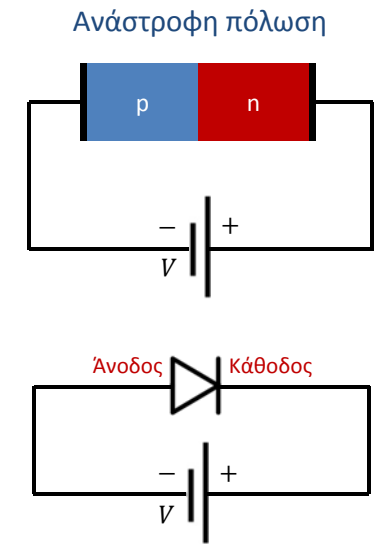
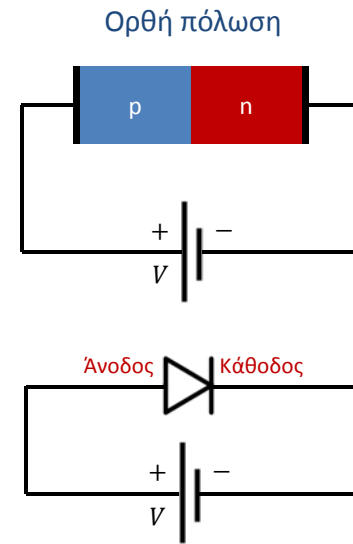


Ορθή πόλωση της επαφής p-n

Δ. Γ. Παπαγεωργίου
Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

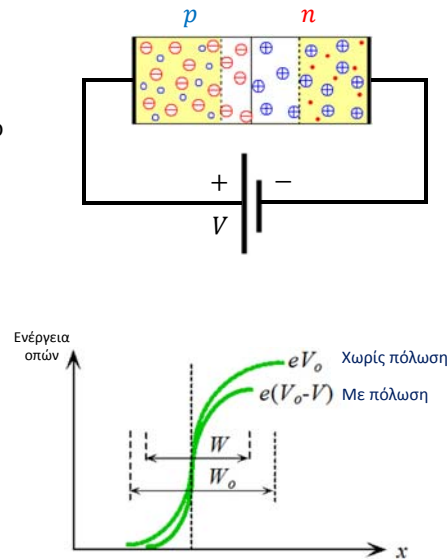
dparageo@uoi.gr
<http://pc164.materials.uoi.gr/dparageo>

Δύο τρόποι πόλωσης της επαφής p-n



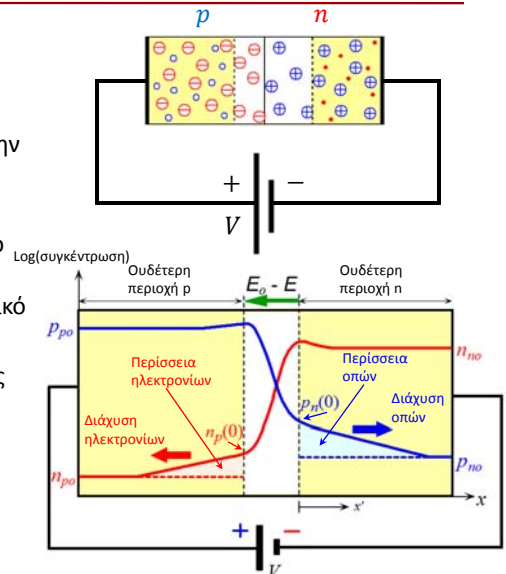
Ορθή πόλωση

- Η εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού μειώνει το εσωτερικό δυναμικό σε $V_0 - V$
- Αντίστοιχα μειώνεται και το ηλεκτρικό πεδίο που συγκρατεί τη διάχυση των φορέων .
- Αποτέλεσμα:
 - Οπές διαχέονται στην περιοχή n.
 - Ηλεκτρόνια διαχέονται στην περιοχή p.
 - Έγχυση περίσσειας φορέων μειονότητας.



