

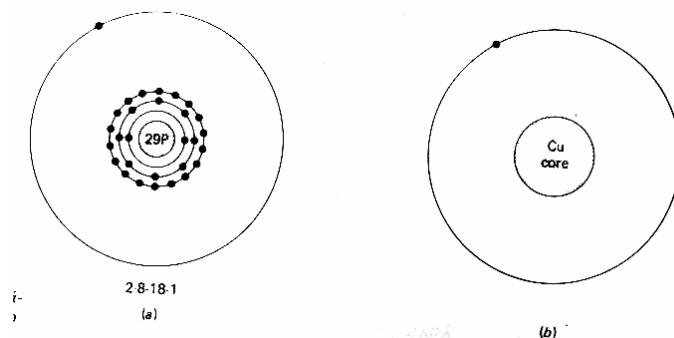
## Κεφάλαιο Μηδέν: Η Δίοδος

### 0.0 Εισαγωγή

Οι ημιαγωγοί δεν είναι ούτε αγωγοί ούτε μονωτές. Οι ημιαγωγοί περιέχουν μερικά ελεύθερα ηλεκτρόνια, αλλά αυτό που τους κάνει ασυνήθεις είναι η παρουσία οπών.

### 0.1 Αγωγοί

Ένα παράδειγμα καλού αγωγού είναι ο χαλκός. Η ατομική του δομή απεικονίζεται στο σχήμα 1 ( Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση ).



Σχήμα 1: Η ατομική δομή του χαλκού

Ο πυρήνας του ατόμου του χαλκού περιέχει 29 πρωτόνια. Όταν το άτομο του χαλκού είναι ηλεκτρικά ουδέτερο 29 ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα σε διαφορετικές τροχιές.

Ο θετικός πυρήνας έλκει τα πλανητικά ηλεκτρόνια. Ο λόγος που τα ηλεκτρόνια αυτά δεν πέφτουν πάνω στον πυρήνα του ατόμου είναι η ανάπτυξη μιας φυγόκεντρου δύναμης λόγω της κυκλικής τους τροχιάς. Όταν ένα ηλεκτρόνιο είναι σε σταθερή τροχιά η φυγόκεντρη δύναμη είναι ίση με την ελκτική δύναμη από τον πυρήνα.

Το μέτρο της φυγόκεντρου δυνάμεως είναι μικρότερο όσο η ταχύτητα του περιστρεφόμενου ηλεκτρονίου είναι μικρότερη. Βγαίνει λοιπόν το συμπέρασμα ότι τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών τροχιών κινούνται με ταχύτητες μικρότερες από αυτά που βρίσκονται στις εσωτερικές στοιβάδες. Το εξωτερικό ηλεκτρόνιο έχει πολύ μικρή ταχύτητα και σχεδόν δεν έλκεται από τον πυρήνα.

## Θεωρητικό Μέρος Η Δίοδος

Στην Ηλεκτρονική όλο το ενδιαφέρον εστιάζεται στην εξωτερική τροχιά των ατόμων η οποία καλείται στοιβάδα σθένους. Η στοιβάδα αυτή καθορίζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του ατόμου. Πολλές φορές για να τονίσουμε την σπουδαιότητα της στοιβάδας αυτής θεωρούμε ως πυρήνα τον πυρήνα και όλα τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων. Για παράδειγμα στην εικόνα της ατομικής δομής του ατόμου του χαλκού ως πυρήνας μπορεί να θεωρηθούν τα νουκλεόνια (πρωτόνια και νετρόνια) (+29) και όλα τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων (-28). Το σχήμα 1(β) μπορεί να βοηθήσει στην εικόνα αυτή του πυρήνα και της στοιβάδας σθένους του ατόμου του χαλκού.

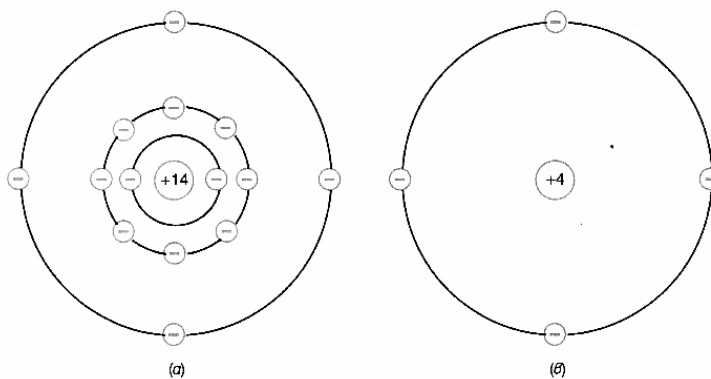
Εφόσον το ηλεκτρόνιο σθένους είναι σε μια μεγάλη τροχιά γύρω από τον πυρήνα η ελκτική δύναμη που αισθάνεται το εξωτερικό ηλεκτρόνιο είναι πολύ ασθενής.

Λόγω ότι η ελκτική δύναμη μεταξύ του πυρήνα και του ηλεκτρονίου της εξωτερικής στοιβάδας είναι ασθενής μια εξωτερική δύναμη μπορεί εύκολα να το αποσπάσει από το άτομο του χαλκού. Για αυτό το λόγο ονομάζουμε το εξωτερικό ηλεκτρόνιο ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Αυτός είναι και ο λόγος που ο χαλκός είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Ακόμη και η πιο μικρή τάση προκαλεί ροή των ελευθέρων ηλεκτρονίων από το ένα άτομο στο άλλο. Όλοι οι αγωγοί έχουν παρόμοια ατομική δομή με αυτή του χαλκού.

### 0.2 Ημιαγωγοί

Όπως είδαμε παραπάνω οι καλοί αγωγοί έχουν ένα ηλεκτρόνιο σθένους ενώ οι καλοί μονωτές έχουν οκτώ ηλεκτρόνια σθένους. Ένας ημιαγωγός είναι ένα στοιχείο με ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ εκείνων ενός αγωγού και εκείνων ενός μονωτή. Οι πιο καλοί ημιαγωγοί έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Η ατομική δομή του πυριτίου, καλό ημιαγωγικό στοιχείο, απεικονίζεται στο σχήμα 2 (*Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση*).

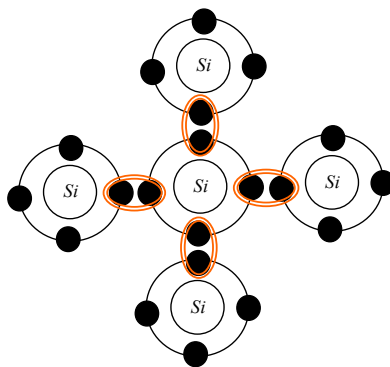
## Θεωρητικό Μέρος Η Δίοδος



Σχήμα 2: Ατομική δομή του πυριτίου

### 0.3 Κρύσταλλοι Πυριτίου

Τα άτομα του πυριτίου συνδυάζονται για να σχηματίσουν ένα στερεό, διατάσσονται περιοδικά στο χώρο και σχηματίζουν ένα κρύσταλλο. Κάθε άτομο πυριτίου μοιράζεται τα ηλεκτρόνια του σθένους του με τέσσερα γειτονικά άτομα πυριτίου ώστε να έχει οκτώ ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3: Διάταξη ατόμων πυριτίου σε ένα κρύσταλλο του στοιχείου αυτού (Διαδίκτυο)

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ταυτίζεται με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα. Αν η θερμοκρασία αυτή υπερβεί το απόλυτο μηδέν η θερμική ενέργεια του περιβάλλοντος αέρα αναγκάζει τα άτομα να ταλαντώνονται μέσα στον κρύσταλλό του πυριτίου. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία αυτή τόσο ισχυρότερες (δηλαδή έχουν μεγαλύτερο πλάτος) είναι οι ταλαντώσεις αυτές.

Κατά την διάρκεια των ταλαντώσεων αυτών μπορεί να απελευθερωθεί τυχαία ένα ηλεκτρόνιο από την στοιβάδα σθένους. Όταν συμβεί αυτό το απελευθερούμενο ηλεκτρόνιο έχει τόση ενέργεια ώστε να μεταβεί σε μια ανώτερη

## *Θεωρητικό Μέρος* *Η Δίοδος*

ενεργειακή στάθμη. Σε αυτή την ανώτερη τροχιά το ηλεκτρόνιο είναι γνωστό ως ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Το κενό στην στοιβάδα σθένους ονομάζεται οπή. Η οπή συμπεριφέρεται σαν θετικό φορτίο επειδή έλκει και συλλαμβάνει οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο βρεθεί κοντά της. Η ύπαρξη οπών είναι η κρίσιμη διαφορά μεταξύ των αγωγών και των ημιαγωγών.

