



ΗΜΙΑΓΩΓΑ ΥΛΙΚΑ: ΘΕΩΡΙΑ-ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Μέρος 2^ο: Αρχές λειτουργίας των ημιαγωγικών διατάξεων
Ενότητα 11^η: Βαθμίδα συγκέντρωσης. Επαφή p-n σε
ισορροπία.

Γεώργιος Λιτσαρδάκης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
& Μηχανικών Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





11. Βαθμίδα συγκέντρωσης. Επαφή p-n σε ισορροπία.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

1. Εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο, εξίσωση Poisson, επαφή p - n , προσέγγιση αραίωσης.
2. Πλάτος περιοχής φορτίων χώρου.
3. Μονόπλευρη επαφή, γραμμική επαφή (διάχυσης).



Βαθμίδα συγκέντρωσης → ηλεκτροστατικό πεδίο

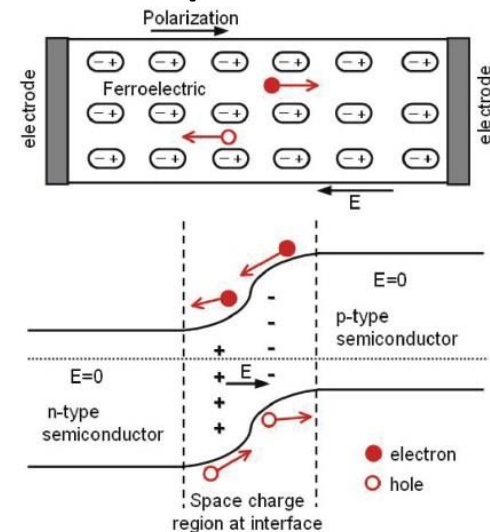
- Η βαθμίδα συγκέντρωσης συνεπάγεται ύπαρξη εσωτερικού ηλεκτροστατικού πεδίου (σε κατάσταση ισορροπίας)

$$J_p = J_{p\mu} + J_{pd} = 0$$

$$\Rightarrow e[p(x)\mu_h \varepsilon(x) - D_p dp(x)/dx] = 0$$

$$\Rightarrow \varepsilon(x) = (D_p/\mu_h) (1/p(x)) dp(x)/dx$$

$$= (kT/e) (1/p(x)) dp(x)/dx$$



Κίνηση φορέων υπό το δυναμικό επαφής στην περιοχή απογύμνωσης.
Simplified schematics for the bulk photovoltaic (PV) effect in a ferroelectric thin film (top) and the interfacial PV effect in a semiconductor p-n junction (bottom). E: Electric field.

* Φορτία χώρου

Πηγή: Solar & Alternative Energy, Nanoscale ferroelectric thin films show promise for solar cells, Kui Yao, Photovoltaic effects in a uniform thin film could potentially produce high output voltage and absorb visible light. 24 May 2010, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201004.002927
http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported-2010/002927/002927_10_fig1.jpg
<http://spie.org/x40422.xml>



ηλεκτροστατικό πεδίο \leftrightarrow βαθμίδα δυναμικού

δυναμικό $V=U/q$,

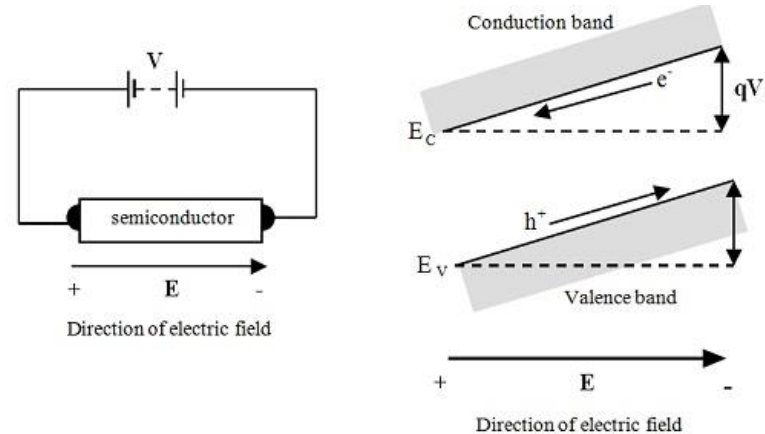
όπου U η δυναμική ενέργεια του πεδίου

πεδίο $\epsilon = (1/e)(dU/dx) = dV/dx$

Η δύναμη που ασκείται σε φορτίο $-e$ είναι

$$F = -e\epsilon = -dU/dx,$$

Το ηλεκτροστατικό πεδίο συνδέεται με βαθμίδα της δυναμικής ενέργειας και του ηλεκτροστατικού δυναμικού

