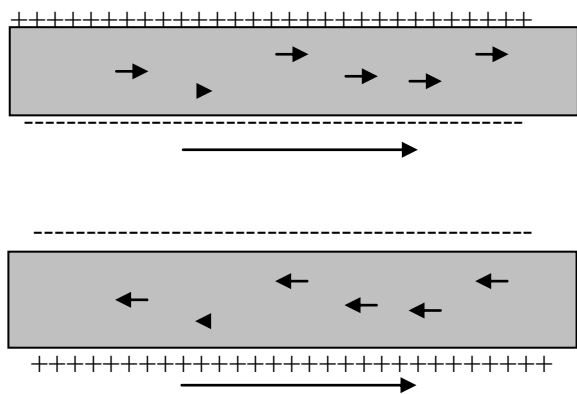


ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΕΡΙ ΑΓΩΓΩΝ -ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ- ΜΟΝΩΤΩΝ

Η ΘΕΩΡΙΑ ΖΩΝΩΝ

Στον ηλεκτρισμό διδάσκουμε στην Β/θμια, ότι η αγωγιμότητα των σωμάτων οφείλεται στους ελεύθερους φορείς ηλεκτρισμού που περιέχουν τα σώματα. Έτσι στα μέταλλα η αγωγιμότητα οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια, ενώ στους ηλεκτρολύτες στα θετικά και αρνητικά ιόντα. Επίσης αναφέρουμε ότι ανεξάρτητα το τι είδους φορείς κινούνται εμείς θεωρούμε ως φορά ρεύματος τη συμβατική φορά που είναι η φορά κίνησης θετικών φορτίων. Μπορούμε άραγε πειραματικά να διαπιστώσουμε σε τι είδους φορείς θετικούς ή αρνητικούς οφείλεται κάποιο ρεύμα;

Η απάντηση στο ανωτέρω ερώτημα είναι θετική. Μπορούμε πράγματι να βρούμε το είδος των φορέων σ' έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο Hall. Έστω ένας αγωγός ο οποίος διαρρέεται από θετικούς φορείς ηλεκτρισμού. Εφαρμόζουμε ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό. Τότε στους φορείς θα ασκηθεί δύναμη Laplace και έτσι στα άκρα του αγωγού θα δημιουργηθεί μια τάση $V=BUl$ με πολικότητα το θετικό πάνω και το αρνητικό κάτω όπως στο σχήμα. Αυτό ακριβώς είναι το φαινόμενο Hall. Αν τώρα υποθέσουμε ότι το ρεύμα οφείλεται σε κίνηση αρνητικών φορτίων. Τότε εφαρμόζοντας το μαγνητικό πεδίο με την ίδια φορά, θα δημιουργηθεί πολικότητα αντίθετη από ότι προηγουμένως.



Παρατηρούμε λοιπόν ότι με το φαινόμενο Hall έχουμε τη δυνατότητα να βρούμε το είδος των φορέων ηλεκτρισμού σ' έναν αγωγό. Αν κινούνται τόσο θετικοί όσο και αρνητικοί φορείς, τότε στα άκρα του αγωγού δεν δημιουργείται καμία τάση.

Τώρα είμαστε σε θέση να βρούμε πειραματικά το είδος των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος σε κάθε υλικό. Κάνοντας διάφορα πειράματα παρατηρούμε ότι υπάρχουν μέταλλα όπως το Βηρύλλιο, ο Ψευδάργυρος και το Κάδμιο που το είδος των φορέων είναι θετικό!! Έτσι αυτό που λέγαμε χρόνια στους μαθητές μας ότι η αγωγιμότητα στα μέταλλα οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια, καταρρέει στη στιγμή. Πρέπει λοιπόν να αναθεωρήσουμε τις απόψεις μας για τη δομή των μετάλλων.

