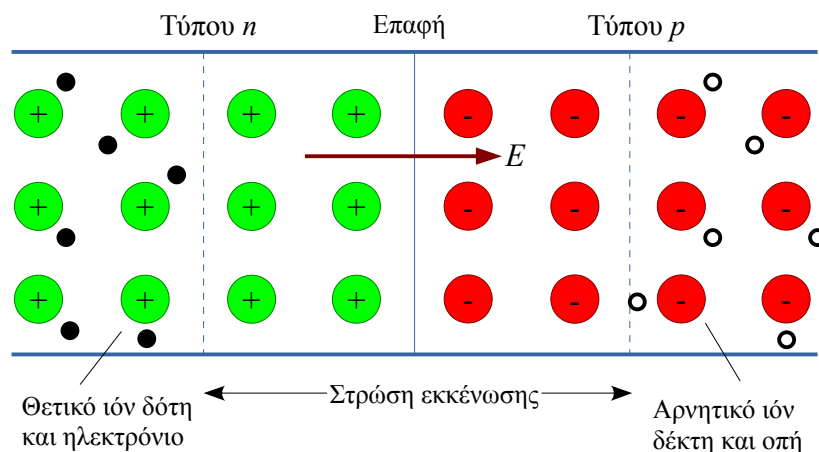


Δίοδος ημιαγωγού (Semiconductor Diode)

Δυναμικό επαφής: ενεργειακή ζώνη μιας σύνδεσης $p - n$

Η πιο απλή διάταξη ημιαγωγών είναι η σύνδεση $p - n$, ή *δίοδος* ημιαγωγού, μια συσκευή που επιτρέπει την ροή ρεύματος σε μια μόνο κατεύθυνση. Πρόκειται για έναν ημιαγωγό τύπου p σε επαφή με ημιαγωγό τύπου n . Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την ανάπτυξη ενός τύπου πάνω στον άλλο (κυρίως φωτολιθογραφία), αλλά για την ενεργειακή ανάλυση μπορούμε να υποθέσουμε ότι απλά τους φέρνουμε σε επαφή.

Πριν την επαφή, η περιοχή n έχει μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας που έχουν προέλθει από τις προσμίξεις του δότη. Το φορτίο αυτών των “ευκίνητων ηλεκτρονίων” εξισορροπείται από το φορτίο των θετικών ιόντων του δότη εξασφαλίζοντας ηλεκτροουδετερότητα. Ομοίως, στον ημιαγωγό τύπου p υπάρχει μεγάλος αριθμός “ευκίνητων οπών” το φορτίο των οποίων εξουδετερώνεται από το φορτίο των αρνητικών ιόντων του δέκτη. Όταν έρθουν σε επαφή θα υπάρξει μια καθαρή ροή ηλεκτρονίων από την περιοχή n στην περιοχή p : εκεί θα βρουν πολλές οπές με τις οποίες θα επανενωθούν. Ταυτόχρονα, οι οπές από την περιοχή p διαχέονται προς την περιοχή n , όπου επανενώνονται με τα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας. Το καθαρό αποτέλεσμα αυτής της διπλής διάχυσης και επανένωσης είναι η εκκένωση των περιοχών εκατέρωθεν της επαφής από τους πλειοψηφικούς “ευκίνητους φορείς”, οπότε και αυξάνεται η ηλεκτρική τους αντίσταση. Ταυτόχρονα, τα ακίνητα ιόντα δότη στην πλευρά του n και των ιόντων δέκτη στην πλευρά του p παραμένουν φορτισμένα δημιουργώντας φορτισμένες στρώσεις εκατέρωθεν της επαφής: μια θετική στρώση στην περιοχή του τύπου n και μια αρνητική στην περιοχή του p (σχήμα 1).

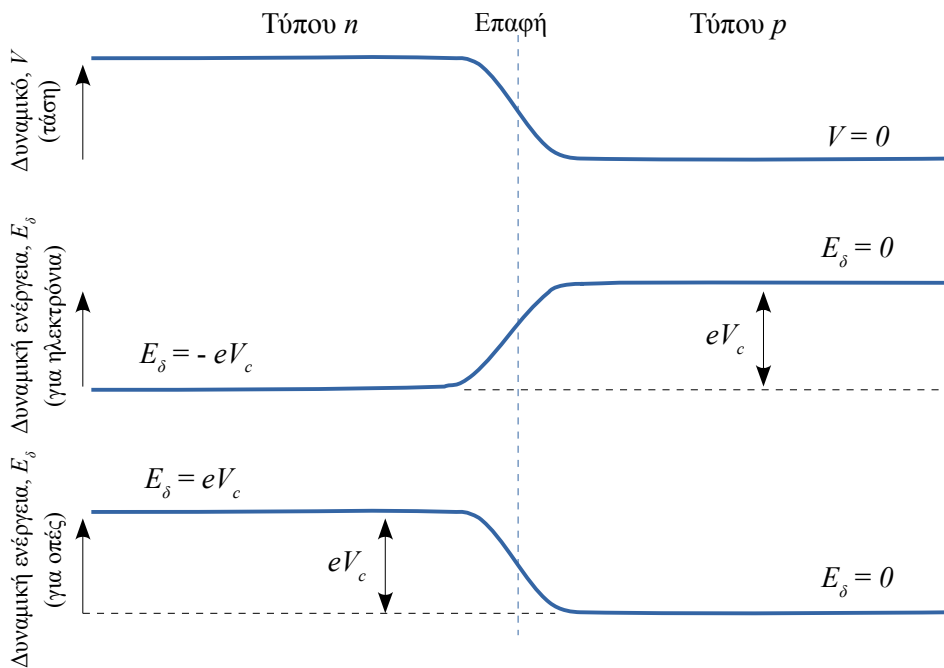


Σχήμα 1. Δημιουργία της στρώσης εκκένωσης (περιοχή χωρίς ευκίνητους φορείς φορτίου) στην επαφή $p - n$ εξαιτίας διάχυσης ηλεκτρονίων από την περιοχή p στην περιοχή n και οπών από την περιοχή n στην περιοχή p .

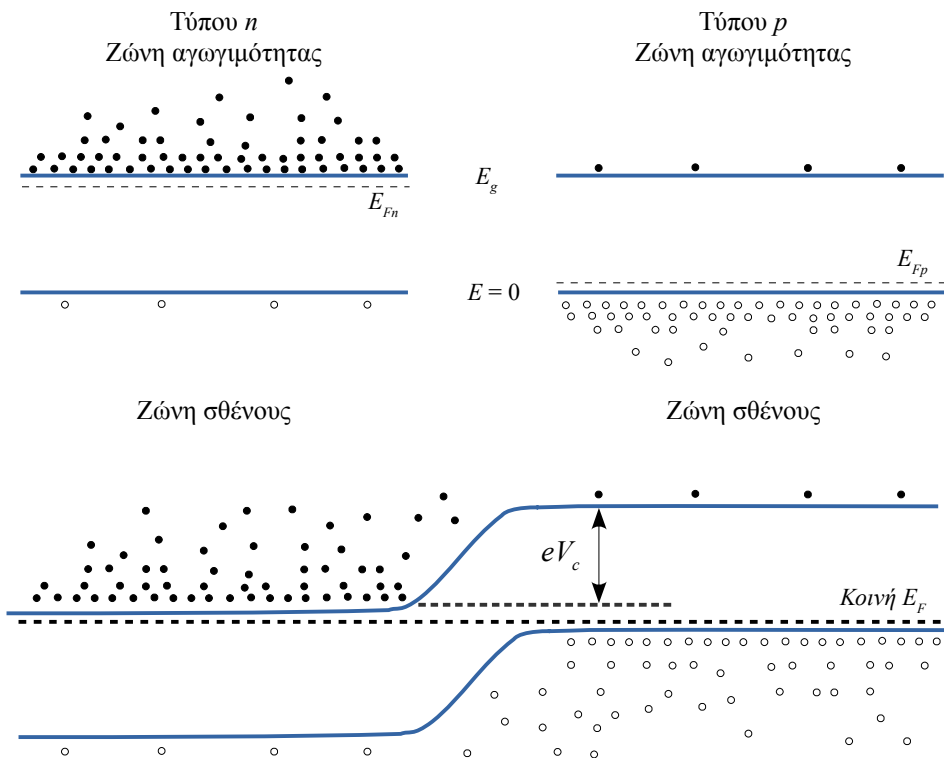
Η διάχυση των πλειοψηφικών φορέων από κάθε περιοχή διά της επαφής ολοκληρώνεται σύντομα. Ο λόγος είναι ότι οι στρώσεις φορτίου εκατέρωθεν της επαφής προκαλούν ένα ηλεκτρικό πεδίο E , που εναντιώνεται σε περαιτέρω διάχυση. Έτσι αποκαθίσταται ισορροπία και δεν υπάρχει ροή ρεύματος διά της διόδου.

