

Οι ημιαγωγοί αποτελούν την πλέον χρήσιμη κατηγορία υλικών από όλα τα στερεά για εφαρμογές στα ηλεκτρονικά.

Οι ημιαγωγοί έχουν ηλεκτρική ειδική αντίσταση (ή ηλεκτρική αγωγιμότητα) που κυμαίνεται μεταξύ καλών μονωτών και καλών αγωγών.

Η πολύ σημαντική σπουδαιότητα των ημιαγωγών στην σύγχρονη βιομηχανία ηλεκτρονικών εφαρμογών οφείλεται στο γεγονός ότι οι **ηλεκτρικές τους ιδιότητες είναι πολύ ευαίσθητες σε πολύ μικρές μεταβολές στην συγκέντρωση των προσμειξέων.**

Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη των βασικών εννοιών που αφορούν στην συμπεριφορά των ημιαγωγών είναι τα στοιχεία Si και Ge.

Η έρευνα για ανάπτυξη νέων ημιαγωγικών υλικών και εφαρμογές αυτών αποτελεί αντικείμενο με το οποίο ασχολούνται παρά πολλοί επιστήμονες σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο σε όλο τον κόσμο.

Το **Si** και το **Ge** ανήκουν στην ομάδα **IV** του περιοδικού συστήματος και έχουν στην εξωτερική ατομική στιβάδα τέσσερα ηλεκτρόνια



Και τα δύο στοιχεία κρυσταλλώνονται στην δομή του **αδαμαντά**.

Επειδή και τα τέσσερα εξωτερικά ηλεκτρόνια συμμετέχουν στους δεσμούς, η **στιβάδα αγωγιμότητας είναι πλήρως άδεια**.

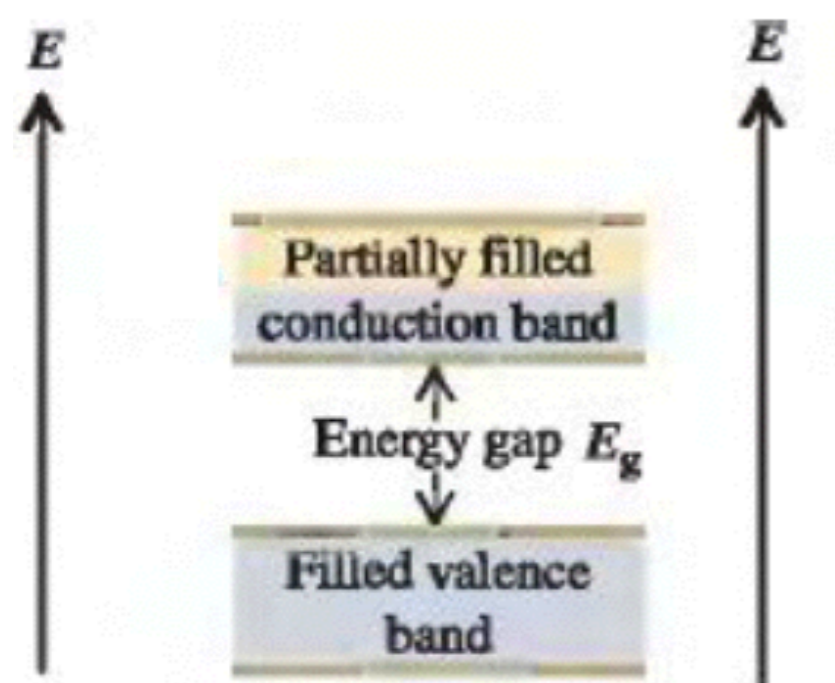
Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να μεταπηδήσουν από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα τα στοιχεία αυτά να συμπεριφέρονται ως **μονωτές**.

Group 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
 Period

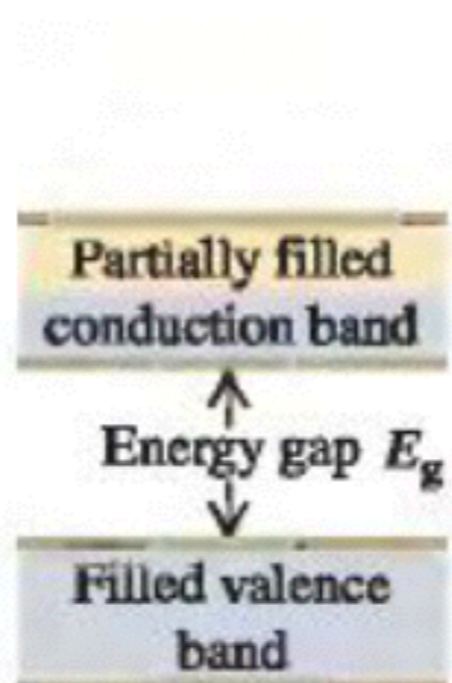
1																		
1	1 H 1.008											2 He 4.003						
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.078	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (289)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo

Lanthanoids	57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
Actinoids	89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)

