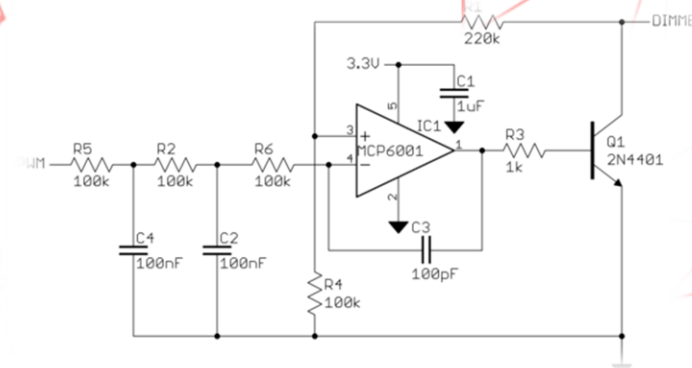
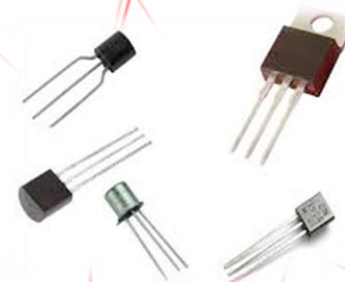
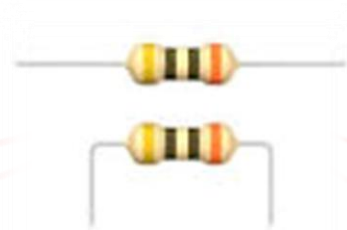
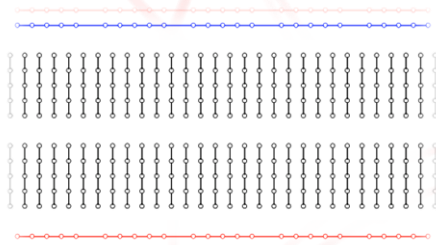


Ηλεκτρονική

➔ Νικόλαος Γιαννακέας



Περιεχόμενα του μαθήματος

- Δομή Ημιαγωγών
- Εξωγενείς – Ενδογενείς Ημιαγωγοί
- Επαφή P-N (Εξήγηση φαινομένου)
 - Περιοχή διάχυσης
 - Ενεργειακή προσέγγιση
 - Περιοχή απογύμνωσης
- Πόλωση P-N (Ανάστροφη/Ορθή)

Αγωγοί, Μονωτές, Ημιαγωγοί

- Κατηγοριοποίηση υλικών βάσει των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων:
- **Αγωγοί** (αφήνουν το ρεύμα να περάσει)
- **Μονωτές** (δεν αφήνουν το ρεύμα να περάσει)
- **Ημιαγωγοί** (ανάλογα με τις συνθήκες συμπεριφέρονται είτε ως αγωγοί, είτε ως μονωτές)

Αίτια αλλαγής συμπεριφοράς ημιαγωγών

➤ Ειδική αντίσταση

- ειδική αντίσταση αγωγών = 10^{-8} ohm
- ειδική αντίσταση μονωτών = 10^{11} ohm
- 10^{-6} ohm < ειδική αντίσταση ημιαγωγών < 10^6 ohm

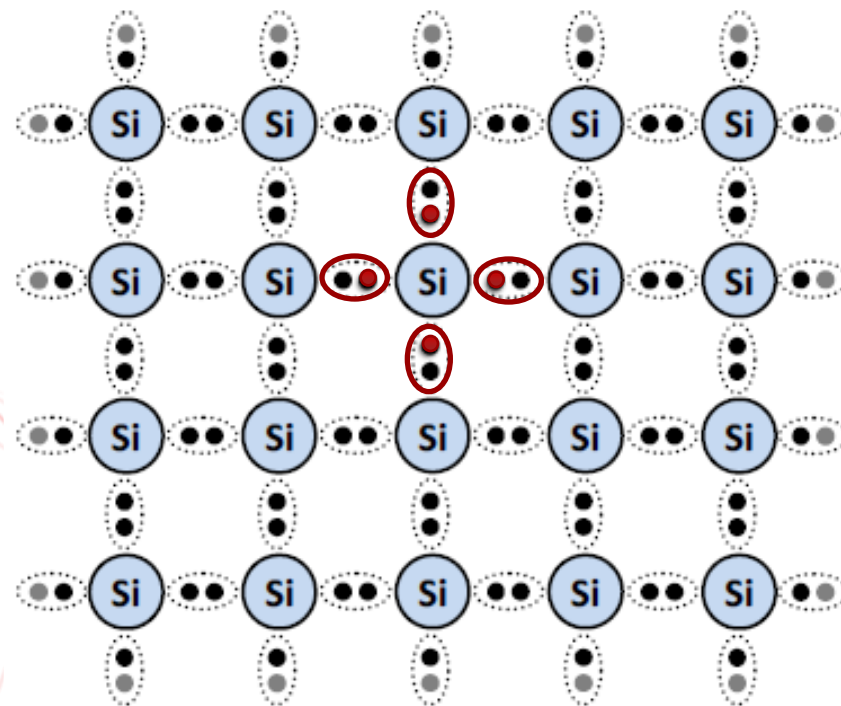
➤ Θερμοκρασία

- Οι ειδικές αντιστάσεις των αγωγών & των μονωτών δε μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, ενώ των ημιαγωγών μεταβάλλονται σημαντικά

Periodic System of Elements																		VIII			
Dimitri Mendeleev (1869)																					
IA												IIIA		IVA	VA	VIA	VIIA				
1 H Hydrogen 1s ¹												2 He Helium 1s ²									
IIA														B	C	N	O	F	Ne		
3 Li Lithium 2s ¹	4 Be Beryllium 2s ²											5 B Boron 2p ¹	6 C Carbon 2p ²	7 N Nitrogen 2p ³	8 O Oxygen 2p ⁴	9 F Fluorine 2p ⁵	10 Ne Neon 2p ⁶				
11 Na Sodium 3s ¹	12 Mg Magnesium 3s ²	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB		IB	IIB	13 Al Aluminum 3p ¹	14 Si Silicon 3p ²	15 P Phosphorous 3p ³	16 S Sulfur 3p ⁴	17 Cl Chlorine 3p ⁵	18 Ar Argon 3p ⁶					
19 K Potassium 4s ¹	20 Ca Calcium 4s ²	21 Sc Scandium 3d ¹ 4s ²	22 Ti Titanium 3d ² 4s ²	23 V Vanadium 3d ³ 4s ²	24 Cr Chromium 3d ⁵ 4s ¹	25 Mn Manganese 3d ⁵ 4s ²	26 Fe Iron 3d ⁶ 4s ²	27 Co Cobalt 3d ⁷ 4s ²	28 Ni Nickel 3d ⁸ 4s ²	29 Cu Copper 3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn Zinc 3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga Gallium 4p ¹	32 Ge Germanium 4p ²	33 As Arsenic 4p ³	34 Se Selenium 4p ⁴	35 Br Bromine 4p ⁵	36 Kr Krypton 4p ⁶				
37 Rb Rubidium 5s ¹	38 Sr Strontium 5s ²	39 Y Yttrium 4d ¹ 5s ²	40 Zr Zirconium 4d ² 5s ²	41 Nb Niobium 4d ⁴ 5s ¹	42 Mo Molybdenum 4d ⁵ 5s ²	43 Tc Technetium 4d ⁵ 5s ²	44 Ru Ruthenium 4d ⁷ 5s ¹	45 Rh Rhodium 4d ⁸ 5s ¹	46 Pd Palladium 4d ¹⁰	47 Ag Silver 4d ¹⁰ 5s ¹	48 Cd Cadmium 4d ¹⁰ 5s ²	49 In Indium 5p ¹	50 Sn Tin 5p ²	51 Sb Antimony 5p ³	52 Te Tellurium 5p ⁴	53 I Iodine 5p ⁵	54 Xe Xenon 5p ⁶				
55 Cs Cesium 6s ¹	56 Ba Barium 6s ²	57 La* Lanthanum 5d ¹ 6s ²	72 Hf Hafnium 5d ² 6s ²	73 Ta Tantalum 5d ³ 6s ²	74 W Tungsten 5d ⁴ 6s ²	75 Re Rhenium 5d ⁵ 6s ²	76 Os Osmium 5d ⁶ 6s ²	77 Ir Iridium 5d ⁷ 6s ²	78 Pt Platinum 5d ⁹ 6s ¹	79 Au Gold 5d ¹⁰ 6s ¹	80 Hg Mercury 5d ¹⁰ 6s ²	81 Tl Thallium 6p ¹	82 Pb Lead 6p ²	83 Bi Bismuth 6p ³	84 Po Polonium 6p ⁴	85 At Astatine 6p ⁵	86 Rn Radon 6p ⁶				
87 Fr Francium 7s ¹	88 Ra Radium 7s ²	89 Ac** Actinium 6d ¹ 7s ²											Coinage metals		Elemental semiconductors		Halogens		Noble gases		
Alkaline metals		Alkaline-earth metals																			

