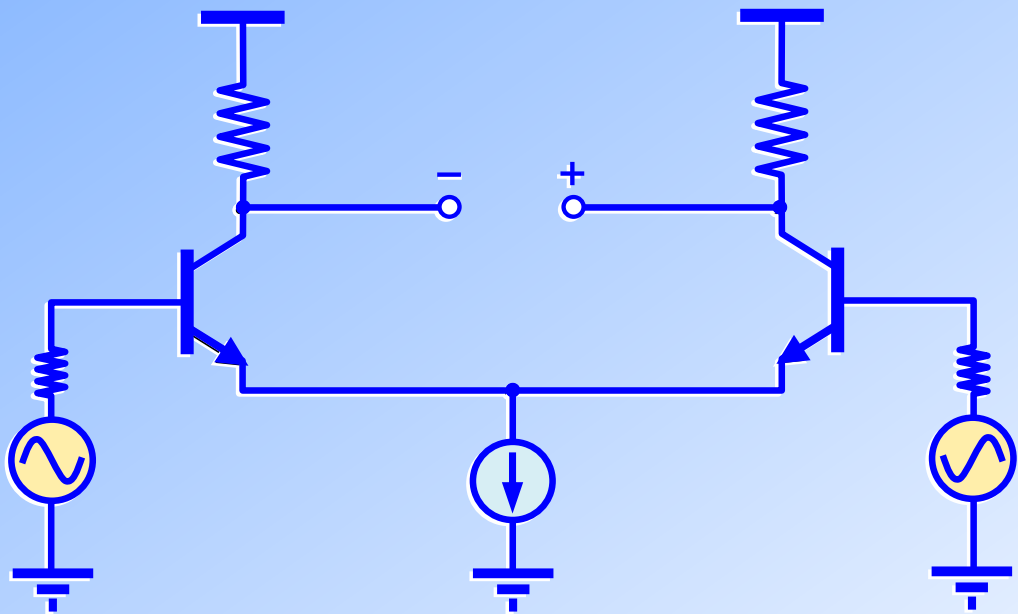




# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

# 3





Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά  
Συγγράμματα και Βοηθήματα  
www.kallipos.gr

Γιάννης Λιαπέρδος  
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Κριτική Ανάγνωση:  
Αγγελική Αραπογιάννη

Επιμέλεια πολυμεσικού – διαδραστικού υλικού:  
Γιώργος Θεοφάνους

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας  
Creative Commons Αναφορά Δημιουργού – Μη Εμπο-  
ρική Χρήση – Όχι Παράγωγα Έργα 3.0. Για να δείτε ένα  
αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/gr/>

Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου  
www.kallipos.gr

ISBN: 978-618-82124-8-0

---

---

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**  
**ΣΤΗΝ**  
**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ**

---

---

**ΓΙΑΝΝΗΣ ΛΙΑΠΕΡΔΟΣ**  
Καθηγητής Εφαρμογών  
ΤΕΙ Πελοποννήσου

Κριτική Ανάγνωση:  
**ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΑΡΑΠΟΓΙΑΝΝΗ**  
Καθηγήτρια  
Εθνικού και Καποδιστριακού  
Πανεπιστημίου Αθηνών

ΣΠΑΡΤΗ 2015



	Σελ.
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>7</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b>	<b>9</b>
<b>3 ΔΙΠΟΛΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ</b>	<b>11</b>
3.1 Αρχή λειτουργίας . . . . .	12
3.2 Τύποι . . . . .	20
3.3 Βασικές συνδεσμολογίες . . . . .	21
3.4 Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας . . . . .	22
3.5 Σχέσεις ρευμάτων στην ενεργό περιοχή . . . . .	23
3.6 Χαρακτηριστικές . . . . .	25
3.6.1 Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης . . . . .	26
3.6.2 Χαρακτηριστικές εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης . . . . .	28
3.6.3 Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού . . . . .	28
3.6.4 Χαρακτηριστικές εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού . . . . .	29
3.6.5 Χαρακτηριστικές εισόδου/εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη . . . . .	30
3.6.6 Σύγκριση συνδεσμολογιών κοινής βάσης/κοινού εκπομπού	30
3.6.7 Θερμοκρασιακή εξάρτηση των χαρακτηριστικών εισόδου/εξόδου . . . . .	31
3.7 Πόλωση στην ενεργό περιοχή . . . . .	31
3.7.1 Άμεση πόλωση στη βάση . . . . .	33
3.7.2 Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη . . . . .	33
3.7.3 Πόλωση στον εκπομπό . . . . .	35
3.7.4 Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό . . . . .	36
3.8 Ισοδύναμα κυκλώματα . . . . .	39
3.8.1 Μοντέλο των Ebers-Moll . . . . .	39
3.8.2 Μοντέλο για το συνεχές (DC) . . . . .	40
3.8.3 Μοντέλα μικρού σήματος . . . . .	40
3.9 Ζεύγη διπολικών τρανζίστορ . . . . .	42

3.9.1	Συνδεσμολογία Darlington . . . . .	43
3.9.2	Συνδεσμολογία Sziklai . . . . .	43
3.10	Εφαρμογές . . . . .	44
3.10.1	Ακολουθητής εκπομπού (emitter follower) . . . . .	44
3.10.2	Πηγή ρεύματος . . . . .	46
3.11	Κριτήρια αξιολόγησης . . . . .	47
3.12	Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> κεφαλαίου . . . . .	49
3.13	Διαδραστικά στοιχεία . . . . .	50
3.14	Οπτικοακουστικό υλικό . . . . .	51
	<b>Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια</b>	<b>53</b>
	<b>Απόδοση ξενόγλωσσων όρων</b>	<b>55</b>
	<b>Ευρετήριο</b>	<b>59</b>

ΣΧΗΜΑ	Σελ.
3.1 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (1/7) . . . . .	13
3.2 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (2/7) . . . . .	14
3.3 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (3/7) . . . . .	15
3.4 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (4/7) . . . . .	16
3.5 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (5/7) . . . . .	16
3.6 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (6/7) . . . . .	17
3.7 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (7/7) . . . . .	18
3.8 Δομή του πρώτου τρανζίστορ . . . . .	19
3.9 Κυκλωματικά σύμβολα τρανζίστορ $pnp$ . . . . .	20
3.10 Σχηματική αναπαράσταση και κυκλωματικά σύμβολα διπολικών τρανζίστορ . . . . .	20
3.11 Βασικές συνδεσμολογίες του διπολικού τρανζίστορ . . . . .	21
3.12 Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας διπολικού τρανζίστορ . . . . .	23
3.13 Συνιστώσες ρευμάτων σε διπολικό τρανζίστορ . . . . .	24
3.14 Φορές των ρευμάτων στους διάφορους τρόπους λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ . . . . .	25
3.15 Σμήνος χαρακτηριστικών $I_C-V_{CB}$ για ιδανικό διπολικό τρανζίστορ . . . . .	26
3.16 Συνδεσμολογία κοινής βάσης με το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη . . . . .	26
3.17 Χαρακτηριστικές εισόδου και εξόδου για διπολικό τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινής βάσης . . . . .	27
3.18 Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού με το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη . . . . .	29
3.19 Χαρακτηριστικές εισόδου και εξόδου για διπολικό τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού . . . . .	29
3.20 Συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη με το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη . . . . .	30
3.21 Δεδομένα διπολικού τρανζίστορ προς πόλωση . . . . .	31
3.22 Αμεση πόλωση στη βάση . . . . .	32
3.23 Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη . . . . .	34
3.24 Πόλωση στον εκπομπό . . . . .	36
3.25 Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό . . . . .	37
3.26 Πόλωση μέσω διαιρέτη τάσης . . . . .	38
3.27 Ισοδύναμο κύκλωμα για το κύκλωμα του Σχήματος 3.26 . . . . .	38
3.28 Ισοδύναμο κύκλωμα για το μοντέλο Ebers-Moll . . . . .	40
3.29 Ισοδύναμο κύκλωμα για το συνεχές (DC) . . . . .	40
3.30 h-υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα . . . . .	41
3.31 h-υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού . . . . .	41
3.32 π-υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα για χαμηλές συχνότητες . . . . .	42

3.33	π-υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα για υψηλές συχνότητες . . . . .	42
3.34	Συνδεσμολογία Darlington . . . . .	43
3.35	Συνδεσμολογία Sziklai . . . . .	44
3.36	Κύκλωμα ακολουθητή εκπομπού . . . . .	45
3.37	Πηγή ρεύματος με διπολικό τρανζίστορ . . . . .	46



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

ΠΙΝΑΚΑΣ	Σελ.
3.1 Χαρακτηριστικά συνδεσμολογιών διπολικού τρανζίστορ . . . . .	22



## ΔΙΠΟΛΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

### ■ Σύνοψη

Το τρανζίστορ αποτελεί τη θεμελιωδέστερη ηλεκτρονική διάταξη τόσο για την κατασκευή αναλογικών κυκλωμάτων όσο και ψηφιακών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα διπολικά τρανζίστορ, η εφεύρεση των οποίων προηγήθηκε όλων των άλλων τύπων τρανζίστορ τα οποία βρίσκονται σήμερα σε χρήση. Μεταξύ άλλων περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας τους, οι τύποι τους, οι περιοχές λειτουργίας τους, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κυκλωμάτων τα οποία περιέχουν διπολικά τρανζίστορ, οι βασικοί κανόνες που εφαρμόζονται για τη σωστή πόλωσή τους καθώς και οι κυριότερες εφαρμογές τους.

### ■ Προαπαιτούμενη γνώση

Η κατανόηση του κεφαλαίου προϋποθέτει καλή γνώση των αρχών λειτουργίας των επαφών p-n, καθώς και εξοικείωση με τις βασικές αρχές ανάλυσης κυκλωμάτων.

**Η** εφεύρεση του τρανζίστορ υπήρξε καθοριστικός σταθμός στην ιστορία της Ηλεκτρονικής. Το 1947 οι Bardeen, Brattain και Shockley κατόρθωσαν να κατασκευάσουν μια διάταξη στερεάς κατάστασης με συμπεριφορά παρόμοια με εκείνη της τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας. Για την ονομασία της προτάθηκαν οι όροι «semiconductor triode» (τρίοδος ημιαγωγού), «solid state triode» (τρίοδος στερεάς κατάστασης), «crystal triode» (κρυσταλλοτρίοδος – που χρησιμοποιείται και ως η ελληνική απόδοση), επικράτησε όμως η ονομασία «transistor» για τον λόγο που θα εξηγήσουμε στη συνέχεια. Η εφεύρεση αυτή, για την οποία οι εμπνευστές της βραβεύτηκαν με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1956, πυροδότησε τη ραγδαία ανάπτυξη

των Τηλεπικοινωνιών και επέτρεψε στην επιστήμη της Πληροφορικής να πάρει τη μορφή που έχει σήμερα.

Η αύξηση την οποία παρουσίασε ο αριθμός των τρανζίστορ που περιέχει ένας επεξεργαστής από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 μέχρι και σήμερα επαλήθευσε τον νόμο του Moore, σύμφωνα με τον οποίο ο αριθμός αυτός διπλασιάζεται κάθε διετία. Οι σημερινοί μικροεπεξεργαστές περιλαμβάνουν δισεκατομμύρια τρανζίστορ και καταλαμβάνουν επιφάνεια λίγων τετραγωνικών εκατοστών. Αν το τρανζίστορ δεν είχε εφευρεθεί, οι ίδιοι μικροεπεξεργαστές θα έπρεπε να καταλαμβάνουν επιφάνεια περίπου εκατό στρεμμάτων, αν κατασκευάζονταν με λυχνίες της μικρότερης δυνατής διατομής.

Από τους διάφορους τύπους τρανζίστορ, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor – BJT) και τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field Effect Transistor – FET). Με τα πρώτα θα ασχοληθούμε σε αυτό το κεφάλαιο, ενώ για τη μελέτη των δεύτερων θα αφιερώσουμε το επόμενο.

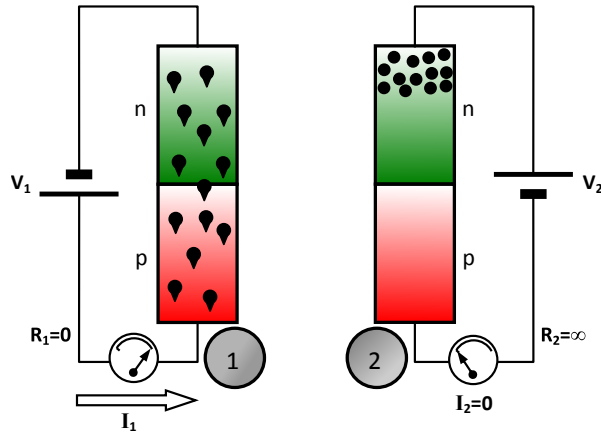
### 3.1 Αρχή λειτουργίας

Η εφεύρεση του τρανζίστορ<sup>1</sup> υπήρξε αποτέλεσμα της προσπάθειας κατασκευής μιας διάταξης στερεάς κατάστασης η οποία να μιμείται τη συμπεριφορά της τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και να είναι, επομένως, ικανή να επιτελεί ενίσχυση. Η τρίοδος λυχνία είναι μια διάταξη τριών ακροδεκτών ελεγχόμενη από τάση, υπό την έννοια ότι η τάση που εφαρμόζεται στον έναν από τους ακροδέκτες της (στο πλέγμα) μπορεί να ρυθμίζει (ελέγχει) τη ροή ηλεκτρονίων μεταξύ των άλλων δύο (ανόδου και καθόδου) [1]. Οι πρώτες προσπάθειες, λόγω τεχνικών περιορισμών κατά την εποχή εφεύρεσης του πρώτου τρανζίστορ, απέδωσαν μια διάταξη ελεγχόμενη από ρεύμα, όπως και το διπολικό τρανζίστορ που θα εξετάσουμε πιο κάτω. Παρότι όχι πλήρως αντίστοιχη με μια τρίοδο (τη λειτουργία της οποίας πλησιάζουν περισσότερο τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου τα οποία κατασκευάστηκαν αργότερα) η διάταξη αυτή μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενισχυτών ως εξαρτημένη πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα. Επομένως, θεμελιώδης σκοπός της λειτουργίας ενός τρανζίστορ είναι ο έλεγχος της ροής των ηλεκτρονίων μεταξύ δύο ακροδεκτών του, μέσω ενός τρίτου ακροδέκτη.

Ας εκτελέσουμε το ακόλουθο νοητικό πείραμα:

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δύο ανεξάρτητες επαφές p-n, τη μία (1) πολωμένη κατά την ορθή φορά και την άλλη (2) κατά την ανάστροφη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Ας υποθέσουμε, ακόμη, ότι οι συγκεντρώσεις των προσμίξεων στις περιοχές τύπου n των επαφών αυτών είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στις περιοχές τύπου p. Αυτό συνεπάγεται πως ο αριθμός των ηλεκτρονίων θα είναι πολύ μεγαλύτερος

<sup>1</sup> Στο βιβλίο αυτό υιοθετούμε τη γραφή του όρου transistor με ελληνικούς χαρακτήρες, η οποία φαίνεται πως έχει επικρατήσει στην ελληνική βιβλιογραφία.



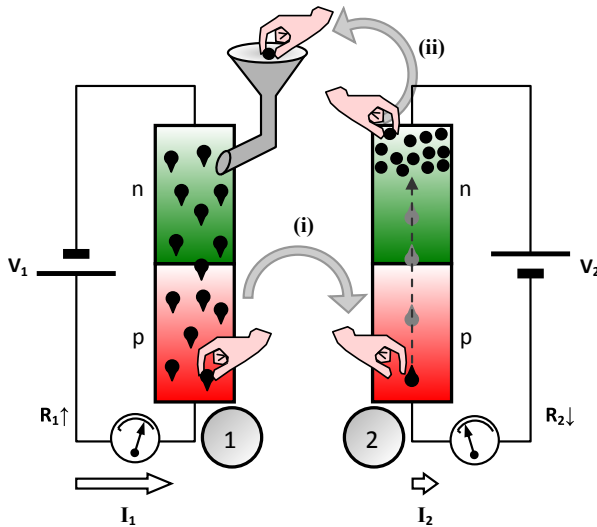
Σχήμα 3.1 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (1/7)

του αριθμού των οπών και άρα η αγωγιμότητα των επαφών θα καθορίζεται κυρίως από τα ηλεκτρόνια. Αν η τάση  $V_1$  στα άκρα της διόδου (1) είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου της, τότε ένα ρεύμα πολύ μεγάλης έντασης ( $I_1$ ) θα διαρρέει το κύκλωμα της διόδου αυτής. Άρα στο κύκλωμα της διόδου (1) θα έχουμε μια σχεδόν μηδενική αντίσταση  $R_1^2$ . Στο Σχήμα 3.1 έχει σχεδιαστεί η κίνηση των ηλεκτρονίων, όπου το βέλος δηλώνει τη φορά της κίνησης. Η αντίθετη κίνηση των οπών έχει παραλειφθεί μιας και, όπως απαιτήσαμε, ο αριθμός τους είναι μικρός και άρα εξίσου μικρή θα είναι η συμβολή τους στην αγωγιμότητα της επαφής. Λόγω της ανάστροφης πόλωσης της επαφής (2), το ρεύμα που τη διαρρέει θα είναι σχεδόν μηδενικό, ενώ τα ηλεκτρόνια του τμήματος τύπου  $n$  θα συνωστιάζονται υπό την έλξη του θετικού πόλου της πηγής  $V_2$ , κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 3.1<sup>3</sup>. Επομένως, το ρεύμα που θα διαρρέει το κύκλωμα της διόδου (2) θα είναι σχεδόν μηδενικό και η αντίσταση του αντίστοιχου κυκλώματος θα είναι άπειρη.