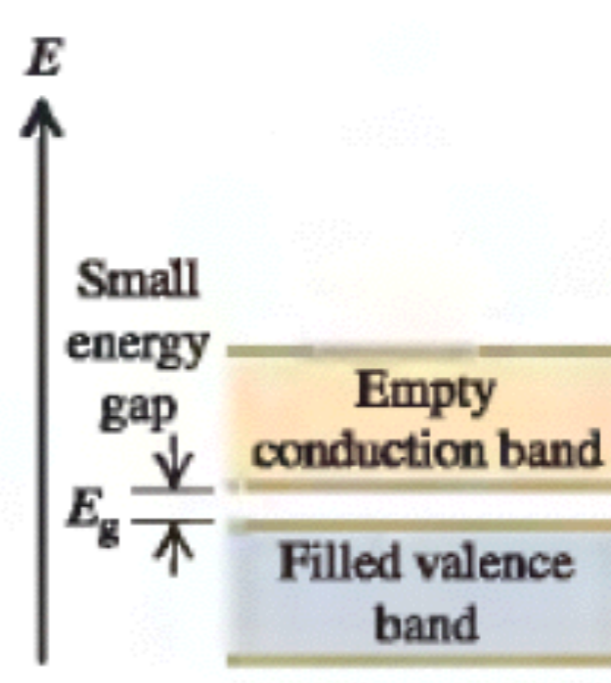
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΑ ΓΡΑΜΜΑ ΖΩΝΩΝ



ΜΕΤΑΛΛΟ



ΜΟΝΩΤΗΣ



ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ

ΑΣΚΗΣΗ: Θεωρούμε υλικό με ενέργεια Fermi στη μέση του ενεργειακού κενού. Υπολογίστε την πιθανότητα να είναι κατειλημμένη μια κατάσταση στην βάση της ζώνης αγωγιμότητας σε θερμοκρασία 300 K αν το ενεργειακό κενό είναι (a) 0,200 eV, (b) 1,00 eV και (c) 5,00 eV. Να επαναλάβετε τους υπολογισμούς για θερμοκρασία 310 K.

Λύση

Η συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac παίρνει την μορφή

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} = \frac{1}{e^{\frac{E_g/2}{kT}} + 1}$$

Επειδή εξ ορισμού ισχύει

$$E = E_F + \frac{E_g}{2} \rightarrow E - E_F = \frac{E_g}{2}$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές και έχουμε

(a)

$$\frac{E - E_F}{kT} = \frac{0,100 \text{ eV}}{\left(8,617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (300 \text{ K})} = 3,87$$

και

$$f(E) = \frac{1}{e^{3,87} + 1} = 0,0205$$

Στους 310 K η συνάρτηση κατανομής δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα.

$$\frac{E - E_F}{kT} = \frac{0,100 \text{ eV}}{\left(8,617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (310 \text{ K})} = 3,74$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{3,74} + 1} = 0,0231$$

Παρατηρούμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 K προκαλεί μεταβολή της συνάρτησης Fermi-Dirac κατά

$$\frac{0,0231 - 0,0205}{0,0205} = 0,127 = 12,7\%$$

(b) Για ενεργειακό χάσμα 1,00 V έχουμε για 300 K

$$\frac{E - E_F}{kT} = \frac{0,500 \text{ eV}}{\left(8,617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (300 \text{ K})} = 19,3$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{19,3} + 1} = 4,15 \times 10^{-9}$$

(c) Για ενεργειακό χάσμα 5,00 V έχουμε για 300 K

$$\frac{E - E_F}{kT} = \frac{2,50 \text{ eV}}{\left(8,617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (300 \text{ K})} = 96,7$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{96,7} + 1} = 1,01 \times 10^{-42}$$

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία όπως στα μεταλλά θα μπορούσε κανείς να υπολογίσει την **πυκνότητα n των ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας σε οποιαδήποτε θερμοκρασία.**

Θα επέτρεπε να υπολογίσει την *πυκνότητα καταστάσεων $g(e)$ στα όρια της ζώνης αγωγιμότητας.* Υπάρχουν θεωρητικοί υπολογισμοί που ξεφεύγουν από τα όρια του μαθηματος αυτού.

Όταν όμως γνωρίζουμε την *πυκνότητα ηλεκτρονίων n μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική αντίσταση του υλικού κατά τα γνωστά από τον κλασικό ηλεκτρισμό, που οφείλεται στα ηλεκτρόνια.*

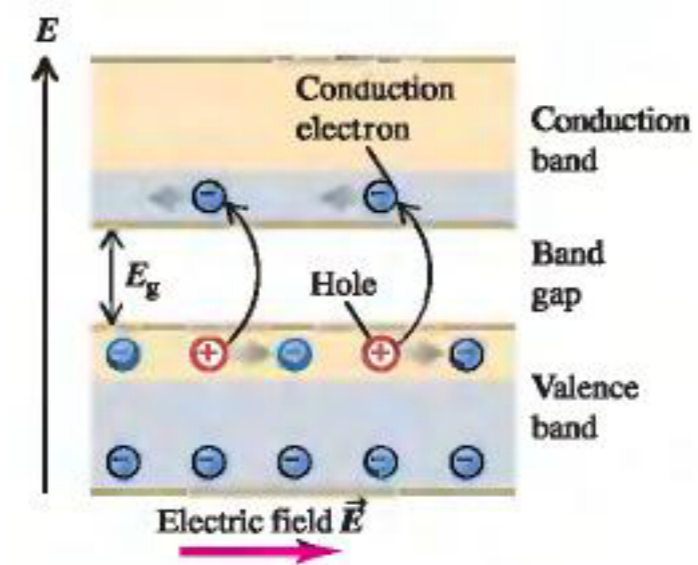
Όμως όπως θα δούμε στην συνέχεια η αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς δεν οφείλεται μόνο στα ηλεκτρόνια.

