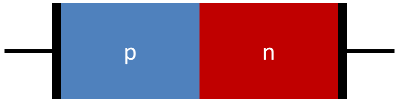
# Η επαφή p-n

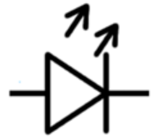
**Δ. Γ. Παπαγεωργίου**
**Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών**
**Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων**

**dpapageo@uoi.gr**
**http://pc164.materials.uoi.gr/dpapageo**



## Δίοδος, δίοδος εκπομπής φωτός (LED)

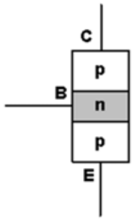


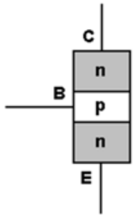

Άνοδος  Κάθοδος

Άνοδος  Κάθοδος



## Τρανζίστορ





**PNP**

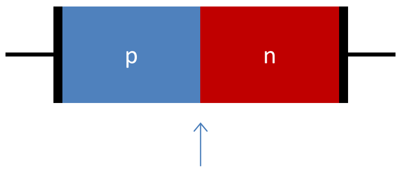

**NPN**



## Ολοκληρωμένο κύκλωμα

# Η επαφή p-n

### Τι είναι




Μεταλλουργική ένωση

### Που χρησιμεύει

- Η διάταξη που αποτελείται από μία επαφή p-n ονομάζεται **δίοδος**.


- Βασική ηλεκτρική ιδιότητα: επιτρέπει στο ρεύμα να διέρχεται προς μια κατεύθυνση μόνο.
- Είναι το βασικό συστατικό όλων των διπολικών διατάξεων.

Διπολική διάταξη:
διάταξη όπου έχουμε δύο ειδών φορείς αγωγιμότητας: ηλεκτρόνια και οπές.

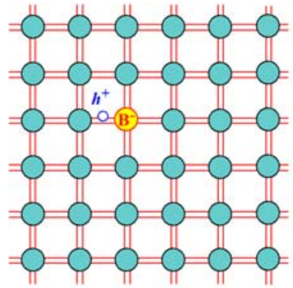


# Υπενθύμιση: Ημιαγωγός τύπου p

- Νόθευση με τρισθενές στοιχείο (B, Al, Ga) σε συγκέντρωση $N_a$ (αποδέκτες).
- Δημιουργούνται οπές στη ζώνη σθένους.
- Συγκέντρωση φορέων πλειονότητας (οπές):
$$p_{po} = N_a$$
- Συγκέντρωση φορέων μειονότητας (ηλεκτρόνια):

Εφαρμόζουμε το νόμο δράσης των μαζών:

$$p_{po} n_{po} = n_i^2$$
$$\Rightarrow n_{po} = \frac{n_i^2}{p_{po}} \qquad \Rightarrow n_{po} = \frac{n_i^2}{N_a}$$



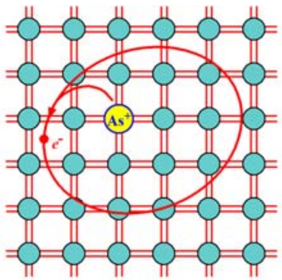



# Υπενθύμιση: Ημιαγωγός τύπου n

- Νόθευση με πεντασθενές στοιχείο (As, P, Sb) σε συγκέντρωση $N_d$ (δότες).
- Δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας.
- Συγκέντρωση φορέων πλειονότητας (ηλεκτρόνια):
$$n_{no} = N_d$$
- Συγκέντρωση φορέων μειονότητας (οπές):

Εφαρμόζουμε το νόμο δράσης των μαζών:

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





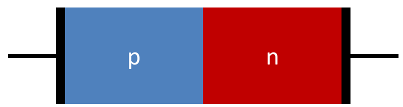

# Πως συμβολίζουμε τη συγκέντρωση

$$p_{po}$$

Συγκέντρωση οπών **p** ή ηλεκτρονίων **n**

Σε ποιο τμήμα της διάταξης (**p** ή **n**)

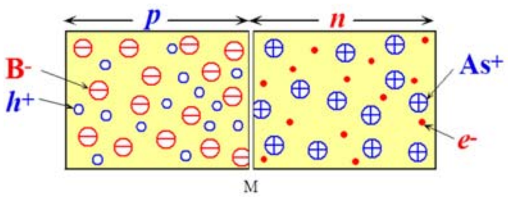
Εάν υπάρχει δείχνει ότι είμαστε σε θερμική ισορροπία (όχι εξωτερική πόλωση, όχι ακτινοβολία)



