

Στο τέλος
αυτού του κεφαλαίου
ο μαθητής πρέπει να:

- Ξεχωρίζει τους ημιαγωγούς από τους αγωγούς και τους μονωτές
- Γνωρίζει ότι στους ημιαγωγούς το ηλεκτρικό ρεύμα οφείλεται σε δύο είδη φορέων, τα ηλεκτρόνια και τις οπές
- Γνωρίζει την ύπαρξη ζωνών και συγκεκριμένα της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους
- Γνωρίζει την επίδραση του εμπλουτισμού με προσμίξεις στον τύπο αγωγιμότητας των ημιαγωγών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

2

2.1 Ενδογενείς ημιαγωγοί

2.1.1 Αγωγοί, Μονωτές, Ημιαγωγοί

Στην καθημερινή ζωή συνηθίζουμε να διαχωρίζουμε τα υλικά, σύμφωνα με τις ηλεκτρικές ιδιότητες τους, σε δύο κατηγορίες: σε αγωγούς και σε μονωτές. Επιπλέον δεχόμαστε ότι οι αγωγοί είναι τέλειοι και ότι οι μονωτές είναι επίσης τέλειοι. Αυτές οι παραδοχές είναι αρκετά καλές ώστε να καλύπτουν όλες τις απαιτήσεις των απλών ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Μεταξύ των καλών αγωγών και των καλών μονωτών υπάρχει και μια άλλη κατηγορία υλικών οι οποίοι δεν είναι καλοί αγωγοί και δεν είναι καλοί μονωτές. Τα υλικά αυτά ονομάζονται συμβατικά **ημιαγωγοί (semiconductors)**.

Οι ημιαγωγοί διαφέρουν από τους αγωγούς και τους μονωτές κατά δυο διαφορετικούς τρόπους:

α) Ο πρώτος αφορά το μέτρο της ειδικής αντίστασης του ημιαγωγού.

Στους **αγωγούς** και τους **μονωτές** η ειδική αντίσταση εξαρτάται μόνο από το υλικό και είναι περίπου $1 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ στους αγωγούς και $1 \times 10^{11} \Omega \text{m}$ στους μονωτές. Αντίθετα στους **ημιαγωγούς** η ειδική αντίσταση, για συγκεκριμένο υλικό όπως το πυρίτιο (Si) ή το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), μπορεί να κυμαίνεται σε ευρύτατα όρια από 1×10^{-6} έως $1 \times 10^6 \Omega \text{m}$ αντίστοιχα. Έτσι οι ημιαγωγοί δεν είναι καλοί αγωγοί αλλά επίσης δεν είναι ούτε καλοί μονωτές. Σ' αυτό οφείλουν το όνομα τους.

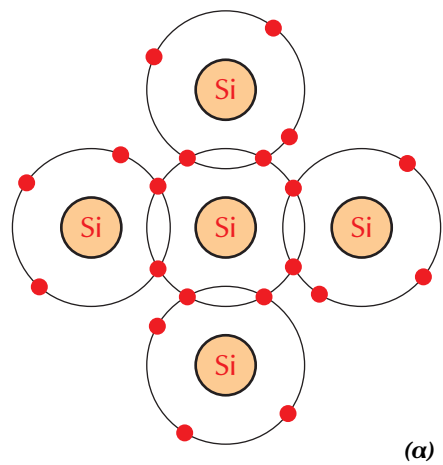
β) Ο δεύτερος αφορά τη σημαντική εξάρτηση της ειδικής αντίστασης των ημιαγωγών από τη θερμοκρασία η οποία οφείλεται αποκλειστικά, όπως θα δούμε παρακάτω, στον τρόπο με τον οποίο καθορίζεται η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στο υλικό. Έτσι για κοινές θερμοκρασίες λειτουργίας κυκλωμάτων, 0°C έως 80°C , οι ειδικές αντιστάσεις των αγωγών και μονωτών μεταβάλλονται ελάχιστα όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Στην περίπτωση των μετάλλων παρατηρείται αύξηση της ειδικής αντίστασης με τη θερμοκρασία. Αντίθετα η ειδική αντίσταση των ημιαγωγών μεταβάλλεται σημαντικά με τη θερμοκρασία και συγκεκριμένα ελαττώνεται εκθετικά.

Για να κατανοηθούν οι ηλεκτρικές ιδιότητες των αγωγών, των μονωτών και κυρίως των ημιαγωγών θα πρέπει να εξετασθεί η δομή των ατόμων τους και οι δεσμοί τους με τα γειτονικά άτομα.

