

6.29

Δίνεται ο απλός καθρέπτης ρεύματος διπολικών στοιχείων του Σχ. 6.8 για την περίπτωση που τα Q_1 και Q_2 είναι πανομοιότυπα και έχουν $I_S = 10^{-15} A$.

(α) Υποθέτοντας ότι η παράμετρος β των τρανζίστορ είναι πού υψηλή, βρείτε το εύρος τιμών των V_{BE} και I_O που αντιστοιχούν σε αύξηση του I_{REF} από $10 \mu A$ σε $10 mA$. Υποθέστε ότι το Q_2 παραμένει στην ενεργή κατάσταση και αγνοήστε το φαινόμενο Early.

(β) Βρείτε το εύρος του I_O που αντιστοιχεί σε εύρος τιμών του I_{REF} από $10 \mu A$ έως $10 mA$, συνυπολογίζοντας το πεπερασμένο β . Υποθέστε ότι το β παραμένει σταθερό σε τιμή 100 για ένα εύρος τιμών ρεύματος $0,1 mA$ έως $5 mA$, αλλά ότι σε ρεύμα $I_C \cong 10 mA$, το $\beta=70$. Καθορίστε το I_O που αντιστοιχεί σε $I_{REF} = 10 \mu A, 0.1 mA, 1 mA$ και $10 mA$. Παρατηρήστε ότι η διακύμανση του β ανάλογα με την τιμή ρεύματος προκαλεί αντίστοιχη διακύμανση στο λόγο μεταφοράς ρεύματος.

$$I_S = 10^{-15} A$$

$$\alpha) I_{REF} = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \rightarrow V_{BE} = V_T \ln \left(\frac{I_{REF}}{I_S} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow I_{REF} = 10 \mu A \rightarrow V_{BE} = 0.025 \ln \left(10 * \frac{10^{-6}}{10^{-15}} \right) = 0.576 V$$

$$\rightarrow I_{REF} = 10 mA \rightarrow V_{BE} = 0.025 \ln \left(10 * \frac{10^{-3}}{10^{-15}} \right) = 0.748 V$$

Άρα:

$$10 \mu A \leq I_{REF} \leq 10 mA \rightarrow 0.576 V \leq I_{REF} \leq 0.748 V$$

Επειδή το β είναι πολύ μεγάλο, το I_B είναι αμελητέο και συνεπώς:

$$I_O \approx I_{REF} : 10 \mu A \leq I_O \leq 10 mA$$

β) $I_O = I_{REF} \left(\frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \right)$. Για $0.1 mA \leq I_C \leq 5 mA$ το β παραμένει σταθερό και ίσο με 100. Έτσι:

$$I_{REF} = 10 mA \rightarrow I_O = \left(\frac{1}{1 + \frac{2}{70}} \right) = 9.72 mA$$

$$I_{REF} = 0.1 mA \rightarrow I_O = \left(\frac{1}{1 + \frac{2}{100}} \right) = 0.098 mA$$

$$I_{REF} = 1 mA \rightarrow I_O = \left(\frac{1}{1 + \frac{2}{100}} \right) = 0.98 mA$$

$$I_{REF} = 10 \mu A \rightarrow \dots$$

6.30

Δίνεται το απλό BJT κύκλωμα καθρέπτη ρεύματος του Σχ. 6.8 για την περίπτωση που το Q_2 έχει m -πλάσιο εμβαδό από το Q_1 . Δείξτε ότι ο λόγος μεταφοράς ρεύματος δίνεται από την εξίσωση $I_0 = m I_{REF}$. Εάν το β καθοριστεί σε ελάχιστη τιμή 80, ποιός είναι ο μέγιστος δυνατός λόγος μεταφοράς ρεύματος, κρατώντας ταυτόχρονα το σφάλμα που συνεπάγεται το πεπερασμένο β περιορισμένο στο 5%.

