

Λειτουργία των Transistors

Ρυσάκης Γιάννης

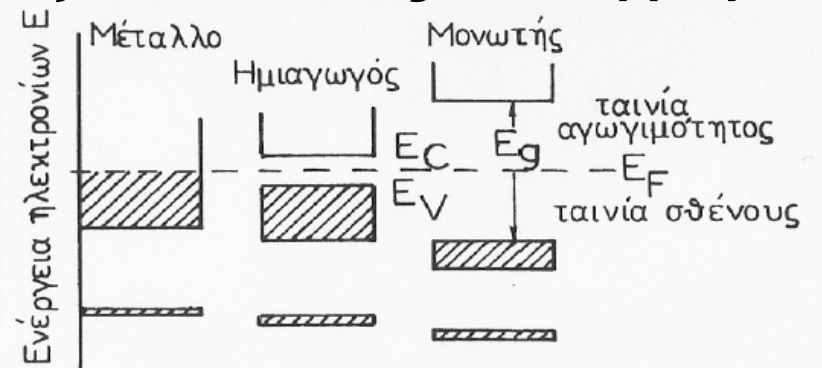
Λειτουργία των Transistors

- Κατηγορίες στερεών υλικών
- Ημιαγωγοί
- Ημιαγωγοί με προσμίξεις
- Επαφή p-n
- Τρανζίστορ npn και pnp
- Πόλωση του Τρανζίστορ
- Λειτουργία στην Αποκοπή
- Γραμμική Λειτουργία
- Λειτουργία στον Κόρο

Κατηγορίες στερεών υλικών

- Τα στερεά υλικά χωρίζονται στις κατηγορίες:

- **Αγωγούς**
- **Ημιαγωγούς**
- **Μονωτές**



- Το κάθε στέρεο υλικό ταξινομείται βάσει του ενεργειακού χάσματος (energy gap), που ορίζεται ως η απόσταση των γεμάτων από τις άδειες επιτρεπτές ηλεκτρονικές στάθμες και συμβολίζεται με E_g (eV).
- Το σημείο με $E_g=0\text{eV}$ βρίσκεται στην κορυφή της Ζώνης Σθένους

Ημιαγωγοί

- Η ζώνη σθένους (Valence band) είναι πλήρως κατειλημμένη από Ηλεκτρόνια, άρα χωρίς φορτίο
- Η ζώνη αγωγιμότητας (Conductivity band) είναι μερικώς κατειλημμένη από Ηλεκτρόνια, άρα με φορτίο
- Στους Ημιαγωγούς το Ενεργειακό Χάσμα είναι μη μηδενικό καθιστώντας τον Ημιαγωγό μονωτή, αλλά αρκετά μικρό ($0,1 - 1\text{eV}$) ώστε μικρά ποσά ενέργειας από εξωτερικούς παράγοντες να μπορούν να γεφυρώσουν τη Ζώνη Σθένους με τη Ζώνη Αγωγιμότητας, και ο Ημιαγωγός να αρχίσει να άγει.