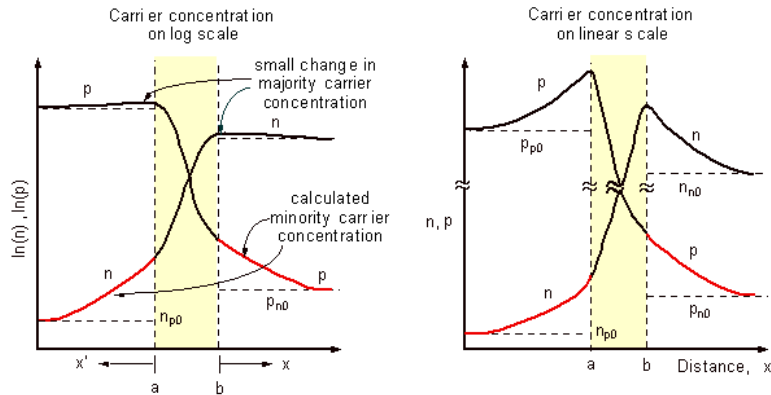


Κίνηση φορέων σε ημιαγωγό υπό την επιβολή ηλεκτρικού πεδίου.
Figure: Effect of an Electric Field on Energy Bands

Πηγή: tutorsglobe- Theory of Material types and Electric conduction.
http://secure.tutorsglobe.com/CMSImages/2285_1.5.jpg
<http://www.tutorsglobe.com/homework-help/electrical-engineering/material-types-and-electric-conduction-74128.aspx>

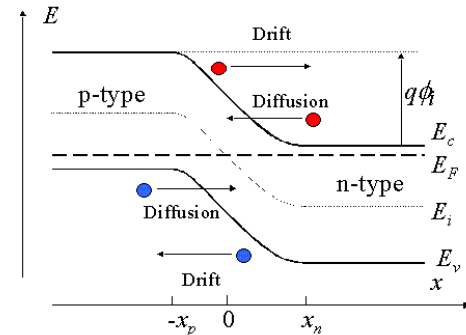


Βαθμίδα συγκέντρωσης → βαθμίδα δυναμικού



Συγκέντρωση φορέων στην περιοχή απογύμνωσης.

Πηγή: PVEDUCATION.ORG, Christiana Honsberg and Stuart Bowden
<http://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/PN-Junction/Images/image183.png>
<http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/wide-base-diode>



Μηχανισμοί διάχυσης και ολίσθησης σε pn επαφή.

Πηγή: Principles of Semiconductor Devices, B. Van Zeghbroeck, 2011, Boulder, December 2004
http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/gif/fig4_2_3.gif
http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4_2.htm

• Η βαθμίδα συγκέντρωσης συνεπάγεται **βαθμίδα της δυναμικής ενέργειας**

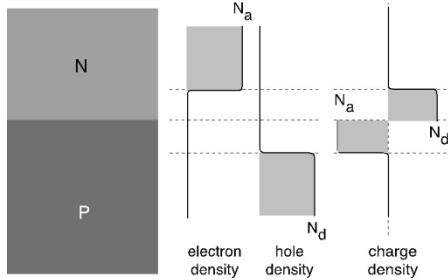
• $E_{Fn} = E_i + kT \ln(n/n_i) \Rightarrow E_i(x) = E_{Fn} - kT \ln[n(x)/n_i]$

• $d\varepsilon(x)/dx = \rho(x)/\varepsilon_0$ εξίσωση Poisson

• $\rho(x) = e [N_D(x) - n(x)]$ πυκνότητα φορτίων χώρου



Επαφή p-n

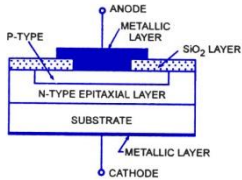


απότομη επαφή

Επαφή p-n και διάφορα μεγέθη.

Πηγή: CMOS Photodetectors
 Albert H. Titus¹, Maurice C.K. Cheung¹ and Vamsy P. Chodavarapu¹
^[1] Department of Electrical Engineering, University at Buffalo,
 The State University of New York, USA
^[2] Electrical and Computer Engineering, McGill University, Montreal, Canada

<http://www.intechopen.com/source/html/17220/media/image1.jpg>
<http://www.intechopen.com/books/photodiodes-world-activities-in-2011/cmos-photodetectors>

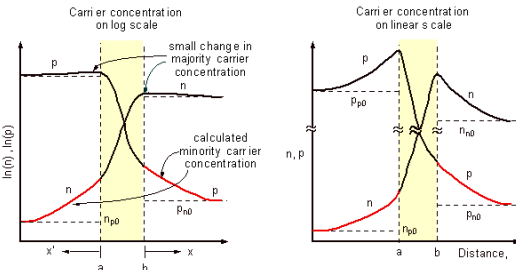


Epitaxially Grown or Planar Diffused Diode

επιταξία

Πηγή: <http://www.circuitstoday.com/wp-content/uploads/2009/08/planar-diffused-diode.jpg>

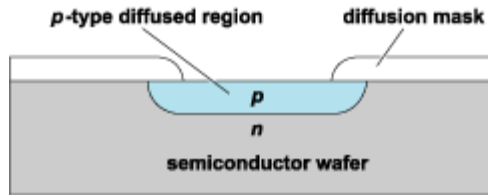
Βαθμίδα συγκέντρωσης σε απότομη επαφή και γραμμική επαφή: ηλεκτροστατικό πεδίο και διαφορά δυναμικού



γραμμική επαφή

Συγκέντρωση φορέων στην περιοχή απογύμνωσης.

Πηγή: PVEDUCATION.ORG, Christiana Honsberg and Stuart Bowden
<http://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/PN-Junction/Images/image183.png>
<http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/wide-base-diode>

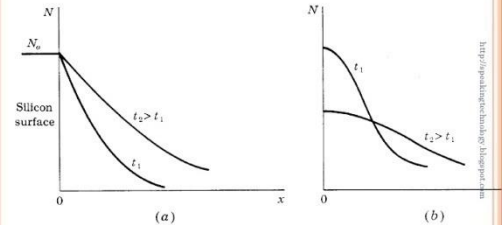


διάχυση

High-speed diffused silicon diodes. (a) Mesaless structure. (b) Mesa structure.
 Σύγκριση μεθόδων επίστρωσης.

Πηγή: <http://content.answers.com/main/content/img/McGrawHill/Encyclopedia/images/CE360800FG0010.gif> http://conocimientossemiconductoriodi.blogspot.gr/2010/02/blogs_3439.html

DIFFUSION OF DOPANTS (CONTINUED)



Concentration of dopant in surrounding atmosphere kept constant per unit volume

Dopant deposited on surface - constant amount per unit area

Προφίλ διάχυσης

Πηγή: <http://image.slidesharecdn.com/semiconductorphysics-110918010624-phpapp02/95/semiconductor-physics-19-728.jpg?cb=1316308080>
<http://www.slideshare.net/AmitBiswal/semiconductor-physics>