Ας υποθέσουμε τώρα πως, με κάποιον τρόπο, «υποκλέπτουμε» ένα μέρος από τα ηλεκτρόνια που φθάνουν στο τμήμα τύπου  $p$  της διόδου (1), πριν αυτά εγκαταλείψουν τον ημιαγωγό και καταλήξουν στον θετικό πόλο της πηγής  $V_1$  μέσω των αγωγών σύνδεσης. Ας θεωρήσουμε ότι αρχικά υποκλέπτουμε ένα μόνο ηλεκτρόνιο το οποίο, επιπλέον, το τροφοδοτούμε στο τμήμα τύπου  $p$  της επαφής (2). Η διαδικασία «υποκλοπής» απεικονίζεται με το βέλος  $i$  στο Σχήμα 3.2. Με την απόσπαση ενός ηλεκτρονίου από την επαφή (1) (η οποία είναι αρχικά ουδέτερη) αυτή θα παρουσιάσει έλλειμμα αρνητικού φορτίου (φορτίζεται, δηλαδή, θετικά). Παρόμοια, με την προσθήκη ενός ηλεκτρονίου στην επαφή (2) αυτή θα φορτισθεί αρνητικά. Για να αποκατα-

<sup>2</sup> Η αντίσταση αυτή ισούται με την αντίσταση της διόδου και πρακτικά έχει πολύ μικρή τιμή, όπως έχουμε δει στην περιγραφή των διόδων.

<sup>3</sup> Κάτι αντίστοιχο θα συμβαίνει και για τις ελάχιστες οπές στο τμήμα  $p$ .

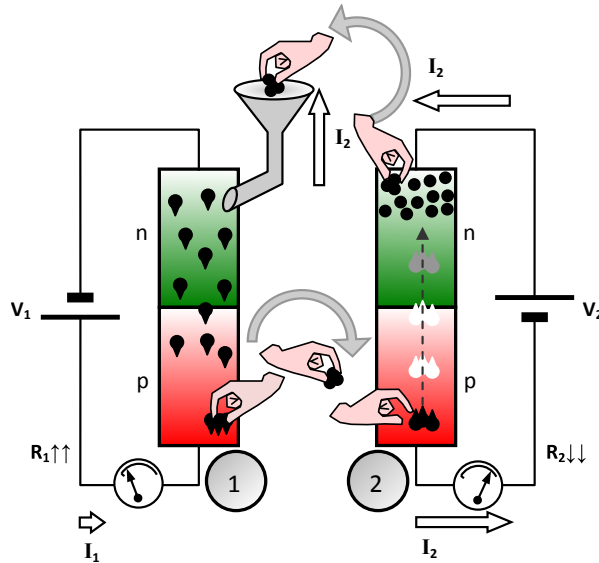


Σχήμα 3.2 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (2/7)

στήσουμε το ουδέτερο φορτίο των δύο κρυστάλλων θα «επιστρέψουμε» ένα ηλεκτρόνιο στην επαφή (1), αφαιρώντας το από την επαφή (2), η οποία παρουσιάζει πλεόνασμα ενός ηλεκτρονίου. Για το σκοπό αυτό ένα ηλεκτρόνιο από την περιοχή τύπου n της επαφής (2) θα οδηγηθεί στην αντίστοιχη περιοχή της επαφής (1), προκειμένου να διατηρηθεί η ισορροπία φορτίου. Η διαδικασία αυτή (αντίστροφη της διαδικασίας υποκλοπής) απεικονίζεται με το βέλος ii στο Σχήμα 3.2.

Όταν βρεθεί στην περιοχή τύπου p της επαφής (2), το ηλεκτρόνιο που υποκλέψαμε θα δεχθεί ισχυρή άπωση λόγω του δυναμικού του αρνητικού πόλου της πηγής  $V_2$  και έλξη από τον θετικό της πόλο. Οι δυνάμεις αυτές θα «σαρώσουν» το ηλεκτρόνιο προς το τμήμα τύπου n<sup>4</sup>. Το ηλεκτρόνιο που «σαρώνεται» από το τμήμα τύπου p προς το τμήμα τύπου n της επαφής (2) αυξάνει την αγωγιμότητα της επαφής, μιας και προκαλεί ένα μικρό ρεύμα με φορά αντίθετη της φοράς «σάρωσης». Άρα, ένα μικρό ρεύμα  $I_2$  θα διαρρέει το κύκλωμα της διόδου (2), και η αντίσταση  $R_2$  του κυκλώματος θα μειωθεί. Για την επαφή (1), αντίθετα, το ηλεκτρόνιο που υποκλέπτεται παύει να συνεισφέρει στην αγωγιμότητα του «εξωτερικού» κυκλώματος, μιας και η υποκλοπή γίνεται πριν αυτό εισέλθει στον αγωγό που συνδέει το τμήμα τύπου p με τον θετικό πόλο της πηγής  $V_1$ . Επομένως, το ρεύμα  $I_1$  που διαρρέει το κύκλωμα της επαφής (1) θα μειωθεί, και η αντίσταση  $R_1$  του κυκλώματος θα αυξηθεί. Φυσικά, οι μεταβολές των ρευμάτων και των αντιστάσεων θα είναι πολύ μικρές, εξαιτίας της μικρής συνεισφοράς του μοναδικού ηλεκ-

<sup>4</sup> Να σημειωθεί πως η πιθανότητα ανασύνδεσης του ηλεκτρονίου αυτού με οπή του τμήματος p είναι εξαιρετικά μικρή, μιας και υποθέσαμε πως ο αριθμός των οπών είναι πολύ μικρός.

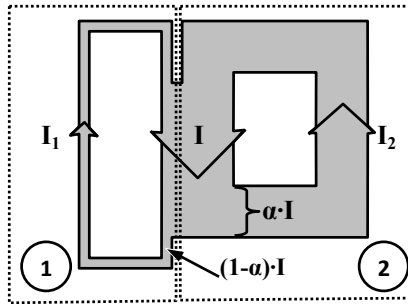


Σχήμα 3.3 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (3/7)

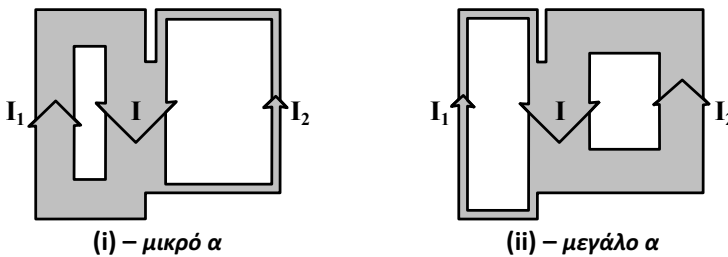
τρονίου που υποκλέψαμε.

Ας υποθέσουμε, τώρα, ότι αυξάνουμε τον βαθμό της υποκλοπής ώστε σχεδόν όλα τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στο τμήμα τύπου p της επαφής (1) να αποσπώνται και να τροφοδοτούνται στο ομόλογο τμήμα της επαφής (2), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα  $I_1$  που διαρρέει το κύκλωμα της επαφής (1) θα γίνει εξαιρετικά μικρό, και η αντίσταση  $R_1$  του κυκλώματος σχεδόν άπειρη. Από την άλλη μεριά, το ρεύμα  $I_2$  που διαρρέει το κύκλωμα της επαφής (2) θα γίνει πολύ μεγάλο, και η αντίσταση  $R_2$  του κυκλώματος σχεδόν μηδενική. Άρα, αυξάνοντας τον βαθμό υποκλοπής μειώνουμε την αντίσταση του κυκλώματος (2) και αυξάνουμε την αντίσταση του κυκλώματος (1).

Ας συνοψίσουμε τα μέχρι στιγμής συμπεράσματά μας. Έχουμε κατασκευάσει νοητικά μια διάταξη η οποία, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία υποκλοπής ηλεκτρονίων, «μεταφέρει» τη μικρή αντίσταση του κυκλώματος της διόδου (1) στο κύκλωμα (2). Για το λόγο αυτό ας την ονομάσουμε transistor (από το «transfer» [μεταφέρω] και «resistor»). Μια σημαντική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι πως το ρεύμα  $I_2$  δεν εξαρτάται από την τιμή της τάσης  $V_2$ , αλλά μονάχα από τον αριθμό των ηλεκτρονίων που υποκλέπτονται. Οποιαδήποτε τιμή της  $V_2$  μεγαλύτερη της τάσης κατωφλίου της διόδου (2) είναι ικανή να «σαρώσει» τα ηλεκτρόνια που υποκλέπτονται από το κύκλωμα (1). Προφανώς, όσο περισσότερα είναι αυτά τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το ρεύμα  $I_2$ . Επομένως, η ένταση του ρεύματος στο κύκλωμα (2) είναι ανεξάρτητη της εφαρμοζόμενης τάσης  $V_2$  και η τιμή του εξαρτά-



Σχήμα 3.4 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (4/7)



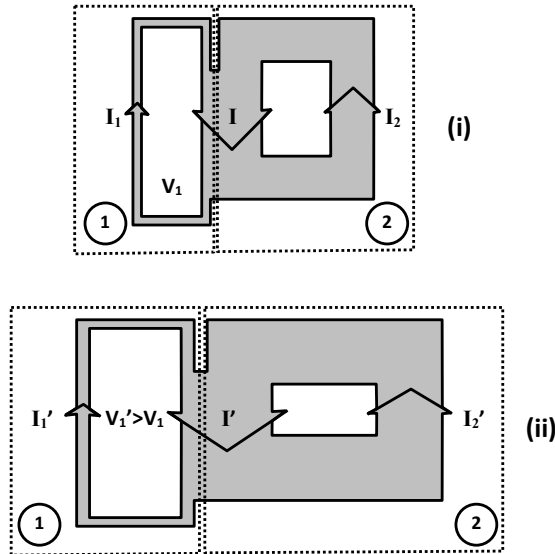
Σχήμα 3.5 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (5/7)

ται από τη διαδικασία «υποκλοπής». Μπορούμε, λοιπόν, να υποστηρίξουμε πως η διάταξή μας λειτουργεί ως πηγή ρεύματος για το κύκλωμα ②.

Ας προχωρήσουμε, στο σημείο αυτό, σε μια ακόμα υπόθεση. Ας θεωρήσουμε ότι η διαδικασία υποκλοπής λειτουργεί ποσοστιαία, ότι δηλαδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων που υποκλέπτονται είναι ένα κλάσμα του αριθμού των ηλεκτρονίων που φτάνουν στην περιοχή τύπου  $p$  της επαφής ①. Ας συμβολίσουμε το κλάσμα αυτό με  $\alpha$ . Ως συνέπεια της υπόθεσής μας, το ρεύμα  $I_2$  στο κύκλωμα της επαφής ② θα είναι ίσο με  $\alpha \cdot I$ , όπου  $I$  το ρεύμα στο εσωτερικό της διόδου ①. Για το ρεύμα  $I_1$  στο κύκλωμα της επαφής ① θα ισχύει, προφανώς,  $I_1 = (1 - \alpha)I$ , σύμφωνα και με το Σχήμα 3.4. Να σημειωθεί ότι στο σχήμα αυτό απεικονίζεται η φορά του ρεύματος που αντιστοιχεί στην κίνηση των ηλεκτρονίων και όχι η συμβατική φορά, προκειμένου να είναι ευκολότερη η σύγκριση με το Σχήμα 3.3. Για μικρές τιμές του κλάσματος  $\alpha$  η τιμή του ρεύματος στο κύκλωμα ② θα είναι μικρή (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5-i) και η αντίστασή του μεγάλη. Αντίθετα, για μεγάλες τιμές του κλάσματος  $\alpha$  η τιμή του ρεύματος στο κύκλωμα ② θα είναι μεγάλη (βλπ Σχήμα 3.5-ii) και η αντίστασή του μικρή. Η δεύτερη περίπτωση είναι και η επιθυμητή.

Αξίζει να παρατηρήσουμε εδώ πως η τιμή του ρεύματος  $I$  στο εσωτερικό της διόδου ① καθορίζεται από την τάση  $V_1$  στα άκρα της επαφής ① και δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του κλάσματος  $\alpha$ . Αν η τάση  $V_1$  αυ-





Σχήμα 3.6 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (6/7)

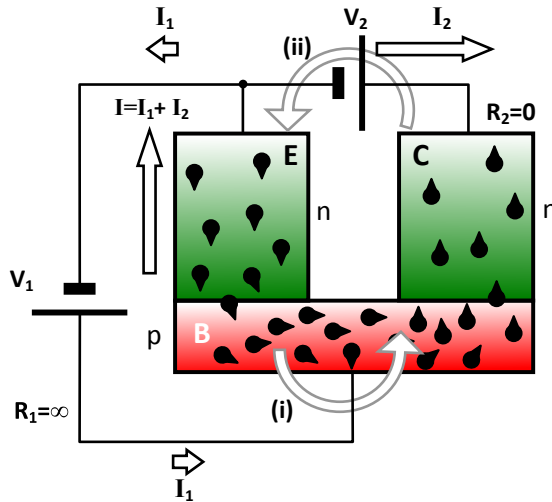
ξηθεί ελάχιστα, το ρεύμα  $I$  που διαρρέει τη δίοδο ① θα αυξηθεί εκθετικά. Ωστόσο, αν το κλάσμα  $\alpha$  είναι πολύ κοντά στη μονάδα, η τιμή του ρεύματος  $I_1$  θα παραμείνει μικρή, ενώ η μεταβολή του ρεύματος  $I_2$  θα είναι μεγάλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Εξαιτίας του σταθερού κλάσματος υποκλοπής  $\alpha$ , είναι φανερό ότι το ρεύμα  $I_2$  θα είναι ανάλογο του ρεύματος  $I_1$  και μάλιστα θα ισχύει:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\alpha I}{(1 - \alpha)I} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3.1)$$

σύμφωνα και με το Σχήμα 3.4. Ας συμβολίσουμε τη σταθερά της πιο πάνω αναλογίας με  $\beta$ , και ας ξαναγράψουμε τη σχέση (3.1) ως εξής:

$$I_2 = \beta I_1 \quad (3.2)$$

Είναι φανερό ότι ο συντελεστής αναλογίας  $\beta$  αποτελεί την απολαβή ρεύματος αν ως κύκλωμα εισόδου θεωρήσουμε το κύκλωμα ① και ως κύκλωμα εξόδου το κύκλωμα ②. Αν το κλάσμα υποκλοπής  $\alpha$  πλησιάζει τη μονάδα, τότε η τιμή της σταθεράς  $\beta$  θα είναι πάρα πολύ μεγάλη, γεγονός που συνεπάγεται μεγάλη απολαβή (ενίσχυση) ρεύματος. Με βάση τη σχέση (3.2) μπορούμε να πούμε πως η διάταξή μας (που λειτουργεί όπως ήδη δείξαμε ως πηγή ρεύματος για το κύκλωμα ②) είναι μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από ρεύμα, η τιμή δηλαδή του ρεύματος  $I_2$  στο κύκλωμα ② εξαρτάται (ελέγχεται) από την τιμή του ρεύματος  $I_1$  στο κύκλωμα ①. Μια τέτοια πηγή με μεγάλη απολαβή ρεύματος μπορεί να επιτελεί ενίσχυση και, επομένως, η διάταξή μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλώματα ενισχυτών.