$$I_{S2} = I_{S1} * m \quad , \quad I_{C1} = I_C$$

$$I_{REF} = I_C + \frac{I_C}{\beta} + \frac{I_0}{\beta} \quad (1)$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} \rightarrow V_T \ln\left(\frac{I_C}{I_{S2}}\right) = V_T \ln\left(\frac{I_0}{I_{S2}}\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{I_0}{I_C} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} = m \rightarrow I_C = \frac{I_0}{m}$$

Με αντικατάσταση του I_C στην (1):

$$I_{REF} = \frac{I_0}{m} + \frac{I_0}{\beta m} + \frac{I_0}{\beta} \rightarrow \frac{I_0}{I_{REF}} = \frac{m}{1 + \left(\frac{1}{\beta}\right) + \left(\frac{m}{\beta}\right)} \rightarrow \frac{I_0}{I_{REF}} = \frac{m}{1 + \frac{1+m}{\beta}}$$

Για μεγάλες τιμές του β : $\frac{I_0}{I_{REF}} = m$.

Για β άπειρο η αναλογία καταλήγει $\frac{I_0}{I_{REF}} = \frac{m}{1 + \frac{m}{\beta}}$.

Για να διατηρήσουμε το σφάλμα στο 5% έχουμε:

$$0.95m = \frac{m}{1 + \frac{1+m}{\beta}} \rightarrow \beta_{min} = 80 \rightarrow 0.95 = \frac{m}{1 + \frac{1+m}{80}} \rightarrow m = 3.21$$

6.32

Δίνεται ο απλός καθρέπτης ρεύματος διπολικών στοιχείων του Σχ. 6.8 με τα Q_1 και Q_2 ταιριασμένα και το $I_{REF} = 2mA$. Αγνοώντας την επίδραση του πεπερασμένου β , βρείτε την μεταβολή στο I_0 , τόσο σαν απόλυτη τιμή όσο και σαν ποσοστό, που αντιστοιχεί σε αλλαγή της V_0 από 1V σε 10V. Η τάση *Early* είναι 90V.

$$I_0 = I_{REF} = 2mA$$

$$r_{02} = \frac{V_{A2}}{I_0} = \frac{90}{2} = 45k\Omega$$

$$r_{02} = \frac{\Delta V_0}{\Delta I_0} = \frac{10 - 1}{\Delta I_0} = 45 \rightarrow \Delta I_0 = 0.2mA$$

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta I_0} = \frac{0.2}{2} = 10\%$$

6.33

Το κύκλωμα πηγής ρεύματος του Σχ Π6.33 χρησιμοποιεί ένα ζεύγος ταιριασμένων pnp τρανζίστορ που έχουν $I_S = 10^{-15}A$, $\beta = 50$, και $|V_A| = 50V$. Ζητείται να σχεδιάσετε το κύκλωμα με τρόπο ώστε να παρέχει ρεύμα εξόδου $I_O = 1mA$ σε $V_O = 2V$. Ποιές τιμές των I_{REF} και R απαιτούνται; Ποιά είναι η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της V_O για την οποία συνεχίζει να λειτουργεί σωστά η πηγή ρεύματος; Πόσο μεταβάλλεται το I_O σε αντιστοιχία με την αλλαγή της V_O από τη μέγιστη θετική τιμή σε $-5V$.

$$I_S = 10^{-15} \text{ και } \beta = 50$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \rightarrow I_{REF} = I_O * \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) = 1 * \left(1 + \frac{2}{50}\right) \rightarrow I_{REF} = 1.02 \text{ mA}$$

$$V_{BE} = V_T \ln \frac{I_O}{I_S \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)} = 0.025 \frac{10^{-3}}{10^{-15} \left(1 + \frac{3}{50}\right)} = 0.689V$$

$$V_C = V_B = 5 - 0.689 = 4.13V$$

$$V_C = R * I_{REF} \rightarrow R = \frac{4.31}{1.02} = 4.2k\Omega$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_O} = \frac{50}{1} = 50k\Omega$$

Την μέγιστη τιμή V_{Omax} την παίρνουμε όταν το Q_2 βρίσκεται στα όρια του κόρου, ή αλλιώς $V_{CE} = 0.3V$.