Ορθή πόλωση

- Οι οπές που εγχέονται στην περιοχή n επανασυνδέονται με ηλεκτρόνια και χάνονται.
- Τα ηλεκτρόνια που εγχέονται στην περιοχή p επανασυνδέονται με οπές και χάνονται.
- Τα ηλεκτρόνια που χάνονται από την επανασύνδεση αναπληρώνονται από τον αρνητικό πόλο της πηγής.
- Όμοια ο θετικός πόλος της πηγής αναπληρώνει τις οπές.
- Με τον τρόπο αυτό το ρεύμα διαμέσου της διόδου μπορεί να διατηρηθεί.

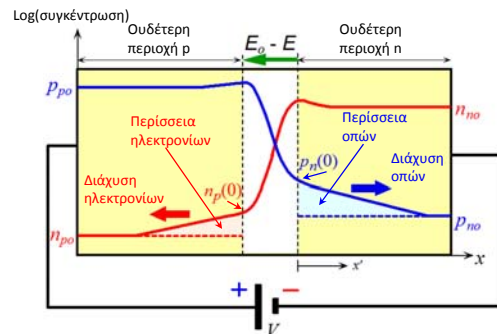


Νόμος της επαφής p-n

Περιγράφει τη επίδραση της πόλωσης στη συγκέντρωση των φορέων μειονότητας στο άκρο της περιοχής απογύμνωσης.

$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{eV}{kT}}$$

$$n_p(0) = n_{po} e^{\frac{eV}{kT}}$$



Το ρεύμα στην επαφή p-n – Εξίσωση Shockley

Η ολική πυκνότητα ρεύματος εξαιτίας διάχυσης των φορέων είναι:

$$J = J_{D,h} + J_{D,e} = \frac{eD_h n_i^2}{L_h N_d} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) + \frac{eD_e n_i^2}{L_e N_a} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) =$$

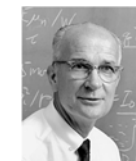
$$en_i^2 \left(\frac{D_h}{L_h N_d} + \frac{D_e}{L_e N_a} \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \Rightarrow$$

$$J = J_{so} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

Εξίσωση Shockley
για την ιδανική δίοδο

$$J_{so} = en_i^2 \left(\frac{D_h}{L_h N_d} + \frac{D_e}{L_e N_a} \right)$$

Πυκνότητα ανάστροφου
ρεύματος κορεσμού

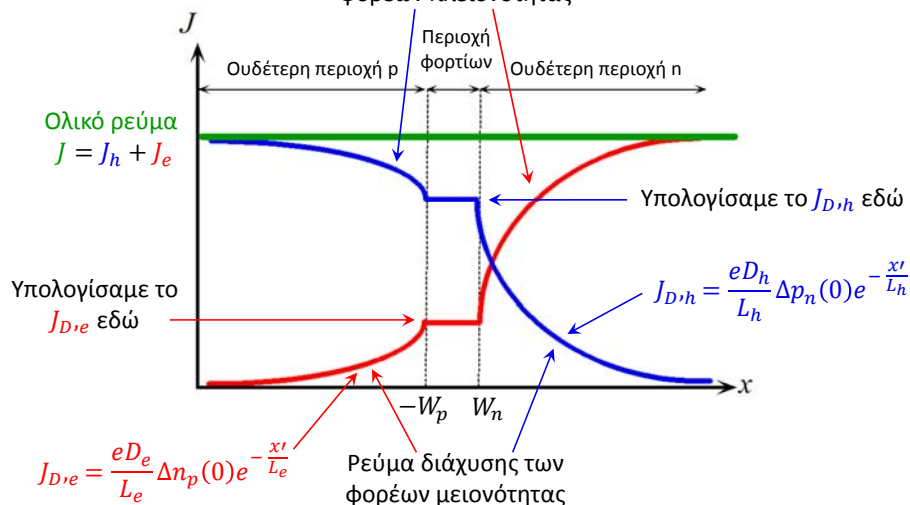


William Bradford Shockley Jr.
1910-1989

Η σταθερά J_{so} εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού ($D_h, D_e, L_h, L_e, n_i^2$) και από τη νόθευση (N_a, N_d).