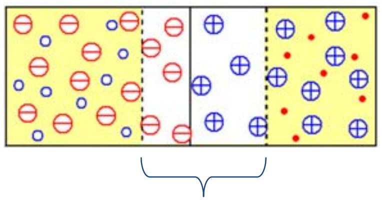

| | | |
|---|---|---|
| Συγκέντρωση οπών: | $p_{po}$ | $p_{no}$ |
| Συγκέντρωση ηλεκτρονίων: | $n_{po}$ | $n_{no}$ |

# Η περιοχή απογύμνωσης

Πριν την επαφή




Μετά την επαφή

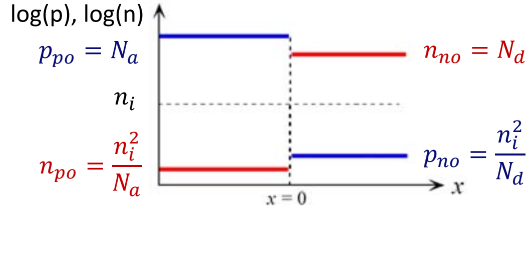


Περιοχή απογύμνωσης ή περιοχή φορτίων χώρου

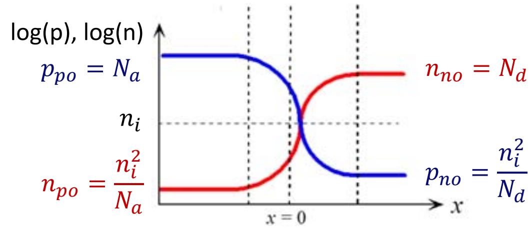
- Η μεγάλη συγκέντρωση οπών στην περιοχή p προκαλεί διάχυση οπών προς την περιοχή n και επανασύνδεση με ηλεκτρόνια.
- Η μεγάλη συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην περιοχή n προκαλεί διάχυση ηλεκτρονίων προς την περιοχή p και επανασύνδεση με οπές.
- **Η περιοχή κοντά στην ένωση απογυμνώνεται από φορείς αγωγιμότητας**.
- Υπενθύμιση:
  Δότες και αποδέκτες δεν κινούνται. Κινούνται τα ηλεκτρόνια και οι οπές.



# Η συγκέντρωση φορέων στην περιοχή απογύμνωσης



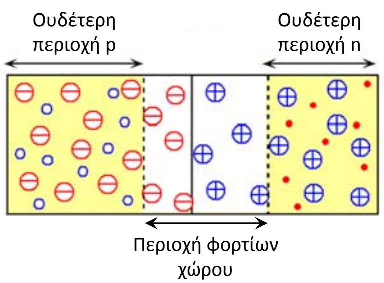

Πριν την επαφή




Μετά την επαφή



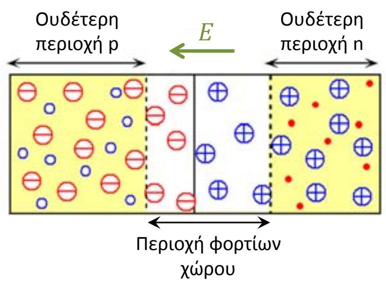
# Φορτία στην περιοχή απογύμνωσης




- Οπές που μεταβαίνουν από την περιοχή p στην περιοχή n, αφήνουν πίσω ιόντα $B^-$
- Όμοια, ηλεκτρόνια που μεταβαίνουν από την περιοχή n στην περιοχή p, αφήνουν πίσω ιόντα $As^+$
- Δημιουργείται έτσι μια περιοχή με φορτία γύρω από την ένωση.



# Δημιουργία εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου




- Εντός της περιοχής απογύμνωσης δημιουργείται ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο με φορά από τα θετικά ιόντα $As^+$ προς τα αρνητικά $B^-$
- Υπενθύμιση: Ορισμός ηλεκτρικού πεδίου:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Γιατί δεν συνεχίζεται η απογύμνωση της διάταξης από φορείς αγωγιμότητας ;

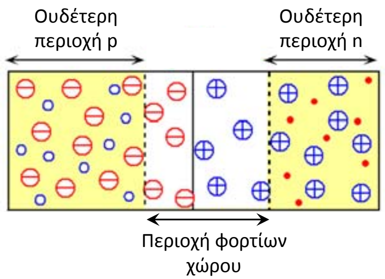
- Το ηλεκτρικό πεδίο οδηγεί τις οπές πίσω στην περιοχή p.
- Όμοια το ηλεκτρικό πεδίο οδηγεί τα ηλεκτρόνια πίσω την περιοχή n.

