

Φαινόμενα Μεταφοράς Φορτίου (1)

- Ολίσθηση φορέων (ρεύμα αγωγιμότητας)

Λευτέρης Καπετανάκης



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

Φθινόπωρο 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 δικτυότοπό τους.

Ρεύματα στους ημιαγωγούς

- ❑ Στους ημιαγωγούς υπάρχουν δύο τύποι ρεύματος.
 - Ρεύμα ολίσθησης (*drift current*)
 - Ρεύμα διάχυσης (*diffusion current*)
- ❑ Οι ελεύθεροι φορείς στους ημιαγωγούς – δηλ. αυτοί που δεν συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς- κινούνται με τυχαία κίνηση σε τυχαίες διευθύνσεις στον ημιαγωγό εξαιτίας της ύπαρξης της θερμικής ενέργειας

$$\sim \frac{3}{2} k_B T$$

όπου $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K η σταθερά Boltzman και T η θερμοκρασία σε K

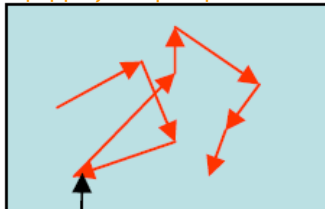
ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ρεύμα ολίσθησης

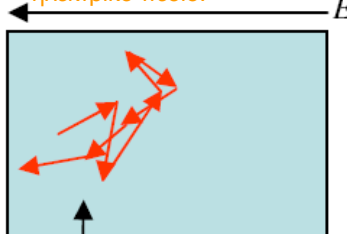
- ❑ Σχηματική αναπαράσταση της τυχαίας κίνησης ενός φορέα φορτίου.
- ❑ Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο στον ημιαγωγό υπάρχουν ακόμη οι μηχανισμοί σκέδασης αλλά όμως η μέση κίνηση των φορτίων καθορίζεται από την διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου.

Διαδρομή που ακολουθεί ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο όταν δεν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο.



Γεγονότα σκέδασης

Διαδρομή που ακολουθεί το ηλεκτρόνιο όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο.



Γεγονότα σκέδασης ακόμη υπάρχουν, αλλά το ηλεκτρικό πεδίο σπρώχνει τον φορέα φορτίου προς τα "αριστερά".

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

2ος νόμος του Newton

Ο 2ος νόμος του Newton δίνει τη σχέση ανάμεσα στην επιτάχυνση a και το ηλεκτρικού πεδίου E :

$$\underbrace{F = ma \quad a = \frac{dv}{dt} \quad F = qE}_{m \frac{dv}{dt} = (\pm)eE}$$

Ξέρουμε ότι η μάζα του ελεύθερου ηλεκτρονίου στο κενό είναι: $m_0 = 0.91 \times 10^{-30} \text{ kg}$.

Υπάρχει διαφορά μεταξύ του ηλεκτρονίου στο κενό και του ηλεκτρονίου στον ημιαγωγό.

Το ηλεκτρόνιο στον ημιαγωγό κινείται στην γειτονιά των άλλων ηλεκτρονίων και κυρίως στη γειτονιά των θετικά φορτισμένων ιόντων.

Έτσι, η ταχύτητα με την οποία κινείται ένα ηλεκτρόνιο στον ημιαγωγό θα εξαρτάται από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις η οποίες ασκούνται σε αυτό.

Η παραπάνω σχέση δεν έχει πάρει υπόψη της το γεγονός αυτό και βασικά η χρήση της είναι ακατάλληλη για έναν ημιαγωγό.

Ενεργός μάζα ελεύθερου φορέα φορτίου στον ημιαγωγό

- ❑ Όμως, αν θέλουμε να αποφύγουμε αυστηρούς κβαντομηχανικούς υπολογισμούς, είναι πιο εύκολο να κρατήσουμε αυτόν τον πασίγνωστο νόμο.
- ❑ Ο φορέας φορτίου στον ημιαγωγό θεωρείται ως σχεδόν ελεύθερος φορέας, ο οποίος αισθάνεται τις αλληλεπιδράσεις με το πλέγμα.
- ❑ Αυτές οι αλληλεπιδράσεις λαμβάνονται υπόψη διαμέσου αλλαγής της μάζας του φορέα φορτίου, για τα ηλεκτρόνια και τις οπές.

- ❑ Έτσι, η προηγούμενη σχέση γίνεται: $m_{n,p}^* \frac{dv}{dt} = (\mp)eE$

- ❑ Όπου η μάζα m αντικαθίσταται με: $m = m_0 m_{n,p}^*$

m_0 είναι η μάζα του ελεύθερου ηλεκτρονίου

m_n^* είναι η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου αγωγιμότητας

