



Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

- Έγχυση φορέων
- Ορθή/Ανάστροφη πόλωση

Λευτέρης Καπετανάκης



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

Φθινόπωρο 2010

ΤΛ1001

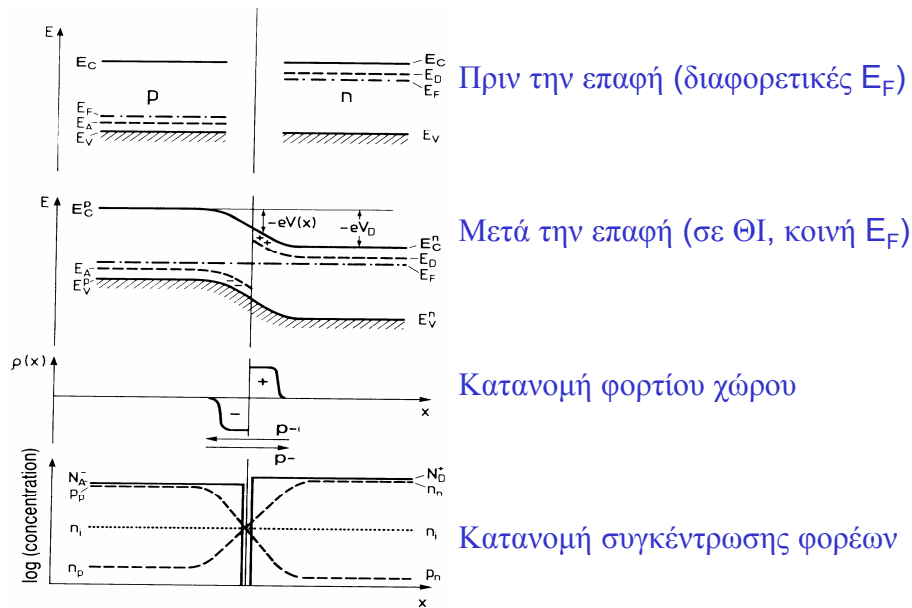
L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

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.

ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

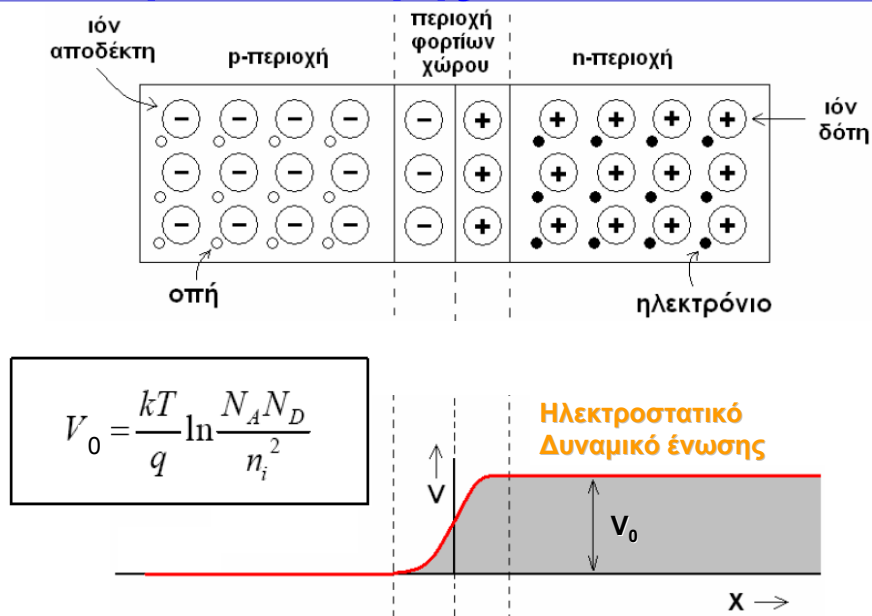
Επαφή p-n



ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

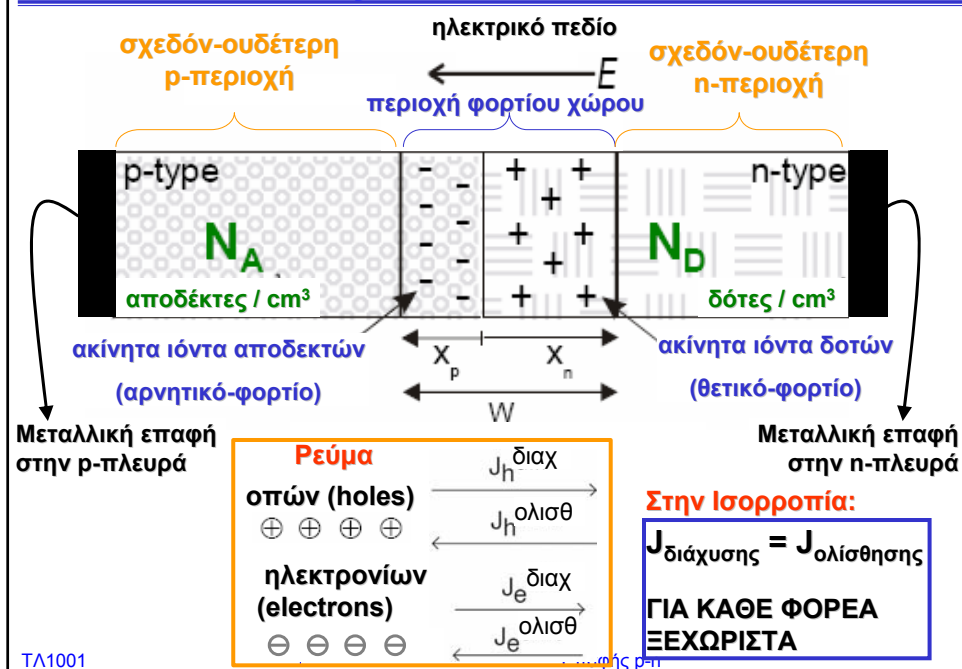
Δυναμικό Επαφής



ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Ρεύματα Επαφής p-n σε Θερμική Ισορροπία



Επίδραση εφαρμοζόμενης τάσης



- ❑ Οι σχεδόν-ουδέτερες περιοχές p και n έχουν χαμηλή αντίσταση, ενώ η περιοχή αραίωσης έχει υψηλή αντίσταση. Έτσι, **κατά την εφαρμογή μιας εξωτερικής τάσης V_D εγκάρσια στη δίοδο, σχεδόν όλη η πτώση τάσης εμφανίζεται διαμέσου της περιοχής αραίωσης.** (Σκέψου το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης.)
- ❑ Αν $V_D > 0$ (**ορθή πόλωση**), ο δυναμικός φραγμός για τη διάχυση των φορέων ελαττώνεται λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης.
- ❑ If $V_D < 0$ (**ανάστροφη πόλωση**), ο δυναμικός φραγμός για τη διάχυση των φορέων αυξάνεται λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης.

ΤΑ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Υπολογισμός του W

$$\begin{aligned}
 W &= x_n + x_p \\
 &= \sqrt{\frac{2\epsilon}{q}} \cdot V_0 \cdot \left[\frac{\sqrt{N_D}}{\sqrt{N_A} \cdot \sqrt{N_A + N_D}} + \frac{\sqrt{N_A}}{\sqrt{N_D} \cdot \sqrt{N_A + N_D}} \right] \\
 &= \sqrt{\frac{2\epsilon}{q}} \cdot V_0 \cdot \left[\frac{N_A + N_D}{\sqrt{N_A N_D} \cdot \sqrt{N_A + N_D}} \right] \\
 W &= \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \cdot V_0^2}
 \end{aligned}$$

ΣΤΗΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

$$W(0) = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \cdot V_0^2}$$

**ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ
ΣΧΕΣΗ**

ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Πόλωση Επαφής p-n

Γενικά:
$$W(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 \pm |V|)}$$

V είναι η εφαρμοζόμενη τάση

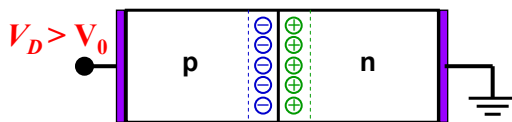
$$\begin{cases}
 +|V| & \text{στην ανάστροφη πόλωση} \\
 & \text{(W αυξάνεται)} \\
 -|V| & \text{στην ορθή πόλωση} \\
 & \text{(W ελαττώνεται)}
 \end{cases}$$

ΤΛ1001

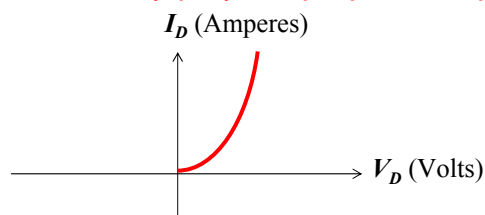
L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Ορθή πόλωση (Forward Bias)

- Καθώς V_D αυξάνει, ο δυναμικός φραγμός ο οποίος δυσκολεύει τη διάχυση των φορέων ελαττώνεται λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης *, και το ρεύμα αυξάνει εκθετικά.



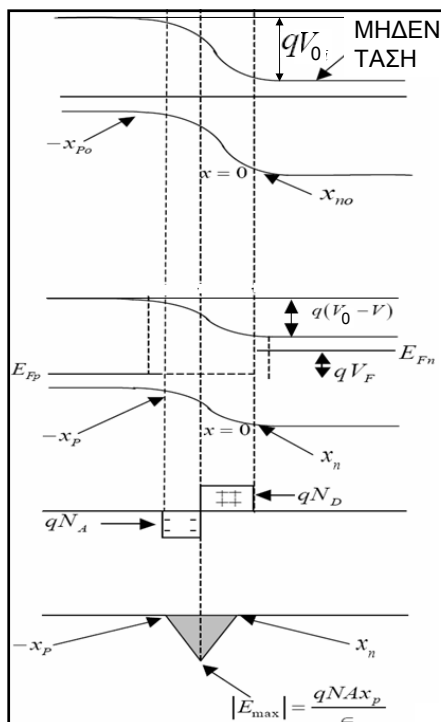
Οι φορείς οι οποίοι διαχέονται δια μέσου της επαφής γίνονται φορείς μειονότητας στις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές, οπότε αυτοί επανασυνδέονται με τους φορείς πλειονότητας, “εξαφανίζονται” με την απόσταση.



* Οπότε, το εύρος της περιοχής φορτίου χώρου ελαττώνεται.

ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n



Ορθή Πόλωση

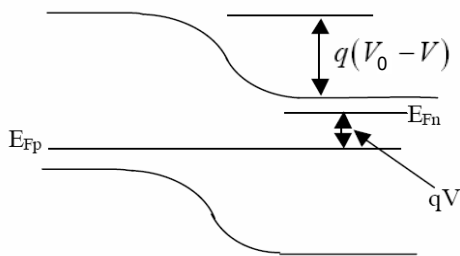
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:

1. Η συνολική κάμψη των ζωνών είναι τώρα $q(V_0 - V)$
2. Η σκιασμένη επιφάνεια είναι: $\left| \int E \cdot dx \right| = V_0 - |V|$
3. Τα όρια της περιοχής φορτίου χώρου μετακινούνται προς την ένωση, οπότε το W μικραίνει.
4. $E_{Fn} - E_{Fp} = qV_F$ τα επίπεδα Fermi στις σχεδόν ουδέτερες περιοχές n και p διαχωρίζονται κατά μια ποσότητα ίση με τη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται, V_F .