Έχουμε δύο ανταγωνιστικά φαινόμενα:

- Διάχυση φορέων λόγω βαθμίδας συγκέντρωσης.
- Ολίσθηση φορέων λόγω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.
- Επέρχεται ισορροπία:

$$J_h(\text{διάχυση}) + J_h(\text{ολίσθηση}) = 0$$
$$J_e(\text{διάχυση}) + J_e(\text{ολίσθηση}) = 0$$

## Προσεγγίσεις στην περιοχή απογύμνωσης



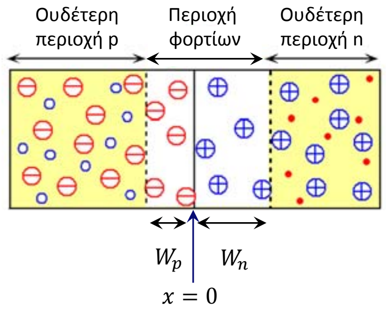

Χρησιμοποιούμε τις παρακάτω προσεγγίσεις για την περιοχή απογύμνωσης:

1) Στην περιοχή απογύμνωσης δεν υπάρχουν φορείς αγωγιμότητας.
2) Οι περιοχές εκατέρωθεν της περιοχής απογύμνωσης είναι ηλεκτρικά ουδέτερες.
3) Η μετάβαση από τις ουδέτερες περιοχές στην περιοχή απογύμνωσης γίνεται απότομα.

Με τις προσεγγίσεις αυτές η διάταξη ονομάζεται **ασυνεχής** ή **βηματική**.



## Έκταση της περιοχής απογύμνωσης




Όλη η διάταξη είναι ουδέτερη:

Ολικό φορτίο στην περιοχή απογύμνωσης $= 0$ $\rightarrow$

$e(\text{Πλήθος ιόντων As}^+) +$
$(-e)(\text{Πλήθος ιόντων B}^-) = 0$

Για την περιοχή p: $-W_p \le x \le 0$

$$N_a = \frac{\text{Πλήθος ιόντων B}^-}{\text{Όγκος}} = \frac{\text{Πλήθος ιόντων B}^-}{W_p A} \Rightarrow$$

*A* είναι το εμβαδό της διατομής.

$\text{Πλήθος ιόντων B}^- = N_a W_p A$

Για την περιοχή n: $0 \le x \le W_n$

Με όμοιο τρόπο βρίσκουμε:

$\text{Πλήθος ιόντων As}^+ = N_d W_n A$

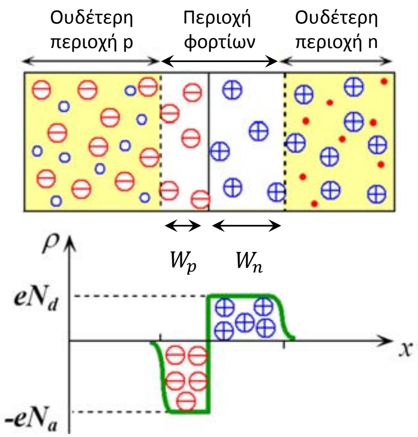
$$eN_d W_n A + (-e) N_a W_p A = 0 \Rightarrow$$

$$\boxed{N_d W_n = N_a W_p}$$

Η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται περισσότερο προς την πλευρά με τη μικρότερη συγκέντρωση.



## Η πυκνότητα φορτίου στην περιοχή απογύμνωσης




Πυκνότητα φορτίου $\rho(x)$ = Ολικό φορτίο ανά μονάδα όγκου στη θέση $x$

$$\rho = \frac{Q_{o\lambda}}{V}$$

Για την απογυμνωμένη περιοχή n:

$Q_{o\lambda} = e$ (Πλήθος ιόντων As⁺)

Για να βρούμε το πλήθος ιόντων As⁺ χρησιμοποιούμε τον ορισμό της συγκέντρωσης:

$$N_d = \frac{(\text{Πλήθος ιόντων As}^+)}{V} \Rightarrow$$

(Πλήθος ιόντων As⁺)$= N_d V$

Αντικαθιστώ στην πυκνότητα:

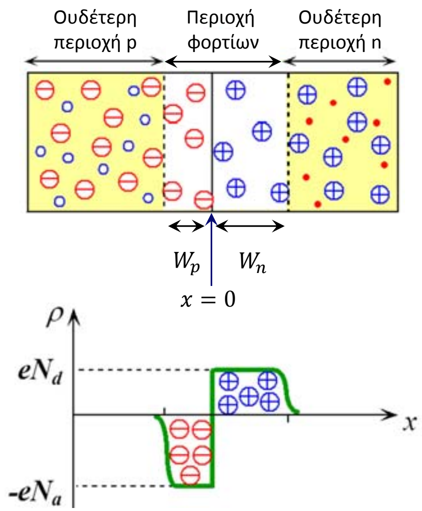
$$\rho = \frac{Q_{o\lambda}}{V} = \frac{e\,(\text{Πλήθος ιόντων As}^+)}{V} = \frac{eN_d V}{V} = eN_d$$

