = \frac{qE}{m_h}t \quad \text{για τις οπές}$$

Η ταχύτητα αλλάζει κατά μέσο όρο κάθε τ_c όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Οπότε η μέση καθαρή ταχύτητα (οριακή) στην κατεύθυνση του πεδίου είναι η ταχύτητα ολίσθησης v_d [cm/s]

$$\bar{v} = v_d = \pm \frac{qE}{2m_{e,h}^*} \tau_c = \pm \frac{q\tau_c}{2m_{e,h}^*} E$$

holes electrons

όπου $m_{e,h}^*$ είναι η ενεργός μάζα των ηλεκτρονίων, οπών .

Ορίζουμε την ευκινησία των φορέων ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) ως

$$\mu_e = \frac{q\tau_e}{m_e^*} \quad \text{και} \quad \mu_h = \frac{q\tau_h}{m_h^*} \quad (\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$$

Η ευκινησία είναι μια θετική ποσότητα για τα ηλεκτρόνια-οπές, οι κατευθυνόμενες ταχύτητες έχουν αντίθετα πρόσημα:

$$v_e = -\mu_e E \quad \text{για τα ηλεκτρόνια} \quad \text{και} \quad v_h = \mu_h E \quad \text{για τις οπές}$$

Το αρνητικό πρόσημο εκφράζει το γεγονός ότι η διεύθυνση της ταχύτητας των ηλεκτρονίων είναι αντίθετη από εκείνη του ηλεκτρικού πεδίου

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

Τιμές ενεργού μάζας ηλεκτρονίων και οπών για το Γερμάνιο, Πυρίτιο, Αρσενιούχο Γάλλιο

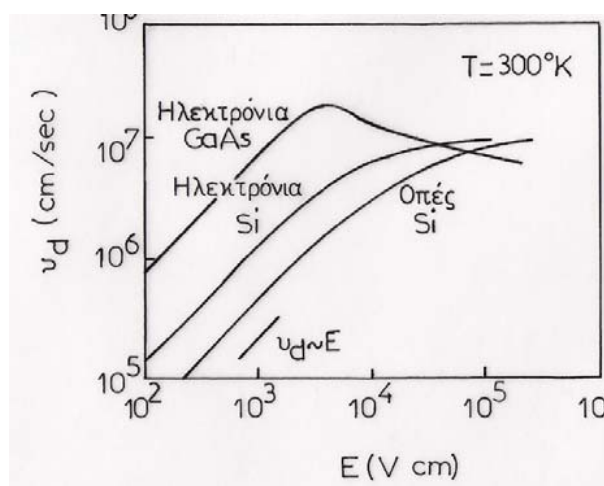
φορέας	σύμβολο	Γερμάνιο	Πυρίτιο	Αρσενιούχο-Γάλλιο
ηλεκτρόνια	$m_{e,cond}^*/m_0$	0.12	0.26	0.067
οπές	$m_{h,cond}^*/m_0$	0.21	0.386	0.34

$m_0 = 9.11 \times 10^{-31}$ kg είναι η μάζα του ελεύθερου ηλεκτρονίου στο κενό.

(Οι τιμές της ενεργού μάζας των ηλεκτρονίων είναι μικρότερες από αυτές των οπών, γιατί??)

Τα πιο σημαντικά είναι :

- Σε χαμηλής και μέτριας έντασης $|E|$ η ευκινησία είναι σταθερή, οπότε η ταχύτητα ολίσθησης είναι ανάλογη του πεδίου
- ενώ σε υψηλά ηλεκτρικά πεδία η ταχύτητα ολίσθησης παρουσιάζει κορεσμό



Η μεταβολή της v_D συναρτήσει του E για το Si και GaAs (από πειραματικές μετρήσεις)

Προσοχή: Στο GaAs η ελάττωση της v_D όταν $E > 3 \times 10^3$ V/m οφείλεται στη μεταφορά των ηλεκτρονίων από την κοιλάδα Γ στην κοιλάδα L της ταινίας αγωγιμότητας όπου η ενεργός μάζα των ηλεκτρονίων στην κοιλάδα αυτή είναι μεγαλύτερη από εκείνη στην κοιλάδα Γ (γιατί?), οι κοιλάδες Γ και L φαίνονται στη σελίδα 5 στις διαφάνειες στην πρώτη ενότητα).

Η ευκινησία είναι ένα μέτρο του πόσο εύκολα ολισθαίνουν οι φορείς

Εξαρτάται από τις παραμέτρους:

- $\tau_{e,h}$ (διαδικασίες σκέδασης των φορέων)
- m^* (Δομή ενεργειακών ταινιών)

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

- Αν $\tau \uparrow$, μεγαλύτερος χρόνος μεταξύ σκαδάσεων $\rightarrow \mu \uparrow$
- Αν $m^* \downarrow$, ελαφρύτερα μάζα φορέων $\rightarrow \mu \uparrow$

Ευκινησία των ηλεκτρονίων και των οπών σε διάφορους ημιαγωγούς στη θερμοκρασία δωματίου (σε μονάδες $m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$).