Τα παραπάνω δίνουν μια κινητική εικόνα της αποκατάστασης ισορροπίας. Αυτή η αποκατάσταση μπορεί να περιγραφεί και ενεργειακά. Οι στρώσεις φορτίου προκαλούν μια διαφορά δυναμικού V_c μεταξύ των δύο πλευρών της επαφής, με την πλευρά n που είναι φορτισμένη θετικά να βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό από την πλευρά p που είναι αρνητικά φορτισμένη. Η μεταβολή του δυναμικού αναμένεται να είναι μονότονη κατά μήκος της περιοχής εκκένωσης.

Όταν ένα φορτίο q βρεθεί σε δυναμικό V , η δυναμική του ενέργεια είναι $E_\delta = qV$. Έτσι, η δυναμική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου στην περιοχή n είναι $E_\delta = -eV_c$, ενώ στην περιοχή p είναι 0, δηλ., η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου στην περιοχή p αυξάνεται κατά eV_c (σχήμα 2). Για τις οπές συμβαίνει το αντίθετο. Στην περιοχή n η δυναμική ενέργεια των οπών είναι $E_\delta = eV_c$, ενώ στην περιοχή p είναι 0. Αυτά τα ενεργειακά φράγματα σταματούν περαιτέρω ροή των πλειοψηφικών φορέων μέσω της επαφής. Έτσι, μια συνέπεια του δυναμικού επαφής είναι η μετατόπιση των ενεργειακών ζωνών προς υψηλότερες στάθμες στην περιοχή p σε σχέση με αυτές στην περιοχή n κατά μια ποσότητα eV_c . Αυτή η μετατόπιση σχετίζεται με την απαίτηση ότι η ενέργεια Fermi είναι ίδια εκατέρωθεν της επαφής (σχήμα 3).



Σχήμα 2. Πάνω εικόνα: διαφορά δυναμικού V_c εξαιτίας των θετικών ιόντων δότη στην περιοχή n και των αρνητικών ιόντων δότη στην περιοχή p της στρώσης εκκένωσης. Μεσαία εικόνα: φράγμα δυναμικής ενέργειας που συναντούν οι πλειοψηφικοί φορείς (ηλεκτρόνια) στην περιοχή n καθώς επιχειρούν να διασχίσουν την επαφή. Κάτω εικόνα: φράγμα δυναμικής ενέργειας που συναντούν οι πλειοψηφικοί φορείς (οπές) στην περιοχή p καθώς επιχειρούν να διασχίσουν την επαφή.



Σχήμα 3. Πάνω εικόνα: ενεργειακές ζώνες πριν την επαφή. Κάτω εικόνα: μετατόπιση των ενεργειακών ζωνών μετά την δημιουργία της επαφής. Η μετατόπιση οφείλεται στην αύξηση της δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου p σε σχέση με την περιοχή τύπου n .

Η απαίτηση της κοινής ενέργειας Fermi εκατέρωθεν της επαφής ορίζει και την τιμή του δυναμικού επαφής. Επειδή η θέση του επιπέδου Fermi σε σχέση με την δομή των ζωνών σε κάθε πλευρά δεν αλλάζει με την επαφή, η μετατόπιση στις ζώνες, eV_c θα πρέπει να είναι ίση με την διαφορά των επιπέδων Fermi πριν την επαφή

$$eV_c = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (1)$$

όπου E_{Fn} και E_{Fp} οι ενέργειες Fermi στις πλευρές n και p αντίστοιχα. Σε έναν ημιαγωγό προσμίξεων η θέση του επιπέδου Fermi εξαρτάται από την συγκέντρωση των προσμίξεων και την θερμοκρασία – το δυναμικό επαφής, V_c ορίζεται από αυτές τις δύο παραμέτρους. Τυπικά, για δίοδο πυριτίου το V_c είναι μεταξύ 0.6 και 0.9 V σε θερμοκρασία δωματίου.

Ρεύματα ισορροπίας κατά μήκος της επαφής $p - n$

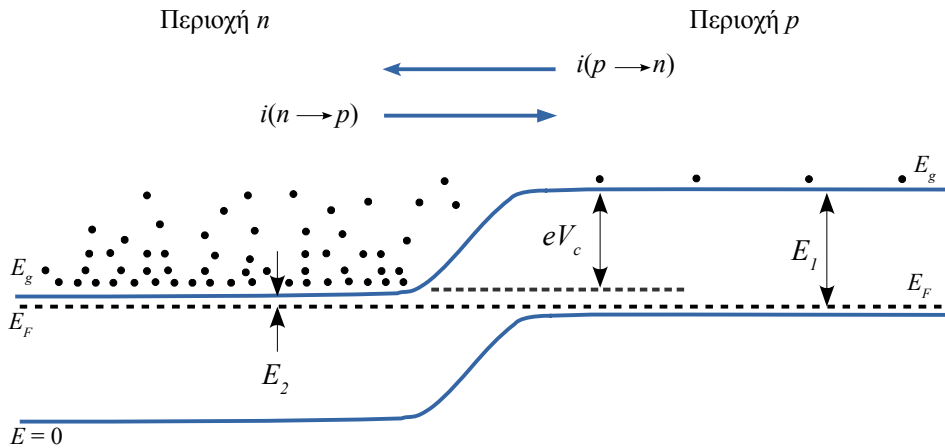
Στην παραπάνω ενότητα είδαμε πως η δημιουργία της επαφής $p - n$ προκαλεί την εμφάνιση ενός φράγματος δυναμικής ενέργειας eV_c που σταματάει την ροή των πλειοψηφικών φορέων κατά μήκος της επαφής. Αυτή η συνθήκη είναι μια δυναμική ισορροπία. Ηλεκτρόνια και σπές ρέουν συνεχώς κατά μήκος της επαφής – η καθαρή ροή είναι μηδέν γιατί ίσες ποσότητες ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ας δούμε τι συμβαίνει, π.χ., με την ροή ηλεκτρονίων. Ηλεκτρόνια υπάρχουν στην ζώνη αγωγιμότητας και στον τύπο n και στον τύπο p ημιαγωγού. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας έχουμε δει ότι είναι

$$N_e = N_c \exp\left(-\frac{E_g - E_F}{k_B T}\right) \quad (2)$$

όπου

$$N_c = \frac{1}{4} \left(\frac{2m^* k_B T}{\hbar^2 \pi} \right) \quad (3)$$

με m^* την ισοδύναμη μάζα του ηλεκτρονίου. Αν και η σχέση (2) δίνει την συγκέντρωση ηλεκτρονίων και για τους δύο τύπους ημιαγωγού, η αριθμητική τιμή του N_e σε θερμοκρασία δωματίου για τον τύπου p είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερος από αυτήν για τον τύπου n . Ο λόγος είναι ότι η διαφορά $E_g - E_F$ είναι πολύ μεγαλύτερη για τον τύπου p από ότι για τον τύπου n (σχήμα 4).