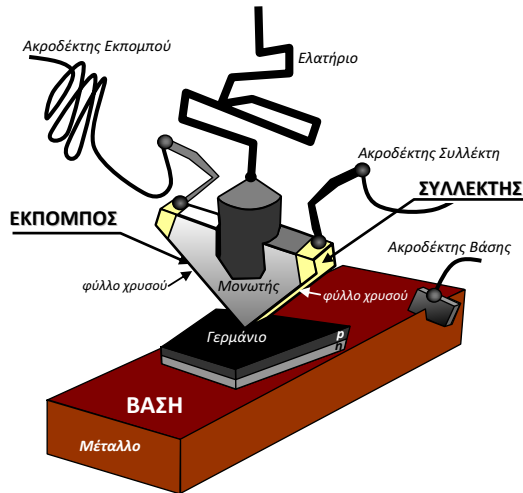


Σχήμα 3.7 Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ (7/7)

Ας προσπαθήσουμε να βρούμε τρόπους υλοποίησης της νοητής διάταξης την οποία παρουσιάσαμε. Προκειμένου να επιτύχουμε τον μηχανισμό υποκλοπής ηλεκτρονίων από το τμήμα p της μιας επαφής στο ομόλογο τμήμα της άλλης, ας συνενώσουμε τις δύο επαφές p-n με τέτοιον τρόπο ώστε το τμήμα τύπου p να είναι κοινό και για τις δύο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

Επιπλέον, το κοινό τμήμα θα πρέπει να έχει πολύ μικρό πάχος, ώστε τα ηλεκτρόνια από το τμήμα n της επαφής (1) που θα φτάνουν σε αυτό να διαχέονται προς την επαφή (2), κατά την έννοια του βέλους i στο Σχήμα 3.7. Η «αφαίρεση» ηλεκτρονίων από το τμήμα τύπου n της επαφής (2) μπορεί να εξασφαλισθεί με την ηλεκτρική σύνδεση των δύο τμημάτων τύπου n ώστε τα κυκλώματα των δύο επαφών να μοιράζονται από κοινού το τμήμα τύπου n της επαφής (1) και να υπάρχει ροή των «πλεοναζόντων» ηλεκτρονίων κατά την έννοια του βέλους ii στο Σχήμα 3.7. Η επιλογή των τιμών των τάσεων  $V_1$  και  $V_2$  των πηγών τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε η επαφή (1) να είναι ορθά πολωμένη και η επαφή (2) ανάστροφα, σύμφωνα με όσα προαναφέραμε. Υπενθυμίζουμε την απαίτηση για υψηλή συγκέντρωση προσμίξεων στο τμήμα τύπου n της επαφής (1) και χαμηλή συγκέντρωση προσμίξεων στο κοινό τμήμα τύπου p. Ακόμα χαμηλότερη θα πρέπει να είναι η συγκέντρωση των προσμίξεων στο τμήμα τύπου n της επαφής (2), μιας και οι φορείς του τμήματος αυτού δεν συμβάλλουν στην αγωγιμότητα της επαφής (2) η οποία είναι πολωμένη ανάστροφα.

Επειδή το τμήμα τύπου n της επαφής (1) «εκπέμπει» τα ηλεκτρόνια που κυκλοφορούν στο τρανζίστορ θα το αποκαλούμε στο εξής εκπομπό (emitter) και θα το συμβολίζουμε με E. Παρόμοια, επειδή το τμήμα τύπου n της επαφής (2) «συλλέγει» το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρονίων που εκπέμπο-

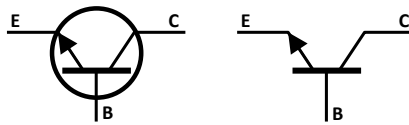


Σχήμα 3.8 Δομή του πρώτου τρανζίστορ

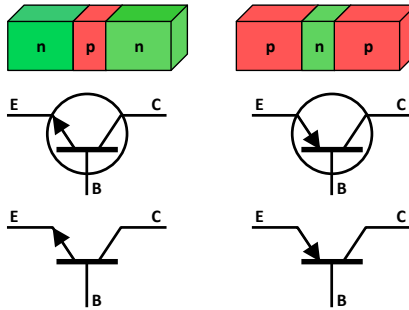
νται από τον εκπομπό θα το αποκαλούμε στο εξής συλλέκτη (collector) και θα το συμβολίζουμε με C. Το κοινό τμήμα τύπου p των δύο επαφών θα το ονομάζουμε βάση (base) για ιστορικούς λόγους που θα αναφέρουμε στη συνέχεια και θα το συμβολίζουμε με B.

Το πρώτο τρανζίστορ που κατασκευάστηκε ήταν ένα τρανζίστορ σημειακής επαφής (point contact transistor). Επειδή τα τεχνολογικά δεδομένα της εποχής (1947) δεν επέτρεπαν τη δημιουργία ενός πολύ λεπτού τμήματος ημιαγωγού μεταξύ δύο άλλων διαφορετικού τύπου, οι κατασκευαστές του υλοποίησαν τη διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Πάνω σε μια μεταλλική βάση (από την οποία πήρε το όνομά του ο αντίστοιχος ακροδέκτης του τρανζίστορ) τοποθέτησαν μια πλάκα από γερμάνιο με προσμίξεις τύπου n, στην άνω επιφάνεια της οποίας είχε δημιουργηθεί ένα λεπτό στρώμα τύπου p. Στην επιφάνεια δύο επαφτόμενων εδρών ενός μονωτικού πρίσματος τοποθέτησαν ένα λεπτό φύλλο χρυσού το οποίο χάραξαν στην κοινή ακμή, ώστε τα δύο τμήματα του φύλλου να βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους (αποτελώντας τα ηλεκτρόδια του εκπομπού και του συλλέκτη της διάταξης). Ένα άλλο ηλεκτρόδιο στερεωμένο στο σώμα του μετάλλου της βάσης αποτελούσε τον ακροδέκτη βάσης του τρανζίστορ, ενώ ένα ελατήριο εξασφάλιζε την πρόσφυση του πρίσματος και των στερεωμένων σε αυτό ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του ημιαγωγού (γερμανίου).

Με την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων του εκπομπού και του συλλέκτη σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους γινόταν δυνατή η εμφάνιση του μηχανισμού «υποκλοπής» που ήδη περιγράψαμε, η οποία ονομάζεται και δράση (ή ενέργεια) του τρανζίστορ (transistor action). Έτσι, πολώνοντας κατά την ορθή φορά το κύκλωμα εκπομπού-βάσης και παρεμβάλλοντας ένα μικρόφωνο έπαιρναν το ενισχυμένο σήμα του μικροφώνου από μεγάφωνο συνδεδεμένο στο κύκλωμα συλλέκτη-βάσης το οποίο πολωνόταν ανάστροφα. Η ανα-



Σχήμα 3.9 Κυκλωματικά σύμβολα τρανζίστορ npn



Σχήμα 3.10 Σχηματική αναπαράσταση και κυκλωματικά σύμβολα διπολικών τρανζίστορ

λογία της διάταξης αυτής με το κυκλωματικό σύμβολο που χρησιμοποιείται για τα διπολικά τρανζίστορ είναι προφανής (βλπ. Σχήμα 3.9). Στο σύμβολο αυτό, το βέλος το οποίο σημειώνεται στον εκπομπό δηλώνει τη συμβατική φορά του ρεύματος. Η φορά του βέλους διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του τρανζίστορ, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο<sup>5</sup>.

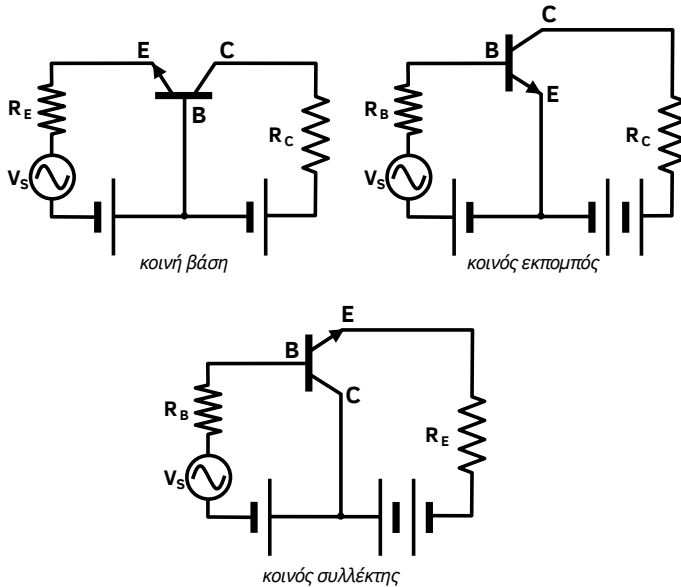
### 3.2 Τύποι

Το τρανζίστορ με το οποίο ασχοληθήκαμε μέχρι στιγμής αποτελείται από δύο επαφές p-n με κοινό το τμήμα p. Τρανζίστορ αυτού του τύπου ονομάζονται npn. Παρόμοια συμπεριφορά έχουν και δύο επαφές p-n με κοινό το τμήμα n. Τα τρανζίστορ που κατασκευάζονται με τον τρόπο αυτό ονομάζονται pnp. Οι σχηματικές αναπαραστάσεις<sup>6</sup> και τα κυκλωματικά σύμβολα και των δύο τύπων φαίνονται στο Σχήμα 3.10.

Για τον τύπο pnp η δράση του τρανζίστορ οφείλεται στις οπές. Δηλαδή, σε ένα τρανζίστορ pnp γίνεται «υποκλοπή» οπών που φθάνουν στη βάση κινούμενες από τον εκπομπό και ακολουθεί η σάρωσή τους προς τον συλλέκτη. Η κυριότερη διαφορά των τρανζίστορ pnp σε σχέση με τα npn είναι, εκτός από τον διαφορετικό τρόπο πόλωσης, η μικρή τους «ταχύτητα». Είναι γνωστό πως η ευκινησία των οπών είναι μικρότερη εκείνης των ηλεκτρονίων [3, 4]. Επομένως, ένα τρανζίστορ pnp θα μπορεί να ανταποκριθεί λι-

<sup>5</sup>Το σύμβολο του σχήματος αντιστοιχεί σε τρανζίστορ npn.

<sup>6</sup>Η σχηματική αναπαράσταση ενός διπολικού τρανζίστορ έχει ελάχιστη σχέση με τη φυσική του κατασκευή. Για στοιχεία που αφορούν την κατασκευή των διπολικών τρανζίστορ ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία [2].



Σχήμα 3.11 Βασικές συνδεσμολογίες του διπολικού τρανζίστορ

γότερο καλά στις υψηλές συχνότητες σε σύγκριση με ένα ηρη. Για τον λόγο αυτό τα τρανζίστορ ηρη επικρατούν έναντι των ηρη στις διάφορες εφαρμογές.

### 3.3 Βασικές συνδεσμολογίες

Όπως είδαμε προηγουμένα, προκειμένου το τρανζίστορ να εμφανίζει την επιθυμητή «δράση» (transistor action) θα πρέπει να έχει, εκτός από τα κατάλληλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (μικρό πάχος βάσης και υψηλή συγκέντρωση προσμίξεων στον εκπομπό), και την κατάλληλη πόλωση. Θα πρέπει, δηλαδή, η επαφή εκπομπού-βάσης (EB) να είναι πολωμένη ορθά και η επαφή βάσης-συλλέκτη (BC) ανάστροφα. Επιπλέον, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η «επιστροφή» στον εκπομπό των ηλεκτρονίων που σαρώνονται προς τον συλλέκτη, άρα θα πρέπει να υπάρχει ένα ηλεκτρικά αγώγιμο μονοπάτι από τον συλλέκτη προς τον εκπομπό. Τις πιο πάνω απαιτήσεις πόλωσης εξασφαλίζουν οι συνδεσμολογίες του Σχήματος 3.11. Οι συνδεσμολογίες αυτές είναι ουσιαστικά συνδεσμολογίες ενισχυτών, μιας και το τρανζίστορ είναι πολωμένο ώστε να εμφανίζει τη «δράση» με την οποία εξασφαλίζεται η επιθυμητή ενίσχυση. Για το λόγο αυτό, στα κυκλώματα του Σχήματος 3.11 έχουν συμπεριληφθεί και οι πηγές σήματος  $v_s$ , που αντιστοιχούν στο σήμα που ενισχύεται.

Παρατηρώντας το Σχήμα 3.11 μπορούμε να δούμε πως κάθε συνδεσμολογία αποτελείται από ένα κύκλωμα εισόδου (στο οποίο περιλαμβάνεται η πηγή σήματος) και ένα κύκλωμα εξόδου, όπου παρέχεται το ενισχυμένο

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά συνδεσμολογιών διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικό	Συνδεσμολογία		
	ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥ	ΚΟΙΝΗΣ ΒΑΣΗΣ	ΚΟΙΝΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ
Διαφορά φάσης εισόδου – εξόδου	180°	0°	0°
Απολαβή τάσης ( $A_v$ )			
Απολαβή ρεύματος ( $A_i$ )			
Απολαβή ισχύος			
Αντίσταση εισόδου			
Αντίσταση εξόδου			

= χαμηλή, = μέση, = υψηλή.

σήμα. Τα δύο αυτά κυκλώματα έχουν κοινό έναν εκ των ακροδεκτών του τρανζίστορ. Από τον κοινό ακροδέκτη παίρνουν και την ονομασία τους. Αν κοινός ακροδέκτης είναι ο ακροδέκτης της βάσης, τότε η συνδεσμολογία ονομάζεται κοινής βάσης κ.ο.κ.

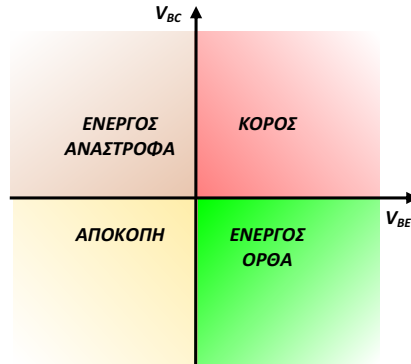
Στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τριών συνδεσμολογιών που προαναφέραμε. Με βάση τις προδιαγραφές μιας ενισχυτικής διάταξης επιλέγεται η συνδεσμολογία με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Σε επόμενες παραγράφους θα δούμε αναλυτικότερα πρακτικά κυκλώματα για ορισμένες από τις συνδεσμολογίες αυτές.

### 3.4 Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας

Όπως αναφέραμε στα προηγούμενα, προκειμένου ένα τρανζίστορ να παρουσιάζει «δράση» θα πρέπει η επαφή βάσης-εκπομπού να είναι πολωμένη ορθά και η επαφή βάσης-συλλέκτη ανάστροφα. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα του συλλέκτη είναι ανάλογο του ρεύματος της βάσης με συντελεστή αναλογίας  $\beta$  και, επίσης, ανάλογο του ρεύματος του εκπομπού με συντελεστή αναλογίας  $\alpha$ . Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας λέμε πως το τρανζίστορ βρίσκεται στην (ορθά) ενεργό περιοχή (active region) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ενίσχυσης.

Αν η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι πολωμένη ορθά και η επαφή βάσης-εκπομπού ανάστροφα, τότε το τρανζίστορ θα εμφανίζει επίσης «δράση»<sup>7</sup>. Ωστόσο, επειδή οι προϋποθέσεις που αφορούν τις προσμίξεις των διάφορων τμημάτων του τρανζίστορ δεν θα πληρούνται, το «κλάσμα υποκλοπής»  $\alpha$  θα είναι πολύ μικρό και αναντίστοιχο με αυτό που δίνει ο κατασκευαστής του τρανζίστορ. Στην περίπτωση αυτή λέμε πως το τρανζίστορ βρίσκεται στον ανάστροφα ενεργό τρόπο λειτουργίας (ή ανάστροφο τρόπο – reverse

<sup>7</sup>Θα εμφανίζεται δηλαδή το φαινόμενο της «υποκλοπής» ηλεκτρονίων από την επαφή βάσης-συλλέκτη και σάρωσής τους προς τον εκπομπό.



Σχήμα 3.12 Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας διπολικού τρανζίστορ

mode). Επειδή στην περίπτωση αυτή τα χαρακτηριστικά του τρανζίστορ είναι πρακτικά άγνωστα, ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας θα πρέπει να αποφεύγεται.

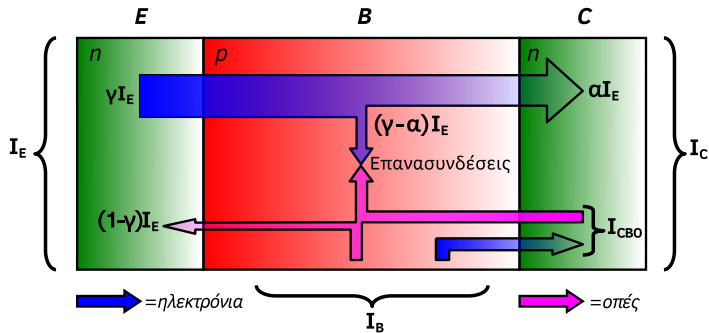
Αν η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι πολωμένη ανάστροφα και το ίδιο ισχύει και για την επαφή βάσης-εκπομπού, τότε είναι φανερό πως το ρεύμα που θα διαρρέει το τρανζίστορ θα είναι σχεδόν μηδενικό. Λέμε τότε πως το τρανζίστορ βρίσκεται στην αποκοπή (cutoff). Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας υπάρχει ανοικτό κύκλωμα μεταξύ εκπομπού και συλλέκτη, και άρα το τρανζίστορ συμπεριφέρεται ως ανοικτός διακόπτης.