Το ρεύμα στην επαφή p-n

Ρεύμα διάχυσης και ολίσθησης των φορέων πλειονότητας



Το ρεύμα στην επαφή p-n – Εξίσωση Shockley

Η εξίσωση Shockley:

$$J = J_{so} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

παίρνει μια πιο απλή μορφή όταν

$$\frac{eV}{kT} \gg 1$$

Γίνεται:

$$J = J_{so} e^{\frac{eV}{kT}}$$

Η προσέγγιση αυτή είναι πολύ καλή ακόμη και για μικρές τιμές V

Παράδειγμα:

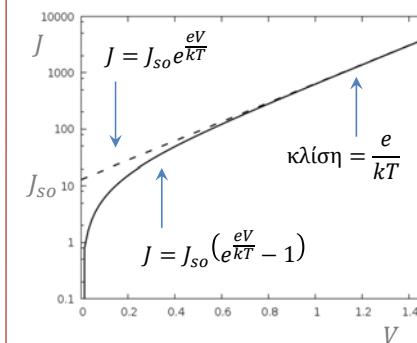
$$kT/e = 0.0259 V$$

$$T = 300 K$$

$$V = 0.1 V$$

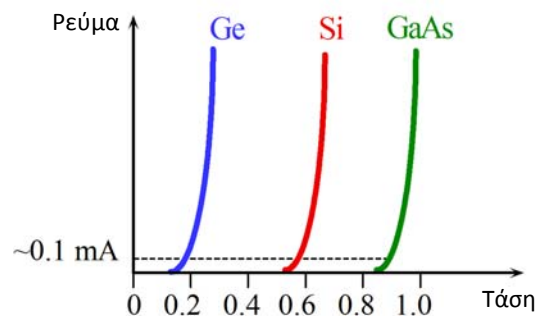
$$\frac{eV}{kT} = \frac{0.1 V}{0.0259 V} \approx 3.9$$

$$\frac{eV}{kT} = e^{3.9} \approx 49 \gg 1$$



Το ρεύμα στην επαφή p-n

Διάγραμμα ρεύματος-τάσης για επαφές p-n τριών διαφορετικών ημιαγωγών.



Για να πάρουμε ρεύμα $\sim 0.1\text{mA}$ πρέπει να εφαρμόσουμε τάση:
 0.2V για το Ge, 0.6V για το Si, 0.9V για το GaAs

Επανασύνδεση στην περιοχή απογύμνωσης

Μέχρι τώρα υποθέσαμε ότι οι φορείς μειονότητας διαχέονται στις ουδέτερες περιοχές και κατόπιν επανασυνδέονται.

Οι φορείς που χάνονται αναπληρώνονται από την εξωτερική πηγή.

Όμως κάποιοι από τους φορείς πλειονότητας επανασυνδέονται εντός της περιοχής απογύμνωσης.

Ρεύμα λόγω επανασύνδεσης στην περιοχή απογύμνωσης

$$J_{recom} = J_{ro} e^{\frac{eV}{2kT}}$$

όπου

$$J_{ro} = \frac{1}{2} en_i \left(\frac{W_p}{\tau_e} + \frac{W_n}{\tau_h} \right)$$

Ολικό ρεύμα με ορθή πόλωση

Το ολικό ρεύμα στη δίοδο έχει δύο όρους (υποθέτουμε $\frac{eV}{kT} \gg 1$):

$$J = J_{so} e^{\frac{eV}{kT}} + J_{ro} e^{\frac{eV}{2kT}}$$

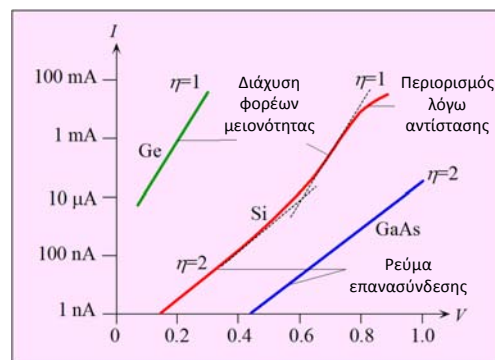
↑ Διάχυση φορέων μειονότητας ↑ Επανασύνδεση στην περιοχή απογύμνωσης

Μπορούμε να γράψουμε:

$$J = J_0 e^{\frac{eV}{\eta kT}}$$

όπου το η ονομάζεται συντελεστής ποιότητας και παίρνει τις τιμές:

- 1 Το ρεύμα οφείλεται σε διάχυση φορέων μειονότητας
- 2 Το ρεύμα οφείλεται σε επανασύνδεση στην περιοχή απογύμνωσης



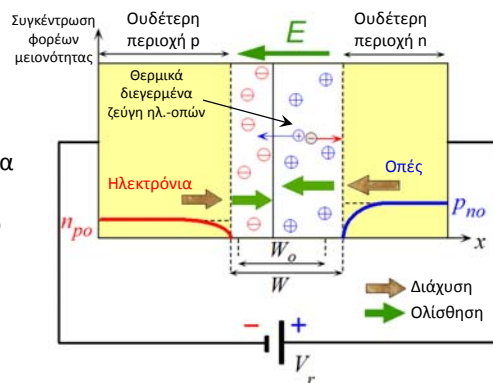
Ανάστροφη πόλωση της επαφής p-n

Δ. Γ. Παπαγεωργίου
 Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών
 Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

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

Επαφή p-n – Ανάστροφη πόλωση

- Πολώνουμε τη δίοδο με τάση $V = -V_r$ ($V_r > 0$)
- Ο αρνητικός πόλος έλκει σπές από την περιοχή p.
- Η κίνηση των σπών δεν μπορεί να διατηρηθεί αφού δεν υπάρχει αντίστοιχη παροχή φορέων από το άλλο άκρο.
- Όμοια ο θετικός πόλος έλκει ηλεκτρόνια από την περιοχή n.
- Η κίνηση των ηλεκτρονίων δεν μπορεί να διατηρηθεί αφού δεν υπάρχει αντίστοιχη παροχή φορέων από το άλλο άκρο.



Περιοχή απογύμνωσης στην ανάστροφη πόλωση

Το δυναμικό στην περιοχή απογύμνωσης είναι $V_0 + V_r$
Υπενθύμιση: Το εύρος της περιοχής απογύμνωσης δίνεται από:

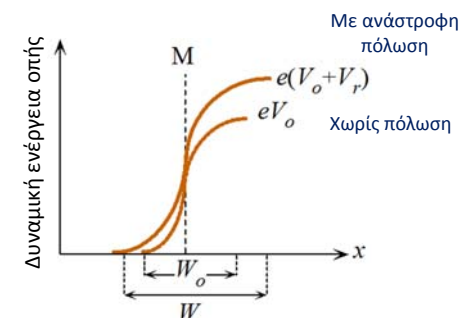
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_0 + V_r)}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}$$

Υπενθύμιση: Η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από:

$$E = -\sqrt{\frac{2(V_0 + V_r)e}{\varepsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Αποτέλεσμα της ανάστροφης πόλωσης:

- Μεγαλύτερη περιοχή απογύμνωσης
- Μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο.



Ανάστροφο ρεύμα λόγω διάχυσης

Το μικρό πλήθος σπών **κοντά στην περιοχή απογύμνωσης** στην πλευρά n μεταφέρεται απέναντι εξαιτίας του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Από το νόμο της επαφής:

$$p_n(0) = p_{no} e^{-\frac{eV_r}{kT}}$$

Αν $V_r > \frac{kT}{e} \approx 26mV$ τότε

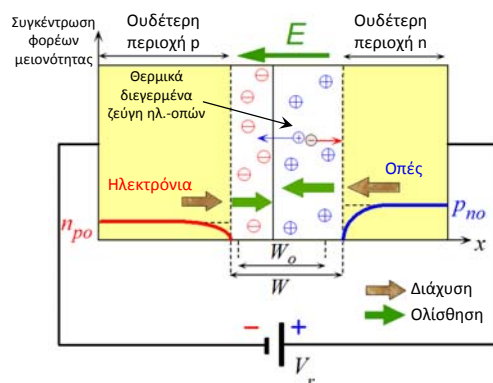
$$e^{-\frac{eV_r}{kT}} \rightarrow 0$$

και συνεπώς

$$p_n(0) \approx 0$$

Στο κύριο σώμα της περιοχής n συγκέντρωση σπών είναι:

$$p_{po} n_{po} = n_i^2 \Rightarrow p_{no} = \frac{n_i^2}{N_d}$$



Υπάρχει βαθμίδα συγκέντρωσης, συνεπώς σπές από την περιοχή n διαχέονται προς το άκρο της περιοχής απογύμνωσης.