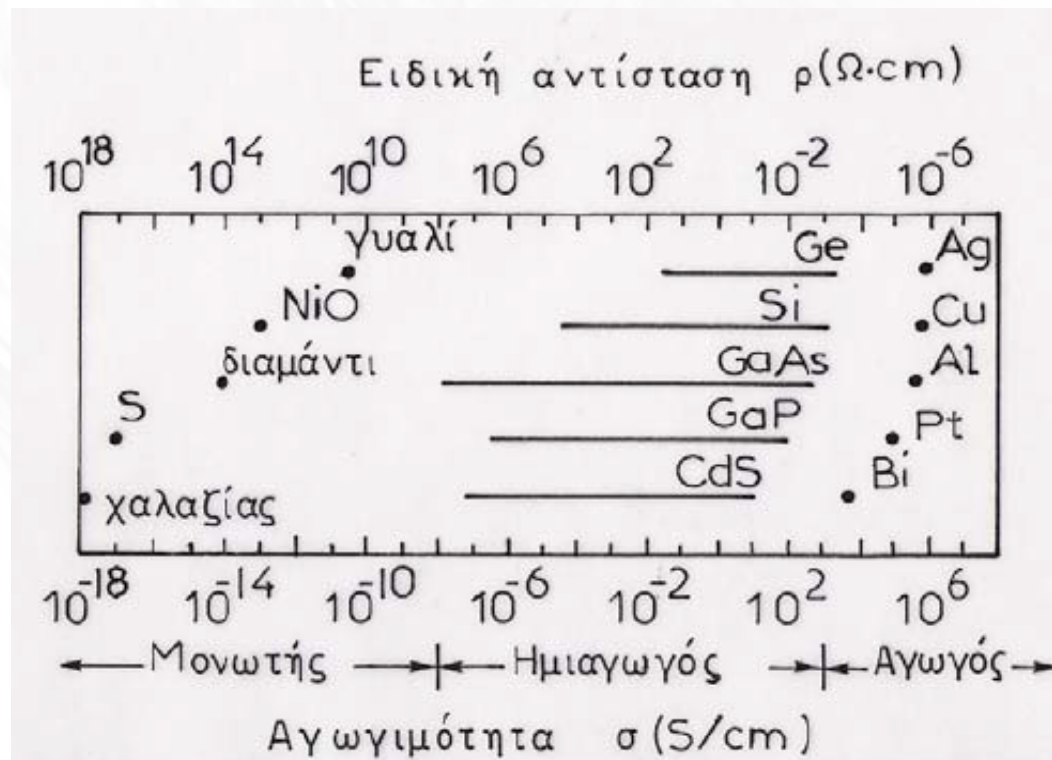
Ημιαγωγοί

- Ο Ημιαγωγός δεν άγει στο απόλυτο μηδέν.
- Όμως, σε θερμοκρασία δωματίου $T > 0$ K, και με $E_g > 0$ τα ηλεκτρόνια μπορούν να διεγερθούν θερμικά, και να περάσουν από τη **Ζώνη Σθένους** στη **Ζώνη Αγωγιμότητας** δημιουργώντας δύο φορείς φορτίου, ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μία οπή. Το ποσοστό αυτών είναι η αγωγιμότητα του υλικού, και υπολογίζεται από:

$$\text{Exp}(-E_g/2k_B T)$$

Ημιαγωγοί

- Σχετικό διάγραμμα υλικών βασισμένο στην Αγωγιμότητα σ , και ειδική αντίσταση ρ .



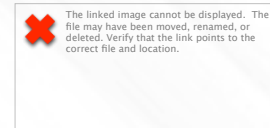
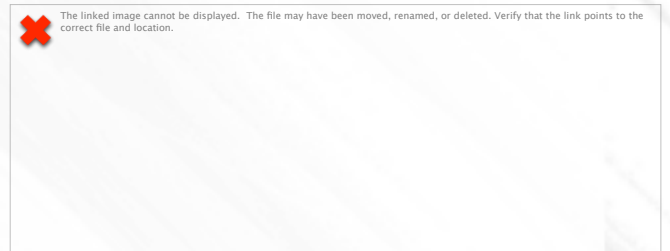
Ημιαγωγοί

- Το Ενεργειακό Χάσμα τείνει να μειώνεται στους Ημιαγωγούς, με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- Η σχέση του Ενεργειακού Χάσματος με τη θερμοκρασία περιγράφεται από