Σε θερμοκρασία δωματίου, λόγω της θερμικής τους ενέργειας παράγονται μερικές οπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Για να αυξήσουμε την παραγωγή/συγκέντρωση των οπών και των ελευθέρων ηλεκτρονίων πρέπει να γίνει προσθήκη προσμίξεων.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται τυχαία μέσα στον κρύσταλλο. Σποραδικά ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο πλησιάζει μια οπή, έλκεται από αυτή και πέφτει μέσα της. Αυτή η διεργασία ονομάζεται επανασύζευξη. Το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας ενός ελευθέρου ηλεκτρονίου και της εξαφάνισής του καλείται χρόνος ζωής του ελευθέρου ηλεκτρονίου. Κυμαίνεται μεταξύ μερικών ns ως μερικών μs. Ο χρόνος ζωής εξαρτάται από το είδος του κρυστάλλου.

### **0.4 Ενδογενείς Ημιαγωγοί**

Ενδογενής ημιαγωγός είναι αυτός που αποτελείται από το ίδιο είδος ατόμων. Ο ενδογενής ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν μονωτής σε θερμοκρασία δωματίου.

Η κίνηση ενός ελευθέρου ηλεκτρονίου και μιας οπής μέσα σε ένα ημιαγωγό είναι αντίθετες.

Το ρεύμα σε ένα ημιαγωγό είναι 2 τύπων: το ρεύμα λόγω της ροής των ελευθέρων ηλεκτρονίων προς την μια διεύθυνση και το ρεύμα λόγω της ροής των οπών προς την αντίθετη διεύθυνση.

### **0.5 Εμπλουτισμός ενός Ημιαγωγού**

Ένας τρόπος αύξησης της αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού είναι με εμπλουτισμό. Αυτό σημαίνει την προσθήκη ατόμων προσμείξεων σε ένα ενδογενή ημιαγωγό για την μεταβολή της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας. Ένας ημιαγωγός με προσμείξεις ονομάζεται εξωγενής ημιαγωγός.

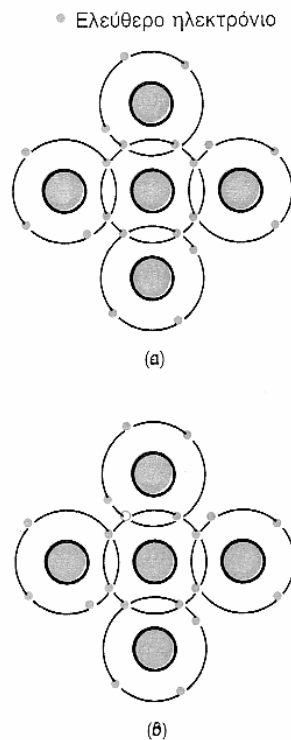
Για την αύξηση του αριθμού των ελευθέρων ηλεκτρονίων τα άτομα της πρόσμιξης πρέπει να είναι, στην περίπτωση που ο ημιαγωγός είναι πυρίτιο

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος

(τετρασθενές άτομο), πεντασθενές άτομο (π.χ. αρσενικό, αντιμόνιο, φώσφορος). Επειδή τα στοιχεία αυτά έχουν στη εξωτερική τους στοιβάδα ένα ηλεκτρόνιο παραπάνω αναφέρονται σαν δότες. Το extra ηλεκτρόνιο συμπεριφέρεται σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο.

Ομοίως για να αυξήσουμε τον αριθμό των οπών χρησιμοποιούμε για πρόσμιξη ένα τρισθενές άτομο (π.χ. βόριο, αργίλιο) με την προϋπόθεση ότι το host άτομο είναι το πυρίτιο όπως και προηγουμένως. Εφόσον τώρα το τρισθενές άτομο της πρόσμιξης αρχικά έχει μόνο τρία ηλεκτρόνια σθένους και κάθε γειτονικό άτομο πυριτίου συνεισφέρει ένα ηλεκτρόνιο, μόνο επτά ηλεκτρόνια βρίσκονται στην στοιβάδα σθένους. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια οπή στην στοιβάδα σθένους κάθε τρισθενούς ατόμου. Ένα τρισθενές άτομο ονομάζεται άτομο-δέκτης.

Η προσθήκη προσμίξεων για την δημιουργία extra ηλεκτρονίων ή extra οπών απεικονίζεται στο σχήμα 4 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση).

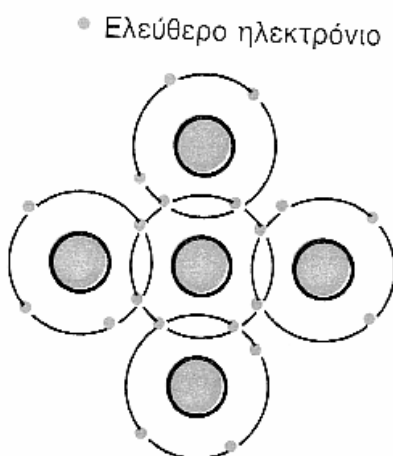


Σχήμα 4: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας extra ηλεκτρονίων και οπών.

### 0.6 Τύποι Εξωγενών Ημιαγωγών

Όπως είδαμε ένας ημιαγωγός μπορεί να εμπλουτιστεί ώστε να έχει περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων ή περίσσεια οπών. Υπάρχουν 2 τύποι εμπλουτισμένων ημιαγωγών.

Όταν η πρόσμειξη είναι πεντασθενές άτομο τότε ο ημιαγωγός έχει περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων και ονομάζεται ημιαγωγός τύπου n. Σε ένα ημιαγωγό τύπου n τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι περισσότερα από τις οπές και για αυτό το λόγο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ονομάζονται φορείς πλειονότητας και οι οπές φορείς μειονότητας. Ένας ημιαγωγός τύπου n απεικονίζεται στο σχήμα 5 (*Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση*).

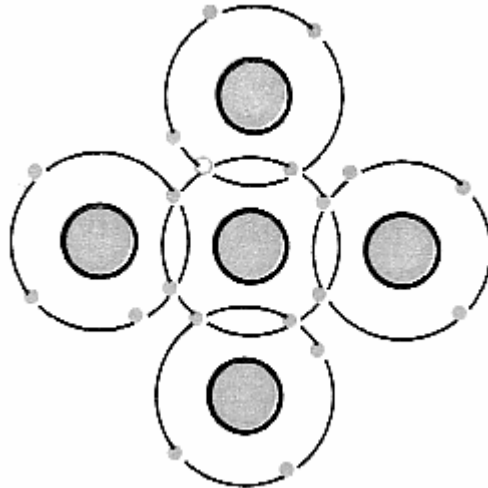


Σχήμα 5: Ατομική δομή ημιαγωγού τύπου n.

Λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται προς τα αριστερά και οι οπές προς τα δεξιά. Όταν μια οπή φθάσει στο δεξιό άκρο του κρυστάλλου, ένα από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα εισέρχεται στον ημιαγωγό και επανασυνδέεται με την οπή. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ρέουν προς το αριστερό άκρο του κρυστάλλου όπου εισέρχονται στον αγωγό και ρέουν προς το θετικό άκρο της μπαταρίας.

Όταν σε ένα ημιαγωγό πυριτίου προστεθούν προσμίξεις τρισθενούς ατόμου τότε οι φορείς πλειονότητας είναι οπές και ο ημιαγωγός είναι τύπου p. Στην παρακάτω εικόνα (*Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση*) απεικονίζεται ένας ημιαγωγός τύπου p.

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος



Σχήμα 6: Ατομική δομή ημιαγωγού τύπου p.

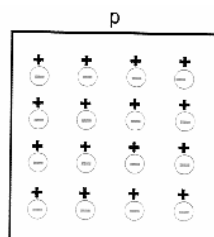
Λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται προς τα αριστερά και οι οπές κινούνται προς τα δεξιά. Οι οπές φθάνουν στο δεξιό άκρο του κρυστάλλου ανασυζευγνύονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του εξωτερικού κυκλώματος. Επειδή ο αριθμός των φορέων μειονότητας είναι μικρός τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δεν επιδρούν σχεδόν καθόλου σε αυτό το κύκλωμα.

### 0.7 Η Δίοδος Χωρίς Πόλωση

Ένα κομμάτι ημιαγωγού τύπου n ή p είναι το ίδιο χρήσιμο με μια αντίσταση από άνθρακα. Όταν όμως δημιουργηθεί ένας ημιαγωγός που ο μισός είναι τύπου n και ο άλλος μισός είναι τύπου p τότε δημιουργείται κάτι νέο.