Ας δούμε όμως τι λέει η θεωρία που διδάσκουμε στους μαθητές μας. Η θεωρία αυτή που λέγεται και θεωρία των ελευθέρων ηλεκτρονίων, λέει ότι από κάθε άτομο ενός μετάλλου φεύγει ένα ή δύο ηλεκτρόνια της τελευταίας στοιβάδας τα οποία κινούνται πλέον ελεύθερα σε

όλο τον όγκο του μετάλλου. Τα θετικά ιόντα που εναπομένουν μετά την διαφυγή των ηλεκτρονίων δεν παίζουν κανέναν ρόλο στην κίνηση άρα και στην αγωγιμότητα των μετάλλων. Τον μόνο ρόλο που παίζουν στη θεωρία των ελευθέρων ηλεκτρονίων είναι να ασκούν δυνάμεις στα ελεύθερα ηλεκτρόνια, όταν αυτά επιχειρήσουν να εγκαταλείψουν το μέταλλο. Δημιουργούν δηλαδή τα τοιχώματα μέσα στα οποία κινούνται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Έτσι αυτή η κατάσταση μοιάζει καταπληκτικά και έτσι την διαπραγματευόμαστε, σαν ένα δοχείο που περιέχει ένα αέριο. Γι αυτό και πολλές φορές μιλάμε για το αέριο των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Η θεωρία αυτή εκτός των άλλων αδυναμιών της δεν μπορεί να εξηγήσει γιατί όλα τα μέταλλα δεν παρουσιάζουν την ίδια αγωγιμότητα. Δεν μπορεί ακόμη να εξηγήσει τον συνεχή τρόπο με τον οποίο μεταβαίνουμε από τα μέταλλα στους μονωτές, όπως δείχνουν τα πειραματικά δεδομένα, αφού και οι μονωτές δεν παρουσιάζουν όλοι την ίδια διηλεκτρική σταθερά.

Σε μια πιο εξελιγμένη θεωρία, θα λάβουμε υπ' όψη μας και την παρουσία των πυρήνων. Τότε θα διαπιστώσουμε ότι καταλήγουμε σε πολύ διαφορετικά πράγματα από ότι στη θεωρία των ελευθέρων ηλεκτρονίων.

Εάν έχουμε έναν πυρήνα, τότε αυτός δημιουργεί ένα δυναμικό με αποτέλεσμα τα (e) βρίσκονται σε συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες, που η κάθε στάθμη χωράει συγκεκριμένο αριθμό (e). Αν πλησιάσουμε 2 πυρήνες αρκετά τόσο κοντά, ώστε να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους, τότε αποδεικνύεται ότι η κάθε ενεργειακή στάθμη σπάει σε δύο. Αν πλησιάσουμε ακόμη έναν πυρήνα, θα έχουμε το κάθε αρχικό ενεργειακό επίπεδο να χωρίζεται σε τρία και εάν τελικά έχουμε η πυρήνες, όπου $\eta \rightarrow \infty$ όπως στην περίπτωση ενός στερεού, τότε πλέον το κάθε ενεργειακό επίπεδο μετατρέπεται σε ενεργειακή ζώνη



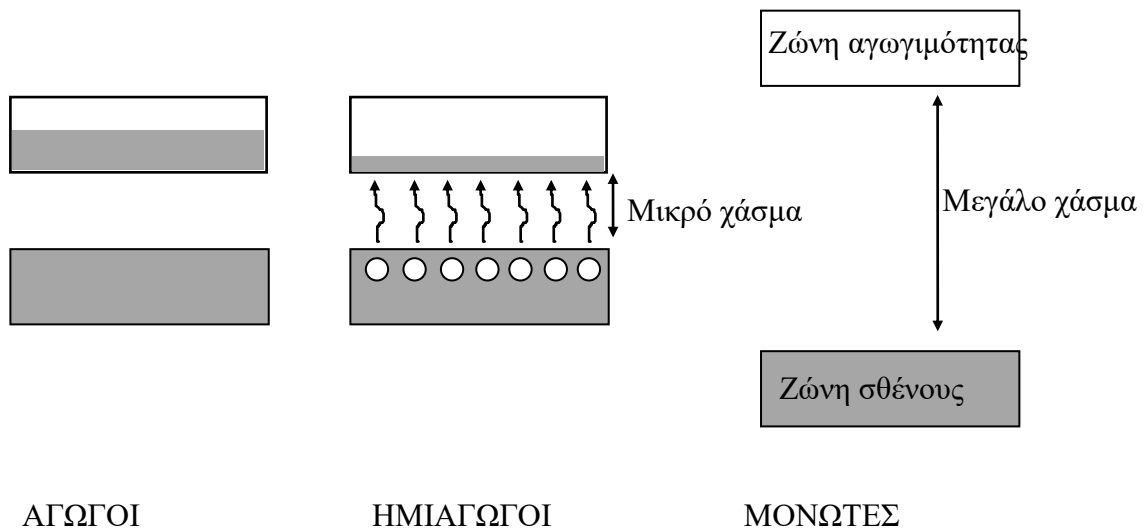
Η προτελευταία πλήρως συμπληρωμένη από (e) ζώνη, ονομάζεται ζώνη σθένους ενώ η τελευταία μερικώς συμπληρωμένη ζώνη, ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας. Τώρα διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