- τον εμπειρικό τύπο του Varshni

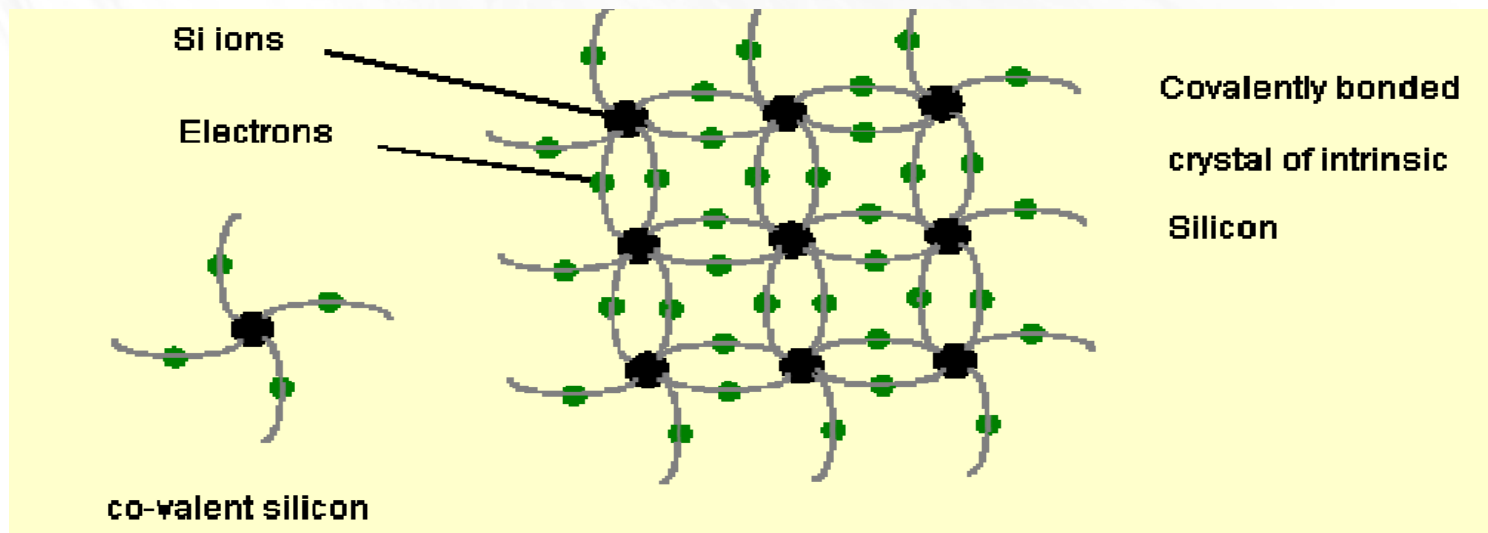
όπου α και β σταθερές του υλικού

- Και τον μαθηματικό τύπο



Ημιαγωγοί με προσμίξεις

- Η κρυσταλλική δομή του καθαρού πυριτίου Si (ενδογενές ή intrinsic Si) έχει 4 ελεύθερα ηλεκτρόνια και 4 οπές, καθιστώντας τον, ιδανικά, χωρίς φορτίο.

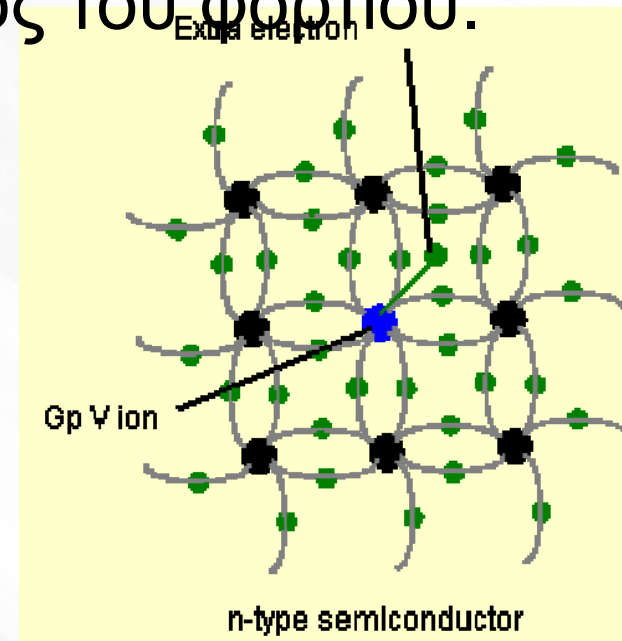


Ημιαγωγοί με προσμίξεις

- Όταν στο πυρίτιο προστεθούν προσμίξεις ονομάζεται εξωγενές ή εκφυλισμένος ή εμπλουτισμένος, και αποκτά πλεονασμό ή έλλειψη ηλεκτρονίων, δηλαδή φορτίο. Το ποσοστό των προσμίξεων καθορίζει το μέγεθος του φορτίου.