ια Δίοδο Επαφής p-n

ΠΟΛΥ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ: Ορθή Πόλωση

Για $V > 0$, $V_0 - V \downarrow \Rightarrow |E_{\text{ΠΦΧ}}| \downarrow \Rightarrow |J_{\text{ολισθ}}| \downarrow$



Άρση της αντιστάθμισης των ρευμάτων στην περιοχή φορτίου χώρου (ΠΦΧ):

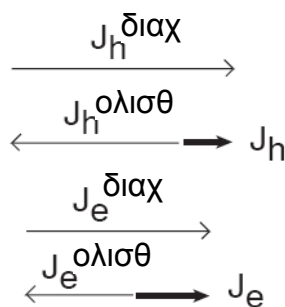
$$|J_{\text{ολισθ}}| < |J_{\text{διαχ}}|$$

Καθαρό ρεύμα διάχυσης στην ΠΦΧ $\Rightarrow$ **έγχυση** φορέων μειονότητας στις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές (ΣΟΠς).

Η ροή ρεύματος μπορεί να είναι μεγάλη γιατί πολλοί φορείς μειονότητας εγχέονται στις ΣΟΠς.

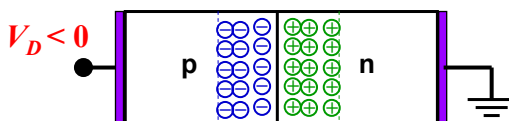
ΤΛ1001

Επαφής p-n

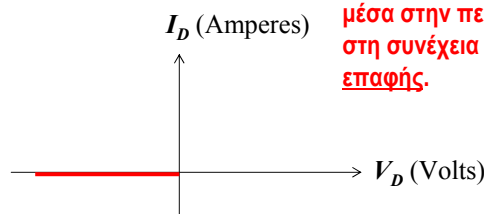


Ανάστροφη πόλωση (Reverse Bias)

- Καθώς $|V_D|$ αυξάνει, ο δυναμικός φραγμός ο οποίος δυσκολεύει τη διάχυση των φορέων αυξάνεται λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης*; έτσι, οι φορείς δε διαχέονται διαμέσου της επαφής.



Στην πραγματικότητα ένα πολύ μικρό ανάστροφο ρεύμα ($I_D < 0$) διαρρέει την επαφή, εξαιτίας των φορέων μειονότητας που διαχέονται αρχικά από τις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές μέσα στην περιοχή φορτίου χώρου και στη συνέχεια ολισθύνουν διαμέσου της επαφής.

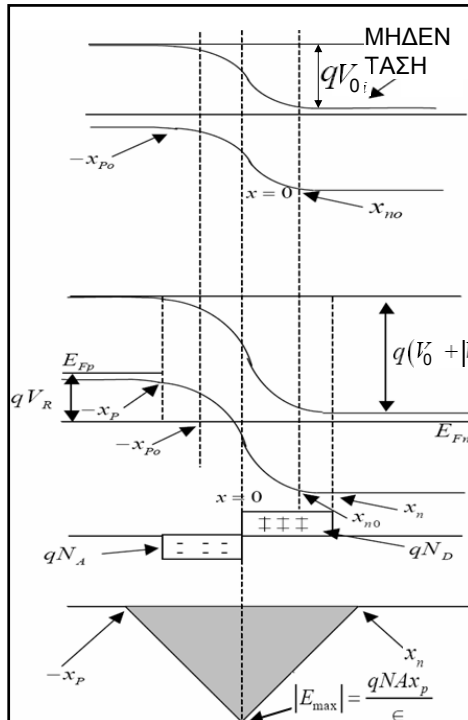


* Οπότε, το πλάτος της περιοχής αραίωσης αυξάνει.

ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Ανάστροφη Πόλωση



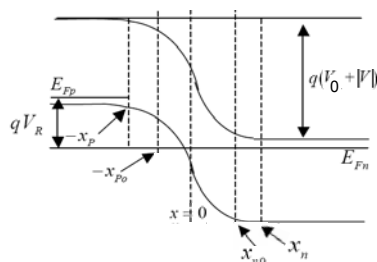
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:

1. Η συνολική κάμψη των ζωνών είναι τώρα $q(V_0 + V)$
2. Η σκιασμένη επιφάνεια είναι: $\left| \int E \cdot dx \right| = V_0 + |V|$
3. Η περιοχή φορτίου χώρου διαστέλλεται.
4. $E_{Fp} - E_{Fn} = q|V_R|$ με την εφαρμοζόμενη τάση, V_R .