Όμοια, για την απογυμνωμένη περιοχή p:

$\rho = -eN_a$



## Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου




Εφαρμόζουμε το νόμο του Gauss:

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

$\rho(x)$ είναι η πυκνότητα φορτίου:

$$\rho(x) = \begin{cases} -eN_a, & -W_p \le x < 0 \\ eN_d, & 0 \le x \le W_n \end{cases}$$

$\varepsilon$ είναι η διηλεκτρική σταθερά.

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \Rightarrow$$

$$dE(x) = \frac{1}{\varepsilon}\rho(x)dx \Rightarrow$$

$$E(x) = \frac{1}{\varepsilon}\int \rho(x)dx + C$$

Υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα ξεχωριστά στις περιοχές p και n.

## Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου (περιοχή p)

Για την περιοχή p:

$$E(x) = \frac{1}{\varepsilon}\int(-eN_a)dx + C_p \;\Rightarrow$$

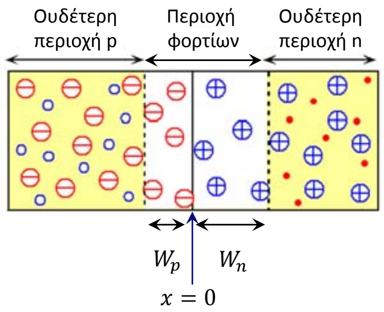
$$E(x) = -\frac{1}{\varepsilon}eN_a x + C_p$$

Η σταθερά $C_p$ προσδιορίζεται από την απαίτηση το ηλεκτρικό πεδίο να μηδενίζεται εκτός της περιοχής απογύμνωσης:

$$E(-W_p) = 0 \;\Rightarrow$$

$$-\frac{1}{\varepsilon}eN_a(-W_p) + C_p = 0 \;\Rightarrow$$

$$\boxed{C_p = -\frac{1}{\varepsilon}eN_a W_p}$$




$$E(x) = -\frac{1}{\varepsilon}eN_a x + C_p \;\Rightarrow$$

$$E(x) = -\frac{1}{\varepsilon}eN_a x - \frac{1}{\varepsilon}eN_a W_p \;\Rightarrow$$

$$\boxed{E(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon}(x + W_p) \quad -W_p \le x \le 0}$$



## Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου (περιοχή n)

Για την περιοχή n:

$$E(x) = \frac{1}{\varepsilon}\int(eN_d)dx + C_n \;\Rightarrow$$

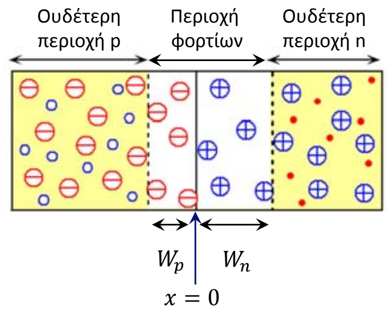
$$E(x) = \frac{1}{\varepsilon}eN_d x + C_n$$

Η σταθερά $C_n$ προσδιορίζεται από την απαίτηση το ηλεκτρικό πεδίο να μηδενίζεται εκτός της περιοχής απογύμνωσης:

$$E(W_n) = 0 \;\Rightarrow$$

$$\frac{1}{\varepsilon}eN_d W_n + C_n = 0 \;\Rightarrow$$

$$\boxed{C_n = -\frac{1}{\varepsilon}eN_d W_n}$$



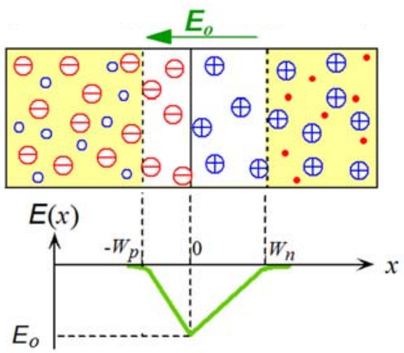

$$E(x) = \frac{1}{\varepsilon}eN_d x + C_n \;\Rightarrow$$

$$E(x) = \frac{1}{\varepsilon}eN_d x - \frac{1}{\varepsilon}eN_d W_n \;\Rightarrow$$

$$\boxed{E(x) = \frac{eN_d}{\varepsilon}(x - W_n) \qquad 0 \le x \le W_n}$$



## Μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου




Το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλεται γραμμικά εντός της περιοχής απογύμνωσης.