Η διαφοροποίηση οφείλεται στο ότι στην αγωγιμότητα δεν συμμετέχουν μόνο ηλεκτρόνια αλλά και οπές.

Οπες

Όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταφερθεί από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας δημιουργεί μια κενή θέση. Ηλεκτρόνιο από γειτονική θέση μπορεί να μεταπηδήσει στην κενή θέση που δημιουργήθηκε και να εμφανιστεί νέα κενή θέση, η οποία καλείται οπή και η οποία μπορεί να κινείται στο υλικό και επομένως αποτελεί επιπλέον φορέα ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι αμιγείς ημιαγωγοί οι οποίοι δεν έχουν προσμειξείς καλούνται **ενδογενείς ημιαγωγοί**. Κυριο χαρακτηριστικό είναι ότι ηλεκτρόνια και οπες είναι ίσα σε αριθμό.



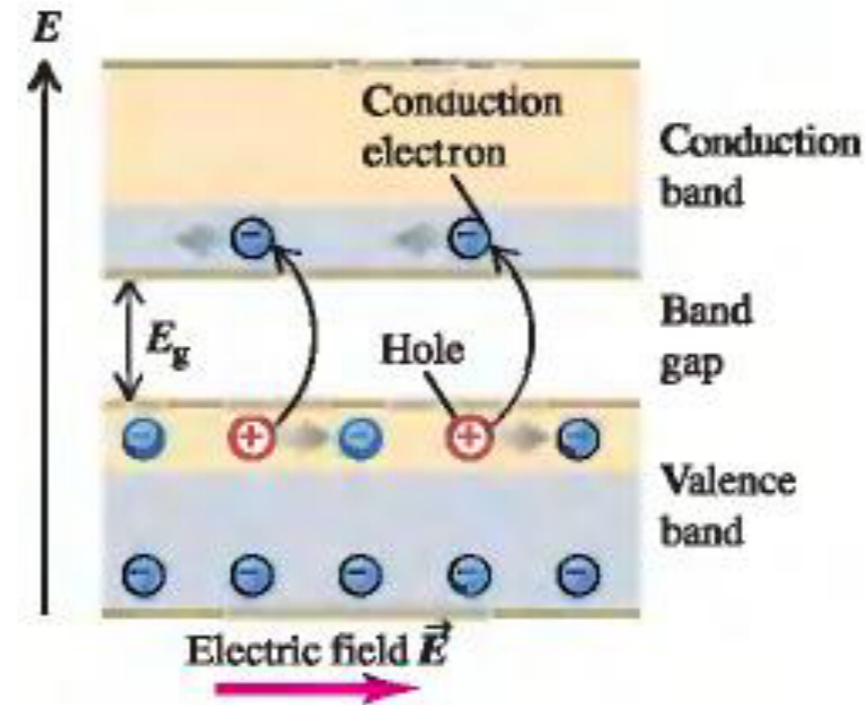
Οπες

Όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο τα ηλεκτρόνια και οι οπες κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Επομένως, μια οπή στην ζώνη σθένους συμπεριφέρεται ως ένα θετικό φορτίο αν και το κινούμενο φορτίο στην ζώνη σθένους είναι ηλεκτρόνιο.

Η παρατηρούμενη αγωγιμότητα καλείται ενδογενής αγωγιμότητα.

Το σχήμα στην διαφάνεια αυτή δείχνει καθαρά την κίνηση των ηλεκτρονίων στην ζώνη σθένους και των οπών στην ζώνη αγωγιμότητας



Ημιαγωγοί προσμειξεων

Υποθετούμε ότι σε τήγμα **γερμανιου ($Z=32$)** προσθέτουμε μικρή ποσότητα **αρσενικου ($Z=33$)**, το οποίο είναι το επομενο στοιχειο μετα το γερμανιο στην ιδια περιοδο.

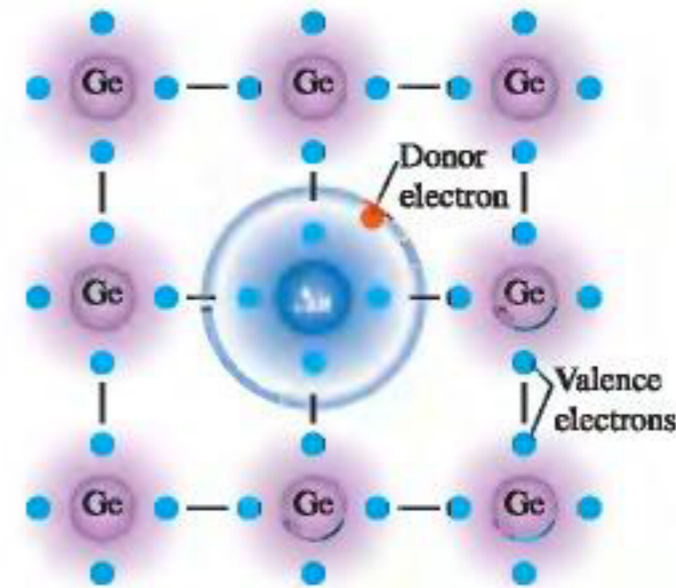
Η διαδικασία προσθηκης προσμειξεων σε ένα ημιαγωγο καλειται doping.

Το αρσενικο ανηκει στην ομαδα **V** του περιοδικου πινακα και εχει πεντε ηλεκτρονια σθενους. Όταν αφαιρεθει ενα απο τα πεντε ηλεκτρονια, η δομη των ηλεκτρονιων που παραμενουν είναι η ιδια με την δομη του γερμανιου.

