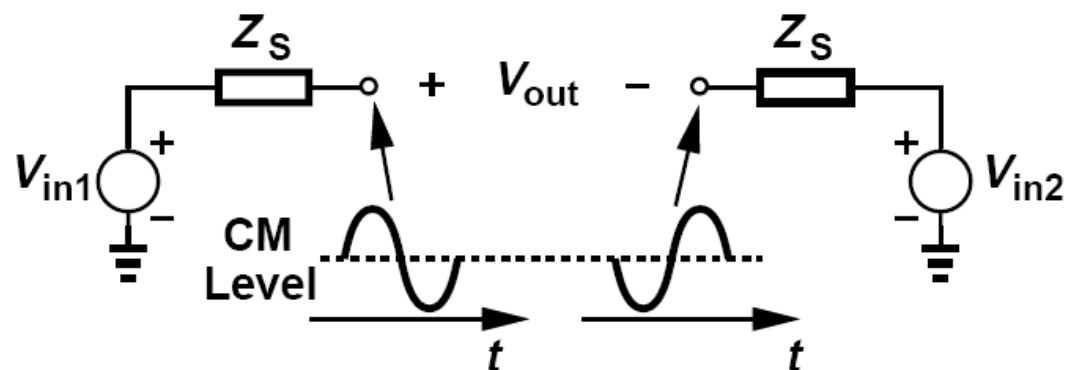
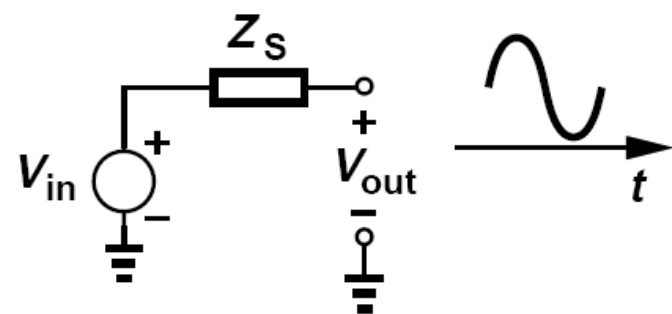


# Απλή & Διαφορική Λειτουργία

## Απλή (μονή) λειτουργία :

Το σήμα (π.χ. τάσης) μετράται σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς (συνήθως τη γείωση)

**Διαφορική λειτουργία:** το σήμα (π.χ. τάσης) ορίζεται ως η διαφορά (δυναμικού) μεταξύ δύο κόμβων που έχουν αριθμητικά ίσες αλλά αντίθετες ( $180^\circ$ ) μεταβολές από μία κοινή (common mode) τάση (ή ρεύματος, αντίστοιχα)

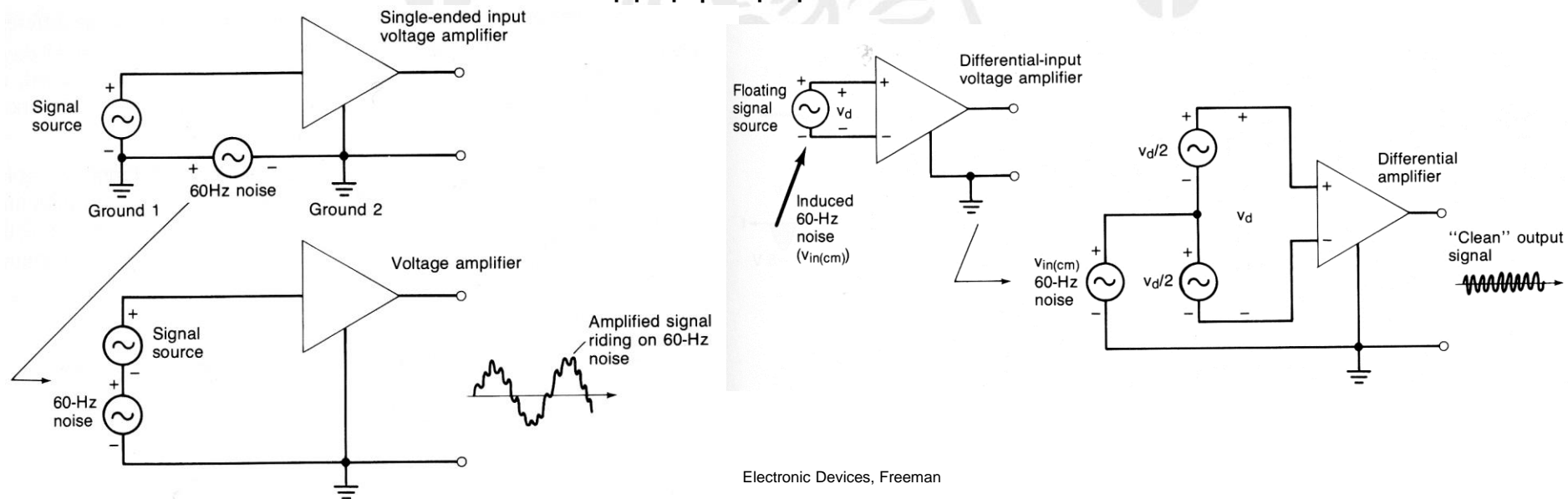


# Χρησιμότητα διαφορικής λειτουργίας ?

- Θυμηθείτε: Ο θόρυβος (ή παρεμβολή) εμφανίζεται ως σήμα κοινού τρόπου.
- Υποθέστε ότι έχουμε δύο αγωγούς που μεταφέρουν ένα ασθενές διαφορικό σήμα, με τη μορφή διαφορικής τάσης  $\Delta v$ , μεταξύ των δύο αγωγών. Υποθέστε επίσης ότι υπάρχει σήμα παρεμβολής (θόρυβος), με μέσο πλάτος  $V_N \gg \Delta v$ . Τι θα συμβεί?
  - Το σήμα μου θα «εξαφανιστεί» μέσα στον θόρυβο. Τι κάνω?

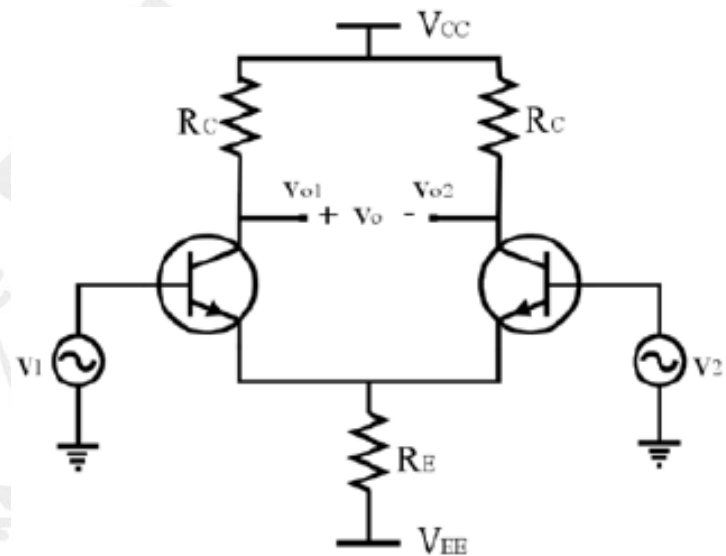
Αφού η παρεμβολή θα είναι κοινή και στους δύο αγωγούς, χρειαζόμαστε μια τοπολογία που θα «αναδεικνύει» και (αν είναι δυνατόν) να ενισχύει τη **διαφορά** των σημάτων των δύο αγωγών  
 → θα αναδεικνύει και θα ενισχύει το «ωφέλιμο» σήμα