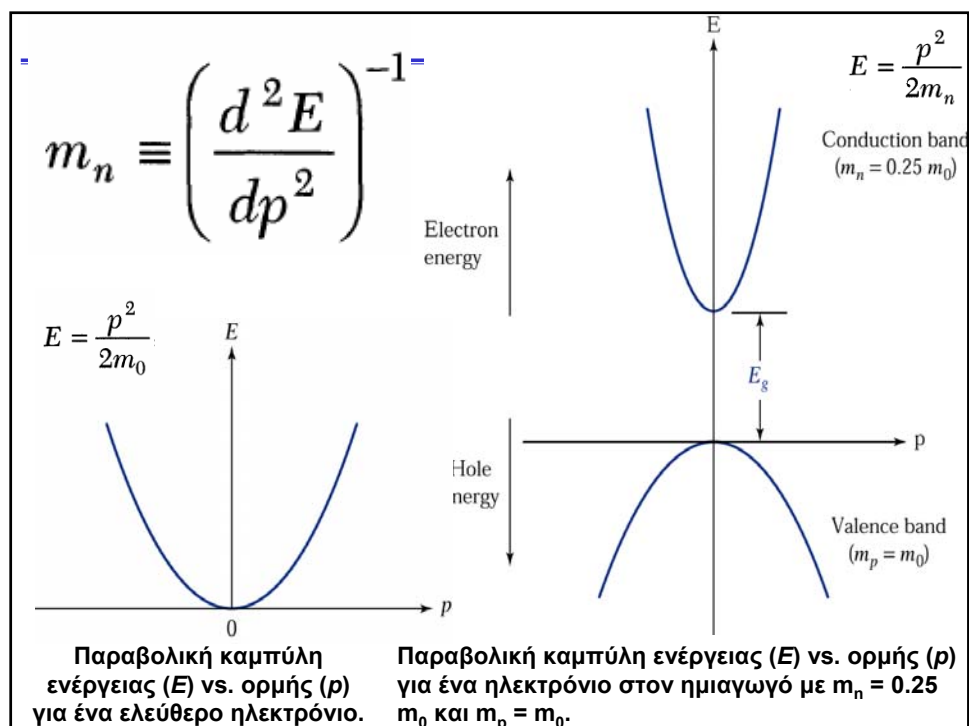
m_p^* είναι η ενεργός μάζα της οπής

Ενεργός μάζα ηλεκτρονίου και οπής για το Si, Ge και GaAs

Effective mass [†]	Si	Ge	GaAs
electrons	0.26	0.12	0.067
holes	0.33	0.16	0.26

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)



Μέση Ταχύτητα Ολίσθησης

$$F = \pm qE$$

Λόγω σκέδασης, τα ηλεκτρόνια μέσα στον ημιαγωγό δεν αποκτούν σταθερή επιτάχυνση. Ωστόσο, αυτά μπορούν να θεωρηθούν σαν κλασσικά σωματίδια κινούμενα με μια σταθερή μέση ταχύτητα ολίσθησης, V .



- για τη δύναμη επιτάχυνσης στη διεύθυνση-x ισχύει

$$\frac{dp_x}{dt} \text{ πεδίο} = \pm qE_x$$

- για τη δύναμη επιβράδυνσης λόγω των συγκρούσεων θεωρούμε ότι:

$$\frac{dp_x}{dt} \text{ σύγκρουση} = -\frac{p_x}{\tau} \quad \text{Όπου } \tau : \text{Μέσος ελεύθερος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών γεγονότων σκέδασης (mean free time)}$$

$$\text{Άρα: } m^* d\mathbf{v}_x/dt = q\mathbf{E}_x - m^* \mathbf{v}_x/\tau = 0 \Rightarrow$$

$$\mathbf{v}_x = \pm (q\tau/m^*)\mathbf{E}_x$$

Όπου $\mathbf{v}_x$: Μέση ταχύτητα ολίσθησης (drift velocity, $\mathbf{v}_x$ συμβολίζεται, συνήθως ως $\mathbf{v}_d$)

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ταχύτητα Ολίσθησης και Ευκινησία φορέων

Η ταχύτητα ολίσθησης των ευκίνητων φορέων είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου πεδίου - E :

Ορισμός: $\mu_{n,p} = \frac{q\tau}{m_{n,p}}$ μ είναι η ευκινησία (mobility)
(Μονάδες: $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

Έτσι, για τα ηλεκτρόνια:

$$\mathbf{v}_{dn} = -\mu_n \mathbf{E}$$

και για τις οπές:

$$\mathbf{v}_{dp} = \mu_p \mathbf{E}$$

εξαρτάται ($\mu = e\tau/m^*$) από :

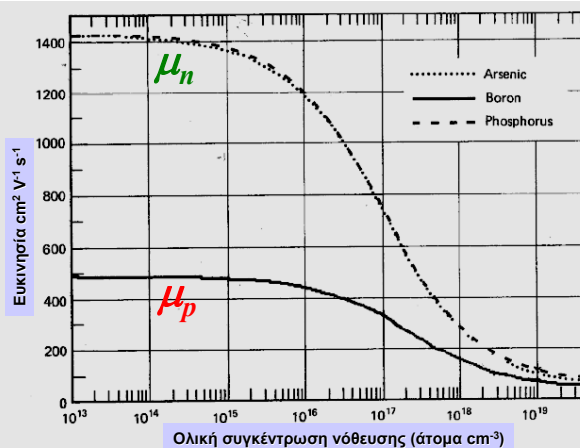
- τ : (Στατιστική και διαδικασίες σκέδασης)
- m^* : (Δομή Ζώνη: ενεργός μάζα αγωγιμότητας)

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Χαρακτηριστικές Τιμές Ευκινησίας (cm²/sV)

300K	μ_n (ηλεκτρόνια)	μ_p (οπές)
Si	1350	475
Ge	3900	1900
GaAs	8500	400
GaP	110	75



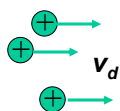
Παρατήρηση: Η ευκινησία των φορέων εξαρτάται από τη συνολικά συγκέντρωση νόθευσης ($N_D + N_A$) !