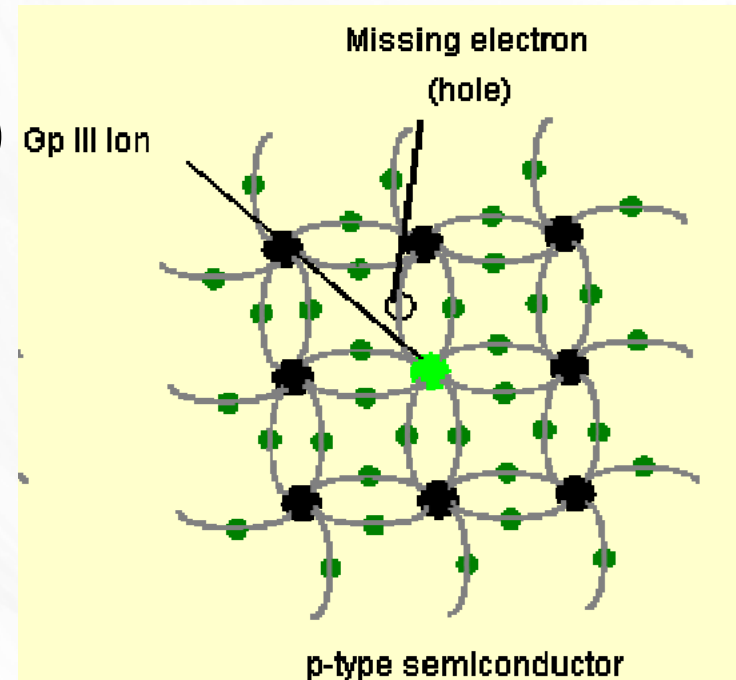
Προσμίξεις Δότη (donnor Impurities, n-type) είναι στοιχεία με 5 ελεύθερα ηλεκτρόνια (P,As,Sb).

Το ελεύθερο ηλεκτρόνιο χρειάζεται μόνο 0,05eV για να περάσει από τη Ζώνη Σθένους στη Ζώνη Αγωγιμότητας



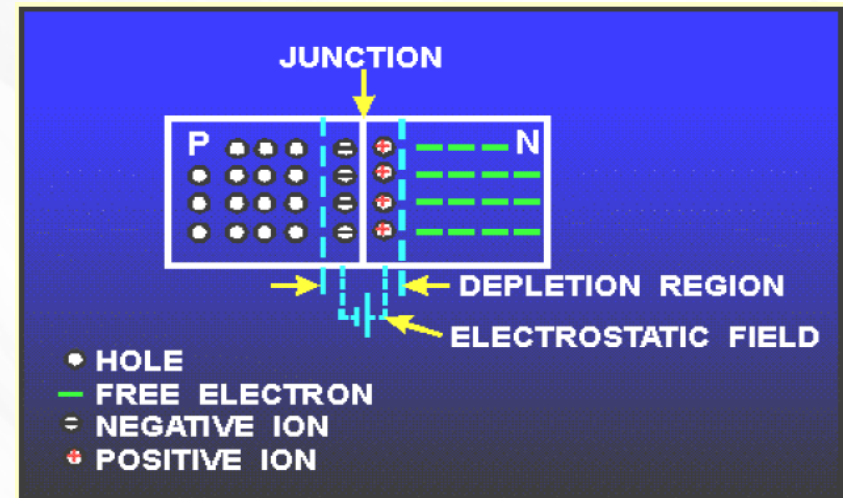
Ημιαγωγοί με προσμίξεις

- Προσμίξεις Δέκτη (acceptor Impurities, p-type) είναι στοιχεία με 3 ελεύθερα ηλεκτρόνια (B, Al, Ga, In).
- Υπάρχουν πολλές ελεύθερες οπές και ελάχιστα ελεύθερα ηλεκτρόνια.