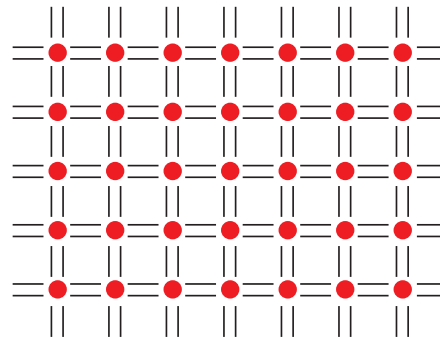
Οι πλέον κοινοί ημιαγωγοί είναι το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge). Αυτά τα δύο στοιχεία βρίσκονται στην τέταρτη στήλη του περιοδικού πίνακα και έχουν αρκετές ιδιότητες που είναι κοινές με εκείνες του άνθρακα. Έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα και κάθε ένα από αυτά τα ηλεκτρόνια συνδέεται με ένα ηλεκτρόνιο από κάθε κοντινό γειτονικό άτομο, δηλαδή σχηματίζουν τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς. Έτσι κάθε άτομο αποκτά οκτώ ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα που επιτρέπει το σχηματισμό σταθερών δεσμών και το σχηματισμό κρυστάλλων στους οποίους τα άτομα βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις.

Στο σχήμα 2.1.1α απεικονίζεται η δημιουργία των ομοιοπολικών δεσμών πυριτίου ή γερμανίου με τη συνεισφορά των ηλεκτρονίων της εξωτερικής στοιβάδας ενώ στο σχήμα 2.1.1β απεικονίζεται, σε δυο διαστάσεις, η δομή κρυστάλλου τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι με αντίστοιχο τρόπο δημιουργούνται οι δύο γνωστές κρυσταλλικές δομές του άνθρακα, ο γραφίτης και το διαμάντι.

Όταν τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας δεν μπορούν να απομακρυνθούν από τα άτομα δεν θα υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στο υλικό και συνεπώς δεν είναι δυνατή και η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό. Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση το υλικό συμπεριφέρεται σαν μονωτής.



(α)



(β)

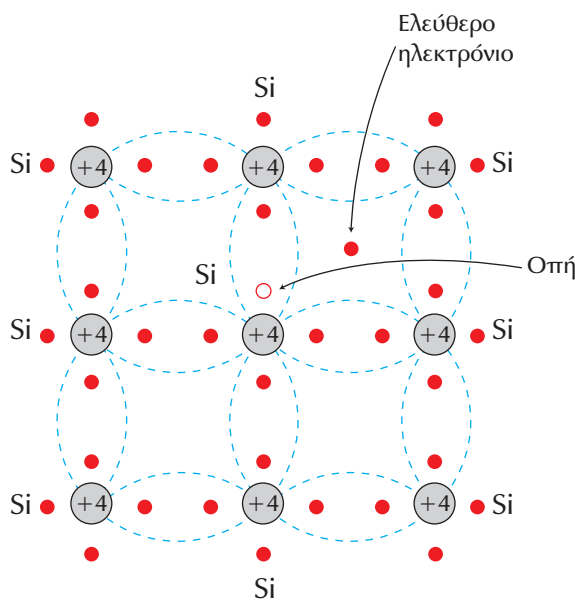
Σχήμα 2.1.1

(α) Η δημιουργία των τεσσάρων ομοιοπολικών δεσμών με συνεισφορά ηλεκτρονίων και (β) αναπαράσταση του κρυστάλλου πυριτίου ή γερμανίου

Στο πυρίτιο και το γερμάνιο, λόγω μεγέθους των ατόμων, η σύνδεση των ηλεκτρονίων της εξωτερικής στοιβάδας με το άτομο είναι χαλαρότερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε θερμοκρασία δωματίου, κάποια από τα ηλεκτρόνια να απομακρυνθούν με θερμικό τρόπο από τα άτομα (βλέπε σχ. 2.1.2) και να κινηθούν ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο του ημιαγωγού μέχρις ότου να συναντήσουν κάποιο άλλο άτομο από το οποίο λείπει ένα ηλεκτρόνιο.

Η κίνηση που εκτελούν αυτά τα ηλεκτρόνια είναι εντελώς τυχαία με αποτέλεσμα το μέσο ηλεκτρικό ρεύμα μέσα στον ημιαγωγό να είναι μηδέν. Αν στον ημιαγωγό εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, με τη βοήθεια μιας εξωτερικής ηλεκτρικής πηγής, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια θα κινηθούν υπό την επίδραση του πεδίου με αποτέλεσμα να διέλθει μέσα από τον ημιαγωγό ένα ηλεκτρικό ρεύμα.

Το μητρικό άτομο που έχει χάσει, λόγω θερμικής διέγερσης, ένα ηλεκτρόνιο παύει να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και αποκτά θετικό φορτίο. Επειδή το άτομο αυτό δεν μπορεί να μετακινηθεί, το έλλειμμα του αρνητικού φορτίου μπορεί να αντισταθμιστεί με "δανεισμό" ενός ηλεκτρονίου από ένα γειτονικό άτομο, το οποίο στη συνέχεια θα αποκτήσει θετικό φορτίο. Αυτό μπορεί να επαναληφθεί στη συνέχεια με ένα άλλο γειτονικό άτομο κ.ο.κ.