$$\text{Επομένως } V_{Omax} = 5 - 0.3 = 4.7V$$

$$r_o = \frac{\Delta V_O}{\Delta I_O} = \frac{4.7 - (-5)}{\Delta I_O} = 50k\Omega \rightarrow \Delta I_O = 0.194mA$$

$$\frac{\Delta I_O}{I_O} * 100 = \frac{0.194}{1} * 100 = 19.4\% \text{ μεταβολή του } I_O$$

6.34

Βρείτε τις τάσεις σε όλους τους κόμβους και τα ρεύματα που διαρρέουν όλους τους κλάδους στο κύκλωμα του Σχ. Π6.34. Υποθέτε ότι $|V_{BE}| = 0.7V$ και $\beta = \infty$

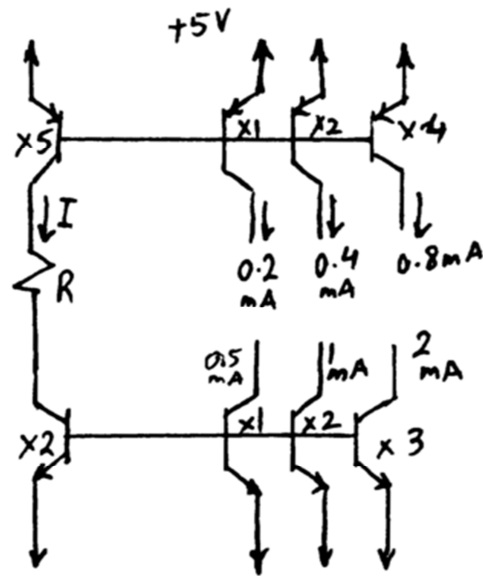
$$I_{C1} = I_{C2} = I_{R1}$$

$$V_{B1} = 10 - 0.7 = 9.3V, \quad V_{B2} = -10 + 0.7 = -9.3V, \quad I_{R1} = \frac{9.3 + 9.3}{10} \rightarrow I_{R1} = 1.86mA$$

$$I_{R1} = 1.86mA = I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = I_{C4} = I_{C5} = I_{C6}$$

$$V_{C3} = 1.86mA * 2k\Omega = 3.72V, \quad V_{C5} = 0.7V$$

$$V_{C6} = 5 - 1.86 * 1 = 3.14V, \quad I_{C9} = I_{C8} = I_{C7} = I_{C2} = 1.86mA$$



6.102

Δίνεται ένας cascode ενισχυτής υλοποιημένος με διπολικά τρανζίστορ, στον οποίο το φορτίο πηγής ρεύματος υλοποιείται με ένα κύκλωμα που έχει αντίσταση εξόδου ίση με βr_o . Έστω ότι $\beta=100$, $|V_A| = 100V$ και $I = 0.1 \text{ mA}$. Βρείτε τα R_{in} , G_m , R_{out} και $\frac{V_o}{V_i}$. Επίσης, βρείτε το κέρδος του σταδίου CE

$$R_L = \beta r_o, \beta = 100, |V_A| = 100V, I = 0.1 \text{ mA}$$

$$\text{Από το κύκλωμα μπορούμε να γράψουμε: } R_{in} = r_{\pi 1} = \frac{\beta}{g_{m1}} = \frac{\beta V_T}{I_C} = \frac{100 \cdot 0.025}{0.1} = 25 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} \approx \beta r_{o2}, r_{o2} = \frac{V_A}{I_C} = \frac{100}{0.1} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$A_{V_o} = -\beta A_{V_2} = -\beta g_{m2} r_{o2} = -100 * \left(\frac{0.1 \text{ M}}{0.0025} \right) * 1 \text{ M} \rightarrow A_{V_o} = -400 * 10^3 \frac{V}{V}$$

$$G_m = \frac{A_{V_o}}{R_{out}} = 400 * \frac{10^3}{100 * 10^6} = \frac{4 \text{ mA}}{V} \approx g_m$$