Η οριακή περιοχή μεταξύ ημιαγωγού τύπου p και τύπου n ονομάζεται επαφή pn. Η επαφή pn είναι η βασική ιδέα όλων των σημαντικών ανακλύψεων στην ηλεκτρονική συμπεριλαμβανομένων των διόδων, των transistors, και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

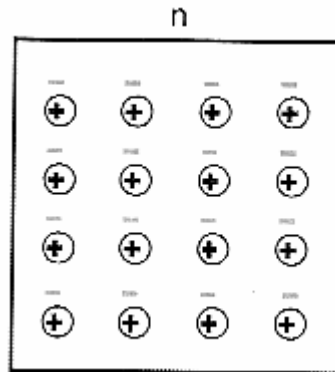
Ένα κομμάτι ημιαγωγού τύπου p μπορεί να προσομοιωθεί με το σχήμα 7 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση). Κάθε πλην μέσα σε κύκλο παριστά ένα τρισθενές άτομο, και κάθε συν είναι η οπή στην στοιβάδα σθένους του.



Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος

Σχήμα 7: Ημιαγωγός τύπου p

Ομοίως μπορούμε να φανταστούμε ένα κομμάτι ημιαγωγού τύπου n όπως απεικονίζεται στο σχήμα 8 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση). Πρέπει να τονιστεί ότι κάθε κομμάτι ημιαγωγικού υλικού είναι ηλεκτρικά ουδέτερο επειδή ο αριθμός των συν είναι ίσος με τον αριθμό των πλην.



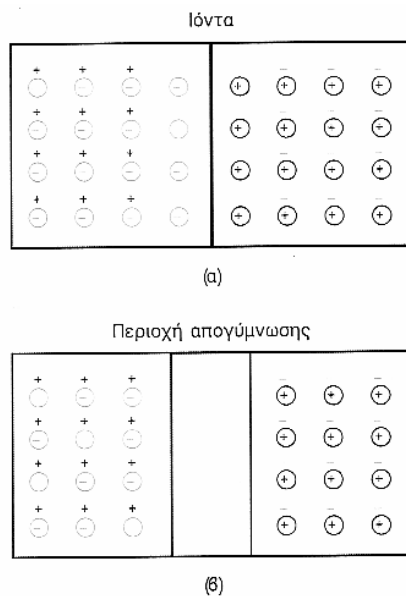
Σχήμα 8: Ημιαγωγός τύπου n

Δίοδος επαφής είναι ο ημιαγωγός που αποτελείται από 2 κομμάτια ημιαγωγού ένα τύπου n και ένα τύπου p (βλέπε σχήμα 9).

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της περιοχής n απωθούνται μεταξύ τους με αποτέλεσμα να κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις. Μερικά από αυτά εισέρχονται μέσω της επαφής pn στην περιοχή p. Στην περιοχή αυτή είναι φορείς μειονότητας και ο χρόνος ζωής τους είναι πολύ μικρός. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επανασυνδεθούν με τις οπές και να μετατραπούν από ελεύθερα ηλεκτρόνια σε ηλεκτρόνια σθένους.

Κάθε φορά που ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο διαχέεται διαμέσου της επαφής, δημιουργεί ένα ζεύγος ιόντων. Στη πλευρά του ημιαγωγού n δημιουργεί ένα θετικό ιόν ενώ στη πλευρά p δημιουργεί ένα ιόν αρνητικό. Το σχήμα 9 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση) απεικονίζει την δημιουργία των ιόντων σε κάθε πλευρά της επαφής.

## Θεωρητικό Μέρος Η Δίοδος



**Σχήμα 9:** Δημιουργία επαφής pn.

Κάθε ζεύγος θετικού και αρνητικού ιόντος στην επαφή ονομάζεται ηλεκτρικό δίπολο. Η δημιουργία ενός δίπολου σημαίνει ότι ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή έχουν τεθεί εκτός κίνησης. Καθώς ο αριθμός των δίπολων αυξάνει, η περιοχή κοντά στην επαφή αδειάζει από φορείς, και για αυτό το λόγο την ονομάζουμε περιοχή απογύμνωσης (βλέπε σχήμα 9).

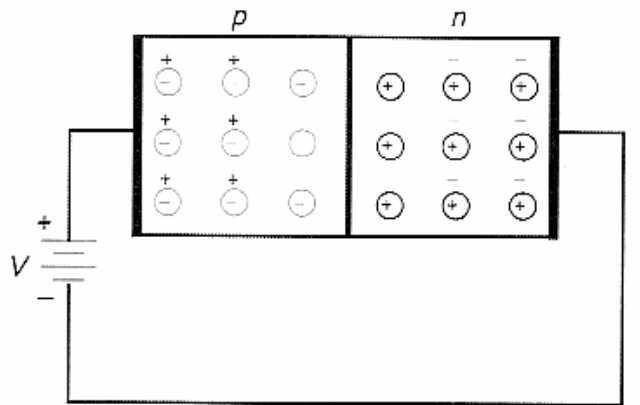
Κάθε δίπολο έχει ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ιόντος. Αν επιπλέον ελεύθερα ηλεκτρόνια εισέλθουν στην περιοχή απογύμνωσης, το ηλεκτρικό πεδίο προσπαθεί να απωθήσει τα ηλεκτρόνια αυτά πίσω στην περιοχή τύπου p. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται με τον αριθμό του δημιουργημένων ηλεκτρικών δίπολων μέχρι να έρθει σε ισορροπία. Το ηλεκτρικό αυτό πεδίο τότε σταματά την διάχυση των ηλεκτρονίων μέσω της επαφής.

Το ηλεκτρικό πεδίο των δίπολων (δηλαδή η διαφορά δυναμικού της περιοχής απογύμνωσης) στην ισορροπία μεταξύ των ιόντων είναι ισοδύναμο με μια διαφορά δυναμικού ίση με 0.7 Volt (στους 25°C) για διόδους πυριτίου και καλείται φράγμα δυναμικού.

### 0.8 Ορθή Πόλωση

Έστω ότι συνδέουμε μια dc πηγή στα άκρα μιας διόδου. Εάν ο θετικός πόλος της πηγής είναι συνδεδεμένος με το υλικό τύπου p και ο αρνητικός πόλος είναι συνδεδεμένος με το υλικό τύπου n, τότε η διάοδος λέμε ότι είναι ορθά πολωμένη. Η ορθή πόλωση της διόδου απεικονίζεται στο σχήμα 10 (*Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση*)

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος



Σχήμα 10: Επαφή p-n υπό ορθή πόλωση

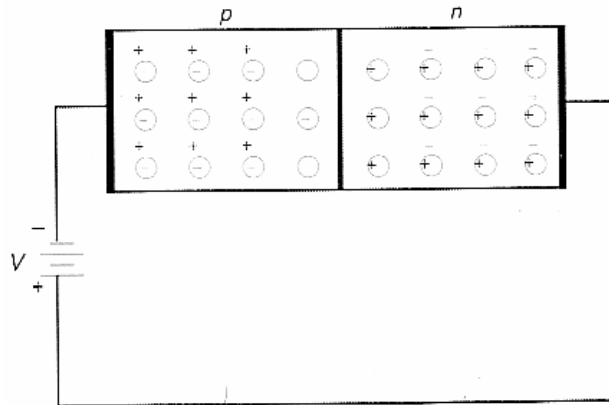
Στο σχήμα 10 η μπαταρία ωθεί τις οπές και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προς την επαφή. Αν η τάση της μπαταρίας είναι μικρότερη από το φράγμα δυναμικού, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δεν διαθέτουν αρκετή ενέργεια ώστε να διαπεράσουν την περιοχή απογύμνωσης. Για αυτό το λόγο η δίοδος δεν διαρρέετε από ρεύμα.

Όταν η εξωτερική dc τάση της πηγής γίνει μεγαλύτερη από το φράγμα του δυναμικού η μπαταρία πάλι ωθεί τις οπές και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προς την επαφή. Αυτή την φορά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια έχουν αρκετή ενέργεια για να διαπεράσουν την περιοχή απογύμνωσης και να επανασυνδεθούν με τις οπές. Ομοίως και οι οπές κινούνται προς τα δεξιά με αποτέλεσμα να επανασυνδέονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κοντά στην επαφή. Αφού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συνεχώς εισέρχονται στο δεξί άκρο της διόδου και οι οπές συνεχώς δημιουργούνται στο αριστερό, έχουμε συνεχές ρεύμα διαμέσου της διόδου.