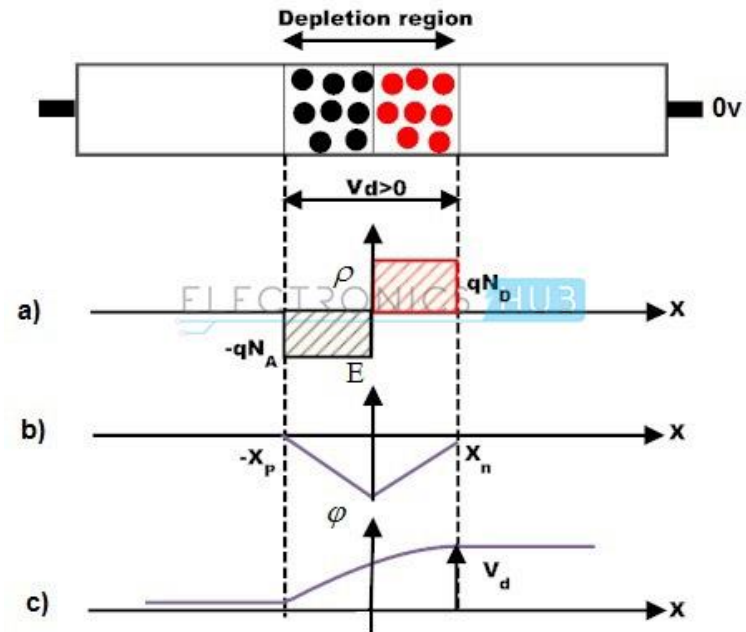
Ημιαγωγά Υλικά: Θεωρία - Διατάξεις

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών



Δυναμικό επαφής

- Σε κατάσταση ισορροπίας η στάθμη Fermi είναι σταθερή
- Στη μεταβατική περιοχή οι ενεργειακές στάθμες μετατοπίζονται κατά $U = E_F(n) - E_F(p)$



Πηγή: <http://www.electronicshub.org/wp-content/uploads/2015/01/1-.PN-junction-at-the-thermal-equilibrium..jpg>
<http://www.electronicshub.org/pn-junction-tutorial/>

Η διαφορά δυναμικού στη μεταβατική περιοχή επομένως είναι :

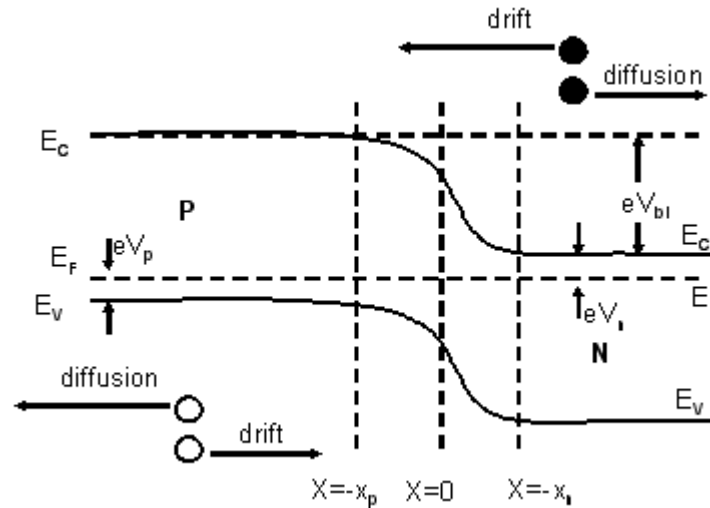
$$V_0 = U/e = [E_F(n) - E_F(p)]/e$$

$$E_{F(n)} = E_i + kT \ln(n_n/n_i)$$

$$E_{F(p)} = E_i - kT \ln(p_p/n_i)$$



Δυναμικό ισορροπίας



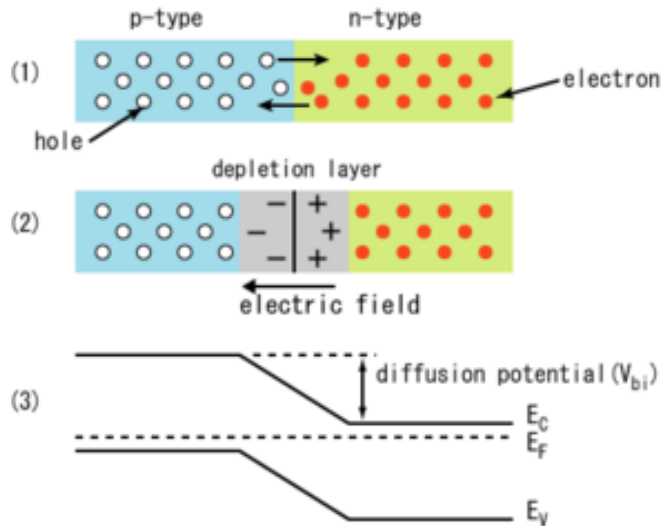
Πηγή: http://nptel.ac.in/courses/115102025/module5/img5_3/img2.png
<http://nptel.ac.in/courses/115102025/18>