Η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου είναι στο $x = 0$

Από την πλευρά p:

$$E_0 = E(0) = -\frac{eN_a}{\varepsilon}(0 + W_p) = -\frac{eN_a W_p}{\varepsilon}$$

Από την πλευρά n:

$$E_0 = E(0) = \frac{eN_d}{\varepsilon}(0 - W_n) = -\frac{eN_d W_n}{\varepsilon}$$

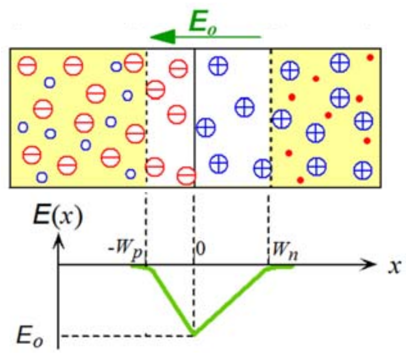
Βρήκαμε ότι

$$E(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon}(x + W_p) \qquad -W_p \le x \le 0$$

$$E(x) = \frac{eN_d}{\varepsilon}(x - W_n) \qquad 0 \le x \le W_n$$



## Εσωτερικό δυναμικό




Το δυναμικό $V(x)$ σχετίζεται με το ηλεκτρικό πεδίο:

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \;\Rightarrow$$

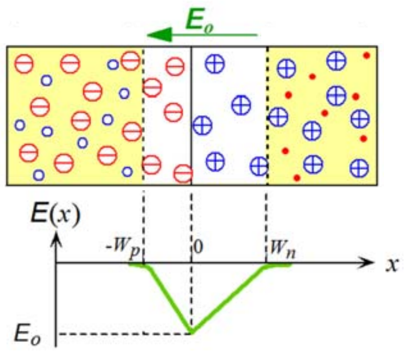
$$dV(x) = -E(x)dx \;\Rightarrow$$

$$V(x) = -\int E(x)dx + C$$

Υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα ξεχωριστά στις περιοχές p και n.

# Εσωτερικό δυναμικό (περιοχή p)

Για την περιοχή p: $E(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon}(x + W_p)$




$$V(x) = -\int E(x)dx + C_p \Rightarrow$$

$$V(x) = -\int \left(-\frac{eN_a}{\varepsilon}\right)(x + W_p)dx + C_p \Rightarrow$$

$$V(x) = \int \frac{eN_a}{\varepsilon}xdx + \int \frac{eN_a}{\varepsilon}W_p dx + C_p \Rightarrow$$

$$V(x) = \frac{eN_a}{2\varepsilon}x^2 + \frac{eN_a}{\varepsilon}W_p x + C_p$$

Μας ενδιαφέρει η διαφορά δυναμικού, οπότε για να προσδιορίσουμε τη σταθερά $C_p$ θεωρούμε ότι στο αριστερό άκρο $x = -W_p$ το δυναμικό είναι μηδέν.



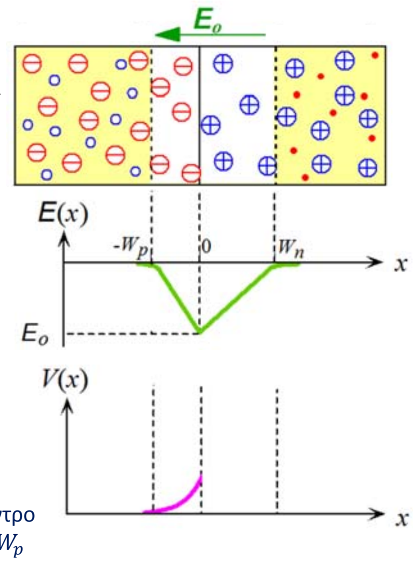
# Εσωτερικό δυναμικό (περιοχή p)

$$V(-W_p) = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{eN_a}{2\varepsilon}(-W_p)^2 + \frac{eN_a}{\varepsilon}W_p(-W_p) + C_p = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{eN_a}{2\varepsilon}W_p^2 - \frac{eN_a}{\varepsilon}W_p^2 + C_p = 0 \Rightarrow$$

$$-\frac{eN_a}{2\varepsilon}W_p^2 + C_p = 0 \Rightarrow \boxed{C_p = \frac{eN_a}{2\varepsilon}W_p^2}$$




$$V(x) = \frac{eN_a}{2\varepsilon}x^2 + \frac{eN_a}{\varepsilon}W_p x + C_p \Rightarrow$$