Υλικό	Ηλεκτρόνια	Οπές	Υλικό	Ηλεκτρόνια	Οπές
Αδάμαντας	0,180	0,120	GaSb	0,400	0,140
Si	0,130	0,050	PbS	0,060	0,055
Ge	0,390	0,190	PbSe	0,102	0,093
InAs	3,300	0,046	AgCl	0,005	-
InP	0,460	0,015	KBr(100K)	0,010	-
GaAs	0,880	0,040	SiC	0,010	0,005

Γιατί τα ηλεκτρόνια είναι πιο ευκίνητα από τις οπές?

Η τελική ταχύτητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων εξαρτάται από την ταχύτητα του φορέα. Η μικρή ενεργός μάζα του Αρσενιούχου Γαλλίου είναι ο βασικός λόγος που το υλικό αυτό και τα κράματα αυτού χρησιμοποιούνται αντί του πυριτίου σε εφαρμογές μεγάλου εύρους ζώνης (high-bandwidth), όπως η κυψελιδωτή τηλεφωνία.

3. Μηχανισμοί σκέδασης των φορέων στους ημιαγωγούς

Οι κύριοι μηχανισμοί σκέδασης είναι η σκέδαση από :i) τις θερμικές ταλαντώσεις του πλέγματος (lattice scattering), ii) τις ιονισμένες προσμίξεις (impurity scattering)

i) Η σκέδαση από το πλέγμα, οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του φορέα και των θερμικών ταλαντώσεων των ατόμων του πλέγματος (φωνόνια) για $T > 0K$. Ο μηχανισμός αυτός είναι ισχυρός σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο μέσος ελεύθερος χρόνος είναι $\tau_l = AT^{-3/2}$. Η συνιστώσα στην ευκινησία συμβολίζεται με μ_i , μειώνεται αυξανόμενη της θερμοκρασίας:

$$\mu_i = bT^{-3/2}$$

ii) Η σκέδαση από τις ιονισμένες προσμίξεις, οφείλεται στην αλληλεπίδραση Coulomb μεταξύ του φορέα και των ιονισμένων προσμίξεων (θετικά

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

φορτισμένων δοτών N_D ή αρνητικά φορτισμένων αποδεκτών N_A). Ο μέσος ελεύθερος χρόνος είναι $\tau_i = BT^{3/2}$. Η συνιστώσα στην ευκινησία συμβολίζεται με μ_i , αυξάνεται αυξανομένης της θερμοκρασίας:

$$\mu_i = a \frac{T^{3/2}}{N_I} \quad \text{όπου } N_I = N_D + N_A$$

Η συνολική ευκινησία θα δίνεται από τη σχέση

$$\frac{1}{\mu_t} = \frac{1}{\mu_e} + \frac{1}{\mu_h}$$

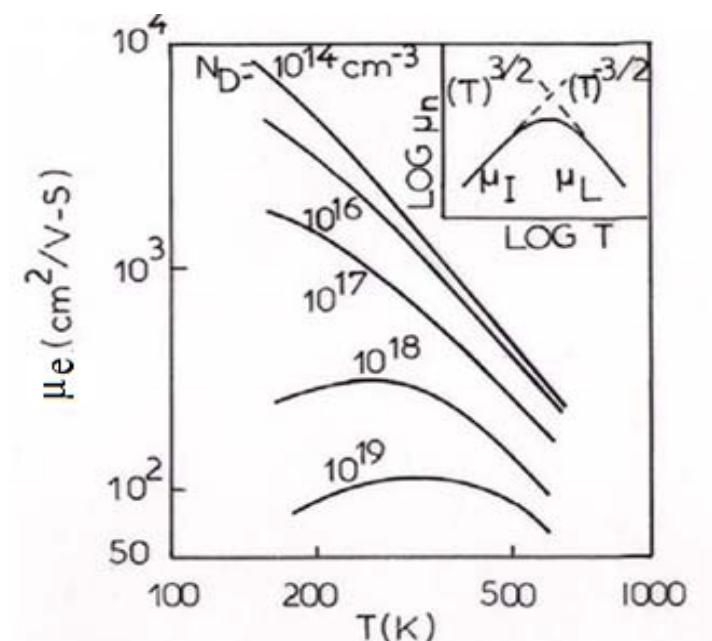
Και η εξάρτησή της από τη θερμοκρασία είναι:

$$\frac{1}{\mu_t} = bT^{3/2} + a'T^{-3/2}$$

Σε ιδανικό ενδογενή ημιαγωγό (δίχως ατέλειες) τα μ_e και μ_h καθορίζονται μόνο από τις σκεδάσεις των φορέων με τα φωνόνια του κρυσταλλικού υλικού