Σχήμα 4. Μετά την δημιουργία της επαφής αποκαθίσταται ισορροπία όπου δεν υπάρχει καθαρή ροή ηλεκτρονίων (ή σπών) κατά μήκος της επαφής. Ηλεκτρόνια, όμως, ρέουν. Τα σχετικά λίγα (μειοψηφικοί φορείς) στην περιοχή p δεν εμποδίζονται από το φράγμα δυναμικής ενέργειας διασχίζοντας την επαφή. Αυτή η ροή όμως εξισορροπείται από την ροή (στην αντίθετη κατεύθυνση) των ηλεκτρονίων στην περιοχή n με ενέργειες μεγαλύτερες από eV_c .

Τα ηλεκτρόνια (μειοψηφικοί φορείς) στην ζώνη αγωγιμότητας της περιοχής p δεν εμποδίζονται από το φράγμα δυναμικής ενέργειας στην διάσχιση της επαφής από την περιοχή p στην περιοχή n . Το ρεύμα από την p στην n , $i(p \rightarrow n)$ θα είναι ανάλογο του αριθμού του συνολικού αριθμού ηλεκτρονίων στην p . Αν υποθέσουμε έναν συντελεστή αναλογίας A αυτή η σχέση είναι

$$i(p \rightarrow n) = A \exp\left(-\frac{E_1}{k_B T}\right) \quad (4)$$

όπου $E_1 = E_g - E_F$ στην περιοχή p .

Στην περιοχή n υπάρχει μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων (πλειοψηφικοί φορείς) στην ζώνη αγωγιμότητας. Όμως, μόνο αυτά που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από ή ίση με την ενέργεια φράγματος, eV_c μπορούν να διασχίσουν την επαφή από την n στην p . Το ρεύμα ηλεκτρονίων, $i(n \rightarrow p)$ θα είναι ανάλογο με τον αριθμό των ηλεκτρονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από ή ίση με eV_c ,

$$i(n \rightarrow p) = AN_e f(E \geq eV_c) , \quad (5)$$

όπου N_e ο συνολικός αριθμός ηλεκτρονίων στην περιοχή n και $f(E \geq eV_c)$ το ποσοστό με ενέργειες μεγαλύτερες από ή ίσες με eV_c . Έχουμε αναφερθεί στην προσέγγιση της κατανομής Fermi-Dirac από την κατανομή Maxwell-Boltzmann σε θερμοκρασία δωματίου για τα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας του πυριτίου. Επιπλέον, για την κατανομή Maxwell-Boltzmann το ποσοστό των σωματιδίων με ενέργειες μεγαλύτερες ή ίσες από μια τιμή E_i δίνεται από τον παράγοντα Boltzmann, $\exp(-E_i/k_B T)$. Επομένως,

$$f(E \geq eV_c) = \exp\left(-\frac{eV_c}{k_B T}\right) , \quad (6)$$

και αντικατάσταση του N_e από την (2) και του $f(E \geq eV_c)$ από την (6) στην σχέση (5) δίνει

$$i(n \rightarrow p) = A \exp\left(-\frac{E_2 + eV_c}{k_B T}\right) , \quad (7)$$

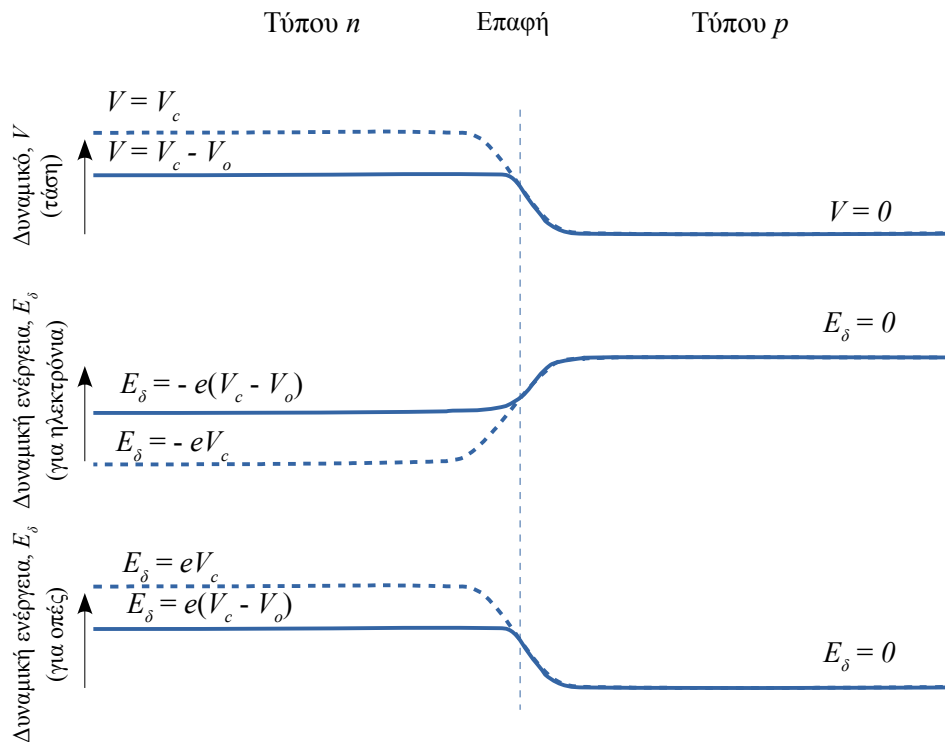
όπου $E_2 = E_g - E_F$ στην περιοχή n . Από το σχήμα 4 φαίνεται ότι $E_2 = E_1 + eV_c$ κι επομένως,

$$i(n \rightarrow p) = i(p \rightarrow n) . \quad (8)$$

Η ροή των ηλεκτρονίων από το p στο n είναι ίση με την αντίστροφη – η καθαρή ροή είναι μηδέν. Ίσως αυτό να μην αποτελεί κάποιο εντυπωσιακό αποτέλεσμα αλλά το συμπέρασμα είναι σημαντικό: Το ρεύμα ηλεκτρονίων από το p στο n (αυτό, δηλαδή, που προέρχεται από τους μειοψηφικούς φορείς) δεν επηρεάζεται από το ύψος του φράγματος δυναμικής ενέργειας γιατί όταν ένα ηλεκτρόνιο βρεθεί στην ζώνη αγωγιμότητας δεν υπάρχει φράγμα στην κατεύθυνση από το p στο n . Από την άλλη, το ρεύμα ηλεκτρονίων από το n στο p (που σχετίζεται με τους πλειοψηφικούς φορείς) εξαρτάται αντιστρόφως εκθετικά από το ύψος του φράγματος. Αυτή η ιδιότητα προσδίδει στην επαφή $p - n$ χαρακτήρα ανορθωτή ρεύματος: ρεύμα ρέει εύκολα προς μια κατεύθυνση και όχι στην αντίθετη.