Για να κατανοήσουμε πιο καλά τις διαδικασίες που συμβαίνουν μέσα σε μια δίοδο ας ακολουθήσουμε ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο σε ένα κύκλωμα μιας ορθά πολωμένης διόδου. Αφού το ελεύθερο ηλεκτρόνιο απομακρυνθεί από τον αρνητικό πόλο της πηγής εισέρχεται στο δεξί άκρο της διόδου. Αυτό διασχίζει την περιοχή n μέχρι να φθάσει στην επαφή. Όταν η εξωτερική τάση της πηγής είναι μεγαλύτερη από 0.7 Volt το ελεύθερο ηλεκτρόνιο θα διαπεράσει την περιοχή απογύμνωσης και θα εισέλθει στην περιοχή του υλικού τύπου p. Στην περιοχή αυτή θα επανασυνδεθεί με μια οπή και θα γίνει ηλεκτρόνιο σθένους. Το τελευταίο θα προχωρήσει, περνώντας από την μια οπή στην άλλη, προς τον θετικό πόλο της dc πηγής και έτσι να δημιουργήσει μια νέα οπή και η διαδικασία ξαναρχίζει. Αφού υπάρχουν δισεκατομμύρια ηλεκτρονίων που κάνουν την ίδια διαδρομή παίρνουμε συνεχές ρεύμα διαμέσου της διόδου.

### 0.9 Ανάστροφη Πόλωση

Αλλάζοντας την πολικότητα της πηγής dc η δίοδος πολώνεται ανάστροφα όπως φαίνεται στο σχήμα 11 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση).



Σχήμα 11: Επαφή pn σε ανάστροφη πόλωση

Η διεύρυνση της περιοχής απογύμνωσης σταματά όταν η διαφορά δυναμικού της περιοχής αυτής γίνει ίση με την τάση της dc πηγής. Είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς όσο μεγαλώνει η ανάστροφη τάση τόσο μεγαλώνει το εύρος της περιοχής απογύμνωσης.

Μετά την σταθεροποίηση της περιοχής απογύμνωσης υπάρχει κάποιο ρεύμα; Ναι υπάρχει ένα μικρό ρεύμα με ανάστροφη πόλωση. Το ανάστροφο αυτό ρεύμα ονομάζεται ρεύμα κόρου. Η ύπαρξη του οφείλεται στο ότι η θερμική ενέργεια προκαλεί την δημιουργία φορέων μειονότητας στα 2 άκρα της επαφής. Οι φορείς μειονότητας που θα περάσουν στο άλλο άκρο της επαφής αποτελούν το ρεύμα κόρου στο εξωτερικό κύκλωμα. Ο όρος κόρος σημαίνει ότι δεν μπορούμε να πάρουμε περισσότερο ρεύμα φορέων μειονότητας από αυτό που παράγεται από την θερμική ενέργεια. Έτσι αυξάνοντας την ανάστροφη τάση δεν αυξάνεται ο αριθμός των θερμικά δημιουργουμένων φορέων μειονότητας. Αυτό εξαρτάται από την θερμοκρασία.

Στην ανάστροφη πόλωση εκτός από το ρεύμα κόρου έχουμε και ένα άλλο ανάστροφο ρεύμα γνωστό ως επιφανειακό ρεύμα διαρροής που οφείλεται σε επιφανειακές προσμίξεις και ατέλειες στην κρυσταλλική δομή.

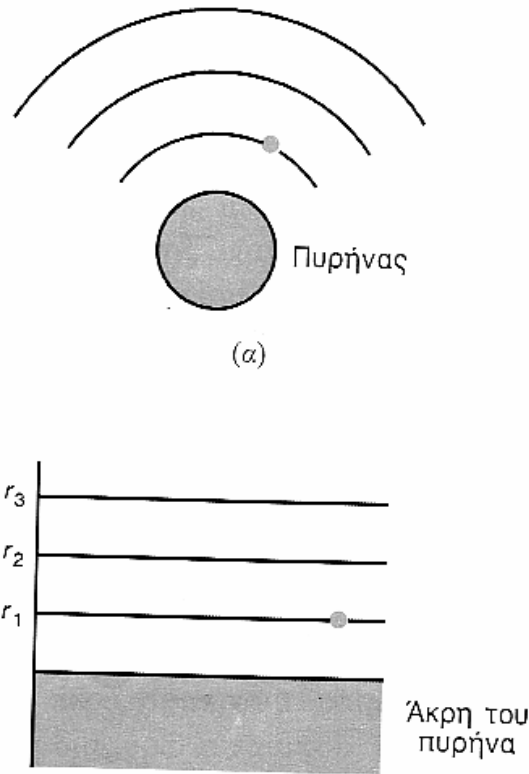
## Θεωρητικό Μέρος Η Δίοδος

Γενικά αυτό που πρέπει να θυμόμαστε είναι ότι το ανάστροφο ρεύμα (ρεύμα κόρου μαζί με το ρεύμα επιφανειακής διαρροής) είναι πολύ μικρό για να το λάβουμε υπόψη μας.

### 0.10 Ενεργειακές στάθμες

Από την ενεργειακή στάθμη που βρίσκεται ένα ηλεκτρόνιο μπορούμε να αναγνωρίσουμε και την ολική του ενέργεια.

Στο σχήμα 12 (*Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση*) μπορεί να θεωρηθεί κάθε ακτίνα σαν μια ισοδύναμη ενεργειακή στάθμη.



Σχήμα 12: Ενεργειακές καταστάσεις ατόμου

Λόγω της ελκτικής δύναμης του πυρήνα προς το ηλεκτρόνιο, για την πρόσκαιρη μετακίνηση του τελευταίου σε μια ανώτερη ενεργειακή στάθμη απαιτείται επιπλέον ενέργεια. Η επιπλέον ενέργεια μπορεί να προέρθει μέσω μεταφοράς θερμότητας, μέσω ακτινοβολίας κατάλληλου μήκους κύματος, μέσω τάσης.

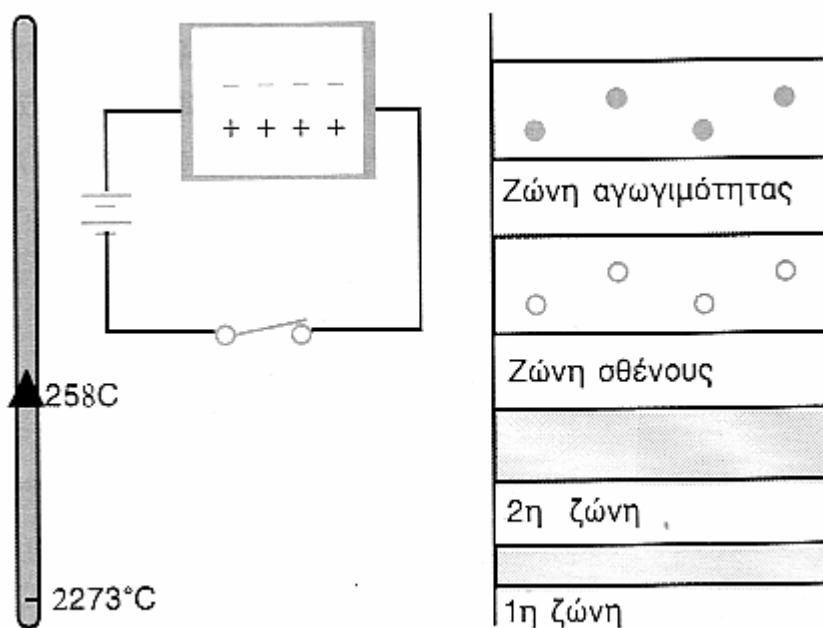
Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος

Όσο υψηλότερα είναι ένα ηλεκτρόνιο τόσο μεγαλύτερη η δυναμική του ενέργεια. Όταν επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση θα αποδώσει την επιπλέον ενέργεια με την μορφή θερμότητας, φωτός ή άλλης ακτινοβολίας.

Όταν ένα άτομο πυριτίου είναι απομονωμένο η τροχιά κάθε ηλεκτρονίου εξαρτάται μόνο από τα φορτία του απομονωμένου ατόμου (δες σχήμα 12).

Όταν όμως έχουμε ένα κρύσταλλο πυριτίου οι τροχιές του ηλεκτρονίου επηρεάζονται από τα φορτία πολλών ατόμων πυριτίου. Αφού κάθε ηλεκτρόνιο έχει μοναδική θέση στον κρύσταλλο, δεν υπάρχουν δυο ηλεκτρόνια που να δέχονται την ίδια επίδραση από τα περιβάλλοντα φορτία. Για το λόγο αυτό το ενεργειακό επίπεδο άρα και η τροχιά κάθε ηλεκτρονίου είναι διαφορετική από οποιοδήποτε άλλο.