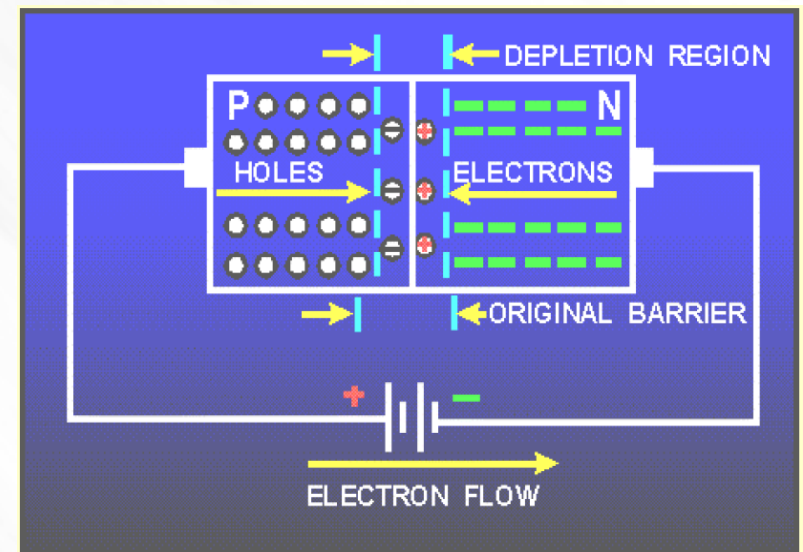
Επαφή p-n

- Η επαφή p-n αποτελείται από δυο μέρη εξωγενή ημιαγωγού, με μεγάλο ποσοστό προσμίξεων (heavily doped). Σε αδράνεια, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του εξωγενή ημιαγωγού n, καλύπτουν τις οπές του εξωγενή ημιαγωγού p.
- Αυτό δημιουργεί ένα εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που αποτρέπει περαιτέρω διάχυση φορτίων στο εσωτερικό του ημιαγωγού, σχηματίζοντας μια περιοχή απομόνωσης.



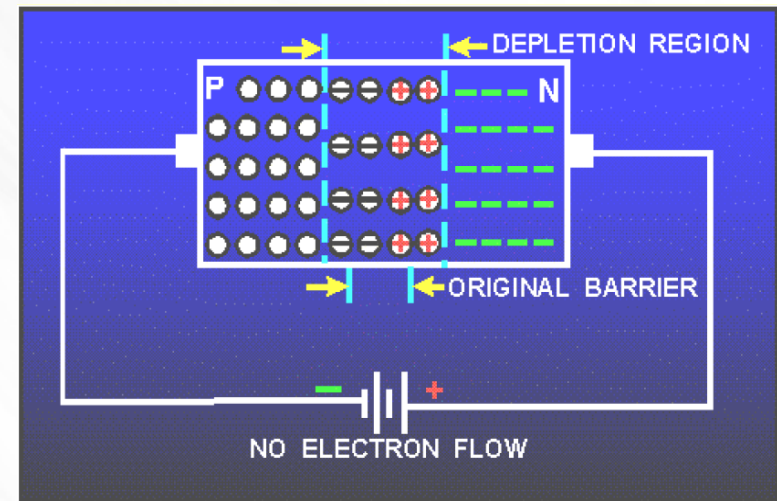
Επαφή p-n

- Όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο στα άκρα του ημιαγωγού με φορά από την περιοχή p στην περιοχή n, η Επαφή p-n πολώνεται ορθά.
- Κατά την Ορθή πόλωση, τα ηλεκτρόνια της περιοχής n ωθούνται να περάσουν την περιοχή απομόνωσης και να διαχυθούν στην p περιοχή του ημιαγωγού, ενώ παράλληλα δημιουργούνται οπές στην περιοχή n, που σταδιακά καλύπτονται από ηλεκτρόνια, και υπάρχει ροή ρεύματος