Σχήμα 2.1.2

Αναπαράσταση ενός ηλεκτρονίου σθένους που έχει απομακρυνθεί και μπορεί να κινηθεί ελεύθερα

Σε ένα ομογενές υλικό όλα τα άτομα και τα ηλεκτρόνια είναι ίδια και όπως προαναφέρθηκε το έλλειμμα ηλεκτρονίου, δηλαδή το θετικό φορτίο, μετακινείται με τυχαίο τρόπο, όπως τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτό το "ελεύθερα" κινούμενο θετικό φορτίο ονομάζεται **οπή (hole)**.

Η κίνηση μιας οπής θα διακοπεί όταν "επανασυνδεθεί" με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και αλληλοεξουδετερωθούν. Αυτή η "επανασύνδεση είναι η δέ-

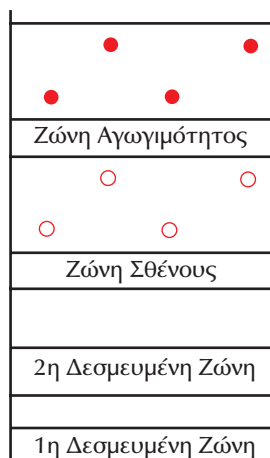
σμευση του ελευθέρου ηλεκτρονίου από ένα άτομο το οποίο έχει έλλειμμα ηλεκτρονίου. Όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο, η σπή θα κινηθεί με κατεύθυνση αντίθετη από εκείνη του ηλεκτρονίου. Έτσι σε ένα **καθαρό** ημιαγωγό, του οποίου όλα τα άτομα είναι ίδια, το ηλεκτρικό ρεύμα που το διαρρέει, και μετράται με τη βοήθεια ενός αμπερομέτρου, έχει δύο συνιστώσες: ενός ρεύματος ηλεκτρονίων και ενός ρεύματος οπών. Επιπλέον σε ένα **καθαρό** ημιαγωγό ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των ελεύθερων οπών. Ένας τέτοιος ημιαγωγός ονομάζεται **ενδογενής ημιαγωγός** (intrinsic semiconductor).

Σε έναν ημιαγωγό η συγκέντρωση (αριθμός/κυβικό εκατοστό) των ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών δεν αυξάνεται συνεχώς λόγω θερμικής διέγερσης. Ο μηχανισμός επανασύνδεσης, που είναι ανάλογος των συγκεντρώσεων τους, οδηγεί σε μια κατάσταση ισορροπίας όπου οι ρυθμοί γένεσης και επανασύνδεσης εξισώνονται. Αυτή η διαδικασία καθορίζει τις συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών σε ένα καθαρό ημιαγωγό σε κάθε θερμοκρασία και κατ' επέκταση την αγωγιμότητα και ειδική αντίσταση του σε κάθε θερμοκρασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε έναν καθαρό ημιαγωγό η αντίσταση ελαττώνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία.

2.1.2 Ενεργειακές ζώνες ημιαγωγών

Η ποσοτική ερμηνεία των ηλεκτρικών, οπτικών και οπτοηλεκτρονικών ιδιοτήτων των ημιαγωγών μπορεί να γίνει μόνο με τη βοήθεια της θεωρίας των "**ενεργειακών ζωνών**" (energy bands). Γενικότερα οι ενεργειακές ζώνες μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε καλύτερα το μηχανισμό που καθορίζει αν ένα υλικό θα είναι μονωτής, ημιαγωγός ή μέταλλο. Οι ενεργειακές ζώνες ορίζουν τις επιτρεπόμενες στάθμες, οι οποίες μπορούν να καταληφθούν από ηλεκτρόνια σε ένα κρυσταλλικό ή ακόμα και άμορφο υλικό.

Για να γίνει κατανοητή η έννοια των ενεργειακών ζωνών, χωρίς τη χρήση της κβαντικής φυσικής, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι σε ένα απομονωμένο άτομο τα ηλεκτρόνια κατανέμονται στις διάφορες στιβάδες, δηλαδή κάθε ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε μία εντελώς καθορισμένη ενεργειακή στάθμη. Σε ένα σύστημα πολλών ατόμων, όπως ένας κρύσταλλος ημιαγωγού ή άλλου υλικού, η αλληλεπίδραση που προκύπτει από τη μικρή απόσταση μεταξύ των ατόμων και τη συνεισφορά κάθε ατόμου με ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια για τη δημιουργία των χημικών δεσμών έχει ως αποτέλεσμα τη διαπλά-



Σχήμα 2.1.3
 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ενός υλικού

τυνση των ενεργειακών στιβάδων και τη μετατροπή τους σε ενεργειακές ζώνες.

