

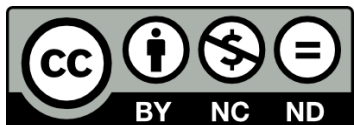


# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙΙ

## Ενότητα 3: Κυκλώματα αναφοράς

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



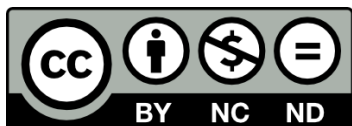
# Σχεδιασμός ενοτήτων:

- 1. Σχεδίαση τελεστικών ενισχυτών
- 2. Κυκλώματα ανόρθωσης - δίοδοι zener
- **3. Κυκλώματα αναφοράς**
- 4. Ενισχυτές ισχύος
- 5. Ηλεκτρονικά ελέγχου ισχύος
- 6. 1η εργαστηριακή άσκηση και προσομοίωση με το SPICE
- 7. 2η εργαστηριακή άσκηση και προσομοίωση με το SPICE





# ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



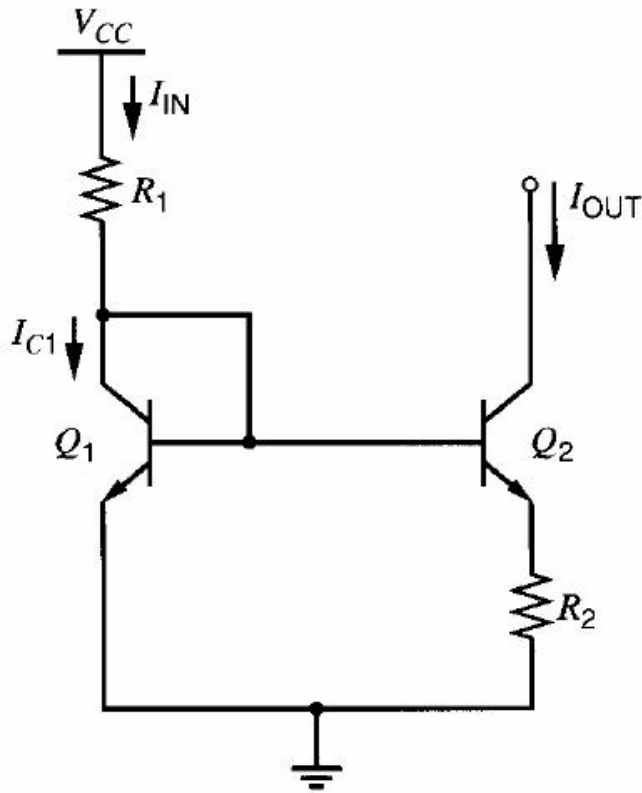
ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

1. Κυκλώματα πηγών ρεύματος (διαφ. 7- 11)
2. Μελέτη ευαισθησίας ως προς την τάση τροφοδοσίας (διαφ. 12 - 21)
3. Μελέτη ευαισθησίας ως προς την θερμοκρασία (διαφ. 22 - 29)
4. Κυκλώματα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης (Band-gap reference) (διαφ. 30 – 43)



# Πηγή ρεύματος Widlar με διπολικά τρανζίστορ



$$V_{BE1} - V_{BE2} - \frac{\beta_F + 1}{\beta_F} I_{OUT} R_2 = 0$$

$$V_T \ln \frac{I_{IN}}{I_{S1}} - V_T \ln \frac{I_{OUT}}{I_{S2}} - I_{OUT} R_2 = 0$$

Για  $I_{S1} = I_{S2}$  θα είναι:

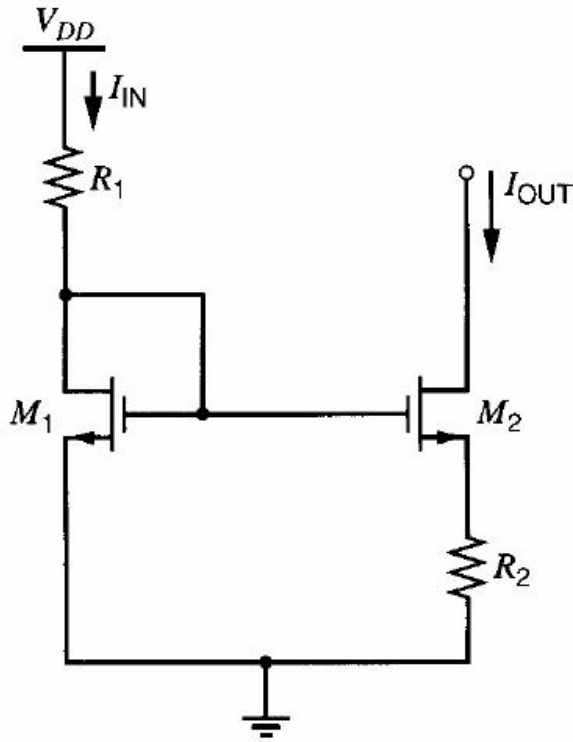
$$V_T \ln \frac{I_{IN}}{I_{OUT}} = I_{OUT} R_2$$

Υπολογισμός του  $I_{OUT}$  με μέθοδο δοκιμής-λάθους (trial and error).

Πηγή κατάλληλη για ρεύματα τάξεως  $\mu A$ .