Χαρακτηριστικά τάσης – έντασης ρεύματος μιας διόδου: ανόρθωση

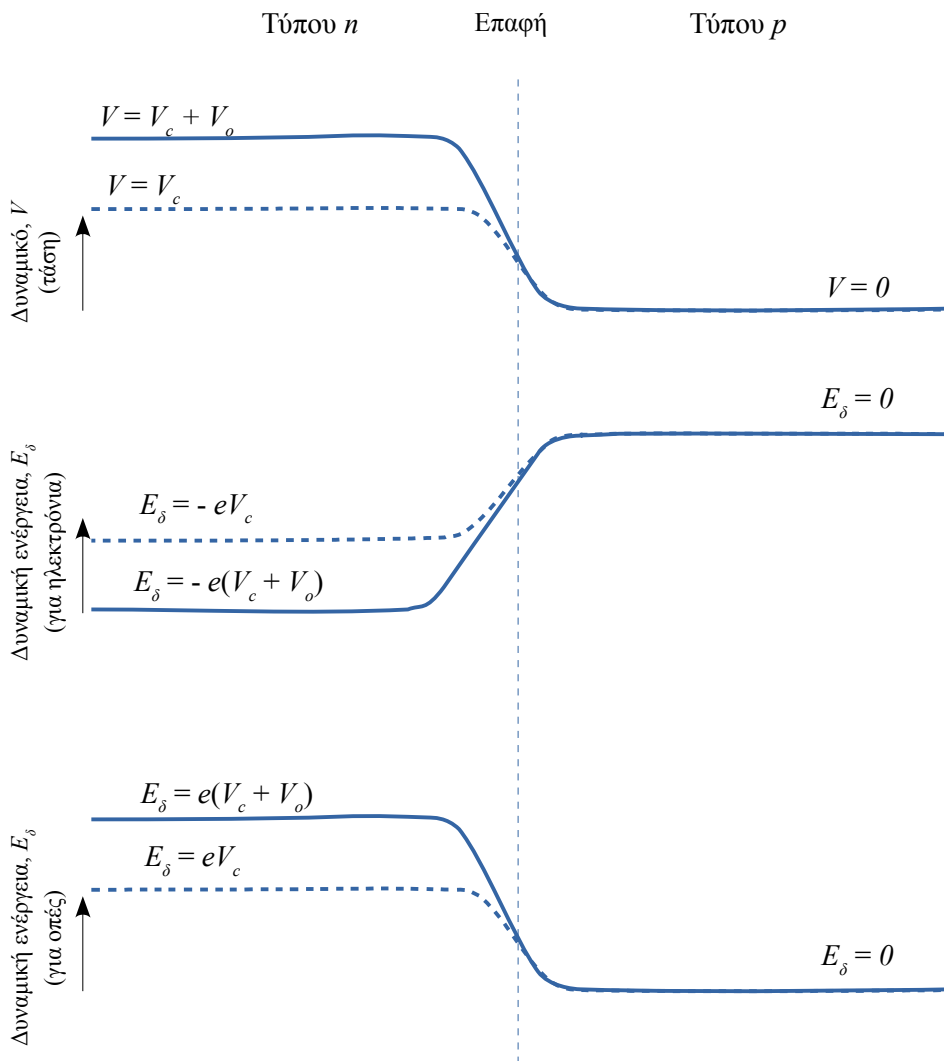
Τι θα συμβεί στο φράγμα δυναμικής ενέργειας αν συνδεθεί η επαφή $p - n$ με μια εξωτερική πηγή V_o ;



Σχήμα 5. Δίοδος ορθής πόλωσης. Πάνω εικόνα: Διαφορά δυναμικού μεταξύ περιοχών n και p . Η πηγή έχει μειώσει την διαφορά δυναμικού από V_c σε $V_c - V_o$. Μεσαία εικόνα: φράγμα δυναμικής ενέργειας για τα ηλεκτρόνια στην περιοχή n . Κάτω εικόνα: φράγμα δυναμικής ενέργειας για τις σπές στην περιοχή p .

Υπάρχουν δύο δυνατές συνδεσμολογίες: συνδέοντας τον θετικό πόλο με το p θέτουμε την δίοδο σε *ορθή πόλωση* (*forward bias*), ενώ συνδέοντας τον θετικό πόλο με το n θέτουμε την δίοδο σε *αντίστροφη πόλωση* (*reverse bias*). Έχουμε ήδη διαπιστώσει ότι η περιοχή γύρω από την επαφή εκκενώνεται από τους πλειοψηφικούς της φορείς. Η στρώση εκκένωσης έχει επομένως μεγάλη αντίσταση και το δυναμικό στα άκρα της θα είναι περίπου V_o . Στην περίπτωση της ορθής πόλωσης η πηγή μειώνει το δυναμικό της περιοχής n σχετικά με αυτό της περιοχής p κατά V_o , και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο περιοχών μειώνεται σε $V_c - V_o$ (σχήμα 5).

Ταυτόχρονα με την μείωση του δυναμικού μεταξύ των δύο περιοχών της επαφής επέρχεται και μια μείωση του ενεργειακού φράγματος που συναντούν οι πλειοψηφικοί φορείς καθώς επιχειρούν να διασχίσουν την επαφή. Στην περιοχή n η δυναμική ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι τώρα $E_\delta = -e(V_c - V_o)$ ενώ στην περιοχή p είναι $E_\delta = 0$. Αντίστοιχα, για τις οπές στην περιοχή n η δυναμική ενέργεια είναι $E_\delta = e(V_c - V_o)$ ενώ στην περιοχή p είναι $E_\delta = 0$. Αυτή η μείωση του ενεργειακού φράγματος θα αυξήσει σημαντικά την ροή των πλειοψηφικών φορέων που διασχίζουν την επαφή, προκαλώντας ένα μεγάλο ρεύμα μέσω της διόδου. Πριν εξετάσουμε αυτό το ρεύμα ας δούμε τι προκαλεί η συνδεσμολογία της διόδου σε αντίστροφη πόλωση. Σε αυτήν την περίπτωση η πηγή αυξάνει το δυναμικό της περιοχής n σε σχέση με αυτό της περιοχής p κατά V_o . Επειδή το δυναμικό της n είναι ήδη αυξημένο κατά V_c , η διαφορά τώρα θα αυξηθεί σε $V_c + V_o$. Επομένως, το φράγμα δυναμικής ενέργειας που συναντούν οι πλειοψηφικοί φορείς θα αυξηθεί από την μη πολωμένη τιμή, eV_c σε αυτήν της αντίστροφης πόλωσης, $e(V_c + V_o)$ (σχήμα 6). Άρα, σε ορθή πόλωση το ενεργειακό φράγμα είναι $e(V_c - V_o)$ ενώ σε αντίστροφη $e(V_c + V_o)$, και αν υιοθετήσουμε την σύμβαση ότι το V_o είναι θετικό στην ορθή πόλωση και αρνητικό στην αντίστροφη το φράγμα δυναμικής ενέργειας σε μια δίοδο $p - n$ είναι $e(V_c - V_o)$.



Σχήμα 6. Δίοδος αντίστροφης πόλωσης.

Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την καθαρή ροή φορέων φορτίου κατά την ορθή και την αντίστροφη πόλωση κατά μήκος της επαφής. Ας δούμε πάλι την ροή ηλεκτρονίων. Το καθαρό ρεύμα είναι

$$i = i(n \rightarrow p) - i(p \rightarrow n) \quad (9)$$

Ο πρώτος όρος είναι ανάλογος του αριθμού των ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας της περιοχής n με ενέργειες μεγαλύτερες από το ενεργειακό φράγμα, που σε πόλωση είναι $e(V_c - V_o)$,

$$i(n \rightarrow p) = A \exp\left(-\frac{E_2 + e(V_c - V_o)}{k_B T}\right), \quad (10)$$

όπου $E_2 = E_g - E_F$ στην περιοχή n . Ο δεύτερος όρος είναι ίδιος για με την μη πολωμένη περίπτωση γιατί δεν υπάρχει φράγμα για τα ηλεκτρόνια από την p στην n . Επομένως,

$$i = A \exp\left(-\frac{E_2 + e(V_c - V_o)}{k_B T}\right) - A \exp\left(-\frac{E_1}{k_B T}\right) \quad (11)$$

Επειδή $E_2 + eV_c = E_1$ η παραπάνω σχέση γίνεται

$$i = i_o \left[\exp\left(+\frac{eV_o}{k_B T}\right) - 1 \right], \quad (12)$$

με

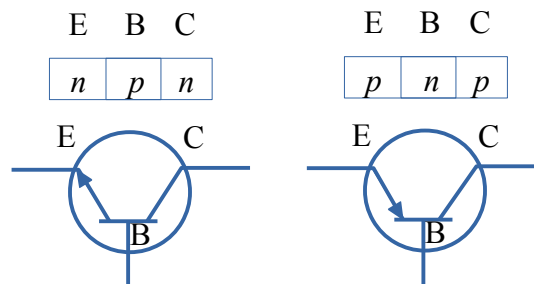
$$i_o = A \exp\left(-\frac{E_1}{k_B T}\right) \quad (13)$$

Σημειώνεται ότι το i_o είναι το ρεύμα που σχετίζεται με τους μειοψηφικούς φορείς (ηλεκτρόνια) από την περιοχή p στην περιοχή n , καθώς το E_1 παραμένει αμετάβλητο από την εφαρμογή της τάσης της πηγής. Το i_o ονομάζεται *αντίστροφο ρεύμα κορεσμού*. Σε μια δίοδο πυριτίου είναι περίπου 0.1 μA . Αυτή είναι πολύ μικρή τιμή καθώς τα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού τύπου p είναι πολύ λίγα γιατί το E_1 είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με την θερμική ενέργεια $k_B T$ σε θερμοκρασία δωματίου.

Η σχέση (13) είναι η *εξίσωση δίοδου*. Επειδή το V_o είναι αρνητικό στην αντίστροφη πόλωση ο εκθετικός όρος γίνεται αμελητέος για σχετικά χαμηλές τάσεις και παραμένει ένα *μικρό* σταθερό ρεύμα ηλεκτρονίων, $i \approx -i_o$ (αρνητικό γιατί είναι από το p στο n). Δεν απαιτείται μεγάλη τάση για την εμφάνιση του. Σε θερμοκρασία δωματίου, $k_B T = 0.025$ eV. Αν $V_o = 0.1$ V τότε $i = i_o(e^4 - 1) = -0.98 i_o$. Από την άλλη, αν η δίοδος είναι σε ορθή πόλωση το ρεύμα αυξάνεται πολύ γρήγορα με την τάση. Π.χ., αν $V_o = 0.1$ V, $i = i_o(e^4 - 1) = 54 i_o$, ενώ αν $V_o = 0.5$ V, $i = i_o(e^{20} - 1) = 4.8 \times 10^8 i_o$. Στην πράξη, η αύξηση δεν είναι τόσο γρήγορη εξαιτίας της αντίστασης του ίδιου του ημιαγωγού και των υπολοίπων αντιστάσεων του κυκλώματος. Το ρεύμα σε ψηφιακά κυκλώματα περιορίζεται μέσω αντιστάσεων σε μερικά mA. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η *τάση κατά μήκος μιας επαφής σε ορθή πόλωση να μην ξεπερνάει μερικά δέκατα του βολτ* - 0.6 V ή λιγότερα είναι τυπικά για μια δίοδο πυριτίου.

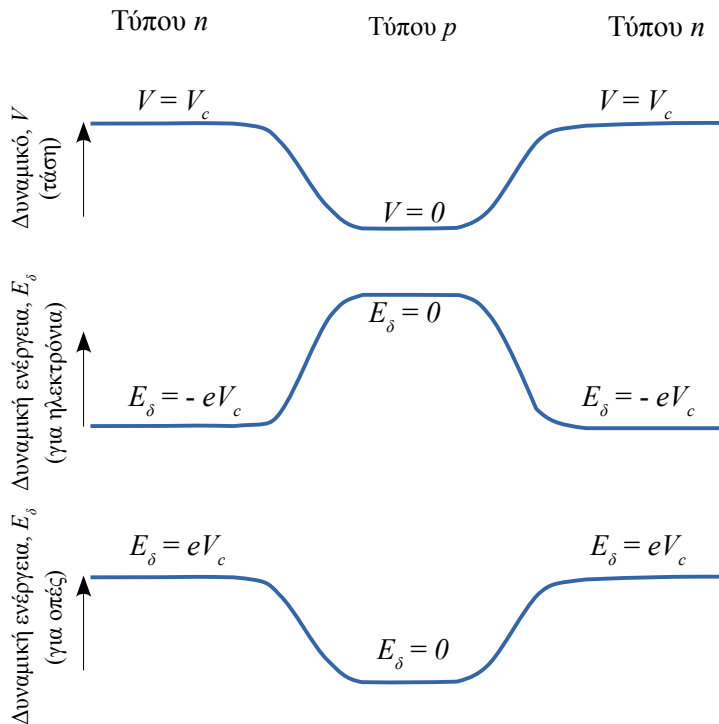
Τρανζίστορ διπολικής επαφής (Bipolar Junction Transistor – BJT)

Όταν μια στρώση ημιαγωγού πυριτίου τύπου n παρεμβληθεί μεταξύ δύο στρώσεων ημιαγωγού πυριτίου τύπου p δημιουργείται *τρανζίστορ pnp* . Αν μια στρώση ημιαγωγού πυριτίου τύπου p παρεμβληθεί μεταξύ δύο στρώσεων ημιαγωγού πυριτίου τύπου n δημιουργείται *τρανζίστορ npn* . Η ενδιάμεση στρώση ονομάζεται *βάση* (*base* – B) και οι δύο ακριανές είναι ο *εκπομπός* (*emitter* – E) και ο *σλλέκτης* (*collector* – C).



Σχήμα 7. Διάταξη και σύμβολο τρανζίστορες pnp και npn .

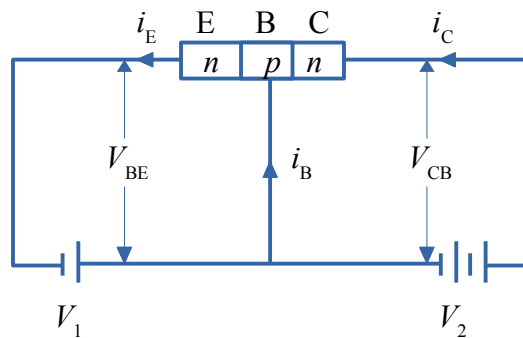
Αν υποθέσουμε ότι οι δύο επαφές είναι συμμετρικές (ο εκπομπός κι ο συλλέκτης έχουν ίση συγκέντρωση προσμίξεων) τότε η τάσεις επαφής V_c μεταξύ εκπομπού και βάσης και μεταξύ βάσης και συλλέκτη θα είναι ίσες (σχήμα 8).



Σχήμα 8. Διαφορές δυναμικού και φράγματα δυναμικής ενέργειας μεταξύ των τριών τμημάτων ενός τρανζίστορ (εκπομπού, βάσης, συλλέκτη).