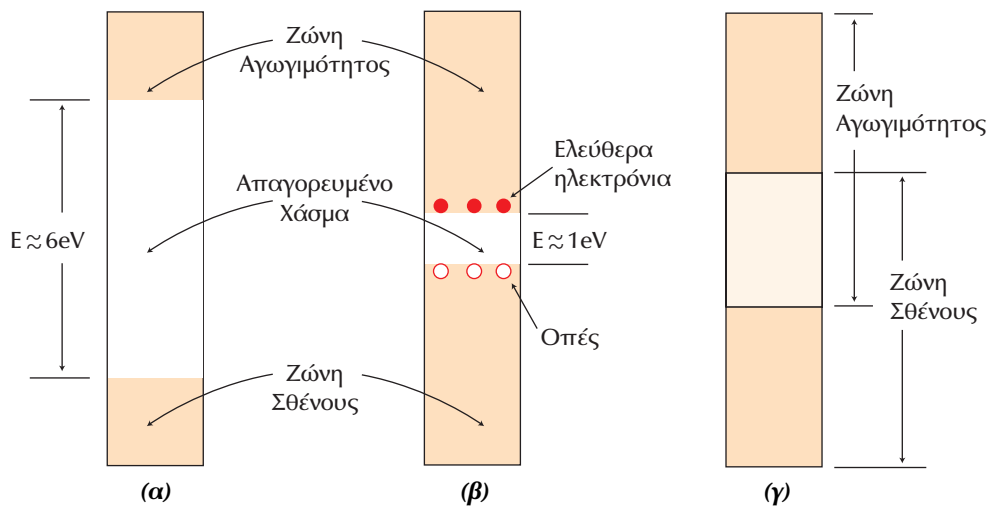
Είναι γνωστό ότι σε ένα άτομο ο αριθμός των στοιβάδων είναι μεγάλος. Ο αριθμός των στιβάδων που είναι πλήρως ή μερικά κατειλημμένος από ηλεκτρόνια εξαρτάται από τον αριθμό των πρωτονίων του πυρήνα του ατόμου. Επίσης είναι γνωστό ότι η κατάληψη των στιβάδων με ηλεκτρόνια αρχίζει από αυτές που βρίσκονται πλησιέστερα στον πυρήνα, δηλαδή αυτές που έχουν χαμηλότερη ενέργεια. Αντίστοιχα σε ένα κρυσταλλικό υλικό οι χαμηλότερες ενεργειακές ζώνες είναι πλήρως κατειλημμένες με ηλεκτρόνια. Σε μία τέτοια ζώνη ένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να κινηθεί διότι όλες οι δυνατές θέσεις είναι κατειλημμένες. Ένα ηλεκτρόνιο θα μπορεί να κινηθεί μόνο όταν υπάρχουν ελεύθερες θέσεις σε

μία ενεργειακή ζώνη, δηλαδή μόνο όταν μέρος της είναι κατειλημμένο με ηλεκτρόνια. Οι ενεργειακές ζώνες οι οποίες ενεργειακά βρίσκονται υψηλότερα από εκείνη των ηλεκτρονίων σθένους είναι κενές.

Όπως σε ένα μεμονωμένο άτομο μεταξύ των στιβάδων υπάρχουν τα **ενεργειακά χάσματα** έτσι και μεταξύ των ενεργειακών ζωνών υπάρχουν τα αντίστοιχα ενεργειακά χάσματα (band gaps) ή **απαγορευμένες ζώνες** (forbidden bands), στα οποία δεν υπάρχουν επιτρεπόμενες θέσεις για ηλεκτρόνια (βλ. σχ.2.1.3). Συνεπώς τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν θέσεις μόνο στις ενεργειακές ζώνες και με ενεργειακά άλματα μεταβαίνουν από μία ζώνη σε άλλη, πράγμα που γίνεται με απορρόφηση ενέργειας για να μεταβούν σε μία υψηλότερη ή με εκπομπή ενέργειας για να μεταβούν σε μια χαμηλότερη, εφόσον εκεί υπάρχουν ελεύθερες θέσεις. Η ενέργεια αυτή μπορεί να είναι θερμική ή να αντιστοιχεί σε φωτόνιο, όπως π.χ. στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και τη φωτοαγωγιμότητα όταν απορροφάται ενέργεια ή κατά την εκπομπή φωτός στις διόδους LED.