Επαφής p-n

ΠΟΛΥ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ: Ανάστροφη Πόλωση

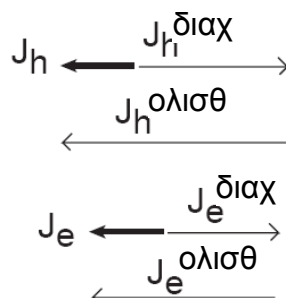
Για $V < 0$, $V_0 + V \uparrow \Rightarrow |E_{\text{ΠΦΧ}}| \uparrow \Rightarrow |J_{\text{ολισθ}}| \uparrow$



Άρση της αντιστάθμισης των ρευμάτων στην ΠΦΧ :

$$|J_{\text{ολισθ}}| > |J_{\text{διαχ}}|$$

Καθαρό ρεύμα ολίσθησης στην ΠΦΧ $\Rightarrow$ **εξαγωγή** φορέων μειονότητας από τις ΣΟΠς.



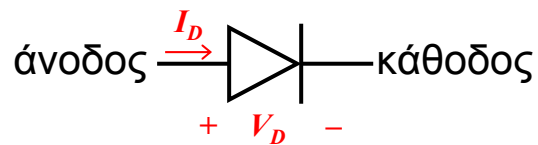
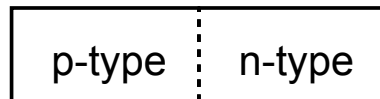
Η ροή ρεύματος είναι μικρή γιατί υπάρχουν πολύ λίγοι φορείς μειονότητας για εξαγωγή από τις ΣΟΠς.

ΤΑ1001

Επαφής p-n

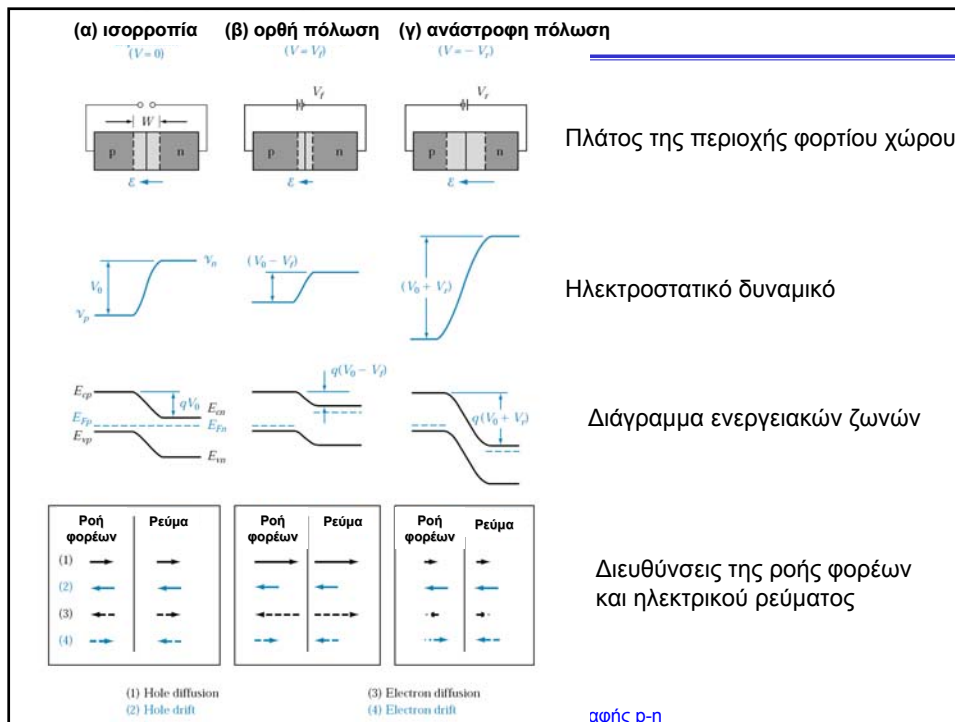
Επαφές p-n

- ❑ Μία ένωση p-τύπου και n-τύπου ημιαγωγών σχηματίζει μια δίοδο.
- ❑ Το ρεύμα ρέει μόνο στην μία διεύθυνση



ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

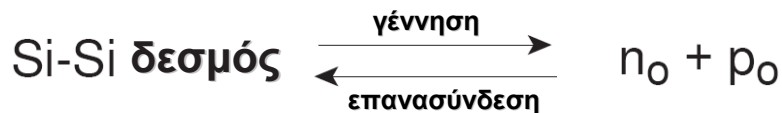


Μεταβολή της συγκέντρωσης φορέων μειονότητας στις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές

Τι θα συμβεί αν η συγκέντρωση φορέων μειονότητας στην σχεδόν-ουδέτερη περιοχή (ΣΟΠ) αλλάξει από την τιμή που έχει στην ισορροπία;

⇒ Αίρεται η εξισορρόπηση ανάμεσα στις διαδικασίες γέννησης και επανασύνδεσης.

• Στη θερμική ισορροπία: ο ρυθμός με τον οποίο σπάνε οι δεσμοί Si-Si ισούται με τον ρυθμό σχηματισμού νέων δεσμών



ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Έγχυση / Εξαγωγή φορέων μειονότητας στις QNRs

• Όταν εγχέονται φορείς μειονότητας: η συγκέντρωση φορέων είναι πάνω από την ισορροπία οπότε η επανασύνδεση κυριαρχεί



• Όταν εξάγονται φορείς μειονότητας: η συγκέντρωση φορέων είναι κάτω από την ισορροπία οπότε η γέννηση κυριαρχεί



ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Που λαμβάνει χώρα η γέννηση/επανασύνδεση;

1. Στο σώμα του ημιαγωγού
2. Στην επιφάνειες του ημιαγωγού & τις επαφές

Στις μοντέρνες διόδους επαφής p-n πυριτίου, η επανασύνδεση στην επιφάνεια & στην επαφή κυριαρχεί επειδή:

- η τέλεια περιοδικότητα του κρυσταλλικού πλέγματος σπάει στην επιφάνεια
⇒ πληθώρα κέντρων γέννησης και επανασύνδεσης
- Οι σύγχρονες διατάξεις είναι πολύ μικρές
⇒ ο λόγος του εμβαδού επιφάνειας / όγκου είναι μεγάλος.

Οι επιφάνειες και οι επαφές είναι πολύ ενεργά κέντρα γέννησης και επανασύνδεσης

⇒ στις επαφές, η συγκέντρωση φορέων δεν μπορεί να αποκλίνει από την ισορροπία:

$$n(s) = n_0 \quad p(s) = p_0$$

ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Συγκέντρωση φορέων : Νόμος Ένωσης

Ισορροπία

Πόλωση

$$(n_{n0}, p_{p0}, n_{p0}, p_{n0}) \rightarrow (n_n, p_p, n_p, p_n)$$

$$p_{p0} n_{p0} = n_i^2 = n_{n0} p_{n0}$$

$$p_p n_p \neq n_i^2 \neq n_n p_n$$

$$\frac{p_{p0}}{p_{n0}} = \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = e^{\frac{qV_0}{kT}}$$

$$\frac{p_p(-x_p)}{p_n(x_n)} = \frac{n_n(x_n)}{n_p(-x_p)} = e^{\frac{q(V_0 - V_D)}{kT}}$$

$$p_{p0} \approx N_A$$

$$n_p(-x_p) = n_{p0} e^{\frac{qV_D}{kT}}$$

$$n_{n0} \approx N_D$$

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{\frac{qV_D}{kT}}$$

ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Συγκέντρωση φορέων : Νόμος Ένωσης