Πυκνότητα Ρεύματος Ολίσθησης

Ταχύτητα φορτισμένων σωματιδίων $\Rightarrow$ ηλεκτρικό ρεύμα I

Η πυκνότητα ρεύματος J είναι το ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας ($J = I / A$; A είναι η επιφάνεια της κάθετης τομής του αγωγού)

Αν έχουμε N θετικά φορτία ανά μονάδα όγκου που κινούνται με μέση ταχύτητα v προς την κατεύθυνση $+x$, τότε η πυκνότητα του ρεύματος στην κατεύθυνση $+x$ είναι $J = qNv_d$

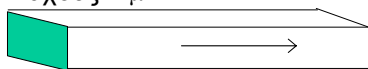


Παράδειγμα:

2×10^{16} οπές/cm³ κινούνται προς τα δεξιά με ταχύτητα 2×10^4 cm/sec

$$J = 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{16} \times 2 \times 10^4 = 64 \text{ A/cm}^2$$

Υποθέστε ότι αυτό συμβαίνει σε ένα αγωγό πλάτους $2 \mu\text{m}$ πάχους $1 \mu\text{m}$:



$$I = J \times A = 64 \times (2 \times 10^{-4} \times 1 \times 10^{-4}) = 1.28 \mu\text{A}$$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Πυκνότητα Ρεύματος Ολίσθησης

Πυκνότητα ρεύματος ολίσθησης ∝ ταχύτητα ολίσθησης φορέων

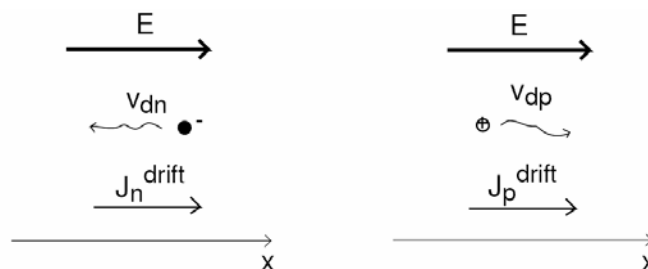
∝ συγκέντρωση φορέων

∝ φορτίο φορέων

$$J_n^{drift} = -qn v_{dn} = qn \mu_n E$$

$$J_p^{drift} = qp v_{dp} = qp \mu_p E$$

Ελέγξτε τα πρόσημα:



TL1001

Ολική πυκνότητα ρεύματος ολίσθησης

$$J^{drift} = J_n^{drift} + J_p^{drift} = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

Έχει τη μορφή του νόμου του *Ohm*:

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho}$$

Όπου:

$$\text{αγωγιμότητα} \equiv \sigma = qn\mu_n + qp\mu_p \quad (\text{μονάδες: } \Omega^{-1}\text{-cm}^{-1})$$

$$\text{ειδική αντίσταση} \equiv \rho \equiv \frac{1}{\sigma} \quad (\text{μονάδες: } \Omega\text{-cm})$$

TL1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση ρ

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p}$$

$$\rho \cong \frac{1}{qn\mu_n} \text{ για υλικό n-τύπου}$$

$$\rho \cong \frac{1}{qp\mu_p} \text{ για υλικό p-τύπου}$$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Παράδειγμα

Θεωρείστε ένα δείγμα Si νοθευμένο με $10^{16}/\text{cm}^3$ άτομα Βορίου. Πόση είναι η ειδική αντίσταση;

Απάντηση:

$$N_A = 10^{16}/\text{cm}^3, N_D = 0 \quad (N_A \gg n_i \rightarrow \text{p-τύπου})$$

$$\rightarrow p \approx 10^{16}/\text{cm}^3 \text{ και } n \approx 10^4/\text{cm}^3$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p} \cong \frac{1}{qp\mu_p} \\ &= \left[(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})(450) \right]^{-1} = 1.4 \, \Omega - \text{cm} \end{aligned}$$

Από τη γραφική απεικόνιση: μ σαν συνάρτηση ($N_A + N_D$)

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Παράδειγμα (συνχ.)

Θεωρείστε ότι το ίδιο δείγμα Si, νοθεύεται επιπρόσθετα με $10^{17}/\text{cm}^3$ άτομα Αρσενικού. Πόση είναι η ειδική αντίσταση;

Απάντηση:

$$N_A = 10^{16}/\text{cm}^3, N_D = 10^{17}/\text{cm}^3 (N_D - N_A \gg \rightarrow \text{n-τύπου})$$

$$\rightarrow n \approx 9 \times 10^{16}/\text{cm}^3 \quad \text{και} \quad p \approx 1.1 \times 10^3/\text{cm}^3$$

$$\rho = \frac{1}{qn\mu_n + qp\mu_p} \cong \frac{1}{qn\mu_n}$$

$$= [(1.6 \times 10^{-19})(9 \times 10^{16})(700)]^{-1} = 0.10 \, \Omega - \text{cm}$$

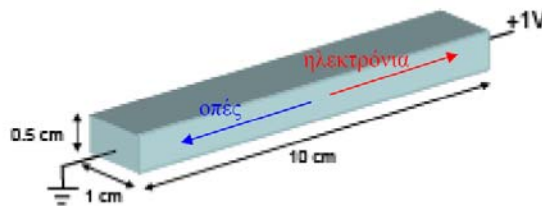
Το δείγμα έχει μετατραπεί σε υλικό τύπου-n με την προσθήκη περισσότερων δοτών από ότι αποδεκτών, και λέμε ότι είναι "αντισταθμισμένο".