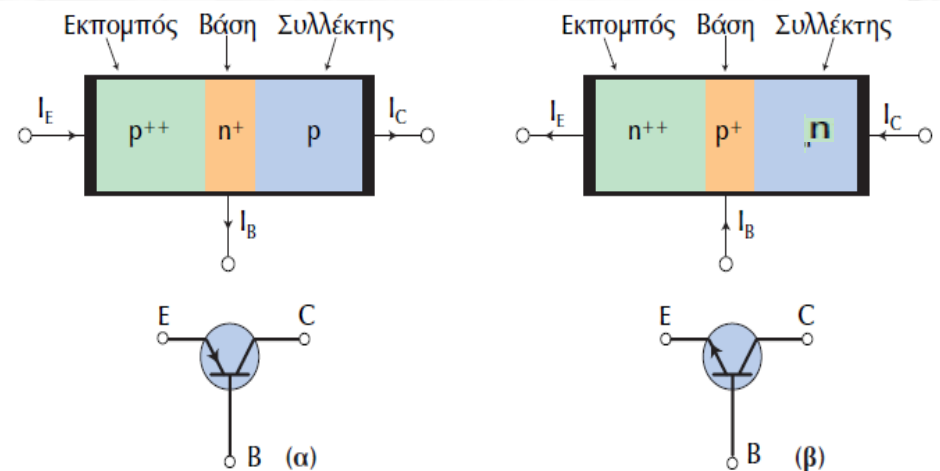
Επαφή p-n

- Όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο στα άκρα του ημιαγωγού με φορά από την περιοχή n στην περιοχή p, η Επαφή p-n πολώνεται ανάστροφα.
- Κατά την ανάστροφη πόλωση, τα ηλεκτρόνια ωθούνται στα άκρα της περιοχής n, απομακρύνοντας τα από την επαφή p-n και μεγαλώνοντας την περιοχή απομόνωσης. Ως αποτέλεσμα, η επαφή δεν διαρρέεται από ρεύμα.



• Τρανζίστορ npn και pnp

- Το Transistor είναι ένας κρύσταλλος ημιαγωγού αποτελούμενος από τρεις περιοχές εμπλουτισμένες με προσμίξεις, και ανάλογα με τον τύπο εμπλουτισμού του, διακρίνεται σε δύο τύπους: τύπου pnp (α) και τύπου npn (β).
- Οι τρεις περιοχές ανάλογα τη λειτουργία τους ονομάζονται Εκπομπός (Emitter), Βάση (Base) και Συλλέκτης (Collector)



•Περιοχές του Τρανζίστορ

- Ο Εκπομπός (E) είναι μία έντονα εμπλουτισμένη περιοχή τύπου p^{++} , με στόχο την εκπομπή φορτίων στην περιοχή της βάσης.
- Η Βάση (B) είναι μια λιγότερο εμπλουτισμένη περιοχή τύπου n^{-} , και πολύ λεπτή, αλλά μεγαλύτερη από την περιοχή απομόνωσης της επαφής $p-n$. Το λεπτό της πάχος επιτρέπει στα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από τον εκπομπό να τη διαπερνούν, και να καταλήγουν στο συλλέκτη, όπου και συλλέγονται.
- Ο συλλέκτης (C) είναι μια περιοχή p , λιγότερο εμπλουτισμένη από τον Εκπομπό και τη Βάση, και είναι μεγαλύτερη λόγω του ότι μέσα από αυτήν καταναλώνεται το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργεια που καταναλώνει του Τρανζίστορ.

•Περιοχές του Τρανζίστορ

- Ανάμεσα στις περιοχές του Τρανζίστορ δημιουργούνται δύο επαφές:

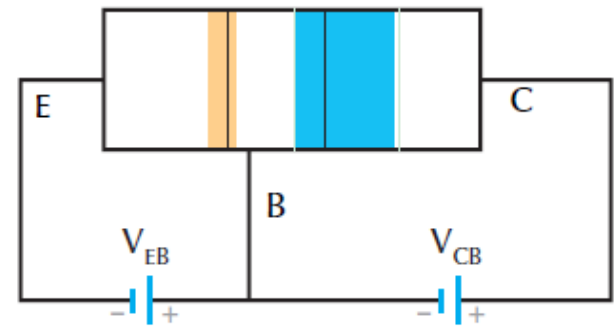
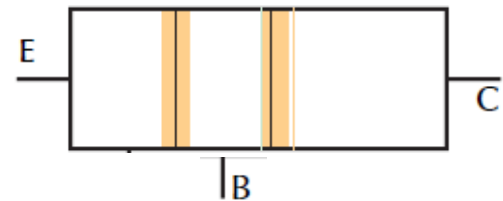
Μία p-n και μία n-p.