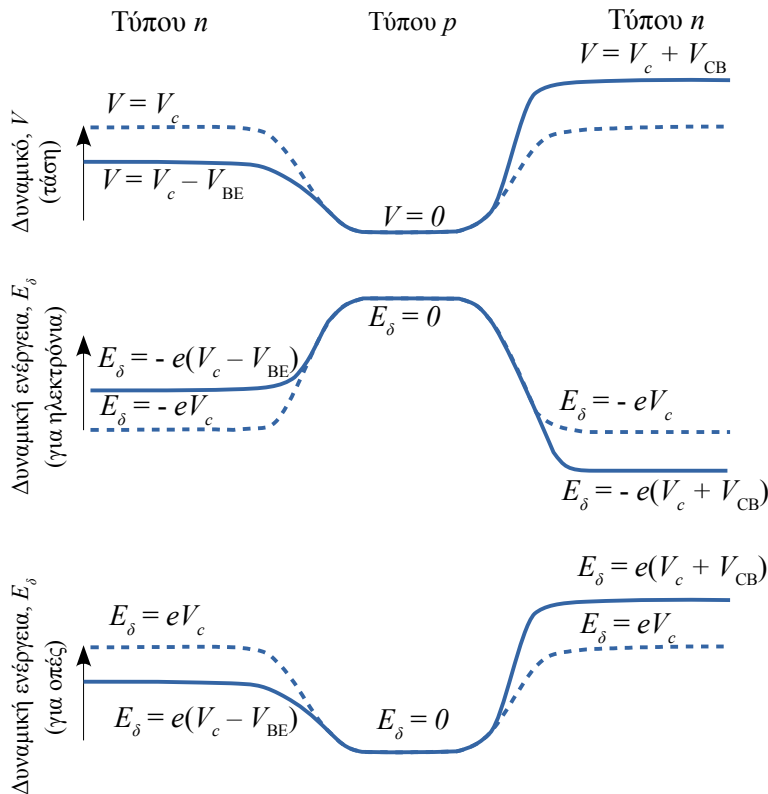
Διάταξη κοινής βάσης

Για να έχουμε μια αίσθηση των βασικών χαρακτηριστικών ενός τρανζίστορ ως συσκευή ενός κυκλώματος ας δούμε το παράδειγμα του κυκλώματος στο σχήμα 9.



Σχήμα 9. Τρανζίστορ σε διάταξη κοινής βάσης. Η φορά των ρευμάτων ακολουθεί είναι η συμβατική (αντίθετα με την ροή των ηλεκτρονίων).

Το αριστερό μέρος του κυκλώματος που περιλαμβάνει την πηγή V_1 , τον εκπομπό και την βάση είναι ένα κύκλωμα με δίοδο σε ορθή πόλωση. Το δεξί μέρος του κυκλώματος που περιλαμβάνει την πηγή V_2 , τον συλλέκτη και την βάση είναι ένα κύκλωμα με δίοδο σε αντίστροφη πόλωση. Η βάση είναι κοινή στα δύο μέρη του κυκλώματος (κύκλωμα διάταξης κοινής βάσης). Επειδή η αντίσταση στις στρώσεις εκκένωσης στις δύο επαφές είναι μεγάλη μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τάση κάθε πηγής μεταφέρεται σχεδόν εξολοκλήρου κατά μήκος της αντίστοιχης επαφής. Η πηγή V_1 θα αυξήσει την τάση στην βάση τύπου p σε σχέση με τον εκπομπό τύπου n κατά ένα ποσό, V_{BE} . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ εκπομπού και βάσης σε $V_c - V_{BE}$. Στο δεξί μέρος του κυκλώματος συμβαίνει το αντίθετο: η πηγή V_2 μειώνει το δυναμικό της βάσης σε σχέση με τον συλλέκτη κατά ένα ποσό, V_{CB} . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ εκπομπού και βάσης σε $V_c + V_{CB}$. Όπως και στην περίπτωση της διόδου, η συνέπεια στην δυναμική ενέργεια είναι η μείωση του φράγματος στην επαφή εκπομπού – βάσης και η αύξηση του φράγματος στην επαφή συλλέκτη – βάσης (σχήμα 10).



Σχήμα 10. Πάνω εικόνα: μείωση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ εκπομπού και βάσης κατά την τάση της πηγής V_1 του σχήματος 9 και αύξηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ συλλέκτη και βάσης κατά την τάση της πηγής V_2 του ίδιου σχήματος. Μεσαία και κάτω εικόνες: φράγματα δυναμικής ενέργειας για τα ηλεκτρόνια και τις οπές αντίστοιχα.

Η μείωση του φράγματος στην επαφή εκπομπού – βάσης επιτρέπει ηλεκτρόνια να περάσουν από τον εκπομπό στην βάση και οπές από την βάση στον εκπομπό. Τα ηλεκτρόνια που ούτε επανενώνονται με τις οπές στην βάση, ούτε ρέουν κατά μήκος του καλωδίου στην βάση θα διαχυθούν μέσω αυτής και θα φτάσουν στην επαφή της με τον συλλέκτη. Εκεί θα βρεθούν απέναντι σε μια θετική διαφορά τάσης $V_c + V_{CB}$ (αρνητική δυναμική ενέργεια) και θα επιταχυνθούν διαμέσου της επαφής, οπότε “συλλέγονται” στον συλλέκτη.

Ας δούμε τα ρεύματα στον εκπομπό, i_E στον συλλέκτη, i_C και την βάση, i_B , λαμβάνοντας υπόψη, ότι, π.χ., κάθε ηλεκτρόνιο που φεύγει διαμέσου της επαφής με την βάση αναπληρώνεται από ένα ηλεκτρόνιο από το καλώδιο ρεύματος. Επίσης, μια οπή που περνάει από την βάση στον εκπομπό και επανενώνεται με ηλεκτρόνιο προκαλεί αύξηση του φροτίου κατά $+e$, και για να αποκατασταθεί ουδετερότητα θα πρέπει πάλι να περάσει ένα ηλεκτρόνιο από το καλώδιο στον εκπομπό. Τα ίδια ισχύουν και για τον συλλέκτη. Η διαφορά των φορέων που διασχίζουν τις δύο επαφές είναι το ρεύμα της βάσης.

Το ρεύμα στον εκπομπό αποτελείται από ένα ρεύμα ηλεκτρονίων (πλειοψηφικά ηλεκτρόνια που περνούν από τον εκπομπό στην βάση), i_{eE} και ένα ρεύμα οπών (πλειοψηφικές οπές που περνούν από την βάση στον εκπομπό), i_{pE}

$$i_E = i_{eE} + i_{pE} \quad (14)$$

Σε τρανζίστορ του εμπορίου η συγκέντρωση προσμίξεων στον εκπομπό είναι πολύ μεγαλύτερη από ό, τι στην βάση. Επειδή το ρεύμα που διασχίζει την επαφή δεν εξαρτάται μόνο από το ύψος του φράγματος αλλά και από τον αριθμό των πλειοψηφικών φορέων, $i_{pE} \ll i_{eE}$ κι έτσι

$$i_E \approx i_{eE} \quad (15)$$

Ας δούμε το ρεύμα στον συλλέκτη. Η κύρια συνεισφορά εδώ είναι από τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται προς την βάση και διαχεόνται μέσω αυτής χωρίς να επανενωθούν με οπές. Αν το ποσοστό αυτών των ηλεκτρονίων είναι α τότε η συνεισφορά τους είναι αi_E . Η τιμή του α εξαρτάται από δύο παράγοντες: (α) τον χρόνο μέσης ζωής των μειοψηφικών φορέων, τ_e (ο χρόνος που ένα ηλεκτρόνιο επιβιώνει στην βάση χωρίς να επανενωθεί με οπή) και (β) τον χρόνο που απαιτείται για την διάχυση διαμέσου της βάσης, τ_D . Μια τυπική τιμή για το τ_e είναι 10^{-4} s και μπορεί να αυξηθεί με την μείωση της συγκέντρωσης των προσμίξεων στην βάση. Αν η βάση γίνει πολύ λεπτή μπορεί να μειωθεί η τιμή του τ_D . Για βάση πάχους 0.1 mm ο χρόνος διάχυσης είναι της τάξης 10^{-6} s. Έτσι, πρακτικά όλα τα ηλεκτρόνια μπορούν να διασχίσουν την βάση και να φτάσουν στον συλλέκτη. Τυπικές τιμές για το α είναι από 0.900 έως 0.998.