- Το **δυναμικό ισορροπίας** στην επαφή είναι

$$V_o = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$



φορτία χώρου

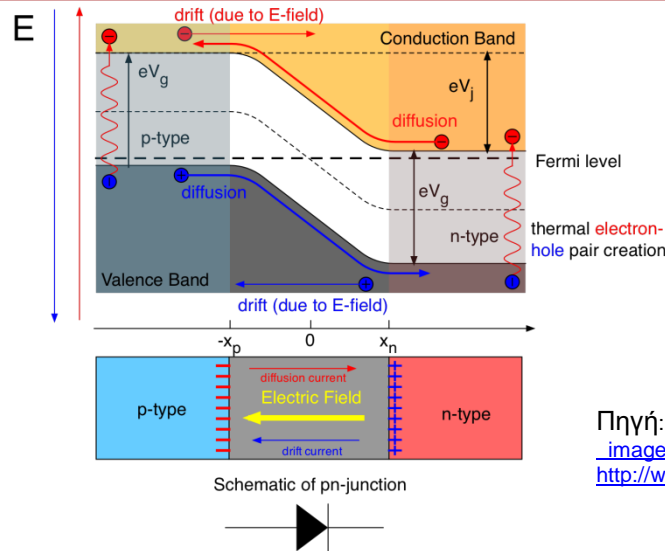


Πηγή: <http://chemwiki.ucdavis.edu/@api/deki/files/51482/300px-PnJunction-E.PNG?size=bestfit&width=300&height=236&revision=1>
http://chemwiki.ucdavis.edu/Textbook_Maps/Inorganic_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Inorganic_Chemistry_Wikibook/Chapter_10%3A_Electronic_Properties_of_Materials%3A_Superconductors_and_Semiconductors/10.5_Semiconductor_p-n_junctions

- Οι φορείς πλειονότητας **διαχέονται** προς την άλλη πλευρά της επαφής (όπου είναι φορείς μειονότητας)
- Αφήνουν πίσω τους ιονισμένα άτομα πρόσμιξης ("**φορτία χώρου**") που δημιουργούν ηλεκτροστατικό πεδίο
- Λόγω του πεδίου οι φορείς μειονότητας **μετατοπίζονται** πίσω στην αντίθετη πλευρά
- Σε κατάσταση ισορροπίας, το ρεύμα διάχυσης και το ρεύμα μετατόπισης είναι ίσα



Ρεύματα στην επαφή p-n

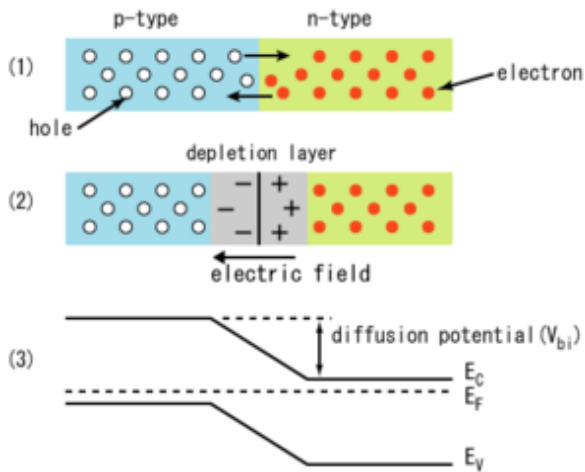


Πηγή: http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/images/pn-junction_energy.png
http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/pn_junction.html