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Άσκηση

1) (30 μονάδες) Τάση 1V εφαρμόζεται μεταξύ της μακρύτερης διάστασης ενός ημιαγωγού n-τύπου μεγέθους $0.5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. Θεωρείστε ότι οι ευκινήσεις των ηλεκτρονίων και των οπών είναι ίσες και η ενδογενής συγκέντρωση φορέων σε θερμοκρασία δωματίου είναι 10^{10} cm^{-3} .



(α) (5 μον.) Σημειώστε στο σχήμα τη διεύθυνση ροής των ηλεκτρονίων και των οπών.

Τα ηλεκτρόνια έλκονται από το ψιλό δυναμικό και οι οπές από το χαμηλό.

(β) (5 μον.) Ποια είναι η αγωγιμότητα, αν το ρεύμα που ρέει είναι 50 mA.

$$\begin{aligned} J &= \sigma E & I &= JA \\ \sigma &= \frac{I}{E} = \frac{(5 \times 10^{-2} \text{ A})}{\frac{5 \times 10^{-1} \text{ cm} \cdot 1 \text{ cm}}{(1 \text{ V} / 10 \text{ cm})}} = \frac{10^{-1}}{10^{-1}} \frac{\text{A}}{\text{V cm}} = 1 \, \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1} \end{aligned}$$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Άσκηση (συνεχ.)

(γ) (5 μον.) Ποια είναι η συγκέντρωση των οπών αν η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι 10^{16} cm^{-3} .

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(10^{10})^2}{10^{16}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

(δ) (5 μον.) Χρησιμοποιώντας το αποτέλεσμα στο (β), υπολογίστε την ευκινησία των ηλεκτρονίων.

$$\sigma = n q \mu$$

$$\mu = \frac{\sigma}{n q} = \frac{1 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}}{10^{-19} \text{ C} \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}} = 10^3 \frac{\text{A} \cdot \text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{C}} \quad (1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{\text{s}})$$

$$= 10^3 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Άσκηση (συνεχ.)

(ε) (10 μον.) Πόσο μακριά από το ενδογενές επίπεδο E_i βρίσκεται η ενέργεια Fermi E_F σε θερμοκρασία δωματίου ($kT = 26 \text{ meV}$).

$$n_0 = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$kT \ln \frac{n_0}{n_i} = E_F - E_i$$

$$26 \text{ meV} \cdot \ln \frac{10^{16}}{10^{10}} = E_F - E_i$$

$$E_F - E_i = 26 \text{ meV} \cdot 6 \cdot \ln 10 = \sim 350 \text{ meV}$$

$$(\ln 10 \sim 2.3)$$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ταχύτητα Ολίσθησης και Ευκίνησία φορέων

Η ταχύτητα ολίσθησης των ευκίνητων φορέων είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου πεδίου - E :

$$|v| = \mu E$$

εξαρτάται ($\mu = e\tau/m^*$) από :

- i) τ : (Στατιστική και διαδικασίες σκέδασης)
- ii) m^* : (Δομή Ζώνης: ενεργός μάζα αγωγιμότητας)

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Συνολικός μέσος ελεύθερος χρόνος

Αν, τ_i ο μέσος ελεύθερος χρόνος για κάθε διαδικασία σκέδασης τότε : $(1/\tau_i)$ = μέτρο της πιθανότητας σκέδασης τύπου- i

Οπότε:

συνολική πιθανότητα σκέδασης = άθροισμα των επιμέρους πιθανοτήτων

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \left(\frac{1}{\tau_i} \right)$$

Στην περίπτωση τέλει-άπειρου κρυστάλλου:

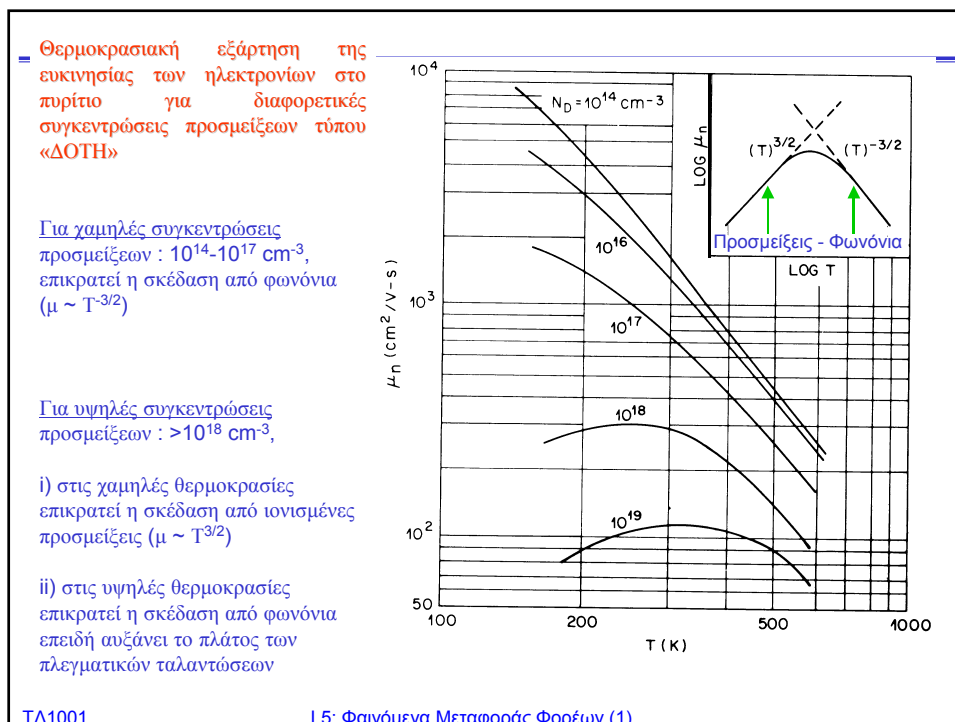
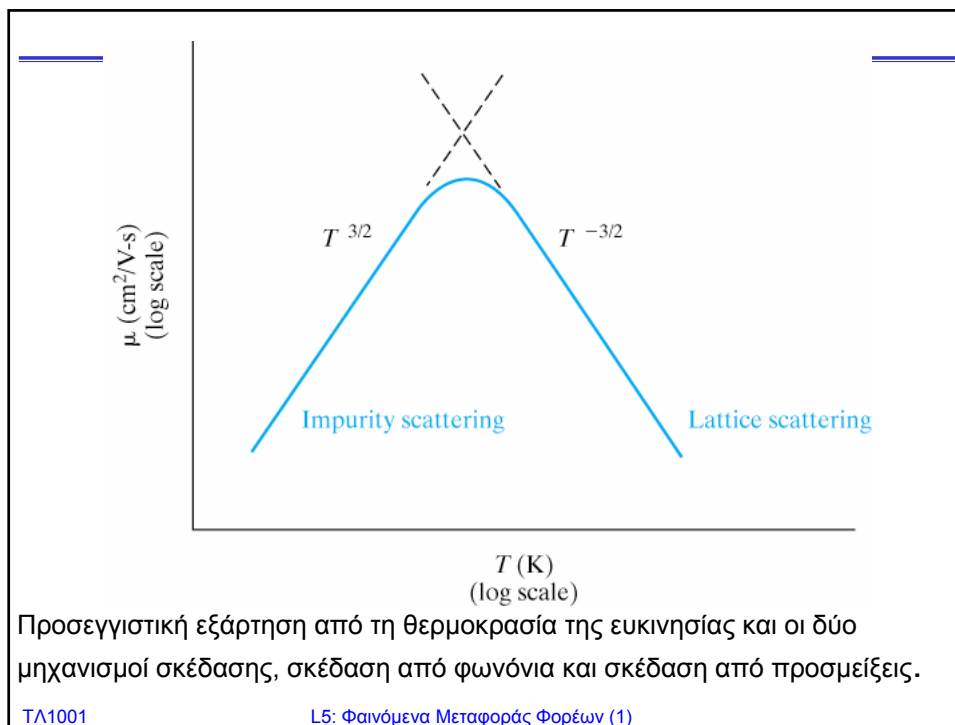
i) θερμικές ταλαντώσεις, ii) ιονισμένες προσμείξεις

$$\Rightarrow \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{phonon}}} + \frac{1}{\tau_{\text{ionized dopants}}}$$

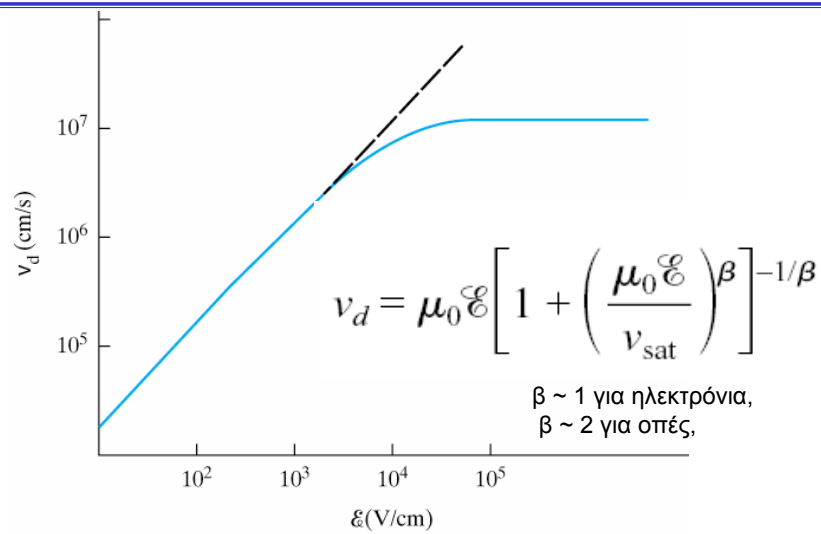
Όπου: $\tau_{\text{phonon}} \sim T^{-3/2}$ και $\tau_{\text{ion-dop}} \sim T^{3/2}$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)



Κατάρρευση του νόμου Ohm σε μεγάλα ηλεκτρικά πεδία



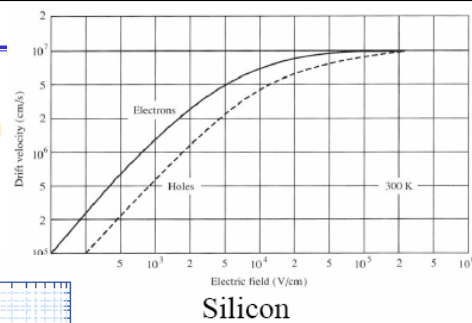
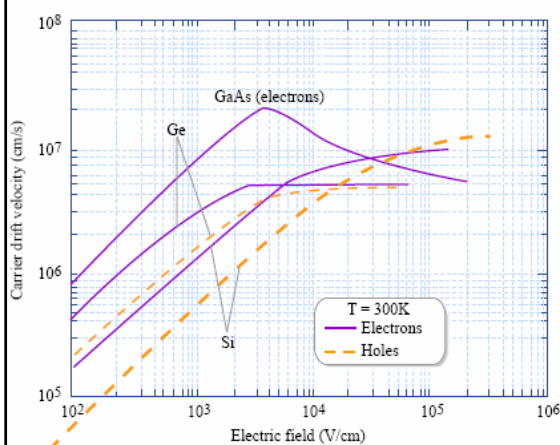
Κορεσμός της ταχύτητας ολίσθησης των ηλεκτρονίων σε μεγάλα ηλεκτρικά πεδία για το Si.

