



2023

## 17. Τρανζίστορ

R2: SCRAPY Guide

Αρ. έργου: **2021-1-FR01-KA220-SCH-000031617**



 **Co-funded by  
the European Union**

The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

ECAM EPMI  
30/04/2023

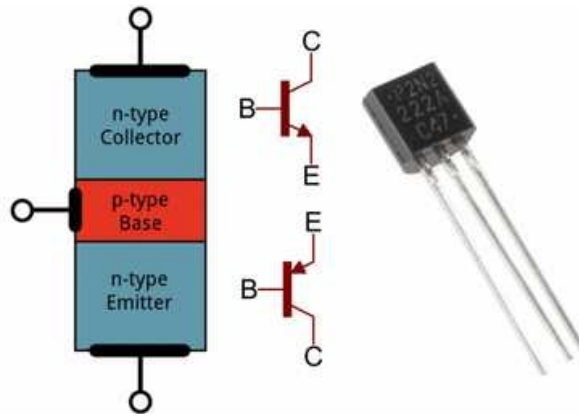
## Πίνακας περιεχομένων

|   |    |
|---|----|
| 1 Εισαγωγή .....  | 2  |
| 2 Σύμβολα, καρφίτσες και κατασκευή .....                        | 3  |
| 2.1 Κατασκευή τρανζίστορ .....                                  | 4  |
| 2.2 Ένα τρανζίστορ ως δύο δίοδοι .....                          | 4  |
| 2.3 Δομή και λειτουργία τρανζίστορ .....                        | 4  |
| 2.4 Επέκταση της αναλογίας του νερού .....                      | 6  |
| 2.5 Ενισχυτική Ισχύς .....                                      | 8  |
| 3 Τρόποι λειτουργίας .....                                      | 8  |
| 3.1 Λειτουργία κορεσμού .....                                   | 9  |
| 3.2 Λειτουργία αποκοπής .....                                   | 10 |
| 3.3 Ενεργή λειτουργία .....                                     | 11 |
| 3.4 Ενίσχυση σε ενεργή λειτουργία .....                         | 11 |
| 3.5 Αντίστροφη ενεργή .....                                     | 12 |
| 4 Σχετικά με το PNP .....                                       | 13 |
| 5 Εφαρμογές I: Διακόπτες .....                                  | 13 |
| 5.1 Διακόπτης τρανζίστορ .....                                  | 14 |
| 6 Αντιστάσεις βάσης! .....                                      | 15 |
| 7 Ψηφιακή Λογική .....  | 16 |
| 8 Ταλαντωτές .....  | 19 |
| 9 Εφαρμογές II: Ενισχυτές .....                                 | 21 |
| 10 Κοινές διαμορφώσεις .....                                    | 21 |
| 10.1 Κοινός Εκπομπός .....                                      | 21 |
| 10.2 Κοινός συλλέκτης (Ακόλουθος εκπομπών) .....                | 22 |
| 10.3 Κοινή Βάση .....   | 23 |
| 10.4 Συνοψίζοντας .....   | 24 |
| 11 Ενισχυτές πολλαπλών σταδίων .....                            | 24 |
| 11.1 Διαφορικός ενισχυτής .....                                 | 25 |
| 11.2 Push-Pull Amplifier .....                                  | 26 |
| 11.3 Η τοποθέτησή τους μαζί (Ένας Λειτουργικός Ενισχυτής) ..... | 27 |

## 1 Εισαγωγή

Τα τρανζίστορ κάνουν τον κόσμο των ηλεκτρονικών μας να περιστρέφονται. Είναι κρίσιμα ως πηγή ελέγχου σε κάθε σύγχρονο κύκλωμα. Μερικές φορές τα βλέπετε, αλλά τις περισσότερες φορές είναι κρυμμένα βαθιά μέσα στο καλούπι ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος. Σε αυτό το μάθημα, θα σας παρουσιάσουμε τα βασικά του πιο συνηθισμένου τρανζίστορ γύρω από τη διασταύρωση με τρανζίστορ διπολικής διαταραχής (BJT).

Σε μικρές, διακριτές ποσότητες, τα τρανζίστορ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία απλών ηλεκτρονικών διακοπών, ψηφιακής λογικής και κυκλωμάτων ενίσχυσης σήματος. Σε ποσότητες χιλιάδων, εκατομμυρίων, ακόμη και δισεκατομμυρίων, τα τρανζίστορ διασυνδέονται και ενσωματώνονται σε μικροσκοπικά τσιπ για να δημιουργήσουν μνήμες υπολογιστών, μικροεπεξεργαστές και άλλα πολύπλοκα IC.



Τρανζίστορ

### Καλύπτεται σε αυτό το μάθημα:

Αφού διαβάσετε αυτό το μάθημα, θέλουμε να έχετε μια ευρεία κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των τρανζίστορ. Δεν θα εμβαθύνουμε πολύ στη φυσική των ημιαγωγών ή σε ισοδύναμα μοντέλα, αλλά θα εμβαθύνουμε αρκετά στο θέμα ώστε να καταλάβετε πώς ένα τρανζίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως διακόπτης είτε ως ενισχυτής.

### Αυτό το μάθημα χωρίζεται σε μια σειρά ενοτήτων, που καλύπτουν:

- **Σύμβολα, ακίδες και κατασκευή** -- Εξήγηση των διαφορών μεταξύ των τριών ακίδων του τρανζίστορ.
- **Επέκταση της αναλογίας νερού** -- Επιστρέφουμε στην αναλογία νερού για να εξηγήσουμε πώς ένα τρανζίστορ λειτουργεί σαν βαλβίδα.
- **Τρόποι λειτουργίας** -- Μια επισκόπηση των τεσσάρων πιθανών τρόπων λειτουργίας ενός τρανζίστορ.
- **Εφαρμογές I: Διακόπτες** -- Κυκλώματα εφαρμογής που δείχνουν πώς χρησιμοποιούνται τα τρανζίστορ ως ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι διακόπτες.
- **Εφαρμογές II: Ενισχυτές** -- Περισσότερα κυκλώματα εφαρμογής, αυτή τη φορά που δείχνουν πώς χρησιμοποιούνται τα τρανζίστορ για την ενίσχυση της τάσης ή του ρεύματος.

Υπάρχουν δύο τύποι βασικών τρανζίστορ εκεί έξω: διπολική διασταύρωση (BJT) και επίδραση πεδίου μετάλλου-οξειδίου (MOSFET). Σε αυτό το μάθημα, θα επικεντρωθούμε στο BJT, γιατί είναι ελαφρώς πιο εύκολο να το κατανοήσουμε. Ψάχνοντας ακόμα βαθύτερα στους τύπους τρανζίστορ, υπάρχουν δύο εκδόσεις του BJT: NPN και PNP. Θα στρέψουμε την εστίασή μας ακόμη πιο ευκρινή περιορίζοντας την πρώιμη συζήτησή μας στο NPN. Περιορίζοντας την εστίασή μας προς τα κάτω -- αποκτώντας μια σταθερή κατανόηση του NPN -- θα είναι ευκολότερο να κατανοήσουμε το PNP (ή το MOSFETS, ακόμη) συγκρίνοντας πώς διαφέρει από το NPN.

Πριν εμβαθύνουμε σε αυτό το μάθημα, θα συνιστούσαμε ιδιαίτερα να ρίξετε μια ματιά:

- **Τάση, ρεύμα, αντίσταση και νόμος του Ohm** -- Εισαγωγή στις βασικές αρχές της ηλεκτρονικής.
- **Βασικά στοιχεία ηλεκτρικής ενέργειας** -- Θα μιλήσουμε λίγο για τον ηλεκτρισμό ως τη ροή των ηλεκτρονίων. Μάθετε πώς ρέουν αυτά τα ηλεκτρόνια σε αυτό το σεμινάριο.
- **Ηλεκτρική ισχύς** -- Μία από τις κύριες εφαρμογές του τρανζίστορ είναι η ενίσχυση -- η αύξηση της ισχύος ενός σήματος. Η αύξηση της ισχύος σημαίνει ότι μπορούμε να αυξήσουμε είτε το ρεύμα είτε την τάση, μάθετε γιατί σε αυτό το σεμινάριο.
- **Δίοδοι** -- Ένα τρανζίστορ είναι μια συσκευή ημιαγωγών, ακριβώς όπως μια δίοδος. Κατά κάποιο τρόπο, είναι αυτό που θα έπαιρνες αν στοιβαζατε δύο διόδους μεταξύ τους και δέσατε τις ανόδους τους μεταξύ τους. Η κατανόηση του πώς λειτουργεί μια δίοδος θα βοηθήσει πολύ στην αποκάλυψη της λειτουργίας ενός τρανζίστορ.

## 2 Σύμβολα, καρφίτσες και κατασκευή

Τα τρανζίστορ είναι βασικά συσκευές τριών ακροδεκτών. Σε μια διασταύρωση με τρανζίστορ διπολικής διαταραχής (BJT), αυτές οι ακίδες φέρουν την επικήτα **συλλέκτη** (C), **βάση** (B) και **πομπό** (E). Τα σύμβολα κυκλώματος τόσο για το NPN όσο και για το PNP BJT είναι παρακάτω:



Τα σύμβολα κυκλώματος για τα τρανζίστορ NPN και PNP

Η μόνη διαφορά μεταξύ ενός NPN και ενός PNP είναι η κατεύθυνση του βέλους στον πομπό. Το βέλος σε ένα NPN δείχνει και στο PNP δείχνει προς τα μέσα. Ένα χρήσιμο μνημονικό για να θυμάστε είναι:

**NPN: Not Pointing in**

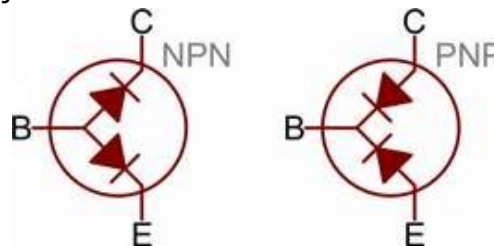
Οπισθοδρομική λογική, αλλά λειτουργεί!

## 2.1 Κατασκευή τρανζίστορ

Τα τρανζίστορ βασίζονται σε ημιαγωγούς για να κάνουν τα μαγικά τους. Ένας ημιαγωγός είναι ένα υλικό που δεν είναι καθαρός αγωγός (όπως το χάλκινο σύρμα) αλλά ούτε και μονωτής (όπως ο αέρας). Η αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού -- πόσο εύκολα επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να ρέουν -- εξαρτάται από μεταβλητές όπως η θερμοκρασία ή η παρουσία περισσότερων ή λιγότερων ηλεκτρονίων. Ας δούμε εν συντομία κάτω από την κουκούλα ενός τρανζίστορ. Μην ανησυχείτε, δεν θα σκάσουμε πολύ βαθιά στην κβαντική φυσική.