Επίδραση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης προσμίξεων στην ευκινησία

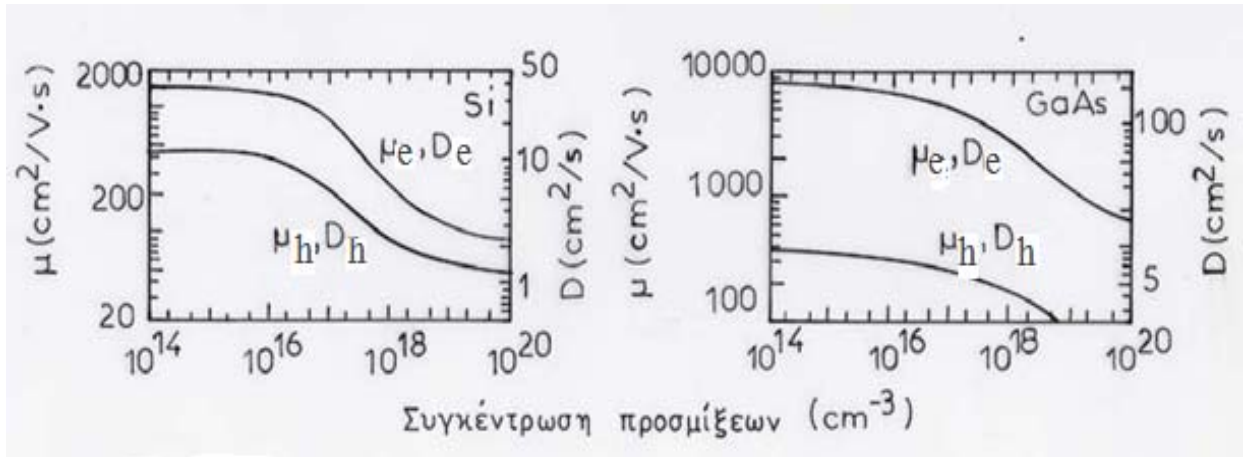
Η εξάρτηση της ευκινησίας των ηλεκτρονίων από τη θερμοκρασία στο Si για διαφορετικές συγκεντρώσεις δοτών απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα :



Θερμοκρασιακή εξάρτηση της ευκινησίας των ηλεκτρονίων στο Si για διαφορετικές συγκεντρώσεις προσμίξεων δοτών.

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

- Στις χαμηλές θερμοκρασίες επικρατεί η σκέδαση από ιονισμένες προσμίξεις
- Στις ψηλές θερμοκρασίες επικρατεί η σκέδαση από φωνόνια επειδή αυξάνει το πλάτος των πλεγματικών ταλαντώσεων



Εξάρτηση της ευκινησίας και του συντελεστή διάχυσης των ηλεκτρονίων (μ_e , D_e) και οπών (μ_h , D_h) από τη συγκέντρωση των προσμίξεων (ολικός αριθμός προσμίξεων στη μονάδα όγκου) στο Si και GaAs (300K). Το σχήμα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ευκινησιών και των συντελεστών διάχυσης.

- η ευκινησία του GaAs είναι μεγαλύτερη του Si (γιατί?)
- ο συντελεστής διάχυσης έχει παρόμοια εξάρτηση με την ευκινησία από τη συγκέντρωση προσμίξεων

4. Ρεύμα αγωγής

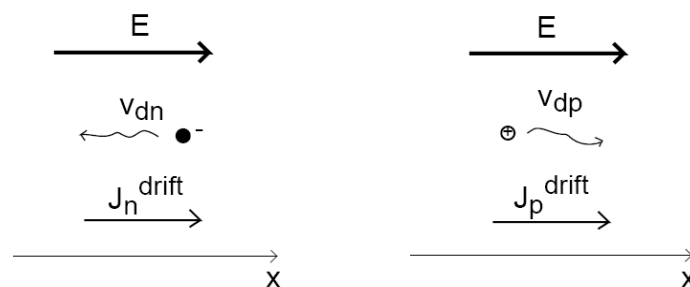
Η μεταφορά των ελεύθερων φορέων (ηλεκτρονίων και οπών) σε έναν ομογενή ημιαγωγό (δεν υπάρχει κλίση συγκέντρωσης προσμίξεων) κάτω από την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου E παράγει ένα ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο λέγεται ρεύμα αγωγής ή ρεύμα ολίσθησης

Το ρεύμα αγωγής ή ρεύμα ολίσθησης των ηλεκτρονίων (συμβατικό), (I_e ή I_n)

$$\begin{aligned} I_e &= -qAnv_d \\ &= qAn\mu_e E \end{aligned}$$

Το ρεύμα ολίσθησης των οπών I_h ή I_p (ομόρροπο του I_e ή I_n)

$$I_h = qApv_d = qAp\mu_h E$$



$$J_{ολ.} = J_e + J_h = q(n\mu_e + p\mu_h)E$$

(όπου n και p είναι οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών)