Το σχήμα 13 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση) απεικονίζει το τι συμβαίνει στα ενεργειακά επίπεδα ενός κρυστάλλου. Στην πρώτη, δεύτερη στοιβάδα βρίσκονται τα περισσότερα ηλεκτρόνια. Λόγω του ότι δυο ηλεκτρόνια δεν βρίσκονται ποτέ στην ίδια θέση, οι ενεργειακές στάθμες όλων αυτών των ηλεκτρονίων θα είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ζώνες ενεργειακών σταθμών.



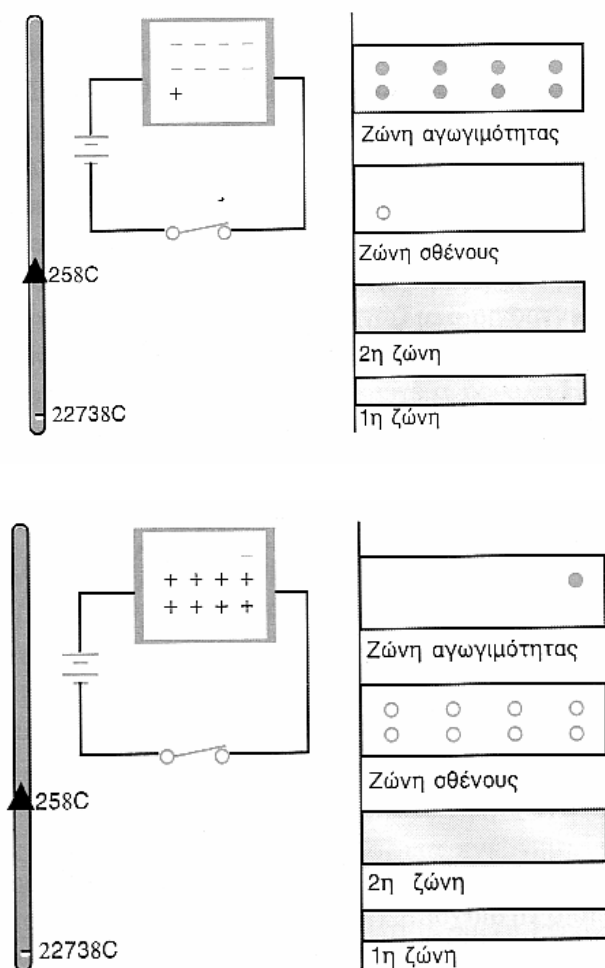
Σχήμα 13: Ζώνες ενεργειακών σταθμών ενός κρυστάλλου

Η θερμική ενέργεια δημιουργεί λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές. Οι οπές παραμένουν στην ζώνη σθένους ενώ τα ηλεκτρόνια πηγαίνουν στην αμέσως επόμενη ζώνη υψηλότερης ενέργειας γνωστή ως ζώνη αγωγιμότητας. Το σχήμα 13 δείχνει

*Θεωρητικό Μέρος*  
*Η Δίοδος*

την ύπαρξη λίγων ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας και οπών στην ζώνη σθένους.

Οι ενεργειακές ζώνες ενός ημιαγωγού τύπου n και ενός τύπου p απεικονίζονται στο σχήμα 14 (*Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση*).



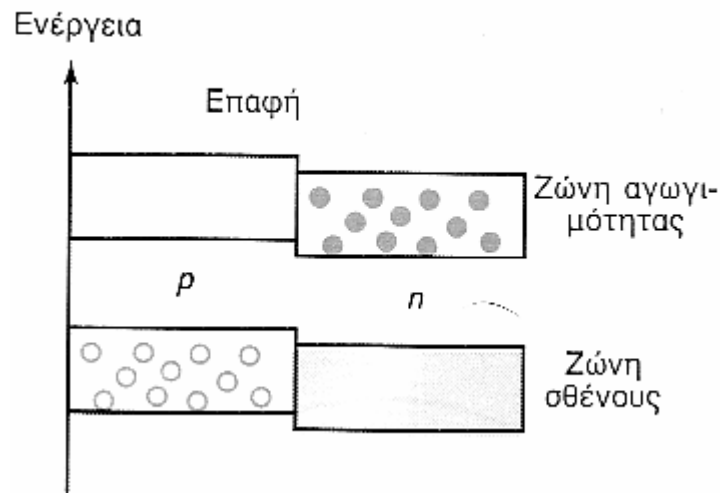
*Σχήμα 14: Ενεργειακές καταστάσεις ημιαγωγού τύπου n και p.*

**0.11 Ο Ενεργειακός Λόφος**

Πρέπει να τονιστεί ότι οι ενεργειακές στάθμες ενός ημιαγωγού ρυθμίζουν τη δράση μιας επαφής pn.

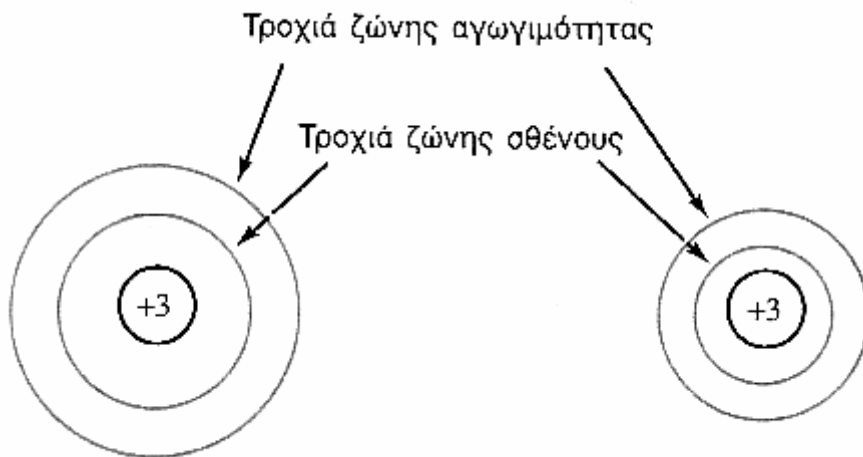
Έστω ότι έχουμε μια επαφή pn. Η πλευρά p έχει πολλές οπές στην ζώνη σθένους ενώ η πλευρά n πολλά ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας (δες παρακάτω σχήμα 15 (*Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση*)).

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος



Σχήμα 15: Διάγραμμα ενεργειακών στάθμεων μιας επαφής pn

Από το παραπάνω σχήμα (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση) βλέπουμε ότι οι ζώνες p είναι ελαφρώς ενεργειακά υψηλότερες από τις ζώνες n. Γιατί; Αυτό συμβαίνει διότι στην πλευρά p έχουμε για παράδειγμα ένα τρισθενές στοιχείο που έλκει πιο ασθενώς ένα ηλεκτρόνιο από ότι ένα πεντασθενές στοιχείο που βρίσκεται στην περιοχή n. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι τροχιές των ηλεκτρονίων στην περιοχή p να είναι πιο μεγάλες (άρα μεγαλύτερη δυναμική ενέργεια) από τις τροχιές που έχουν στην περιοχή n (άρα μικρότερη δυναμική ενέργεια) (βλέπε σχήμα 16).