Η μονη διαφορα είναι οτι το **μεγεθος του αρσενικου είναι μικροτερο επειδη ο πυρηνας εχει 33 πρωτονια** αντι των 32 του γερμανιου με συνεπεια να **ελκει** τα ηλεκτρονια λιγακι περισσοτερο.

Συνεπεια του μικροτερου μεγεθους είναι να αντικαθιστα ευκολα ενα ατομο γερμανιου ως προσμειξη αντικαταστασης.

(a) A donor (*n*-type) impurity atom has a fifth valence electron that does not participate in the covalent bonding and is very loosely bound.



Group 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
 Period

1																	2	
1	1 H 1.008																	2 He 4.003
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.078	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo

Lanthanoids	57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
Actinoids	89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)

Ημιαγωγοί προσμειξεων

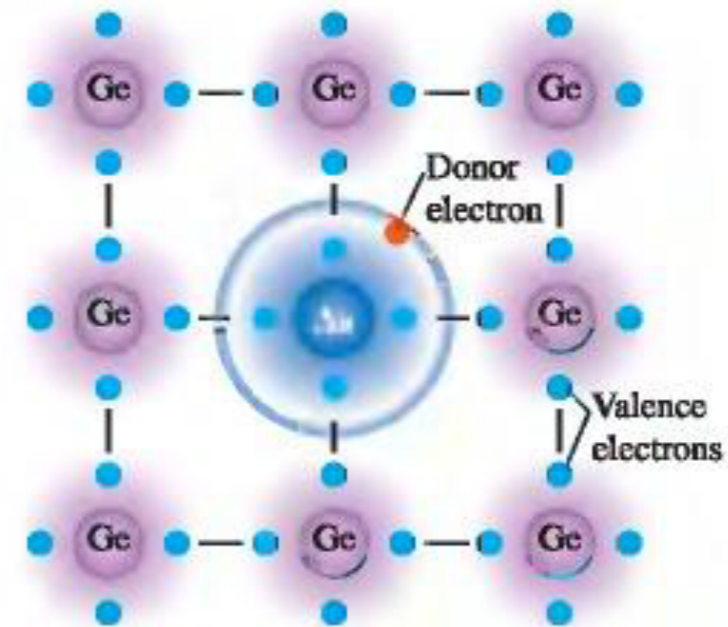
Τα τεσσερα απο τα πεντε ηλεκτρονια σθενους σχηματιζουν ομοιοπολικους δεσμους με τα πλησιεστερα γειτονικα ατομα. Το πεμπτο ηλεκτρονιο ειναι χαλαρα προσαρτημενο στο ατομο, οπως φαινεται στο σχημα.

Επομενως, τα 32 ηλεκτρονια που ειναι ισχυρα συνδεδεμενα στο πλεγμα του υλικου θωρακιζουν το θετικο φορτιο $+33e$ του πυρηνα αφηνοντας ενα καθαρο ηλεκτρικο φορτιο $+e$. θα μπορουσε κανεις να πει οτι η ενεργεια συνδεσης ειναι της ιδιας ταξης με την ενεργεια συνδεσης υδρογονοειδους ατομου με $n=4$.

$$\frac{1}{4}(13,6 \text{ eV}) = 0,85 \text{ eV}$$

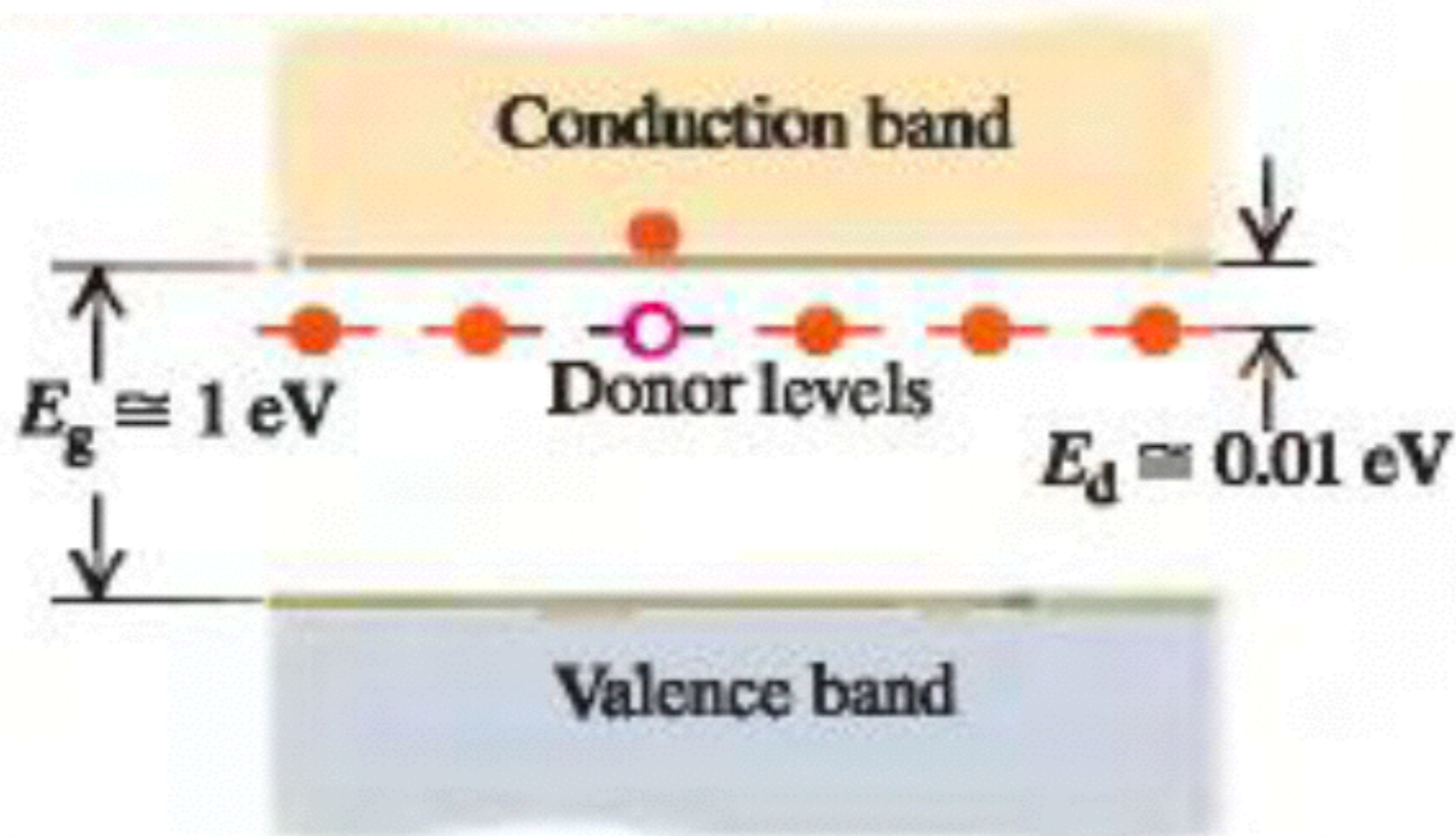
λογω ομως της επιπλεον θωρακισης απο γειτονικα ατομα, η ενεργεια συνδεσης ειναι της ταξης 0,01 ev.