## Απόρριψη θορύβου δικτύου 60Hz



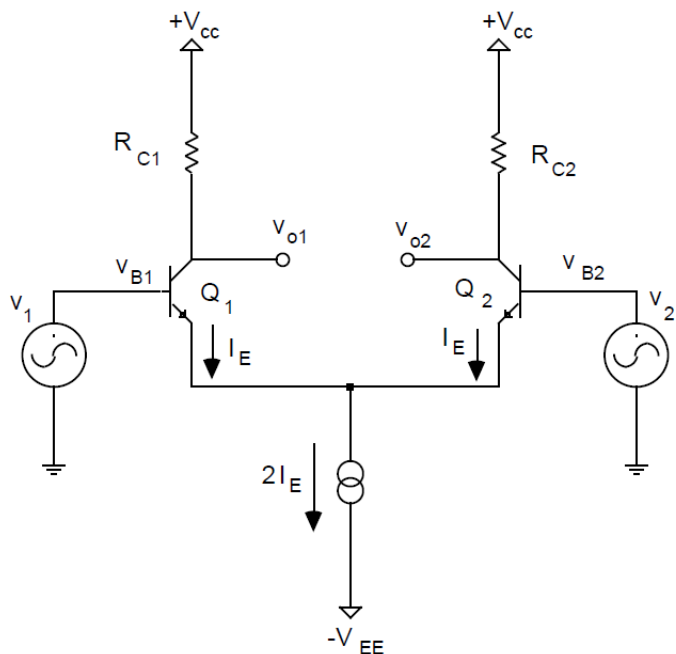
# Διαφορικός ενισχυτής

- Διαφορικός ενισχυτής τάσης: Σύνθετος ενισχυτής CE-CE με κοινή αντίσταση εκπομπού
- Συναντάται *σχεδόν* σε όλες τις βαθμίδες εισόδου
- Πλεονεκτήματα
  - Υψηλή διαφορική ενίσχυση
  - Απόρριψη σημάτων κοινού τρόπου
  - Δυνατότητα διαφορικής εξόδου
  - Ενίσχυση DC
  - Μεγάλη αντίσταση εισόδου
  - Αποφυγή πυκνωτή  $C_E$
  - Κατάλληλο για υλοποίηση IC
- *Απαιτείται* χρήση ταιριασμένων τρανζίστορ και αντιστάσεων
- Συμμετρική τροφοδοσία  $\rightarrow$  δυνατότητα  $V_B \sim 0 \rightarrow$  αποφυγή αντιστάσεων πόλωσης βάσεων  $\rightarrow$  αύξηση αντίστασης εισόδου  $\rightarrow$  δυνατότητα σύνδεσης πηγής εισόδου χωρίς πυκνωτή  $\rightarrow$  ενίσχυση και DC

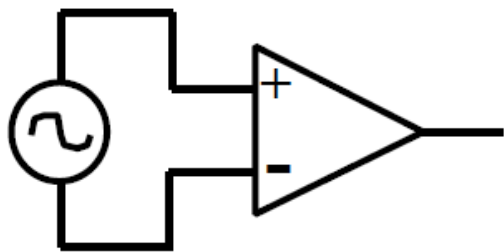


Σχ.4.14 - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριταντής Γ.

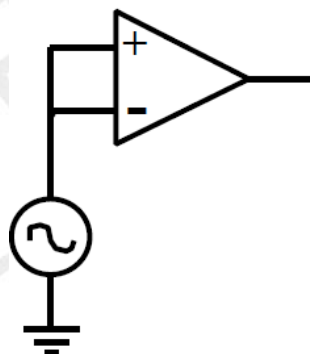
# Τρόποι λειτουργίας διαφορικού ενισχυτή



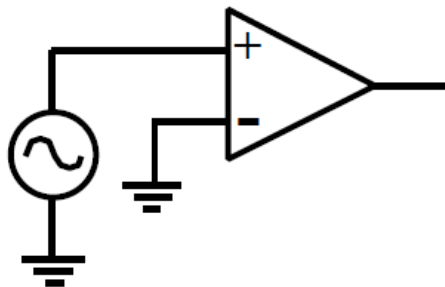
Differential Mode



Common Mode



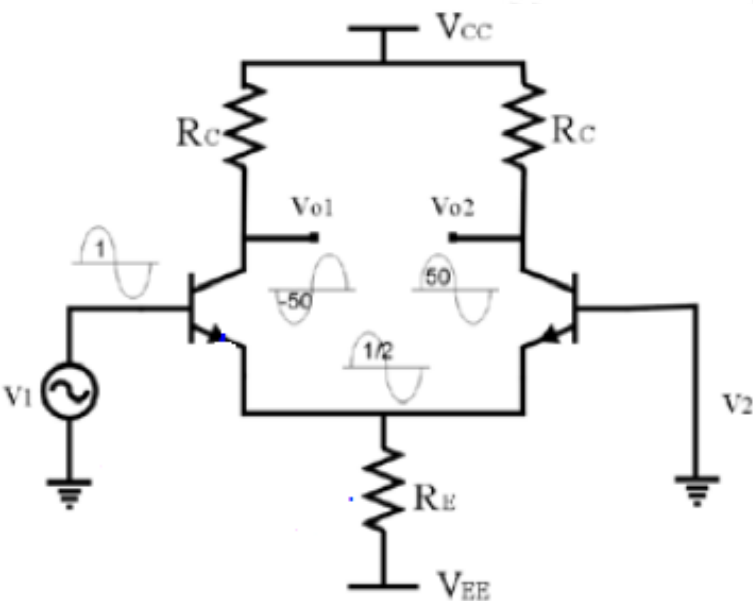
Single-Ended Mode



- Η ανάλυση του  $\Delta E$  είναι ιδιαίτερα σύνθετη.
- Κατανοούμε την λειτουργία του αν αναλύσουμε τις χαρακτηριστικές περιπτώσεις των σημάτων εισόδου
  - ✓  $v_1 = -v_2$  **Διαφορική είσοδος**
  - ✓  $v_1 = v_2$  **Είσοδος κοινού τρόπου**
  - ✓  $v_1 \neq 0, v_2 = 0$  **Μονής εισόδου**

# Λειτουργία ΔΕ με διπλή είσοδο

- ✓ Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να κατανοηθεί η λειτουργία με διπλή είσοδο διότι εδώ επιτελείται η απόρριψη του θορύβου και οποιουδήποτε συλλεγόμενου θορύβου από το περιβάλλον, που εμφανίζονται ως σήματα κοινού τρόπου
- ✓ Χρήση υπέρθεσης (με λειτουργία του ενισχυτή στη γραμμική του περιοχή): Αρχικά θεωρούμε: σήμα στην είσοδο 1 και γειωμένη η είσοδος 2.
- ✓ Το σήμα από την είσοδο 1 εμφανίζεται ενισχυμένο (εδώ κατά 50) και ανεστραμμένο στην έξοδο 1.

