

Κεφάλαιο 7. Στερεά

Εδάφια:

- 7.a. Οι δεσμοί στα στερεά
- 7.b. Η θεωρία των ενεργειακών ζωνών
- 7.c. Νόθευση ημιαγωγών και εφαρμογές
- 7.d. Υπεραγωγοί

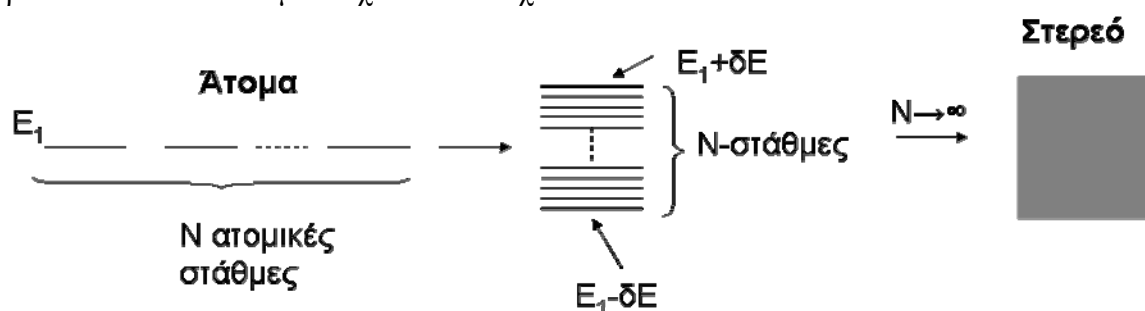
7.a. Οι δεσμοί στα στερεά

Με τον όρο **στερεό σώμα** εννοούμε έναν μεγάλο αριθμό ατόμων ή μορίων που συγκρατούνται μεταξύ τους. Τα άτομα αυτά μπορεί να είναι περιοδικά διατεταγμένα, οπότε έχουμε **κρυσταλλικό στερεό**, ή μη περιοδικά (τυχαία), οπότε έχουμε **άμορφο στερεό**.

Οι δεσμοί στα στερεά είναι ανάλογοι με τους δεσμούς στα μόρια. Η αλληλεπίδραση μεταξύ θετικών (από τους πυρήνες) και αρνητικών (από τα ηλεκτρόνια) φορτίων έχει ως αποτέλεσμα ένα δυναμικό παρόμοιας μορφής με αυτό του Σχ. 1 του προηγούμενου κεφαλαίου. Δεν θα εστιαστούμε εδώ όμως στην ταξινόμηση των στερεών ανάλογα με τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων τους, αλλά θα μελετήσουμε κβαντομηχανικά τη συμπεριφορά των ηλεκτρονίων των στερεών προσπαθώντας να ερμηνεύσουμε την αγωγιμότητά τους, η οποία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις από υλικό σε υλικό και "περίεργη" εξάρτησή από τη θερμοκρασία. (Υπενθυμίζουμε ότι η κλασική φυσική αποδίδει την αγωγιμότητα των μετάλλων σε κρούσεις των ηλεκτρονίων σθένους (τα οποία συμπεριφέρονται σαν να ήταν ελεύθερα) με τα ιόντα του μετάλλου. Η θεώρηση όμως αυτή οδηγεί σε τιμές αγωγιμότητας σ πολύ μικρότερες από τις πειραματικά μετρούμενες τιμές (ή, ισοδύναμα, σε τιμές ειδικής αντίστασης, $\rho=1/\sigma$, πολύ μεγαλύτερες από τις πειραματικές.)