Από όλες τις ενεργειακές ζώνες σε ένα υλικό, δύο παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αυτή που αντιστοιχεί στη στιβάδα των ηλεκτρονίων σθένους και ονομάζεται **ζώνη σθένους (valence band)** και η αμέσως επόμενη, η οποία αντιστοιχεί σε υψηλότερη ενέργεια, και ονομάζεται **ζώνη αγωγιμότητας (conduction band)**. Το εύρος κάθε ενεργειακού χάσματος, το οποίο με-

τράται σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και το ποσοστό κατάληψης της ζώνης αγωγιμότητας καθορίζονται από το υλικό. Με βάση τις ενεργειακές ζώνες και τα χάσματα ενέργειας είναι δυνατός ο επανακαθορισμός των όρων μονωτής, ημιαγωγός και μέταλλο.



Σχήμα 2.1.4

Ενεργειακές ζώνες σε ένα (α) μονωτή, (β) ημιαγωγό και (γ) μέταλλο

Στην περίπτωση ενός μονωτή όπως το διαμάντι, βλέπε σχ.2.1.4α, η ζώνη σθένους είναι πλήρως κατειλημμένη και το εύρος του ενεργειακού χάσματος μεταξύ ζώνης σθένους και αγωγιμότητας είναι μεγάλο (6 eV). Έτσι δεν είναι δυνατή η θερμική διέγερση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και το υλικό είναι μη αγωγίμο, δηλαδή μονωτής.

Στην περίπτωση ενός ημιαγωγού όπως το πυρίτιο, βλέπε σχ.2.1.4β, το εύρος του ενεργειακού χάσματος μεταξύ ζώνης σθένους και αγωγιμότητας δεν είναι μεγάλο (1.2 eV). Σ' αυτή την περίπτωση είναι δυνατή η θερμική διέγερση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και το υλικό είναι μερικά αγωγίμο, δηλαδή ημιαγωγός.

Στην περίπτωση ενός μετάλλου, βλέπε σχ.2.1.4γ, το εύρος του ενεργειακού χάσματος μεταξύ ζώνης σθένους και αγωγιμότητας είναι μηδενικό, δηλαδή υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των ζωνών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη πολύ μεγάλου αριθμού ελεύθερων ηλεκτρονίων και διαθέσιμων ελεύθερων θέσεων στη ζώνη αγωγιμότητας, γεγονός που καθιστά το υλικό πολύ αγωγίμο, δηλαδή μέταλλο.

2.2 Ημιαγωγοί προσμίξεων

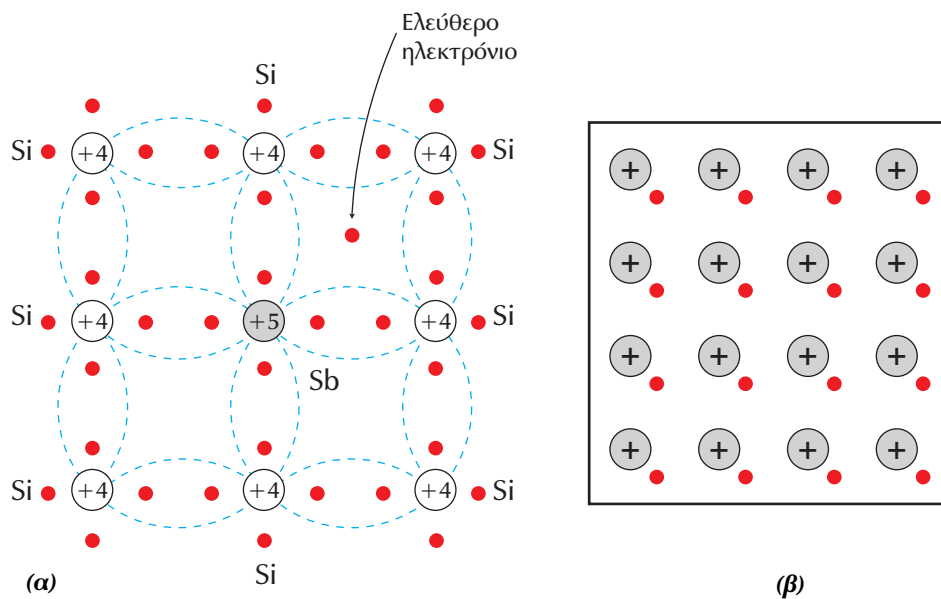
Οι ενδογενείς ημιαγωγοί έχουν ίσες συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών, γι' αυτό το λόγο οι εφαρμογές τους είναι περιορισμένες και καθορίζονται από το ότι η αντίστασή τους μεταβάλλεται πολύ έντονα όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ή όταν φωτίζονται. Αν σε έναν ενδογενή ημιαγωγό προστεθεί μια πολύ μικρή ποσότητα ενός στοιχείου της τρίτης ή της πέμπτης ομάδας του περιοδικού πίνακα, ο ημιαγωγός αποκτά **προσμίξεις** (impurities). Η διαδικασία προσθήκης προσμίξεων ονομάζεται **εμπλουτισμός** (doping) και το υλικό **εμπλουτισμένος ημιαγωγός** (doped semiconductor). Σε ένα τέτοιο ημιαγωγό όπου οι προσμίξεις καθορίζουν τις συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών, ο ημιαγωγός παύει να είναι ενδογενής. Επειδή οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών καθορίζονται πλέον από έναν εξωγενή παράγοντα, δηλαδή τις προσμίξεις, ο ημιαγωγός ονομάζεται και **εξωγενής ημιαγωγός** (extrinsic semiconductor). Το είδος των προσμίξεων που θα χρησιμοποιηθεί θα καθορίσει αν η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη των οπών ή αντίθετα. Στην πρώτη περίπτωση ο ημιαγωγός καλείται **τύπου N** και στη δεύτερη **τύπου P**, από το γεγονός ότι τα φορτία που άγουν τη ηλεκτρικό ρεύμα είναι ηλεκτρόνια, δηλ. αρνητικά (Negative) ή οπές δηλ. θετικά (Positive), αντίστοιχα.