Δομή ημιαγωγών

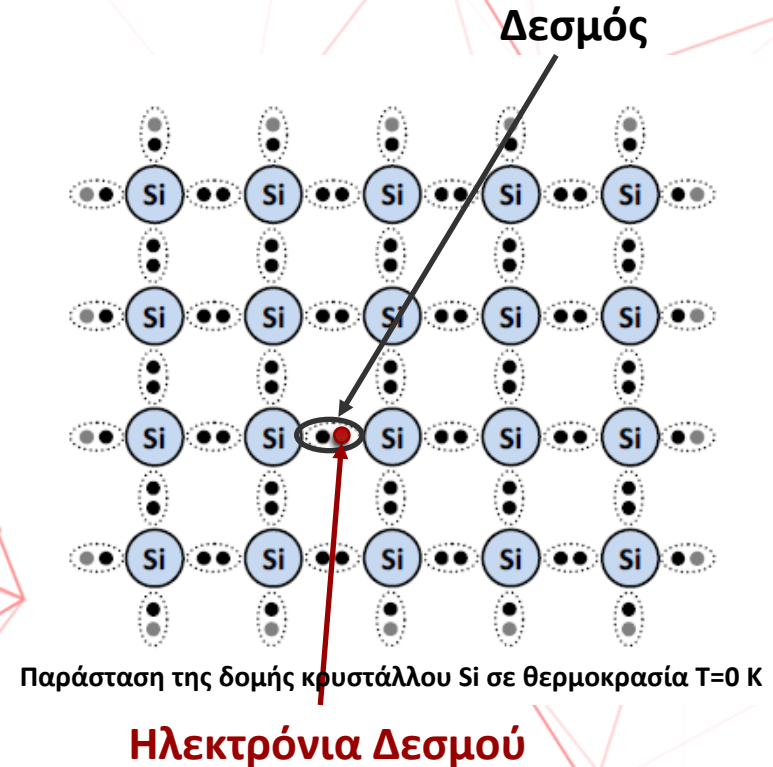
- ➔ Οι ημιαγωγοί, όπως το **Πυρίτιο (Si)** & το **Γερμάνιο (Ge)** έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα & σχηματίζουν τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς



Πλέγμα Πυριτίου. Με την κόκκινη γραμμή σημειώνονται
Οι ομοιοπολικοί δεσμοί

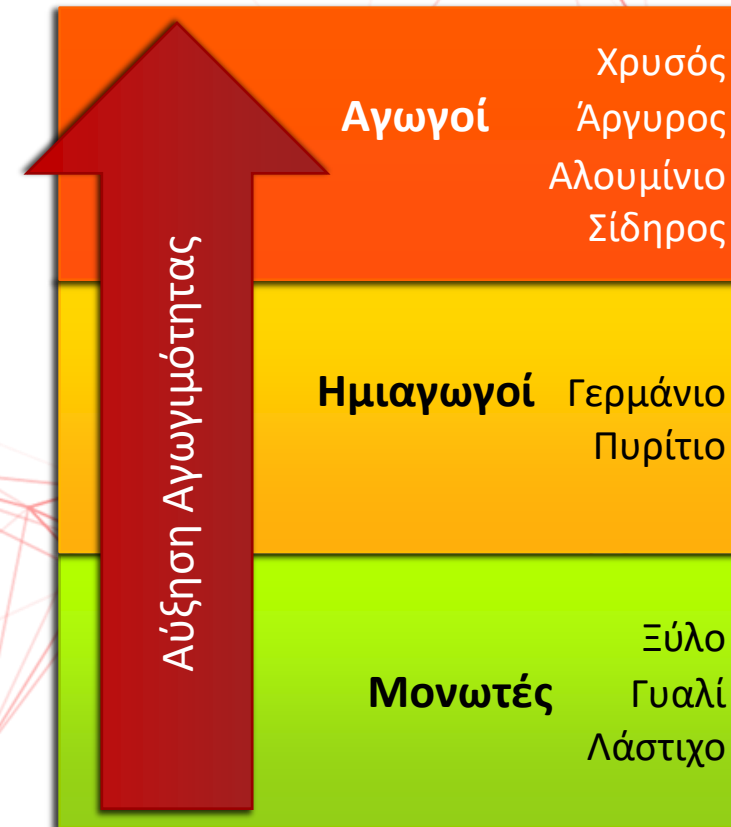
Οι ημιαγωγοί ως μονωτές

- Όταν τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας δε μπορούν να απομακρυνθούν από τα άτομα, τότε δε θα υπάρχουν **ελεύθερα ηλεκτρόνια** μέσα στο υλικό & συνεπώς δεν θα είναι δυνατή η **διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος** μέσα από αυτό
- Τότε λέμε ότι το υλικό συμπεριφέρεται ως **μονωτής**



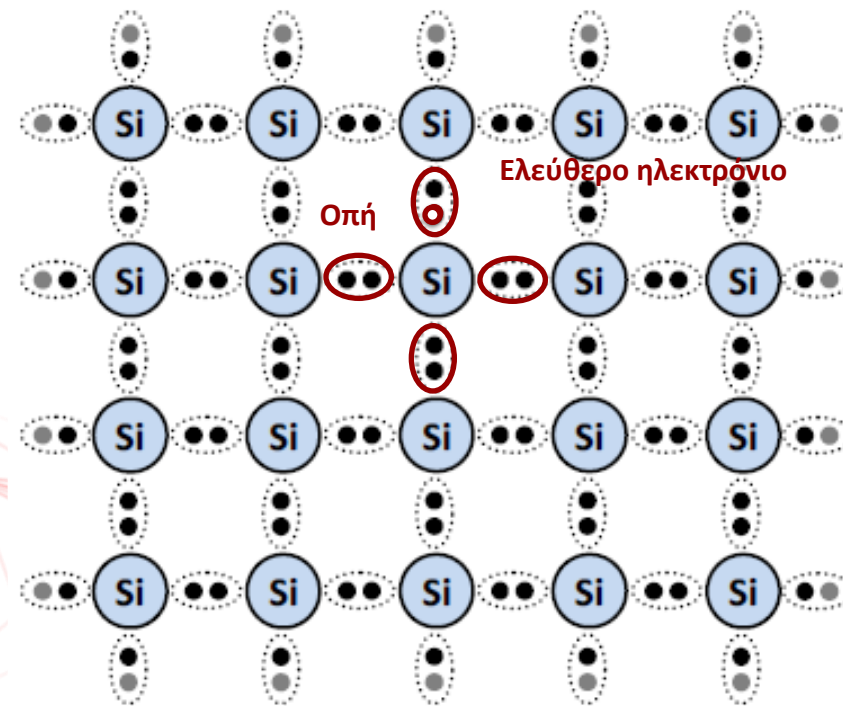
Οι ημιαγωγοί ως αγωγοί

➔ Σε θερμοκρασία δωματίου τα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από τα άτομα & κινούνται ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο του ημιαγωγού μέχρις ότου βρουν ένα άτομο που του λείπει ένα ηλεκτρόνιο



Κίνηση Οπών & ηλεκτρονίων

- Όταν σε ένα ημιαγωγό εφαρμοστεί μια τάση, τότε υπό την επίδραση του πεδίου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια θα κινηθούν προς μια κατεύθυνση
- Οι κενές θέσεις που αφήνουν πίσω τους τα ηλεκτρόνια ονομάζονται **οπές**, οι οποίες δημιουργούν στα άτομα θετικό φορτίο
- Οι οπές κινούνται (εικονικά) σε κατεύθυνση αντίθετη με αυτή των ηλεκτρονίων



Στον δεσμό από τον οποίο έφυγε το ηλεκτρόνιο έμεινε μια θέση κενή που ονομάζεται οπή η οποία θεωρείται ότι έχει θετικό φορτίο & ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου

Ενεργειακές ζώνες

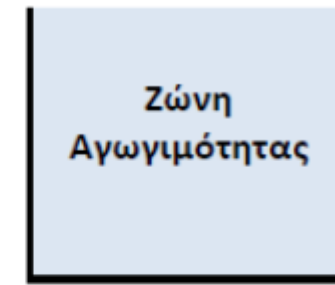
- Οι **ενεργειακές ζώνες** ορίζουν τις επιτρεπόμενες στάθμες που μπορούν να καταληφθούν από ηλεκτρόνια σε ένα κρυσταλλικό ή άμορφο υλικό.
- Οι σημαντικότερες ενεργειακές ζώνες είναι η **ζώνη σθένους** & η **ζώνη αγωγιμότητας**
- Μεταξύ των ενεργειακών ζωνών υπάρχουν τα **ενεργειακά χάσματα** (ή **απαγορευμένες ζώνες**)



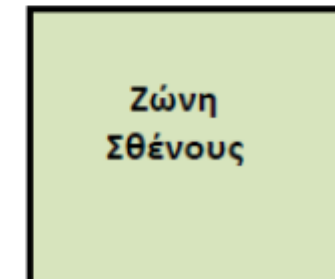
Ενεργειακές ζώνες σε ένα μονωτή

- ➔ Σε ένα **μονωτή** (π.χ. στο διαμάντι) το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους & της ζώνης αγωγιμότητας είναι **μεγάλο**, με αποτέλεσμα το υλικό να **μην είναι αγωγίμο**

Ενέργεια

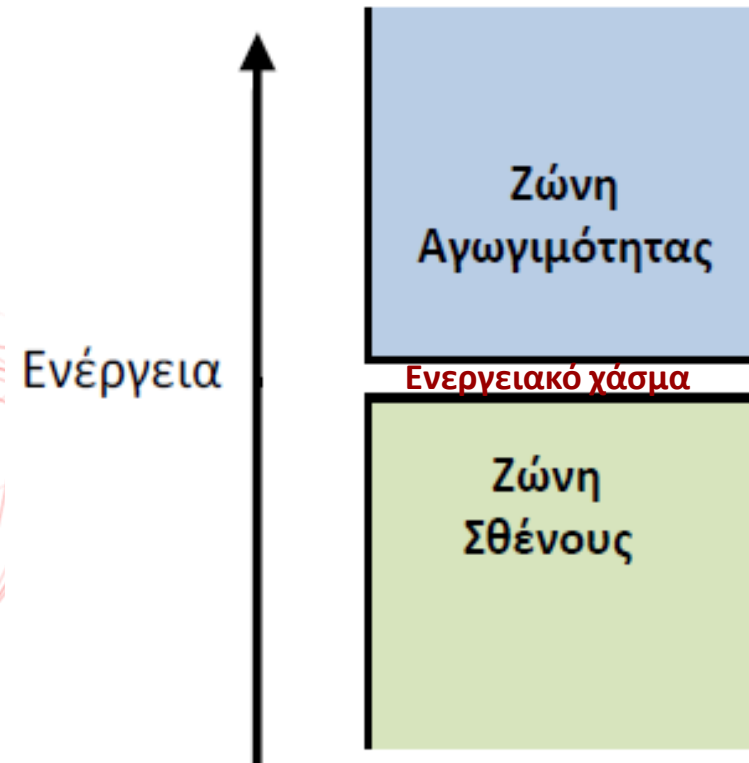


Ενεργειακό χάσμα



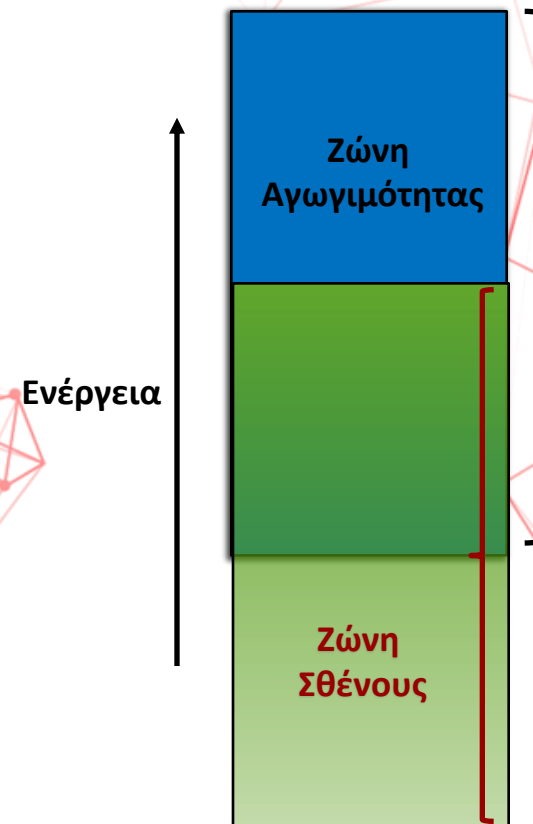
Ενεργειακές ζώνες σε ένα ημιαγωγό

- Σε ένα **ημιαγωγό** (π.χ. στο πυρίτιο) το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους & της ζώνης αγωγιμότητας είναι μικρό, με αποτέλεσμα το υλικό να είναι μερικά αγωγίμο



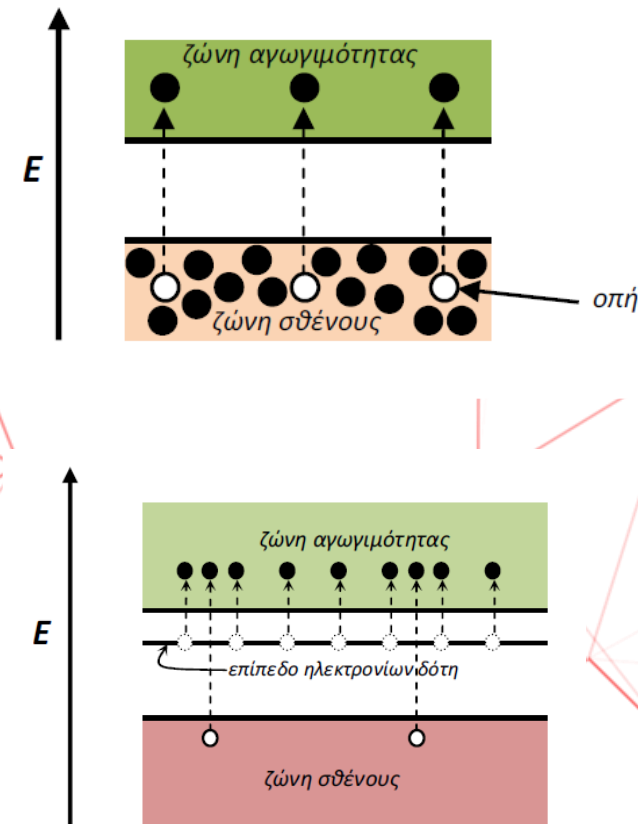
Ενεργειακές ζώνες σε ένα αγωγό

- Σε ένα **αγωγό** (π.χ. στο μέταλλο) το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας είναι **μηδενικό**, καθώς υπάρχει αλληλοκάλυψη των ζωνών, με αποτέλεσμα το υλικό να είναι **πολύ αγωγίμο**



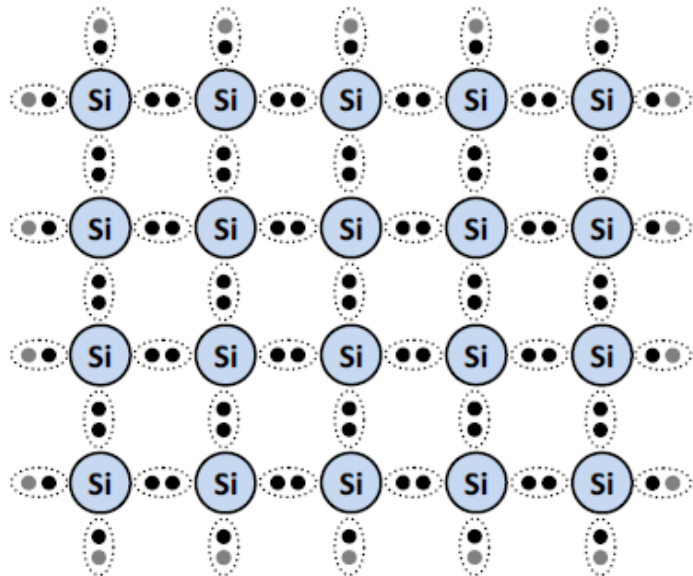
Ενδογενείς & εξωγενείς ημιαγωγοί

- Σε ένα **ενδογενή** (ή αλλιώς καθαρό) ημιαγωγό όλα τα άτομα είναι ίδια & ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των ελεύθερων οπών
- Σε ένα **εξωγενή** ημιαγωγό έχουν προστεθεί μικρές ποσότητες άλλων στοιχείων (προσμίξεις) με αποτέλεσμα ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων να είναι διαφορετικός από τον αριθμό των ελεύθερων οπών