(a) A donor (*n*-type) impurity atom has a fifth valence electron that does not participate in the covalent bonding and is very loosely bound.



ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΕΙΞΕΩΝ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΟ ΤΥΠΟΥ n ΣΕ ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ. ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΤΟΥ ΔΟΤΗ ΕΧΕΙ ΔΙΕΓΕΡΘΕΙ ΑΠΌ ΤΙΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΤΟΥ ΔΟΤΗ ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ



Ημιαγωγοί προσμειξεων

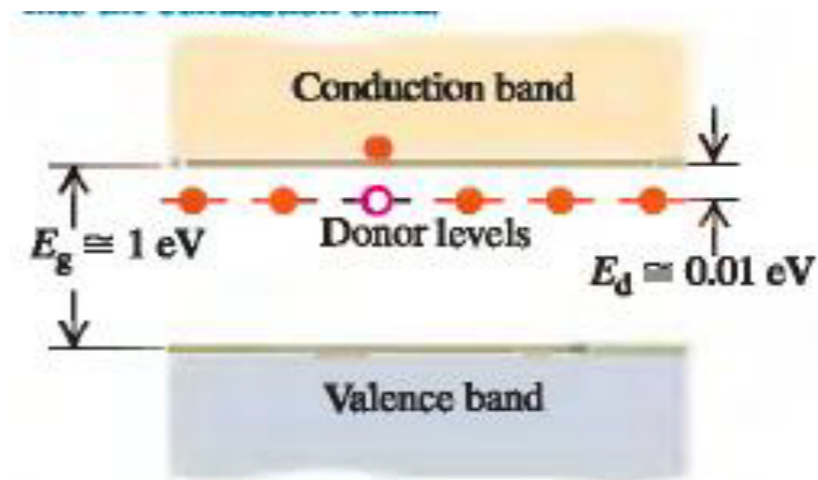
Η ενεργειακη σταθμη του πεμπτου ηλεκτρονιου σε ενεργειακο διαγραμμα απεικονιζεται ως μια σταθμη 0,01eV χαμηλοτερα απο την βαση της ζωνης αγωγιμοτητας.

Η σταθμη αυτη καλειται σταθμη δοτη και το ατομο προσμειξης καλειται δοτης.

(τα στοιχεια που εμφανιζονται με κιτρινο χρωμα στην μεθεπομενη διαφανεια μπορούν να χρησιμοποιηθουν ως δοτες).

Σε θερμοκρασια δωματιου η ποσοτητα $kT = 0,025$ eV, ενεργεια που ειναι σημαντικα μεγαλυτερη απο την 0,01 eV.

Επομενως, σε θερμοκρασια περιβαλλοντος τα περισσοτερα ηλεκτρονια της σταθμης των δοτων αποκτου ενεργεια αρκετη ωστε να μεταπηδησουν στην ζωνη αγωγιμοτητας και να συμβαλουν στην αγωγιμοτητα.



$$f(E) = \frac{1}{e^{3,87} + 1} = 0,0205$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{19,3} + 1} = 4,15 \times 10^{-9}$$

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΔΟΤΩΝ , ΔΗΛΑΔΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ , ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ 1 ΠΡΟΣ 10^8 ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΑΥΞΗΣΟΥΝ ΤΗΝ ΑΓΩΓΜΟΤΗΤΑ ΤΟΣΟ ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΩΣΤΕ ΝΑ ΘΕΩΡΕΙΤΑΙ Η ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΩΣ ΟΦΕΙΛΟΜΕΝΗ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ . ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΠΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΦΕΡΕΤΑΙ ΜΕ ΑΥΤΟΝ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΚΑΛΕΙΤΑΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΤΥΠΟΥ n .