7.b. Η θεωρία των ενεργειακών ζωνών

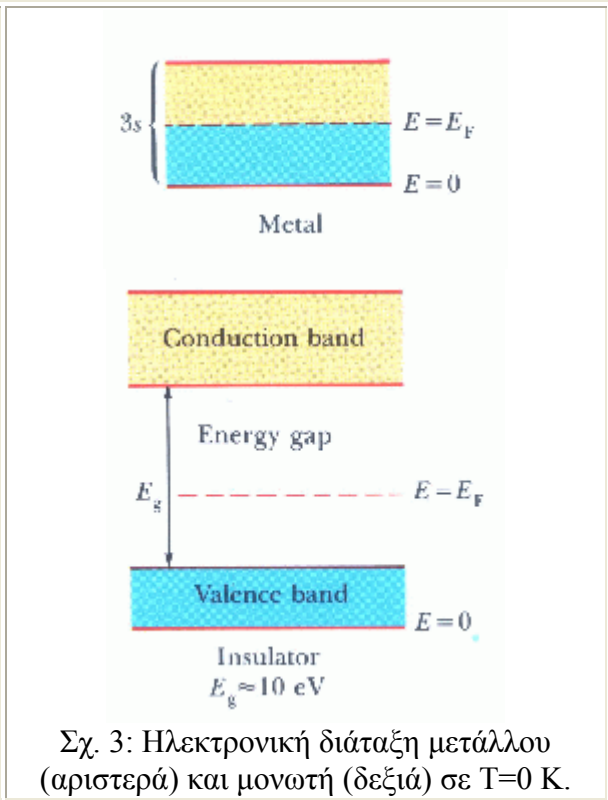
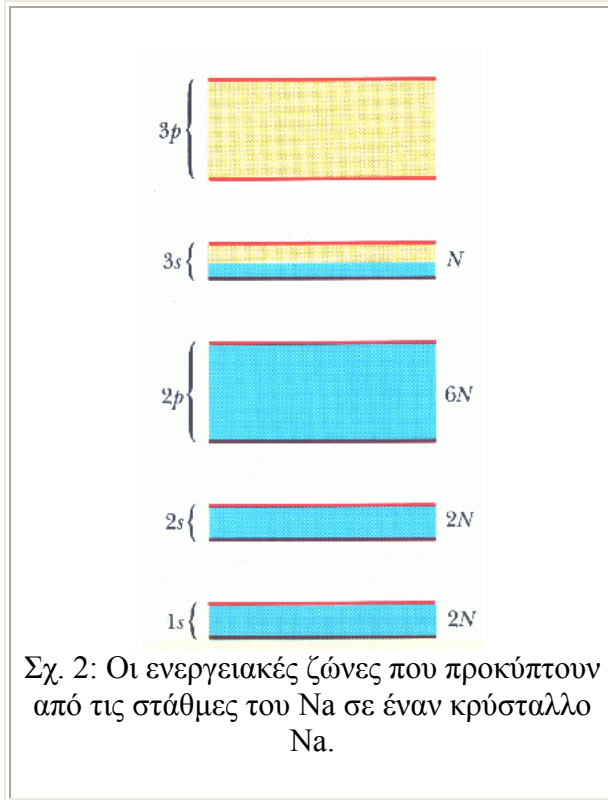
Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι όταν δύο άτομα έρχονται κοντά για να σχηματίσουν μόριο, οι ατομικές στάθμες τους αναδιατάσσονται και δίδουν τις στάθμες του μορίου (βλ. Σχ. 5 του προηγούμενου κεφαλαίου), λόγω της τροποποίησης του δυναμικού που δέχονται τα ηλεκτρόνια. Τι γίνεται τώρα όταν περισσότερα από δύο άτομα ($N > 2$) έρχονται κοντά για να σχηματίσουν το στερεό; Η εικόνα είναι ανάλογη με αυτήν που έχουμε στο σχηματισμό μορίου και το αποτέλεσμα δείχνεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1: Ο σχηματισμός μια ενεργειακής ζώνης στερεού από $N \rightarrow \infty$ άτομα που έρχονται κοντά για να σχηματίσουν το στερεό.

Από N ατομικές στάθμες προκύπτουν οι N στάθμες του στερεού, όπως δείχνεται στο Σχ. 1. Κάθε νέα ατομική στάθμη, E_1 , συνεισφέρει και μία στάθμη του στερεού, στο διάστημα $[E_1 -$

$\delta E, E_1 + \delta E]$, κάνοντας το φάσμα πυκνότερο (το εύρος $2\delta E$ είναι ανεξάρτητο από τον αριθμό των ατόμων που συνεισφέρουν και είναι τόσο μεγαλύτερο όσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα μεταπήδησης των ηλεκτρονίων από το ένα άτομο του στερεού στο άλλο). Έτσι, όταν $N \rightarrow \infty$, από κάθε ατομική στάθμη έχουμε μια “ενεργειακή ζώνη”, δηλαδή μια ζώνη επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων. Οι ζώνες αυτές για το Na δείχνονται στο Σχ. 2.



Οι ενεργειακές περιοχές μεταξύ των ενεργειακών ζωνών είναι απαγορευμένες για τα ηλεκτρόνια του στερεού και λέγονται **ενεργειακά χάσματα**.