Ο νόμος του Ohm στη γενική μορφή είναι:

$$J = \sigma E = (1/\rho) E$$

όπου σ είναι η ειδική αγωγιμότητα και ρ η ειδική αντίσταση. Οπότε, η ειδική αγωγιμότητα μπορεί να γραφτεί ως εξής:

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_e + p\mu_h)$$

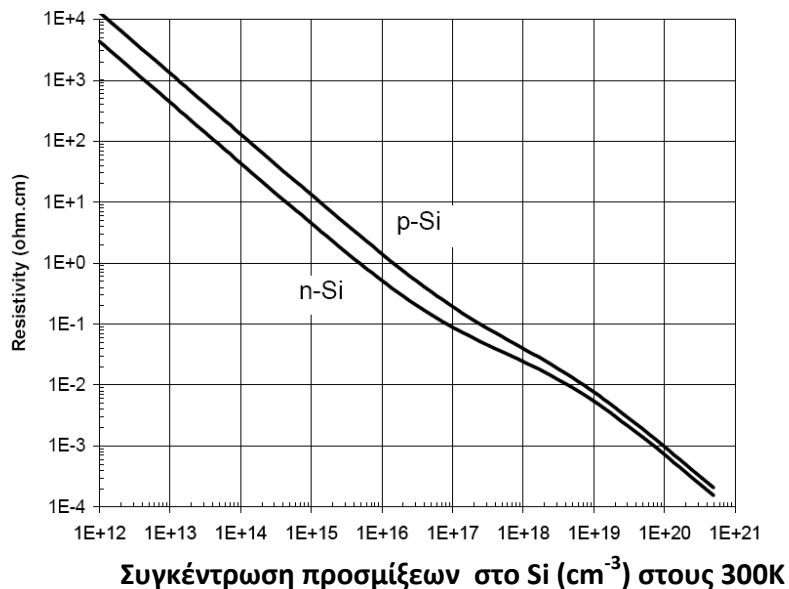
Η ειδική αντίσταση συνήθως χρησιμοποιείται για να προσδιορίσουμε το επίπεδο ντοπαρίσματος (βλέπε παρακάτω σχήμα) στους ημιαγωγούς:

- Για ημιαγωγό τύπου n, για $N_D \gg n_i$ (n_i είναι η ενδογενής συγκέντρωση)

$$\rho_n = \frac{1}{qN_D\mu_e}$$

- Για ημιαγωγό τύπου p, για $N_A \gg n_i$

$$\rho_p = \frac{1}{qN_A\mu_h}$$



Υπολογιστικό παράδειγμα

- Si με $N_D = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ στους 300K:

$$\mu_e \sim 1000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}, \quad \rho_n = 0,21 \Omega \cdot \text{cm}$$

- Εφαρμόζουμε $E = 1 \text{ kV/cm}$:

$$|u_d| \sim 10^6 \text{ cm/s} \ll u_{th}, \quad |J_{ndrift}| \sim 4,8 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$$

- Χρόνος ολίσθησης για $L = 0,1 \mu\text{m}$: $t_d = L/u_d = 10 \text{ ps}$ ($\sim 16 \text{ Hz fast}$)

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

5.Ειδική αγωγιμότητα και εξάρτηση από τη θερμοκρασία

Η σχέση που εκφράζει την αγωγιμότητα συναρτήσει των χαρακτηριστικών των φορέων είναι:

$$\sigma = \frac{q^2 n \tau_e}{m_e^*} + \frac{q^2 p \tau_h}{m_h^*}$$

Οι συγκεντρώσεις των φορέων, n και p εμφανίζουν έντονες μεταβολές με τη θερμοκρασία, ενώ τα τ_e και τ_h είναι ασθενείς συναρτήσεις της θερμοκρασίας

Σε έναν ενδογενή ημιαγωγό οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών είναι ίσες, $n=p=n_i$

$$\sigma_i = q n_i (\mu_e + \mu_h)$$

Γνωρίζοντας ότι $n_i (m^{-3}) = 2 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_h^* m_e^*)^{3/4} \exp(-E_g / 2kT)$

Η εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία μπορεί να γραφτεί ως

$$\sigma = A \exp(-E_g / 2kT)$$

Από την οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε πειραματικά το ενεργειακό χάσμα E_g

Η ολίσθηση φορέων και η αγωγιμότητα στους εξωγενείς ημιαγωγούς κυριαρχούνται από τους φορείς πλειονότητας:

n – τύπου και $n_0 \gg p_0$ ($n_0 \gg n_i$) $\rightarrow \sigma = q n_0 \mu_e$

p – τύπου και $p_0 \gg n_0$ $\rightarrow \sigma = q p_0 \mu_h$

(ο δείκτης μηδέν στα σύμβολα n και p δηλώνει κατάσταση ισορροπίας)