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Κορεσμός ταχύτητας

Κατάρρευση του νόμου Ohm σε μεγάλα ηλεκτρικά πεδία



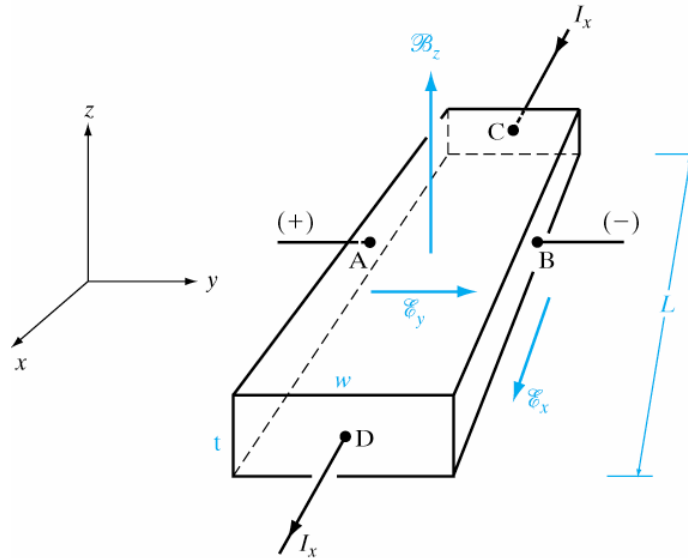
Πάνω:
 γράφημα
 ταχύτητα vs.
 πεδίο σε Θ.Δ.
 (γράφημα log-
 log)

Αριστερά: Καμπύλες ταχύτητας
 vs. πεδίο για Si, Ge και GaAs σε
 Θ.Δ. (καμπύλες log-log).

(Neaman, Fig. 5.7)

έων (1)

Φαινόμενο Hall



ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Φαινόμενο Hall

Όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο κάθετα στη διεύθυνση ολίσθησης των οπών σε ένα p-τύπου ημιαγωγό, αλλάζει η κίνηση των οπών. Χρησιμοποιώντας ανυσματικό συμβολισμό, η ολική δύναμη που ασκείται σε μια οπή εξαιτίας του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι:

$$\mathbf{F} = q(\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{v} \times \boldsymbol{\beta})$$

where $\boldsymbol{\varepsilon}$ = electric field, $\boldsymbol{\beta}$ = magnetic field,

and $\mathbf{v}$ = velocity

Στην διεύθυνση y, η δύναμη είναι:

$$F_y = q(\varepsilon_y - v_x \beta_z)$$

Για να διατηρήσουμε την σταθερή κατάσταση ροής των οπών (steady state)

$$F_y = q(\varepsilon_y - v_x \beta_z) = 0$$

$$\varepsilon_y = v_x \beta_z = \left(\frac{J_x}{qp_0} \right) \beta_z = R_H J_x \beta_z, \quad R_H = \frac{1}{qp_0}$$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (E)

Δυναμικό (V)

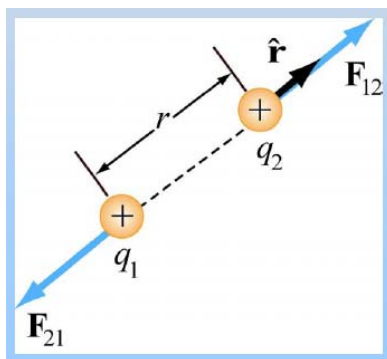
Δυναμική Ενέργεια (U)

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Νόμος Coulomb (F)

Δύναμη που ασκεί το φορτίο q_1 στο q_2 :



$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9875 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$$

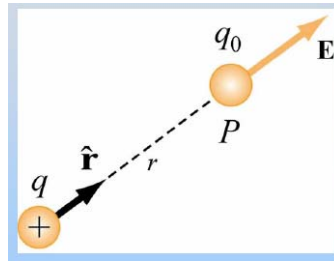
ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ηλεκτρικό Πεδίο (E)

Το ηλεκτρικό πεδίο σε ένα σημείο είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα δοκιμαστικό φορτίο q_0 που βρίσκεται στο σημείο αυτό, δια το φορτίο q_0 :

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_0}$$



ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Δυναμικό Ηλεκτρικού Πεδίου (V) και Ενέργεια (U)

Δυναμικό Ηλεκτρικού Πεδίου (V) μεταξύ δύο σημείων A και B είναι το έργο που καταναλώνεται όταν η μονάδα θετικού φορτίου κινείται από το A στο B:

$$\Delta V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Μονάδες:
Joules/Coulomb
= Volts

Το έργο που απαιτείται για τη μετακίνηση του φορτίου q από το A στο B:

$$\begin{aligned} W_{ext} &= \Delta U = U_B - U_A \\ &= q\Delta V \quad \text{Joules} \end{aligned}$$