## 2.2 Ένα τρανζίστορ ως δύο δίοδοι

Τα τρανζίστορ είναι σαν προέκταση ενός άλλου εξαρτήματος ημιαγωγών: των διόδων. Κατά κάποιο τρόπο τα τρανζίστορ είναι μόνο δύο δίοδοι με τις καθόδους (ή τις ανόδους) τους δεμένες μεταξύ τους:



Ένα τρανζίστορ ως δύο δίοδοι

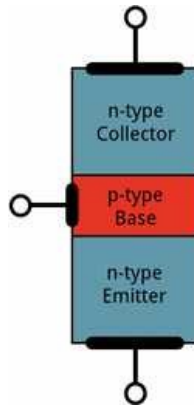
Η δίοδος που συνδέει τη βάση του πομπού είναι σημαντική εδώ, ταιριάζει με την κατεύθυνση του βέλους στο σχηματικό σύμβολο και σας δείχνει προς ποια κατεύθυνση το ρεύμα προορίζεται να ρέει μέσω του τρανζίστορ.

Η αναπαράσταση της διόδου είναι ένα καλό σημείο για να ξεκινήσετε, αλλά απέχει πολύ από το να είναι ακριβές. Μην βασίζετε την κατανόησή σας για τη λειτουργία ενός τρανζίστορ σε αυτό το μοντέλο (και μην προσπαθήσετε να το αναπαραγάγετε σε ένα breadboard, δεν θα λειτουργήσει). Υπάρχουν πολλά παράξενα πράγματα σε επίπεδο κβαντικής φυσικής που ελέγχουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τριών τερματικών.

(Αυτό το μοντέλο είναι χρήσιμο εάν χρειάζεται να δοκιμάσετε ένα τρανζίστορ. Χρησιμοποιώντας τη λειτουργία δοκιμής διόδου (ή αντίστασης) σε ένα πολύμετρο, μπορείτε να μετρήσετε τους ακροδέκτες BE και BC για να ελέγξετε για την παρουσία αυτών των "διόδων".)

## 2.3 Δομή και λειτουργία τρανζίστορ

Τα τρανζίστορ κατασκευάζονται με τη στοίβαξη τριών διαφορετικών στρωμάτων ημιαγωγικού υλικού μαζί. Σε ορισμένα από αυτά τα στρώματα προστίθενται επιπλέον ηλεκτρόνια (μια διαδικασία που ονομάζεται "ντόπινγκ") και σε άλλα αφαιρούνται τα ηλεκτρόνια (με πρόσμιξη "οπές" - η απουσία ηλεκτρονίων). Ένα υλικό ημιαγωγών με επιπλέον ηλεκτρόνια ονομάζεται n-τύπος (n για το αρνητικό επειδή τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο) και ένα υλικό με τα ηλεκτρόνια που έχουν αφαιρεθεί ονομάζεται τύπος p (για θετικό). Τα τρανζίστορ δημιουργούνται είτε τοποθετώντας ένα n πάνω από ένα p πάνω από ένα n είτε το p πάνω από το n πάνω από το p.



*Απλοποιημένο διάγραμμα της δομής ενός NPN.*

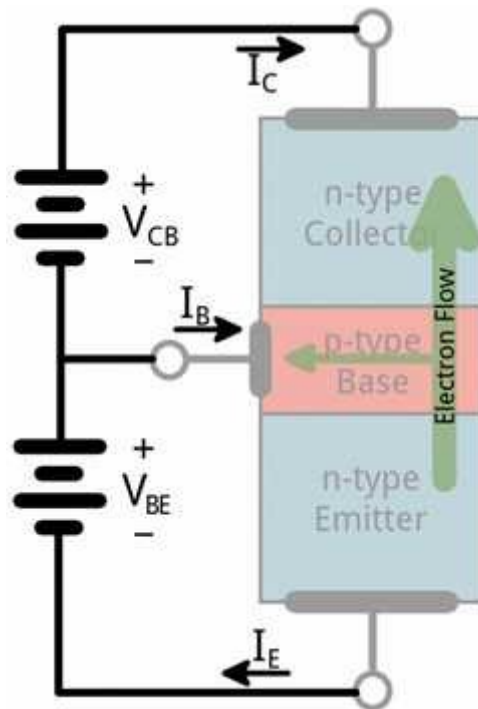
Με κάποιο κούνημα του χεριού, μπορούμε να πούμε ότι τα ηλεκτρόνια μπορούν εύκολα να ρέουν από η περιοχές στις κορυφαίες περιοχές, αρκεί να έχουν λίγη δύναμη (τάση) για να τα ωθήσει. Αλλά η ροή από μια περιοχή p σε μια περιοχή n είναι δύσκολη (απαιτεί πολλή τάση). Αλλά το ιδιαίτερο με ένα τρανζίστορ -- το μέρος που κάνει το μοντέλο μας με δύο διόδους ξεπερασμένο -- είναι το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια μπορούν εύκολα να ρέουν από τη βάση τύπου p στον συλλέκτη τύπου n, εφόσον η διασταύρωση βάσης-εκπομπού είναι μεροληπτική προς τα εμπρός (που σημαίνει ότι η βάση είναι σε υψηλότερη τάση από τον πομπό).

Το τρανζίστορ NPN έχει σχεδιαστεί για να περνά ηλεκτρόνια από τον πομπό στον συλλέκτη (έτσι το συμβατικό ρεύμα ρέει από συλλέκτη σε πομπό). Ο πομπός "εκπέμπει" ηλεκτρόνια στη βάση, η οποία ελέγχει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που εκπέμπει ο εκπομπός. Τα περισσότερα από τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται «συλλέγονται» από τον συλλέκτη, ο οποίος τα στέλνει στο επόμενο τμήμα του κυκλώματος.

Ένα PNP λειτουργεί με τον ίδιο αλλά αντίθετο τρόπο. Η βάση εξακολουθεί να ελέγχει τη ροή του ρεύματος, αλλά αυτό το ρεύμα ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση -- από τον πομπό στον συλλέκτη. Αντί για ηλεκτρόνια, ο πομπός εκπέμπει «οπές» (εννοιολογική απουσία ηλεκτρονίων) που συλλέγονται από τον συλλέκτη.

Το τρανζίστορ είναι σαν μια βαλβίδα ηλεκτρονίων. Ο πείρος βάσης είναι σαν μια λαβή που μπορείτε να προσαρμόσετε για να επιτρέψετε σε περισσότερα ή λιγότερα ηλεκτρόνια να ρέουν από τον πομπό στον συλλέκτη. Ας εξετάσουμε περαιτέρω αυτήν την αναλογία...

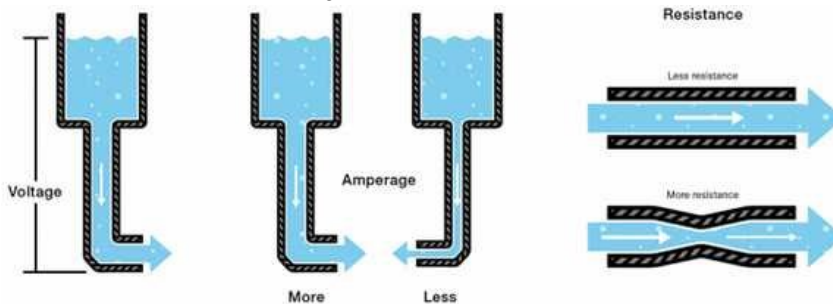




Η δομή ενός NPN

## 2.4 Επέκταση της αναλογίας του νερού

Αν έχετε διαβάσει πολλά μαθήματα ηλεκτρικής ενέργειας τον τελευταίο καιρό, έχετε συνηθίσει σε αναλογίες νερού. Λέμε ότι το ρεύμα είναι ανάλογο με το ρυθμό ροής του νερού, η τάση είναι η πίεση που σπρώχνει αυτό το νερό μέσα από έναν σωλήνα και η αντίσταση είναι το πλάτος του σωλήνα.



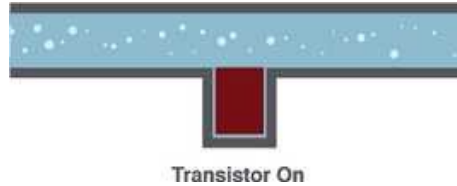
Επέκταση της αναλογίας του νερού

Δεν αποτελεί έκπληξη, η αναλογία του νερού μπορεί να επεκταθεί και στα τρανζίστορ: ένα τρανζίστορ είναι σαν μια **βαλβίδα** νερού -- ένας μηχανισμός που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να **ελέγξουμε τον ρυθμό ροής**.

Υπάρχουν τρεις καταστάσεις στις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια βαλβίδα, καθεμία από τις οποίες έχει διαφορετική επίδραση στον ρυθμό ροής σε ένα σύστημα.

### 1) Ενεργοποιημένο -- Βραχυκύκλωμα

Μια βαλβίδα μπορεί να ανοίξει εντελώς, επιτρέποντας στο νερό να ρέει ελεύθερα -- περνώντας μέσα σαν να μην υπήρχε καν η βαλβίδα.

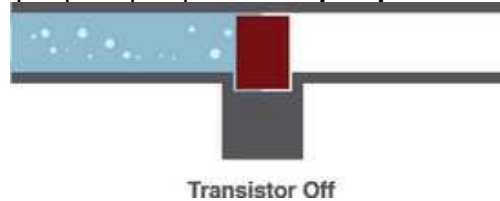


#### Τρανζίστορ ενεργοποιημένο – Βραχυκύκλωμα

Ομοίως, υπό τις κατάλληλες συνθήκες, ένα τρανζίστορ μπορεί να μοιάζει με βραχυκύκλωμα μεταξύ του συλλέκτη και των ακροδεκτών εκπομπού. Το ρεύμα είναι ελεύθερο να ρέει μέσα από τον συλλέκτη και έξω από τον πομπό.

### 2) Απενεργοποιημένο – Ανοιχτό κύκλωμα

Όταν είναι κλειστή, μια βαλβίδα μπορεί να σταματήσει εντελώς τη ροή του νερού.

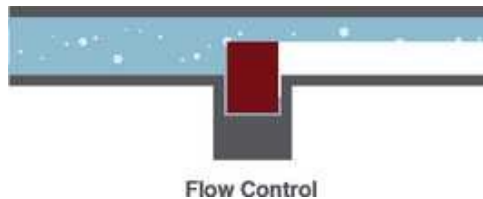


#### Τρανζίστορ απενεργοποιημένο -- Ανοιχτό κύκλωμα

Με τον ίδιο τρόπο, ένα τρανζίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει ένα ανοιχτό κύκλωμα μεταξύ του συλλέκτη και των ακροδεκτών εκπομπού.