Αν η επαφή βάσης-εκπομπού είναι πολωμένη ορθά και το ίδιο ισχύει και για την επαφή βάσης-συλλέκτη, τότε είναι φανερό πως το ρεύμα που θα διαρρέει το τρανζίστορ θα είναι πολύ μεγάλο, αντίστοιχο του ρεύματος των δύο διόδων που το αποτελούν και οι οποίες θα είναι ορθά πολωμένες. Λέμε τότε πως το τρανζίστορ βρίσκεται στον κόρο (saturation). Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας υπάρχει κλειστό κύκλωμα μεταξύ εκπομπού και συλλέκτη, και άρα το τρανζίστορ συμπεριφέρεται ως κλειστός διακόπτης. Στην περιοχή κόρου είναι προφανές ότι δεν εμφανίζεται «δράση» του τρανζίστορ, άρα τα ρεύματα των ακροδεκτών του δεν υπακούουν στις αναλογίες που αναφέραμε για την περίπτωση του ενεργού τρόπου λειτουργίας.

Την ιδιότητα του τρανζίστορ να συμπεριφέρεται ως ανοικτός διακόπτης στην αποκοπή και ως κλειστός στον κόρο την εκμεταλλευόμαστε για τη σχεδίαση ψηφιακών κυκλωμάτων. Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.12 συνοψίζονται οι τέσσερις τρόποι λειτουργίας στους οποίους αναφερθήκαμε.

### 3.5 Σχέσεις ρευμάτων στην ενεργό περιοχή

Στα προηγούμενα θεωρήσαμε ένα ιδανικό διπολικό τρανζίστορ τύπου npn, για το οποίο υποθέσαμε σχεδόν μηδενικές προσμίξεις στη βάση (άρα και ελάχιστες επανασυνδέσεις οπών-ηλεκτρονίων στην περιοχή αυτή) και αμελητέα τα ανάστροφα ρεύματα των επαφών. Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται οι συνιστώσες των διάφορων ρευμάτων σε ένα πραγματικό (μη ιδανικό)



Σχήμα 3.13 Συνιστώσες ρευμάτων σε διπολικό τρανζίστορ

διπολικό τρανζίστορ. Το ρεύμα του εκπομπού ( $I_E$ ) θα οφείλεται στη ροή ενός μεγάλου αριθμού ηλεκτρονίων που αντιστοιχούν στο ρεύμα  $\gamma I_E$  και στη ροή ενός πολύ μικρότερου αριθμού οπών (λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης προσμίξεων στη βάση) που αντιστοιχούν στο ρεύμα  $(1 - \gamma)I_E$ . Προφανώς, η τιμή του συντελεστή  $\gamma$  θα πλησιάζει πάρα πολύ τη μονάδα (και θα είναι ίση με αυτήν στην ιδανική περίπτωση). Το ρεύμα του συλλέκτη ( $I_C$ ) θα οφείλεται στη ροή της μεγάλης πλειοψηφίας των ηλεκτρονίων του εκπομπού που σαρώνονται προς τον συλλέκτη, και που αντιστοιχούν στο ρεύμα  $\alpha I_E$ , καθώς και στο μικρό ρεύμα ανάστροφης πόλωσης της επαφής βάσης-συλλέκτη, που συμβολίζεται με  $I_{CBO}$ . Θα ισχύει, επομένως:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (3.3)$$

Από τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff θα έχουμε:

$$I_E = I_C + I_B \quad (3.4)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.3) και (3.4) και λύνοντας ως προς  $I_B$  παίρνουμε:

$$I_B = (1 - \alpha)I_E - I_{CBO} \quad (3.5)$$

Παρόμοια, λύνοντας ως προς  $I_C$  παίρνουμε:

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha} \quad (3.6)$$

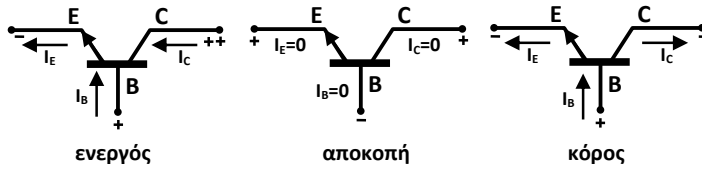
Με βάση τις σχέσεις (3.1) και (3.2) ισχύει:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3.7)$$

Με τη βοήθεια της τελευταίας, η σχέση (3.6) γράφεται, ισοδύναμα:

$$I_C = \beta I_B + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha} \quad (3.8)$$





Σχήμα 3.14 Φορές των ρευμάτων στους διάφορους τρόπους λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

Είναι καλή ευκαιρία να βρούμε την έκφραση του  $\alpha$  ως προς το  $\beta$ . Λύνοντας τη σχέση (3.6) ως προς  $\alpha$  μπορούμε εύκολα να βρούμε πως:

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (3.9)$$

Με τη βοήθεια της σχέσης (3.9) η σχέση (3.8) μπορεί να γραφτεί, ισοδύναμα:

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CB0} \quad (3.10)$$

Ολοκληρώνοντας την αναφορά μας στις σχέσεις των ρευμάτων σε ένα διπολικό τρανζίστορ, αξίζει να παρατηρήσουμε πως στην αγωγιμότητα της διάταξης συμβάλλουν και οι δύο τύποι ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρόνια και οπές), όπως είναι φανερό και από το Σχήμα 3.13. Η παρατήρηση αυτή είναι που δικαιολογεί και τον προσδιορισμό «διπολικός» για το τρανζίστορ του συγκεκριμένου τύπου.

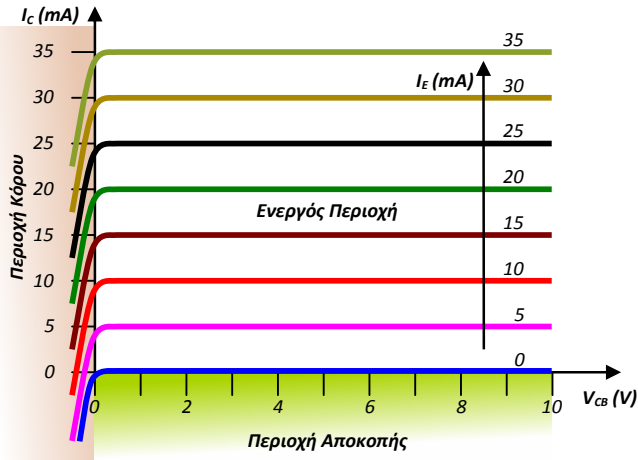
### 3.6 Χαρακτηριστικές

Ας προσπαθήσουμε να αναπαραστήσουμε γραφικά τη σχέση μεταξύ του ρεύματος του συλλέκτη ( $I_C$ ) και της τάσης συλλέκτη-βάσης ( $V_{CB}$ ) για την περίπτωση ιδανικού διπολικού τρανζίστορ ( $\alpha \simeq 1$ ) και για διάφορες τιμές του ρεύματος του εκπομπού ( $I_E$ ).

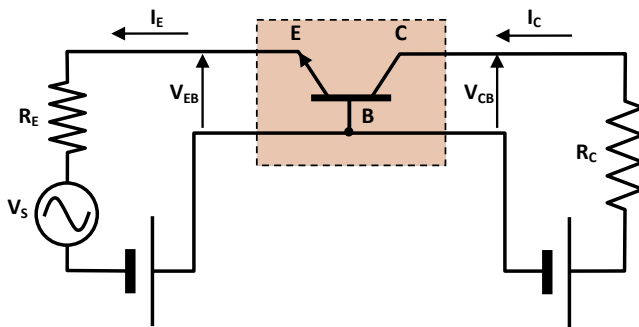
Ας ξεκινήσουμε υποθέτοντας ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στον ενεργό τρόπο λειτουργίας (active mode). Τότε το ρεύμα του συλλέκτη θα είναι σχεδόν ίσο με το ρεύμα του εκπομπού (όλα τα ηλεκτρόνια που φθάνουν στη βάση θα σαρώνονται προς τον συλλέκτη) και πρακτικά ανεξάρτητο από την τάση «σάρωσης»  $V_{CB}$ .

Ας υποθέσουμε, στη συνέχεια, ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στην αποκοπή. Τότε, τόσο το ρεύμα του συλλέκτη όσο και το ρεύμα του εκπομπού θα είναι σχεδόν μηδενικά, σύμφωνα με όσα έχουμε προαναφέρει.

Αν η επαφή βάσης-συλλέκτη πολωθεί και αυτή ορθά, τότε το τρανζίστορ εισέρχεται στην περιοχή κόρου (saturation region). Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα του συλλέκτη θα αντιστρέψει τη φορά του σε σχέση με εκείνη στην ενεργό λειτουργία (βλπ. και Σχήμα 3.14) και η τιμή του θα εξαρτάται πάρα πολύ από την τιμή της τάσης  $V_{CB}$  ορθής πόλωσης της επαφής βάσης-συλλέκτη.



Σχήμα 3.15 Σμήνος χαρακτηριστικών  $I_C-V_{CB}$  για ιδανικό διπολικό τρανζίστορ

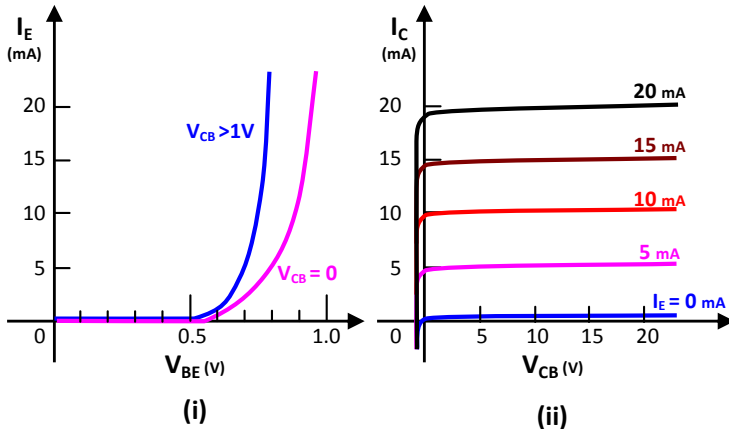


Σχήμα 3.16 Συνδεσμολογία κοινής βάσης με το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη

Τα πιο πάνω συμπεράσματα συνοψίζονται στο σμήνος χαρακτηριστικών του Σχήματος 3.15 και αφορούν το διπολικό τρανζίστορ ανεξάρτητα από τον τύπο της συνδεσμολογίας που χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε αναλυτικότερα τις χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ ξεχωριστά για καθεμιά από τις τρεις βασικές συνδεσμολογίες του (κοινής βάσης, κοινού εκπομπού και κοινού συλλέκτη).

### 3.6.1 Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης

Ας θεωρήσουμε τη συνδεσμολογία κοινής βάσης του Σχήματος 3.16 και ας αντιμετωπίσουμε το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη (τετράπολο). Η θύρα εισόδου αποτελείται από τον ακροδέκτη του εκπομπού και τον ακροδέκτη της βάσης, ενώ η θύρα εξόδου από τον ακροδέκτη του συλλέκτη και τον (κοινό) ακροδέκτη της βάσης. Αν ακολουθήσουμε τη σύμβαση που ισχύει για



Σχήμα 3.17 Χααρακτηριστικές εισόδου (i) και εξόδου (ii) για διπολικό τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινής βάσης

τα δίθυρα, θα πρέπει να θεωρήσουμε ως θετικά τα ρεύματα που εισέρχονται σε κάποιον ακροδέκτη του διθύρου και ως αρνητικά εκείνα που εξέρχονται. Με δεδομένη τη σύμβαση αυτή, το ρεύμα εισόδου του διθύρου θα είναι ίσο με  $-I_E$ , ενώ η τάση εισόδου θα είναι προφανώς ίση με  $V_{EB}$ . Προκειμένου, ωστόσο, να αποφύγουμε τυχόν σύγχυση από τη χρήση των προσήμων, θα θεωρήσουμε ως ρεύμα εισόδου το ρεύμα  $I_E$ , ενώ ως τάση εισόδου την τάση  $V_{BE}$ . Η μορφή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών εισόδου δεν θα επηρεαστεί από την παραδοχή αυτή.

Η επαφή εκπομπού-βάσης (EB), η οποία και καθορίζει τη μορφή των χαρακτηριστικών εισόδου του διθύρου, συμπεριφέρεται όπως μια ορθά πολωμένη δίοδος, επομένως οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές θα προκύπτουν από τον νόμο της επαφής EB:

$$I_E = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_\theta}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

όπου  $I_S$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου και ο συντελεστής ιδανικότητας ( $n$ ) υποτέθηκε ίσος με τη μονάδα. Με την αύξηση της τιμής της τάσης ανάστροφης πόλωσης της επαφής συλλέκτη-βάσης ( $V_{EB} > 0$ ), και για δεδομένη τάση  $V_{EB}$ , το ρεύμα  $I_E$  του εκπομπού θα αυξηθεί. Αυτό συμβαίνει επειδή το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης της επαφής CB αυξάνεται, με αποτέλεσμα το «ενεργό» πλάτος της βάσης να μειώνεται. Κατά συνέπεια, η σάρωση των ηλεκτρονίων προς τον συλλέκτη είναι ταχύτερη και το ρεύμα του συλλέκτη μεγαλύτερο. Άρα και η «ανατροφοδότηση» ηλεκτρονίων από τον συλλέκτη προς τον εκπομπό θα είναι ταχύτερη και άρα και το ρεύμα του εκπομπού μεγαλύτερο.

Στο Σχήμα 3.17-ι φαίνεται η γραφική παράσταση της σχέσης (3.11), για διάφορες τιμές της τάσης  $V_{CB}$ . Οι καμπύλες αυτές αποτελούν τις χαρακτη-

ριστικές εισόδου του διπολικού τρανζίστορ σε μια συνδεσμολογία κοινής βάσης.

### 3.6.2 Χαρακτηριστικές εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης

Ας εξετάσουμε, τώρα, το κύκλωμα εξόδου της συνδεσμολογίας κοινής βάσης του Σχήματος 3.16: Αφού αναφερόμαστε στις χαρακτηριστικές εξόδου της συνδεσμολογίας, μας ενδιαφέρει η σχέση του ρεύματος εξόδου  $I_C$  με την τάση εξόδου  $V_{CB}$ . Θα πρέπει, βέβαια, να λάβουμε υπόψη μας και την εξάρτηση του ρεύματος του συλλέκτη  $I_C$  από το ρεύμα του εκπομπού  $I_E$  (ρεύμα εισόδου). Καθώς η επαφή συλλέκτη-βάσης είναι ανάστροφα πολωμένη, το ρεύμα του συλλέκτη  $I_C$  εξαρτάται αποκλειστικά από το ρεύμα του εκπομπού  $I_E$ . Όταν το ρεύμα του εκπομπού είναι μηδενικό, το ρεύμα του συλλέκτη είναι ίσο με το ανάστροφο ρεύμα της επαφής CB ( $I_{CBO}$ ). Το ρεύμα αυτό είναι, προφανώς, πάρα πολύ μικρό. Όταν το ρεύμα του εκπομπού αυξάνεται, αυξάνεται αντίστοιχα και το ρεύμα του συλλέκτη, σύμφωνα με τη σχέση (3.3) την οποία είδαμε στα προηγούμενα:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (3.12)$$

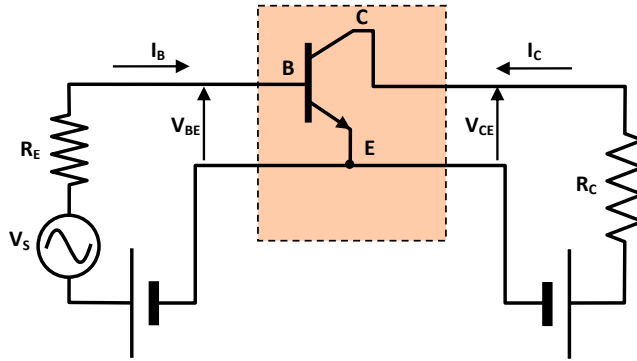
Για δεδομένο ρεύμα εκπομπού  $I_E$ , αύξηση της τάσης  $V_{CB}$  προκαλεί ελαφρά αύξηση του κλάσματος  $\alpha$  του τρανζίστορ και επομένως και του ρεύματος συλλέκτη  $I_C$ . Στο Σχήμα 3.17-ii φαίνεται η γραφική παράσταση του ρεύματος  $I_C$  του συλλέκτη σε συνάρτηση με την τάση  $V_{CB}$ , για διάφορες τιμές του ρεύματος εκπομπού  $I_E$ . Οι καμπύλες αυτές αποτελούν τις χαρακτηριστικές εξόδου του διπολικού τρανζίστορ στη συνδεσμολογία κοινής βάσης.