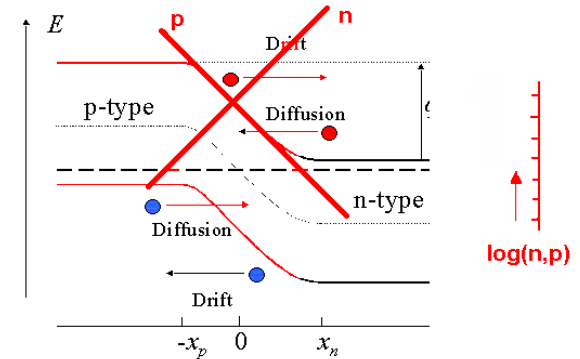
- Προσέγγιση κένωσης : στη μεταβατική περιοχή δεν υπάρχουν φορείς – μόνο φορτία χώρου (οι φορείς μετατοπίζονται λόγω του πεδίου)
- Το ρεύμα μετατόπισης δεν εξαρτάται από το δυναμικό της επαφής. Περιλαμβάνει φορείς που δημιουργούνται στην ΠΦΧ (ρεύμα γένεσης) και φορείς μειονότητας κοντά στην ΠΦΧ
- Το ρεύμα διάχυσης περιλαμβάνει τους φορείς με ενέργεια μεγαλύτερη από το φράγμα δυναμικού. Εξαρτάται εκθετικά από το δυναμικό της επαφής



Προσέγγιση αραίωσης (depletion)

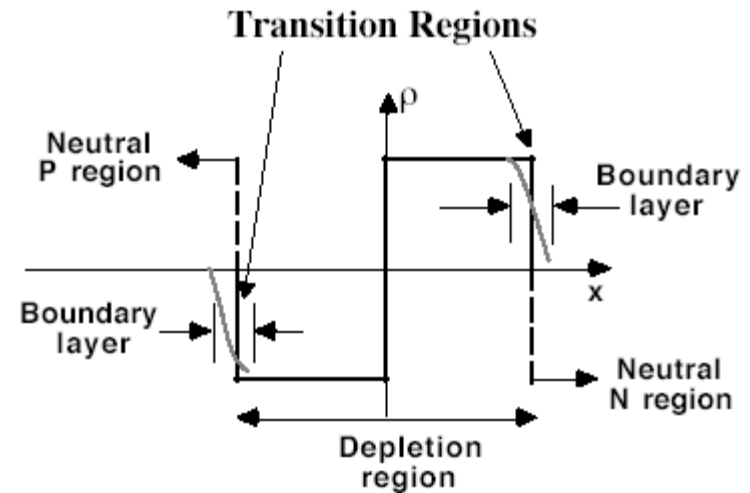


Πηγή: <http://chemwiki.ucdavis.edu/@api/deki/files/51482/300px-PnJunction-E.PNG?size=bestfit&width=300&height=236&revision=1>
http://chemwiki.ucdavis.edu/Textbook/Maps/Inorganic_Chemistry_Textbook/Maps/Map%3A_Inorganic_Chemistry_Wikibook/Chapter_10%3A_Electronic_Properties_of_Materials%3A_Superconductors_and_Semiconductors/10.5_Semiconductor_p-n_junctions



Πηγή: http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/gif/fig4_2_3.gif
http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4_2.htm

- Ο ημιαγωγός εκτός της ΠΦΧ είναι ουδέτερος (πεδίο μηδέν, δυναμικό σταθερό)
- Η ΠΦΧ δεν έχει φορείς (κινούμενα φορτία)
- Η ΠΦΧ έχει απότομα όρια