Group 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
 Period

1	1 H 1.008																2 He 4.003	
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012										5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180	
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305										13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.078	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo

Lanthanoids	57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
Actinoids	89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)

ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΑΤΟΜΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΤΗΝ ΟΜΑΔΑ ΙΙΙ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΟΝΟ ΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΕΧΕΙ ΑΝΑΛΟΓΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.

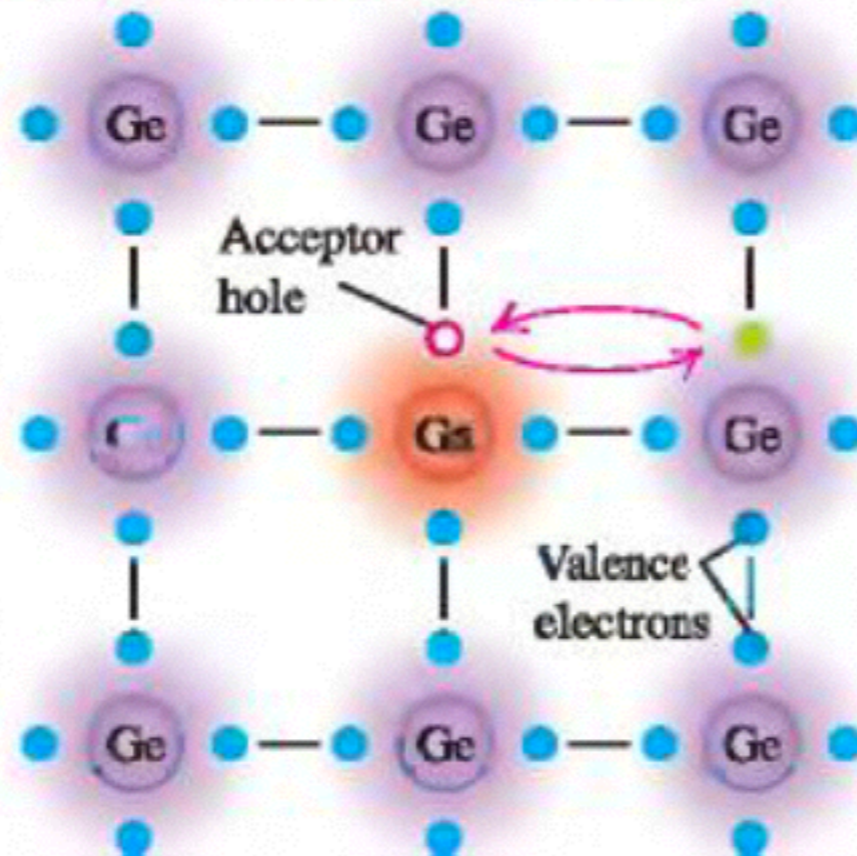
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period																		
1	1 H 1.008																	2 He 4.003
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
6	55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.217	78 Pt 195.078	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	118 Uuo

Lanthanoids	57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
Actinoids	89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)

ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΑΤΟΜΟΥ Ge ΜΕ ΕΝΑ ΑΤΟΜΟ Ga.

42.29 A *p*-type semiconductor.

(a) An acceptor (*p*-type) impurity atom has only three valence electrons, so it can borrow an electron from a neighboring atom. The resulting hole is free to move about the crystal.



Η διαμορφωθείσα κατάσταση έχει ως εξής:

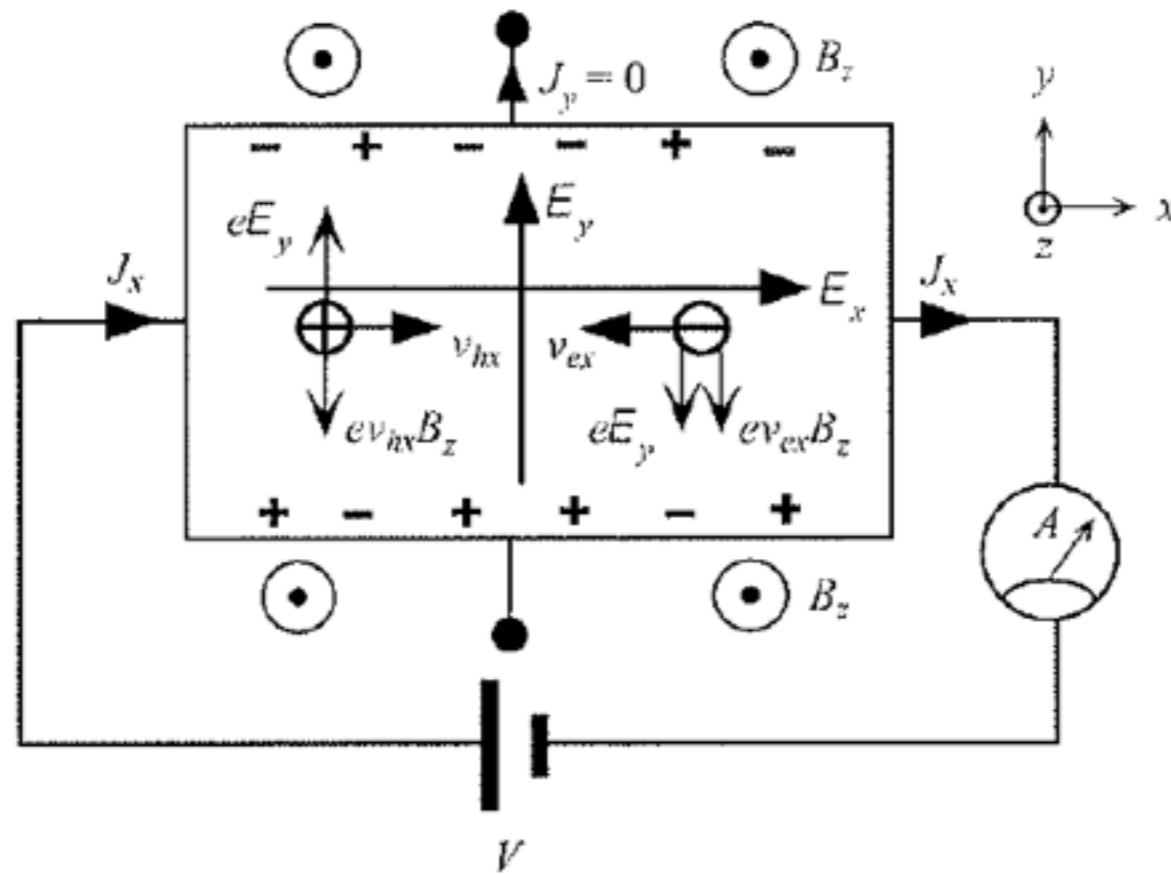
- Η μεταφορά ενός ηλεκτρονίου από το άτομο Ge στο άτομο Ga δημιουργεί μια οπή, η οποία έχει θετικό φορτίο, το οποίο μπορεί να κινείται στον κρυστάλλο.
- Το ηλεκτρόνιο που παγιδεύτηκε από το Ga δεσμεύεται σε μια στάθμη που καλείται **στάθμη αποδεκτη** και η οποία βρίσκεται 0,01 eV πάνω από την μέγιστη στάθμη της ζώνης σθένους.
- Το άτομο Ga καλείται **αποδεκτης**.
- Με την μεταβαση του ηλεκτρονίου από το Ge στο Ga, το τελευταίο γίνεται αρνητικό ιόν και δεν είναι ελεύθερο να κινείται.
- Η παρατηρούμενη αγωγιμότητα οφείλεται στην κίνηση **θετικών φορτίων (οπών)**.
- Το προκύπτον υλικό καλείται **ημιαγωγός τύπου p**.
- Υπάρχουν υλικά τα οποία είναι εμπλουτισμένα και με οπές και με δότες. Τέτοιοι ημιαγωγοί καλούνται **αντισταθμισμένοι ημιαγωγοί**.

Η ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΗ ΑΝ ΕΝΑΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΕΙΝΑΙ ΤΥΠΟΥ n Ή ΤΥΠΟΥ p ΓΙΝΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL. ΤΟ ΠΡΟΣΗΜΟ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ HALL ΕΙΝΑΙ:

ΓΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ n ΘΕΤΙΚΟ

ΚΑΙ ΓΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ p ΑΡΝΗΤΙΚΟ.

Όταν θέσουμε μαγνητικό πεδίο σε ένα αγώγιμο έλασμα που διαρρέεται από ρεύμα, τότε αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού σε διεύθυνση που είναι κάθετη στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως φαινόμενο Hall, το προξενεί η μονομερής απόκλιση των φορέων φορτίου, λόγω της αλληλεπίδρασης με το μαγνητικό πεδίο. Η σωστή ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων δίνει πληροφορίες για το πρόσημο του φορτίου των φορέων και για την πυκνότητα τους.



ΑΝ μ_e ΕΙΝΑΙ Η ΕΥΚΙΝΗΣΙΑ ΚΑΙ v_e Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ , ΤΟΤΕ ΙΣΧΥΕΙ Η ΣΧΕΣΗ

$$v_e = \mu_e E$$

ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

$$F_{net} = eE$$

ΠΟΥ ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ E .
ΕΠΤΟΜΕΝΩΣ

$$v_e = \frac{\mu_e}{e} F_{net}$$

ΠΑΡΟΜΟΙΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΥΝ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΕΣ

$$v_p = \mu_p E$$

$$v_p = \frac{\mu_p}{e} F_{net}$$

ΘΕΩΡΟΥΜΕ ΟΤΙ v_{ey} ΚΑΙ v_{py} ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΟΠΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ $-y$ ΚΑΙ $+y$ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ. ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΘΑ ΙΣΧΥΕΙ

$$J_y = J_n + J_e = epv_{ny} + env_{ey} = 0$$

ΕΠΟΜΕΝΩΣ, $pv_{ny} = -nv_{ey}$

ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΑΚΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΟΠΕΣ ΕΙΝΑΙ