### 3.6.3 Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

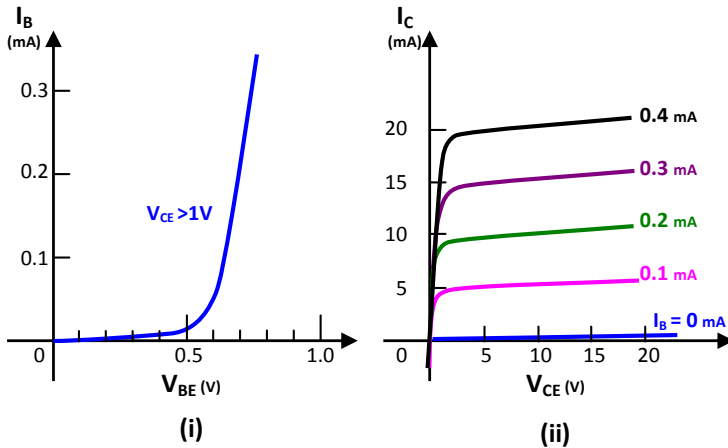
Ας θεωρήσουμε τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού του Σχήματος 3.18, και ας αντιμετωπίσουμε το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη. Η θύρα εισόδου αποτελείται από τον ακροδέκτη της βάσης και τον ακροδέκτη του εκπομπού, ενώ η θύρα εξόδου από τον ακροδέκτη του συλλέκτη και τον (κοινό) ακροδέκτη του εκπομπού. Όπως και στη συνδεσμολογία κοινής βάσης, η επαφή εκπομπού-βάσης (EB), η οποία και καθορίζει τη μορφή των χαρακτηριστικών εισόδου του διθύρου, συμπεριφέρεται όπως μια ορθά πολωμένη δίοδος, επομένως οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές θα προκύπτουν από τον νόμο της επαφής EB:

$$I_B = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_\theta}} - 1 \right) \quad (3.13)$$

Η επίδραση της τάσης  $V_C$  στην τιμή του ρεύματος της βάσης  $I_B$  είναι αμελητέα. Στο Σχήμα 3.19-i φαίνεται η γραφική παράσταση της σχέσης (3.13). Η



Σχήμα 3.18 Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού με το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη



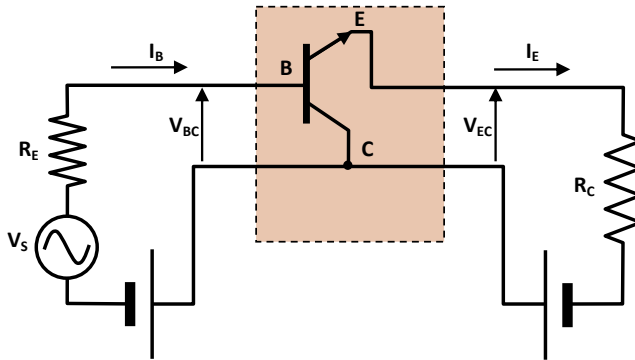
Σχήμα 3.19 Χαρακτηριστικές εισόδου (i) και εξόδου (ii) για διπολικό τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

καμπύλη αυτή αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική εισόδου του διπολικού τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού.

### 3.6.4 Χαρακτηριστικές εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Ας εξετάσουμε, τώρα, το κύκλωμα εξόδου της συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού του Σχήματος 3.18: Μας ενδιαφέρει η σχέση του ρεύματος εξόδου  $I_C$  με την τάση εξόδου  $V_C$ . Θα πρέπει, βέβαια, να λάβουμε υπόψη μας και την εξάρτηση του ρεύματος του συλλέκτη  $I_C$  από το ρεύμα της βάσης  $I_B$  (ρεύμα εισόδου). Το ρεύμα του συλλέκτη σχετίζεται με το ρεύμα της βάσης σύμφωνα με τη σχέση (3.10):

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO} \quad (3.14)$$



Σχήμα 3.20 Συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη με το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη

Με ανοικτό το κύκλωμα της βάσης ( $I_B = 0$ ) η σχέση (3.14) δίνει:

$$I_C = (\beta + 1)I_{CBO} \tag{3.15}$$

από την οποία μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού ενισχύεται και το ανάστροφο ρεύμα (ρεύμα διαρροής). Από τη σχέση (3.14) μπορούμε να συμπεράνουμε πως με την αύξηση του ρεύματος της βάσης  $I_B$  το ρεύμα του συλλέκτη  $I_C$  αυξάνεται ανάλογα, με συντελεστή αναλογίας το  $\beta$  του τρανζίστορ.

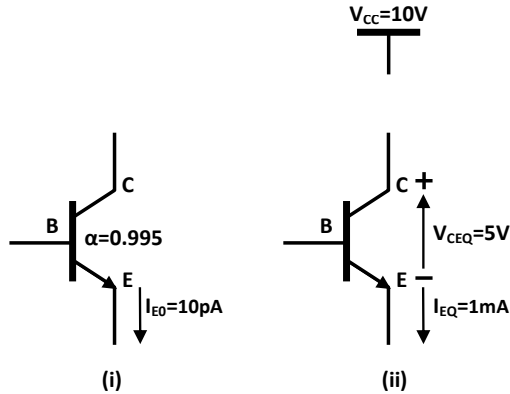
Στο Σχήμα 3.19-ii φαίνεται η γραφική παράσταση του ρεύματος  $I_C$  του συλλέκτη σε συνάρτηση με την τάση  $V_C$ , για διάφορες τιμές του ρεύματος βάσης  $I_B$ . Οι καμπύλες αυτές αποτελούν τις χαρακτηριστικές εξόδου του διπολικού τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού. Η ελαφρά κλίση των χαρακτηριστικών δικαιολογείται από την αύξηση του  $\alpha$  (επομένως και του  $\beta$ ) με την αύξηση της τάσης  $V_{CE}$ .

### 3.6.5 Χαρακτηριστικές εισόδου/εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη

Για την περίπτωση της συνδεσμολογίας κοινού συλλέκτη (Σχήμα 3.20) ισχύουν όσα αναφέραμε και για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, αφού η πρώτη μπορεί να προκύψει από τη δεύτερη με αμοιβαία εναλλαγή του συλλέκτη και του εκπομπού.

### 3.6.6 Σύγκριση συνδεσμολογιών κοινής βάσης/κοινού εκπομπού

Η βασικότερη διαφορά μεταξύ των συνδεσμολογιών κοινής βάσης και κοινού εκπομπού είναι η εξής: Στη συνδεσμολογία κοινής βάσης το ρεύμα εξόδου ( $I_C$ ) είναι περίπου ίσο με το ρεύμα εισόδου ( $I_E$ ). Αντίθετα, στη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού το ρεύμα εξόδου ( $I_C$ ) είναι πολλαπλάσιο του ρεύματος εισόδου ( $I_B$ ). Αυτό συνεπάγεται πως με την πρώτη συνδεσμολογία είναι αδύνατη η ενίσχυση ρεύματος, ενώ με τη δεύτερη είναι δυνατή.



Σχήμα 3.21 Δεδομένα διπολικού τρανζίστορ προς πόλωση

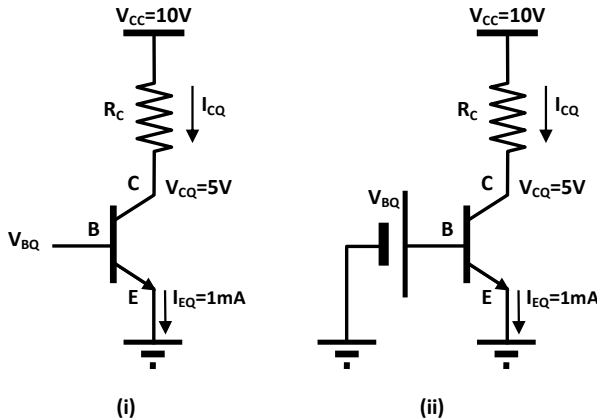
### 3.6.7 Θερμοκρασιακή εξάρτηση των χαρακτηριστικών εισόδου /εξόδου

Κατά τη σχεδίαση κυκλωμάτων με τρανζίστορ θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας την εξάρτηση των χαρακτηριστικών εισόδου/εξόδου από τη θερμοκρασία. Οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  εξαρτώνται σημαντικά από τη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα αντίστοιχη εξάρτηση των χαρακτηριστικών. Για την εξασφάλιση της ανοχής των κυκλωμάτων στις θερμοκρασιακές μεταβολές χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνικές, μερικές από τις οποίες θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

## 3.7 Πόλωση στην ενεργό περιοχή

Όπως έχουμε ήδη τονίσει, όταν ένα τρανζίστορ χρησιμοποιείται ως στοιχείο ενίσχυσης θα πρέπει να λειτουργεί στην ενεργό περιοχή. Για να συμβαίνει αυτό θα πρέπει να πολώνεται κατάλληλα με τη χρήση πηγών τροφοδοσίας και αντιστατών προκειμένου να τίθεται στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας (ηρεμίας). Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε μερικούς τυπικούς τρόπους πόλωσης του διπολικού τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή λειτουργίας και θα παρουσιάσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός.

Ας θεωρήσουμε το τρανζίστορ ηρη του Σχήματος 3.21-i, από τον κατασκευαστή του οποίου γνωρίζουμε ότι  $\alpha=0.995$  και  $I_{E0}=10\text{pA}$ , όπου  $I_{E0}$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου για την επαφή εκπομπού-βάσης. Ας υποθέσουμε ότι το τρανζίστορ αυτό θα πρέπει να πολωθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η τάση ηρεμίας μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού  $V_{CEQ}$  να είναι ίση με 5V, και το ρεύμα ηρεμίας  $I_{EQ}$  του εκπομπού να είναι ίσο με 1mA, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21-ii. Για την πόλωση του συλλέκτη θα χρησιμοποιηθεί μια πηγή σταθερής τάσης  $V_{CC}=10\text{V}$ . Πρόσθετες πηγές τάσεων διαφορετικών τιμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, αν και προτιμούμε να τις αποφεύγουμε για τους λόγους που θα εξηγήσουμε στη συνέχεια.



Σχήμα 3.22 Άμεση πόλωση στη βάση

Αν χρησιμοποιήσουμε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (γειώσουμε, δηλαδή, τον εκπομπό), τότε η τάση ηρεμίας  $V_{CQ}$  του συλλέκτη θα είναι ίση με  $V_{CEQ}$  ( $=5V$ ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22-ι. Επειδή η τιμή της τάσης αυτής είναι διαφορετική της τάσης τροφοδοσίας  $V_{CC}$ , θα παρεμβάλουμε μεταξύ της πηγής τροφοδοσίας και του συλλέκτη αντιστάτη  $R_C$  (βλπ. Σχήμα 3.22-ι), ο οποίος θα προκαλεί την απαραίτητη πτώση τάσης ώστε η τάση στον συλλέκτη να έχει την επιθυμητή τιμή. Η τιμή της αντίστασης  $R_C$  θα υπολογιστεί από τον νόμο του Ohm ως εξής:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CQ}}{I_{CQ}} \tag{3.16}$$

Για τον υπολογισμό του ρεύματος ηρεμίας του συλλέκτη ( $I_{CQ}$ ) θα χρησιμοποιήσουμε τη γνωστή σχέση που συνδέει τα ρεύματα εκπομπού και συλλέκτη στην ενεργό λειτουργία του τρανζίστορ:

$$I_C = \alpha I_E \tag{3.17}$$

η οποία για τις τιμές των ρευμάτων ηρεμίας γράφεται:

$$I_{CQ} = \alpha I_{EQ} \tag{3.18}$$

Αντικαθιστώντας την (3.18) στην (3.16) παίρνουμε:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CQ}}{\alpha I_{EQ}} \tag{3.19}$$

Με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων στη σχέση (3.19) βρίσκουμε πως η τιμή της αντίστασης  $R_C$  θα πρέπει να είναι ίση με  $5.025k\Omega$ .

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την τιμή της τάσης ηρεμίας μεταξύ της βάσης και του εκπομπού ( $V_{BEQ}$ , ή  $V_{BQ}$  αφού ο εκπομπός είναι γειωμένος και, επομένως, το δυναμικό του είναι μηδενικό) η οποία είναι απαραίτητη ώστε



το ρεύμα  $I_{EQ}$  του εκπομπού να έχει την επιθυμητή τιμή του 1 mA. Για το σκοπό αυτό μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$I_E = I_{E0} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_\theta}} - 1 \right) \quad (3.20)$$

η οποία αντιστοιχεί στον νόμο της επαφής βάσης-εκπομπού. Οι τιμές τάσης βάσης-εκπομπού που χρησιμοποιούμε είναι πολύ μεγαλύτερες της θερμοκίνης τάσης  $V_\theta$ , οπότε η σχέση (3.20) μπορεί να απλοποιηθεί στην:

$$I_E = I_{E0} e^{\frac{V_{BE}}{V_\theta}} \quad (3.21)$$

την οποία και θα χρησιμοποιούμε στο εξής. Λύνοντας τη σχέση (3.21) ως προς  $V_{BE}$  έχουμε:

$$V_{BE} = V_\theta \ln \frac{I_E}{I_{E0}} \quad (3.22)$$

η οποία, για τις αντίστοιχες τιμές ηρεμίας, γράφεται:

$$V_{BQ} = V_\theta \ln \frac{I_{EQ}}{I_{E0}} \quad (3.23)$$

Αν λάβουμε υπόψη μας πως η τιμή της θερμοκίνης τάσης  $V_\theta$  είναι περίπου ίση με 25mV και με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων στη σχέση (3.23) βρίσκουμε πως η τιμή της τάσης πόλωσης  $V_{BQ}$  της βάσης θα πρέπει να είναι ίση με 0.632V.

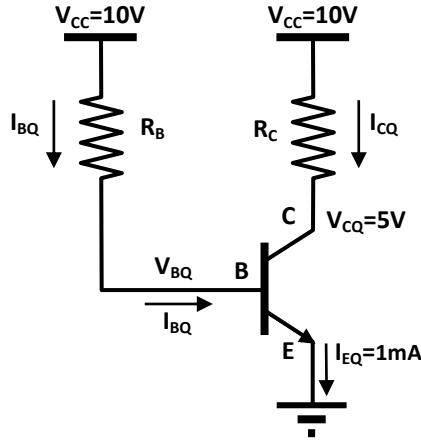
### 3.7.1 Άμεση πόλωση στη βάση

Η τάση  $V_{BQ}$  την οποία υπολογίσαμε πιο πάνω μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στη βάση του τρανζίστορ κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 3.22-ii. Τα μειονεκτήματα αυτού του τρόπου πόλωσης είναι τα εξής: Το κύκλωμα απαιτεί δύο ανεξάρτητες πηγές τροφοδοσίας (τις  $V_{CC}$  και  $V_{BQ}$ ). Επιπλέον, η τάση τροφοδοσίας  $V_{BQ}$  έχει τιμή μικρή και δύσκολα επιτευξιμή στην απαιτούμενη ακρίβεια<sup>8</sup>. Επομένως, η πηγή τάσης  $V_{BQ}$  θα πρέπει να ρυθμίζεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια και να είναι πολύ καλά σταθεροποιημένη, πράγμα που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη. Μπορούμε, λοιπόν, να συμπεράνουμε ότι η πόλωση του τρανζίστορ με άμεση πόλωση στη βάση είναι εξαιρετικά ασταθής.

### 3.7.2 Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη

As τροποποιήσουμε το κύκλωμα του Σχήματος 3.22-ii κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 3.23. Αυτή τη φορά, αντί για τη ρύθμιση της τά-

<sup>8</sup>Θυμίζουμε ότι εξαιτίας της εκθετικής σχέσης του ρεύματος με την τάση ορθής πόλωσης μιας επαφής p-n, μικρή μεταβολή της τάσης αυτής συνεπάγεται σημαντική μεταβολή του αντίστοιχου ρεύματος.



Σχήμα 3.23 Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη

σης  $V_{BQ}$  θα προσπαθήσουμε να ρυθμίσουμε το ρεύμα ηρεμίας  $I_{BQ}$  της βάσης. Επιτυγχάνοντας την κατάλληλη τιμή του ρεύματος αυτού η τάση  $V_{BQ}$  θα προσαρμοστεί «αυτόματα», ώστε να λάβει την κατάλληλη τιμή (ίση με 0.632V για το παράδειγμα το οποίο εξετάζουμε).