Σε ένα τέτοιο ημιαγωγό οι προσμίξεις καταλαμβάνουν θέσεις των ατόμων του υλικού και σχηματίζουν δεσμούς

2.2.1 Ημιαγωγοί τύπου N

Οι ημιαγωγοί **τύπου N** δημιουργούνται όταν σε ένα ημιαγωγό όπως το πυρίτιο ή το γερμάνιο προστεθεί πολύ μικρή ποσότητα ενός στοιχείου της πέμπτης ομάδας του περιοδικού πίνακα. Τα στοιχεία που συνήθως χρησιμοποιούνται ως προσμίξεις είναι το **αρσενικό**, ο **φωσφόρος** και το **αντιμόνιο** ενώ η ποσότητα που απαιτείται είναι της τάξης των μερικών μερών στο εκατομμύριο, δηλαδή σε κάθε ένα εκατομμύριο άτομα πυριτίου ή γερμανίου υπάρχουν μερικά άτομα αρσενικού ή φωσφόρου.

Τα άτομα της πρόσμιξης ενσωματώνονται στην κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού, καταλαμβάνουν θέσεις των ατόμων του και σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά άτομα. Επειδή τα άτομα της πέμπτης ομάδας του περιοδικού πίνακα έχουν πέντε ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους, όταν καταλάβουν μία θέση σε ένα άτομο του ημιαγωγού θα χρησιμοποιήσουν τα τέσσερα για

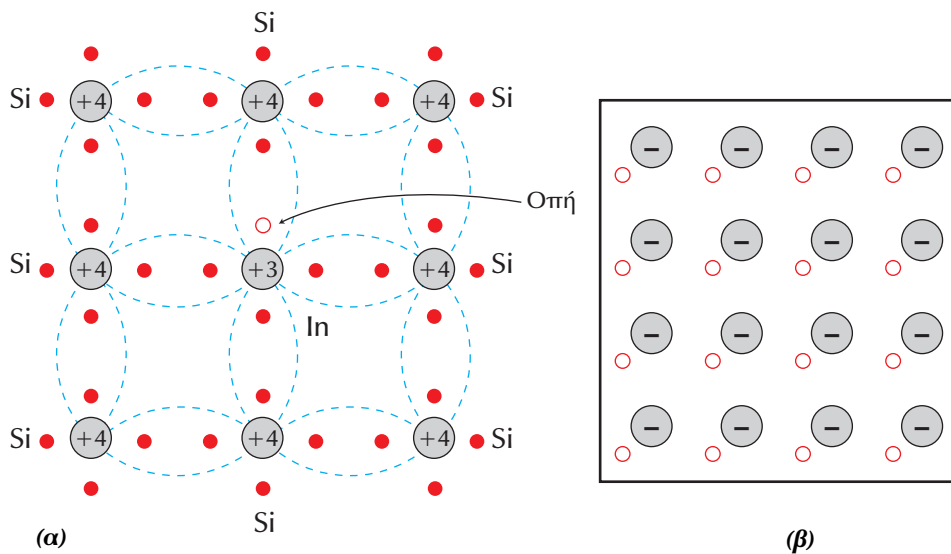


Σχήμα 2.2.1

Κρυσταλλικό πλέγμα γερμανίου όπου ένα άτομο έχει αντικατασταθεί με ένα άτομο αντιμονίου. (α) Δομή δεσμών (β) Μακροσκοπική μορφή

το σχηματισμό ομοιοπολικών δεσμών και θα παραμείνει αδιάθετο ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο θα περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα της πρόσμιξης. Το ηλεκτρόνιο αυτό μπορεί, σε θερμοκρασία δωματίου, να απομακρυνθεί πολύ πιο εύκολα από ότι ένα ηλεκτρόνιο στον ενδογενή ημιαγωγό (βλέπε σχ.2.2.1).