Ειδική αντίσταση στερεών στους 20°C (Ωcm)

υλικό	ρ ($\Omega\text{ cm}$)	υλικό	ρ ($\Omega\text{ cm}$)
Ag	1.6×10^{-8}	Ge	0.5
Cu	1.7×10^{-8}	Si	3.0×10^3
Fe	10×10^{-8}	διαμάντι	1×10^{14}

6. Ρεύμα διάχυσης

Όταν υπάρχει μια κλίση στη συγκέντρωση των φορέων, οι φορείς υπό την επίδραση των τυχαίων κρούσεων με τα φωνόνια (δονήσεις του κρυσταλλικού πλέγματος) τείνουν να ανακατανεμηθούν ώστε να εξουδετερώσουν την κλίση της συγκέντρωσης

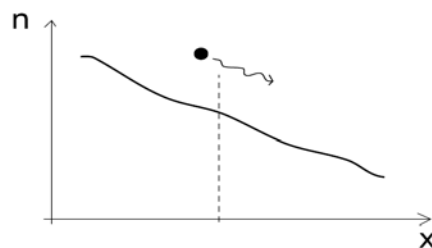
Η ροή των φορέων κάτω από συνθήκες κλίσης της συγκέντρωσής τους λέγεται **διάχυση των φορέων**

υπακούει στον πρώτο νόμο του Fick : $F = -D \frac{dN}{dx}$,

D: ο συντελεστής διάχυσης, σε $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ($D = v_{th} \cdot l$)

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

$$F_n = -D_e \frac{dn}{dx} \text{ για τα ηλεκτρόνια, } F_p = -D_h \frac{dp}{dx} \text{ για τις οπές}$$

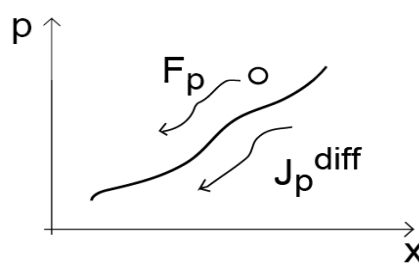
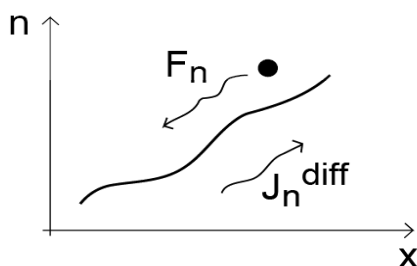


Ρεύμα διάχυσης ηλεκτρονίων

$$J_{eD} = qD_e \frac{dn}{dx}$$

Ρεύμα διάχυσης οπών

$$J_{hD} = -qD_h \frac{dp}{dx}$$



7. Σχέση του Einstein

Δίνει τη σχέση μεταξύ της ευκινησίας μ και της σταθεράς διάχυσης D
 Από τις παρακάτω γνωστές εξισώσεις προκύπτει η σχέση του **Einstein**

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad \text{και} \quad D = v_{th,x} \cdot l \Rightarrow \frac{D}{\mu} = \frac{v_{th,x} \cdot l}{q\tau} m^* = \frac{m^* v_{th,x}^2}{q}$$

$$\frac{1}{2} m^* v_{th,x}^2 = \frac{kT}{2} \quad \text{θεώρημα ισοκατανομής για κίνηση στη διεύθυνση x}$$

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad \text{εξίσωση του Einstein}$$

όπου kT/q είναι η θερμική τάση $\approx 25\text{meV}$ στους 300K

Για τα ηλεκτρόνια

Για τις οπές

$$\mu_e = \frac{q \cdot D_e}{kT}$$

$$\mu_h = \frac{q \cdot D_h}{kT}$$

Υπολογιστικό παράδειγμα για $N_D = 3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$

$$\mu_e = 1000 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \Rightarrow D_e = 25 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$$

$$\mu_h = 400 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \Rightarrow D_h = 10 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$$

8. Συνολικό Ρεύμα

Στην περίπτωση ενός ημιαγωγού με φορείς τύπου n και φορείς τύπου p στο οποίο υπάρχει ταυτόχρονα βαθμίδα συγκέντρωσης και βαθμίδα δυναμικού, δηλ.