1. Η ζώνη αγωγιμότητας να είναι εντελώς άδεια, δηλαδή να μην περιέχει κανένα (e) Τότε το σώμα αυτό είναι μονωτής, γιατί τα (e) που βρίσκονται στη ζώνη σθένους έχουν καταλάβει όλες τις ενεργειακές θέσεις και έτσι δεν μπορούν να επιταχυνθούν, δηλαδή να αυξήσουν την κινητική τους ενέργεια υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Συμβαίνει δηλαδή το ίδιο πράγμα που συμβαίνει και σε ένα εντελώς γεμάτο λεωφορείο, στο οποίο δεν μπορεί να κινηθεί κανένας επιβάτης. Όπως οι επιβάτες γίνονται "παστές σαρδέλες" για να χρησιμοποιήσουμε την έκφραση που χρησιμοποιούμε σε ανάλογες περιπτώσεις, το ίδιο και τα (e) σ' αυτή τη κατάσταση είναι αδύνατον να κινηθούν.
2. Εάν η ζώνη αγωγιμότητας έχει ορισμένα (e), δηλαδή αν είναι μερικώς συμπληρωμένη. Τότε τα (e) αυτής της ζώνης μπορούν να επιταχυνθούν υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου, όπως οι επιβάτες ενός μισογεμάτου λεωφορείου μπορούν να κινηθούν μέσα σ' αυτό. Ένα τέτοιο σώμα είναι αγωγός.

3. Υπάρχει όμως και μια τρίτη περίπτωση. Έστω ότι ένα σώμα δεν έχει κανένα (e) στη ζώνη αγωγιμότητας, αλλά το ενεργειακό χάσμα μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας είναι τόσο μικρό, ώστε λόγω της θερμικής κίνησης των (e) στη θερμοκρασία που βρίσκεται το σώμα, να μπορούν ορισμένα (e) της ζώνης σθένους να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Τότε σ' αυτή τη θερμοκρασία το σώμα, λόγω των (e) της ζώνης σθένους που μεταπήδησαν στη ζώνη αγωγιμότητας, γίνεται αγωγός. Αλλά όχι μόνο λόγω αυτών των (e). Τα (e) που μεταπήδησαν στη ζώνη αγωγιμότητας θ' αφήσουν πίσω τους ορισμένες κενές "ενεργειακά" θέσεις (οπές). Έτσι τώρα τα (e) σθένους θα μπορούν να μετακινηθούν καταλαμβάνοντας διαδοχικά αυτές τις κενές θέσεις. Μια τέτοια μετακίνηση ισοδυναμεί με την αντίθετη κίνηση των κενών θέσεων. Δηλαδή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αντί για μετακίνηση ηλεκτρονίων, έχουμε αντίθετη μετακίνηση των οπών. Οι οπές συμπεριφέρονται σαν πραγματικά θετικά φορτισμένα σωματίδια. Η κατάσταση αυτή μοιάζει με την κατάσταση που επικρατεί σ' ένα διώροφο λεωφορείο που ο κάτω όροφος είναι εντελώς γεμάτος, ενώ ο πάνω εντελώς άδειος. Δεν μπορεί να μετακινηθεί κανένας επιβάτης. Εάν όμως μερικοί επιβάτες μπορέσουν και ανέβουν στον πάνω όροφο, τότε θα μπορούν να μετακινηθούν τόσο οι λιγότεροι επιβάτες του πάνω ορόφου, όσο και οι πολλοί επιβάτες του κάτω.