Επειδή το πεντασθενές στοιχείο πρόσμιξης "δίνει" στον ημιαγωγό ηλεκτρόνια, ονομάζεται **δότης** (donor). Στη συνέχεια το άτομο της πρόσμιξης ιονίζεται και αποκτά θετικό φορτίο. Επειδή η απομάκρυνση του ηλεκτρονίου από το δότη είναι πολύ πιο εύκολη από ότι από ένα άτομο του ημιαγωγού, ο "δανεισμός" ενός ηλεκτρονίου από κάποιο γειτονικό άτομο θα είναι δύσκολος. Επιπλέον η πιθανότητα να βρίσκεται κοντά ένας άλλος δότης που θα μπορούσε εύκολα να "δανείσει" ένα ηλεκτρόνιο είναι αμελητέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το θετικό φορτίο να παραμένει ακίνητο στο δότη και στον ημιαγωγό να κινούνται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Βέβαια, η απομάκρυνση ηλεκτρονίων από τα άτομα του ημιαγωγού δεν πρέπει να αποκλεισθεί αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός τους είναι πολύ μικρός σε σχέση με τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προέρχονται από τους δότες. Έτσι η προσθήκη δοτών έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια και πολύ λίγες σπές στον ημιαγωγό.



Σχήμα 2.2.2

Κρυσταλλικό πλέγμα γερμανίου όπου ένα άτομο έχει αντικατασταθεί με ένα άτομο ινδίου. (α) Δομή δεσμών (β) Μακροσκοπική μορφή

Συνεπώς, σε ένα ημιαγωγό τύπου N το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται κυρίως από ένα είδος φορτίων, τα ηλεκτρόνια, τα οποία ονομάζονται και φορείς **πλειονότητας** ή **πλειοψηφίας** (majority carriers). Αντίθετα οι οπές στους ημιαγωγούς τύπου N ονομάζονται φορείς **μειονότητας** ή **μειοψηφίας** (minority carriers). Τέλος, η αύξηση της συγκέντρωσης των δοτών σε ένα ημιαγωγό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων και συνεπώς της αγωγιμότητας του.

2.2.2 Ημιαγωγοί τύπου P

Οι ημιαγωγοί **τύπου P** δημιουργούνται όταν σε ένα ημιαγωγό όπως, το πυρίτιο ή το γερμάνιο, προστεθεί πολύ μικρή ποσότητα ενός στοιχείου της τρίτης ομάδας του περιοδικού πίνακα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται συνήθως ως προσμίξεις είναι το **βόριο**, το **γάλλιο** και το **ίνδιο** ενώ η ποσότητα που απαιτείται είναι, όπως και στους ημιαγωγούς τύπου N, της τάξης των μερικών μερών στο εκατομμύριο.

Τα άτομα της πρόσμιξης καταλαμβάνουν θέσεις των ατόμων του ημιαγωγού. Επειδή τα άτομα της τρίτης ομάδας του περιοδικού πίνακα έχουν τρία ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους, όταν καταλάβουν μία θέση ενός ατόμου του

ημιαγωγού, θα χρησιμοποιήσουν όλα τα ηλεκτρόνια σθένους για το σχηματισμό ομοιοπολικών δεσμών. Έτσι θα παραμείνει ένα γειτονικό άτομο του ημιαγωγού, το οποίο θα απαιτεί ένα ηλεκτρόνιο για να σχηματίσει την πλήρη δομή των οκτώ ηλεκτρονίων στην εξωτερική στιβάδα του. Το απαιτούμενο ηλεκτρόνιο αυτό θα το "δανειστεί" από κάποιο γειτονικό άτομο του ημιαγωγού. Το ηλεκτρόνιο που θα καταλάβει, με αυτό τον τρόπο, την κενή θέση θα ιονίσει με αρνητικό φορτίο το άτομο της τρίτης ομάδας του περιοδικού πίνακα. Η διαδικασία αυτή αντιστοιχεί με την "απελευθέρωση" μιας οπής και επειδή τα άτομα αυτά αποδέχονται ένα ηλεκτρόνιο ονομάζονται **αποδέκτες** (acceptors) (βλέπε σχ.2.2.2).

Η δομή των δεσμών ενός αποδέκτη κάνει πολύ πιο εύκολη την απελευθέρωση μιας οπής από ότι μπορεί να συμβεί σε ένα άτομο του ημιαγωγού σε θερμοκρασία δωματίου. Το ηλεκτρόνιο που έχει καλύψει το έλλειμμα του δεσμού παραμένει ακίνητο στον αποδέκτη. Όπως συμβαίνει στους ημιαγωγούς τύπου N έτσι και στους ημιαγωγούς τύπου P υπάρχουν και ελεύθερα ηλεκτρόνια, των οποίων όμως η συγκέντρωση είναι πολύ μικρότερη από αυτή των οπών. Έτσι η προσθήκη αποδεκτών έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές οπές και πολύ λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια στον ημιαγωγό.