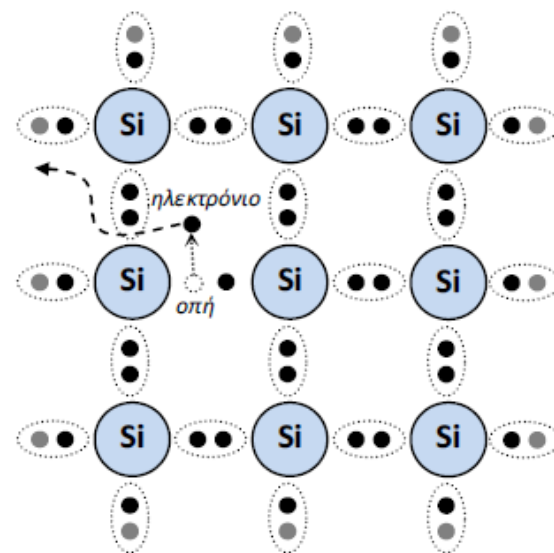


Ενδογενείς ημιαγωγοί

Δομή κρυστάλλου ενδογενούς ημιαγωγού

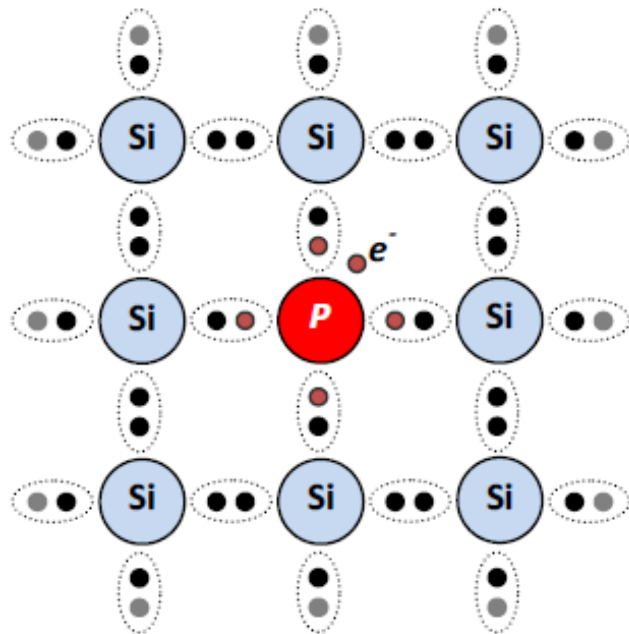


Δομή κρυστάλλου ενδογενούς ημιαγωγού

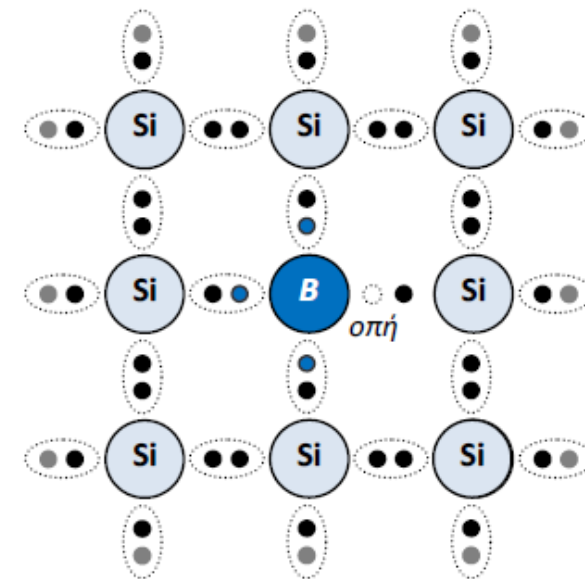


Εξωγενείς ημιαγωγοί

Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη φωσφόρου



Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη βορίου



Καθαροί ημιαγωγοί (1)

- Η δομή τους είναι πανομοιότυπη σε κάθε σημείο του
- Όλα τα στοιχεία του κρυσταλλικού πλέγματος είναι όμοια, δηλ. αποκλειστικά άτομα **Ge** ή **Si** αντίστοιχα
- Τελείως καθαροί ημιαγωγοί δεν υπάρχουν στην πράξη
- Στους καθαρούς ημιαγωγούς έχουμε δύο είδη φορέων: **τις οπές & τα ηλεκτρόνια**

Καθαροί ημιαγωγοί (2)

- Αν θεωρήσουμε τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων στη μονάδα του όγκου μέσα σε έναν καθαρό ημιαγωγό, ίσο με n & τον αριθμό των οπών στη μονάδα του όγκου ίσο με p , τότε όπως ήδη έχει αναφερθεί θα είναι:

$$n = p = n_i$$

- Έχει βρεθεί ότι:

$$n_i = K \cdot T^{3/2} \cdot e^{-E_g / 2KT}$$

T = η απόλυτη θερμοκρασία

E_g = το ενεργειακό χάσμα

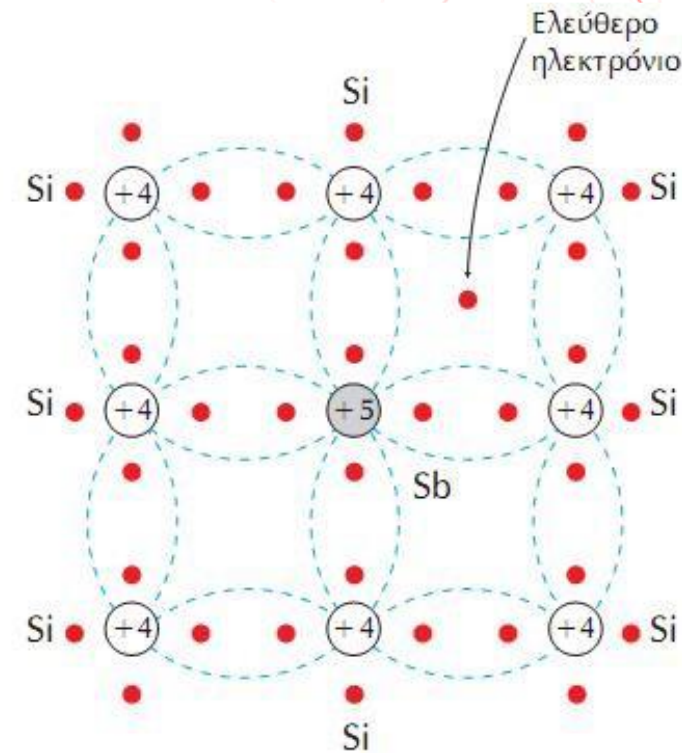
K = η σταθερά του Boltzman

Εμπλουτισμένοι ημιαγωγοί

- **Εμπλουτισμός:** προσθήκη σε τετρασθενή ημιαγωγό (π.χ. Si), πεντασθενών ή τρισθενών ατόμων τους **δότες & αποδέκτες** αντίστοιχα
- Δότες & οι αποδέκτες: **προσμίξεις.**
- **Εμπλουτισμένος ημιαγωγός ή ημιαγωγός προσμίξεων:** ένας ημιαγωγός με προσμίξεις
- Είδη ημιαγωγών προσμίξεων: **τύπου p ή τύπου n**