Εμείς δουλεύουμε με ΔU (ΔV) γιατί μόνο οι αλλαγές ενδιαφέρουν

Εξαγωγή του πεδίου E από το δυναμικό V

$$\Delta V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

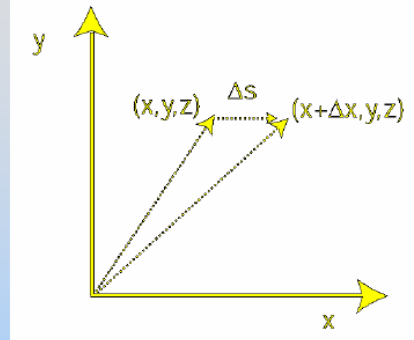
$$A = (x, y, z), B = (x + \Delta x, y, z)$$

$$\Delta \vec{s} = \Delta x \hat{i}$$

$$\Delta V = - \int_{(x,y,z)}^{(x+\Delta x,y,z)} \vec{E} \cdot d\vec{s} \cong -\vec{E} \cdot \Delta \vec{s} = -\vec{E} \cdot (\Delta x \hat{i}) = -E_x \Delta x$$

$$E_x \cong -\frac{\Delta V}{\Delta x} \rightarrow -\frac{\partial V}{\partial x}$$

E_x = Ρυθμός αλλαγής του V με y και z σταθερά σημεία



Σημαντικές Σχέσεις

Το Πεδίο είναι ίσο με την αρνητική κλίση του δυναμικού

$$\Delta V = - \int_A^B \mathbf{E} \, d\mathbf{x} \quad \Leftrightarrow \quad E = - \frac{dV}{dx}$$

Η δύναμη είναι ίση με την αρνητική κλίση της δυναμικής ενέργειας

$$\Delta U = - \int_A^B \mathbf{F}_E \, d\mathbf{x} \quad \Leftrightarrow \quad F_E = - \frac{dU}{dx}$$

Ενεργειακές Ζώνες: Μερικές Σημαντικές Σχέσεις

Ηλεκτρικό πεδίο

Σε κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο ασκείται μια δύναμη $-e\mathcal{E}$ από το πεδίο.

Όμως:

Δυναμική ενέργεια $e \equiv$ ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας : $U \equiv E_C$

Οπότε:

$$-q\mathcal{E} = -\frac{dE_C}{dx}$$

Επειδή ενδιαφερόμαστε για την κλίση της δυναμικής ενέργειας, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιοδήποτε τμήμα του ενεργειακού διαγράμματος που είναι παράλληλο στα E_C και E_V . Είναι βολικό να χρησιμοποιήσουμε το ενδογενές επίπεδο Fermi E_i , επειδή θα χρησιμοποιήσουμε τη στάθμη E_i όταν εξετάσουμε τις επαφές p-n. Έτσι θα έχουμε:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_C}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ενεργειακές Ζώνες: Μερικές Σημαντικές Σχέσεις

Ηλεκτροστατικό δυναμικό (V)

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό V σε ένα σημείο x του ημιαγωγού, με συγκέντρωση φορτίου $\rho(x)$ εκφράζεται μέσω των εξισώσεων Gauss & Poisson ως:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

$$\mathcal{E} \equiv -\frac{dV}{dx}$$

και σε συνδυασμό με την προηγούμενη σχέση του πεδίου παίρνουμε τη σχέση:

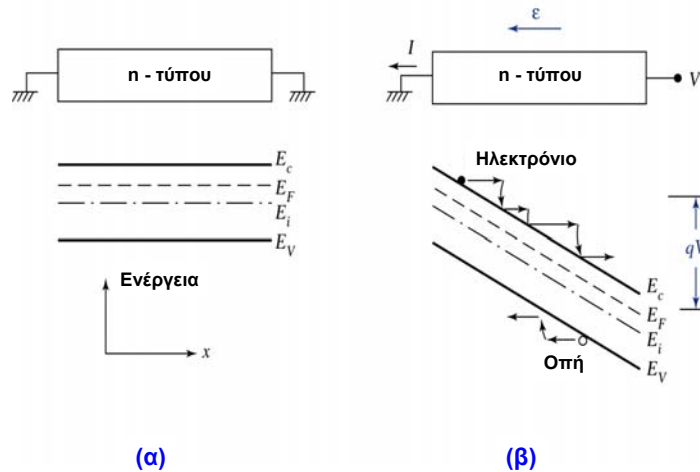
$$V = -\frac{E_i}{q}$$

Η οποία εκφράζει τη σχέση μεταξύ του ηλεκτροστατικού δυναμικού και της δυναμικής ενέργειας του ηλεκτρονίου

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Εφαρμογή διαφοράς δυναμικού V ανάμεσα στα δύο άκρα ενός επιμήκους ομογενούς ημιαγωγού



Ημιαγωγός τύπου- n

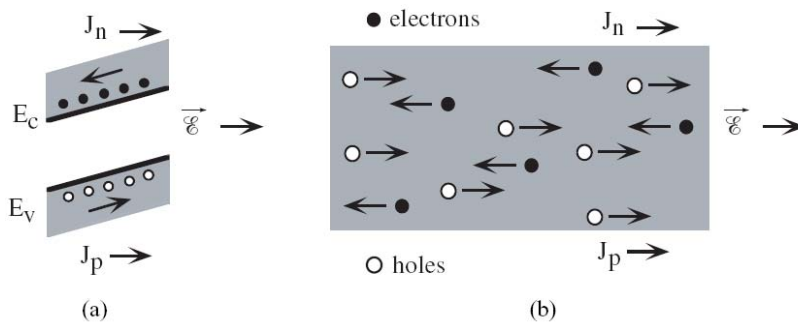
(α) σε θερμική ισορροπία και (β) κάτω από συνθήκες πόλωσης.