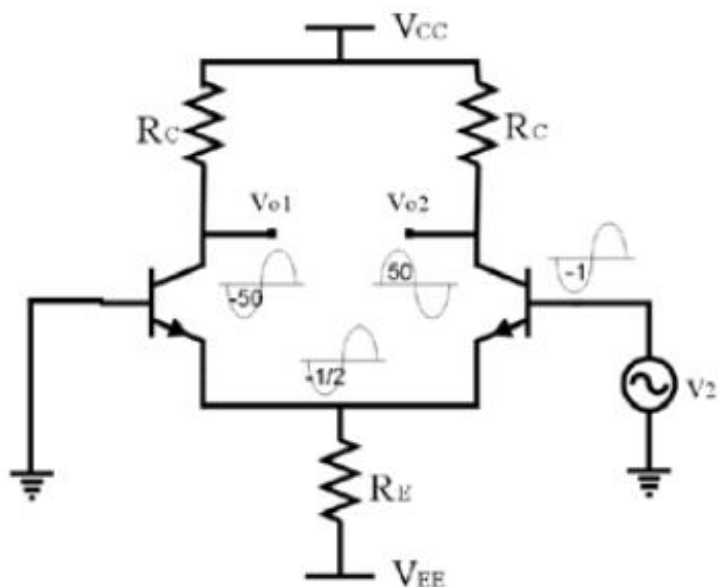


Σχ.4.15α - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

- ✓ Το σήμα εισόδου προκαλεί επίσης μεταβολή του ρεύματος εκπομπού κατά  $\Delta I_{E1} = i_{e1}$  και εμφανίζεται με στάθμη  $v_{e1}$  στον εκπομπού ΣΥΜΦΑΣΙΚΟ με  $v_1$
- ✓ Το θετικό τμήμα της  $v_e$  πολώνει τον Ε2 θετικότερα από την Β2  $\rightarrow$  μεταβολή  $i_{e2} = -i_{e1}$
- ✓ Το ίδιο θα συνέβαινε αν  $V_E=0$  και  $V_{B2}$  αρνητικότερη
- ✓ Λόγω αντίθετης πολικότητας ρευμάτων εκπομπών, στο συλλέκτη 2 εμφανίζεται σήμα ίδιου μεγέθους και αντίθετης φάσης  $v_{o2} = -v_{o1}$

**Αποτέλεσμα: Εφαρμογή απλού σήματος εισόδου  $\rightarrow$  διαφορικό σήμα εξόδου**

# Λειτουργία ΔΕ με διπλή είσοδο (συν.)

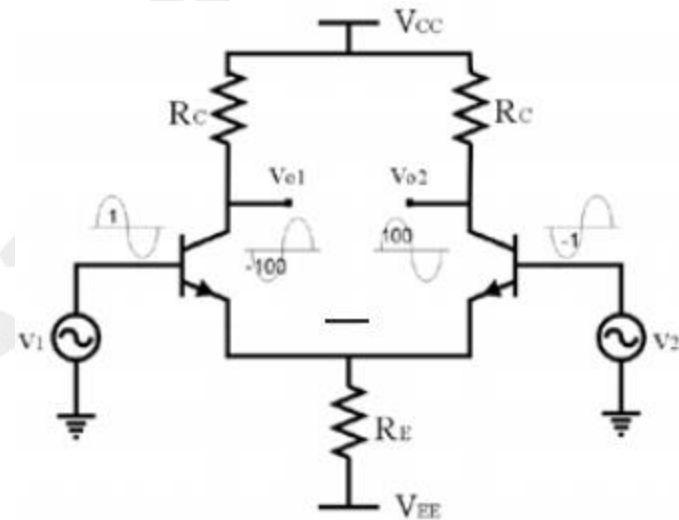


Σχ.4.15β - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριταντής Γ.

- ✓ Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία με την προηγούμενη περίπτωση, γειώνουμε την είσοδο 1 και εφαρμόζουμε το σήμα (με διαφορά φάσης  $180^\circ$ ) στη δεύτερη είσοδο
- ✓ Τα σήματα στις εξόδους (συλλέκτες) θα εμφανίζονται με την ίδια στάθμη και φάση με την προηγούμενη περίπτωση
- ✓ Στους κοινούς εκπομπούς το σήμα θα είναι ίδιας στάθμης με την προηγούμενη περίπτωση και ίδιας φάσης με το  $v_2$  (άρα με αντίθετη φάση σε σχέση με πριν)

# Λειτουργία ΔΕ με διπλή είσοδο (συν.)

- ✓ Συνδυάζοντας τα προηγούμενα συμπεράσματα, μπορούμε να καταλήξουμε στο τι θα συμβεί αν εφαρμόσουμε ταυτόχρονα ένα διαφορικό ζεύγος σημάτων  $v_1$  &  $v_2$  στις αντίστοιχες εισόδους (φυσικά  $v_2 = -v_1$ )
- ✓ Με χρήση υπέρθεσης, συμπεραίνουμε ότι στους κόμβους του κυκλώματος, οι τάσεις ισούνται με το άθροισμα των τάσεων, πού είχαμε στις περιπτώσεις, όπου το κάθε σήμα εισόδου εφαρμοζόταν μόνο του
- ✓ Άρα τα σήματα στους συλλέκτες (ΕΞΟΔΟΣ) διπλασιάζονται ενώ το σήμα στους εκπομπούς (κοινός κόμβος) μηδενίζεται  $\rightarrow$  (virtual ground)
- ✓ Εύκολα καταλήγουμε, ότι για **σήματα κοινού τρόπου** ( $v_2 = v_1$ ) οι συλλέκτες εμφανίζουν **μηδενικό σήμα εξόδου**. Αυτό σημαίνει ότι ο ΔΕ τα απορρίπτει. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται **απόρριψη σημάτων κοινού τρόπου** και είναι πραγματοποιήσιμη μόνο στους ΔΕ.



Σχ.4.15γ - Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

# Ανάλυση dc Διαφορικού Ενισχυτή

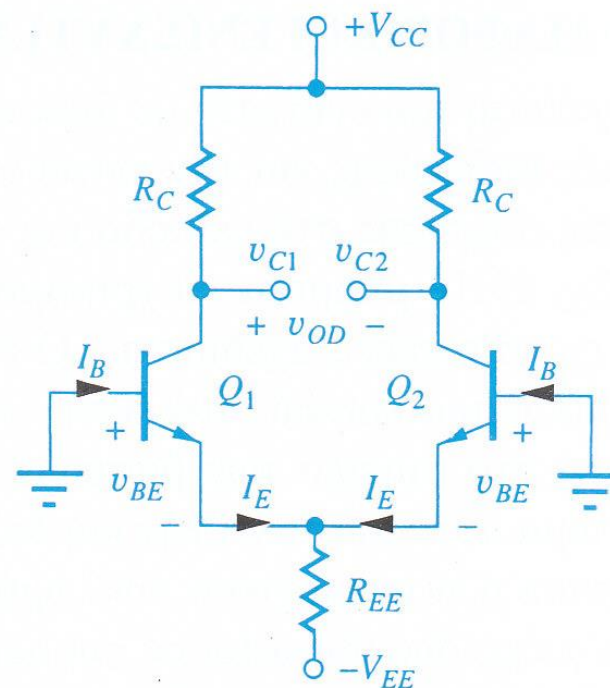
$$V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE}$$

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C$$

$$I_{E1} = I_{E2} = I_E$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$I_{B1} = I_{B2} = I_B$$