- Ο νόμος ένωσης ισχύει αν η συγκέντρωση φορέων μειονότητας είναι μικρότερη από τη συγκέντρωση ισορροπίας των φορέων πλειονότητας. Η συνθήκη αυτή αναφέρεται ως **Χαμηλό Επίπεδο Έγχυσης**.

$$p_n < n_{no} \quad \text{και} \quad n_p < p_{po}$$

ΤΛ1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Συγκέντρωση φορέων : Ορθή Πόλωση

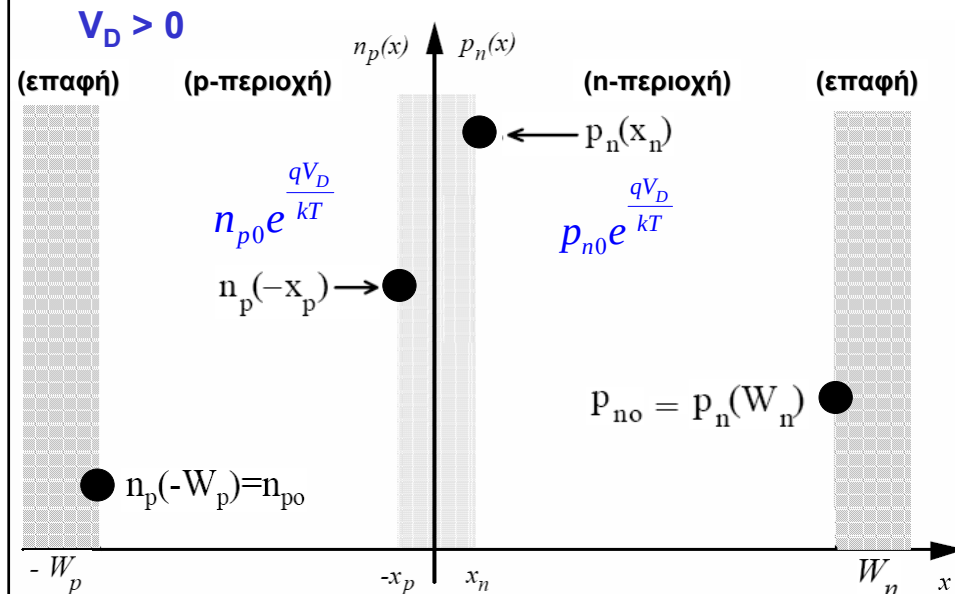
Για $V_D > 0 \Rightarrow$

$$n_p(-x_p) \gg n_{po}(-x_{po})$$
$$p_n(x_n) \gg p_{no}(x_{no})$$

- Υπάρχει πληθώρα φορέων διαθέσιμων για έγχυση, με την αύξηση της τάσης πόλωσης V , η συγκέντρωση των εγχεόμενων φορέων αυξάνει $\Rightarrow$ το επίπεδο ρεύματος ορθής πόλωσης μπορεί να γίνει υψηλό.
- Στην ορθή πόλωση, οι εγχεόμενοι φορείς μειονότητας διαχέονται σε όλη την έκταση της σχεδόν-ουδέτερης περιοχής (QNR) και επανασυνδέονται στην επιφάνεια/επαφή του ημιαγωγού.
- Η συγκέντρωση των φορέων μειονότητας διατηρείται στην ισορροπία στις ωμικές επαφές. Όλοι οι **επιπλέον φορείς επανασυνδέονται στην ωμική επαφή**.

Συγκέντρωση φορέων : Ορθή Πόλωση

• Η συγκέντρωση φορέων μειονότητας στα άκρα της περιοχής φορτίου χώρου είναι μια εκθετική συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης.



Συγκέντρωση φορέων : Ανάστροφη Πόλωση

Για $V_D < 0 \Rightarrow$

$$n_p(-x_p) \ll n_{p0}(-x_{p0})$$

$$p_n(x_n) \ll p_{n0}(x_{n0})$$

• Λίγοι φορείς διαθέσιμοι για εξαγωγή
 $\Rightarrow$ το ανάστροφο ρεύμα είναι μικρό.