Ανάλογα με το αν η τελευταία κατειλημμένη στάθμη των ατόμων που σχηματίζουν το στερεό είναι πλήρως κατειλημμένη ή μη πλήρως, η τελευταία ενεργειακή ζώνη θα είναι επίσης πλήρως ή μη πλήρως κατειλημμένη. Αν μια ζώνη είναι πλήρως κατειλημμένη, τα ηλεκτρόνιά της δεν μπορούν να συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα του υλικού - δεν μπορούν να πάρουν ενέργεια από εξωτερική πηγή ή ηλεκτρικό πεδίο και να κινηθούν, αφού δεν υπάρχουν για αυτά διαθέσιμες ενεργειακές καταστάσεις κοντά στις συμπληρωμένες. Έτσι, η αγωγιμότητα του κάθε υλικού (ηλεκτρική και θερμική) οφείλεται μόνο στα ηλεκτρόνια της τελευταίας ζώνης, αν αυτή δεν είναι πλήρως κατειλημμένη. Η τελευταία αυτή μη πλήρως κατειλημμένη ζώνη λέγεται **ζώνη αγωγιμότητας** και τα ηλεκτρόνιά της ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Η αμέσως χαμηλότερη, πλήρως κατειλημμένη ζώνη, λέγεται **ζώνη σθένους**.

Η κβαντομηχανική μελέτη της κίνησης των ηλεκτρονίων στο στερεό μας λέει ότι τα ηλεκτρόνια σθένους κινούνται μέσα στον όγκο του στερεού σαν να ήταν ελεύθερα, **χωρίς να συγκρούονται με τα ιόντα** (λόγω της κυματικής συμπεριφοράς τους).

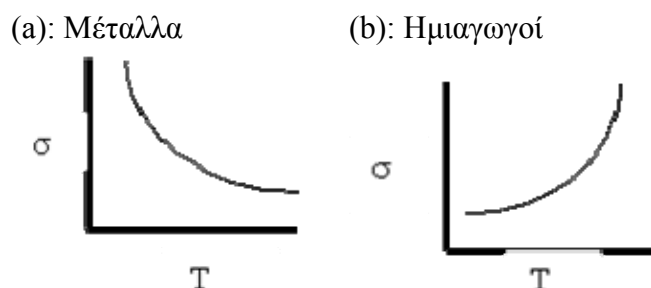
Η ενέργεια της τελευταίας κατειλημμένης κατάστασης στο στερεό λέγεται **ενέργεια Fermi** του στερεού (υπολογίζεται θεωρώντας ότι τα ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου του στερεού

κινούνται σε ολόκληρο τον κρύσταλλο σαν να ήταν ελεύθερα - μετρίεται από το κάτω όριο της τελευταίας κατειλημμένης ζώνης - τυπικές τιμές της είναι ~ 5 eV).

Ανάλογα με το αν η τελευταία ενεργειακή ζώνη τους είναι πλήρως κατειλημμένη ή μη πλήρως, τα στερεά υλικά διακρίνονται σε μονωτές, αγωγούς (μέταλλα) και ημιαγωγούς.

Αγωγοί (μέταλλα): Στους αγωγούς (μέταλλα) η τελευταία ζώνη δεν είναι πλήρως κατειλημμένη (βλ. Σχ. 3 - αριστερά). Έτσι, τα ηλεκτρόνια της, ειδικά αυτά που βρίσκονται κοντά στην ενέργεια Fermi, με μια πολύ μικρή θερμοκρασιακή διέγερση ή εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να κινηθούν, έχοντας ως αποτέλεσμα το υλικό να είναι αγωγίμο.

Αφού, όπως είπαμε προηγουμένως, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας δεν συγκρούονται με τα περιοδικά διατεταγμένα ιόντα του κρυστάλλου, σε ένα μέταλλο θα περιμέναμε μηδενική αντίσταση στην κίνηση των ηλεκτρονίων και άρα άπειρη αγωγιμότητα, πράγμα που δεν συμβαίνει, ειδικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Γιατί; Ο λόγος είναι ότι τα ηλεκτρόνια, ενώ δεν συγκρούονται με τα ιόντα του κρυστάλλου, συγκρούονται με τις κρυσταλλικές ατέλειες (προσμίξεις, δομικές ατέλειες) και με τις ταλαντώσεις των ιόντων, δηλαδή με οτιδήποτε αποτελεί απόκλιση από την περιοδικότητα (σκεφθείτε την κυματοσυνάρτηση ενός ηλεκτρονίου σε ένα σύστημα N ισοβαθών πηγαδιών και σε ένα πανομοιότυπο σύστημα με ένα από τα N πηγάδια βαθύτερο). Αυτό που συνεισφέρει δηλαδή στην αντίσταση του μετάλλου είναι οι ατέλειες και οι ιοντικές ταλαντώσεις. Αφού οι ιοντικές ταλαντώσεις αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας, η ειδική αντίσταση των μετάλλων θα αυξάνεται επίσης με τη θερμοκρασία και άρα η αγωγιμότητα θα ελαττώνεται. Η τυπική εξάρτηση της αγωγιμότητας μετάλλων από τη θερμοκρασία δείχνεται στο Σχ. 4(a)