Ας υπολογίσουμε την τιμή που θα πρέπει να έχει το ρεύμα ηρεμίας  $I_{BQ}$  της βάσης. Θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$I_C = \beta I_B \tag{3.24}$$

η οποία για τις τιμές ηρεμίας γράφεται:

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \tag{3.25}$$

και η οποία, επιλυόμενη ως προς  $I_{BQ}$ , δίνει:

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \tag{3.26}$$

Αν, επιπλέον, λάβουμε υπόψη μας ότι:

$$I_{CQ} = \alpha I_{EQ} \tag{3.27}$$

η σχέση (3.26) γράφεται:

$$I_{BQ} = \frac{\alpha I_{EQ}}{\beta} \tag{3.28}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \tag{3.29}$$

η (3.28) γίνεται:

$$I_{BQ} = (1 - \alpha) I_{EQ} \tag{3.30}$$

Με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων στην (3.30) βρίσκουμε ότι το ρεύμα ηρεμίας της βάσης  $I_{BQ}$  θα πρέπει να είναι ίσο με 5μΑ.

Ας υπολογίσουμε, τώρα, την τιμή της αντίστασης  $R_B$  (βλπ. Σχήμα 3.23) η οποία απαιτείται για να λάβει το ρεύμα  $I_{BQ}$  την πιο πάνω τιμή.

Με βάση το κύκλωμα του Σχήματος 3.23 θα ισχύει:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BQ}}{R_B} \quad (3.31)$$

ή, ισοδύναμα:

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BQ}}{I_{BQ}} \quad (3.32)$$

Αντικαθιστώντας στην τελευταία τα αριθμητικά δεδομένα βρίσκουμε ότι η τιμή της αντίστασης πόλωσης  $R_B$  της βάσης θα πρέπει να είναι ίση με 1.87ΜΩ.

Το πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας είναι ότι χρησιμοποιεί μοναδική πηγή τροφοδοσίας τόσο για την πόλωση του συλλέκτη όσο και για την πόλωση της βάσης. Ωστόσο, όπως και η προηγούμενη, είναι ασταθής. Αν αντικαταστήσουμε την έκφραση του  $\alpha$  σε σχέση με το  $\beta$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (3.33)$$

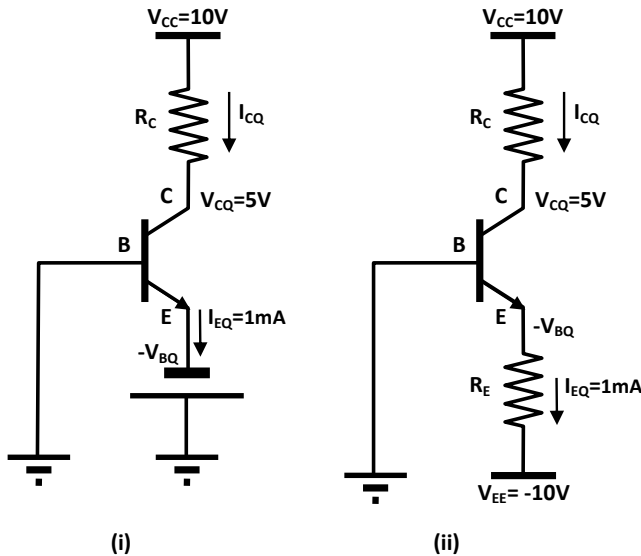
στη σχέση (3.30) παίρνουμε:

$$I_{BQ} = \frac{1}{\beta + 1} I_{EQ} \quad (3.34)$$

Έχοντας υπόψη μας τη μεγάλη διακύμανση του  $\beta$  (η οποία οφείλεται όχι μόνο στη θερμοκρασιακή του εξάρτηση αλλά και σε κατασκευαστικούς περιορισμούς οι οποίοι δεν επιτρέπουν την κατασκευή τρανζίστορ με  $\beta$  πολύ μεγάλης ακρίβειας), μπορούμε να συμπεράνουμε πως η τιμή του ρεύματος ηρεμίας της βάσης  $I_{BQ}$  θα είναι εξίσου ευμετάβλητη, όσο και το  $\beta$ . Αυτό συνεπάγεται την ασταθή πόλωση όσον αφορά τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία.

### 3.7.3 Πόλωση στον εκπομπό

Η σταθερότητα στην πόλωση ενός διπολικού τρανζίστορ μπορεί να εξασφαλιστεί με απευθείας ρύθμιση του ρεύματος του εκπομπού. Ας τροποποιήσουμε το κύκλωμα του Σχήματος 3.22-ii κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 3.24-i. Είναι φανερό ότι η τάση ορθής πόλωσης της επαφής βάσης-εκπομπού παραμένει στην επιθυμητή τιμή. Το πρόβλημα της χρήσης δύο διαφορετικών πηγών τροφοδοσίας υπάρχει και σε αυτή την περίπτωση. Αξίζει να προσέξει κάποιος ότι η συγκεκριμένη συνδεσμολογία είναι μια συνδεσμολογία κοινής βάσης (μιας και η βάση είναι γειωμένη). Μια περαιτέρω τροποποίηση μπορεί να γίνει με τη χρήση συμμετρικής τροφοδοσίας, σύμφωνα με το Σχήμα 3.24-ii. Η εισαγωγή της αντίστασης  $R_E$  στον εκπομπό είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλίζεται η κατάλληλη τιμή τάσης του εκπομπού,



Σχήμα 3.24 Πόλωση στον εκπομπό

η οποία θα πρέπει να είναι ίση με  $-V_{BQ}$ , σύμφωνα με τα προηγούμενα. Για τον αντιστάτη  $R_E$  ο νόμος του Ohm δίνει:

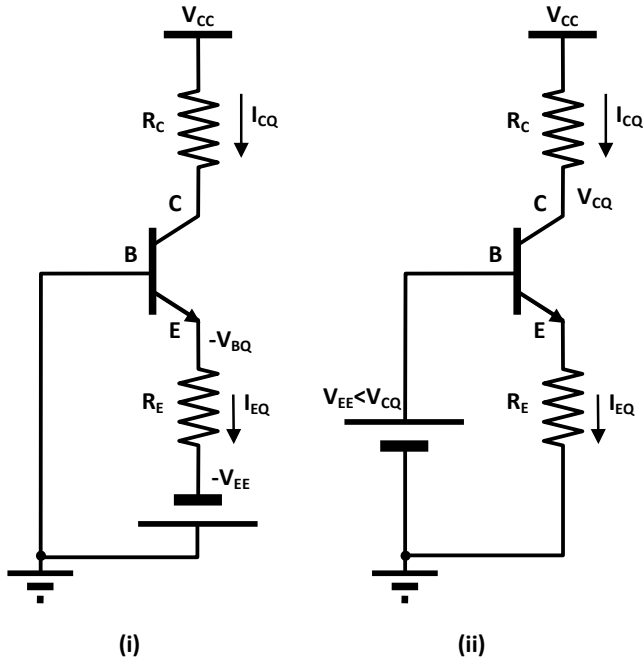
$$R_E = \frac{-V_{BQ} - V_{EE}}{I_{EQ}} \tag{3.35}$$

Με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων βρίσκουμε πως η τιμή της αντίστασης  $R_E$  είναι ίση με 9.368kΩ.

Με τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία, οποιαδήποτε κι αν είναι η τιμή του  $\beta$  του τρανζίστορ, το ρεύμα της βάσης προσαρμόζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα του εκπομπού να παραμένει σταθερό και ίσο με  $I_{EQ}$ . Ακόμα κι αν αντικαταστήσουμε το τρανζίστορ με ένα άλλο, από διαφορετικό κατασκευαστή, το ρεύμα του εκπομπού θα παραμείνει πρακτικά σταθερό. Το ίδιο θα ισχύει και αν το  $\beta$  μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Έχουμε, δηλαδή, μια σταθερή συνδεσμολογία πόλωσης. Το μειονέκτημά της είναι η χρήση δύο πηγών τροφοδοσίας.

### 3.7.4 Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό

Η συνδεσμολογία την οποία θα εξετάσουμε στη συνέχεια αποτελεί συγκερασμό των δύο προηγούμενων. Η συνδεσμολογία του Σχήματος 3.24-ii μπορεί να πάρει, ισοδύναμα, τη μορφή του Σχήματος 3.25-i. Η πηγή τροφοδοσίας  $V_{EE}$  μπορεί να μεταφερθεί προς την πλευρά της βάσης, χωρίς να μεταβληθεί το κύκλωμα εισόδου του τρανζίστορ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.25-ii. Με την τελευταία τροποποίηση, επομένως, το ρεύμα του εκπομπού δεν επηρεάζεται. Προκειμένου, ωστόσο, το τρανζίστορ να παραμείνει στην



Σχήμα 3.25 Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό

ενεργό περιοχή θα πρέπει να ισχύει  $V_{EE} < V_{CQ}$ , ώστε η επαφή βάσης - συλλέκτη να παραμένει ανάστροφα πολωμένη. Για να ικανοποιείται η προηγούμενη ανισότητα θα πρέπει, προφανώς, να ισχύει  $V_{EE} < V_{CC}$ .

Η πηγή τροφοδοσίας  $V_{EE}$  μπορεί να παραλειφθεί αν η τάση  $V_{EE}$  ληφθεί από την πηγή τροφοδοσίας  $V_{CC}$  μέσω διαιρέτη τάσης, με κατάλληλη επιλογή των τιμών των αντιστάσεων του διαιρέτη κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 3.26. Στην περίπτωση αυτή ο διαιρέτης τάσης αντιστοιχεί σε μια μη ιδανική πηγή τάσης, δηλαδή σε μια πηγή τάσης με μη μηδενική τιμή εσωτερικής αντίστασης. Πραγματικά, το δικτύωμα μεταξύ της βάσης και της γης για το κύκλωμα του Σχήματος 3.26 μπορεί να αντικατασταθεί από το αντίστοιχο ισοδύναμο Thevenin (βλπ Σχήμα 3.27) για το οποίο θα ισχύουν:

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad (3.36)$$

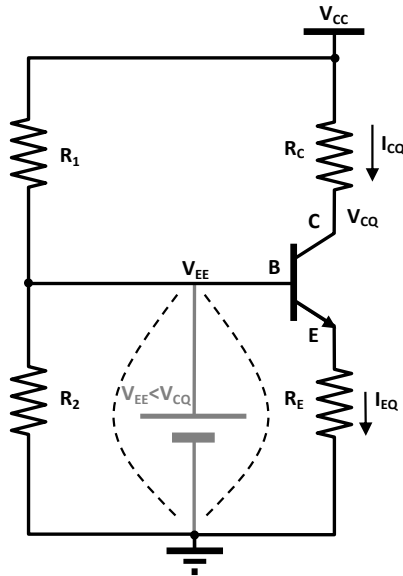
και

$$R_B = R_{Th} = R_1 // R_2 \quad (3.37)$$

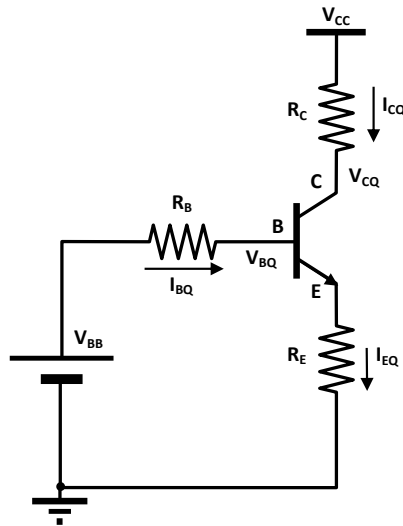
Είναι φανερό πως η πτώση τάσης πάνω στην «εσωτερική» αντίσταση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο μικρή, έτσι ώστε  $V_{BQ} \simeq V_{BB}$ .

Για την τάση  $V_{BQ}$  στη βάση ισχύει:

$$V_{BQ} = V_{BB} - I_{BQ} R_B \quad (3.38)$$



Σχήμα 3.26 Πόλωση μέσω διαίρετη τάσης



Σχήμα 3.27 Ισοδύναμο κύκλωμα για το κύκλωμα του Σχήματος 3.26

Επιπλέον:

$$V_{BQ} = V_{BEQ} + I_{EQ}R_E \quad (3.39)$$

Ο συνδυασμός των σχέσεων (3.38) και (3.39) θα δώσει:

$$V_{BEQ} + I_{EQ}R_E = V_{BB} - I_{BQ}R_B \quad (3.40)$$

Εάν απαιτήσουμε να ισχύει<sup>9</sup>:

$$I_{BQ}R_B \ll I_{EQ}R_E \quad (3.41)$$

η (3.40) γίνεται:

$$V_{BEQ} + I_{EQ}R_E = V_{BB} \quad (3.42)$$

ή

$$I_{EQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_E} \quad (3.43)$$

Η τελευταία σχέση υποδηλώνει σταθερότητα στην πόλωση μιας και τα μεγέθη τα οποία υπεισέρχονται σε αυτήν είναι σταθερά (απουσιάζουν ευμετάβλητοι όροι, όπως το  $\beta$ ). Αξίζει να παρατηρήσουμε πως η συγκεκριμένη συνδεσμολογία δεν ταυτίζεται με καμιά από τις βασικές συνδεσμολογίες του τρανζίστορ (κοινού εκπομπού, κοινής βάσης, ή κοινού συλλέκτη) μιας και κανένας από τους τρεις ακροδέκτες του τρανζίστορ δεν είναι κοινός (γειωμένος).

### 3.8 Ισοδύναμο κυκλώματα

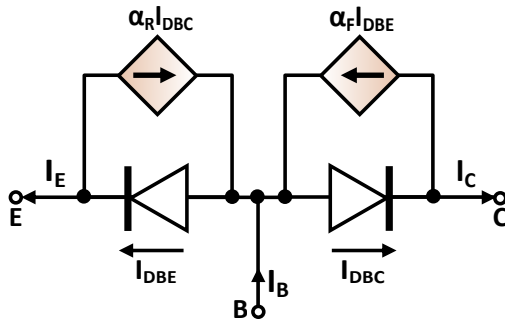
Η ανάλυση κυκλωμάτων που περιέχουν διπολικά τρανζίστορ μπορεί να απλοποιηθεί με την αντικατάσταση των τρανζίστορ με κάποιο ισοδύναμο κύκλωμα. Από τα διάφορα ισοδύναμο κυκλώματα που υπάρχουν, επιλέγεται κάθε φορά το καταλληλότερο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αν, για παράδειγμα, αναλύεται ένα κύκλωμα στις υψηλές συχνότητες, τότε θα πρέπει να επιλεγεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο να μπορεί να περιγράψει (να «μιμηθεί») με ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός τρανζίστορ στις συχνότητες αυτές.

#### 3.8.1 Μοντέλο των Ebers-Moll

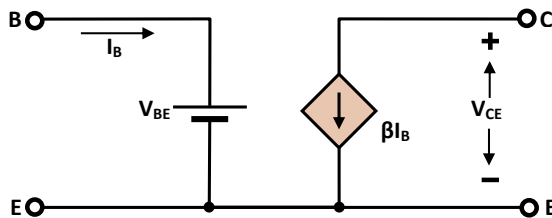
Πρόκειται για ένα αρκετά ακριβές μοντέλο το οποίο βασίζεται στο γεγονός ότι το διπολικό τρανζίστορ αποτελείται από δύο επαφές p-n: Την επαφή βάσης-εκπομπού και την επαφή βάσης-συλλέκτη. Στο ισοδύναμο κύκλωμα που το περιγράφει, οι επαφές αυτές αντιστοιχούν σε δύο διόδους συνδεδεμένες η μία δίπλα στην άλλη (back to back), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.28. Το ισοδύναμο κύκλωμα περιλαμβάνει, επίσης, δύο εξαρτημένες πηγές ρεύματος (ελεγχόμενες από ρεύμα) οι οποίες «μιμούνται» τον μηχανισμό «υποκλοπής» ηλεκτρονίων τον οποίο εξηγήσαμε στα προηγούμενα: Η μία (εκείνη μεταξύ βάσης και συλλέκτη) αφορά την ορθά ενεργό λειτουργία (active mode), ενώ η άλλη (μεταξύ εκπομπού και βάσης) αφορά την αντίστροφα ενεργό λειτουργία (reverse mode).

Το μοντέλο Ebers-Moll είναι ένα μοντέλο μεγάλου σήματος. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που δίνει αφορούν τις τιμές των μεγεθών τάσης ή ρεύματος χωρίς να γίνεται διάκριση σε DC ή AC συνιστώσα. Ωστόσο η

<sup>9</sup> Η συγκεκριμένη συνθήκη ικανοποιείται πολύ εύκολα, εξαιτίας της μεγάλης τιμής του  $\beta$ .



Σχήμα 3.28 Ισοδύναμο κύκλωμα για το μοντέλο Ebers-Moll



Σχήμα 3.29 Ισοδύναμο κύκλωμα για το συνεχές (DC)

χρήση του κατά την ανάλυση «επί χάρτου» εμφανίζει το πρόβλημα πως οι εξισώσεις οι οποίες το περιγράφουν<sup>10</sup> είναι μη γραμμικές και, επομένως, επιλύονται δύσκολα. Ωστόσο, το μοντέλο Ebers-Moll είναι κατάλληλο για τη χρήση σε προσομοιωτές κυκλωμάτων, τόσο επειδή δεν θέτει περιορισμούς στην τιμή του σήματος όσο και επειδή περιγράφει με επιτυχία όλες τις περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ. Για εκτενέστερη ανάλυση του μοντέλου Ebers-Moll ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία [5, 6].