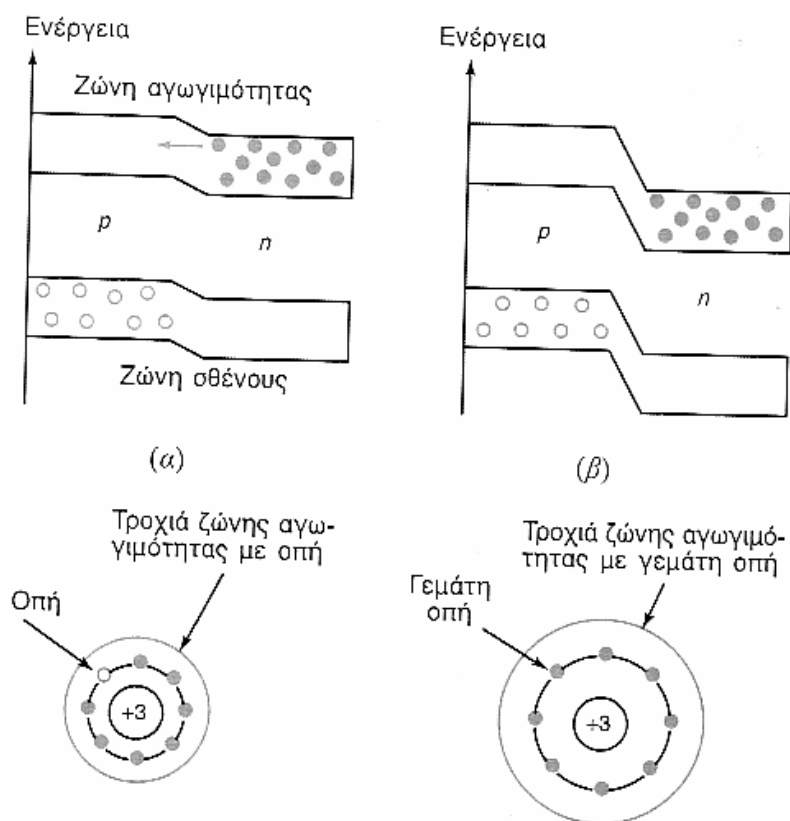


Σχήμα 16: Ενεργειακές τροχιές τρισθενούς και πεντασθενούς ατόμου

Όταν η δίοδος πρώτο-σχηματίζεται δεν υπάρχει περιοχή απογύμνωσης. Ηλεκτρόνια από την n περιοχή θα διαχυθούν προς την περιοχή p. Με αυτό τον τρόπο αρχίζει και δημιουργείται η περιοχή απογύμνωσης. Κάποια στιγμή η κίνηση των ηλεκτρονίων προς την περιοχή p θα σταματήσει λόγω του ότι το ηλεκτρικό πεδίο που

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος

δημιουργείται στην περιοχή απογύμνωσης τα εμποδίζει να κινηθούν προς την περιοχή αυτή. Στο σημείο αυτό τα ηλεκτρόνια της περιοχής  $n$  δεν έχουν αρκετή ενέργεια για να κινηθούν προς την  $p$  περιοχή. Η διάχυση των ηλεκτρονίων της  $n$  περιοχής προς την  $p$  περιοχή επιφέρει κάποιες αλλαγές στις ενεργειακές στάθμες των 2 περιοχών όπως επίσης και στις ακτίνες των τροχιών των ηλεκτρονίων των ατόμων των ημιαγωγών στις περιοχές  $p$  και  $n$ . Οι αλλαγές αυτές απεικονίζονται στο σχήμα 17 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση)



Σχήμα 17: Αλλαγές στις ηλεκτρονικές ενεργειακές στάθμες μιας επαφής  $pn$  υπό ορθή πόλωση

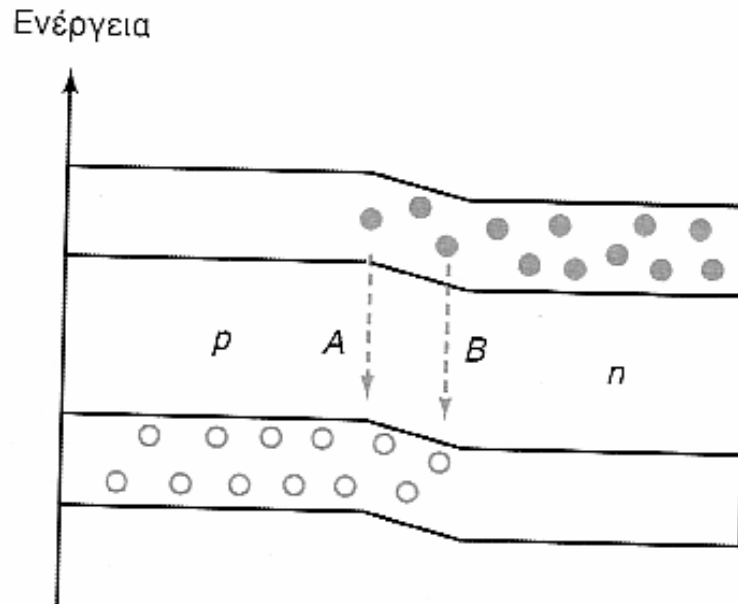
Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι για ένα ηλεκτρόνιο που προσπαθεί να διαχυθεί στα άκρα της επαφής, η διαδρομή που πρέπει να διασχίσει είναι να ανέβει σε ένα λόφο, ένα ενεργειακό λόφο. Το ηλεκτρόνιο πρέπει να δεχθεί extra ενέργεια από μια εξωτερική πηγή τάσης για να συνεχίσει την κίνηση του προς την  $p$  περιοχή.

Η ορθή πόλωση χαμηλώνει τον ενεργειακό λόφο. Η εξωτερική πηγή τάσης ανυψώνει την ενεργειακή στάθμη των ηλεκτρονίων στην περιοχή  $n$  με αποτέλεσμα να μπορούν να εισέλθουν στην περιοχή  $p$ .

Μόλις το ελεύθερο ηλεκτρόνιο της περιοχής  $n$  εισέλθει στην περιοχή  $p$  επανασυνδέεται με μια οπή κι μετατρέπεται σε ηλεκτρόνιο σθένους. Το οποίο συνεχίζει την διαδρομή του προς τα αριστερά του κρυστάλλου. Με αυτό τον τρόπο

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος

έχουμε μια συνεχή ροή ηλεκτρονίων μέσω της διόδου. Αυτά όλα εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση).



Σχήμα 18: Επανασύνδεση ελευθέρων ηλεκτρονίων με τις σπές

### 0.12 Φράγμα Δυναμικού

Ως θερμοκρασία επαφής ορίζουμε την θερμοκρασία εντός της διόδου. Όταν η δίοδος άγει τότε η θερμοκρασία επαφής είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η τιμή του φράγματος δυναμικού (ή ενεργειακός λόφος) εξαρτάται από την θερμοκρασία επαφής. Ισχύει (γιατί;) ότι όσο μικραίνει η θερμοκρασία της επαφής ελαττώνεται το φράγμα δυναμικού. Αυτό εκφράζεται, για την δίοδο πυριτίου, από την ακόλουθη εμπειρική μαθηματική σχέση:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = -2mV / ^\circ C$$

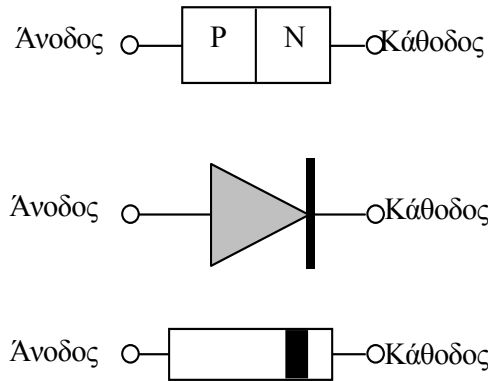
### 0.13 Η Δίοδος

Η δίοδος αποτελεί μια μη γραμμική διάταξη. Αυτό σημαίνει ότι η γραφική παράσταση του ρεύματος σε σχέση με την τάση δεν είναι ευθεία γραμμή. Αυτό συμβαίνει λόγω του φράγματος δυναμικού.

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος

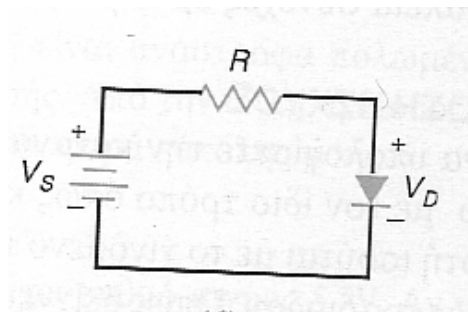
Όταν η τάση στα άκρα της διόδου είναι μικρότερη από το φράγμα δυναμικού τότε η δίοδος δεν άγει. Εάν είναι μεγαλύτερη τότε το ρεύμα της διόδου αυξάνει γρήγορα.

Το σχήμα 19 απεικονίζει το κυκλωματικό σύμβολο της διόδου. Η πλευρά p ονομάζεται άνοδος ενώ η πλευρά n ονομάζεται κάθοδος.