Σχ. 4: Η εξάρτηση από τη θερμοκρασία της αγωγιμότητας των μετάλλων (a) και των ημιαγωγών (b).

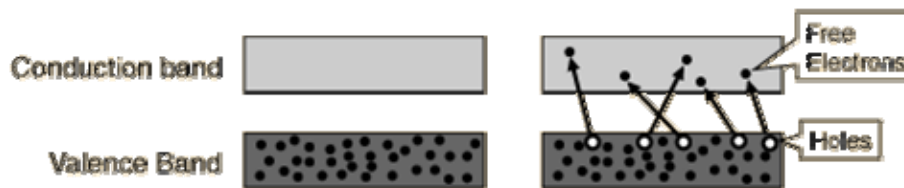
Μονωτές: Στους μονωτές η ηλεκτρονική διάταξη είναι αυτή που δείχνεται στο Σχ. 3 - δεξιά: Δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και η ζώνη σθένους είναι πλήρως κατειλημμένη και με μεγάλη απόσταση από τη ζώνη αγωγιμότητας (της τάξης των 10 eV, άρα είναι δύσκολο με θερμική διέγερση ή με μέτρια ηλεκτρικά πεδία να μεταφερθούν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας). Έτσι, τα υλικά αυτά συμπεριφέρονται ως κακοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού.

Ημιαγωγοί: Εκτός από τους μονωτές και τους αγωγούς υπάρχει και μια ενδιάμεση κατηγορία υλικών, με σημαντικές τεχνολογικές εφαρμογές, οι **ημιαγωγοί** (δείτε και την ιστοσελίδα <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/semcn.html> από την οποία είναι και κάποιες από τις παρακάτω εικόνες). Η ηλεκτρονική διάταξη των ημιαγωγών είναι όμοια με εκείνη των μονωτών, με διαφορά ότι το χάσμα εδώ είναι πολύ μικρότερο (0.5-3 eV). Έτσι,

ενώ σε $T=0$ K οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται ως μονωτές, σε συνηθισμένες θερμοκρασίες αρκετά ηλεκτρόνια έχουν μεταφερθεί στη ζώνη αγωγιμότητας και το υλικό έχει γίνει αγώγιμο.

Όσον αφορά την εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία, αυτή έχει τη μορφή που δείχνεται στο Σχ. 4(b). Αντίθετα με τα μέταλλα, εδώ έχουμε αύξηση της αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία, αφού αυξάνονται τα ηλεκτρόνια που μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας και άρα που συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα.

Ένα άλλο ενδιαφέρον φαινόμενο στους ημιαγωγούς είναι ότι όταν ηλεκτρόνια μεταπηδούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας οι κενές θέσεις που αφήνουν, τις οποίες ονομάζουμε **οπές**, μπορούν να καταλαμβάνονται από γειτονικά ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους και να συνεισφέρουν έτσι στην αγωγιμότητα του υλικού (βλ. Σχ. 5). Έτσι, εδώ, έχουμε αγωγιμότητα και στη ζώνη σθένους. Για την περιγραφή της αγωγιμότητας αυτής βολεύει να μην χρησιμοποιούμε την κίνηση των ηλεκτρονίων που καταλαμβάνουν τις οπές αλλά την κίνηση των ίδιων των οπών (ως αποτέλεσμα της μετακίνησης ηλεκτρονίων). Οι οπές αλληλεπιδρούν με εξωτερικό πεδίο σαν να ήταν θετικά φορτισμένα ηλεκτρόνια. Λέμε λοιπόν ότι στους ημιαγωγούς έχουμε δύο ειδών φορείς αγωγιμότητας: Ελεύθερα ηλεκτρόνια (στη ζώνη αγωγιμότητας) και οπές (στη ζώνη σθένους). Σε έναν ημιαγωγό χωρίς προσμίξεις ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των οπών.