### 3) Γραμμικός Έλεγχος Ροής

Με κάποιο ακριβή συντονισμό, μια βαλβίδα μπορεί να ρυθμιστεί για να ελέγχει με ακρίβεια τον ρυθμό ροής σε κάποιο σημείο μεταξύ πλήρως ανοιχτού και κλειστού.



#### Γραμμικός έλεγχος ροής τρανζίστορ

Ένα τρανζίστορ μπορεί να κάνει το ίδιο πράγμα -- να ελέγχει γραμμικά το ρεύμα μέσω ενός κυκλώματος σε κάποιο σημείο μεταξύ **πλήρως απενεργοποιημένου (ανοικτό κύκλωμα)** και **πλήρως ενεργοποιημένου (βραχυκύκλωμα)**.

Από την αναλογία του νερού μας, το πλάτος ενός σωλήνα είναι παρόμοιο με την αντίσταση σε ένα κύκλωμα. Εάν μια βαλβίδα μπορεί να ρυθμίσει με ακρίβεια το πλάτος ενός σωλήνα, τότε ένα τρανζίστορ μπορεί να προσαρμόσει με ακρίβεια την αντίσταση μεταξύ του



συλλέκτη και του πομπού. Έτσι, κατά κάποιο τρόπο, ένα τρανζίστορ είναι σαν μια μεταβλητή, ρυθμιζόμενη αντίσταση.

## 2.5 Ενισχυτική Ισχύς

Υπάρχει μια άλλη αναλογία που μπορούμε να ερμηνεύσουμε σε αυτό. Φανταστείτε εάν, με το ελαφρύ γύρισμα μιας βαλβίδας, μπορούσατε να ελέγξετε τον ρυθμό ροής των πυλών ροής του φράγματος Hoover. Η άθλια ποσότητα δύναμης που μπορεί να ασκήσετε για να στρίψετε αυτό το κουμπί έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μια δύναμη χιλιάδες φορές ισχυρότερη. Επεκτείνουμε την αναλογία στα όριά της, αλλά αυτή η ιδέα μεταφέρεται και στα τρανζίστορ. Τα τρανζίστορ είναι ιδιαίτερα επειδή μπορούν να **ενισχύσουν** τα ηλεκτρικά σήματα, μετατρέποντας ένα σήμα χαμηλής ισχύος σε ένα παρόμοιο σήμα πολύ υψηλότερης ισχύος.

Περίπου. Υπάρχουν πολλά περισσότερα σε αυτό, αλλά αυτό είναι ένα καλό μέρος για να ξεκινήσετε! Ελέγξτε την επόμενη ενότητα για μια πιο λεπτομερή εξήγηση της λειτουργίας ενός τρανζίστορ.

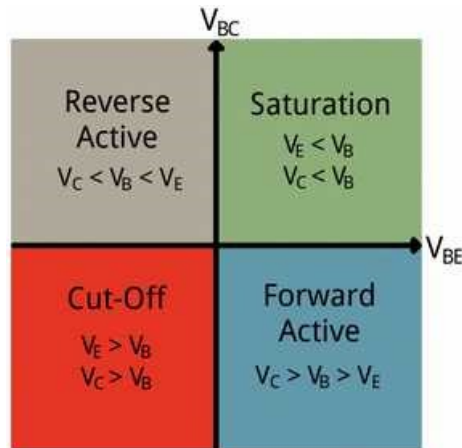
## 3 Τρόποι λειτουργίας

Σε αντίθεση με τις αντιστάσεις, οι οποίες επιβάλλουν μια γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος, τα τρανζίστορ είναι μη γραμμικές συσκευές. Έχουν τέσσερις διακριτούς τρόπους λειτουργίας, οι οποίοι περιγράφουν το ρεύμα που τους διαρρέει. (Όταν μιλάμε για ροή ρεύματος μέσω ενός τρανζίστορ, **συνήθως εννοούμε ρεύμα που ρέει από τον συλλέκτη σε έναν εκπομπό ενός NPN.**)

Οι τέσσερις τρόποι λειτουργίας τρανζίστορ είναι:

- **Κορεσμός** -- Το τρανζίστορ λειτουργεί σαν **βραχυκύκλωμα**. Το ρεύμα ρέει ελεύθερα από συλλέκτη σε πομπό.
- **Αποκοπή** -- Το τρανζίστορ λειτουργεί σαν **ανοιχτό κύκλωμα**. Δεν ρέει ρεύμα από τον συλλέκτη στον πομπό.
- **Ενεργό** -- Το ρεύμα από τον συλλέκτη στον εκπομπό είναι **ανάλογο** με το ρεύμα που ρέει στη βάση.
- **Reverse-Active** -- Όπως και η ενεργή λειτουργία, το ρεύμα είναι ανάλογο με το ρεύμα βάσης, αλλά ρέει αντίστροφα. Το ρεύμα ρέει από τον πομπό στον συλλέκτη (όχι, ακριβώς, για τον σκοπό για τον οποίο σχεδιάστηκαν τα τρανζίστορ).

Για να προσδιορίσουμε σε ποια λειτουργία βρίσκεται ένα τρανζίστορ, πρέπει να δούμε τις τάσεις σε καθεμία από τις τρεις ακίδες και πώς σχετίζονται μεταξύ τους. Οι τάσεις από τη βάση στον εκπομπό (VBE) και στη συνέχεια από τη βάση στον συλλέκτη (VBC) ορίζουν τη λειτουργία του τρανζίστορ:



#### Λειτουργία τρανζίστορ

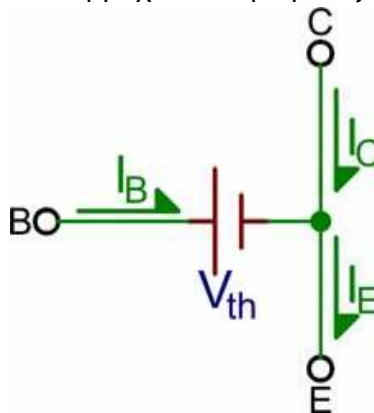
Το απλοποιημένο γράφημα τεταρτημορίου παραπάνω δείχνει πώς οι θετικές και αρνητικές τάσεις σε αυτούς τους ακροδέκτες επηρεάζουν τη λειτουργία. Στην πραγματικότητα, είναι λίγο πιο περίπλοκο από αυτό.

Ας δούμε και τις τέσσερις λειτουργίες τρανζίστορ ξεχωριστά, θα διερευνήσουμε πώς να θέσουμε τη συσκευή σε αυτήν τη λειτουργία και τι επίδραση έχει στη ροή ρεύματος.

**Σημείωση:** Η πλειοψηφία αυτής της σελίδας εστιάζει σε **τρανζίστορ NPN**. Για να κατανοήσετε πώς λειτουργεί ένα τρανζίστορ PNP, απλώς αναστρέψτε τα σημάδια πολικότητας ή > και <.

### 3.1 Λειτουργία κορεσμού

Ο κορεσμός είναι ο **ένας τρόπος** λειτουργίας ενός τρανζίστορ. Ένα τρανζίστορ σε λειτουργία κορεσμού λειτουργεί σαν βραχυκύκλωμα μεταξύ του συλλέκτη και του πομπού.



#### Λειτουργία κορεσμού

Στη λειτουργία κορεσμού και οι δύο "δίοδοι" στο τρανζίστορ έχουν πόλωση προς τα εμπρός. Αυτό σημαίνει ότι το  $V_{BE}$  πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 0, όπως και το  $V_{BC}$ . Με άλλα λόγια, το  $V_B$  πρέπει να είναι υψηλότερο από το  $V_E$  και το  $V_C$ .

$$\begin{aligned} V_B &> V_C \\ V_B &> V_E \end{aligned}$$

Επειδή η διασταύρωση από τη βάση στον πομπό μοιάζει ακριβώς με μια δίοδο, στην πραγματικότητα, η  $V_{BE}$  πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα **threshold voltage** για να εισέλθει σε κορεσμό. Υπάρχουν πολλές συντομογραφίες για αυτήν την πτώση τάσης -- οι  $V_{th}$ ,  $V_{\gamma}$  και  $V_d$  είναι λίγες -- και η πραγματική τιμή ποικίλλει μεταξύ των τρανζίστορ (και ακόμη περισσότερο ανάλογα με τη θερμοκρασία). Για πολλά τρανζίστορ (σε θερμοκρασία δωματίου) μπορούμε να υπολογίσουμε ότι αυτή η πτώση είναι περίπου 0,6V.

Μια άλλη τρομακτική πραγματικότητα: δεν θα υπάρχει τέλεια αγωγιμότητα μεταξύ του πομπού και του συλλέκτη. Μια μικρή πτώση τάσης θα σχηματιστεί μεταξύ αυτών των κόμβων. Τα φύλλα δεδομένων του τρανζίστορ θα ορίσουν αυτή την τάση ως **τάση κορεσμού CE  $V_{CE(sat)}$**  -- μια τάση από τον συλλέκτη στον εκπομπό που απαιτείται για κορεσμό. Αυτή η τιμή είναι συνήθως περίπου 0,05-0,2V. Αυτή η τιμή σημαίνει ότι το  $V_C$  πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το  $V_E$  (αλλά και τα δύο ακόμη μικρότερα από  $V_B$ ) για να τεθεί το τρανζίστορ σε λειτουργία κορεσμού.

### 3.2 Λειτουργία αποκοπής

Η λειτουργία αποκοπής είναι το αντίθετο του κορεσμού. Ένα τρανζίστορ σε λειτουργία αποκοπής είναι απενεργοποιημένο -- δεν υπάρχει ρεύμα συλλέκτη και επομένως δεν υπάρχει ρεύμα εκπομπού. Μοιάζει σχεδόν με ανοιχτό κύκλωμα.



#### Λειτουργία αποκοπής

Για να μπει ένα τρανζίστορ στη λειτουργία αποκοπής, η τάση βάσης πρέπει να είναι μικρότερη από την τάση τόσο του εκπομπού όσο και του συλλέκτη. Το  $V_{BC}$  και το  $V_{BE}$  πρέπει να είναι και τα δύο αρνητικά.

$$\begin{aligned}V_C &> V_B \\V_E &> V_B\end{aligned}$$

Στην πραγματικότητα, το  $V_{BE}$  μπορεί να είναι οπουδήποτε μεταξύ 0V και  $V_{th}$  (~0,6V) για να επιτευχθεί η λειτουργία αποκοπής.