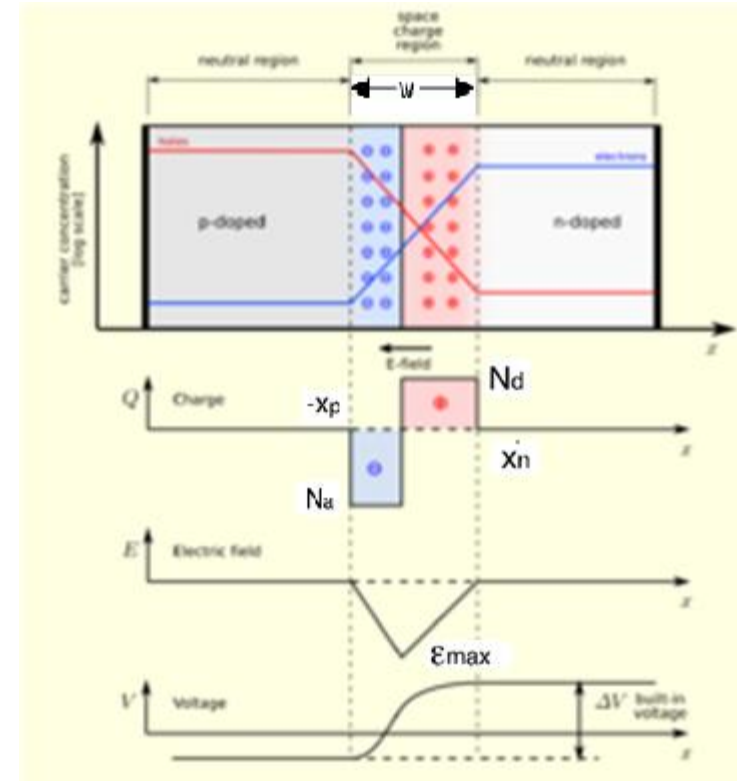


Πλάτος περιοχής φορτίων χώρου

- Τα φορτία χώρου στη μεταβατική περιοχή είναι ίσα, γιατί ο ημιαγωγός είναι ηλεκτρικά ουδέτερος: $N_A x_p = N_D x_n$
- πυκνότητα $\rho(x)$ φορτίων χώρου:
 - $\rho(x) = -eN_A$ στην περιοχή p ($x_p < x < 0$)
 - $\rho(x) = eN_D$ στην περιοχή n ($0 < x < x_n$)

εξίσωση Poisson: $d\varepsilon(x)/dx = \rho(x)/\varepsilon_r\varepsilon_0$

Απότομη επαφή:
$$W_o = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_o}{e} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}}$$



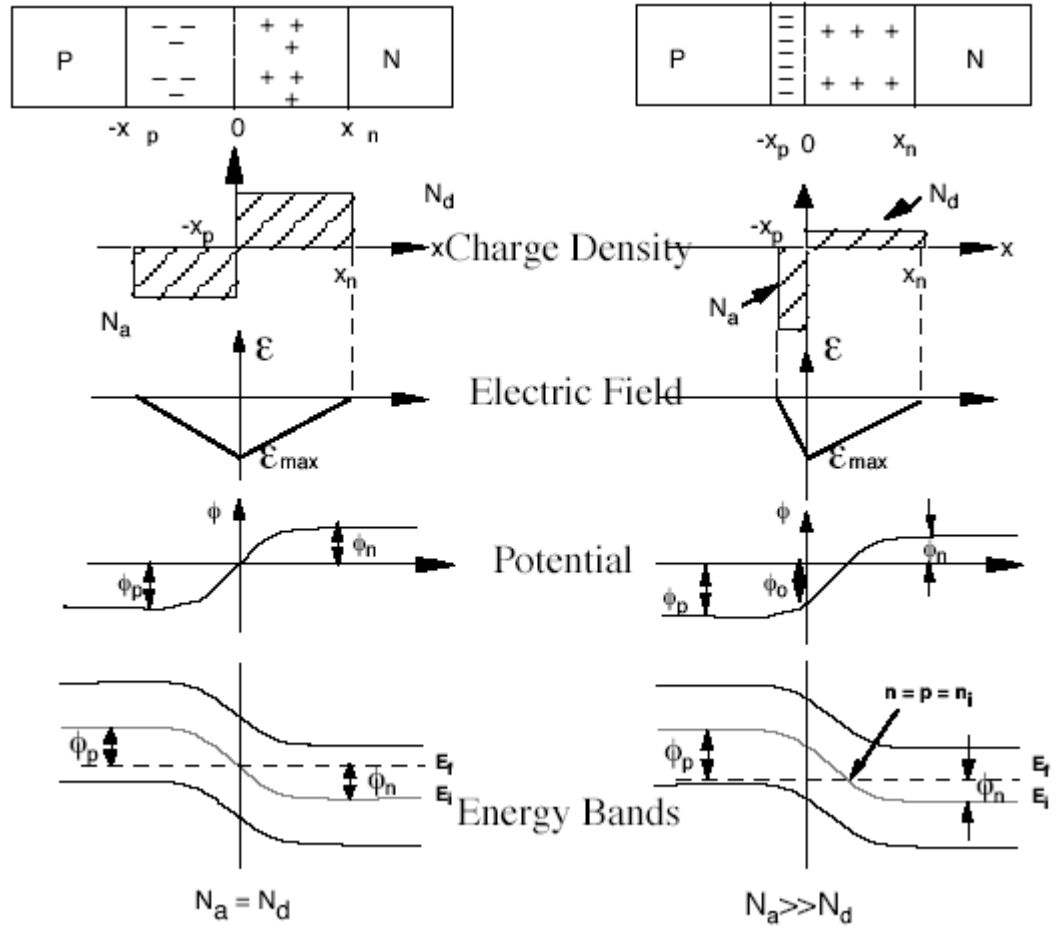
Πηγή: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fa/Pn-junction-equilibrium-graphs.png/250px-Pn-junction-equilibrium-graphs.png>
https://en.wikipedia.org/wiki/Depletion_region