# Ανάλυση dc Διαφορικού Ενισχυτή

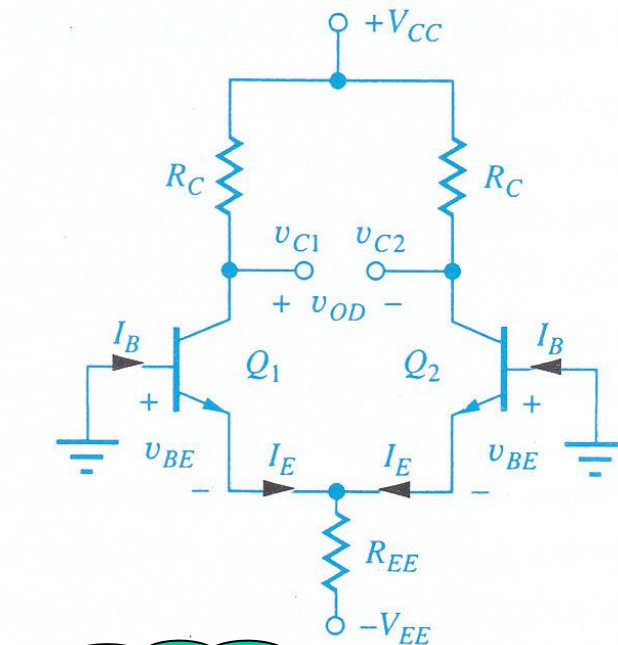
$$V_{BE} + 2I_E R_{EE} - V_{EE} = 0$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{2R_{EE}} \quad I_C = \alpha_F I_E \quad I_B = \frac{I_C}{\beta_F}$$

$$V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - I_C R_C$$

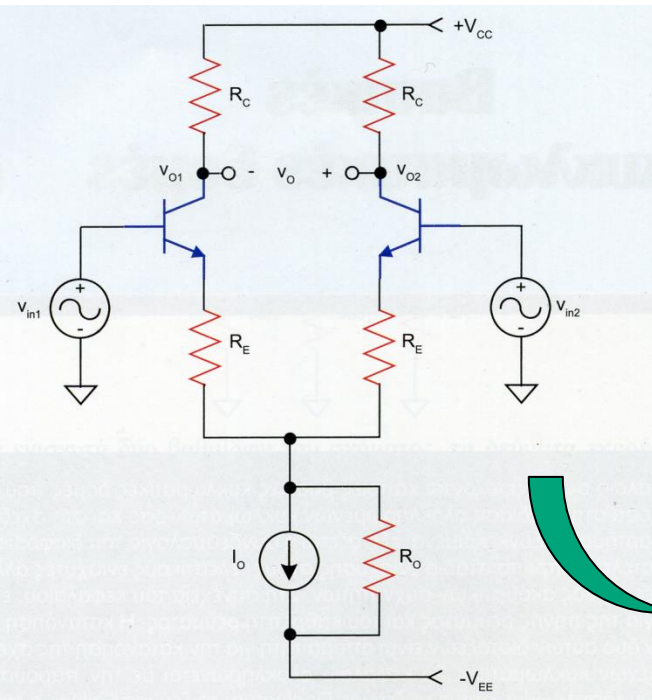
$$V_{CE1} = V_{CE2}$$

$$V_{OD} = V_{C1} - V_{C2} = 0V$$

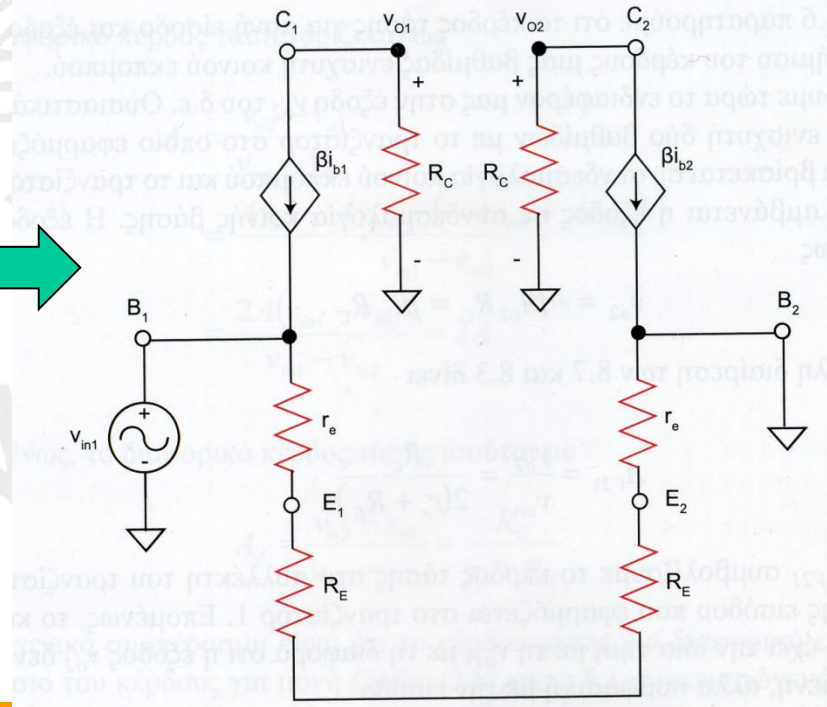
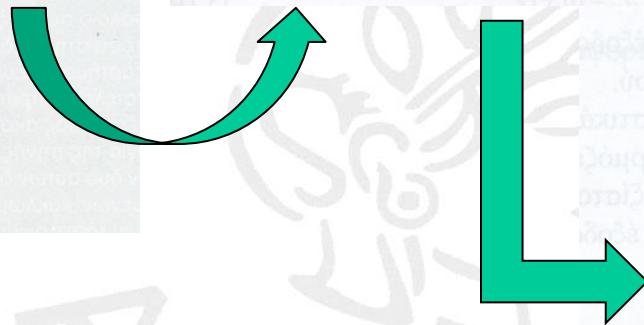
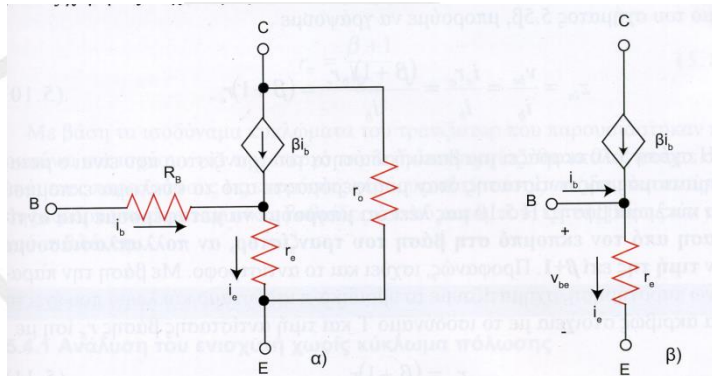


Ιδανικά....

# Ανάλυση ας Διαφορικού Ενισχυτή



Χρήση T-ισοδύναμου



# Ανάλυση ac Διαφορικού Ενισχυτή

μονή είσοδος  
-  
Μονή έξοδος ( $v_{o2}, v_{o1}$ )

$v_2 = 0$

Προσδιορισμός τάσεων εξόδου

$$v_{in1} = i_{e1}(r_e + R_E) - i_{e2}(r_e + R_E) = 2i_{e1}(r_e + R_E)$$

$$i_{e1} = -i_{e2}$$

$$v_{o1} = -\beta i_{b1} R_C$$



Κέρδος τάσης στην έξοδο 1 (για μονή είσοδο)

$$A_{V11} = \frac{v_{o1}}{v_{in1}} = -\frac{\beta i_{b1} R_C}{2(\beta + 1) i_{b1} (r_e + R_E)}$$