- Για το npn Τρανζίστορ
 - η n-p είναι η επαφή εκπομπού (E-B)
 - Και η n-p η επαφή συλλέκτη (B-C)

Πόλωση του Τρανζίστορ

- Μελετώντας ένα Τρανζίστορ τύπου npn, σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, ανάλογα την πόλωση του λειτουργεί σε τρεις περιοχές:

- Αποκοπή
- Γραμμική λειτουργία
- Κόρος



Πόλωση του Τρανζίστορ

- Όταν το τρανζίστορ δεν είναι πολωμένο, όπως και στις διόδους, ελεύθερα ηλεκτρόνια από την περιοχή n -- Εκπομπού (E) διαχέονται στην περιοχή p + της Βάσης (B), δημιουργώντας μια περιοχή απογύμνωσης στην επαφή Εκπομπού.
- Ομοίως συμβαίνει και στην επαφή συλλέκτη αλλά σε μικρότερη κλίμακα λόγω της λιγότερο εμπλουτισμένης περιοχής n του Συλλέκτη (C), ελεύθερα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν ποσοστό των οπών της Βάσης (B).
- Και στις δύο επαφές δημιουργείται φράγμα δυναμικού 0,7V για το πυρίτιο και 0,3V για το γερμάνιο.

Πόλωση του Τρανζίστορ

- Ηλεκτρικό Δυναμικό εφαρμόζεται στην επαφή Συλλέκτη πολώνοντας την ανάστροφα και δημιουργώντας μια μεγάλη περιοχή απογύμνωσης.
- Το Ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ Βάσης και Εκπομπού καθορίζει το μέγεθος της περιοχής απογύμνωσης των επαφών Εκπομπού και Συλλέκτη.
- Η μεγάλη περιοχή απογύμνωσης στην επαφή του Συλλέκτη, και οι περιορισμένοι ελεύθεροι φορείς φορτίου στην περιοχή του Συλλέκτη, αποτρέπουν το Ηλεκτρικό Δυναμικό που εφαρμόζεται στην επαφή Συλλέκτη να επηρεάζει την επαφή Εκπομπού.

ΑΠΟΚΟΠΗ

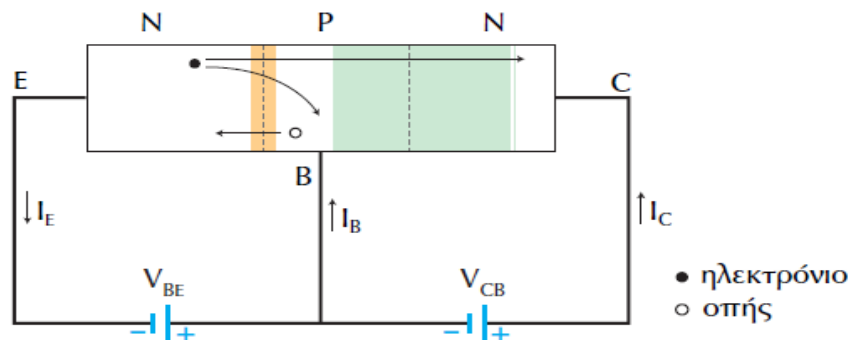
- Λειτουργία Αποκοπής σε Τρανζίστορ τύπου npn:
- Ηλεκτρικό Δυναμικό εφαρμόζεται μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού πολώνοντας την επαφή Συλλέκτη ανάστροφα και δημιουργώντας μεγάλη περιοχή απομόνωσης στην επαφή Συλλέκτη
- Ηλεκτρικό Δυναμικό εφαρμόζεται μεταξύ Βάσης και Εκπομπού ώστε η επαφή Εκπομπού να πολωθεί ανάστροφα ως να μην πολωθεί καθόλου.

Αποκοπή

- Στην περίπτωση που η περιοχή p^+ της Βάσης δεν πολώνεται, ή δεν εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού στα άκρα της, η περιοχή απομόνωσης της επαφής Εκπομπού διατηρείται και η επαφή δεν διαρρέεται από ρεύμα ($V_{BE}=0$).
- Στην περίπτωση που πολωθεί ανάστροφα η περιοχή απομόνωσης μεγαλώνει και η επαφή εξακολουθεί να μη διαρρέεται από ρεύμα.

Γραμμική Λειτουργία

- Γραμμική λειτουργία σε Τρανζίστορ τύπου npn:
- Ηλεκτρικό Δυναμικό εφαρμόζεται μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού, πολώνοντας την επαφή Συλλέκτη η Ανάστροφα, ομοίως δημιουργώντας μια μεγάλη περιοχή απομόνωσης στην επαφή Συλλέκτη
- Ηλεκτρικό Δυναμικό εφαρμόζεται στην περιοχή p+ της Βάσης πολώνοντάς την ορθά, αλλά με μέτρο όχι αρκετό για να άνει πλήρως η επαφή εκπομπού.