• Κατά την ανάστροφη πόλωση, η συγκέντρωση των φορέων μειονότητας πέφτει κάτω από τις τιμές ισορροπίας n_{p0} και p_{n0} .

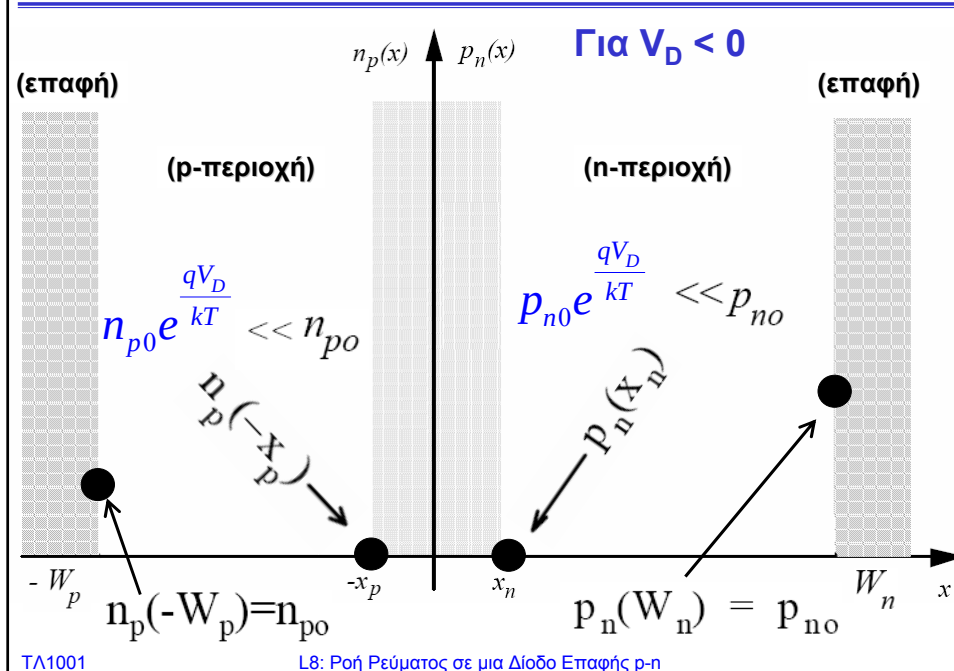
• Η συγκέντρωση φορέων μειονότητας στα άκρα της περιοχής φορτίου χώρου είναι κοντά στο **μηδέν** υπό ανάστροφη τάση.

• Η ιδιότητα ανόρθωσης της διόδου p_n προέρχεται από τις συνοριακές συνθήκες των φορέων μειονότητας στα άκρα της περιοχής φορτίου χώρου (SCR).

TL1001

L8: Ροή Ρεύματος σε μια Δίοδο Επαφής p-n

Συγκέντρωση φορέων : Ανάστροφη Πόλωση



Ανακεφαλαίωση

- Το ρεύμα της διόδου μπορεί να καθοριστεί αναλυτικά αθροίζοντας το ρεύμα των φορέων μειονότητας στα άκρα της ΠΦΧ

$$I = I_o(e^{\left[\frac{qV}{kT}\right]} - 1)$$

- Υπό συνθήκες ορθής πόλωσης:
 - Φορείς μειονότητας **εγχέονται** διαμέσου της ένωσης και διαχέονται προς την επαφή όπου **επανασυνδέονται**
- Υπό συνθήκες ανάστροφης πόλωσης:
 - Φορείς μειονότητας **δημιουργούνται** στην επαφή και διαχέονται προς την ένωση όπου **εξάγονται** διαμέσου της ένωσης

- **Υπό συνθήκες ανάστροφης πόλωσης:**
 - Φορείς μειονότητας **δημιουργούνται** στην επαφή και **διαχέονται** προς την ένωση όπου **εξάγονται** διαμέσου της ένωσης