Εκεί ολισθαίνουν προς την περιοχή p λόγω του ηλεκτρικού πεδίου.

Ανάστροφο ρεύμα λόγω διάχυσης

Το ανάστροφο ρεύμα δίνεται από την εξίσωση Shockley:

$$J_D = J_{so} \left(e^{-\frac{eV_r}{kT}} - 1 \right)$$

όπου

$$J_{so} = en_i^2 \left(\frac{D_h}{L_h N_d} + \frac{D_e}{L_e N_a} \right) \text{ Πυκνότητα ανάστροφου ρεύματος κορεσμού}$$

Η σταθερά J_{so} εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού (D_h, D_e, L_h, L_e, n_i), από τη νόθευση (N_a, N_d) και εξαρτάται ισχυρά από τη θερμοκρασία.

Αν $V_r \gg kT/e$ τότε $e^{-\frac{eV_r}{kT}} \rightarrow 0$ και

$$J_D = -J_{so}$$

Ανάστροφο ρεύμα λόγω δημιουργίας ηλεκτρονίων-οπών στην περιοχή απογύμνωσης

Στην περιοχή απογύμνωσης δημιουργούνται θερμικά διεγερμένα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών

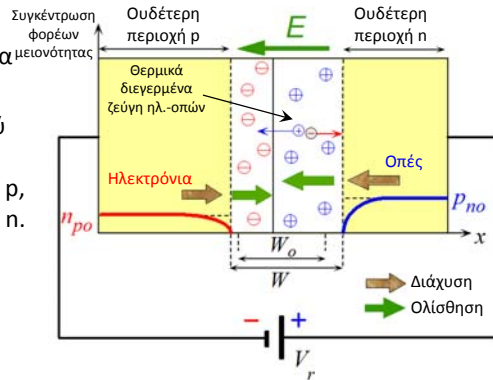
Λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου τα ζεύγη διαχωρίζονται. Οι οπές ολισθαίνουν προς την περιοχή p, και τα ηλεκτρόνια προς την περιοχή n.

Το ρεύμα που προκύπτει είναι:

$$J_{gen} = \frac{eWn_i}{\tau_g}$$

όπου τ_g είναι ο μέσος χρόνος δημιουργίας ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής.

Το ρεύμα J_{gen} εξαρτάται από το εύρος της περιοχής απογύμνωσης και άρα από την εφαρμοζόμενη τάση V_r



Ολικό ανάστροφο ρεύμα

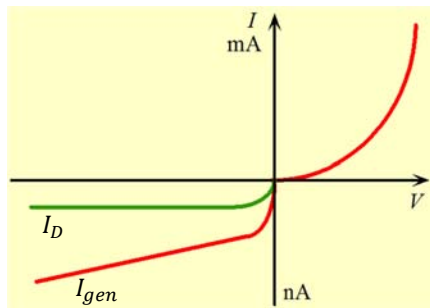
Το ολικό ανάστροφο ρεύμα είναι το άθροισμα του ρεύματος λόγω διάχυσης και λόγω θερμικής διέγερσης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών.

$$J_{rev} = J_D + J_{gen}$$

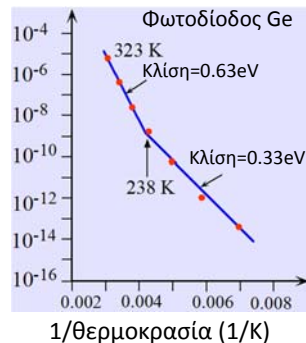
$$en_i^2 \left(\frac{D_h}{L_h N_d} + \frac{D_e}{L_e N_a} \right) + \frac{eWn_i}{\tau_g}$$

Η σημαντικότητα του κάθε όρου εξαρτάται από τις ιδιότητες του ημιαγωγού και τη θερμοκρασία.