$$\text{Εφόσον } R_{out} = R_L = \beta r_o \text{ έχουμε } \frac{V_o}{V_i} = -G_m (R_L || R_{out}) = -G_m \frac{\beta r_o}{2} = -\frac{4 * 100 * 1 \text{ M}}{2} = -200 * 10^3 \frac{V}{V}$$

$$\text{Από το Σχ. 6.41, το κέρδος είναι } A_{CE} = -g_{m1} (r_{o1} || r_{e2} \frac{r_{o2} + R_L}{r_{o2} + \frac{R_L}{\beta + 1}}) \text{ και } r_{o1} = r_{o2} = r_o, R_L = \beta r_o$$

$$A_{CE} = -g_{m1} (r_o || r_{e2} \frac{r_o + \beta r_o}{r_o + \frac{\beta r_o}{\beta + 1}}) \rightarrow A_{CE} = -g_{m1} (r_o || r_{e2} \frac{r_o (\beta + 1)}{2 r_o}) \rightarrow$$

$$\rightarrow A_{CE} = -g_{m1} (r_o || \frac{r_{\pi 2}}{2}) = -\frac{I}{V_T} (1 \text{ M} || \frac{25 \text{ k}}{2}) \rightarrow A_{CE} = -50 \frac{V}{V}$$

6.103

Δίνεται ένας cascade ενισχυτής υλοποιημένος με διπολικά τρανζίστορ, ο οποίος πολώνεται με ρεύμα $1mA$. Τα χρησιμοποιούμενα τρανζίστορ έχουν $\beta=100$, $r_o = 100k\Omega$, $C_\pi = 14pF$, $C_\mu = 2pF$, $C_{cs} = 0$, και $r_\chi = 50\Omega$. Ο ενισχυτής τροφοδοτείται από μία πηγή σήματος που έχει αντίσταση πηγής $4k\Omega$ ενώ η αντίσταση φορτίου είναι $2.4k\Omega$. Βρείτε το κέρδος χαμηλών συχνοτήτων και την άνω συχνότητα αποκοπής

$$R_{sig} = 4k\Omega, R_L = 2.4k\Omega, I = 1mA, \beta = 100, r_o = 100k\Omega$$

$$A_M = \frac{r_\pi}{r_\pi + r_\chi + R_{sig}} * g_m (\beta r_o || R_L)$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{\frac{1}{0.025}} = 2.5k\Omega \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} = 40 \frac{mA}{V}$$

$$A_M = -\frac{2.5}{2.5 + 0.05 + 4} * 40 * (100 * 100 || 2.4k) \rightarrow A_M = -36.6 \frac{V}{V}$$

$$R'_{sig} = r_\pi || (r_\chi + R_{sig}) = 2.5k || (0.05 + 4k) = 1.55k\Omega$$

$$R_{\pi 1} = R'_{sig} = 1.55k\Omega$$

$$R_{M1} = R'_{sig} (1 + g_m R_{e1}) + R_{e1}$$

$$R_{e1} = r_{o1} || r_{e2} \left(\frac{r_o + R_L}{r_o + \frac{R_L}{\beta + 1}} \right) = 1k\Omega \rightarrow R_{M1} = 64.55k\Omega$$

$$R_{out} = \beta r_o = 10M\Omega$$

$$\tau_H = C_{\pi 1} R_{\pi 1} + C_{M1} R_{M1} + (C_{CS1} + C_{\pi 2}) R_{e1} + (C_L + C_{CS2} + C_{M2}) (R_L || R_{out})$$

$$\tau_H = 169.6ns \rightarrow f = 939kHz$$

6.124

Τα BJT τρανζίστορ στον ακόλουθο Darlington του Σχ. Π6.124 έχουν $\beta_0 = 100$. Εάν ακόλουθος τροφοδοτείται με μια πηγή η οποία έχει αντίσταση $100k\Omega$ και φορτίο $1k\Omega$, βρείτε την αντίσταση εισόδου και την αντίσταση εξόδου (με την εξαίρεση του φορτίου). Επίσης, βρείτε το συνολικό κέρδος τάσης, τόσο σε κατάσταση ανοιχτού κοιλκώματος όσο και με φορτίο.