### 3.3 Ενεργή λειτουργία

Για να λειτουργήσει σε ενεργή λειτουργία, το  $V_{BE}$  ενός τρανζίστορ πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μηδέν και το  $V_{BC}$  του πρέπει να είναι αρνητικό. Έτσι, η τάση βάσης πρέπει να είναι μικρότερη από τον συλλέκτη, αλλά μεγαλύτερη από τον πομπό. Αυτό σημαίνει επίσης ότι ο συλλέκτης πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον πομπό.

$$V_C > V_B > V_E$$

Στην πραγματικότητα, χρειαζόμαστε μια μη **μηδενική πτώση τάσης προς τα εμπρός** (συντομογραφία  $V_{th}$ ,  $V_{\gamma}$  ή  $V_d$ ) από τη βάση στον πομπό ( $V_{BE}$ ) για να "ανοίξουμε" το τρανζίστορ. Συνήθως, αυτή η τάση είναι περίπου 0,6 V.

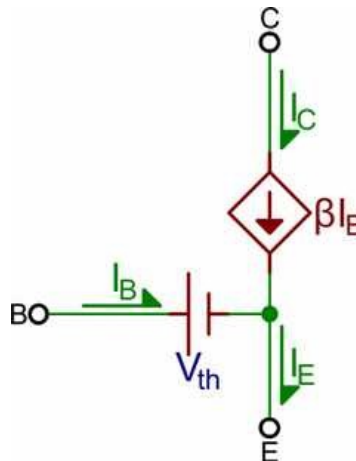
### 3.4 Ενίσχυση σε ενεργή λειτουργία

Η ενεργή λειτουργία είναι η πιο ισχυρή λειτουργία του τρανζίστορ επειδή μετατρέπει τη συσκευή σε ενισχυτή. Το ρεύμα που εισέρχεται στον πείρο βάσης **ενισχύει** το ρεύμα που εισέρχεται στον συλλέκτη και έξω από τον πομπό.

Η συντομογραφία μας για το **κέρδος** (συντελεστής ενίσχυσης) ενός τρανζίστορ είναι  $\beta$  (μπορείτε επίσης να το δείτε ως  $\beta_F$  ή  $h_{FE}$ ). Το  $\beta$  συσχετίζει γραμμικά το ρεύμα συλλέκτη ( $I_C$ ) με το ρεύμα βάσης ( $I_B$ ):

$$I_C = \beta I_B$$

Η πραγματική τιμή του  $\beta$  ποικίλλει ανάλογα με το τρανζίστορ. Συνήθως είναι γύρω στο 100 αλλά μπορεί να κυμαίνεται από 50 έως 200...ακόμα και 2000, ανάλογα με το τρανζίστορ που χρησιμοποιείτε και πόσο ρεύμα περνάει από αυτό. Εάν το τρανζίστορ σας είχε  $\beta$  100, για παράδειγμα, αυτό θα σήμαινε ότι ένα ρεύμα εισόδου 1 mA στη βάση θα μπορούσε να παράγει ρεύμα 100 mA μέσω του συλλέκτη.



*Μοντέλο ενεργής λειτουργίας.  $V_{BE} = V_{th}$ , και  $I_C = \beta I_B$ .*

Τι γίνεται με το ρεύμα εκπομπής,  $I_E$ ; Στην ενεργή λειτουργία, τα ρεύματα συλλέκτη και βάσης εισέρχονται στη συσκευή και ο  $I_E$  βγαίνει. Για να συσχετίσουμε το ρεύμα του εκπομπού με το ρεύμα του συλλέκτη, έχουμε μια άλλη σταθερή τιμή:  $\alpha$ . Το  $\alpha$  είναι το κέρδος ρεύματος κοινής βάσης, συσχετίζει αυτά τα ρεύματα ως εξής:

$$I_C = \alpha I_E$$

Το  $\alpha$  είναι συνήθως πολύ κοντά, αλλά μικρότερο από, 1. Αυτό σημαίνει ότι το  $I_C$  είναι πολύ κοντά, αλλά λιγότερο από το  $I_E$  σε ενεργή λειτουργία.

Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το  $\beta$  για να υπολογίσετε το  $\alpha$  ή το αντίστροφο:

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

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$$

Αν το  $\beta$  είναι 100, για παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι το  $\alpha$  είναι 0,99. Έτσι, εάν το  $I_C$  είναι 100 mA, για παράδειγμα, τότε το  $I_E$  είναι 101 mA.

### 3.5 Αντίστροφη ενεργή

Ακριβώς όπως ο κορεσμός είναι το αντίθετο της αποκοπής, η αντίστροφη ενεργή λειτουργία είναι το αντίθετο της ενεργής λειτουργίας. Ένα τρανζίστορ σε αντίστροφη ενεργή λειτουργία άγει, ακόμη και ενισχύει, αλλά το ρεύμα ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση, από τον πομπό στον συλλέκτη. Το μειονέκτημα στην αντίστροφη ενεργή λειτουργία είναι ότι το  $\beta$  ( $\beta_R$  σε αυτήν την περίπτωση) είναι πολύ μικρότερο.

Για να θέσετε ένα τρανζίστορ σε αντίστροφη ενεργή λειτουργία, η τάση εκπομπού πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη βάση, η οποία πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τον συλλέκτη ( $V_{BE} < 0$  και  $V_{BC} > 0$ ).

$$V_C < V_B < V_E$$

Η αντίστροφη ενεργή λειτουργία δεν είναι συνήθως μια κατάσταση στην οποία θέλετε να οδηγήσετε ένα τρανζίστορ. Είναι καλό να γνωρίζετε ότι υπάρχει, αλλά σπάνια έχει σχεδιαστεί σε μια εφαρμογή.

#### 4 Σχετικά με το PNP

Μετά από όλα όσα έχουμε μιλήσει σε αυτήν τη σελίδα, έχουμε καλύψει μόνο το μισό του φάσματος BJT. Τι γίνεται με τα τρανζίστορ PNP; Τα PNP λειτουργούν πολύ όπως τα NPN -- έχουν τις ίδιες τέσσερις λειτουργίες -- αλλά όλα ανατρέπονται. Για να μάθετε σε ποια λειτουργία βρίσκεται ένα τρανζίστορ PNP, αντιστρέψτε όλα τα σύμβολα  $<$  και  $>$ .

Για παράδειγμα, για να τεθεί ένα PNP σε κορεσμό, το  $V_C$  και το  $V_E$  πρέπει να είναι υψηλότερο από το  $V_B$ . Τραβάτε τη βάση χαμηλά για να ενεργοποιήσετε το PNP και να το κάνετε ψηλότερα από τον συλλέκτη και τον πομπό για να το απενεργοποιήσετε. Και, για να τεθεί ένα PNP σε ενεργή λειτουργία, το  $V_E$  πρέπει να είναι σε υψηλότερη τάση από το  $V_B$ , το οποίο πρέπει να είναι υψηλότερο από το  $V_C$ .

Συνοψίζοντας:

| Σχέσεις τάσης     | Λειτουργία NPN | Λειτουργία PNP |
|-------------------|----------------|----------------|
| $V_E < V_B < V_C$ | Ενεργό         | Αντίστροφα     |
| $V_E < V_B > V_C$ | Κορεσμός       | Αποκοπή        |
| $V_E > V_B < V_C$ | Αποκοπή        | Κορεσμός       |
| $V_E > V_B > V_C$ | Αντίστροφα     | Ενεργό         |

Ένα άλλο αντίθετο χαρακτηριστικό των NPN και PNP είναι η κατεύθυνση της ροής του ρεύματος. Σε καταστάσεις ενεργού και κορεσμού, το ρεύμα σε ένα PNP ρέει από τον πομπό στον συλλέκτη. Αυτό σημαίνει ότι ο πομπός πρέπει να είναι σε υψηλότερη τάση από τον συλλέκτη.

Εάν είστε εξαντλημένοι σε εννοιολογικά πράγματα, κάντε ένα ταξίδι στην επόμενη ενότητα. Ο καλύτερος τρόπος για να μάθετε πώς λειτουργεί ένα τρανζίστορ είναι να το εξετάσετε σε πραγματικά κυκλώματα. Ας δούμε μερικές εφαρμογές!

#### 5 Εφαρμογές I: Διακόπτες

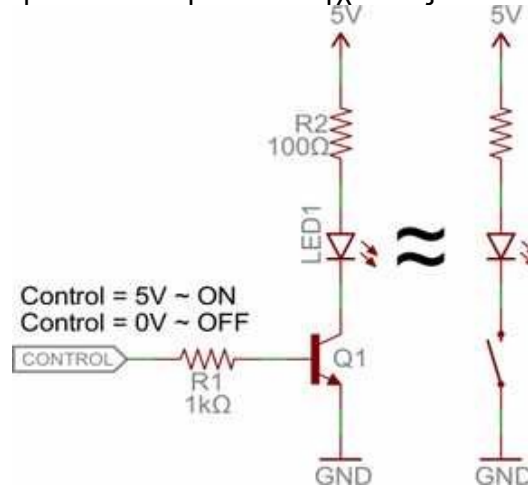
Μία από τις πιο θεμελιώδεις εφαρμογές ενός τρανζίστορ είναι η χρήση του για τον έλεγχο της ροής ισχύος σε άλλο μέρος του κυκλώματος -- χρησιμοποιώντας το ως ηλεκτρικό διακόπτη. Οδηγώντας το είτε σε λειτουργία αποκοπής είτε σε λειτουργία κορεσμού, το τρανζίστορ μπορεί να δημιουργήσει το δυαδικό εφέ ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ενός διακόπτη.

Οι διακόπτες τρανζίστορ είναι κρίσιμα στοιχεία κατασκευής κυκλωμάτων, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή λογικών πυλών, οι οποίες συνεχίζουν να

δημιουργούν μικροελεγκτές, μικροεπεξεργαστές και άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Παρακάτω είναι μερικά παραδείγματα κυκλωμάτων.

### 5.1 Διακόπτης τρανζίστορ

Ας δούμε το πιο θεμελιώδες κύκλωμα διακόπτη τρανζίστορ: έναν διακόπτη NPN. Εδώ χρησιμοποιούμε ένα NPN για τον έλεγχο ενός LED υψηλής ισχύος:



#### Ένας διακόπτης NPN

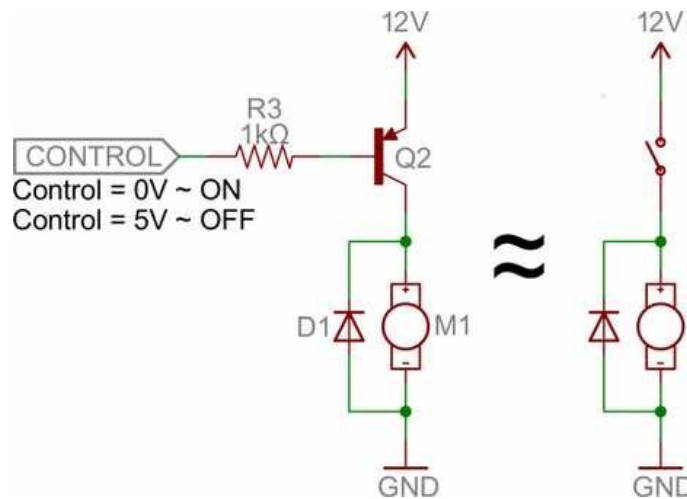
Η είσοδος ελέγχου μας ρέει στη βάση, η έξοδος συνδέεται με τον συλλέκτη και ο πομπός διατηρείται σε σταθερή τάση.