### 3.8.2 Μοντέλο για το συνεχές (DC)

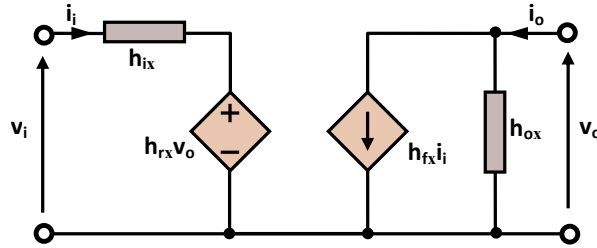
Το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.29 περιγράφει το διπολικό τρανζίστορ στην ορθά ενεργό λειτουργία. Για την επαφή βάσης-εκπομπού χρησιμοποιεί το μοντέλο της τυπικής διόδου σε ορθή πόλωση, ενώ για το ρεύμα  $I_C$  του συλλέκτη χρησιμοποιεί την προσέγγιση  $I_C = \beta I_B$ , όπου  $I_B$  το ρεύμα της βάσης. Πρόκειται για ένα μοντέλο μεγάλου σήματος, το οποίο χρησιμοποιείται για την DC ανάλυση κυκλωμάτων που περιέχουν διπολικά τρανζίστορ και αντιστοιχεί σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού.

### 3.8.3 Μοντέλα μικρού σήματος

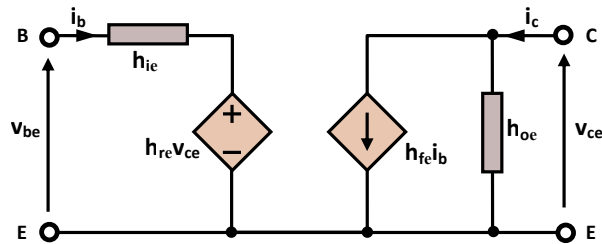
Τα μοντέλα μικρού σήματος που περιγράφουν ένα διπολικό τρανζίστορ προϋποθέτουν σήματα πολύ μικρού πλάτους τα οποία μεταβάλλονται γύρω

<sup>10</sup>Πρόκειται για τους νόμους των επαφών p-n των διόδων του μοντέλου.





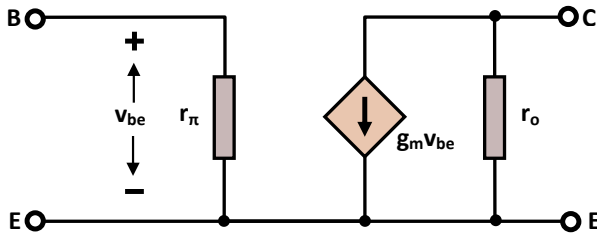
Σχήμα 3.30 h-υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα



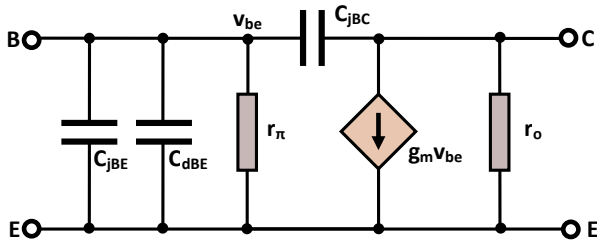
Σχήμα 3.31 h-υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

από το σημείο ηρεμίας τους [7, 8]. Κατά την ανάλυση μικρού σήματος οι εξισώσεις που περιγράφουν το τρανζίστορ μπορούν να «γραμμικοποιηθούν», και το τρανζίστορ μπορεί να θεωρηθεί ως δίθυρη διάταξη. Πιο συγκεκριμένα, οι h-υβριδικές παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν εύκολα από τις χαρακτηριστικές του τρανζίστορ (για δεδομένο σημείο ηρεμίας) και για το λόγο αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.30 βρίσκει ευρεία χρήση στην ανάλυση κυκλωμάτων με τρανζίστορ, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις βασικές συνδεσμολογίες (κοινού εκπομπού, κοινής βάσης και κοινού συλλέκτη). Για την περίπτωση συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού ο δείκτης x αντικαθίσταται με e, για συνδεσμολογία κοινής βάσης με b και για συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη με c. Ο δείκτης f (από το forward) υποδηλώνει σχέση της εξόδου με την είσοδο, ενώ ο δείκτης r (από το reverse) σχέση της εισόδου με την έξοδο. Στο Σχήμα 3.31 απεικονίζεται το h-υβριδικό ισοδύναμο διπολικού τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού:

- Η παράμετρος  $h_{ie}$  αντιστοιχεί στην αντίσταση εισόδου του τρανζίστορ για βραχυκυκλωμένη έξοδο.
- Η παράμετρος  $h_{re}$  είναι αδιάστατο μέγεθος και αντιστοιχεί στην απολαβή τάσης της εισόδου ως προς την έξοδο, για ανοικτοκυκλωμένη είσοδο.
- Η παράμετρος  $h_{fe}$  είναι αδιάστατο μέγεθος που αντιστοιχεί στην απολαβή ρεύματος της εξόδου ως προς την είσοδο, για βραχυκυκλωμένη έξοδο και ταυτίζεται με το  $\beta$  του τρανζίστορ.



Σχήμα 3.32 π-υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα για χαμηλές συχνότητες



Σχήμα 3.33 π-υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα για υψηλές συχνότητες

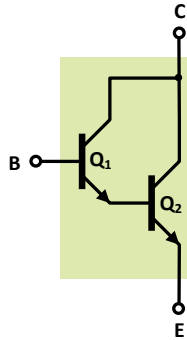
- Η παράμετρος  $h_{oe}$  αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα εξόδου για ανοικτο-κυκλωμένη είσοδο.

Παρόμοιο με το προηγούμενο, το π-υβριδικό ισοδύναμο ενός διπολικού τρανζίστορ (βλπ. Σχήμα 3.32) αποτελείται από την αντίσταση εισόδου  $r_{\pi}$ , την αντίσταση εξόδου  $r_o$  και μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από την τάση βάσης-συλλέκτη ( $v_{be}$ ) μέσω της διαγωγιμότητας  $g_m$ .

Το πλεονέκτημα του π-υβριδικού μοντέλου, το οποίο ισχύει για σήματα χαμηλών συχνοτήτων όπως και το h-υβριδικό μοντέλο, είναι πως μπορεί να επεκταθεί κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 3.33, ώστε να ισχύει και για σήματα υψηλών συχνοτήτων. Πράγματι, για σήματα υψηλών συχνοτήτων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι εσωτερικές (ή παρασιτικές) χωρητικότητες της διάταξης, και συγκεκριμένα η χωρητικότητα της επαφής βάσης-εκπομπού ( $C_{jBE}$ ), η χωρητικότητα διάχυσης μεταξύ βάσης και εκπομπού ( $C_{dBE}$ ) και η χωρητικότητα της επαφής βάσης-συλλέκτη ( $C_{jBC}$ ), η οποία αναφέρεται και ως χωρητικότητα Miller. Η ανάλυση κυκλωμάτων με διπολικά τρανζίστορ με τη βοήθεια των ισοδύναμων κυκλωμάτων τους θα περιγραφεί, για διάφορες εφαρμογές, σε επόμενο κεφάλαιο.

### 3.9 Ζεύγη διπολικών τρανζίστορ

Με την κατάλληλη διασύνδεση ζευγών διπολικών τρανζίστορ μπορούμε να πάρουμε υψηλές απολαβές ρεύματος ( $\beta$ ), σε σχέση με την απολαβή ρεύματος καθενός εκ των τρανζίστορ του ζεύγους.



Σχήμα 3.34 Συνδεσμολογία Darlington

### 3.9.1 Συνδεσμολογία Darlington

Ας θεωρήσουμε τη συνδεσμολογία του Σχήματος 3.34, η οποία αποτελείται από δύο διπολικά τρανζίστορ και ονομάζεται συνδεσμολογία Darlington. Ένα ζεύγος Darlington μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μοναδικό τρανζίστορ, με συλλέκτη τον κοινό συλλέκτη των δύο μελών του ζεύγους, βάση τη βάση του τρανζίστορ  $Q_1$  και εκπομπό τον εκπομπό του τρανζίστορ  $Q_2$ , σύμφωνα και με το Σχήμα 3.34. Με τη χρήση της σχέσης  $I_C = \beta I_B$  μπορούμε εύκολα να δείξουμε πως για ένα ζεύγος Darlington ισχύει:

$$\beta \simeq \beta_1 \beta_2 \quad (3.44)$$

Επομένως, η απολαβή ρεύματος ενός ζεύγους Darlington είναι πρακτικά ίση με το γινόμενο των απολαβών ρεύματος των τρανζίστορ που αποτελούν το ζεύγος. Η πτώση τάσης μεταξύ της βάσης και του εκπομπού του ζεύγους θα είναι ίση με το διπλάσιο της αντίστοιχης πτώσης τάσης για κάθε επιμέρους τρανζίστορ. Το γεγονός αυτό αποτελεί και ένα από τα μειονεκτήματα της συνδεσμολογίας. Ζεύγη Darlington διατίθενται στο εμπόριο σε ολοκληρωμένες συσκευασίες, αλλά μπορούν και να σχηματισθούν με τη χρήση διακριτών τρανζίστορ.

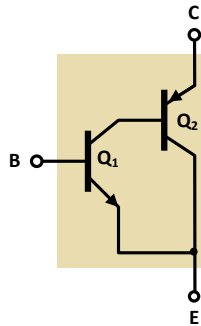
### 3.9.2 Συνδεσμολογία Sziklai

Εξίσου μεγάλη απολαβή ρεύματος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση της συνδεσμολογίας Sziklai, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.35. Εξαιτίας της χρήσης δύο τρανζίστορ διαφορετικών (συμπληρωματικών) τύπων (ενός  $nnp$  και ενός  $ppn$ ), η συνδεσμολογία αυτή αναφέρεται και ως συμπληρωματική συνδεσμολογία Darlington (complementary Darlington connection).

Εύκολα μπορεί να αποδειχθεί ότι για ένα ζεύγος Sziklai ισχύει:

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \quad (3.45)$$

όπου  $\beta$  η απολαβή ρεύματος του ζεύγους και  $\beta_1, \beta_2$  οι απολαβές ρεύματος των τρανζίστορ  $Q_1$  και  $Q_2$ , αντίστοιχα.



Σχήμα 3.35 Συνδεσμολογία Sziklai

Το πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας Sziklai είναι πως, σε αντίθεση με τη συνδεσμολογία Darlington, η πτώση τάσης μεταξύ βάσης και εκπομπού της συνδεσμολογίας είναι ίση με την αντίστοιχη πτώση τάσης καθενός εκ των μελών του ζεύγους.

### 3.10 Εφαρμογές

Το εύρος των εφαρμογών των διπολικών τρανζίστορ είναι τεράστιο. Με πολλές από αυτές θα ασχοληθούμε στα επόμενα κεφάλαια. Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε ενδεικτικά μερικές, για λόγους εμπέδωσης των γνώσεων σχετικά με το διπολικό τρανζίστορ που μέχρι στιγμής αποκτήθηκαν.

#### 3.10.1 Ακολουθητής εκπομπού (emitter follower)

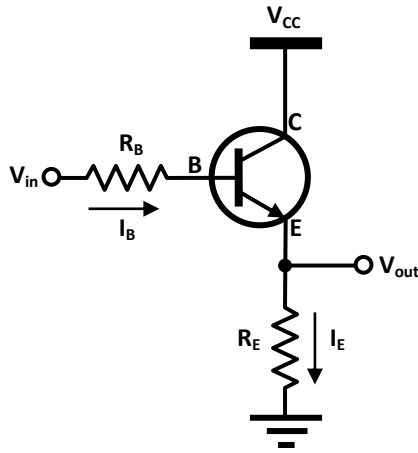
Πρόκειται για συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη και συνήθως χρησιμοποιείται ως απομονωτής τάσης (voltage buffer). Στη συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη η βάση παίζει τον ρόλο της εισόδου του κυκλώματος και ο εκπομπός τον ρόλο της εξόδου, ενώ ο συλλέκτης αποτελεί τον κοινό αγωγό μεταξύ των δύο κυκλωμάτων. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της συνδεσμολογίας κοινού συλλέκτη είναι η προσαρμογή των αντιστάσεων. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη αντίσταση του κυκλώματος της βάσης (κύκλωμα εισόδου) και στη μικρή αντίσταση του κυκλώματος του εκπομπού (κύκλωμα εξόδου), όπως θα δείξουμε στη συνέχεια.

Ένα απλό κύκλωμα ακολουθητή εκπομπού με τρανζίστορ ηρη φαίνεται στο Σχήμα 3.36. Για το κύκλωμα αυτό ισχύει:

$$V_{out} = V_{in} - I_B R_B - V_{BE} \quad (3.46)$$

Το ρεύμα βάσης ( $I_B$ ) είναι πολύ μικρό και μπορεί να αμεληθεί, άρα η σχέση (3.46) μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$V_{out} = V_{in} - V_{BE} \quad (3.47)$$



Σχήμα 3.36 Κύκλωμα ακολουθητή εκπομπού

Αν θεωρήσουμε τις μεταβολές των τάσεων εισόδου ( $V_{in}$ ) και εξόδου ( $V_{out}$ ) η σχέση (3.47) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\Delta V_{out} = \Delta V_{in} \quad (3.48)$$

Η προηγούμενη σχέση δείχνει πως οι μεταβολές του σήματος εξόδου είναι ίσες με τις μεταβολές του σήματος εισόδου, επομένως η έξοδος παρακολουθεί την είσοδο (ακολουθητής εκπομπού).

- Η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος είναι:

$$R_{in} = \frac{\Delta V_{in}}{\Delta I_B} \quad (3.49)$$

Ακόμη ισχύει:

$$I_E = \beta \cdot I_B \Rightarrow \Delta I_E = \beta \cdot \Delta I_B \Rightarrow \Delta I_B = \frac{\Delta I_E}{\beta} \quad (3.50)$$

Η σχέση (3.49) με τη βοήθεια των (3.48) και (3.50) γίνεται:

$$R_{in} = \beta \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_E} \quad (3.51)$$

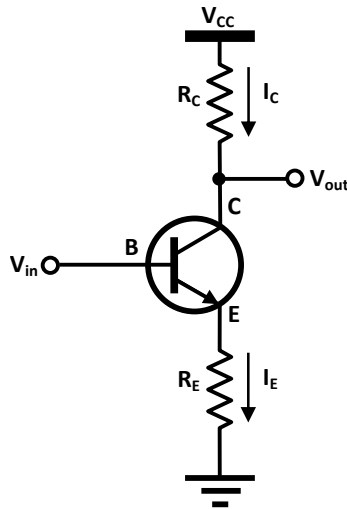
Όμως,

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_E} = R_E \quad (3.52)$$

οπότε η σχέση (3.51) γράφεται:

$$R_{in} = \beta R_E \quad (3.53)$$

Από την προηγούμενη σχέση είναι φανερό ότι η αντίσταση εισόδου είναι πολύ μεγάλη, μιας και η απολαβή ρεύματος  $\beta$  έχει πολύ μεγάλη τιμή.



Σχήμα 3.37 Πηγή ρεύματος με διπολικό τρανζίστορ

- Η αντίσταση εξόδου του κυκλώματος είναι:

$$R_{out} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_E} \quad (3.54)$$

Η τελευταία, με τη βοήθεια των (3.48) και (3.50), δίνει:

$$R_{out} = \frac{\Delta V_{in}}{\beta \cdot \Delta I_B} \quad (3.55)$$

ή

$$R_{out} = \frac{R_s + R_B}{\beta} \quad (3.56)$$

όπου  $R_s$  η αντίσταση της πηγής σήματος που υποθέτουμε πως τροφοδοτεί την είσοδο του κυκλώματος. Από την προηγούμενη σχέση είναι φανερό ότι η αντίσταση εξόδου είναι πολύ μικρή.

### 3.10.2 Πηγή ρεύματος

Έστω η συνδεσμολογία του Σχήματος 3.37. Είναι εύκολο να διαπιστώσουμε πως το ρεύμα που διαρρέει το διπολικό τρανζίστορ είναι ανεξάρτητο της αντίστασης  $R_C$  στον συλλέκτη.