Σχήμα 19: Κυκλωματικό σύμβολο μιας επαφής pn

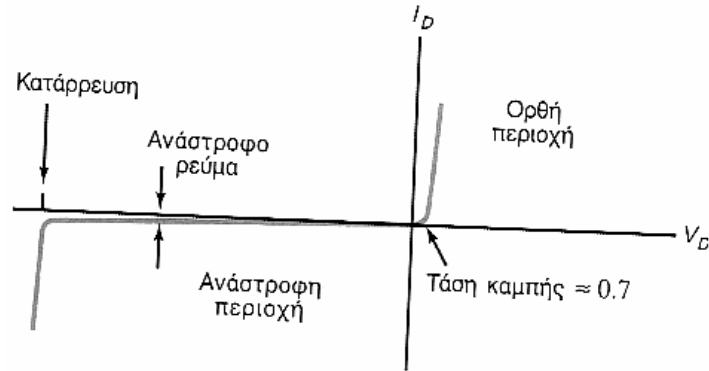
Το κύκλωμα πόλωσης μιας διόδου απεικονίζεται στο σχήμα 20 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση). Ορθή πόλωση μιας διόδου σημαίνει ότι η περιοχή p της διόδου συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής τάσης ενώ η περιοχή n συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής τάσης. Όταν η δίοδος πολωθεί ορθά τότε άγει ενώ στην περίπτωση που πολωθεί ανάστροφα τότε δεν άγει.



Σχήμα 20: Κύκλωμα πόλωσης μιας διόδου

Αν η δίοδος πολωθεί αρχικά ορθά και αργότερα ανάστροφα η γραφική παράσταση που παίρνουμε του ρεύματος  $I_D$  προς την τάση  $V_D$  κατά μήκος της απεικονίζεται στο σχήμα 21 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση).

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος



Σχήμα 21: Γραφική παράσταση του ρεύματος  $I_D$  μιας διόδου προς την τάση  $V_D$  στα άκρα της

Στην ορθή περιοχή η τάση στην οποία το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται γρήγορα ονομάζεται τάση καμψής της διόδου. Η τάση καμψής είναι ίση με το φράγμα δυναμικού (π.χ. για το πυρίτιο  $\sim 0.7$  Volt).

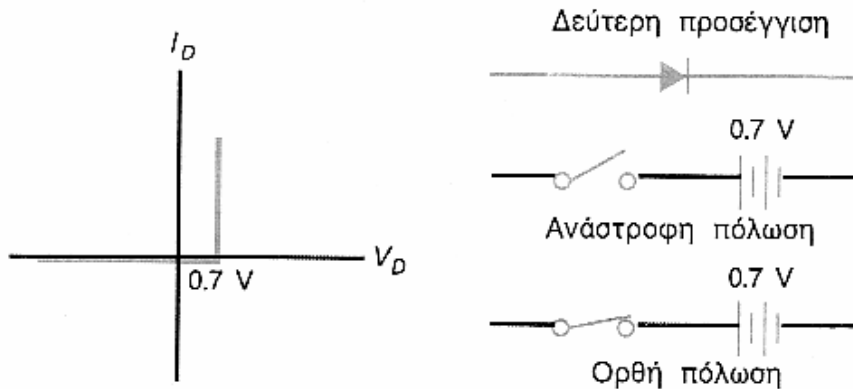
Αν το ρεύμα σε μια δίοδο είναι πολύ μεγάλο, η υπερβολική θερμότητα θα καταστρέψει τη δίοδο. Το μέγιστο ορθό ρεύμα είναι από τα μεγέθη που δίνονται σε στο φυλλάδιο προδιαγραφών της διόδου.

Η κατανάλωση ισχύος πάνω σε μια δίοδο που είναι ορθά πολωμένη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_D = I_D V_D$$

Μια ιδανική δίοδος ανόρθωσης όπως τονίστηκε προηγουμένως άγει κατά την ορθή πόλωση όταν  $V_D > 0.7V$ , και άγει ελάχιστα κατά την ανάστροφη πόλωση. Η προσομοίωση της διόδου σαν κλειστός διακόπτης ή βραχυκύκλωμα (στην περίπτωση που άγει) είτε ως ανοικτός διακόπτης ή άπειρη αντίσταση (όταν δεν άγει) απεικονίζεται στο σχήμα 22 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση).

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος



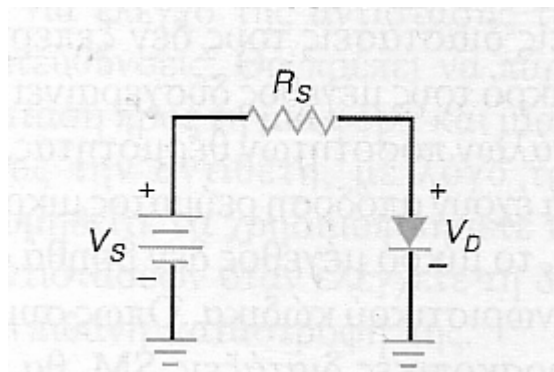
Σχήμα 22: Προσομοίωση της διόδου ως ανοικτός διακόπτης (ανάστροφη πόλωση) και σαν κλειστός διακόπτης (ορθή πόλωση)

#### 0.14 Γραμμές Φορτίου

Η κατασκευή της γραμμής φορτίου μας βοηθά στην εύρεση των ακριβών τιμών του ρεύματος και της τάσης στα άκρα μιας διόδου.

Στο κύκλωμα του σχήματος 23 (Ηλεκτρονική Malvino-6<sup>η</sup> Έκδοση) το ρεύμα  $I_D$  το

οποίο διαρρέει την αντίσταση  $R_S$  είναι ίσο με :  $I_D = \frac{V_S - V_D}{R_S}$ .

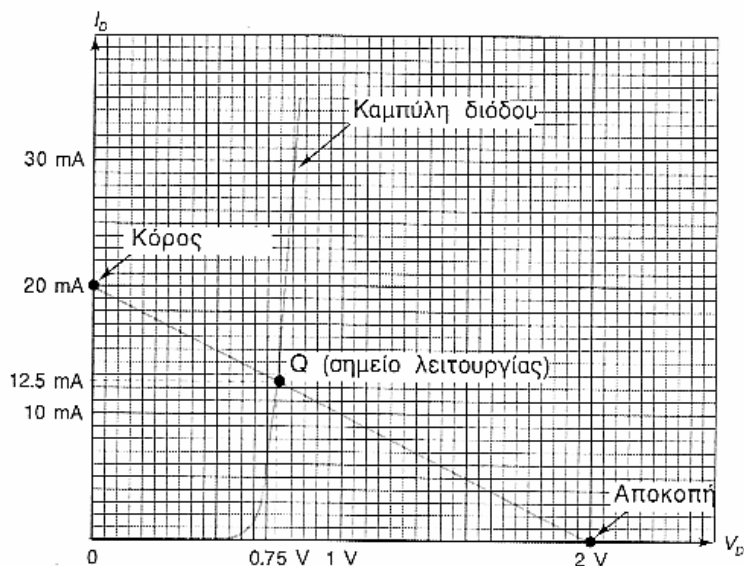


Σχήμα 23

Για να χαράξουμε την γραμμή φόρτου του κυκλώματος του σχήματος 23 χρειαζόμαστε 2 σημεία. Τα σημεία αυτά είναι γνωστά ως σημείο κόρου και σημείο αποκοπής. Ως σημείο κόρου παίρνουμε το σημείο στο οποίο η τάση στα άκρα της διόδου είναι ίση με μηδέν. Από την άλλη στο σημείο αποκοπής ισχύει ότι  $I_D = 0$  A. Τα σημεία που αντιστοιχούν σε τιμές της τάσης και ρεύματος της διόδου διάφορες από τις τιμές της τάσης αποκοπής και του ρεύματος κόρου βρίσκονται πάνω στην ευθεία που ενώνει τα σημεία αποκοπής και κόρου. Η ευθεία αυτή ονομάζεται ευθεία φόρτου.

## Θεωρητικό Μέρος Η Δίοδος

Στο σχήμα 24 (Ηλεκτρονική Μαλβίνο-6<sup>η</sup> Έκδοση) απεικονίζεται η ευθεία φορτίου και η καμπύλη μιας ορθά πολωμένης διόδου. Το σημείο τομής είναι γνωστό ως σημείο Q ;ή σημείο λειτουργίας.