Ενώ ένας κανονικός διακόπτης θα απαιτούσε τη φυσική αναστροφή ενός ενεργοποιητή, αυτός ο διακόπτης ελέγχεται από την τάση στον πείρο βάσης.

Ένας ακροδέκτης I/O μικροελεγκτή, όπως αυτοί σε ένα Arduino, μπορεί να προγραμματιστεί να πηγαίνει ψηλά ή χαμηλά για να ανάβει ή να απενεργοποιεί το LED.

Όταν η τάση στη βάση είναι μεγαλύτερη από 0,6 V (ή ό,τι μπορεί να είναι το  $V_{th}$  του τρανζίστορ σας), το τρανζίστορ αρχίζει να κορεστεί και μοιάζει με βραχυκύκλωμα μεταξύ του συλλέκτη και του πομπού. Όταν η τάση στη βάση είναι μικρότερη από 0,6 V, το τρανζίστορ είναι σε λειτουργία αποκοπής -- δεν ρέει ρεύμα επειδή μοιάζει με ανοιχτό κύκλωμα μεταξύ C και E.





#### Διακόπτης χαμηλής πλευράς

Το παραπάνω κύκλωμα ονομάζεται διακόπτης χαμηλής πλευράς επειδή ο διακόπτης -- το τρανζίστορ μας -- βρίσκεται στη χαμηλή (γείωση) πλευρά του κυκλώματος. Εναλλακτικά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα τρανζίστορ PNP για να δημιουργήσουμε έναν διακόπτη υψηλής πλευράς

Παρόμοια με το κύκλωμα NPN, η βάση είναι η είσοδος μας και ο πομπός είναι συνδεδεμένος με σταθερή τάση. Αυτή τη φορά, ωστόσο, ο πομπός είναι δεμένος ψηλά και το φορτίο συνδέεται με το τρανζίστορ στην πλευρά της γείωσης.

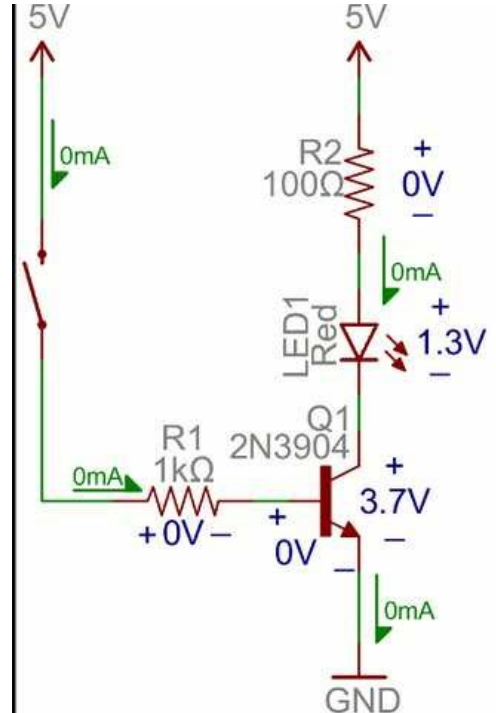
Αυτό το κύκλωμα λειτουργεί εξίσου καλά με τον διακόπτη που βασίζεται σε NPN, αλλά υπάρχει μια τεράστια διαφορά: για να ενεργοποιήσετε το φορτίο, η βάση πρέπει να είναι χαμηλή. Αυτό μπορεί να προκαλέσει επιπλοκές, ειδικά εάν η υψηλή τάση του φορτίου (το VCC είναι 12 V που συνδέεται με τον πομπό VE σε αυτήν την εικόνα) είναι υψηλότερη από την υψηλή τάση της εισόδου ελέγχου μας. Για παράδειγμα, αυτό το κύκλωμα δεν θα λειτουργούσε αν προσπαθούσατε να χρησιμοποιήσετε ένα Arduino που λειτουργεί 5V για να απενεργοποιήσετε έναν κινητήρα 12V. Σε αυτήν την περίπτωση, **θα ήταν αδύνατο να απενεργοποιήσετε τον διακόπτη** επειδή το VB (σύνδεση με τον ακροδέκτη ελέγχου) θα ήταν πάντα μικρότερο από το VE.

## 6 Αντιστάσεις βάσης!

Θα παρατηρήσετε ότι καθένα από αυτά τα κυκλώματα χρησιμοποιεί μια αντίσταση σειράς μεταξύ της εισόδου ελέγχου και της βάσης του τρανζίστορ. Μην ξεχάσετε να προσθέσετε αυτήν την αντίσταση! Ένα τρανζίστορ χωρίς αντίσταση στη βάση είναι σαν ένα LED χωρίς αντίσταση περιορισμού ρεύματος.

Θυμηθείτε ότι, κατά κάποιο τρόπο, ένα τρανζίστορ είναι απλώς ένα ζεύγος διασυνδεδεμένων διόδων. Κάνουμε πόλωση προς τα εμπρός τη δίοδο εκπομπού βάσης για να ενεργοποιήσουμε το φορτίο. Η δίοδος χρειάζεται μόνο 0,6 V για να ανάψει, περισσότερη τάση από αυτό σημαίνει περισσότερο ρεύμα. Μερικά τρανζίστορ μπορούν να έχουν τιμή μόνο 10-100 mA ρεύματος που να διαρρέει από αυτά. Εάν παρέχετε ρεύμα πάνω από τη μέγιστη ονομαστική τιμή, το τρανζίστορ μπορεί να εκραγεί.

Η αντίσταση σειράς μεταξύ της πηγής ελέγχου μας και της **βάσης περιορίζει το ρεύμα στη βάση**. Ο κόμβος εκπομπού βάσης μπορεί να πάρει την ευτυχή πτώση τάσης 0,6 V και η αντίσταση μπορεί να ρίξει την υπόλοιπη τάση. Η τιμή της αντίστασης και η τάση σε αυτήν θα ρυθμίσουν το ρεύμα.



#### Μια βασική αντίσταση

Η αντίσταση πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να περιορίζει αποτελεσματικά το ρεύμα, αλλά αρκετά μικρή για να τροφοδοτεί τη βάση με αρκετό ρεύμα. 1mA έως 10mA είναι συνήθως αρκετά, αλλά ελέγξτε το φύλλο δεδομένων του τρανζίστορ σας για να βεβαιωθείτε.

## 7 Ψηφιακή Λογική

Τα τρανζίστορ μπορούν να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν όλες τις θεμελιώδεις λογικές πύλες μας: AND, OR, και NOT.

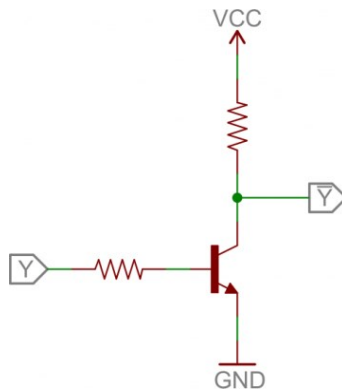
(Σημείωση: Αυτές τις μέρες τα MOSFET είναι πιο πιθανό να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία λογικών πυλών από τα BJT. Τα MOSFET είναι πιο αποδοτικά από πλευράς ισχύος, γεγονός που τα καθιστά την καλύτερη επιλογή.)

#### Αντιστροφέας

Ακολουθεί ένα κύκλωμα τρανζίστορ που υλοποιεί έναν μετατροπέα ή μια πύλη NOT:

Εδώ μια υψηλή τάση στη βάση θα ενεργοποιήσει το τρανζίστορ, το οποίο θα συνδέσει αποτελεσματικά τον συλλέκτη με τον πομπό. Δεδομένου ότι ο πομπός συνδέεται απευθείας με το έδαφος, ο συλλέκτης θα είναι επίσης (αν και θα είναι ελαφρώς υψηλότερος, κάπου γύρω στο  $V_{CE(sat)} \sim 0,05-0,2V$ ). Εάν η είσοδος είναι χαμηλή, από την άλλη πλευρά, το τρανζίστορ μοιάζει με ανοιχτό κύκλωμα και η έξοδος σύρεται μέχρι το VCC

(Αυτή είναι μια θεμελιώδης διαμόρφωση τρανζίστορ που ονομάζεται κοινός εκπομπός. Περισσότερα για αυτό αργότερα.)



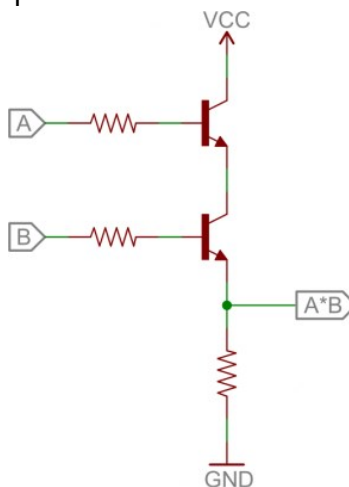
*Ένας μετατροπέας κατασκευασμένος από τρανζίστορ.*

### Πύλη AND

Εδώ είναι ένα ζευγάρι τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μιας πύλης AND 2 εισόδων:

Εάν κάποιο τρανζίστορ είναι απενεργοποιημένο, τότε η έξοδος στον συλλέκτη του δεύτερου τρανζίστορ θα τραβηχτεί χαμηλά.

Εάν και τα δύο τρανζίστορ είναι "on" (οι βάσεις και οι δύο ψηλές), τότε η έξοδος του κυκλώματος είναι επίσης υψηλή.