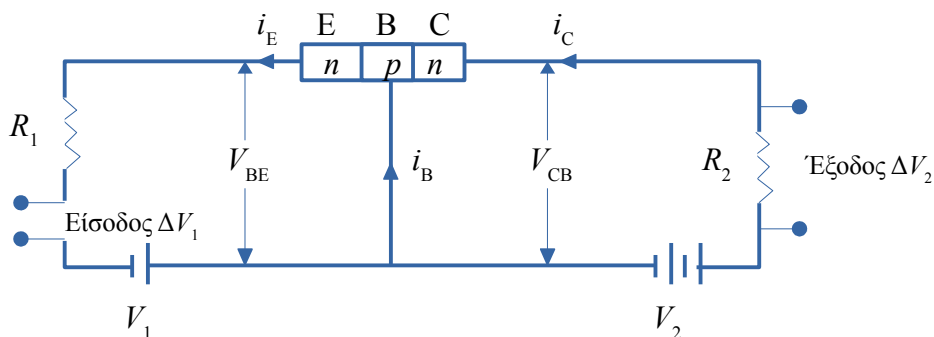
Επειδή η επαφή βάση – συλλέκτη είναι σε αντίστροφη πόλωση δεν υπάρχει συνεισφορά από πλειοψηφικούς φορείς (οπές στην βάση και ηλεκτρόνια στον συλλέκτη) στο i_C . Η μοναδική επιπλέον συνεισφορά είναι από το μικρό αντίστροφο ρεύμα κορεσμού i_o εξαιτίας της ροής μειοψηφικών φορέων κατά μήκος της επαφής συλλέκτη – βάσης, το οποίο μπορούμε να αγνοήσουμε

$$i_C = \alpha i_E + i_o \approx \alpha i_E \quad (16)$$

Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι το ρεύμα συλλέκτη ουσιαστικά καθορίζεται από το ρεύμα του εκπομπού, που καθορίζεται από την διαφορά δυναμικού μεταξύ βάσης και εκπομπού, V_{BE} . Είναι ουσιαστικά ανεξάρτητο από την διαφορά δυναμικού μεταξύ συλλέκτη και βάσης, V_{CB} . Υπάρχει, βέβαια, η εξάρτηση του α από το V_{CB} που μπορεί να εμφανίσει διακύμανση έως 0.1% όταν το δεύτερο μεταβάλλεται από 0 V έως 10 V. Ο λόγος είναι ότι το εύρος της στρώσης εκκένωσης στην επαφή εξαρτάται από την διαφορά δυναμικού κατά μήκος της. Έτσι, καθώς αυξάνεται το δυναμικό αντίστροφης πόλωσης στην επαφή συλλέκτη – βάσης η στρώση εκκένωσης διεισδύει βαθύτερα και στην βάση και στον συλλέκτη, που σημαίνει ότι η “εενργή βάση” (η περιοχή όπου υπάρχουν ελεύθερες οπές) συρρικνώνεται. Όταν συμβεί αυτό η πιθανότητα για επανένωση μέσα στην βάση μειώνεται και έτσι το α αυξάνεται.

Το τρανζίστορ ως ενισχυτής τάσης

Στο σχήμα 11 φαίνεται μια τροποποιημένη εκδοχή της διάταξης κοινής βάσης. Μια μικρή αντίσταση R_1 έχει συνδεθεί στο κύκλωμα εκπομπού – βάσης και μια μεγαλύτερη R_2 στο κύκλωμα συλλέκτη – βάσης.



Σχήμα 11. Τροποποιημένο κύκλωμα διάταξης κοινής βάσης με μικρή R_1 και μια μεγάλη R_2 αντίσταση ώστε να λειτουργήσει ως ενισχυτής τάσης.

Αυτές οι δύο αντιστάσεις, ενώ μειώνουν τις διαφορές δυναμικού στις δύο επαφές (η πτώση τάσης σε μια αντίσταση R που διαρρέεται από ρεύμα i είναι iR) δεν επηρεάζουν τον τύπο πόλωσης. Επίσης, η μείωση στο V_{CB} δεν επηρεάζει το i_C που, όπως είδαμε, καθορίζεται από το i_E .

Το ρεύμα i_E περιορίζεται από την αντίσταση R_1 , που συνήθως είναι μικρή (π.χ., 100 Ω) και την ισοδύναμη αντίσταση R_e του κυκλώματος ορθής πόλωσης εκπομπού – βάσης. Αυτό το ρεύμα επανεμφανίζεται στο κύκλωμα εξόδου ως $i_C = \alpha i_E$ και ρέει διαμέσου μιας μεγάλης αντίστασης R_2 (π.χ., 50 kΩ), προκαλώντας μεγάλη μείωση της τάσης εξόδου. Οι μεταβολές στα ρεύματα είναι

$$\Delta i_E = \frac{\Delta V_1}{R_1 + R_e} \quad (17)$$

και

$$\Delta i_C = \alpha \Delta i_E = \alpha \frac{\Delta V_1}{R_1 + R_e} \quad (18)$$

Η τάση εξόδου θα αυξηθεί κατά

$$\Delta V_2 = R_2 \Delta i_C \quad (19)$$

Έτσι,

$$\Delta V_2 = \alpha \frac{R_2}{R_1 + R_e} \Delta V_1 \quad (20)$$

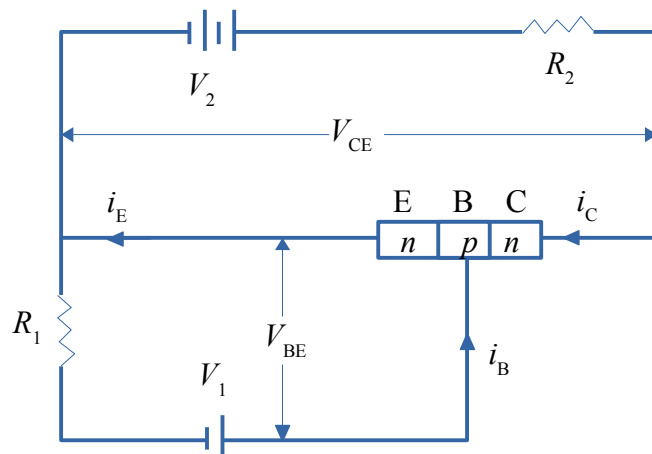
κι επειδή $\alpha \approx 1$,

$$\Delta V_2 \approx \frac{R_2}{R_1 + R_e} \Delta V_1 \quad (21)$$

Η ισοδύναμη αντίσταση R_e δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την τάση κατά μήκος της επαφής. Αυτό συμβαίνει επειδή σε μια επαφή $p - n$ το ρεύμα δεν αυξάνεται γραμμικά με την τάση [δεν ακολουθεί τον νόμο του Ohm, βλ. σχέση (12)]. Για ορθή πόλωση, για τάση μεγαλύτερη από μερικά δέκατα του βολτ, το ρεύμα αυξάνεται πολύ γρήγορα με την τάση που σημαίνει ότι το R_e είναι πολύ χαμηλό, τυπικά μερικά Ohm. Αν υποθέσουμε $R_e = 10 \Omega$, $R_1 = 100 \Omega$ και $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$, η ενίσχυση είναι $\Delta V_2 = 455 \Delta V_1$.