Σε ένα ημιαγωγό τύπου P οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές, ενώ οι φορείς μειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια. Τέλος, η αύξηση της συγκέντρωσης των αποδεκτών σε ένα ημιαγωγό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των οπών και συνεπώς της αγωγιμότητας του.

Μια σημαντική διαφορά που υπάρχει μεταξύ των εξωγενών και των ενδογενών ημιαγωγών, είναι η σταθερή τιμή της ειδικής αντίστασης σε μια ευρεία περιοχή θερμοκρασιών. Αυτό προκύπτει από την ευκολία με την οποία παρέχουν φορείς οι δότες ή οι αποδέκτες σε ημιαγωγό τύπου N ή τύπου P αντίστοιχα. Τέλος, δε θα πρέπει να παραλειφθεί η ύπαρξη των **οργανικών ημιαγωγών** οι οποίοι προς το παρόν δεν έχουν εφαρμογές παρά μόνο σε πειραματικό στάδιο, όπως ορισμένα πολυμερή τα οποία φθορίζουν, όταν εφαρμοστεί τάση στα άκρα τους και το χρώμα τους εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό τους.

Εκτός των οργανικών ημιαγωγών, υπάρχουν και οι **άμορφοι ημιαγωγοί**, όπως το **άμορφο πυρίτιο** που χρησιμοποιείται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων σε αριθμομηχανές και σε άλλες εφαρμογές χαμηλής καταπόνησης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 2

- Σε κάθε υλικό τα ηλεκτρόνια κατανέμονται στις **ενεργειακές ζώνες**, οι οποίες διαχωρίζονται από τα ενεργειακά χάσματα.
- Η αγωγιμότητα κάθε υλικού καθορίζεται από το εύρος του **ενεργειακού χάσματος** μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας.
- Με τη βοήθεια της θεωρίας των ενεργειακών ζωνών είναι δυνατή η κατανόηση του διαχωρισμού των υλικών σε **αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές**.
- Στους ημιαγωγούς το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται με δύο είδη φορέων, τα **ηλεκτρόνια** και τις **οπές**.
- Οι ημιαγωγοί χωρίζονται σε **εξωγενείς** και **ενδογενείς** ανάλογα με το αν περιέχουν προσμίξεις ή όχι.
- Οι προσμίξεις χωρίζονται σε δύο είδη, τους **δότες**, οι οποίοι αυξάνουν τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και **αποδέκτες**, οι οποίοι αυξάνουν τη συγκέντρωση των οπών.
- Οι ημιαγωγοί που έχουν προσμίξεις δοτών, ονομάζονται **τύπου N**, ενώ αυτοί οι οποίοι έχουν προσμίξεις αποδεκτών, **τύπου P**.
- Πέραν των κρυσταλλικών ημιαγωγών υπάρχουν και άλλοι, όπως οι **άμορφοι** και οι **οργανικοί**.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ – ΑΣΚΗΣΕΙΣ 2

1. Ποια στοιχεία πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για να μετατρέψουμε ενδογενές πυρίτιο σε τύπου N;
 - α. τύπου N
 - β. τύπου P
 - γ. ενδογενής
 - δ. εξωγενής
2. Ποια στοιχεία πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για να μετατρέψουμε ενδογενές γερμάνιο σε τύπου P;
 - α. τύπου N
 - β. τύπου P
 - γ. ενδογενής
 - δ. εξωγενής
3. Ποιοί είναι οι φορείς πλειονότητας σε ένα ημιαγωγό τύπου N;
4. Ποιοί είναι οι φορείς μειονότητας σε ένα ημιαγωγό τύπου N;
5. Σε πυρίτιο προστίθεται πολύ μικρή ποσότητα γαλλίου. Ο ημιαγωγός ο οποίος θα προκύψει θα είναι:
 - α. τύπου N
 - β. τύπου P
 - γ. ενδογενής
 - δ. εξωγενής
6. Σε γερμάνιο προστίθεται πολύ μικρή ποσότητα φωσφόρου. Ο ημιαγωγός ο οποίος θα προκύψει θα είναι:
 - α. τύπου N
 - β. τύπου P
 - γ. ενδογενής
 - δ. εξωγενής
7. Σε πυρίτιο προστίθεται πολύ μικρή ποσότητα γερμανίου. Ο ημιαγωγός ο οποίος θα προκύψει θα είναι:
 - α. τύπου N
 - β. τύπου P
 - γ. ενδογενής
 - δ. εξωγενής