Πράγματι, ισχύουν:

$$I_C = I_E \quad (3.57)$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \quad (3.58)$$

και

$$V_E = V_{in} - V_{BE} \quad (3.59)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.57), (3.58) και (3.59) βρίσκουμε:

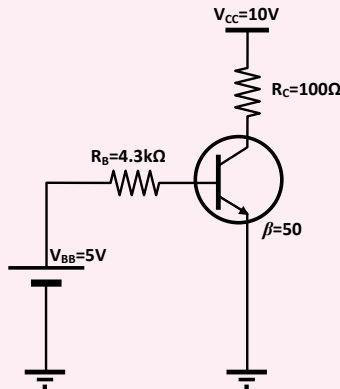
$$I_C = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_E} \quad (3.60)$$

από την οποία μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το ρεύμα ( $I_C$ ) του συλλέκτη είναι σταθερό, για δεδομένες τιμές της τάσης εισόδου ( $V_{in}$ ) και της αντίστασης  $R_E$  στον εκπομπό, και ανεξάρτητο της αντίστασης  $R_C$  στον συλλέκτη (η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η αντίσταση φόρτου). Έχουμε, επομένως, μια πηγή σταθερού ρεύματος.

### 3.11 Κριτήρια αξιολόγησης

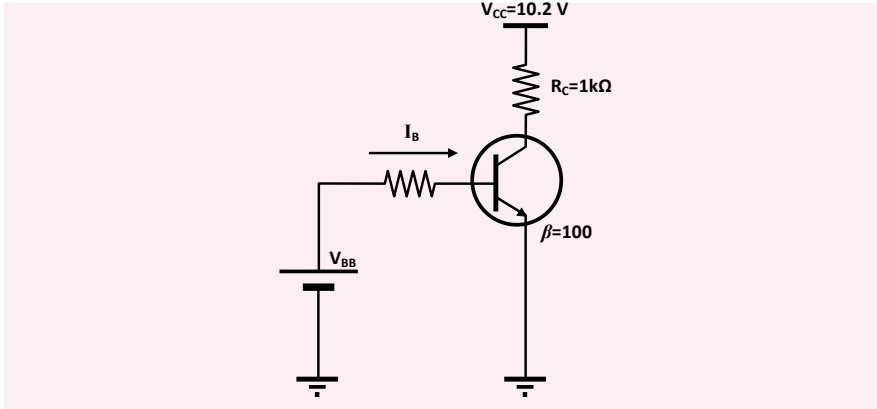
#### ● Κριτήριο Αξιολόγησης 3.1.

Δίνεται το κύκλωμα του πιο κάτω σχήματος, όπου το τρανζίστορ είναι κατασκευασμένο σε πυρίτιο. Να βρεθεί το δυναμικό στον συλλέκτη του τρανζίστορ. Σε ποια περιοχή λειτουργεί το τρανζίστορ; Να ληφθεί υπόψη πως για τα τρανζίστορ πυριτίου η τιμή της τάσης συλλέκτη-εκπομπού στο όριο της ενεργού περιοχής και της περιοχής κόρου είναι περίπου ίση με 0.2V.



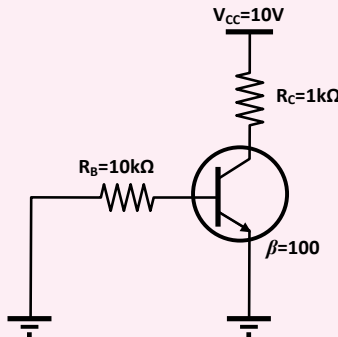
#### ● Κριτήριο Αξιολόγησης 3.2.

Δίνεται το κύκλωμα του πιο κάτω σχήματος, όπου το τρανζίστορ είναι κατασκευασμένο σε πυρίτιο. Να βρεθεί η ελάχιστη τιμή του ρεύματος βάσης ( $I_B$ ) για την οποία το τρανζίστορ θα τεθεί στην περιοχή κόρου, λαμβάνοντας υπόψη πως για τα τρανζίστορ πυριτίου η τιμή της τάσης συλλέκτη-εκπομπού στο όριο της ενεργού περιοχής και της περιοχής κόρου είναι περίπου ίση με 0.2V.



● **Κριτήριο Αξιολόγησης 3.3.**

Δίνεται το κύκλωμα του πιο κάτω σχήματος, όπου το τρανζίστορ είναι κατασκευασμένο σε πυρίτιο. Σε ποια περιοχή λειτουργεί το τρανζίστορ;

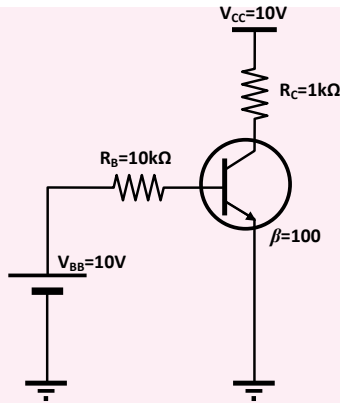


- A. αποκοπής
- B. κόρου
- C. ενεργό (ορθά)
- D. ανάστροφα ενεργό

● **Κριτήριο Αξιολόγησης 3.4.**

Δίνεται το κύκλωμα του πιο κάτω σχήματος, όπου το τρανζίστορ είναι κατασκευασμένο σε πυρίτιο. Σε ποια περιοχή λειτουργεί το τρανζίστορ;





- A. αποκοπής
- B. κόρου
- C. ενεργό (ορθά)
- D. ανάστροφα ενεργό

#### ● Κριτήριο Αξιολόγησης 3.5.

Ζητείται να πολώσουμε ένα διπολικό τρανζίστορ κατά ευσταθή τρόπο χρησιμοποιώντας τάση τροφοδοσίας  $V_{CC}=10\text{V}$ , ώστε η τάση συλλέκτη-βάσης να είναι ίση με  $V_{CB}=5\text{V}$  και το ρεύμα του συλλέκτη να ισούται με  $I_C=1\text{mA}$ . Για το τρανζίστορ δίνεται ότι  $\alpha=0.995$ , και πως η πτώση τάσης στην επαφή βάσης-εκπομπού είναι ίση με  $0.6\text{V}$ .

#### ● Κριτήριο Αξιολόγησης 3.6.

Να αποδείξετε τη σχέση (3.44) η οποία παρέχει την ισοδύναμη απολαβή ρεύματος ενός ζεύγους Darlington.

#### ● Κριτήριο Αξιολόγησης 3.7.





Να αποδείξετε τη σχέση (3.45) η οποία παρέχει την ισοδύναμη απολαβή ρεύματος ενός ζεύγους Sziklai.

### 3.12 Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου




- [1] G.E. Valley και H. Wallman. *Vacuum Tube Amplifiers*. Radiation Laboratory Series. McGraw-Hill Book Company, 1948.
- [2] P. Ashburn. *Design and realization of bipolar transistors*. Design and measurement in electronic engineering. Wiley, 1988.

- [3] W. Shockley. [Electrons and Holes in Semiconductors: With Applications to Transistor Electronics](#). Bell Telephone Laboratories series. Robert E. Krieger, 1950.
- [4] P. Yu και M. Cardona. [Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties](#). Graduate Texts in Physics. Springer, 2010.
- [5] G.W. Neudeck. [The Bipolar Junction Transistor](#). Modular series on solid state devices. Addison-Wesley, 1989.
- [6] G. Massobrio και P. Antognetti. [Semiconductor Device Modeling with SPICE](#). McGraw-Hill, 1993.
- [7] D.C. Dube. [Electronics: Circuits and Analysis](#). Alpha Science International, 2005.
- [8] U. Bakshi. [Electronic Circuit Analysis](#). Technical Publications, 2009.

### 3.13 Διαδραστικά στοιχεία

<b>3.1</b>	<b>Πόλωση διπολικού τρανζίστορ</b>	 Διαδραστική σελίδα
<p>Το αντικείμενο περιλαμβάνει κύκλωμα πόλωσης ενός διπολικού τρανζίστορ με αντίσταση στον εκπομπό (<math>R_E</math>). Ο αναγνώστης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την απολαβή ρεύματος (<math>\beta</math>) του τρανζίστορ, καθώς και την τιμή της αντίστασης <math>R_E</math>, να παρατηρεί την ολίσθηση του σημείου ηρεμίας του κυκλώματος μέσω βολτομέτρων και αμπερομέτρων, και να απεικονίζει σε διάγραμμα μετρήσεις του ρεύματος συλλέκτη σε συνάρτηση με το <math>\beta</math> προκειμένου να αξιολογήσει την επίδραση της αντίστασης <math>R_E</math> στην ευστάθεια της πόλωσης.</p>		
<p>Μπορείτε να αποκτήσετε πρόσβαση στο αντικείμενο με “κλικ” στον τίτλο του ή στο εικονίδιο . Το αντικείμενο είναι, επίσης, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του Κεφ. 3 του παρόντος συγγράμματος, στον Ελληνικό Συσσωρευτή Ακαδημαϊκών Ηλεκτρονικών Βιβλίων (<a href="http://repository.kallipos.gr">http://repository.kallipos.gr</a>).</p>		
<b>3.2</b>	<b>Πηγή ρεύματος με διπολικό τρανζίστορ</b>	 Διαδραστική σελίδα
<p>Το αντικείμενο περιλαμβάνει απλό κύκλωμα πηγής ρεύματος με διπολικό τρανζίστορ. Στον αναγνώστη δίνεται η δυνατότητα να μεταβάλλει την αντίσταση φόρτου, και να παρατηρεί μέσω αμπερομέτρου την τιμή του ρεύματος που παρέχει η πηγή.</p>		
<p>Μπορείτε να αποκτήσετε πρόσβαση στο αντικείμενο με “κλικ” στον τίτλο του ή στο εικονίδιο . Το αντικείμενο είναι, επίσης, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του Κεφ. 3 του παρόντος συγγράμματος, στον Ελληνικό Συσσωρευτή Ακαδημαϊκών Ηλεκτρονικών Βιβλίων (<a href="http://repository.kallipos.gr">http://repository.kallipos.gr</a>).</p>		

### 3.14 Οπτικοακουστικό υλικό

<b>3.1</b>	<b>Το διπολικό τρανζίστορ σαν διακόπτης</b>	 Video
<p>Σε αυτό το video παρουσιάζεται η δυνατότητα του διπολικού τρανζίστορ να λειτουργεί σαν διακόπτης. Το κύκλωμα υλοποιείται στο εργαστήριο και η συμπεριφορά του παρατηρείται μέσω των ενδείξεων διόδων LED στην είσοδο και στην έξοδο.</p>		
<p>Μπορείτε να αποκτήσετε πρόσβαση στο αντικείμενο με “κλικ” στον τίτλο του ή στο εικονίδιο  . Το αντικείμενο είναι, επίσης, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του Κεφ. 3 του παρόντος συγγράμματος, στον Ελληνικό Συσσωρευτή Ακαδημαϊκών Ηλεκτρονικών Βιβλίων (<a href="http://repository.kallipos.gr">http://repository.kallipos.gr</a>). Εναλλακτικά, μπορείτε να δείτε το video στο  .</p>		



## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

---

AC	Alternating Current
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BJT	Bipolar Junction Transistor
BPF	Band Pass Filter
BW	Bandwidth
CMOS	Complementary MOS
CMRR	Common Mode Rejection Ratio
CPU	Central Processing Unit
DC	Direct Current
DDL	Diode-Diode Logic
DSP	Digital Signal Processing
FET	Field Effect Transistor
HPF	High Pass Filter
IR	InfraRed
JFET	Junction Field Effect Transistor
LED	Light Emitting Diode
LPF	Low Pass Filter
MESFET	Metal-Semiconductor Field Effect Transistor
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor (Field Effect Transistor)
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
OpAmp	Operational Amplifier
OFET	Organic Field Effect Transistor
PC	Personal Computer
PIV	Peak Inverse Voltage
RMS	Root Mean Square
RTL	Resistor-Transistor Logic
UV	UltraViolet
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VLSI	Very Large Scale Integration



### Απόδοση

άμεσο ενεργειακό χάσμα  
ανάδραση  
αναστρέφων ενισχυτής  
αναστροφέας  
αναστροφέας περιορισμένου ρεύματος  
ανομοιομορφία  
ανόρθωση  
απειριστής  
αποδέκτης  
αποκοπή  
απόκριση κατά συχνότητα  
αποκρισιμότητα  
απομονωτής τάσης  
αρμονικός ταλαντωτής  
αρνητική αντίσταση  
αρχή της επαλληλίας  
βάση  
δεδομένα  
διαγωγιμότητα  
διαντίσταση  
διαφορικός ενισχυτής  
δίοδος χιονοστιβάδας  
δότης  
δράση τρανζίστορ  
εκπομπός  
εκροή  
εκφυλισμός  
έμμεσο ενεργειακό χάσμα  
εναλλασσόμενο ρεύμα  
ενδογενής ημιαγωγός  
ενεργός περιοχή  
ενισχυτής  
ενισχυτής - αθροιστής τάσεων  
ενισχυτής διαφοράς  
ενισχυτής κοινού εκπομπού  
εξωγενής ημιαγωγός  
επανάσυνδεση  
επαφή

### Ξενογλωσσος όρος

direct energy gap  
feedback  
inverting amplifier  
inverter  
current-starved inverter  
mismatch  
rectification  
norator  
acceptor  
cutoff  
frequency response  
responsivity  
voltage buffer  
harmonic oscillator  
negative resistance  
superposition principle  
base  
data  
transconductance  
transresistance  
differential amplifier  
avalanche diode  
donor  
transistor action  
emitter  
drain  
degeneration  
indirect energy gap  
alternating current  
intrinsic semiconductor  
active region  
amplifier  
summing amplifier  
difference amplifier  
common emitter amplifier  
extrinsic semiconductor  
recombination  
junction

εύρος ζώνης	bandwidth
ημικύκλωμα	half circuit
θόρυβος	noise
ιδεατή γη	virtual ground
ιδιοσυχνότητα	natural frequency
καθρέφτης ρεύματος	current mirror
καθυστερήση διάδοσης	propagation delay
καθυστερήση μετάβασης	transition delay
κοινός τρόπος	common mode
κόρος	saturation
κρυσταλλοτρίοδος	transistor
λογική πύλη	logic gate
λόγος απόρριψης κοινού τρόπου	common mode rejection ratio
λόγος διαστάσεων	aspect ratio
λυχνία κενού	vacuum tube
μηδενιστής	nullator
μονόπλευρος	unbalanced
ολοκληρωτής	integrator
οπή	hole
ορθογώνιος ταλαντωτής	quadrature oscillator
περιοχή απογύμνωσης	depletion region
περιοχή τριόδου	triode region
πηγή	source
πληροφορική	informatics
πόλωση	bias
πυκνωτής παράκαμψης	bypass capacitor
πύλη	gate
πύλη διέλευσης	transmission gate
ρεύμα αναφοράς	reference current
ρεύμα σκότους	dark current
σημείο ηρεμίας	quiescence point
σταθεροποίηση	regulation
στραγγαλισμός	pinch-off
στρώμα αναστροφής	inversion layer
συγκριτής	comparator
σύζευξη	coupling
συλλέκτης	collector
συνεχές ρεύμα	direct current
συχνότητα αποκοπής	cutoff frequency
συχνότητα μισής ισχύος	half power frequency
συχνότητα συντονισμού	resonant frequency
ταλαντωτής	oscillator
ταλαντωτής δακτυλίου	ring oscillator
ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση	voltage controlled oscillator
ταλαντωτής χαλάρωσης	relaxation oscillator
τάξη (φίλτρου)	order
τάση κατωφλίου	threshold voltage
τάση κατάρρευσης	breakdown voltage
τελεστικός ενισχυτής	operational amplifier
τρανζίστορ	transistor



τρανζίστορ επίδρασης πεδίου	field effect transistor
τρανζίστορ σημειακής επαφής	point contact transistor
υπόστρωμα	substrate
φάσμα	spectrum
φίλτρο	filter
φωτοδίοδος	photodiode
φωτόρρευμα	photocurrent
φωτοφωρατής	photodetector
χιαστί σύζευξη	cross coupling



**T**

Transistor βλπ Τρανζίστορ

**A**

Ακολουθητής εκπομπού 44  
Απομονωτής τάσης 44

**B**

Βάση 19

**Δ**

Διπολικό τρανζίστορ 11  
  h-υβριδικό ισοδύναμο 41  
  npn 20  
  pnp 20  
  μοντέλο DC 40  
  μοντέλο Ebers-Moll 39  
  μοντέλο μικρού σήματος 40  
  π-υβριδικό ισοδύναμο 42  
  περιοχές λειτουργίας 22  
  πόλωση 31

συνδεσμολογία Darlington 43  
συνδεσμολογία Sziklai 43  
συνδεσμολογίες 21

**E**

Εκπομπός 18  
Ενεργός περιοχή 22

**N**

Νόμος του Moore 12  
Πηγή  
  ρεύματος 46

**Σ**

Συλλέκτης 19

**T**

Τρανζίστορ, διπολικό βλπ Διπολικό τρανζίστορ  
Χωρητικότητα  
  Miller 42