$$F_{ny} = eE - ev_{nx}B_z$$

$$-F_{ey} = eE_y + ev_{ex}B_z$$

ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΟΤΙ

$$F_{ny} = \frac{ev_{ny}}{\mu_n} \quad -F_{ey} = \frac{ev_{ey}}{\mu_e}$$

ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΤΕΛΙΚΑ

$$\frac{v_{ny}}{\mu_n} = E_y - \mu_n E_x B_z$$

$$\frac{v_{ey}}{\mu_e} = E_y + \mu_e E_x B_z$$

ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΟΤΙ

$$p\mu_n E_y - p\mu_n^2 E_x B_z = -n\mu_e E_y - n\mu_e^2 E_x B_z$$

$$E_y(p\mu_n + n\mu_e) = B_z E_x (p\mu_n^2 - n\mu_e^2)$$

ΤΟ ΟΛΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ x ΕΙΝΑΙ

$$J_x = epv_{nx} + env_{ex} = (p\mu_n + n\mu_e)eE_x$$

ΑΝΤΙΚΑΘΙΣΤΩΝΤΑΣ ΤΟ E_x ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ

$$eE_y(p\mu_n + n\mu_e)^2 = B_z J_x (p\mu_n^2 - n\mu_e^2)$$

ΚΑΙ ΕΠΕΙΔΗ $R_H = \frac{E_y}{J_x B_x}$ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΤΕΛΙΚΑ

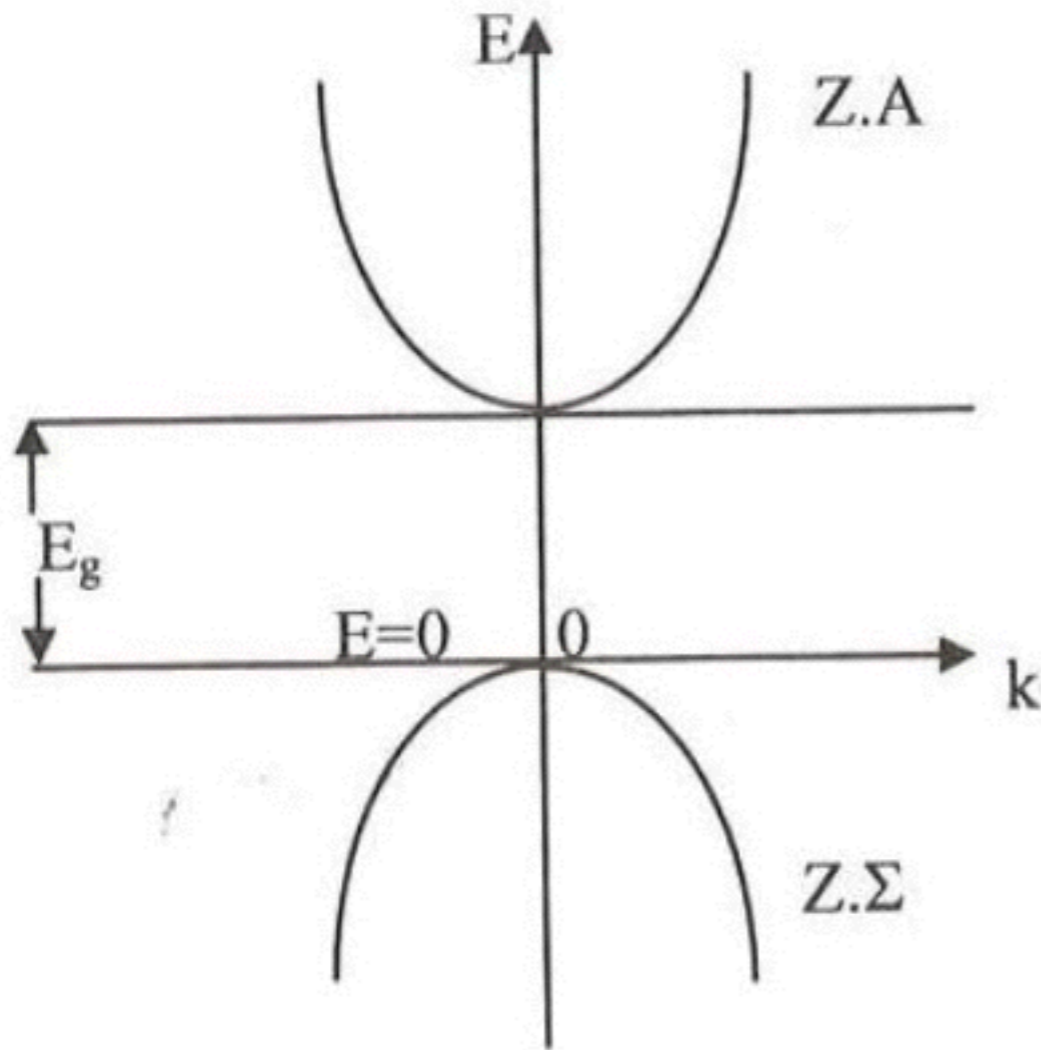
$$R_H = \frac{p\mu_n^2 - n\mu_e^2}{e(p\mu_n + n\mu_e)}$$

ΔΟΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ

ΕΝΑ ΣΤΕΡΕΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΕΤΑΙ ΩΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΟΤΑΝ Η ΑΝΩΤΕΡΗ ΚΑΤΕΙΛΗΜΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ) ΕΊΝΑΙ ΕΝΤΕΛΩΣ ΚΑΤΕΙΛΗΜΜΕΝΗ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ $T=0K$ ΑΛΛΑ Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΙΝΑΙ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΩΝ $2,0 \text{ eV}$.

ΔΟΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΣΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ

Η ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΗ ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ, ΑΠΟ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΟΤΙ:



$$E_c(\vec{k}) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}$$

$$E_v(\vec{k}) = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h}$$

m_e ΕΙ Η ΕΝΕΡΓΟΣ ΜΑΖΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΕΊΝΑΙ

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}}$$