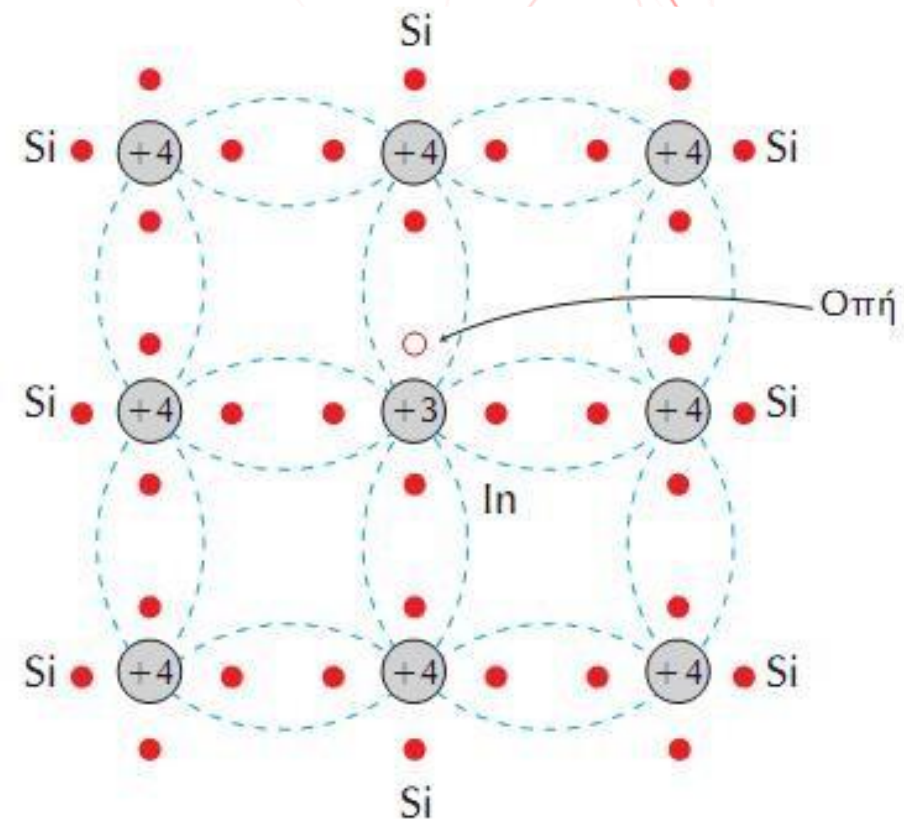
Ημιαγωγοί τύπου n

- ➔ Η πρόσμιξη στοιχείων με 5 ηλεκτρόνια (δότες) στην εξωτερική στοιβάδα έχει ως αποτέλεσμα την **εμφάνιση πολλών ελεύθερων ηλεκτρονίων** (φορείς πλειονότητας) και **πολύ λίγων οπών** (φορείς μειονότητας)



Ημιαγωγοί τύπου p

- ➔ Η πρόσμιξη στοιχείων με 3 ηλεκτρόνια (αποδέκτες) στην εξωτερική στοιβάδα (π.χ. βόριο) έχει ως αποτέλεσμα την **εμφάνιση πολλών ελεύθερων οπών** (φορείς πλειονότητας) & **πολύ λίγων ελεύθερων ηλεκτρονίων** (φορείς μειονότητας)

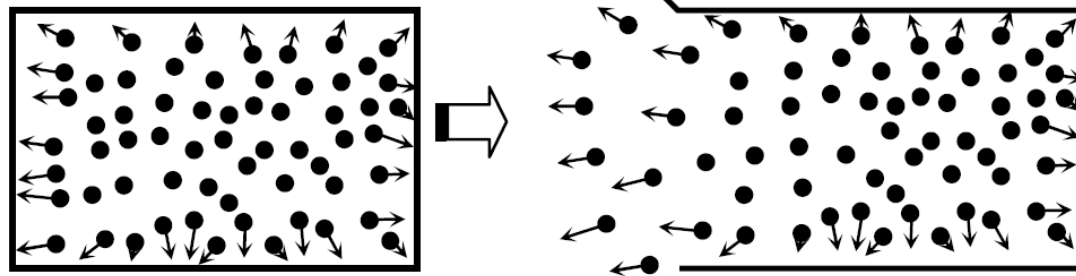


Άλλοι ημιαγωγοί

- Οι **οργανικοί** ημιαγωγοί φθορίζουν όταν εφαρμοστεί τάση στα άκρα του & το χρώμα τους εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό τους
- Οι **άμορφοι** ημιαγωγοί (π.χ. άμορφο πυρίτιο) χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, σε αριθμομηχανές, κτλ.

Επαφή $p-n$ (1)

- Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ένας ημιαγωγός τύπου p μπορεί να θεωρηθεί ως μια δεξαμενή οπών, ενώ ένας ημιαγωγός τύπου n ως μια δεξαμενή ηλεκτρονίων
- Σε κάθε περίπτωση οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρόνια ή οπές) θα απωθούνται μεταξύ τους εξαιτίας του ομώνυμου φορτίου το οποίο φέρουν



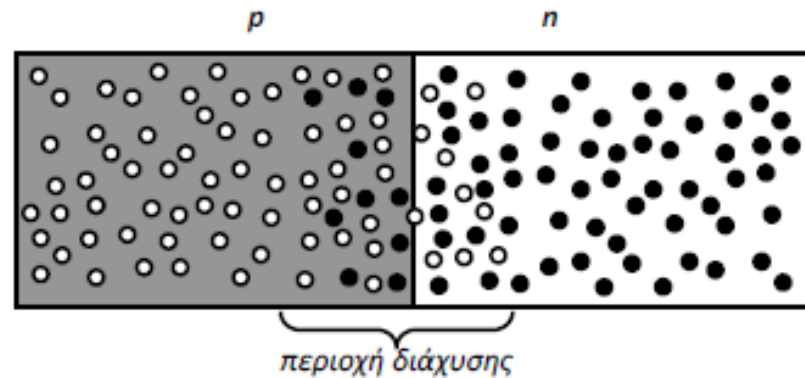
Διάχυση ηλεκτρονίων σε ημιαγωγό τύπου n

Επαφή p - n (2)

- Στο προηγούμενο Σχήμα φαίνεται η τάση που έχουν τα **ηλεκτρόνια** αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού τύπου n να **απομακρύνονται το ένα από το άλλο**, λόγω των μεταξύ τους απώσεων
- Προφανώς η απομάκρυνση αυτή δεν είναι δυνατό να συμβεί εξαιτίας του φραγμού που θέτουν τα όρια του κρυστάλλου
- Ας υποθέσουμε, παρόλα αυτά, πως ο φραγμός αυτός αίρεται με κάποιο τρόπο & ότι τα ηλεκτρόνια **μπορούν να κινηθούν ελεύθερα μέσω μιας έδρας του κρυστάλλου**, όπως φαίνεται στο Σχήμα
- Υπό την επίδραση των αμοιβαίων τους απώσεων τα ηλεκτρόνια θα εγκαταλείψουν τον κρύσταλλο ώστε να αυξήσουν τις μεταξύ τους αποστάσεις, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την αλληλεπίδρασή τους και επομένως και την ενέργειά τους
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **διάχυση** & θα ισχύει προφανώς & για την περίπτωση οπών σε ημιαγωγό τύπου p

Επαφή $p-n$ (3)

- Ας υποθέσουμε πως φέρνουμε σε επαφή δύο τμήματα του ίδιου ημιαγωγού, το ένα **τύπου p** & το άλλο **τύπου n**
- Λέμε τότε ότι έχουμε μια επαφή $p-n$ (**$p-n$ junction**) (Στην πράξη μια επαφή $p-n$ κατασκευάζεται πάνω στο ίδιο κομμάτι ημιαγωγού διαφοροποιώντας τον τύπο των προσμίξεων σε κάθε επιμέρους τμήμα)
- Εξαιτίας του φαινομένου της διάχυσης, το οποίο ήδη περιγράψαμε, ηλεκτρόνια θα αρχίσουν να διαχέονται από το τμήμα τύπου n προς το τμήμα τύπου p , ενώ το αντίστροφο θα συμβαίνει για τις οπές