$$V(x) = \frac{eN_a}{2\varepsilon}x^2 + \frac{eN_a}{\varepsilon}W_p x + \frac{eN_a}{2\varepsilon}W_p^2 \Rightarrow$$

$$V(x) = \frac{eN_a}{2\varepsilon}(x^2 + 2W_p x + W_p^2) \Rightarrow$$

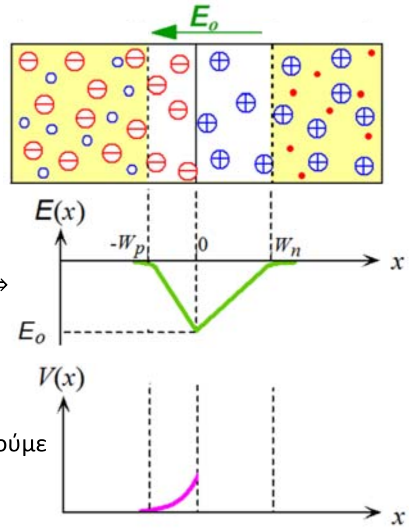
$$\boxed{V(x) = \frac{eN_a}{2\varepsilon}(x + W_p)^2}$$

Παραβολή με κέντρο το σημείο $x = -W_p$



# Εσωτερικό δυναμικό (περιοχή n)

Για την περιοχή n: $E(x) = \frac{eN_d}{\varepsilon}(x - W_n)$




$$V(x) = -\int E(x)dx + C_n \Rightarrow$$

$$V(x) = -\int \frac{eN_a}{\varepsilon}(x - W_n)dx + C_n \Rightarrow$$

$$V(x) = -\int \frac{eN_d}{\varepsilon}xdx + \int \frac{eN_d}{\varepsilon}W_n dx + C_n \Rightarrow$$

$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}x^2 + \frac{eN_d}{\varepsilon}W_n x + C_n$$

Για να προσδιορίσουμε τη σταθερά $C_n$ απαιτούμε το δυναμικό να είναι συνεχές στο $x = 0$

$$\underset{\text{Από αριστερά (p)}}{V(0)} = \underset{\text{Από δεξιά (n)}}{V(0)}$$



# Εσωτερικό δυναμικό (περιοχή n)

$$\underset{\text{Από αριστερά (p)}}{V(0)} = \underset{\text{Από δεξιά (n)}}{V(0)} \Rightarrow$$

$$\frac{eN_a}{2\varepsilon}(0 + W_p)^2 = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}0^2 + \frac{eN_d}{\varepsilon}W_n 0 + C_n \Rightarrow \quad C_n = \frac{eN_a}{2\varepsilon}W_p^2$$

$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}x^2 + \frac{eN_d}{\varepsilon}W_n x + C_n \qquad = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}x^2 + \frac{eN_d}{\varepsilon}W_n x + \frac{eN_a}{2\varepsilon}W_p^2$$

Προσθαφαιρούμε $eN_d W_n^2/2\varepsilon$

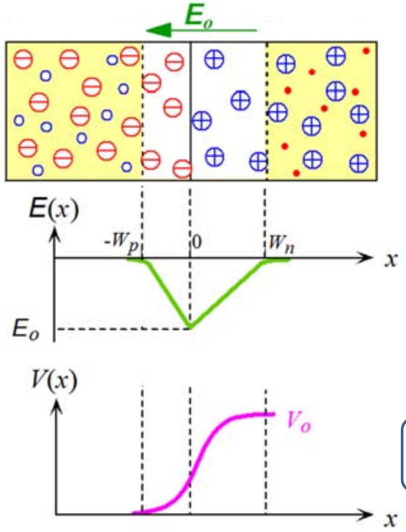
$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}x^2 + \frac{eN_d}{\varepsilon}W_n x + \frac{eN_a}{2\varepsilon}W_p^2 + \frac{eN_d}{2\varepsilon}W_n^2 - \frac{eN_d}{2\varepsilon}W_n^2 \Rightarrow$$

$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}(x^2 - 2W_n x + W_n^2) + \frac{eN_a}{2\varepsilon}W_p^2 + \frac{eN_d}{2\varepsilon}W_n^2 \Rightarrow$$

$$\boxed{V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}(x - W_n)^2 + \frac{e}{2\varepsilon}(N_a W_p^2 + N_d W_n^2)}$$

Παραβολή με κέντρο το σημείο $x = W_n$

## Μέγιστη τιμή του εσωτερικού δυναμικού




Βρήκαμε ότι στην περιοχή $0 \le x \le W_n$ το δυναμικό είναι:

$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}(x - W_n)^2 + \frac{e}{2\varepsilon}(N_a W_p^2 + N_d W_n^2)$$