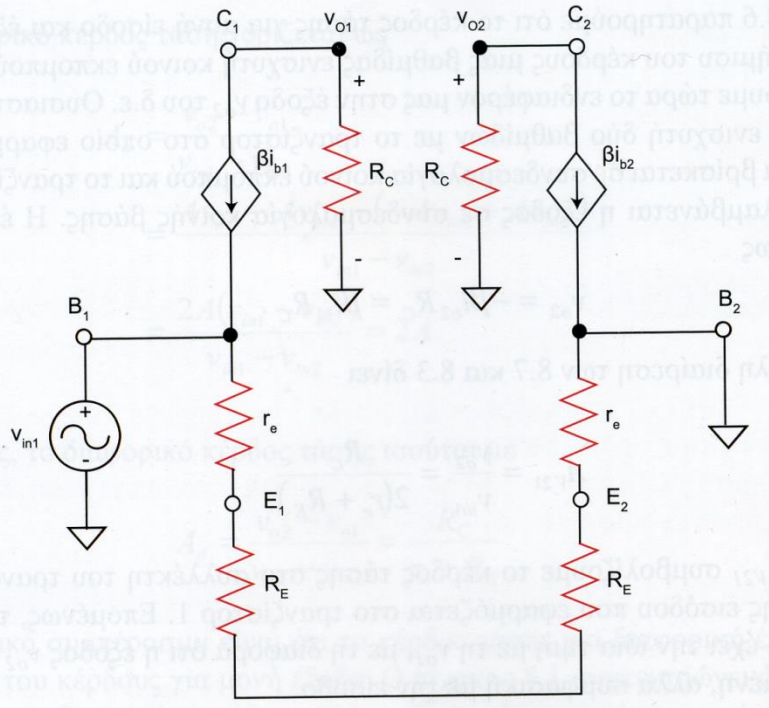
$|\beta| \gg 1$

$$A_{V11} = \frac{v_{o1}}{v_{in1}} = -\frac{R_C}{2(r_e + R_E)}$$

Κέρδος τάσης στην έξοδο 2 (για μονή είσοδο)

$$v_{o2} = -\beta i_{b2} R_C = \beta i_{b1} R_C$$

$$A_{V21} = \frac{v_{o2}}{v_{in1}} = \frac{R_C}{2(r_e + R_E)}$$



Αρα, το κέρδος τάσης για την έξοδο 2 έχει την ΙΔΙΑ ΤΙΜΗ με την έξοδο 1 αλλά με αντίθετο πρόσημο

# Ανάλυση ac Διαφορικού Ενισχυτή

Μονή εισόδος  
-  
Διαφορική έξοδος ( $v_{o2} - v_{o1}$ )

$v_2 = 0$

Προσδιορισμός τάσεων εξόδου

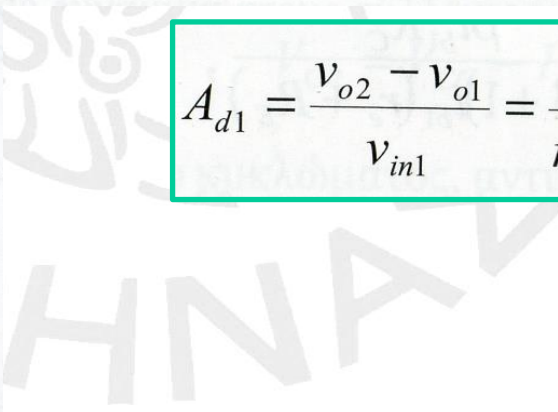
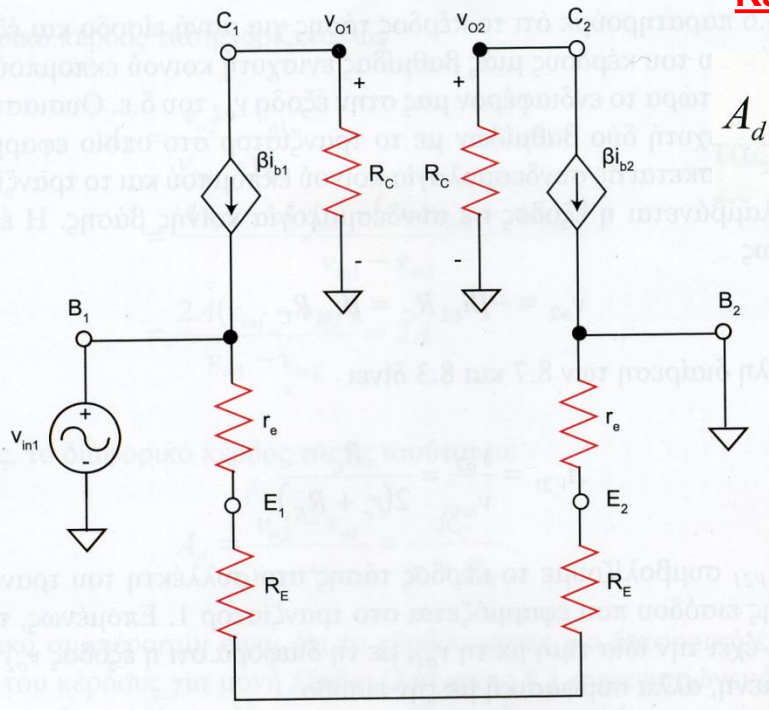
$$v_{o1} = -Av_{in1}, \quad v_{o2} = Av_{in1}$$

$A$  : κέρδος τάσης μονής εισόδου-μονής εξόδου

Κέρδος τάσης για διαφορική έξοδο (σε μονή είσοδο)

$$A_{d1} = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{in1}} = \frac{Av_{in1} - (-Av_{in1})}{v_{in1}} = \frac{2Av_{in1}}{v_{in1}} = 2A$$

$$A_{d1} = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{in1}} = \frac{R_C}{r_e + R_E}$$



# Ανάλυση ας Διαφορικού Ενισχυτή

Διαφορική είσοδος ( $v_{i1} = -v_{i2}$ )

Διαφορική έξοδος ( $v_{o2} - v_{o1}$ )

Προσδιορισμός τάσεων εξόδου

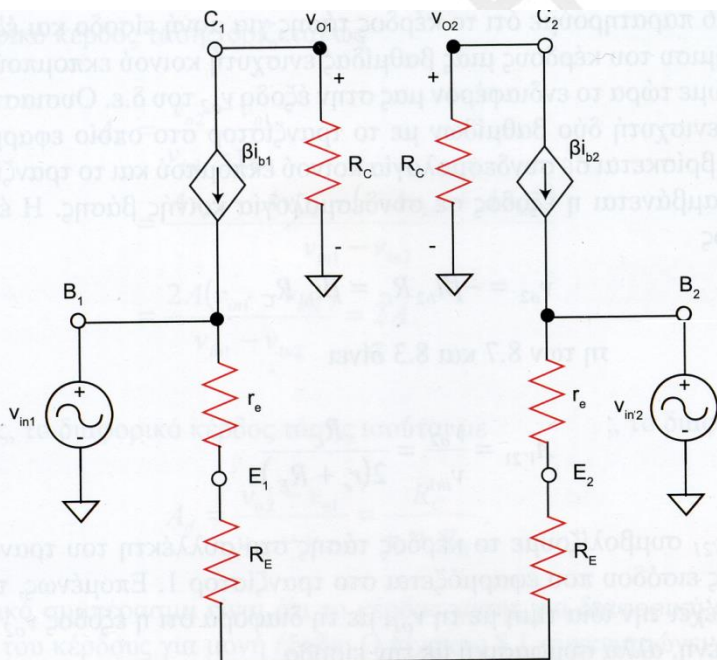
$$v_{o1} = -Av_{in1} + Av_{in2}$$

$$v_{o2} = Av_{in1} - Av_{in2}$$

Κέρδος τάσης για διαφορική έξοδο (σε διαφορική είσοδο)

$$\begin{aligned} A_d &= \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{in1} - v_{in2}} \\ &= \frac{Av_{in1} - Av_{in2} - (-Av_{in1} + Av_{in2})}{v_{in1} - v_{in2}} \\ &= \frac{2A(v_{in1} - v_{in2})}{v_{in1} - v_{in2}} = 2A \end{aligned}$$

$$A_d = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{in1} - v_{in2}} = \frac{R_C}{r_e + R_E}$$