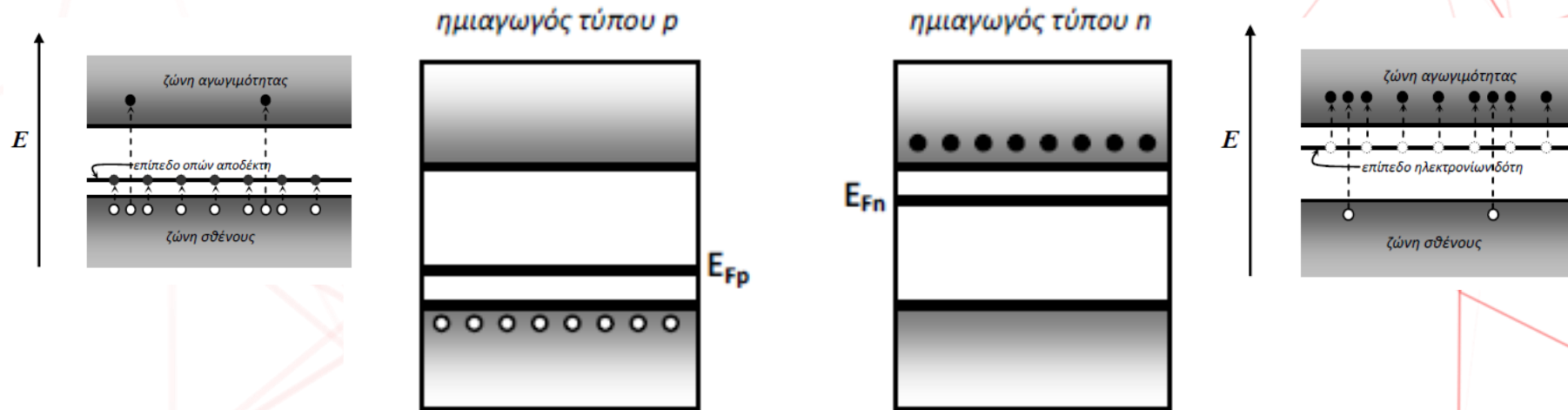
Επαφή $p-n$ (4)

- Με τον τρόπο αυτό, μια περιοχή εκατέρωθεν της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των δύο τμημάτων θα περιέχει ηλεκτρικούς φορείς και των δύο τύπων (ηλεκτρόνια & οπές)
- Η περιοχή αυτή ονομάζεται **περιοχή διάχυσης**
- Εισερχόμενα στην περιοχή **τύπου p** τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας από την περιοχή **τύπου n** την φορτίζουν αρνητικά
- Αντίθετα, οι οπές οι οποίες μένουν κενές από την περιοχή **τύπου n** φορτίζουν θετικά το τμήμα του ημιαγωγού **τύπου n** .
- Όσο αυξάνει ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην περιοχή **τύπου p** , τόσο **δυσκολότερη είναι η περαιτέρω διάχυση** ηλεκτρονίων προς αυτήν, λόγω της άπωσης των ηλεκτρονίων που έχουν ήδη διαχυθεί προς την περιοχή αυτή

Επαφή $p-n$ (5)

- Όμοια, όσο αυξάνει ο αριθμός των οπών στην περιοχή **τύπου n** , τόσο δυσκολότερη είναι η περαιτέρω διάχυση οπών προς αυτήν, λόγω της άπωσης των ήδη υπάρχουσών οπών
- Είναι φανερό πως το φαινόμενο θα φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας όταν εξισορροπηθούν οι δύο <<αντικρουόμενες>> τάσεις ανά τύπο φορέα

Επαφή p - n Ενεργειακή Προσέγγιση (1)



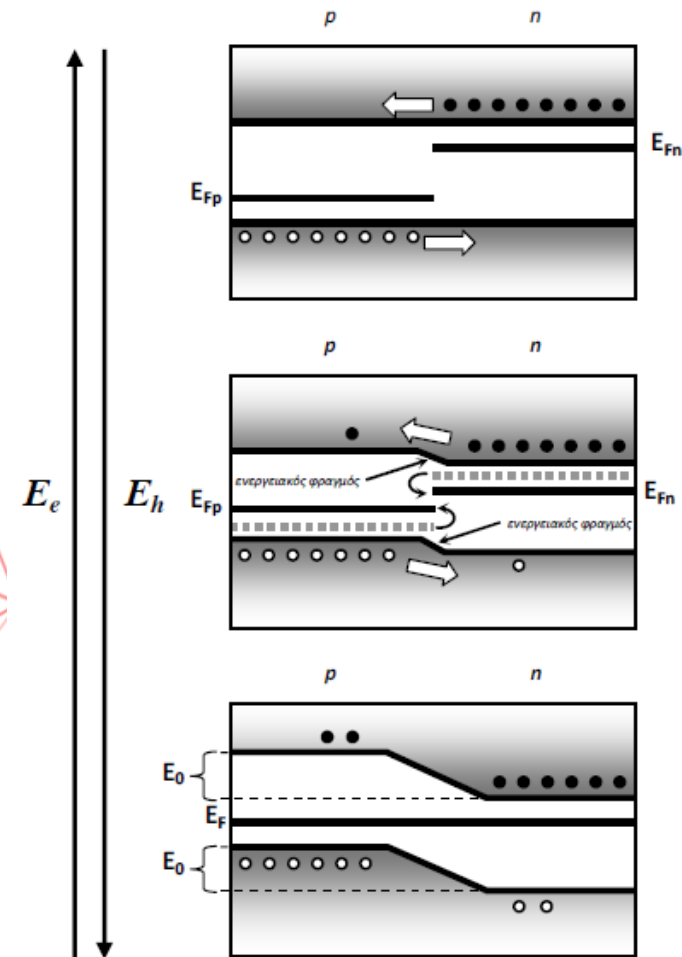
- Η στάθμη Fermi σε έναν ημιαγωγό **τύπου p** θα βρίσκεται μακριά από τη **ζώνη αγωγιμότητας & πολύ κοντά στη ζώνη σθένους**, μιας & η πλειοψηφία των ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας βρίσκεται πλησίον της ζώνης αυτής
- Παρόμοια, για ημιαγωγό **τύπου n** η στάθμη Fermi θα βρίσκεται κοντά στη **ζώνη αγωγιμότητας**, μιας & η πλειοψηφία των ηλεκτρονίων από τα άτομα των δοτών βρίσκεται πλησίον της ζώνης αυτής

Επαφή p - n Ενεργειακή Προσέγγιση (2)

- Ας θεωρήσουμε τώρα μια **επαφή p - n** τη χρονική στιγμή που αποκαθίσταται η επαφή των δύο τμημάτων διαφορετικού τύπου
- Είναι φανερό πως τη συγκεκριμένη στιγμή ηλεκτρόνια από την περιοχή **τύπου n** θα μπορούν να διαχυθούν χωρίς καμία «**αντίσταση**» προς την περιοχή **τύπου p**
- Αντίστοιχα, οπές από την περιοχή **τύπου p** θα μπορούν να «κινηθούν» ελεύθερα προς την περιοχή **τύπου n**
- Όσο στη ζώνη αγωγιμότητας του **τμήματος p** εγκαθίστανται ηλεκτρόνια διαχεόμενα από **τμήμα n** , οι ενεργειακές στάθμες του **τμήματος p** ανυψώνονται, ενώ οι αντίστοιχες στάθμες στο **τμήμα n** ταπεινώνονται (πέφτουν), μαζί με αυτές & η αντίστοιχη στάθμη Fermi

Επαφή p - n Ενεργειακή Προσέγγιση (3)

- Αυτό συμβαίνει επειδή η ενέργεια των διαχεόμενων ηλεκτρονίων «αφαιρείται» από τη ζώνη αγωγιμότητας του τμήματος **τύπου n** στην οποία ήταν εγκατεστημένα αρχικά & «προστίθεται» στην αντίστοιχη ζώνη του τμήματος **τύπου p** προς την οποία διαχέονται
- Στην εξέλιξη του φαινομένου συμβάλλει με παρόμοιο τρόπο & η διάχυση των οπών από το τμήμα **τύπου p** στο τμήμα **τύπου n**

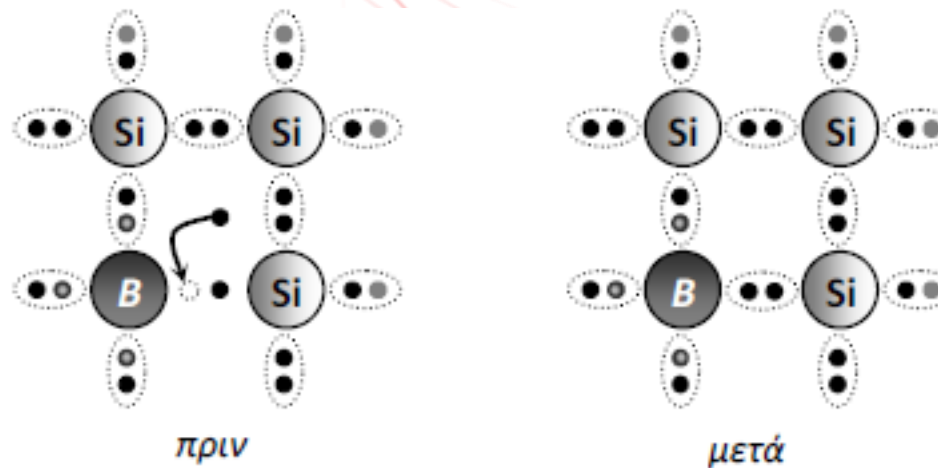


Επαφή p - n Ενεργειακή Προσέγγιση (4)