Η μέγιστη τιμή του δυναμικού είναι:

$$V_0 = V(W_n) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon}(W_n - W_n)^2 + \frac{e}{2\varepsilon}(N_a W_p^2 + N_d W_n^2) \Rightarrow$$

$$\boxed{V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}(N_a W_p^2 + N_d W_n^2)}$$



## Συνολικό εύρος της περιοχής απογύμνωσης

Θα συσχετίσουμε το εύρος της περιοχής απογύμνωσης με το εσωτερικό δυναμικό $V_0$

Βρήκαμε ότι:

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}(N_a W_p^2 + N_d W_n^2)$$

Επίσης:

$$N_a W_p = N_d W_n \Rightarrow \quad W_n = \frac{N_a}{N_d} W_p$$

Αντικαθιστούμε στον τύπο για το $V_0$

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}\left(N_a W_p^2 + N_d \left(\frac{N_a}{N_d} W_p\right)^2\right) \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}\left(N_a W_p^2 + \frac{N_a^2}{N_d} W_p^2\right) \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon} W_p^2 N_a \left(1 + \frac{N_a}{N_d}\right) \Rightarrow$$

$$\boxed{W_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e} \frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)}}}$$

Με όμοιο τρόπο βρίσκουμε:

$$\boxed{W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e} \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}}}$$



## Συνολικό εύρος της περιοχής απογύμνωσης

Το συνολικό εύρος $W_0$ της περιοχής απογύμνωσης είναι:

$$W_0 = W_p + W_n =$$

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

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

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

$$\sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e} \frac{(N_a + N_d)}{N_a N_d}} \Rightarrow$$

$$\boxed{W_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}}$$



## Συσχέτιση του $E_0$ με το $V_0$

Θα συσχετίσουμε τη μέγιστη τιμή $E_0$ του ηλεκτρικού πεδίου με το εσωτερικό δυναμικό $V_0$.

Βρήκαμε ότι: $V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}(N_a W_p^2 + N_d W_n^2)$

Για το $E_0$ βρήκαμε ότι:

Από την περιοχή p: $E_0 = -\frac{eN_a W_p}{\varepsilon} \Rightarrow \quad N_a W_p = -\frac{\varepsilon}{e} E_0$

Από την περιοχή n: $E_0 = -\frac{eN_d W_n}{\varepsilon} \Rightarrow \quad N_d W_n = -\frac{\varepsilon}{e} E_0$

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}\left(-\frac{\varepsilon}{e} E_0 W_p - \frac{\varepsilon}{e} E_0 W_n\right) = -\frac{1}{2} E_0 (W_p + W_n) \Rightarrow$$

$$\boxed{V_0 = -\frac{1}{2} E_0 W_0}$$

Όπου $W_0$ το ολικό μήκος της περιοχής απογύμνωσης:

$$W_0 = W_p + W_n$$

## Συσχέτιση του $E_0$ με το $V_0$

Έχουμε βρει ότι:

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}$$

Συνεπώς μπορούμε να γράψουμε:

$$V_0 = -\frac{1}{2} E_0 W_0 \;\Rightarrow$$

$$E_0 = -\frac{2V_0}{W_0} \;\Rightarrow$$

$$E_0 = -\frac{2V_0}{\sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{e}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}} \;\Rightarrow$$

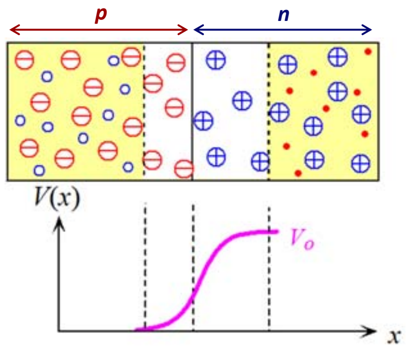
$$\boxed{E_0 = -\sqrt{\frac{2V_0 e}{\varepsilon}\frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}}$$

Εξάρτηση της μέγιστης τιμής του ηλεκτρικού πεδίου από το εσωτερικό δυναμικό



## Πως εξαρτάται το δυναμικό $V_0$ από τις συγκεντρώσεις νόθευσης

Υπενθύμιση: Φορτίο $q$ μέσα σε δυναμικό $V$ έχει ενέργεια: $E = qV$




Χρησιμοποιώντας στατιστική Boltzmann η συγκέντρωση φορέων είναι:

$N = Ae^{-E/kT}$ ($A$: σταθερά)

Οι σχετικές συγκεντρώσεις φορέων με διαφορετικές ενέργειες είναι:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Ae^{-E_2/kT}}{Ae^{-E_1/kT}}$$