# Συμμάζεμα ...

Είσοδος	Έξοδος	$v_{in}$	$v_o$	Κέρδος τάσης
μονή	μονή	$v_{in1}$ ή $v_{in2}$	$v_{o1}$ ή $v_{o2}$	$\frac{R_C}{2(r_e + R_E)}$
διαφορική	μονή	$v_{in1} - v_{in2}$	$v_{o1}$ ή $v_{o2}$	$\frac{R_C}{2(r_e + R_E)}$
μονή	διαφορική	$v_{in1}$ ή $v_{in2}$	$v_{o2} - v_{o1}$	$\frac{-R_C}{r_e + R_E}$
διαφορική	διαφορική	$v_{in1} - v_{in2}$	$v_{o2} - v_{o1}$	$\frac{R_C}{r_e + R_E}$

ΑΘΗΝΑΣ

# Αντιστάσεις I/O

## Αντίσταση εισόδου

Η αντίσταση εισόδου (είτε στην αναστρέφουσα είτε στην μη αναστρέφουσα είσοδο) μπορεί να βρεθεί με χρήση των σχέσεων ενισχυτή CE με RE (χωρίς πυκνωτή παράκαμψης). Συμβολίζοντας με  $r_E$  την ac αντίσταση εκπομπού, έχουμε (για μονή είσοδο) :

$$z_{in} = \frac{v_{in1}}{i_{in1}} = \frac{2i_{e1}(r_e + R_E)}{i_{b1}} = \frac{2(\beta + 1)i_{b1}(r_e + R_E)}{i_{b1}}$$

$$z_{in} = 2(\beta + 1)(r_e + R_E)$$

Ενώ για διαφορική είσοδο

$$z_{in} = \frac{v_{in1} - v_{in2}}{i_{in1} - i_{in2}} = \frac{2i_{e1}(r_e + R_E) - 2i_{e2}(r_e + R_E)}{i_{b1} - i_{b2}} = \frac{4(\beta + 1)i_{b1}(r_e + R_E)}{2i_{b1}} =$$

$$2(\beta + 1)(r_e + R_E)$$

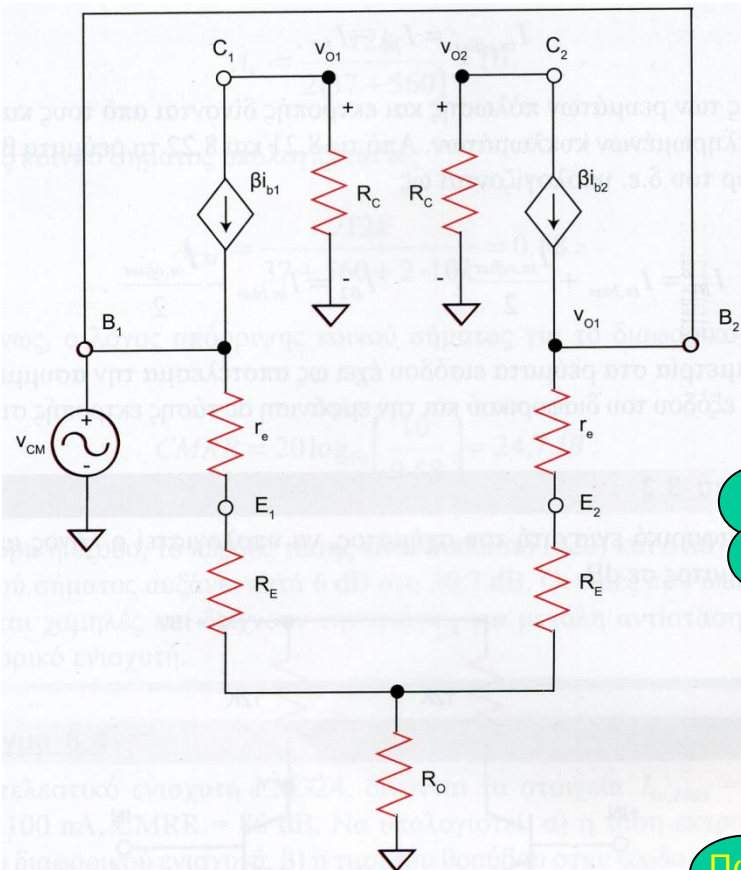
## Αντίσταση εξόδου

Με χρήση του ac ισοδύναμου μοντέλου (a) και θέτοντας τις εισόδους ίσες με 0 (b), μπορούμε να βρούμε την αντίσταση εξόδου. Για εισόδους ίσες με 0  $\rightarrow$  πηγές ρεύματος ίσες με 0 (ανοιχτοκυκλώμα). Συνεπώς, η αντίσταση εξόδου, πολύ απλά είναι για διαφορική και μονή έξοδο, αντίστοιχα

$$R_{out} = 2R_C$$

$$R_{out} = R_C$$

# Λόγος απόρριψης κοινού τρόπου



$$v_{CM} = (\beta + 1)i_b(r_e + R_E) + 2(\beta + 1)i_b R_o$$

$$v_{o2} = \beta i_b R_C$$

$$A_{CM} = \frac{v_{o2}}{v_{CM}} = \frac{R_C}{r_e + R_E + 2R_o}$$

Πως γίνεται να ελαχιστοποιήσω το κέρδος κοινού τρόπου?

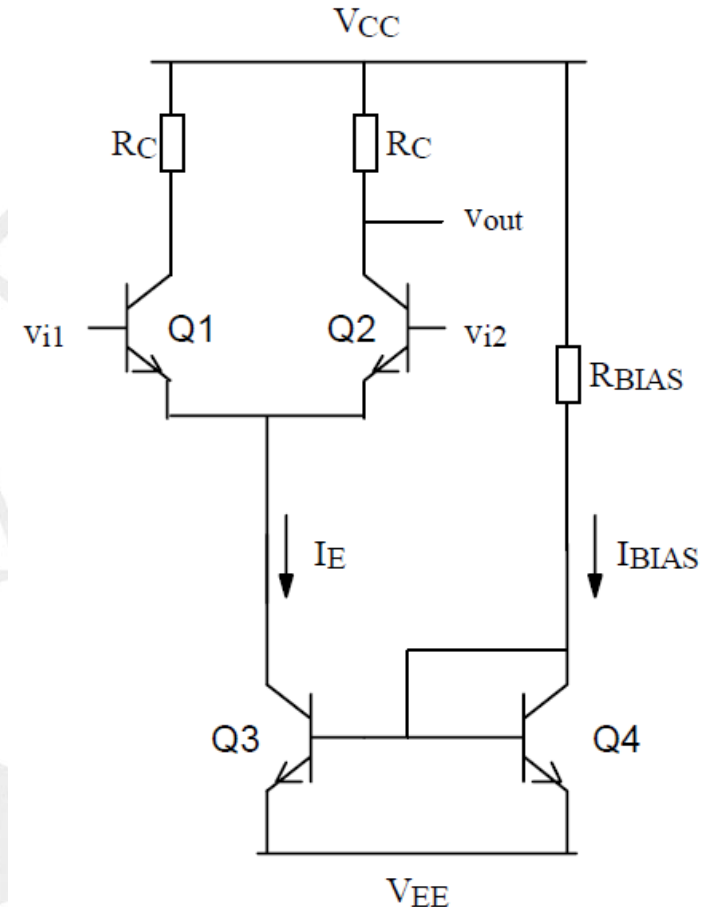
Πως γίνεται να μεγιστοποιήσω το CMRR?