- Με την ολίσθηση των ενεργειακών σταθμών δημιουργείται ένας αυξανόμενος με το χρόνο **ενεργειακός φραγμός** μεταξύ των δύο τμημάτων, ο οποίος αντιστοιχεί στην διαφορά ενέργειας μεταξύ των ομόλογων σταθμών στα **τμήματα p & n** , & ο οποίος παίρνει τη **μέγιστη τιμή του (E_0)** όταν το σύστημα έρθει σε ισορροπία
- Εξαιτίας του φραγμού αυτού, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας του **τμήματος n** θα πρέπει να διαθέτουν ενέργεια μεγαλύτερη εκείνης του φραγμού προκειμένου να διαχυθούν προς το **τμήμα p**
- Το αντίστοιχο ισχύει & για τις οπές, δηλαδή οι οπές του **τμήματος p** θα πρέπει να διαθέτουν ενέργεια μεγαλύτερη εκείνης του φραγμού προκειμένου να διαχυθούν προς το **τμήμα n**
- Η ισορροπία επέρχεται όταν οι στάθμες Fermi των δύο τμημάτων εξισωθούν

Επαφή $p-n$ Περιοχή Απογύμνωσης (1)

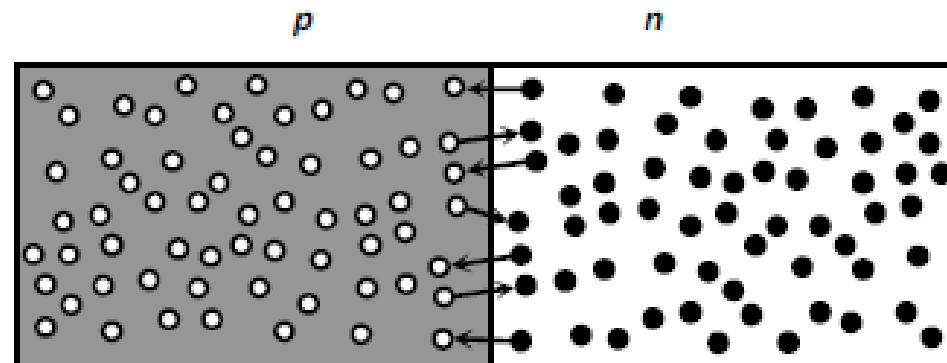
- ➔ Στην περιοχή διάχυσης συνυπάρχουν & οι δύο τύποι ηλεκτρικών φορέων, δηλαδή οπές & ηλεκτρόνια
- ➔ Η συνύπαρξη αυτή οδηγεί στην **ανασύζευξη** ή **επανασύνδεση (recombination)** των φορέων, κατά την οποία ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας συνάπτει δεσμό με ένα ηλεκτρόνιο σθένους το οποίο δεν μετέχει σε δεσμό με άλλο ηλεκτρόνιο



Ανασύζευξη ηλεκτρονίου - οπής

Επαφή p - n Περιοχή Απογύμνωσης (2)

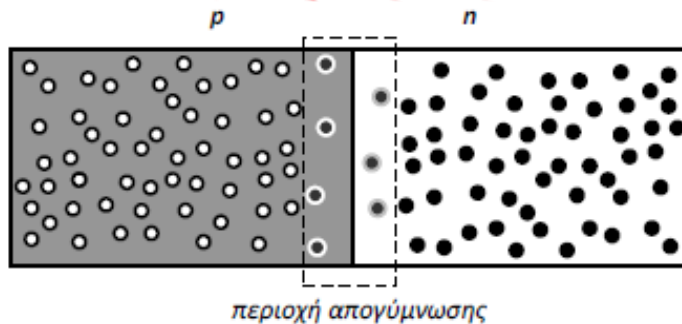
- Μετά την ανασύζευξη, το ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας καθίσταται ηλεκτρόνιο σθένους, μεταπίπτει δηλαδή στη ζώνη σθένους
- Ως αποτέλεσμα έχουμε την <<εξαφάνιση>> & των δύο φορέων (οπής & ηλεκτρονίου) μιας & η οπή παύει να υφίσταται, ενώ το ηλεκτρόνιο παύει πια να συνεισφέρει στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου



Ανασύζευξη οπών-ηλεκτρονίων στην περιοχή διάχυσης επαφής p - n

Επαφή p - n Περιοχή Απογύμνωσης (3)

- Λόγω του μεγάλου αριθμού των ανασυζεύξεων που πραγματοποιούνται στην περιοχή διάχυσης, η περιοχή αυτή απογυμνώνεται εντελώς από ηλεκτρικούς φορείς
- Για το λόγο αυτό ονομάζεται & **περιοχή απογύμνωσης (depletion region)**
- Όσο η ισορροπία αποκαθίσταται, το πάχος της περιοχής απογύμνωσης μεγαλώνει

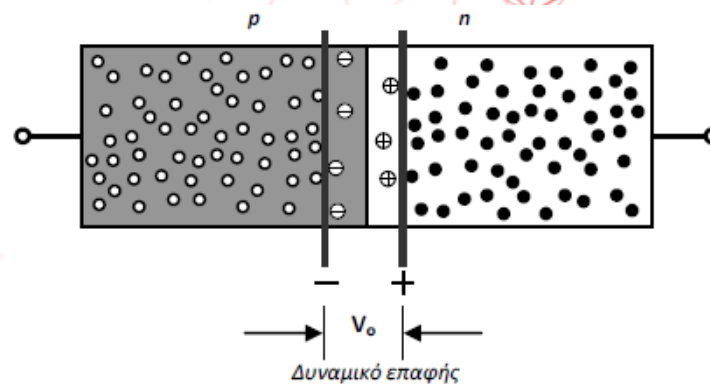


- ⊙ = ανασύζευξη οπής-ηλεκτρονίου στην περιοχή τύπου p
- = ανασύζευξη οπής-ηλεκτρονίου στην περιοχή τύπου n

Σχηματισμός περιοχής απογύμνωσης

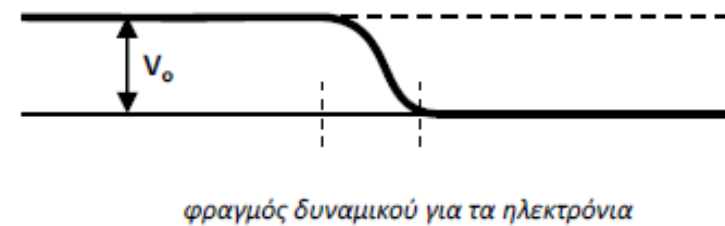
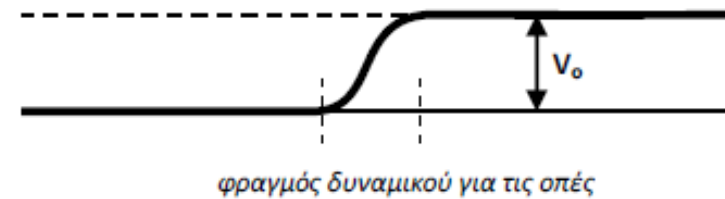
Επαφή p - n Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά (1)

- Τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται στο τμήμα **τύπου p** & επανασυνδέονται με οπές φορτίζουν αρνητικά το μέρος της (ουδέτερης αρχικά) περιοχής διάχυσης που αντιστοιχεί στο τμήμα αυτό
- Αντίθετα, οι οπές που εισέρχονται στο τμήμα **τύπου n** & επανασυνδέονται με ηλεκτρόνια φορτίζουν θετικά το αντίστοιχο τμήμα της περιοχής διάχυσης
- Δημιουργείται με τον τρόπο αυτό μια κατανομή φορτίου χώρου μέσα στην περιοχή απογύμνωσης με την πολικότητα