- i) Εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο E
- ii) Ανομοιογενείς πυκνότητες φορέων $n(x)$, $p(x)$

Το συνολικό ρεύμα είναι $J_{ολ} = J_n + J_p$ όπου :

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

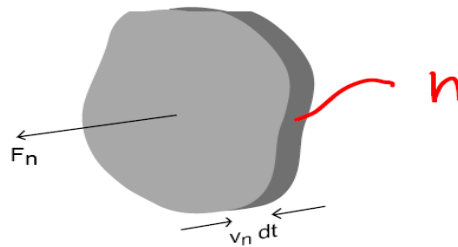
$$J_n = J_{n \text{ drift}} + J_{n \text{ diff}} \quad \text{και} \quad J_p = J_{p \text{ drift}} + J_{p \text{ diff}}$$

$$J_n = q \left[n \mu_e E + D_e \frac{dn}{dx} \right] \quad J_p = q \left[p \mu_h E - D_h \frac{dp}{dx} \right]$$

9. Γενικές σχέσεις που συνδέουν την ταχύτητα υ, 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, $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)



Σχέσεις που συνδέουν τη ροή με την ταχύτητα φορέων

$$F_n = n v_e \quad F_p = p v_h$$

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

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

Ανεξάρτητα αν οι φορείς κινούνται λόγω πεδίου ή διάχυσης

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

10.Εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου σε ομογενή ντοπαρισμένο ημιαγωγό

Εφαρμόζουμε διαφορά δυναμικού V ανάμεσα στα δύο άκρα ενός ημιαγωγού

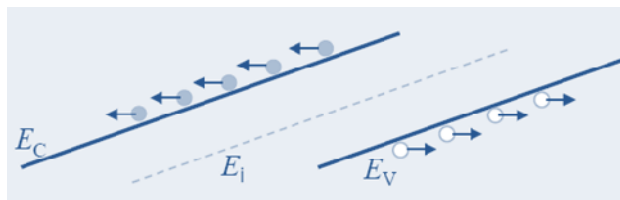
$$\varepsilon = -\frac{dV}{dx} = -\left(\frac{1}{q}\right)\left(\frac{dE}{dx}\right), \text{ όπου } E \text{ η ενέργεια των φορέων}$$

Ενέργεια των ηλεκτρονίων στον πυθμένα (άκρο) της ταινίας αγωγιμότητας= E_C ,

Ενέργεια των οπών στην κορυφή (άκρο) της ταινίας σθένους = E_V

(Αν ένα ηλεκτρόνιο βρίσκεται (ενεργειακά) πάνω από την E_C , η επιπλέον ενέργεια μπορεί να είναι μόνο κινητική. Κατ' αναλογία, αν μια σπή βρίσκεται κάτω από την E_V , η επιπλέον ενέργεια μπορεί να είναι μόνο κινητική)

Ενδογενής στάθμη Fermi: $E_i // E_V // E_C \Rightarrow \varepsilon = -\left(\frac{1}{q}\right)\left(\frac{dE_i}{dx}\right)$



Διάγραμμα των ενεργειακών ταινιών σε έναν ημιαγωγό όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο όπου φαίνεται η κίνηση των φορέων

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dx} \text{ όπου } \psi = -\frac{E_i}{q}$$

το σύμβολο ψ παριστάνει το **ηλεκτροστατικό δυναμικό**. Κατ' αναλογία, ορίζουμε το **δυναμικό** του Fermi από τη σχέση $\varphi = -\frac{E_F}{q}$, οπότε οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων

και των οπών στην ταινία αγωγιμότητας και σθένους, αντίστοιχα, γράφονται με τη μορφή:

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{\psi - \varphi}{V_T}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{\varphi - \psi}{V_T}\right)$$

όπου $V_T = \frac{kT}{q}$ Στους 300K τιμή της ποσότητας V_T είναι περίπου 0,026V.

12.Ανομοιογενής ημιαγωγός σε θερμοδυναμική ισορροπία: Εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο –Διαφορά δυναμικού

Εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο

Ανομοιογενής συγκέντρωση προσμίξεων σε ημιαγωγό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου

$$\varepsilon = -\left(\frac{1}{q}\right)\left(\frac{dE_i}{dx}\right) = \frac{kT}{q} \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx}$$

$$\text{όπου } n(x) = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

Αν θεωρήσουμε $n(x) = N_D(x)$ θα έχουμε:

$$\varepsilon = -\frac{kT}{q} \frac{1}{N_D(x)} \frac{dN_D(x)}{dx}$$

Το εσωτερικό αυτό ηλεκτρικό πεδίο θα επηρεάζει τη λειτουργία των διατάξεων

Διαφορά δυναμικού λόγω ανομοιογενούς συγκέντρωσης φορέων

Λόγω αλληλοαναίρεσης των ρευμάτων διάχυσης και ολίσθησης στην κατάσταση ισορροπίας ισχύει:

$$J = 0 \Rightarrow n\mu_e E = -D_e \frac{dn}{dx} \Rightarrow E = -\frac{D_e}{\mu_e} \frac{1}{n(x)} \frac{dn}{dx} = -\frac{kT}{q} \frac{1}{n(x)} \frac{dn}{dx} \Rightarrow$$

$$dV = \frac{kT}{q} \frac{dn(x)}{dx} \Rightarrow \int_{V_1}^{V_2} dV = \frac{kT}{q} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn(x)}{n(x)}$$

$$\boxed{\Rightarrow V_2 - V_1 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = V_T \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right)}$$

10. Ημιαγωγοί κάτω από συνθήκες μη-ισορροπίας

10.1. Εγχυση φορέων

1. **Εισαγωγή πλεονάσματος φορέων** $\Delta n = \Delta p$ (οπτικά ή ηλεκτρικά), οπότε ισχύει η συνθήκη $n p > n_i^2$. Για παράδειγμα σε ημιαγωγό τύπου n έχουμε ότι:

Συγκέντρωση φορέων πλειονότητας $n_n = n_{n0} + \Delta n$

Συγκέντρωση φορέων μειονότητας $p_n = p_{n0} + \Delta p$

ο δείκτης μηδέν δηλώνει κατάσταση ισορροπίας, πριν την επίδραση εξωτερικής διέγερσης)

Διακρίνουμε δυο περιπτώσεις (πίνακας):

- ασθενής έγχυση πλεονάσματος φορέων, $\Delta n = \Delta p \ll N_{A, D}$
- ισχυρή έγχυση πλεονάσματος φορέων, $\Delta n = \Delta p \gg N_{A, D}$

Παράδειγμα Πυρίτιο τύπου n με συγκέντρωση δοτών $N_D = 2,25 \times 10^{21} (\text{m}^{-3})$ ολικός ιονισμός

Συγκέντρωση φορέων (m^{-3})	Κατάσταση της έγχυσης φορέων		
	Κατάσταση ισορροπίας	Ασθενής έγχυση	Ισχυρή έγχυση
Περίσσεια φορέων, $\Delta n = \Delta p$	0	1×10^{19}	1×10^{22}
Φορείς πλειοψηφίας, n_n	$1,25 \times 10^{21}$	$2,26 \times 10^{21}$	$1,225 \times 10^{22}$
Φορείς μειοψηφίας, p_n	1×10^{11}	1×10^{19}	1×10^{22}

και 2) όταν ισχύει η συνθήκη $n p < n_i^2$, οπότε μιλούμε για εξαγωγή ή άντληση φορέων από τον ημιαγωγό

(Υπενθύμιση: Σε θερμοδυναμική ισορροπία ισχύει $n \cdot p = n_i^2$)

10.2 Γένεση- Επανασύνδεση φορέων

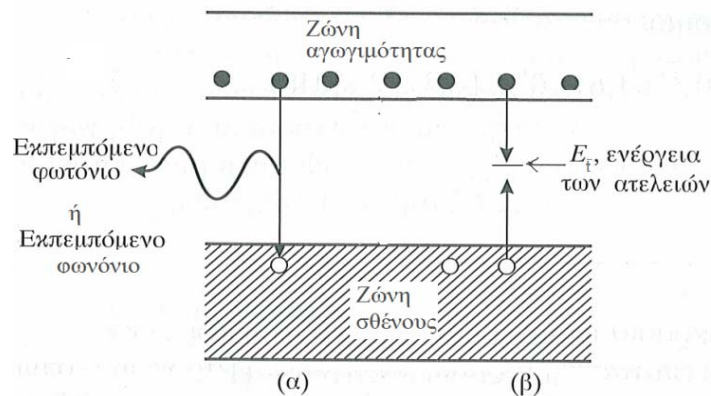
Γένεση φορέων: Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου από την ταινία σθένους στην ταινία αγωγιμότητας αφήνει μια οπή στην ταινία σθένους και έτσι παράγεται ένα ζευγάρι ηλεκτρονίου - οπής. (**G**: ρυθμός γένεσης, φορείς / $\text{cm}^3 \cdot \text{s}$). Μπορεί ανάλογα με το αίτιο να είναι: 1) θερμική, 2) οπτική, 3) ηλεκτρική

Επανασύνδεση (ή Ανασύζευξη) φορέων όταν ένα ηλεκτρόνιο στην ταινία αγωγιμότητας μεταβαίνει σε μία κενή κατάσταση στην ταινία σθένους, οπότε εξαφανίζεται ένα ζευγάρι ηλεκτρονίου - οπής. (**R**: ρυθμός επανασύνδεσης, φορείς / $\text{cm}^3 \cdot \text{s}$). Μπορεί να είναι :

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

α) άμεση ή αλλιώς διαταινιακή (band to band recombination): ένα ηλεκτρόνιο στην ταινία αγωγιμότητας κάνει μία μετάβαση άμεσα στην ταινία σθένους για να επανασυνδεθεί με μία οπή. Συμβαίνει σε ημιαγωγό με άμεσο χάσμα (GaAs) και η επιπλέον ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια φωτονίου $h\nu = E_g$ (ακτινοβολούσα ανασύζευξη).