Εξετάζοντας τα ηλεκτρόνια:

Στην ουδέτερη περιοχή p (εκτός της περιοχής απογύμνωσης):
Συγκέντρωση: $n_{po}$, ενέργεια εξαιτίας του δυναμικού: 0

Στην ουδέτερη περιοχή n (εκτός της περιοχής απογύμνωσης):
Συγκέντρωση $n_{no} = N_d$, ενέργεια εξαιτίας του δυναμικού: $-eV_0$



## Πως εξαρτάται το δυναμικό $V_0$ από τις συγκεντρώσεις νόθευσης

Οι σχετικές συγκεντρώσεις είναι:

$$\frac{n_{no}}{n_{po}} = \frac{Ae^{-(-eV_0)/kT}}{Ae^{-0/kT}} = e^{eV_0/kT} \;\Rightarrow$$

$$\ln\frac{n_{no}}{n_{po}} = \frac{eV_0}{kT} \;\Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{kT}{e}\ln\frac{n_{no}}{n_{po}}$$

Όμως: $n_{no} = N_d$

Για να βρούμε το $n_{po}$ εφαρμόζουμε το νόμο δράσης των μαζών στην περιοχή p:

$$n_{po}p_{po} = n_i^2 \;\Rightarrow\; n_{po}N_a = n_i^2 \;\Rightarrow$$

$$n_{po} = \frac{n_i^2}{N_a}$$

$$V_0 = \frac{kT}{e}\ln\frac{n_{no}}{n_{po}} \;\Rightarrow$$

$$\boxed{V_0 = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_a N_d}{n_i^2}}$$

Στην ίδια σχέση μπορούμε να καταλήξουμε εξετάζοντας τις οπές.

Μπορούμε να μετρήσουμε το εσωτερικό δυναμικό με ένα βολτόμετρο ;



## Παράδειγμα #1 (εσωτερικό δυναμικό Si)

Μια επαφή p-n πυριτίου έχει συγκέντρωση αποδεκτών $N_\alpha = 10^{16}/cm^3$ στην περιοχή p και $N_d = 10^{17}/cm^3$ δοτών στην περιοχή n. Ποιο είναι το εσωτερικό δυναμικό σε θερμοκρασία T=300K ;

Θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$V_0 = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

Χρειαζόμαστε:
Φυσικές σταθερές
$k = 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K

Σταθερές του πυριτίου
$n_i = 10^{10}$ cm$^{-3}$

Αντικαθιστούμε:

$$V_0 = \frac{\left(8.62\times 10^{-5}\frac{eV}{K}\right)\times(300K)}{e}\ln\frac{(10^{16}cm^{-3})\times(10^{17}cm^{-3})}{(10^{10}cm^{-3})^2} =$$

$$0.0259V\ \ln(10^{13}) \;=\; 0.775V$$

## Παράδειγμα #2 (μεταβολή εσωτερικού δυναμικού)

Σε δίοδο p-n η συγκέντρωση αποδεκτών είναι $N_\alpha=10^{16}/cm^3$. Πόσο θα μεταβληθεί το εσωτερικό δυναμικό αν η συγκέντρωση αποδεκτών γίνει $10^{17}/cm^3$ ;

Το εσωτερικό δυναμικό δίνεται από:

$$V_0 = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

Για δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις αποδεκτών:

$$V_{01} = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_{a1} N_d}{n_i^2}$$

$$V_{02} = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_{a2} N_d}{n_i^2}$$

Η διαφορά τους είναι:

$$V_{02} - V_{01} =$$

$$\frac{kT}{e}\ln\frac{N_{a2} N_d}{n_i^2} - \frac{kT}{e}\ln\frac{N_{a1} N_d}{n_i^2} =$$

$$\frac{kT}{e}\left(\ln\frac{N_{a2} N_d}{n_i^2} - \ln\frac{N_{a1} N_d}{n_i^2}\right) =$$

$$\frac{kT}{e}\ln\frac{\frac{N_{a2} N_d}{n_i^2}}{\frac{N_{a1} N_d}{n_i^2}} =$$

$$\frac{kT}{e}\ln\frac{N_{a2}}{N_{a1}}$$



## Παράδειγμα #2 (μεταβολή εσωτερικού δυναμικού)

Χρειαζόμαστε:

kT/e = 0.0259V

Αντικαθιστούμε:

$$V_{02} - V_{01} = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_{a2}}{N_{a1}} =$$

$$0.0259V\ \ln\frac{10^{17}cm^{-3}}{10^{16}cm^{-3}} =$$

$$0.0259V\ \ln 10 =$$

$$0.059V$$