Σχ. 5: Η ηλεκτρονική διάταξη ημιαγωγού σε $T=0$ K (αριστερά) και σε $T>0$ K (δεξιά).

Παραδείγματα ημιαγωγών είναι το πυρίτιο, το γερμάνιο, κοκ.

7.c. Νόθευση ημιαγωγών και εφαρμογές

Σε έναν ημιαγωγό χωρίς προσμίξεις (ενδογενή ημιαγωγό) ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των οπών και η αγωγιμότητα σε μια ορισμένη θερμοκρασία είναι καθορισμένη. Υπάρχει η δυνατότητα όμως να μεταβάλλουμε την αγωγιμότητα αυτή κατά βούληση, και η δυνατότητα αυτή και οι συνακόλουθες εφαρμογές είναι η βάση της τεχνολογικής επανάστασης που έφεραν οι ημιαγωγοί.

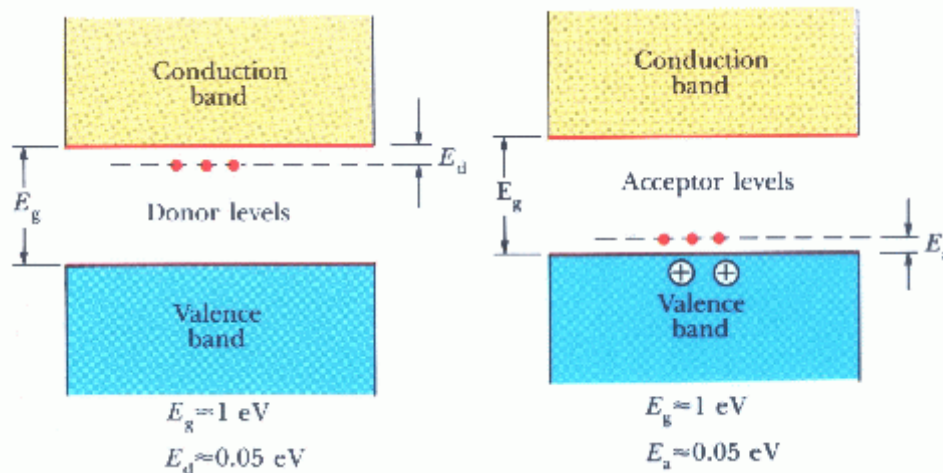
Ο τρόπος που χρησιμοποιούμε για να μεταβάλλουμε κατά βούληση την αγωγιμότητα των ημιαγωγών είναι η νόθευσή ή εμπλουτισμός τους (dopping) με ξένα άτομα. Υπάρχουν δύο τρόποι νόθευσης: Σε έναν ημιαγωγό από άτομα με A ηλεκτρόνια σθένους να προσθέσουμε ένα άτομο (ή περισσότερα) με

1. $A+1$ ηλεκτρόνια σθένους
2. $A-1$ ηλεκτρόνια σθένους

Στην περίπτωση (1) A ηλεκτρόνια του ημιαγωγού θα φτιάξουν ομοιοπολικούς δεσμούς με το ξένο άτομο (άτομο δότης) και μένει ένα "αδέσμευτο" ηλεκτρόνιο του δότη το οποίο έχει ενέργεια κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας (βλ. Σχ. 6 - αριστερά). (Ακριβέστερα, η προσθήκη

του ξένου ατόμου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ενεργειακής στάθμης μέσα στο χάσμα, κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας, την οποία καταλαμβάνει το "αδέσμευτο" ηλεκτρόνιο.) Το ηλεκτρόνιο αυτό, με μικρή θερμοκρασιακή διέγερση, μπορεί να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας και να γίνει ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας. Σε ημιαγωγούς με τέτοιου είδους εμπλουτισμό οι φορείς αγωγιμότητας είναι ηλεκτρόνια, άρα αρνητικοί, και οι ημιαγωγοί ονομάζονται τύπου n (negative).