β) έμμεση (Shockley-Read-Hall (SRH) recombination). Η επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής πραγματοποιείται μέσω εντοπισμένων ενεργειακών καταστάσεων E_t (παγίδα) μέσα στο ενεργειακό χάσμα, οι οποίες συνδέονται με τις καταστάσεις ατελειών του πλέγματος. Είναι συνήθης στους ημιαγωγούς με έμμεσο χάσμα (πυρίτιο, γερμάνιο) και η επιπλέον ενέργεια του ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ταλαντώσεις πλέγματος («εκπέμπει» φωνόνια στο κρυσταλλικό πλέγμα με τη μορφή παραγωγής θερμότητας). Αυτό υποδηλώνει μια μη-ακτινοβολούσα ανασύζευξη.



10.3 Χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας

π.χ. ηλεκτρονίου τ_n (ή τ_e) ή οπής τ_p (ή τ_h) ονομάζεται ο μέσος χρόνος πριν την επανασύνδεση του φορέα, δηλαδή ο μέσος χρόνος κατά τον οποίο το ηλεκτρόνιο (ή οπή) παραμένει στην ταινία αγωγιμότητας (ή σθένους).

Η ποσότητα $1/\tau$ ισούται με την πιθανότητα ανά μονάδα χρόνου που έχει ένας φορέας μειονότητας να επανασυνδεθεί με έναν φορέα πλειονότητας.

A) άμεση ή διαταινιακή (band to band recombination)

Η καθαρή ταχύτητα επανασύνδεσης είναι

$$U = R - G_{th} = R - R_{th} = \alpha \cdot n_{no} \cdot (p_n - p_{no})$$

Επομένως ο χρόνος ζωής του πλεονάσματος των φορέων μειονότητας (οπές σε ημιαγωγό), που ορίζεται προσεγγιστικά ως

$$U = \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p}$$

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

δίδεται από τη σχέση $\tau_p = \frac{1}{\alpha \cdot n_{no}}$

β) έμμεση επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής (Shockley-Read-Hall, SRH)

Η καθαρή ταχύτητα επανασύνδεσης είναι

$$U_{SHR} = R_{th} - G_{th}$$

$$U_{SHR} = \frac{p_n - n_i^2}{p + n + 2n_i \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)} N_t v_{th} \sigma$$

Όπου v_{th} είναι η θερμική ταχύτητα, E_t είναι η εντοπισμένη ενεργειακή κατάσταση (που ονομάζεται παγίδα) μέσα στο ενεργειακό χάσμα (βλέπε προηγούμενο σχήμα), N_t είναι η συγκέντρωση των καταστάσεων αυτών και σ είναι η ενεργός διατομή σύλληψης της παγίδας του φορέα.

Για $n \gg p$ η παραπάνω σχέση απλοποιείται σε

$$U_n = R_n - G_n = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

Για $p \gg n$ η παραπάνω σχέση απλοποιείται σε

$$U_p = R_p - G_p = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

Όπου ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας είναι

$$\tau_n = \tau_p = \frac{1}{N_t v_{th} \sigma}$$

10.4 Μήκος διάχυσης φορέων μειονότητας (L)

$L = \sqrt{D\tau}$ Όπου D είναι ο συντελεστής διάχυσης και τ ο χρόνος ζωής του φορέα μειονότητας.

Δ. ΓΚΙΡΓΚΙΝΟΥΔΗ

10.5. Ψευδοστάθμες του Fermi

Κάτω από συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών καθορίζονται από τη θέση της στάθμης του Fermi με τη βοήθεια των εξισώσεων

$$n_0 = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad \text{και} \quad p_0 = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

δεν ισχύουν στην περίπτωση της κατάστασης μη-ισορροπίας, γιατί οι φορείς που έχουν εγχυθεί από την εξωτερική διαταραχή καθιστούν τη στάθμη του Fermi χωρίς νόημα. Κάτω από τις νέες αυτές συνθήκες (μη-ισορροπίας) μπορούμε να ορίσουμε δύο ποσότητες E_{Fn} και E_{Fp} , για ν' αντικαταστήσουν τη στάθμη του Fermi στις παραπάνω εξισώσεις έτσι ώστε οι πραγματικές συγκεντρώσεις τώρα των ηλεκτρονίων και των οπών στις αντίστοιχες ταινίες να δίδονται από τις εξής σχέσεις:

$$n = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right) \quad \text{και} \quad p = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right)$$

όπου οι E_{Fn} και E_{Fp} λέγονται **ψευδοστάθμες του Fermi** ή **στάθμες Imref** (αναγραμματισμός της λέξης Fermi) για τα ηλεκτρόνια και τις οπές, αντίστοιχα, και ϕ_n και ϕ_p είναι τα αντίστοιχα **ψευδοδυναμικά του Fermi**