Έτσι διαπιστώνουμε ότι αν ένα σώμα είναι μονωτής αλλά το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας είναι αρκετά μικρό, τότε ζεσταίνοντας το σώμα, (ανοίγοντας τη πόρτα του πάνω ορόφου), γίνεται αγωγός. Η αγωγιμότητα του οφείλεται εξίσου στα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και στις οπές της ζώνης σθένους. Αυτά τα σώματα λέγονται ημιαγωγοί.

Στην περίπτωση των μετάλλων ψευδαργύρου, καδμίου, βηρυλλίου που προαναφέραμε, η ζώνη σθένους είναι αρκετά συμπληρωμένη, όχι όμως πλήρως, και έτσι η αγωγιμότητα οφείλεται στις οπές (δεν υπάρχουν (e) στη ζώνη αγωγιμότητας). Μ' άλλα λόγια ο πάνω όροφος του λεωφορείου είναι άδειος και ο κάτω όχι ασφυκτικά γεμάτος.



Για να καταλάβουμε καλύτερα την έννοια της οπής, μπορούμε να φανταστούμε το αντίστοιχο μηχανικό ανάλογο παράδειγμα. Εάν έχουμε μια βρύση που στάζει, τότε οι σταγόνες του νερού, λόγω της επίδρασης του βαρυντικού πεδίου, επιταχύνονται προς τα κάτω επιθυμώντας να καταλάβουν θέσεις με χαμηλότερη δυναμική ενέργεια. Αυτό αντιστοιχεί στην κίνηση των (e) της ζώνης αγωγιμότητας, που υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου κινούνται από τα χαμηλά δυναμικά στα υψηλά, ώστε ν' αποκτήσουν τελικά όσο το δυνατό μικρότερη δυναμική ενέργεια.

Έστω όμως ότι έχουμε ένα ποτήρι νερό. Τότε μια σταγόνα που βρίσκεται στην επιφάνεια δεν μπορεί να κινηθεί προς το πάτο του ποτηριού, αφού όλες οι ενδιάμεσες ενεργειακές θέσεις είναι ήδη κατειλημμένες. Αν όμως στον πάτο του ποτηριού δημιουργηθεί μια φυσαλίδα, τότε αυτή θα αρχίσει να κινείται προς τα πάνω, αντίθετα δηλαδή προς την κίνηση της σταγόνας. Στην πραγματικότητα βέβαια, αυτό που κινείται είναι το νερό, καταλαμβάνοντας διαρκώς τη θέση της φυσαλίδας, αφού το νερό προσπαθεί να καταλάβει τις όσο το δυνατό χαμηλότερες ενεργειακά στάθμες. Η πολύπλοκη όμως αυτή κίνηση του νερού, μπορεί εύκολα να περιγραφεί σαν την απλή κίνηση της φυσαλίδας. Όπως συμπεριφέρονται οι φυσαλίδες, έτσι συμπεριφέρονται και οι οπές υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Δηλαδή οι οπές κινούνται αντίθετα από τα (e) και συνεπώς συμπεριφέρονται σαν να έχουν θετικό φορτίο.

ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ P ΚΑΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ N

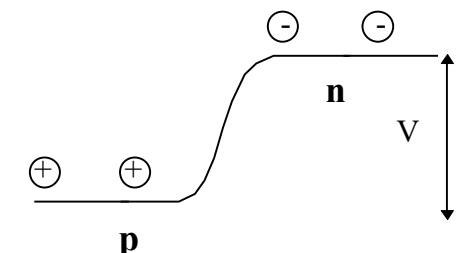
ΕΠΑΦΕΣ P-N

Από τα προηγούμενα καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι σ' έναν ημιαγωγό η αγωγιμότητα του οφείλεται, τόσο στα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας, όσο και στις οπές που αφήνουν πίσω τους στη ζώνη σθένους. Η συνεισφορά αυτών των δύο παραγόντων στην αγωγιμότητα του υλικού είναι η ίδια, αφού κάθε (e) που μεταπηδά στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνει πίσω του μια οπή. Μπορούμε όμως με μια τεχνική να φτιάξουμε ημιαγωγούς, που η αγωγιμότητά τους να οφείλεται αποκλειστικά στα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας, (τέτοιοι ημιαγωγοί λέγονται τύπου n "negatif") ή που η αγωγιμότητά τους να οφείλεται αποκλειστικά στις οπές της ζώνης σθένους (τέτοιοι ημιαγωγοί λέγονται τύπου p "pozitif"). Αυτό το πετυχαίνουμε ως εξής:

Παίρνουμε ένα καθαρό ημιαγωγό π.χ. Si στοιχείο της τέταρτης ομάδας του περιοδικού συστήματος, το λειώνουμε και το "μπολιάζουμε" (προσθέτουμε μικρή ποσότητα) με ένα πεντασθενές στοιχείο π.χ. τον P. Τότε τα 4 (e) του πεντασθενούς στοιχείου θα δημιουργήσουν 4 ομοιοπολικούς δεσμούς, το πέμπτο όμως θα μείνει ελεύθερο. Έτσι δημιουργούμε ένα πλεόνασμα ελευθέρων (e) τόσα όσα και τα άτομα του πεντασθενούς στοιχείου που μπολιάσαμε. Σ' έναν τέτοιο ημιαγωγό, η αγωγιμότητα με συντριπτική διαφορά θα οφείλεται στα ελεύθερα (e) της ζώνης αγωγιμότητας, παρά στις οπές. Έτσι φτιάχνουμε ένα ημιαγωγό τύπου (n). Μήπως μπορείτε να σκεφτείτε πώς μπορούμε να φτιάξουμε έναν ημιαγωγό τύπου (p);

Ενδιαφέρον είναι να δούμε τι συμβαίνει εάν ενώσουμε έναν ημιαγωγό τύπου n με έναν ημιαγωγό τύπου p, φτιάχνοντας μια επαφή p-n, ή μια κρυσταλλοδίοδο όπως αλλιώς λέγεται. Εάν πραγματοποιήσουμε μια επαφή p-n, τότε μερικά (e) λόγω διάχυσης θα περάσουν από την περιοχή (n) στην περιοχή (p) όπου θα εξουδετερώσουν αντίστοιχες οπές. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας τάσης ανάμεσα στις δύο περιοχές και λόγω αυτής, σταματούν πλέον τα (e) να μπαίνουν στην περιοχή (p).

Γύρω από την επαφή δημιουργείται μια περιοχή γυμνή από ηλεκτρικούς φορείς. Η επαφή λόγω αυτής της τάσης λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης.



Εάν τώρα εφαρμόσουμε μια εξωτερική τάση ίδιας πολικότητας με αυτή που είχε αναπτυχθεί, τότε το φράγμα που χωρίζει τους 2 φορείς (ελεύθερα e και οπές) αυξάνεται ακόμη πιο πολύ και έτσι το κύκλωμα δε διαρρέεται από ρεύμα. Εάν όμως εφαρμόσουμε μια αντίθετη τάση, τότε καταρρέει το φράγμα ανάμεσα στα ηλεκτρόνια και στις οπές των περιοχών (n) και (p) αντίστοιχα, και έτσι μπορούν πλέον να μπαίνουν ηλεκτρόνια της περιοχής (n) στη περιοχή (p), καθώς και οπές της περιοχής (p), στη περιοχή (n). Έτσι το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα. Συμπερασματικά λοιπόν διαπιστώνουμε, ότι μια επαφή p-n λειτουργεί σαν μια ηλεκτρονική βαλβίδα, που αφήνει να περνάει ρεύμα μόνο προς τη μια κατεύθυνση.