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ρεύμα Ολίσθησης

- Η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου θα προκαλέσει κλίση στις ενεργειακές ζώνες του ημιαγωγού έτσι ώστε το ηλεκτρικό πεδίο δείχνει την κατεύθυνση μεγαλύτερης δυναμικής ενέργειας.



ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

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

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

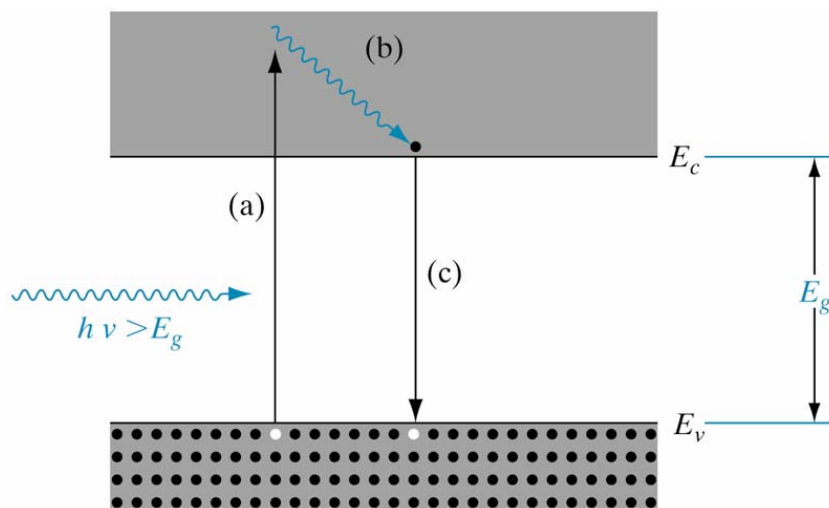
- Απελευθέρωση ενέργειας (με τη μορφή θερμότητας ή φωτός)
- Ρυθμός Επανασύνδεσης: $R = [\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$
- 1 γεγονός επανασύνδεσης απαιτεί 1 ηλεκτρόνιο + 1 οπή

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

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Οπτική Γένεση



ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Ομοιόμορφη Οπτική Γένεση, $G_{\text{οπτ}}(t)$

□ Πληθυσμός ηλεκτρονίων και οπών, n και p :

- Το φως παρέχει ενέργεια και "σπάει" δεσμούς δημιουργώντας επιπλέον φορείς ρεύματος, δηλ. οπές, p' , και ηλεκτρόνια, n' . Αυτοί οι φορείς ρεύματος δημιουργούνται ανά ζεύγη. Έτσι:

Συγκέντρωση ηλεκτρονίων

$$\left. \begin{aligned} n_o &\Rightarrow n_o + n'(t) \\ p_o &\Rightarrow p_o + p'(t) \end{aligned} \right\} \text{όπου} \quad n'(t) = p'(t)$$

Συγκέντρωση οπών

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Φωτοαγωγιμότητα – ολίσθηση και οπτική γένεση

- Όταν οι συγκεντρώσεις των φορέων ρεύματος αλλάζουν εξαιτίας της οπτικής γένεσης . . .

$$n(t) = n_o + n'(t), \quad p(t) = p_o + p'(t) \quad \text{όπου} : p'(t) = n'(t)$$

- ...η αγωγιμότητα αλλάζει:

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= q[\mu_e n(t) + \mu_h p(t)] \\ &= q[\mu_e n_o + \mu_h p_o] + q[\mu_e + \mu_h]n'(t) \\ &= \sigma_o + \sigma'(t) \end{aligned}$$

ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)

Φωτοαγωγιμότητα – ολίσθηση και οπτική γένεση (συνεχ.)

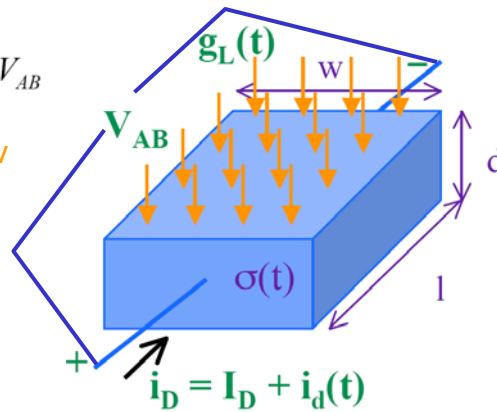
- Αυτή η αλλαγή αγωγιμότητας χρησιμοποιείται στους φωτοαγώγιμους ανιχνευτές που ανιχνεύουν φως:

$$i_D(t) = [\sigma_o + \sigma'(t)] \frac{w \cdot d}{l} V_{AB} = I_D + i_d(t)$$

$$\text{με } i_d(t) = \sigma'(t) \frac{w \cdot d}{l} V_{AB}$$

- Το ρεύμα μεταβάλλεται στην απόκριση του φωτός.

$$g_L(t) \Rightarrow i_d(t)$$



ΤΛ1001

L5: Φαινόμενα Μεταφοράς Φορέων (1)