$$CMRR = 20 \log_{10} \frac{A_V}{A_{CM}}$$

# Βελτιώσεις (I)

- Q1, Q2 είναι το διαφορικό ζεύγος
- Το Q4 και η  $R_{BIAS}$  καθορίζουν το ρεύμα  $I_{BIAS}$ 

$$I_{BIAS} = (V_{CC} - V_{EE} - 0.7) / R_{BIAS}$$
- Το Q3 και το Q4 δημιουργούν καθρέπτη ρεύματος
 
$$I_E = I_{BIAS}.$$
- Σε ηρεμία, τα ρεύματα των συλλεκτών Q1, Q2
 
$$I_{C1} = I_{C2} = I_{BIAS} / 2$$
- Αντιστοίχως για τις τάσεις συλλεκτών
 
$$V_{C1} = V_{C2} = V_{out}.$$
- Για διαφορική έξοδο
 
$$V_{C2} - V_{C1} = 0$$
- Για μονή έξοδο
 
$$-I_{C2}R_C = V_{CE2} + V_{CE3} = V_{CC} = -V_{EE}, \rightarrow V_{out} = 0V$$
- Η ισοδύναμη  $R_E$  είναι η αντίσταση εξόδου του Q3 ( $r_{o3}$ ).  
Θυμηθείτε ότι  $CMRR = g_m R_E$ , με ενεργό φορτίο όμως θα γίνει
 
$$CMRR = g_m r_{o3} = \frac{I_C}{V_T} \frac{V_A}{I_E}$$
- Άρα, για ιδανικό Q3,  $V_A \rightarrow \infty$  ή αλλιώς έχω, την  $r_{o3}$  να λαμβάνει μεγάλες τιμές (**ΕΠΙΘΥΜΗΤΟ**)



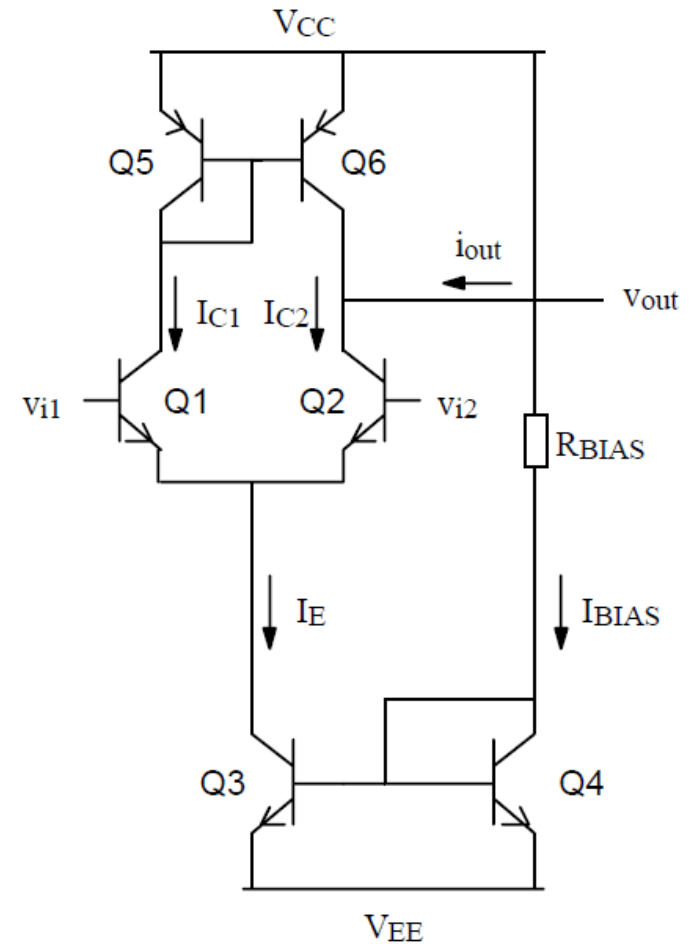
D.R.S Cumming, University of Glasgow

## Βελτιώσεις (II)

- Σε ηρεμία, τα ρεύματα συλλεκτών είναι τα ίδια

$$I_{C1} = I_{C2} = I_E/2.$$

- Η εφαρμογή διαφορικής τάσης  $v_{diff}$  μια μεταβολή  $\Delta I$  στο  $I_{C1}$  και  $-\Delta I$  στο  $I_{C2}$  (ή αντίστροφα).
- Επειδή όμως ο καθρέπτης ρεύματος Q5-Q6 έχει υψηλή  $R_o$  (η οποία στην ουσία είναι η  $R_c$  του τρανζίστορ εξόδου)
- Θυμηθείτε για την απολαβή τάσης μονής εξόδου, θέλω είτε να ελαχιστοποιήσω τον παρονομαστή ( $R_E$ ) είτε να μεγιστοποιήσω τον αριθμητή ( $R_C$ ).
- Έχω αυξημένες τιμές της  $R_E$  (όπως είδαμε πριν) για να έχω αυξημένο CMMR, αρα
- Χρειάζομαι και μεγάλες τιμές  $R_C$  για να διατηρήσω την απολαβή τάσης σε υψηλές τιμές  $\rightarrow$  Το έχω με Q5-Q6



# Στην πράξη... (ατέλειες)

## Τάση εκτροπής εισόδου

Τάση εξόδου  $\neq 0$  με εισόδους 0

Οφείλεται σε ασυμμετρίες είτε αντιστάσεων συλλεκτών είτε μη ταιριάσματος τρανζίστορ (διαφορετικά εμβαδά επαφής B-E)

### Ασυμμετρία αντιστάσεων

$$|V_{os}| = V_T \left( \frac{\Delta R_C}{R_C} \right)$$

### Ασυμμετρία εμβαδών

$$|V_{os}| = V_T \left( \frac{\Delta I_S}{I_S} \right)$$

### Συνολικά

$$V_{os} = \sqrt{\left( V_T \frac{\Delta R_C}{R_C} \right)^2 + \left( V_T \frac{\Delta I_S}{I_S} \right)^2}$$

$$= V_T \sqrt{\left( \frac{\Delta R_C}{R_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta I_S}{I_S} \right)^2}$$

## Ρεύματα πόλωσης και εκτροπής εισόδου

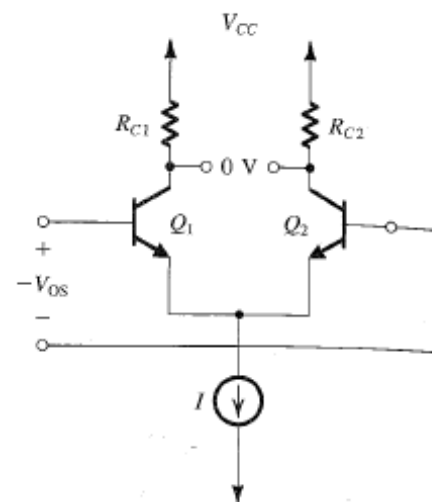
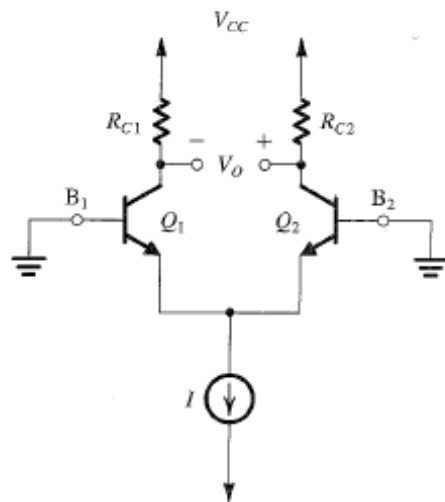
Ιδανικά  $I_{B1} = I_{B2}$ , όμως στην πράξη  $\beta_1 \neq \beta_2$

Ρεύμα πόλωσης εισόδου  $I_{in,bias} = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$