Διάταξη κοινού εκπομπού

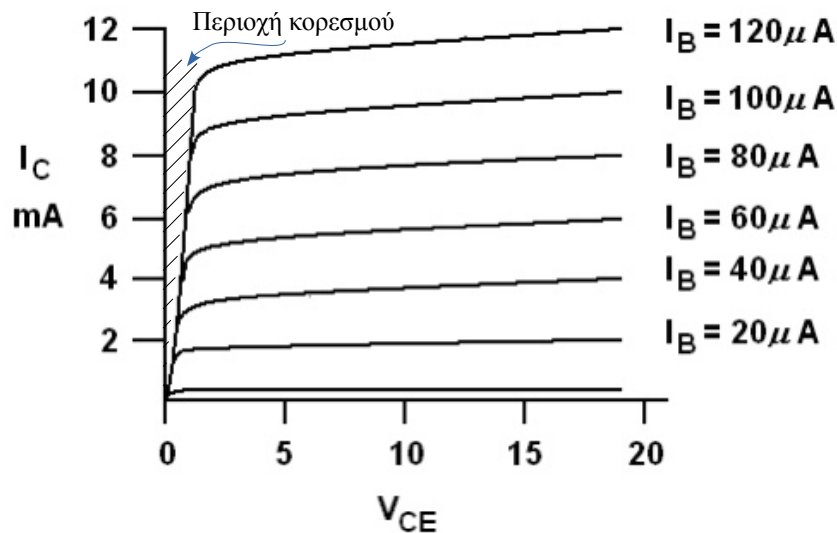
Η πιο κοινή διάταξη, ειδικά σε λογικά κυκλώματα (πύλες), είναι αυτή που ο εκπομπός είναι κοινός στα κυκλώματα εισόδου και εξόδου. Στο σχήμα 12 φαίνεται ένα τέτοιο κύκλωμα.



Σχήμα 12. Τρανζίστορ σε διάταξη κοινού εκπομπού.

Σε αυτήν την διάταξη το κύκλωμα εξόδου περιέχει δύο επαφές: του συλλεκτη – βάσης και του εκπομπού – βάσης. Επειδή ο εκπομπός συνδέεται απευθείας με τον αρνητικό πόλο της V_2 ενώ ο συλλέκτης μέσω της R_2 με τον θετικό πόλο της V_2 , το δυναμικό του συλλέκτη είναι υψηλότερο από αυτό του εκπομπού κατά $V_{CE} = V_2 - i_C R_2$. Η φύση της πόλωσης στην επαφή συλλέκτη – βάσης θα εξαρτάται από τις σχετικές τιμές των V_{CE} και V_{BE} .

Στην διάταξη κοινού εκπομπού το ρεύμα εισόδου i_B είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και το ρεύμα εξόδου i_C η εξαρτημένη. Δηλαδή, το i_B που καθορίζεται από το V_1 και το R_1 γιατί η επαφή εκπομπού βάσης είναι σε ορθή πόλωση ελέγχει το i_C . Στο σχήμα 13 δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες για ένα τρανζίστορ npn τύπου 2N2222A για διαφορετικές τιμές του i_B .



Σχήμα 13. Χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου για διαφορετικές τιμές του i_B για το κύκλωμα κοινού εκπομπού του σχήματος 12.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες χωρίζονται σε δύο περιοχές: την ενεργή περιοχή και την περιοχή κορεσμού. Η περιοχή δεξιά από το γόνατο είναι η ενεργή περιοχή – το γόνατο είναι μερικά δέκατα του βολτ. Σε αυτήν την περιοχή το i_C είναι πολύ ευαίσθητο στο i_B αλλά σχεδόν ανεξάρτητο από το V_{CE} . Η περιοχή κορεσμού είναι αριστερά από το γόνατο. Στην περιοχή κορεσμού το i_C αυξάνεται απότομα με το V_{CE} . Στην ενεργή περιοχή η επαφή συλλέκτη – βάσης είναι σε αντίστροφη πόλωση. Αυτό συμβαίνει καθώς η τάση στην επαφή εκπομπού – βάσης που είναι σε ορθή πόλωση είναι μερικά δέκατα του βολτ – τυπικά, 0.6 V. Έτσι, αν η V_{CE} είναι μεγαλύτερη από 0.6 V τότε ο συλλέκτης είναι θετικότερος του εκπομπού κι επομένως είναι σε υψηλότερο δυναμικό (αντίστροφη πόλωση). Επομένως, η κατάσταση είναι όμοια με αυτήν της διάταξης κοινής βάσης. Ξεκινώντας από τον νόμο του Kirchhoff για τα ρεύματα και χρησιμοποιώντας το προηγούμενο αποτέλεσμα, $i_C = \alpha i_E$

$$\begin{aligned}
 i_E &= i_B + i_C \\
 \Rightarrow \frac{i_C}{\alpha} &= i_B + i_C \\
 \Rightarrow i_C \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) &= i_B \\
 \Rightarrow i_C \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) &= i_B \\
 \Rightarrow i_C &= \beta i_B
 \end{aligned}$$

όπου $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ ονομάζεται παράμετρος κέρδους ρεύματος (current gain parameter). Το α είδαμε ότι αλλάζει ελάχιστα με το V_{CE} – οι μεταβολές στο β μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Π.χ., αν $\alpha = 0.990$ τότε $\beta = 99$, ενώ αν $\alpha = 0.991$ τότε $\beta = 110$, δηλ., μια αλλαγή 0.1% στο α προκαλεί μια μεταβολή 11% στο β . Κατά τα άλλα, η τιμή του i_C καθορίζεται ουσιαστικά από i_B και εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές του δευτέρου. Π.χ., μια αλλαγή 10 μA στο i_B θα προκαλέσει μια μεταβολή 990 μA στο i_C . Έτσι, όταν το κύκλωμα κοινού εκπομπού χρησιμοποιείται στην ενεργή περιοχή λειτουργεί ως ενισχυτής ρεύματος.

Στην περιοχή κορεσμού $V_{CE} < V_{CB}$, δηλ., η βάση είναι θετικότερη από τον συλλέκτη κι επομένως σε υψηλότερο δυναμικό. Αυτό σημαίνει ότι η επαφή συλλέκτη – βάσης είναι σε ορθή πόλωση. Σε αυτή την διαμόρφωση οι σπές (πλειοψηφικοί φορείς) στην βάση ρέουν προς τον συλλέκτη (έστω αυτό το ρεύμα i_{pC}) και τα ηλεκτρόνια (πλειοψηφικοί φορείς) στον συλλέκτη ρέουν προς την βάση (έστω αυτό το ρεύμα i_{eC}). Αυτή η διπλή ροή φορέων φορτίου αντιστοιχεί σε υψηλό ρεύμα στην αντίθετη κατεύθυνση από το αi_E . Το καθαρό ρεύμα στον συλλέκτη θα είναι

$$i_C = \alpha i_E - (i_{pC} + i_{eC})$$

Το καθαρό ρεύμα στον συλλέκτη θα μειωθεί απότομα καθώς η επαφή συλλέκτη – βάσης μετατρέπεται σε ορθής πόλωσης (καθώς το V_{CE} μειώνεται κάτω από 0.6 V), μέχρι $V_{CE} = 0$, οπότε και οι δύο επαφές γίνονται ορθής πόλωσης στον ίδιο βαθμό και το καθαρό ρεύμα είναι μηδέν.