Μονόπλευρη επαφή $N_A \gg N_D$ (p⁺-n)

$$W_o = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_o}{e} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}}$$

$$W_o \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon V_o}{e N_D}}$$

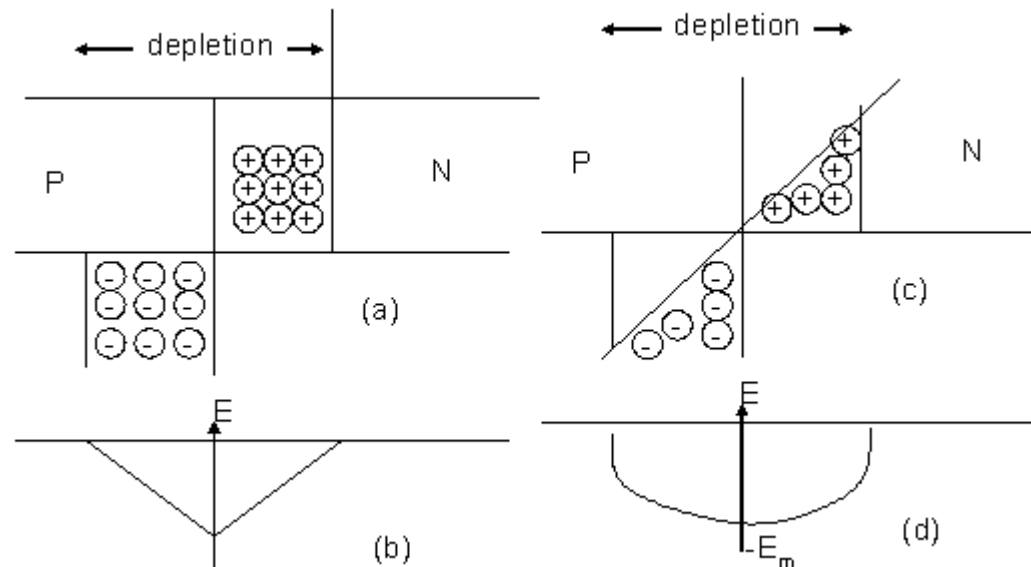


Επαφή διάχυσης (γραμμική)

- $\rho(x) = \alpha x$ ($\alpha = dN/dx$, $N = N_A - N_D$)

$$V_o = 2 \frac{kT}{e} \ln \frac{aW}{2n_i}$$

$$W_o \approx 3 \sqrt[3]{\frac{12\epsilon V_o}{ea}}$$



Πηγή: http://nptel.ac.in/courses/115102025/module5/img5_3/img3_1.png
<http://nptel.ac.in/courses/115102025/18>



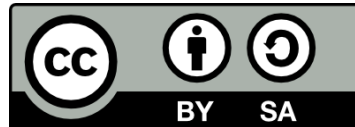
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λιτσαρδάκης Γεώργιος.
«Ημιαγωγά Υλικά: Θεωρία – Διατάξεις» Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015.
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://eclass.auth.gr/courses/OCRS463>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Καρανάσιος Νικόλαος
Θεσσαλονίκη, 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