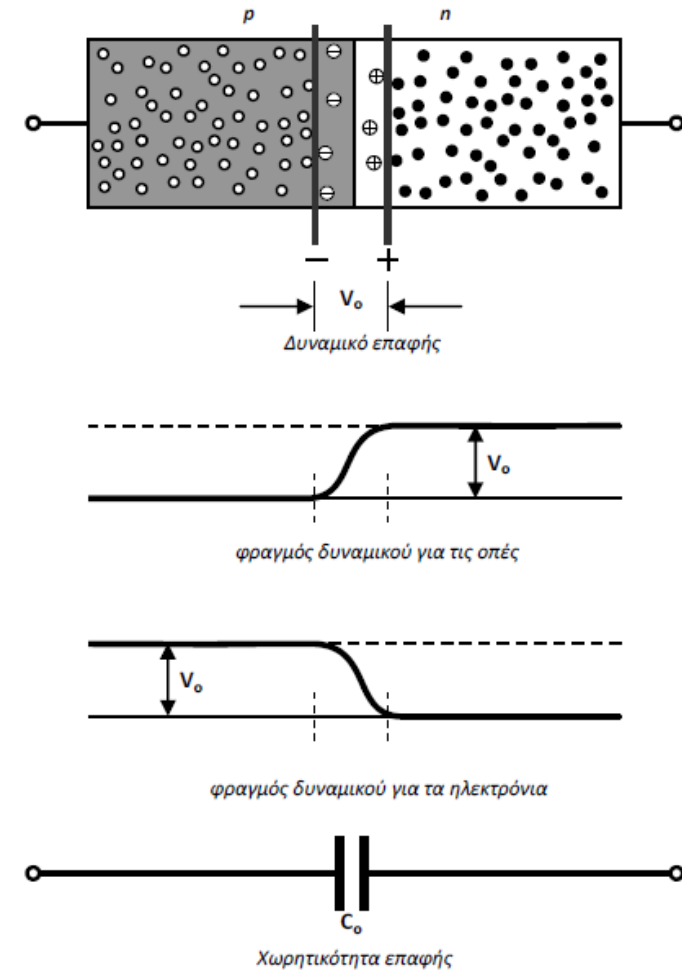
Επαφή $p-n$ Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά (2)

- Η κατανομή αυτή οδηγεί στην εμφάνιση **διαφοράς δυναμικού (V_0)** μεταξύ των δύο τμημάτων διαφορετικού τύπου, η οποία ονομάζεται **δυναμικό επαφής**
- Η παρουσία του φορτίου χώρου δυσχεραίνει την περαιτέρω διάχυση ηλεκτρονίων και οπών, θέτοντας τους αντίστοιχους φραγμούς δυναμικού για κάθε τύπο φορέα
- Στην ισορροπία, το ύψος (V_0) του φραγμού δυναμικού αντιστοιχεί στην τιμή E_0 του ενεργειακού φραγμού



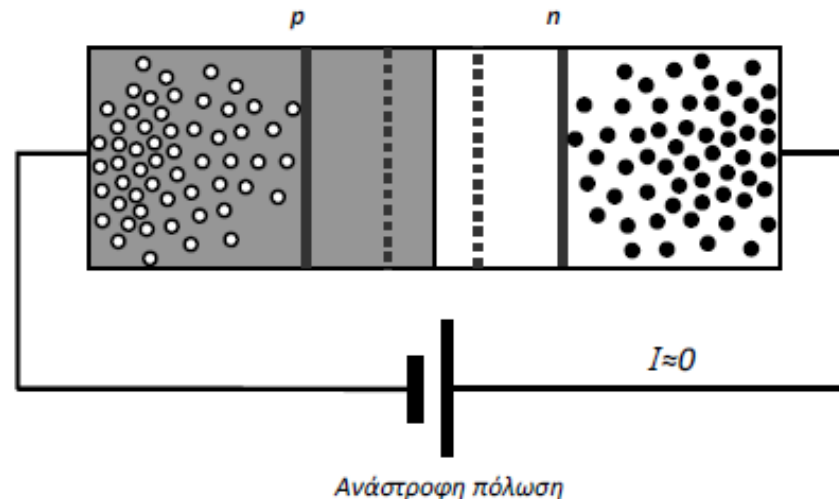
Επαφή p - n Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά (3)

- ➔ Η κατανομή του φορτίου χώρου σε δύο ετερόνυμες περιοχές θυμίζει την δομή του πυκνωτή
- ➔ Πράγματι, η περιοχή απογύμνωσης παρουσιάζει μια χωρητικότητα που συμβολίζεται με C_o & ονομάζεται **χωρητικότητα επαφής**



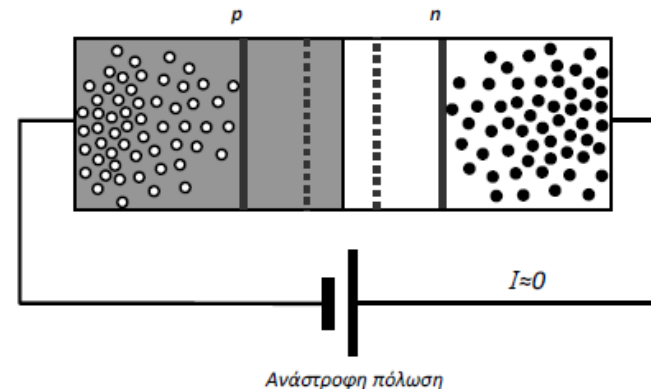
Συμπεριφορά κατά ανάστροφη πόλωση (1)

- Έστω πως εφαρμόζουμε **σταθερή τάση** στα άκρα της επαφής κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα
- Λέμε ότι η πόλωση της επαφής είναι ανάστροφη, επειδή ο θετικός πόλος της πηγής σταθερής τάσης εφαρμόζεται στο τμήμα **τύπου n** , ενώ ο αρνητικός στο τμήμα **τύπου p**



Συμπεριφορά κατά ανάστροφη πόλωση (2)

- Στην περίπτωση αυτή οι οπές, κάτω από την επίδραση της έλξης του αρνητικού πόλου της πηγής τάσης, θα συνωστισθούν στο άκρο του τμήματος **τύπου p** που συνδέεται στον πόλο αυτό
- Όμοια, τα ηλεκτρόνια θα συγκεντρωθούν κοντά στο άκρο του τμήματος n στο οποίο συνδέεται ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής τάσης
- Ως αποτέλεσμα, **θα έχουμε μια μεγάλου εύρους περιοχή απογύμνωσης**, το πάχος της οποίας θα εξαρτάται από την τιμή της εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης, η ύπαρξη της οποίας θα απαγορεύει την κυκλοφορία ρεύματος στο κύκλωμα που περιλαμβάνει την επαφή



Συμπεριφορά κατά ανάστροφη πόλωση (3)

- Ουσιαστικά, η περιοχή απογύμνωσης δρα ως μονωτής, οπότε το κύκλωμα είναι ανοικτό
- Ισοδύναμα, μπορούμε να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά της **επαφής $p-n$** σε ανάστροφη πόλωση ως εξής:
 - Η εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση έχει τέτοια πολικότητα ώστε να αυξάνει το φραγμό δυναμικού της επαφής, καθώς & τον αντίστοιχο ενεργειακό φραγμό
 - Το γεγονός αυτό αποτρέπει τη διάχυση των φορέων μέσα από την περιοχή απογύμνωσης, μιας & αυτοί δεν διαθέτουν την απαιτούμενη ενέργεια προκειμένου να υπερβούν τον ενεργειακό φραγμό
- Στην πράξη, ένα απειροελάχιστο ρεύμα θα διαρρέει την ανάστροφα πολωμένη επαφή
- Το ρεύμα αυτό οφείλεται στους φορείς που παράγονται από τη θερμική διέγερση του κρυστάλλου

Συμπεριφορά κατά ορθή πόλωση

- Αν αντιστρέψουμε την πηγή εξωτερικής τάσης, έχουμε ορθή πόλωση της επαφής
- Αν η τιμή της εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης είναι μεγαλύτερη του δυναμικού της επαφής, τότε ο φραγμός δυναμικού αίρεται (αντισταθμίζεται) & η **περιοχή απογύμνωσης κατακλύζεται από τους φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος** οι οποίοι μπορούν να διαχέονται ανεμπόδια
- Για τιμές της εξωτερικής τάσης μικρότερες του φραγμού δυναμικού είναι προφανές ότι η περιοχή απογύμνωσης θα εξακολουθεί να υφίσταται, & η επαφή θα απαγορεύει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος