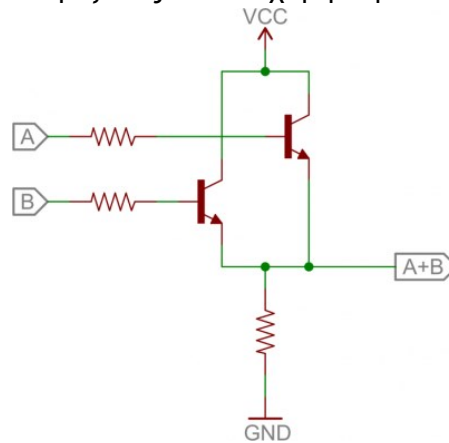


### 2-input AND gate built out of transistors.

#### Πύλη OR

Και, τέλος, εδώ είναι μια **πύλη OR 2 εισόδων**:

Σε αυτό το κύκλωμα, εάν κάποιο (ή και τα δύο) A και B είναι υψηλά, το αντίστοιχο τρανζίστορ θα ενεργοποιηθεί και θα τραβήξει την έξοδο ψηλά. Εάν και τα δύο τρανζίστορ είναι απενεργοποιημένα, τότε η έξοδος έλκεται χαμηλά μέσω της αντίστασης.

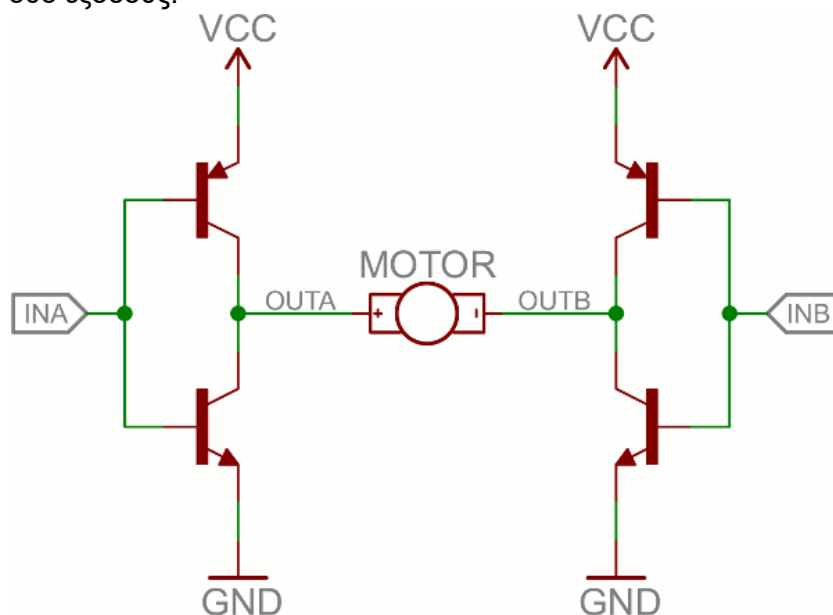


### Πύλη OR 2 εισόδων κατασκευασμένη από τρανζίστορ.

#### Γέφυρα H

Η γέφυρα H είναι ένα κύκλωμα που βασίζεται σε τρανζίστορ, ικανό να οδηγεί κινητήρες τόσο δεξιόστροφα όσο και αριστερόστροφα. Είναι ένα απίστευτα δημοφιλές κύκλωμα -- η κινητήρια δύναμη πίσω από αμέτρητα ρομπότ που πρέπει να μπορούν να κινούνται τόσο προς τα εμπρός όσο και προς τα πίσω.

Βασικά, μια γέφυρα H είναι ένας συνδυασμός τεσσάρων τρανζίστορ με δύο γραμμές εισόδου και δύο εξόδους:



*Μπορείτε να μαντέψετε γιατί ονομάζεται γέφυρα Η;*

(**Σημείωση:** συνήθως υπάρχουν πολλά περισσότερα σε μια καλοσχεδιασμένη γέφυρα Η που περιλαμβάνει διόδους flyback, αντιστάσεις βάσης και σκανδάλες Schmidt.)

Εάν και οι δύο είσοδοι έχουν την ίδια τάση, οι έξοδοι του κινητήρα θα έχουν την ίδια τάση και ο κινητήρας δεν θα μπορεί να περιστρέφεται. Αλλά εάν οι δύο είσοδοι είναι αντίθετες, ο κινητήρας θα περιστραφεί προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση.

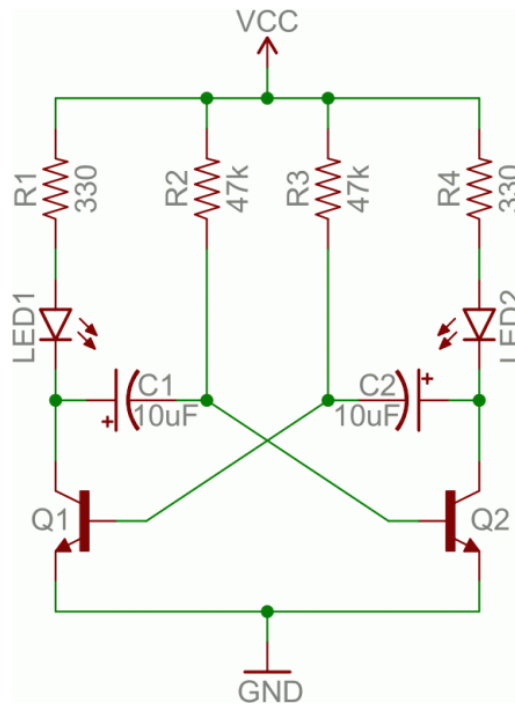
Η γέφυρα Η έχει έναν πίνακα αλήθειας που μοιάζει λίγο με αυτό:

| Είσοδος<br>A | Είσοδος<br>B | Έξοδος A | Έξοδος B | Κατεύθυνση<br>κινητήρα |
|--------------|--------------|----------|----------|------------------------|
| 0            | 0            | 1        | 1        | Σταμάτησε (φρένο)      |
| 0            | 1            | 1        | 0        | Δεξιόστροφος           |
| 1            | 0            | 0        | 1        | Αριστερόστροφος        |
| 1            | 1            | 0        | 0        | Σταμάτησε (φρένο)      |

## 8 Ταλαντωτές

Ένας ταλαντωτής είναι ένα κύκλωμα που παράγει ένα περιοδικό σήμα που ταλαντεύεται μεταξύ υψηλής και χαμηλής τάσης. Οι ταλαντωτές χρησιμοποιούνται σε όλα τα είδη κυκλωμάτων: από το απλό αναβοσβήσιμο ενός LED μέχρι την παραγωγή ενός σήματος ρολογιού για την κίνηση ενός μικροελεγκτή. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να δημιουργήσετε ένα κύκλωμα ταλαντωτή, συμπεριλαμβανομένων κρυστάλλων χαλαζία, op-amp και, φυσικά, τρανζίστορ.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα ταλαντευόμενου κυκλώματος, το οποίο ονομάζουμε ασταθή πολυδονητή. Χρησιμοποιώντας ανάδραση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα ζεύγος τρανζίστορ για να δημιουργήσουμε δύο συμπληρωματικά, ταλαντευόμενα σήματα.



#### Ταλαντούμενο κύκλωμα

Εκτός από τα δύο τρανζίστορ, οι πυκνωτές είναι το πραγματικό κλειδί σε αυτό το κύκλωμα. Τα καπάκια εναλλακτικά φορτίζονται και αποφορτίζονται, γεγονός που προκαλεί εναλλακτικά ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των δύο τρανζίστορ.

Η ανάλυση της λειτουργίας αυτού του κυκλώματος είναι μια εξαιρετική μελέτη της λειτουργίας τόσο των καπακιών όσο και των τρανζίστορ. Αρχικά, ας υποθέσουμε ότι το C1 είναι πλήρως φορτισμένο (αποθηκεύοντας μια τάση περίπου VCC), το C2 είναι αποφορτισμένο, το Q1 είναι ενεργοποιημένο και το Q2 είναι απενεργοποιημένο. Να τι συμβαίνει μετά από αυτό:

- Εάν το Q1 είναι ενεργοποιημένο, τότε η αριστερή πλάκα του C1 (στο σχηματικό) συνδέεται σε περίπου 0V. Αυτό θα επιτρέψει στο C1 να εκφορτιστεί μέσω του συλλέκτη του Q1.
- Ενώ το C1 εκφορτίζεται, το C2 φορτίζει γρήγορα μέσω της αντίστασης χαμηλότερης τιμής -- R4.
- Μόλις το C1 εκφορτιστεί πλήρως, η δεξιά πλάκα του θα τραβηχτεί μέχρι περίπου 0,6 V, το οποίο θα ενεργοποιήσει το Q2.
- Σε αυτό το σημείο έχουμε ανταλλάξει καταστάσεις: το C1 είναι αποφορτισμένο, το C2 είναι φορτισμένο, το Q1 είναι απενεργοποιημένο και το Q2 είναι ενεργοποιημένο. Τώρα κάνουμε τον ίδιο χορό από την άλλη.
- Η ενεργοποίηση του Q2 επιτρέπει στο C2 να εκφορτίζεται μέσω του συλλέκτη του Q2.
- Ενώ το Q1 είναι απενεργοποιημένο, το C1 μπορεί να φορτίσει γρήγορα μέσω του R1.
- Μόλις το C2 αποφορτιστεί πλήρως, το Q1 θα ενεργοποιηθεί ξανά και είμαστε πάλι στην κατάσταση που ξεκινήσαμε.

**Μπορεί να είναι δύσκολο να τυλίξεις το κεφάλι σου.** Μπορείτε να βρείτε ένα άλλο εξαιρετικό demo αυτού του κυκλώματος εδώ.

Επιλέγοντας συγκεκριμένες τιμές για τα C1, C2, R2 και R3 (και διατηρώντας τα R1 και R4 χαμηλά), μπορούμε να ορίσουμε την ταχύτητα του κυκλώματος πολυδονητή μας:

$$f = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_2 C_1 + R_3 C_2)}$$

Έτσι, με τις τιμές για τα καπάκια και τις αντιστάσεις ρυθμισμένες στα 10μF και 47kΩ αντίστοιχα, η συχνότητα του ταλαντωτή μας είναι περίπου 1,5 Hz. Αυτό σημαίνει ότι κάθε LED θα αναβοσβήνει περίπου 1,5 φορές το δευτερόλεπτο.

Όπως μπορείτε ήδη να δείτε, υπάρχουν τόνοι κυκλωμάτων εκεί έξω που χρησιμοποιούν τρανζίστορ. Αλλά μόλις και μετά βίας ξύσαμε την επιφάνεια. Αυτά τα παραδείγματα δείχνουν κυρίως πώς το τρανζίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λειτουργίες κορεσμού και αποκοπής ως διακόπτης, αλλά τι γίνεται με την ενίσχυση; Ώρα για περισσότερα παραδείγματα!

## 9 Εφαρμογές II: Ενισχυτές

Μερικές από τις πιο ισχυρές εφαρμογές τρανζίστορ περιλαμβάνουν ενίσχυση: μετατροπή ενός σήματος χαμηλής ισχύος σε σήμα υψηλότερης ισχύος. Οι ενισχυτές μπορούν να αυξήσουν την τάση ενός σήματος, παίρνοντας κάτι από την περιοχή μV και μετατρέποντάς το σε ένα πιο χρήσιμο επίπεδο mV ή V. Ή μπορούν να ενισχύσουν το ρεύμα, χρήσιμο για τη μετατροπή του mA του ρεύματος που παράγεται από μια φωτοδίοδο σε ρεύμα πολύ υψηλότερου μεγέθους. Υπάρχουν ακόμη και ενισχυτές που λαμβάνουν ρεύμα και παράγουν υψηλότερη τάση ή αντίστροφα (ονομάζονται αντίσταση trans και διαγωγιμότητα αντίστοιχα).

Τα τρανζίστορ είναι βασικό συστατικό πολλών κυκλωμάτων ενίσχυσης. Υπάρχει μια άπειρη ποικιλία ενισχυτών τρανζίστορ εκεί έξω, αλλά ευτυχώς, πολλοί από αυτούς βασίζονται σε μερικά από αυτά τα πιο πρωτόγονα κυκλώματα. Θυμηθείτε αυτά τα κυκλώματα και, ελπίζουμε, με λίγη αντιστοίχιση προτύπων, ν μπορείτε να κατανοήσετε πιο περίπλοκους ενισχυτές.

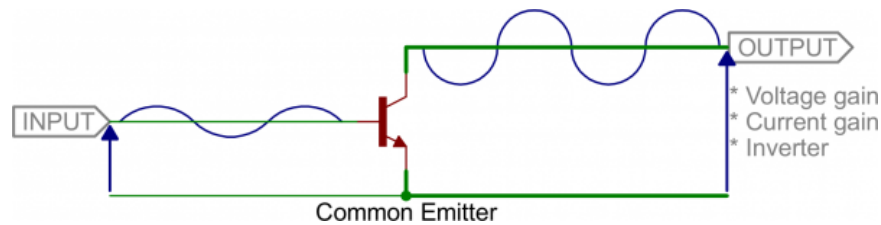
## 10 Κοινές διαμορφώσεις

Τρεις από τους πιο θεμελιώδεις ενισχυτές τρανζίστορ είναι ο κοινός πομπός, ο κοινός συλλέκτης και η κοινή βάση. Σε κάθε μία από τις τρεις διαμορφώσεις, ένας από τους τρεις κόμβους είναι μόνιμα συνδεδεμένος σε μια κοινή τάση (συνήθως γείωση) και οι άλλοι δύο κόμβοι είναι είτε είσοδος είτε έξοδος του ενισχυτή.

### 10.1 Κοινός Εκπομπός

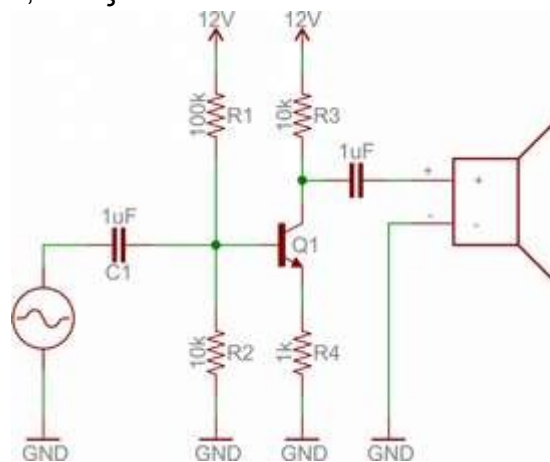
Ο κοινός πομπός είναι μια από τις πιο δημοφιλείς διατάξεις τρανζίστορ. Σε αυτό το κύκλωμα, ο πομπός συνδέεται με μια τάση κοινή τόσο στη βάση όσο και στον συλλέκτη (συνήθως γείωση). Η βάση γίνεται η είσοδος σήματος και ο συλλέκτης γίνεται η έξοδος.





### Κοινός Εκπομπός

Το κύκλωμα κοινού εκπομπού είναι δημοφιλές επειδή είναι κατάλληλο για ενίσχυση τάσης, ειδικά σε χαμηλές συχνότητες. Είναι ιδανικά για την ενίσχυση των σημάτων ήχου, για παράδειγμα. Εάν έχετε ένα μικρό σήμα εισόδου 1,5 V από αιχμή σε κορυφή, θα μπορούσατε να το ενισχύσετε σε πολύ υψηλότερη τάση χρησιμοποιώντας ένα ελαφρώς πιο περίπλοκο κύκλωμα, όπως:

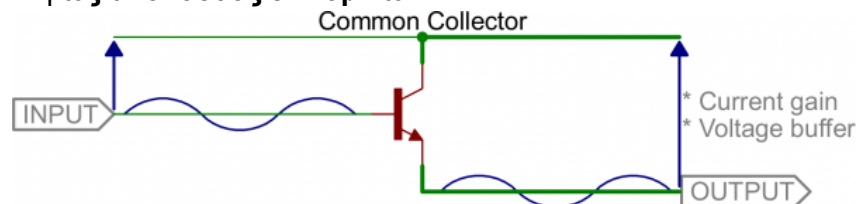


### Κοινό κύκλωμα εκπομπού

Ωστόσο, μια ιδιορρυθμία του κοινού πομπού είναι ότι **αντιστρέφει** το σήμα εισόδου (συγκρίνετε το με τον μετατροπέα από την τελευταία σελίδα!).

## 10.2 Κοινός συλλέκτης (Ακόλουθος εκπομπών)

Αν δέσουμε τον πείρο του συλλέκτη σε μια κοινή τάση, χρησιμοποιήσουμε τη βάση ως είσοδο και τον πομπού ως έξοδο, έχουμε έναν κοινό συλλέκτη. Αυτή η διαμόρφωση είναι επίσης γνωστή ως **ακόλουθος εκπομπών**.

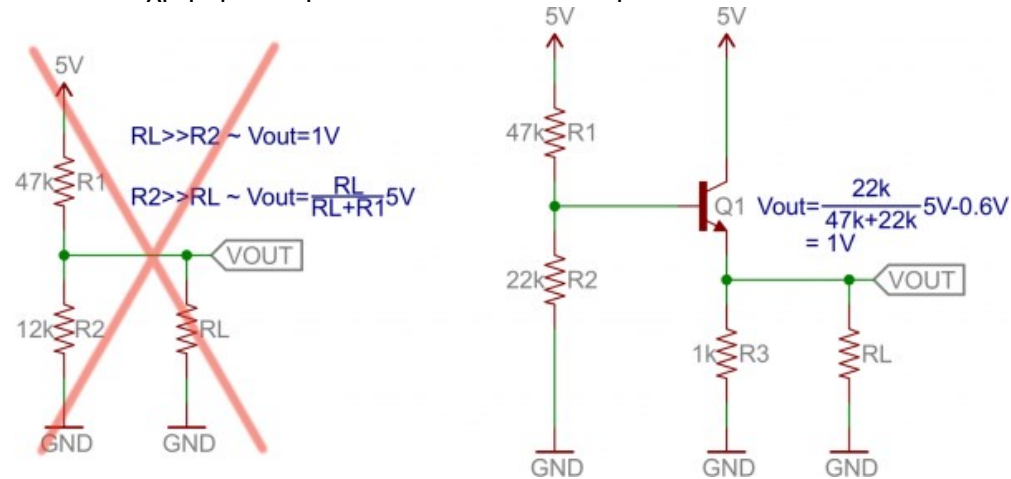


### Κοινός συλλέκτης

Ο κοινός συλλέκτης δεν κάνει **καμία ενίσχυση τάσης** (στην πραγματικότητα, η τάση εξόδου θα είναι 0,6 V χαμηλότερη από την τάση εισόδου). Για το λόγο αυτό, αυτό το κύκλωμα μερικές φορές ονομάζεται ακολουθητής τάσης.

Αυτό το κύκλωμα έχει μεγάλες δυνατότητες ως **ενισχυτής ρεύματος**. Επιπλέον, το υψηλό κέρδος ρεύματος σε συνδυασμό με το κέρδος μονάδας τάσης καθιστά αυτό το κύκλωμα ένα εξαιρετικό buffer τάσης. Ένα buffer τάσης εμποδίζει ένα κύκλωμα φορτίου από ανεπιθύμητες παρεμβολές στο κύκλωμα που το οδηγεί.

Για παράδειγμα, εάν θέλατε να παραδώσετε 1 V σε ένα φορτίο, θα μπορούσατε να ακολουθήσετε τον εύκολο τρόπο και να χρησιμοποιήσετε έναν διαιρέτη τάσης ή θα μπορούσατε να χρησιμοποιήσετε έναν ακόλουθο πομπό.

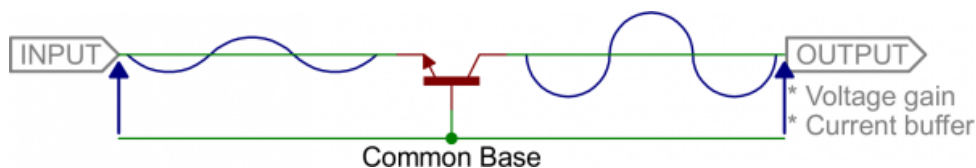


#### Κοινό κύκλωμα συλλέκτη

Καθώς το φορτίο μεγαλώνει (που, αντίθετα, σημαίνει ότι η αντίσταση είναι μικρότερη), η έξοδος του κυκλώματος διαιρέτη τάσης πέφτει. Αλλά η τάση εξόδου του ακολούθου εκπομπού παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από το φορτίο. Μεγαλύτερα φορτία δεν μπορούν να «φορτώσουν» έναν ακόλουθο εκπομπού, καθώς μπορούν να κυκλώσουν με μεγαλύτερες σύνθετες αντιστάσεις εξόδου.

### 10.3 Κοινή Βάση

Θα μιλήσουμε για την κοινή βάση για να παρέχουμε κάποιο κλείσιμο σε αυτήν την ενότητα, αλλά αυτή είναι η λιγότερο δημοφιλής από τις τρεις βασικές διαμορφώσεις. Σε έναν κοινό ενισχυτή βάσης, ο πομπός είναι η είσοδος και η έξοδος συλλέκτη. Η βάση είναι κοινή και στα δύο.



#### Κοινή Βάση

Η κοινή βάση είναι σαν τον αντεκπομπού-ακόλουθο. Είναι ένας αξιοπρεπής ενισχυτής τάσης και το ρεύμα εισόδου είναι περίπου ίσο με το ρεύμα εξόδου (στην πραγματικότητα το ρεύμα εισόδου είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το ρεύμα εξόδου).

Το κύκλωμα κοινής βάσης λειτουργεί καλύτερα ως ενδιάμεση **μνήμη ρεύματος**. Μπορεί να πάρει ρεύμα εισόδου σε χαμηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου και να παραδώσει το ίδιο ρεύμα σε έξοδο υψηλότερης σύνθετης αντίστασης.

#### 10.4 Συνοψίζοντας

Αυτές οι τρεις διαμορφώσεις ενισχυτών βρίσκονται στην καρδιά πολλών πιο περίπλοκων ενισχυτών τρανζίστορ. Καθένα από αυτά έχει εφαρμογές όπου λάμπει, είτε ενισχύουν ρεύμα, τάση ή buffer.

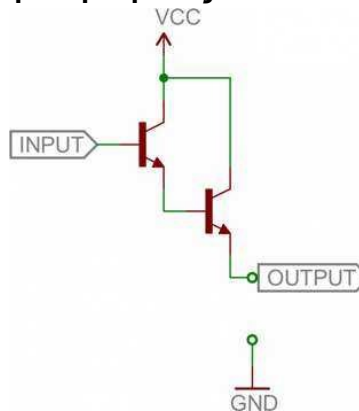
|                   | Κοινός Εκπομπός | Κοινός Συλλέκτης | Κοινή Βάση |
|-------------------|-----------------|------------------|------------|
| Κέρδος τάσης      | Μεσαίο          | Χαμηλό           | Υψηλό      |
| Τρέχον κέρδος     | Μεσαίο          | Υψηλό            | Χαμηλό     |
| Αντίσταση εισόδου | Μεσαίο          | Υψηλό            | Χαμηλό     |
| Αντίσταση εξόδου  | Μεσαίο          | Χαμηλό           | Υψηλό      |

### 11 Ενισχυτές πολλαπλών σταδίων

Θα μπορούσαμε να συνεχίσουμε για τη μεγάλη ποικιλία ενισχυτών τρανζίστορ εκεί έξω. Ακολουθούν μερικά γρήγορα παραδείγματα για να δείξετε τι συμβαίνει όταν συνδυάζετε τους παραπάνω ενισχυτές ενός σταδίου:

#### Ντάρλινγκτον

Ο ενισχυτής Ντάρλινγκτον περνά έναν κοινό συλλέκτη σε έναν άλλο για να δημιουργήσει έναν **ενισχυτή απολαβής υψηλού ρεύματος**.



#### Multistage Amplifiers

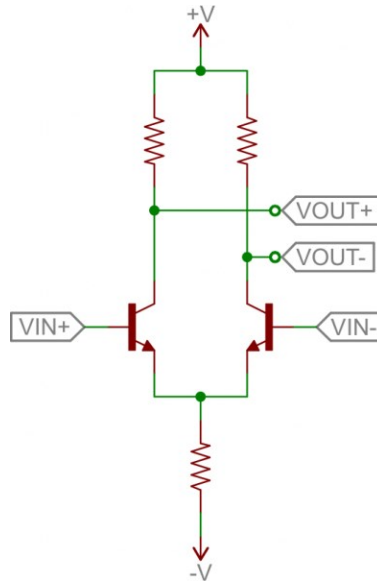
Η τάση εξόδου είναι περίπου η ίδια με την τάση εισόδου (μείον περίπου 1,2 V-1,4 V), αλλά το κέρδος ρεύματος είναι το γινόμενο δύο κερδών τρανζίστορ. Αυτό είναι  $\beta^2$  -- πάνω από 10.000!

Το ζεύγος Darlington είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο εάν χρειάζεται να οδηγείτε μεγάλο φορτίο με πολύ μικρό ρεύμα εισόδου.

### 11.1 Διαφορικός ενισχυτής

Ένας διαφορικός ενισχυτής αφαιρεί δύο σήματα εισόδου και ενισχύει αυτή τη διαφορά. Είναι ένα κρίσιμο μέρος των κυκλωμάτων ανάδρασης, όπου η είσοδος συγκρίνεται με την έξοδο, για να παραχθεί μια μελλοντική έξοδος.

Εδώ είναι η βάση του διαφορικού ενισχυτή:



#### Διαφορικός ενισχυτής

Αυτό το κύκλωμα ονομάζεται επίσης **ζεύγος με μακριά ουρά**. Είναι ένα ζευγάρι κυκλωμάτων κοινού εκπομπού που συγκρίνονται μεταξύ τους για να παράγουν μια διαφορική έξοδο. Δύο είσοδοι εφαρμόζονται στις βάσεις των τρανζίστορ. η έξοδος είναι μια διαφορική τάση στους δύο συλλέκτες.

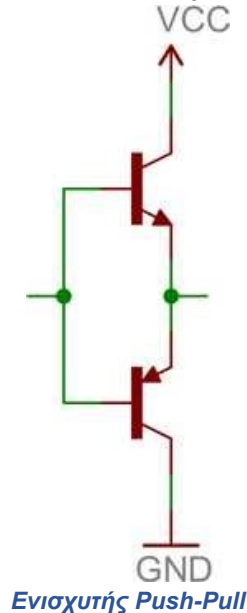
## 11.2 Push-Pull Amplifier

Ένας ενισχυτής push-pull είναι ένα χρήσιμο "τελικό στάδιο" σε πολλούς ενισχυτές πολλαπλών σταδίων. Είναι ένας ενεργειακά αποδοτικός ενισχυτής ισχύος, που χρησιμοποιείται συχνά για την οδήγηση μεγαφώνων.

Ο βασικός ενισχυτής push-pull χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ NPN και PNP, και τα δύο διαμορφωμένα ως κοινούς συλλέκτες:

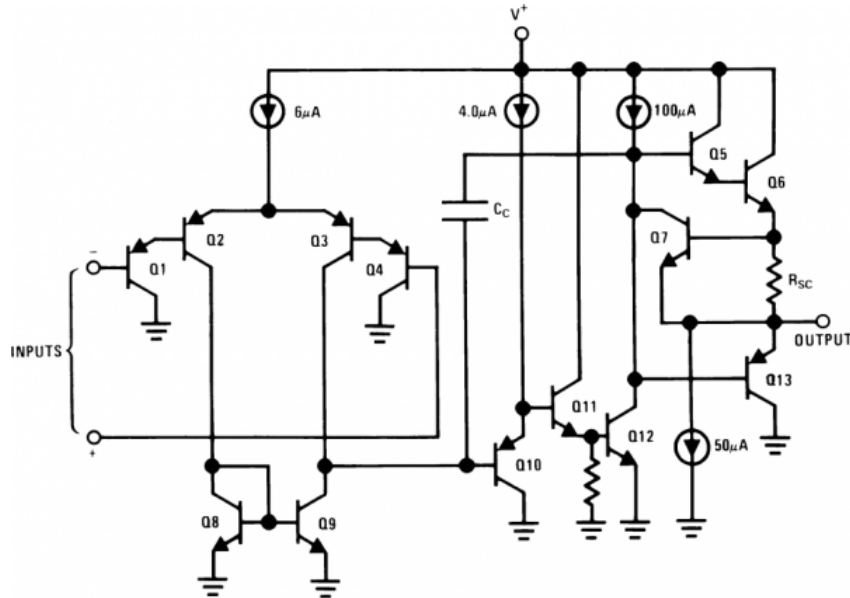
Ο ενισχυτής push-pull δεν ενισχύει την τάση (η τάση εξόδου θα είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτήν εντός), αλλά ενισχύει το ρεύμα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε διπολικά κυκλώματα (αυτά με θετικές και αρνητικές τροφοδοσίες) επειδή μπορεί τόσο να "σπρώξει" ρεύμα στο φορτίο από τη θετική παροχή και να "τραβήξει" ρεύμα προς τα έξω και να το βυθίσει στην αρνητική παροχή.

Εάν έχετε διπολική παροχή (ή ακόμα και αν δεν έχετε), το push-pull είναι ένα εξαιρετικό τελικό στάδιο σε έναν ενισχυτή, που λειτουργεί ως buffer για το φορτίο.



### 11.3 Η τοποθέτησή τους μαζί (Ένας Λειτουργικός Ενισχυτής)

Ας δούμε ένα κλασικό παράδειγμα ενός κυκλώματος τρανζίστορ πολλαπλών σταδίων: έναν ενισχυτή Op. Η ικανότητα αναγνώρισης κοινών κυκλωμάτων τρανζίστορ και η κατανόηση του σκοπού τους μπορεί να σας βοηθήσει πολύ! Εδώ είναι το κύκλωμα μέσα σε ένα LM3558, ένα απλό op-amp:



*Τα εσωτερικά ενός λειτουργικού ενισχυτή LM358. Αναγνωρίζετε κάποιους ενισχυτές;*

Υπάρχει σίγουρα περισσότερη πολυπλοκότητα εδώ από ό,τι μπορεί να είστε έτοιμοι να αφομοιώσετε. Ωστόσο, μπορεί να δείτε μερικές γνωστές τοπολογίες:

- Τα Q1, Q2, Q3 και Q4 αποτελούν το στάδιο εισόδου. Μοιάζει πολύ με κοινό συλλέκτη (Q1 και Q4) σε διαφορικό ενισχυτή, σωστά; Απλώς φαίνεται ανάποδα επειδή χρησιμοποιεί PNP. Αυτά τα τρανζίστορ βοηθούν στο σχηματισμό του διαφορικού σταδίου εισόδου του ενισχυτή.
- Τα Q11 και Q12 αποτελούν μέρος του δεύτερου σταδίου. Ο Q11 είναι ένας κοινός συλλέκτης και ο Q12 είναι ένας κοινός πομπός. Αυτό το ζεύγος τρανζίστορ θα αποθηκεύσει το σήμα από τον συλλέκτη του Q3 και θα παρέχει υψηλό κέρδος καθώς το σήμα πηγαίνει στο τελικό στάδιο.
- Το Q6 και το Q13 είναι μέρος του τελικού σταδίου και θα πρέπει να φαίνονται οικεία (ειδικά αν αγνοήσετε το RSC) -- είναι ένα push-pull! Αυτό το στάδιο απομονώνει την έξοδο, επιτρέποντάς του να οδηγεί μεγαλύτερα φορτία.
- Υπάρχουν διάφορες άλλες κοινές διαμορφώσεις εκεί για τις οποίες δεν έχουμε μιλήσει. Τα Q8 και Q9 έχουν διαμορφωθεί ως κάτοπτρο ρεύματος, το οποίο απλώς αντιγράφει την ποσότητα του ρεύματος που διέρχεται από το ένα τρανζίστορ στο άλλο.

Μετά από αυτή τη συντριβή στα τρανζίστορ, δεν θα περιμέναμε να καταλάβετε τι συμβαίνει σε αυτό το κύκλωμα, αλλά αν μπορείτε να αρχίσετε να αναγνωρίζετε κοινά κυκλώματα τρανζίστορ, είστε στο σωστό δρόμο!