Ολικό ανάστροφο ρεύμα



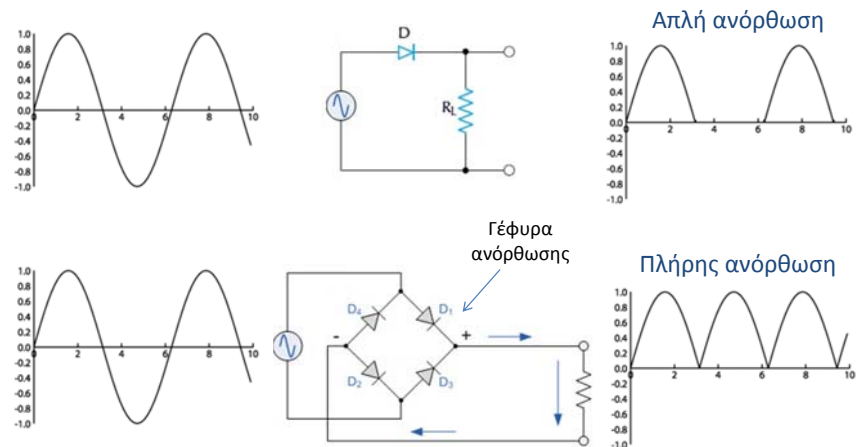
Χαρακτηριστική I-V μιας διόδου σε συνθήκες ορθής και ανάστροφης πόλωσης. Ο θετικός και ο αρνητικός άξονας των ρευμάτων έχουν διαφορετική κλίμακα.



Ανάστροφο ρεύμα σε μια δίοδο Ge ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πάνω από τους 238K το ρεύμα εξαρτάται από το n_i^2 ενώ κάτω από τους 238K εξαρτάται από το n_i

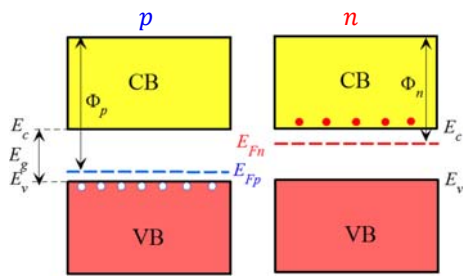
Εφαρμογή: Μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (ανόρθωση)

Για όλες τις πρακτικές εφαρμογές η δίοδος θεωρείται ότι άγει ρεύμα όταν είναι ορθά πολωμένη, αλλά όχι όταν είναι ανάστροφα



Διάγραμμα ζωνών της επαφής p-n χωρίς πόλωση

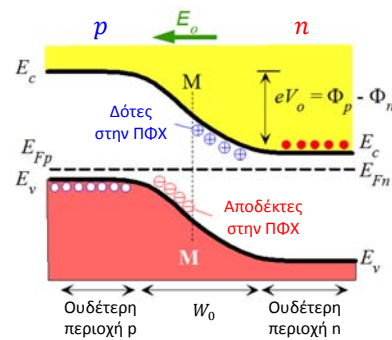
Ανεξάρτητα τμήματα ημιαγωγών p και n



$$p_{po} = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{kT}} \quad n_{no} = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

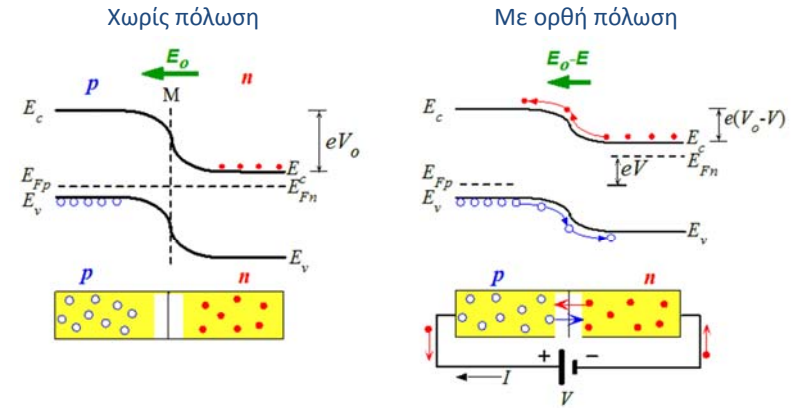
Διαφορά στις ενέργειες Fermi ΔE_F είναι ισοδύναμη με ηλεκτρικό έργο $e\Delta V$

Επαφή p-n χωρίς πόλωση



Σε σύστημα σε ισορροπία η ενέργεια Fermi είναι ίδια σε όλη τη διάταξη.