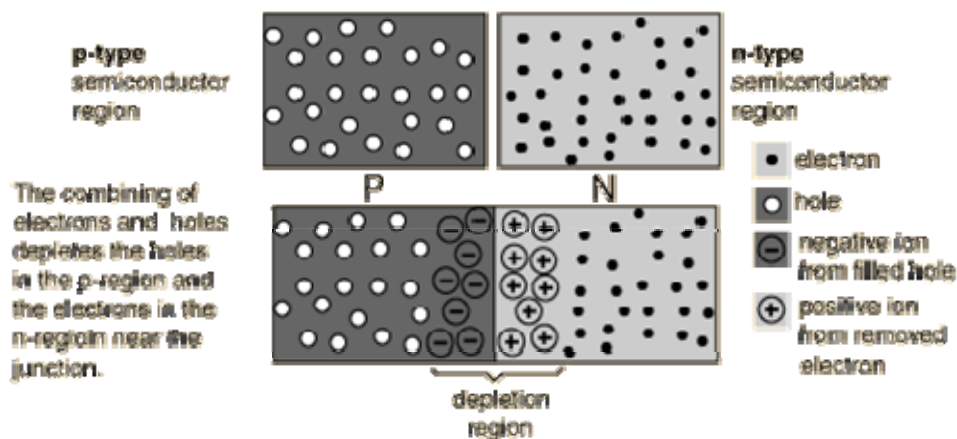
Στην περίπτωση (2) τα A-1 ηλεκτρόνια του ημιαγωγού θα φτιάξουν ομοιοπολικούς δεσμούς με το ξένο άτομο και μένει "αδέσμευτο" ένα ηλεκτρόνιο του ημιαγωγού, το οποίο έχει ενέργεια κοντά στη ζώνη σθένους (βλ. Σχ. 6 - δεξιά). Ακριβέστερα, η προσθήκη του ξένου ατόμου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ενεργειακής στάθμης μέσα στο χάσμα, κοντά στη ζώνη σθένους, την οποία καταλαμβάνει το "αδέσμευτο" ηλεκτρόνιο. Η ενεργειακή αυτή στάθμη μπορεί πολύ εύκολα να καταληφθεί και από άλλο ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους, αφήνοντας έτσι μια οπή στη ζώνη σθένους, η οποία μπορεί να συνεισφέρει στην αγωγιμότητα. Οι ημιαγωγοί που προκύπτουν από τέτοιου είδους εμπλουτισμό λέγονται τύπου p (positive) γιατί οι φορείς της αγωγιμότητας είναι κυρίως οπές.



Σχ. 6: Ηλεκτρονική διάταξη ημιαγωγού τύπου n (αριστερά) και τύπου p (δεξιά).

Τυπικές τιμές πυκνότητας εμπλουτισμού που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές είναι 10^9 - 10^{13} cm^{-3} . (Η τυπική πυκνότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων στα συνήθη μέταλλα είναι της τάξης $\sim 10^{24} \text{ cm}^{-3}$.)

Αν φέρουμε σε επαφή έναν ημιαγωγό τύπου p με ένα ημιαγωγό τύπου n η διάταξη που προκύπτει λέγεται **επαφή p-n** (Σχ. 7). Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της διάταξης είναι ότι είναι αγωγή μόνο κατά τη μία κατεύθυνση, άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, π.χ., ως ανορθωτής εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχ. 7: Ο σχηματισμός επαφής p-n. Η επαφή μπορεί να είναι αγωγική μόνο από αριστερά προς δεξιά.

Αν φέρουμε σε επαφή δύο ημιαγωγούς τύπου p (ή δύο ημιαγωγούς τύπου n) παρεμβάλλοντας μεταξύ τους ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγού τύπου n (ή p) τότε φτιάχνεται η διάταξη που λέγεται **κρυσταλλοτρίοδος επαφής** ή **transistor**. Η διάταξη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτής ασθενών ρευμάτων.

Σε διεπαφές ημιαγωγών, ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να μεταπηδήσουν στη ζώνη σθένους καταλαμβάνοντας οπές και εκπέμποντας φωτόνια, τα οποία φέρουν το περίσσειμα της ενέργειας. Μια τέτοια διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εκπομπός ακτινοβολίας.

Άσκηση: Περιγράψτε την επαφή p-n και εξηγήστε γιατί είναι αγωγική μόνο κατά τη μία κατεύθυνση. Τι είναι η περιοχή απογύμνωσης (depletion region) της επαφής (βλ. Σχ. 7); Τι λέμε ορθή πόλωση και τι ανάστροφη; (Συμβουλευτείτε το βιβλίο.)

7.d. Υπεραγωγοί

Μελέτες πάνω στην ειδική αντίσταση των μετάλλων σε χαμηλές θερμοκρασίες, οι οποίες ξεκίνησαν το 1911 από τον Onnes, έδειξαν ότι σε ορισμένα μέταλλα, κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία T_c (~4 K), η αντίσταση στη ροή συνεχούς ρεύματος πέφτει απότομα στο μηδέν (ενώ πάνω από T_c έχει την αναμενόμενη θερμοκρασιακή εξάρτηση). Τα υλικά αυτά ονομάστηκαν **υπεραγωγοί**.