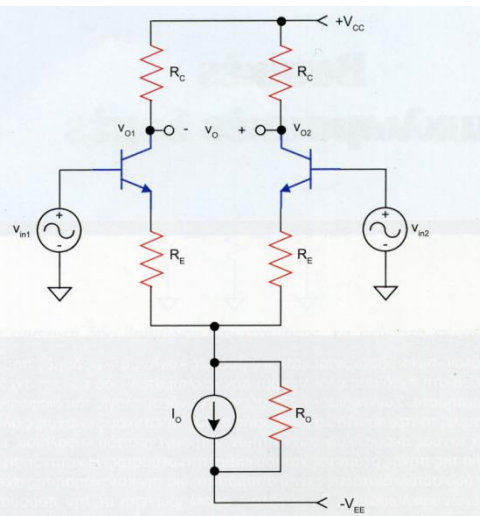
Ρεύμα εκτροπής εισόδου  $I_{in,offset} = I_{B1} - I_{B2} = I_B \left( \frac{\Delta \beta}{\beta} \right)$

$$I_{B1} = I_{in,bias} + \frac{I_{in,offset}}{2}$$

$$I_{B2} = I_{in,bias} - \frac{I_{in,offset}}{2}$$



# Ανάλυση για σήμα μεγάλου πλάτους



$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$R_E = 0,$$

$$v_{IN1} - v_{BE1} + v_{BE2} - v_{IN2} = 0$$

$$v_d - V_T \ln \frac{i_{C1}}{I_{S1}} + V_T \ln \frac{i_{C2}}{I_{S1}} = 0$$

$$v_d = v_{BE1} - v_{BE2}$$

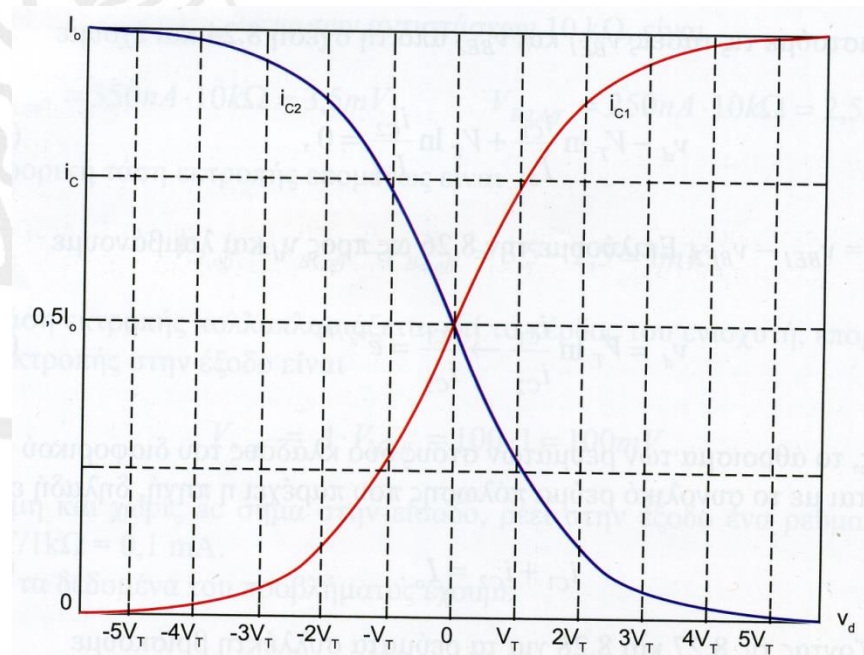
$$v_d = V_T \ln \frac{i_{C1}}{i_{C2}} \rightarrow \frac{i_{C1}}{i_{C2}} = e^{v_d/V_T}$$

Πρέπει όμως να ισχύει σε κάθε χρονική στιγμή

$$i_{C1} + i_{C2} = I_o$$

$$i_{C1} = \frac{I_o}{1 + e^{-v_d/V_T}}$$

$$i_{C2} = \frac{I_o}{1 + e^{v_d/V_T}}$$



# Ανάλυση για σήμα μεγάλου πλάτους (II)

$$v_{o1} = V_{CC} - i_{C1}R_C$$

$$v_{o2} = V_{CC} - i_{C2}R_C$$

$$v_o = v_{o2} - v_{o1}$$

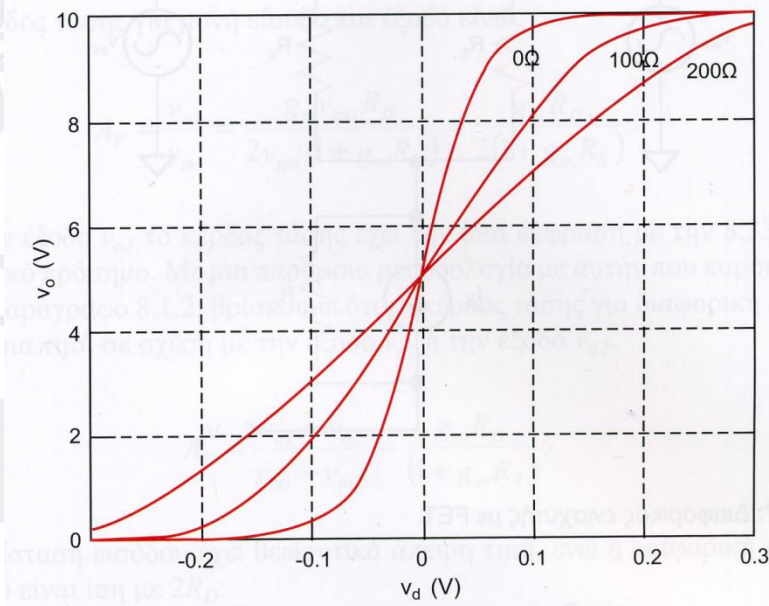
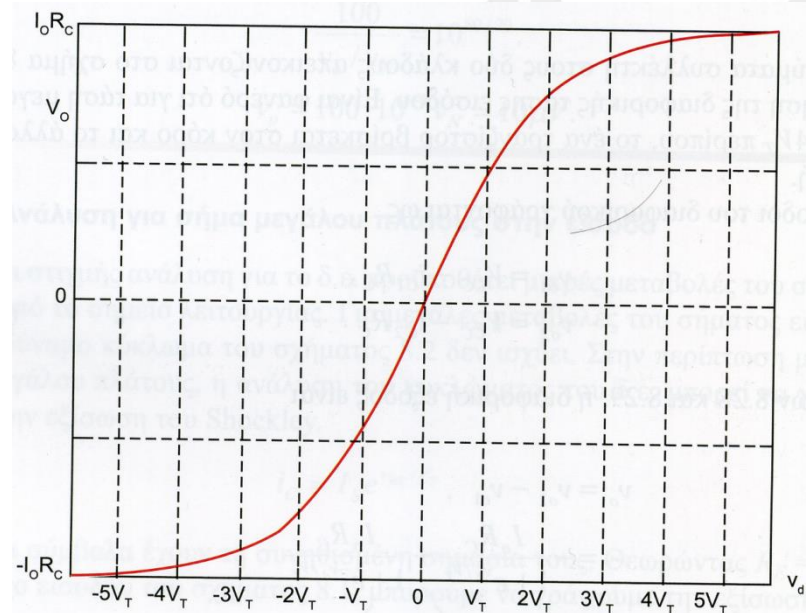
$$= -\frac{I_o R_C}{1 + e^{v_d/V_T}} + \frac{I_o R_C}{1 + e^{-v_d/V_T}}$$

Αρα, η σχέση εισόδου-εξόδου παραμένει σχεδόν γραμμική για περιοχή

$$-2V_T < v_d < 2V_T$$

$$-52\text{mV} < v_d < 52\text{mV}$$

Αύξηση εύρους  $\rightarrow$  εισαγωγή αντιστάσεων εκπομπού



$$-300\text{mV} < v_d < 300\text{mV}$$