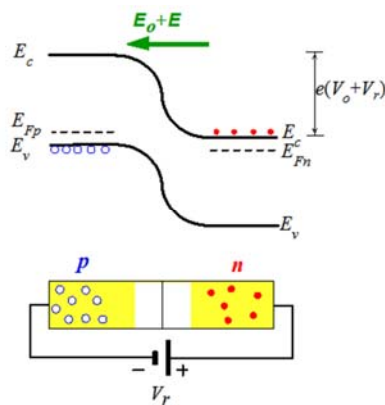
Διάγραμμα ζωνών της επαφής p-n με ορθή πόλωση



Το επίπεδο Fermi δεν είναι χωρικά συνεχές.

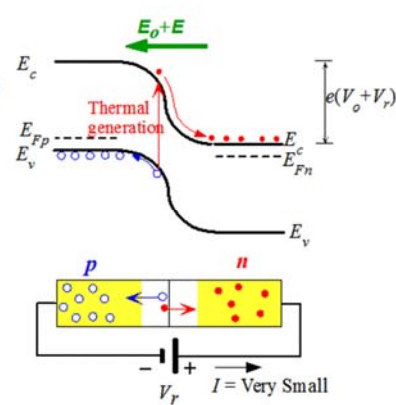
Διάγραμμα ζωνών της επαφής p-n με ανάστροφη πόλωση

Με ανάστροφη πόλωση



Πολύ μικρό ρεύμα διάχυσης J_{diff} ανάλογο του $e^{-\frac{e(V_0 + V_r)}{kT}}$

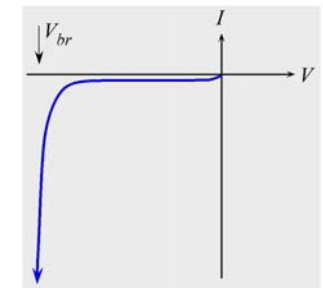
Θερμική διέγερση ΖΗΟ



Μικρό ρεύμα ολίσθησης J_{drift} από θερμική διέγερση ΖΗΟ στην περιοχή απογύμνωσης.

Κατάρρευση στην ανάστροφη πόλωση

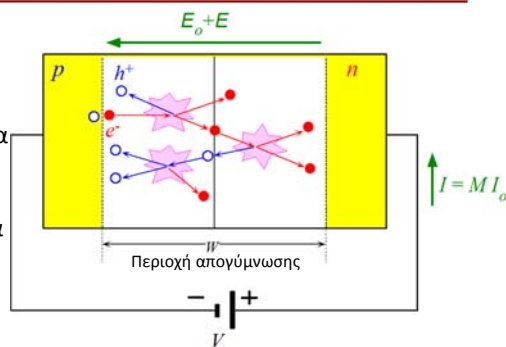
- Σε μια δίοδο η ανάστροφη τάση δεν μπορεί να αυξηθεί χωρίς όριο.
- Μετά από ένα όριο η επαφή p-n καταρρέει επιτρέποντας μεγάλο ανάστροφο ρεύμα.
- Αυξάνεται η ισχύς που καταναλώνεται.
- Αυξάνεται η θερμοκρασία.
- Επιπλέον αύξηση του ρεύματος.



- Αν λόγω της θερμοκρασίας δεν καταστραφεί η διάταξη (πχ. λιώσιμο επαφών) τότε αυτή μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες κατάρρευσης.
- Υπάρχουν δύο μηχανισμοί κατάρρευσης:
 - Φαινόμενο χιονοστιβάδας
 - Φαινόμενο Zener

Κατάρρευση – Φαινόμενο χιονοστιβάδας

- Καθώς η ανάστροφη πόλωση μεγαλώνει, το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνεται.
- Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να επιταχυνθεί τόσο ώστε να συγκρουστεί με ένα άτομο Si, να σπάσει ένα δεσμό Si-Si και να αποκολλήσει ένα ηλεκτρόνιο (ιονισμός λόγω κρούσης).
- Έχουμε διέγερση ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.
- Το αρχικό ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια E_g (τουλάχιστον).
- Συνεχίζει να επιταχύνει εξαιτίας του πεδίου (πιθανός και άλλος ιονισμός).
- Το ζεύγος οπής/ηλεκτρονίου που δημιουργήθηκε μπορεί να επιταχυνθεί από το πεδίο και να δημιουργήσει και άλλα ζεύγη οπής/ηλεκτρονίου.
- Ένας αρχικός φορέας μπορεί να δημιουργήσει πολλούς φορείς.