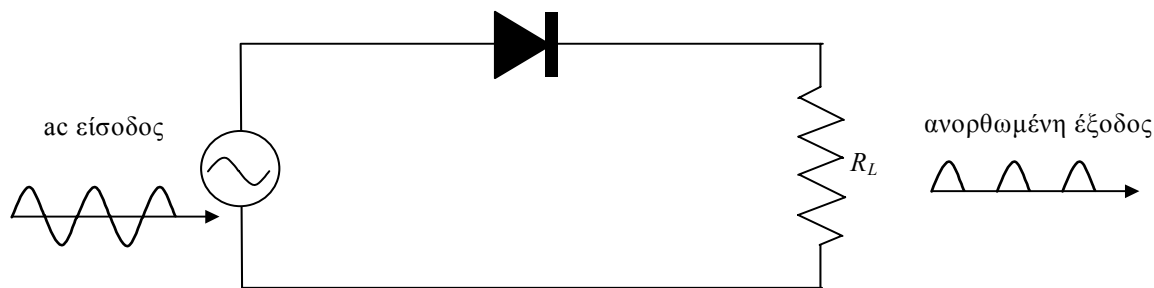
Σχήμα 24: Γραμμή φόρτου μιας ορθά πολωμένης διόδου

### 0.15 Κύκλωμα Ημιανόρθωσης

Οι περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές όπως οι τηλεοράσεις, τα στερεοφωνικά συγκροτήματα και οι υπολογιστές χρειάζονται μια dc τάση για να λειτουργήσουν σωστά. Αφού η τάση της γραμμής είναι εναλλασσόμενη το πρώτο πράγμα που χρειάζεται να κάνουμε είναι να μεταβάλουμε την ac τάση της γραμμής σε dc τάση. Μέσα στο τροφοδοτικό υπάρχουν κυκλώματα που επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος προς μια μόνο κατεύθυνση. Τα κυκλώματα αυτά ονομάζονται ανορθωτές.

Το κύκλωμα του σχήματος 25 δρα ως ημιανορθωτής. Η ac πηγή δημιουργεί ημιτονοειδή τάση. Η θετική ημιπερίοδος πολώνει ορθά την διόδο. Άρα η διόδος δρα ως κλειστός διακόπτης. Επομένως στην έξοδο θα μετρήσουμε τάση. Η αρνητική ημιπερίοδος πολώνει ανάστροφα την διόδο με αποτέλεσμα αυτή να λειτουργεί ως ανοικτός διακόπτης και να μην παίρνουμε σήμα στην έξοδο (στα άκρα της αντίστασης  $R_L$ ). Το κύκλωμα αυτό λοιπόν αποκόπτει τις αρνητικές ημιπεριόδους.

Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος



Σχήμα 25: Κύκλωμα ημιανόρθωσης

**Υποσημείωση:** Για καλύτερη και πληρέστερη μελέτη της θεωρίας μελετήστε τα κεφάλαια 1,2 στον Malvino «Βασική Ηλεκτρονική» (σελ. 2-49)

**0.16 Επαναληπτικές ερωτήσεις – ασκήσεις**

1. Το ηλεκτρόνιο σθένους ενός ατόμου χαλκού τι είδους έλξη υφίσταται από τον πυρήνα;  
(α) Καμία (β) Ασθενή (γ) Ισχυρή (δ) Απροσδιόριστη
2. Ποιος ημιαγωγός χρησιμοποιείται περισσότερο;  
(α) Χαλκός (β) Γερμάνιο (γ) Πυρίτιο (δ) Κανένα από τα παραπάνω
3. Ένας ενδογενής ημιαγωγός έχει μερικές οπές σε θερμοκρασία δωματίου. Τι δημιουργεί αυτές τις οπές;  
(α) Ο εμπλουτισμός (β) Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (γ) Η θερμική ενέργεια
4. Η ενσωμάτωση ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου και μιας οπής καλείται  
(α) Ομοιοπολική ζεύξη (β) Χρόνος ζωής (γ) Ανασύζευξη
5. Σε θερμοκρασία δωματίου ένας ενδογενής ημιαγωγός ενεργεί περίπου σαν  
(α) Μια μπαταρία (β) Ένας αγωγός (γ) Ένας μονωτής
6. Το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας μιας οπής και της εξαφάνισής της καλείται  
(α) Εμπλουτισμός (β) Χρόνος ζωής (γ) Ανασύζευξη (δ) Σθένος

*Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος*

7. Πόσους τύπους ροής έχει ένας αγωγός ;  
(α) 1 (β) 2 (γ) 3 (δ) 4
8. Πόσους τύπους ροής έχει ένας ημιαγωγός ;  
(α) 1 (β) 2 (γ) 3 (δ) 4
9. Όταν σε ένα ημιαγωγό εφαρμόζεται μια τάση, οι οπές ρέουν  
(α) Απομακρυνόμενες από το αρνητικό δυναμικό  
(β) Προς τον θετικό δυναμικό  
(γ) Στο εξωτερικό κύκλωμα  
(δ) Τίποτα από τα παραπάνω
10. Σε ένα ενδογενή ημιαγωγό, ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων  
(α) Ισούται με τον αριθμό των οπών  
(β) Είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των οπών  
(γ) Είναι μικρότερος από τον αριθμό των οπών  
(δ) Τίποτα από τα παραπάνω
11. Η ροή των ηλεκτρονίων σθένους προς τα αριστερά σημαίνει ότι οι οπές ρέουν προς  
(α) Αριστερά (β) Δεξιά (γ) Οποιαδήποτε κατεύθυνση
12. Πόσα ηλεκτρόνια έχει ένα άτομο δότης σε έναν ημιαγωγό πυριτίου τύπου n ;  
(α) 1 (β) 4 (γ) 3 (δ) 5
13. Αν θέλατε να δημιουργήσετε έναν ημιαγωγό τύπου p τι από τα παραπάνω θα χρησιμοποιούσατε;  
(α) Άτομα δέκτες (β) Άτομα Δότες (γ) Πεντασθενή πρόσμειξη
14. Σε ποιον τύπο ημιαγωγού οι οπές είναι οι φορείς μειονότητας ;  
(α) Εξωγενή (β) Ενδογενή (γ) τύπου p (δ) τύπου n
15. Ποιο από τα παρακάτω περιγράφει καλύτερα ένα ημιαγωγό τύπου p;  
(α) Ουδέτερος (β) Θετικά φορτισμένος (γ) Αρνητικά φορτισμένος

*Θεωρητικό Μέρος  
Η Δίοδος*

16. Ποιο από τα παρακάτω περιγράφει καλύτερα ένα ημιαγωγό τύπου n;
- (α) Ουδέτερος (β) Θετικά φορτισμένος (γ) Αρνητικά Φορτισμένος
17. Τι προκαλεί την περιοχή απογύμνωσης;
- (α) Εμπλουτισμός (β) Ανασύζευξη (γ) Φράγμα Δυναμικού (δ) Ιόντα
18. Πόσο είναι το φράγμα δυναμικού μιας διόδου πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου;
- (α) 0.3 V (β) 0.7 V (γ) 1 V (δ) 50 V
19. Για να παραχθεί ένα μεγάλο ρεύμα ορθής φοράς σε μια δίοδο πυριτίου, η εφαρμοζόμενη τάση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από
- (α) 0 V (β) 0.7 V (γ) 1 V (δ) 50 V
20. Σε μια δίοδο πυριτίου το ανάστροφο ρεύμα είναι συνήθως
- (α) Πολύ μικρό (β) Πολύ μεγάλο (γ) Μηδέν (δ) Στην περιοχή διάσπασης
21. Όταν η ανάστροφη τάση αυξάνεται από 5 έως 10 Volt η περιοχή απογύμνωσης
- (α) Γίνεται μικρότερη (β) Γίνεται μεγαλύτερη (γ) Δεν επηρεάζεται
22. Όταν μια δίοδος είναι πολωμένη ορθά, η ανασύζευξη ελευθέρων ηλεκτρονίων και οπών μπορεί να παράγει
- (α) Θερμότητα (β) Φως (γ) Ακτινοβολία (δ) Όλα τα παραπάνω
23. Μια ανάστροφη τάση 20 V εφαρμόζεται στα άκρα μιας διόδου. Πόση είναι η τάση στα άκρα της περιοχής απογύμνωσης;
- (α) 0 V (β) 0.7 V (γ) 20 V (δ) Τίποτα από τα παραπάνω
24. Τι είδους διάταξη είναι μια δίοδος;
- (α) Δυσδιάστατη (β) Γραμμική (γ) Μη Γραμμική (δ) Μονοπολική
25. Πως είναι πολωμένη μια μη άγουσα δίοδος ;
- (α) Ορθά (β) Ανάστροφα (γ) Αντίστροφη (δ) Πτωχή

*Θεωρητικό Μέρος*  
*Η Δίοδος*

26. Η τάση καμψής μιας διόδου είναι ίση με την / το

(α) Εφαρμοζόμενη τάση (β) Φράγμα δυναμικού (γ) Τάση κατάρρευσης

27. Πόση τάση (V) πρέπει να υπάρχει στα άκρα μιας διόδου πυριτίου όταν είναι ορθά πολωμένη;

(α) 0            (β) 0.7            (γ) 0.3            (δ) 1