Η μηδενική αντίσταση σε έναν υπεραγωγό έχει ως αποτέλεσμα, αν π.χ. ένας υπεραγωγός δακτύλιος διαρρέεται από ρεύμα, να διαρρέεται επ' άπειρον. Η έλλειψη αυτή αντίστασης κάνει τους υπεραγωγούς μοναδικούς για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις (λόγω απουσίας θερμικών απωλειών) και για τη δημιουργία μόνιμων μαγνητικών πεδίων.

Αξιοσημείωτες είναι και οι μαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών: Το μαγνητικό πεδίο μέσα σε έναν υπεραγωγό, στην υπεραγωγική κατάστασή του, είναι μηδέν (επάγονται επιφανειακά ρεύματα που ακυρώνουν τυχόν εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, με τον ίδιο τρόπο που σε έναν αγωγό επάγονται επιφανειακά φορτία που μηδενίζουν το ηλεκτρικό πεδίο εσωτερικά του αγωγού).

Η κρίσιμη θερμοκρασία, T_c , εξαρτάται από το υλικό του υπεραγωγού και από το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή γύρω από τον υπεραγωγό. Όσο μεγαλύτερο είναι το μαγνητικό πεδίο τόσο μικρότερη είναι η κρίσιμη θερμοκρασία. Το μαγνητικό πεδίο με το οποίο $T_c \rightarrow 0$ (το υλικό δεν μπορεί να γίνει υπεραγωγίσιμος) λέγεται κρίσιμο μαγνητικό πεδίο, B_c . Η υπεραγωγίσιμότητα δηλαδή καταστρέφεται από τη θερμοκρασία και το μαγνητικό πεδίο.

Οι τυπικοί υπεραγωγοί σήμερα διακρίνονται σε υπεραγωγούς τύπου I και τύπου II. Επίσης, σχετικά πρόσφατα ανακαλύφθηκαν υλικά που γίνονται υπεραγωγίσιμα σε αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες από τους τύπου I και τύπου II υπεραγωγούς ($T_c > 20$ K). Τα υλικά αυτά ονομάστηκαν υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών.

Υπεραγωγοί τύπου I: Στους υπεραγωγούς αυτούς υπάρχει μια κρίσιμη θερμοκρασία $T_c < 10$ K και ένα κρίσιμο μαγνητικό πεδίο $B_c < 0,2$ T. Για $T > T_c$ ή $B > B_c$ δεν υπάρχει υπεραγωγίσιμη κατάσταση. Τέτοιος υπεραγωγός είναι π.χ. το Nb.

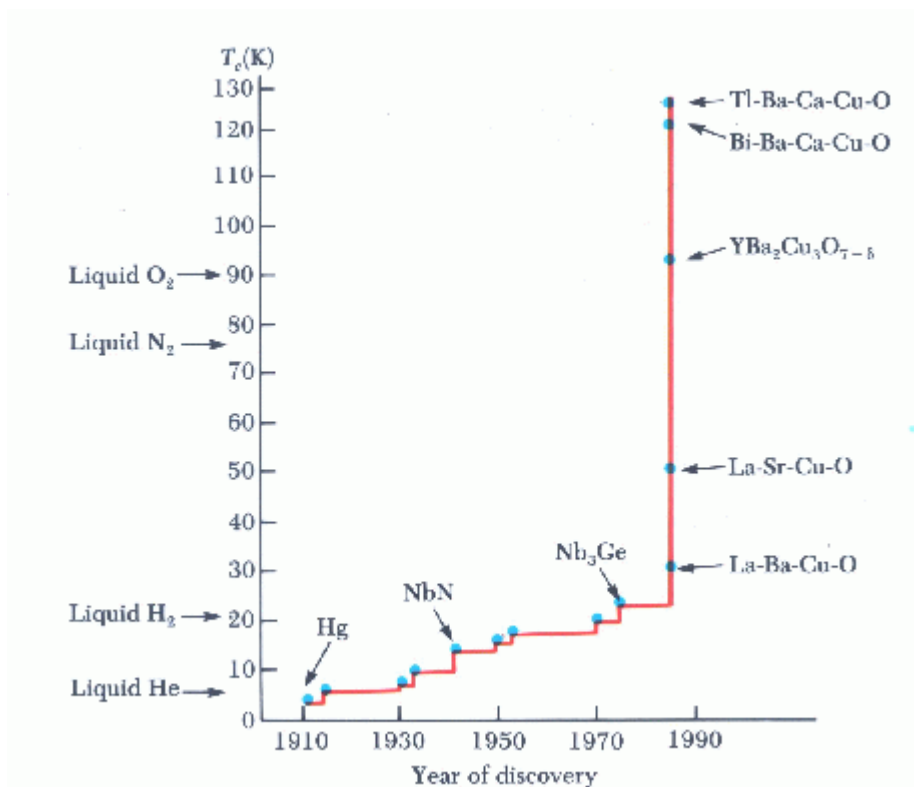
Υπεραγωγοί τύπου II: Εδώ υπάρχει μια κρίσιμη θερμοκρασία $T_c < 21$ K και δύο κρίσιμα μαγνητικά πεδία, B_{c1} και B_{c2} (< 45 T). Για $B < B_{c1}$ ο υπεραγωγός συμπεριφέρεται όπως υπεραγωγός τύπου I. Μεταξύ B_{c1} και B_{c2} ο υπεραγωγός βρίσκεται σε μια μικτή κατάσταση όπου η αντίστασή του είναι μηδέν αλλά το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο δεν αποβάλλεται από το εσωτερικό του. Παράδειγμα τέτοιου υπεραγωγού είναι το Nb_3AlGe (ο βέλτιστος μέχρι στιγμής).