Γραμμική Λειτουργία

- Πολώνοντας ορθά την επαφή του εκπομπού CB μειώνουμε την περιοχή απομόνωσης της επαφής ώστε κάποιο ηλεκτρόνιο να μπορέσει να εισέλθει στην περιοχή p^+ της βάσης και να καλύψει μια οπή. Αυτό δημιουργεί ένα ζεύγος ελεύθερων φορέων φορτίου στις περιοχές της Βάσης και του Εκπομπού.
- Ένα ηλεκτρόνιο εισέρχεται στην περιοχή του εκπομπού για να καλύψει την οπή που δημιουργήθηκε.
- Ομοίως ένα ηλεκτρόνιο φεύγει από την περιοχή της βάσης για να δημιουργήσει μια οπή.
- Αυτό προκαλεί ένα μικρό ρεύμα επανασύνδεσης.

Γραμμική Λειτουργία

- Λόγο του ότι η περιοχή p^+ της βάσης είναι λιγότερο εμπλουτισμένη σε προσμίξεις από την περιοχή του εκπομπού, δεν θα εισέλθει μόνο ένα ηλεκτρόνιο για να καλύψει την οπή που δημιουργήθηκε στη βάση.
- Επίσης, λόγω του ότι η περιοχή p^+ της βάσης είναι πολύ λεπτή, τα ηλεκτρόνια που δεν κάλυψαν την οπή θα διαπεράσουν την περιοχή της βάσης και θα εισέλθουν στην περιοχή απομόνωσης του Συλλέκτη.

Γραμμική Λειτουργία

- Σε αυτό το σημείο, οι οπές που δημιουργήθηκαν στην περιοχή του εκπομπού έχουν ήδη καλυφθεί από ηλεκτρόνια λόγω του ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού.
- Οπές δημιουργούνται στην περιοχή του Συλλέκτη καθώς ηλεκτρόνια φεύγουν διαμέσου της πηγής του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού δυναμικού.
- Τα ηλεκτρόνια στην περιοχή απομόνωσης του συλλέκτη πλέον επηρεάζονται από το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο και οδηγούνται να καλύψουν τις οπές που δημιουργήθηκαν.

Γραμμική Λειτουργία

- Καθ' αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα ρεύμα ηλεκτρονίων που διαρρέει το τρανζίστορ πολλαπλάσιο του ρεύματος επανασύνδεσης στην περιοχή της Βάσης.
- Το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ εξαρτάται στην πραγματικότητα από το ηλεκτρικό δυναμικό στη βάση, και όχι από το ρεύμα βάσης.
- Το ρεύμα βάσης είναι αποτέλεσμα του ρεύματος του Εκπομπού.



The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

Λειτουργία στον Κόρο

- Στην περίπτωση λειτουργίας στον κόρο:
 - η επαφή Συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη και
 - η επαφή εκπομπού ορθά πολωμένη με ηλεκτρικό δυναμικό ώστε να άγει πλήρως.
- Το Τρανζίστορ άγει πλήρως με το μέγιστο δυνατό ρεύμα ηλεκτρονίων να το διαπερνά από τον εκπομπό στο συλλέκτη.

Λειτουργία στον Κόρο

- Σε συνδεσμολογία κοινής βάσης, με λειτουργία στον κόρο, η επαφή Συλλέκτη και η επαφή Εκπομπού πολώνονται ορθά, με το μέγιστο δυνατό ρεύμα να διαρρέει το τρανζίστορ

Περιοχές Λειτουργίας Τρανζίστορ

- Σχετικός Πίνακας Λειτουργίας Τρανζίστορ



Βιβλιογραφία

- Στοιχεία θεωρίας Ημιαγωγών - Σημειώσεις: Φυσική Στερεάς Κατάστασης , Τμήμα Φυσικής ΑΠΘ
- Introduction to Materials: Science for Engineers, Ch 19
- Γενικά Ηλεκτρονικά, Κεφάλαιο 4: Τρανζίστορ
- How transistors work?, ©1995 William J. Beaty, BSEE
- www.learnabout-electronics.org
- www.wikipedia.com