$$I_{E2} = 10mA \rightarrow r_{e2} = 2.5\Omega, r_{\pi 2} = 253\Omega$$

$$I_{E1} = \frac{10}{101} = 0.1mA \rightarrow r_{e1} = 250\Omega, r_{\pi 1} = 25.3k\Omega$$

$$R_{in} = 101 * [0.25 + 101(0.0025 + 1)] = 10.3M\Omega$$

$$R_{out} = r_{e2} + \frac{1}{\beta_2 + 1} * \left[r_{e1} + \frac{R_{sig}}{\beta_1 + 1} \right] = 2.5 + \frac{1}{101} \left[250 + \frac{100000}{101} \right] = 14.8\Omega$$

Παραλείποντας το r_o :

$$A_{V0} = 1000 \frac{V}{V}, A_V = \frac{1 * 1000}{14.8 + 1000} = 0.985 \frac{V}{V}$$

6.131

Για τον καθρέπτη ρεύματος με αντιστάθμιση ρεύματος βάσης που παρουσιάζεται στο ΣΧ. 6.59, έστω ότι τα τρία τρανζίστορ είναι ταιριασμένα και έχουν ρεύμα συλλέκτη 1mA σε $V_{BE} \cong 0.7\text{V}$. Για ρεύμα $I_{REF} = 100\mu\text{A}$ και υποθέτοντας $\beta=200$, πόση θα είναι η τάση στον κόμβο χ ; Εάν αυξηθεί το I_{REF} σε 1mA , πόση είναι η μεταβολή στην V_χ ; Πόσο ρεύμα I_0 επιτυγχάνεται στις δύο περιπτώσεις; Δώστε την ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της πραγματικής και της ιδανικής τιμής του I_0 . Ποια είναι η ελάχιστη τάση στην έξοδο για την οποία το κύκλωμα διατηρεί τη λειτουργία του ως πηγή ρεύματος;

$$V_X - V_{BE3} + V_{BE1} = 1.4\text{V}$$

Αν το I_{REF} αυξηθεί στο 1mA ή ανάλογα δεκαπλασιαστεί τότε:

$$\frac{I_{C2}}{I_{C1}} = \frac{(I_S e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}})}{(I_B e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}})} \rightarrow 10 = e^{\frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{V_T}}$$

$$V_{BE2} - V_{BE1} = \Delta V_{BE} = V_T \ln 10 = 0.058\text{V}$$

$$\Delta V_{BE} = 0.058\text{V} \rightarrow \Delta V_X = 2\Delta V_{BE} = 0.116\text{V}$$

Τώρα υπολογίζουμε το I_0 για $V_0 = V_\chi$

$$I_{REF} = I_C = 100\mu\text{A} \rightarrow V_{BE1} = \dots$$

$$\text{Η πραγματική τιμή του } I_0 = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{\beta^2 + \beta}{\beta}} \rightarrow I_0 = \frac{100\mu\text{A}}{1 + \frac{200^2 + 200}{200}} = 99.995\mu\text{A}$$

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{0.005}{100} = 5 * 10^{-5} = 0.005\%$$

6.132

Επεκτείνεται το κύκλωμα καθρέπτη ρεύματος του Σχ. 6.59 ώστε να έχει η εξόδους. Ποιός είναι ο λόγος εταφοράς ρεύματος από την είσοδο προς κάθε έξοδο, $\frac{I_0}{I_{REF}}$; Εάν η απόκλιση από τη μονάδα πρόκειται να κρατείται σε 0.1% ή λιγότερο, ποιός είναι ο μέγιστος δυνατός αριθμός εξόδων, για BJT τρανζίστορ με $\beta=100$;

Εφόσον $Q_{21}, Q_{22}, Q_{23}, \dots, Q_{2n}$ είναι ταιριασμένα με το Q_1 έχουμε:

$$I_{01} = I_{01} = \dots = I_{0n} = I_0$$

Ο εκπομπός του Q_3 παρέχει το ρεύμα βάσης για όλα τα τρανζίστορ, οπότε $I_{C3} = \frac{(n+1)I_0}{\beta}$