Η ερμηνεία της αγωγιμότητας των υπεραγωγών τύπου I και II δόθηκε από τους Bardeen, Cooper και Shrieffer το 1957. Σύμφωνα με τη θεωρία των Bardeen, Cooper και Shrieffer, γνωστή ως **θεωρία BCS**, στην υπεραγωγίσιμη κατάσταση ενός υπεραγωγού τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με το πλέγμα των ιόντων σχηματίζοντας ζεύγη, γνωστά ως **ζεύγη Cooper** (σκεφτείτε ότι το ένα ηλεκτρόνιο του ζεύγους οδηγεί σε μια παραμόρφωση του πλέγματος γύρω από αυτό, άρα σε μια περίσσεια θετικού φορτίου, το οποίο έλκει το δεύτερο ηλεκτρόνιο). Το κάθε ζεύγος, όταν σχηματιστεί, έχει μηδενική ορμή στο σύστημα κέντρου μάζας και μηδενικό spin (άρα συμπεριφέρεται ως μποζόνιο), και ενέργειά χαμηλότερη από την ενέργεια των δύο ηλεκτρονίων χωριστά (σχηματίζεται μια νέα ενεργειακή στάθμη που χωρίζεται με χάσμα από την ενέργεια πριν τη "δέσμευση"). Όλα τα ζεύγη Cooper βρίσκονται στην ίδια ενεργειακή κατάσταση, αφού δεν υπακούουν πια στην απαγορευτική αρχή του Pauli, και εκτελούν συγχρονισμένη κίνηση χωρίς να συγκρούονται με τις ταλαντώσεις του πλέγματος.

Υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών: Το 1986, σε έρευνα πάνω στην αγωγιμότητα μεταλλικών οξειδίων, ανακαλύφθηκαν υπεραγωγίσιμα μεταλλικά οξείδια με T_c μέχρι και 100 K και B_c 50-100 T. Τα υλικά αυτά ονομάστηκαν υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών και αποτελούν τη νέα ελπίδα στην έρευνα των υπεραγωγών. (Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι για την ψύξη των υλικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλέον υγρό άζωτο (αντί για υγρό He), το οποίο είναι φθηνότερο και πιο εύκολα επιτεύξιμο.)

Η θεωρητική μελέτη των υπεραγωγών υψηλών θερμοκρασιών είναι υπό εξέλιξη, καθώς η θεωρία BCS στη σημερινή της μορφή δεν είναι απόλυτα επαρκής. Η θεωρητική αυτή μελέτη δίδει ελπίδες περαιτέρω αύξησης της T_c , η οποία έχει φθάσει σήμερα στους 125 K. Παράδειγμα τέτοιου υπεραγωγού είναι το Tl-Ba-Ca-Cu-O.

Μια σκιαγράφιση της πορείας της έρευνας πάνω στους υπεραγωγούς δίδεται στο Σχ. 8.



Σχ. 8: Η κρίσιμη θερμοκρασία διαφόρων υπεραγωγών και το έτος ανακάλυψής τους. Τα οριζόντια βέλη στον γ-άξονα δείχνουν το υλικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ψύξη του υπεραγωγού.