Κατάρρευση – Φαινόμενο χιονοστιβάδας

Το ρεύμα δίνεται από:

$$I = MI_0$$

όπου

I_0 Ρεύμα πριν την κατάρρευση

M Πολλαπλασιαστικός παράγοντας

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_r}{V_{br}}\right)^n}$$

V_{br} Η ανάστροφη τάση κατάρρευσης. Εξαρτάται από τη νόθευση.

n Τυπικές τιμές: 3 ... 5

Κατάρρευση – Φαινόμενο Zener

- Επαφές p-n με μεγάλες συγκεντρώσεις νόθευσης έχουν μικρότερη περιοχή απογύμνωσης.

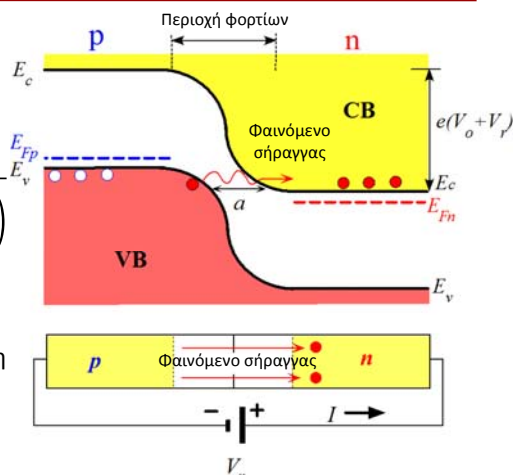
- Υπενθύμιση:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_0 + V_r)}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}$$

- Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ισχυρότερο.

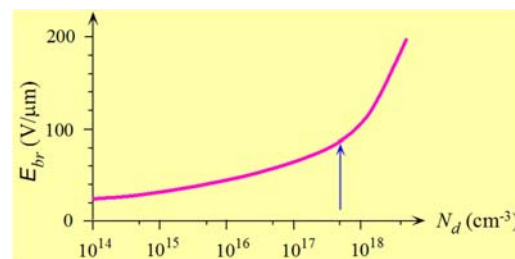
- Στο διάγραμμα ζωνών μπορεί η E_c στην περιοχή n να είναι χαμηλότερα από την E_v στην περιοχή p.

- Ηλεκτρόνια στην κορυφή της ΖΣ είναι σε ίδια ενέργειά με άδειες καταστάσεις της ΖΑ. Επειδή η απόσταση a μικραίνει μπορούν να μεταβούν με το φαινόμενο σήραγγας από τη ΖΣ της περιοχής p στη ΖΑ της περιοχής n.



Κατάρρευση – Φαινόμενο Zener

- Επειδή υπάρχουν πολλά ηλεκτρόνια στη ΖΣ και πολλές κενές καταστάσεις στη ΖΑ το ρεύμα θα είναι μεγάλο.
- Διαισθητική εξήγηση:
Το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή απογύμνωσης αποσπά ηλεκτρόνια από τους δεσμούς Si-Si τα οποία στη συνέχεια διατίθενται ως φορείς αγωγιμότητας.



Εξάρτηση του ηλεκτρικού πεδίου E_{br} από τη συγκέντρωση σε επαφή p-n.

Σε χαμηλές συγκεντρώσεις ενεργοποιείται ο μηχανισμός χιονοστιβάδας.

Σε υψηλές συγκεντρώσεις υπερσχύει το φαινόμενο Zener.

Λειτουργία σε συνθήκες κατάρρευσης

- Εάν περιορίσουμε το ανάστροφο ρεύμα (μέσω αντίστασης), η διόδος μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες κατάρρευσης.
- Όσο ισχύει $V_r > V_{br}$ η διόδος διατηρεί την τάση στα άκρα της ίση με V_{br}
- Το ανάστροφο ρεύμα θα είναι:

$$I = \frac{V_r - V_{br}}{R}$$