Μια κύρια εξίσωση στη βάση του Q_3 μας αποδίδει: $I_{REF} = \frac{I_0}{1 + \frac{\beta^2 + \beta}{\beta}} = \frac{I_0}{1 + \frac{\beta(\beta+1)}{\beta}}$ οπότε $\frac{I_{REF}}{I_0} = \frac{1}{1 + \frac{\beta+1}{\beta}}$

Και για απόκλιση μικρότερη του 0.1%: $\frac{99.9}{100} = \frac{1}{1 + \frac{\beta+1}{\beta^2}} \rightarrow \frac{n+1}{\beta^2} = \frac{1}{999} \rightarrow n = \frac{\beta^2}{999} - 1 \rightarrow n \approx 9$

6.137

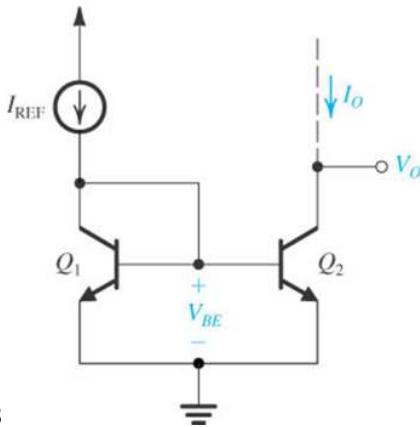
Δίνεται το κύκλωμα καθρέπτη ρεύματος Wilson του ΣΧ. 6.60 για την περίπτωση που τροφοδοτείται με ρεύμα αναφοράς I_{REF} ίσο με 1mA . Πόση είναι η μεταβολή του I_O που αντιστοιχεί σε μεταβολή $+10\text{V}$ της τάσης στο συλλέκτη του Q_3 ; Δώστε τόσο την απόλυτη τιμή όσο και την ποσοστιαία μεταβολή. Έστω ότι $\beta=100$ και $V_A = 100\text{V}$. Θυμηθείτε επίσης ότι η αντίσταση εξόδου του κυκλώματος Wilson είναι $\beta r_o/2$.

$$R_0 = \frac{\beta r_o}{2} = \frac{\beta V_A}{2 I_C} = \frac{100 \cdot 100}{2 \cdot 1} = 5\text{M}\Omega$$

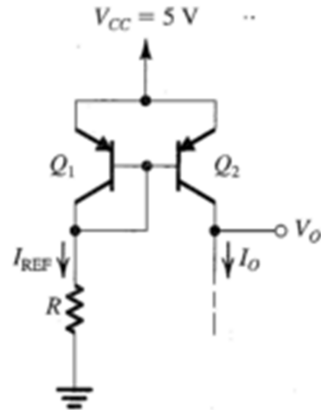
$$\Delta I_0 = \frac{\Delta V_0}{R_0} = \frac{10\text{V}}{5\text{M}\Omega} = 2\mu\text{A}$$

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{2\mu\text{A}}{1\text{mA}} = 0.2\%$$

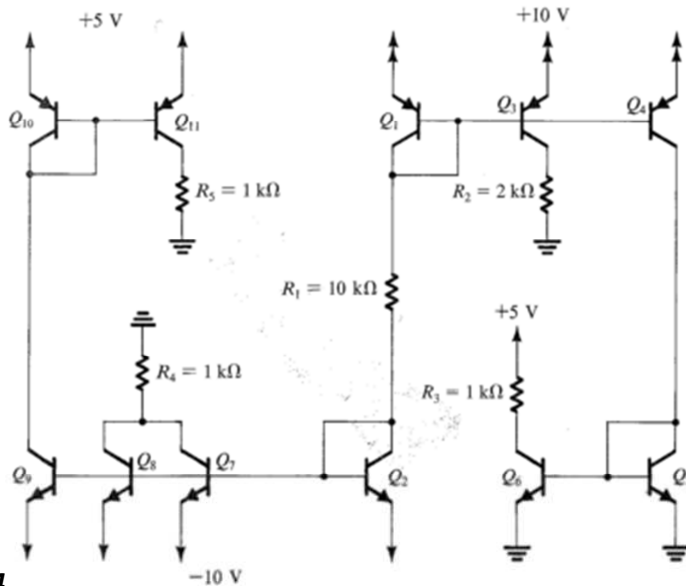
ΣΧΗΜΑΤΑ



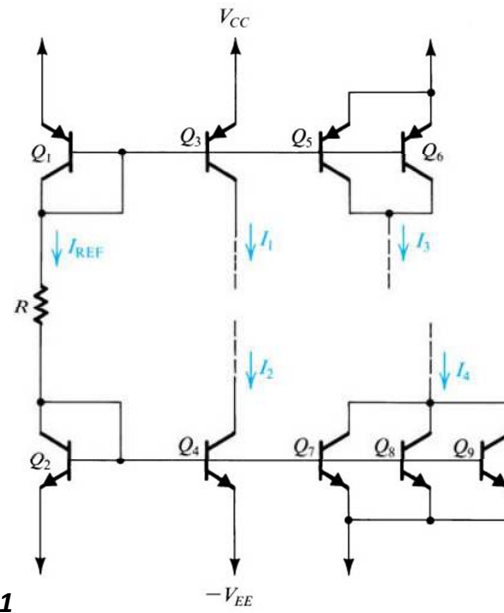
ΣΧ. 6.8



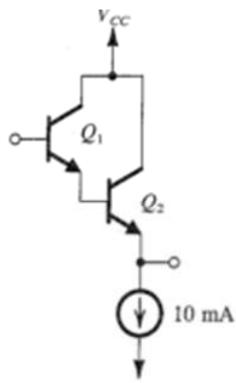
ΣΧ.Π 6.33



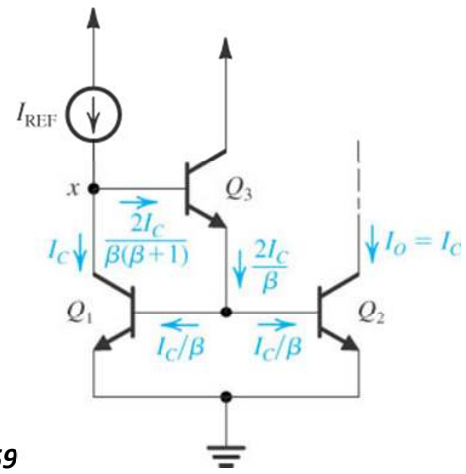
ΣΧ.Π6.34



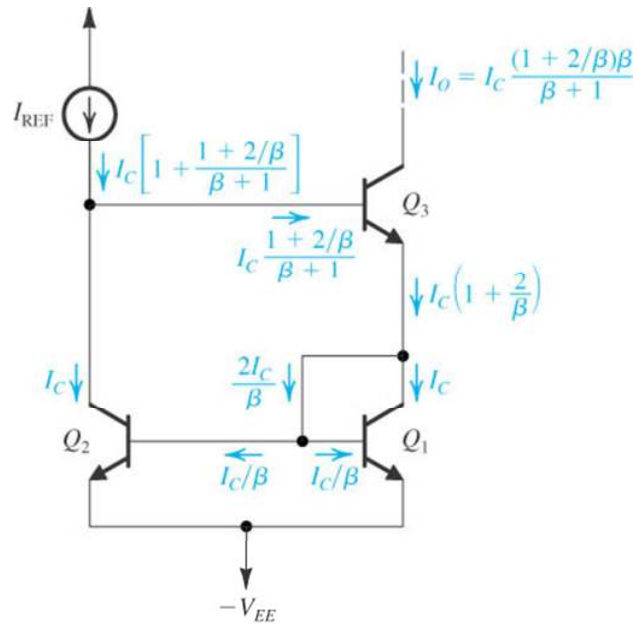
Σχ.6.11



Σχ.Π.6.124



Σχ.6.59



Σχ.6.60

(a)