# Πηγή ρεύματος Widlar με MOS τρανζίστορ



$$I_D = \frac{k'}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \quad k' = \mu_n C_{ox} = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$V_{ov1} = \sqrt{2I_{IN} / [k'(W/L)_1]}$$

$$V_{GS1} - V_{GS2} - I_{OUT} R_2 = 0$$

$$I_{OUT} R_2 + \sqrt{\frac{2I_{OUT}}{k'(W/L)_2}} - V_{ov1} = 0 \quad \begin{array}{l} \text{2βάθμια ως} \\ \text{προς } \sqrt{I_{OUT}} \end{array}$$

$$\sqrt{I_{OUT}} = \frac{-\sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2}} \pm \sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2} + 4R_2 V_{ov1}}}{2R_2}$$

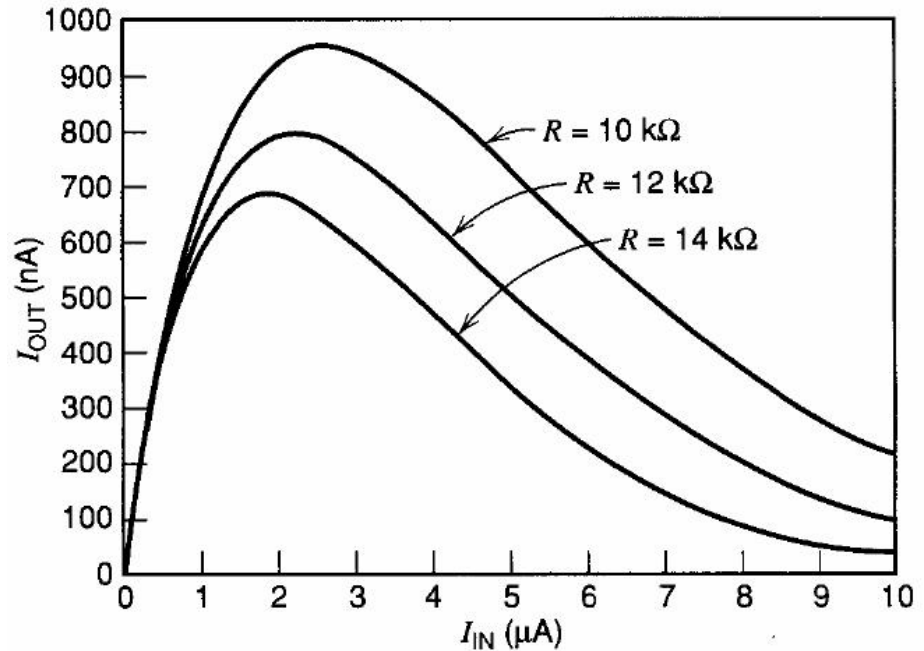
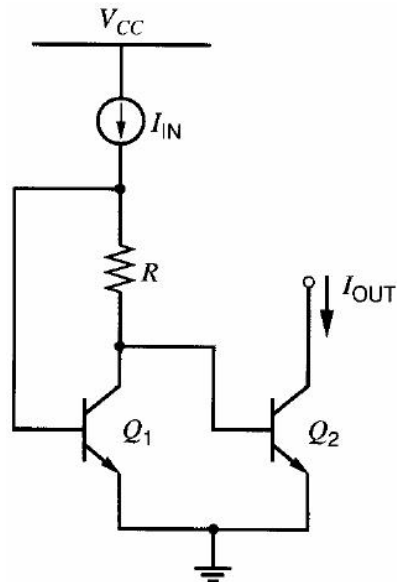
$$\sqrt{I_{OUT}} = \frac{-\sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2}} + \sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2} + 4R_2 V_{ov1}}}{2R_2}$$

Για  $\sqrt{I_{OUT}} > 0$  θα είναι:





# Πηγή μεγίστου ρεύματος με διπολικά τρανζίστορ



$$V_{BE1} - I_{IN}R = V_{BE2}$$

$$V_T \ln \frac{I_{IN}}{I_{S1}} - V_T \ln \frac{I_{OUT}}{I_{S2}} = I_{IN}R$$

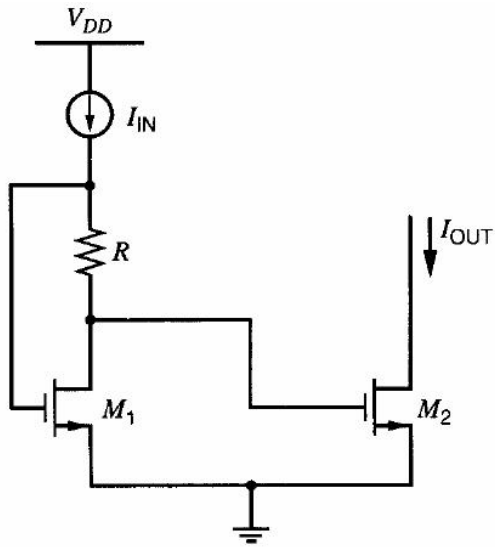
$$\text{Για σχεδίαση: } R = \frac{V_T}{I_{IN}} \ln \frac{I_{IN}}{I_{OUT}}$$

$$I_{OUT} = I_{IN} \exp\left(-\frac{I_{IN}R}{V_T}\right)$$

Πηγή κατάλληλη για ρεύματα τάξεως nA.



# Πηγή μεγίστου ρεύματος με MOS τρανζίστορ (1/2)



$$V_{GS1} - I_{IN}R - V_{GS2} = 0$$

$$V_{ov2} = V_{ov1} - I_{IN}R$$

Για τρανζίστορ στον κορεσμό ισχύει:

$$I_{OUT} = \frac{k'(W/L)_2}{2} (V_{ov2})^2 = \frac{k'(W/L)_2}{2} (V_{ov1} - I_{IN}R)^2$$

Για τρανζίστορ σε ασθενή αναστροφή ισχύει:

$$I_D = \frac{W}{L} I_t \exp\left(\frac{V_{GS} - V_t}{nV_T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{V_{DS}}{V_T}\right)\right]$$

$$\text{όπου : } I_t = qXD_n n_{po} \exp\left(\frac{k_2}{V_T}\right) \quad 1.3 \leq n \leq 1.5$$

Για  $V_{DS1} > 3V_T$

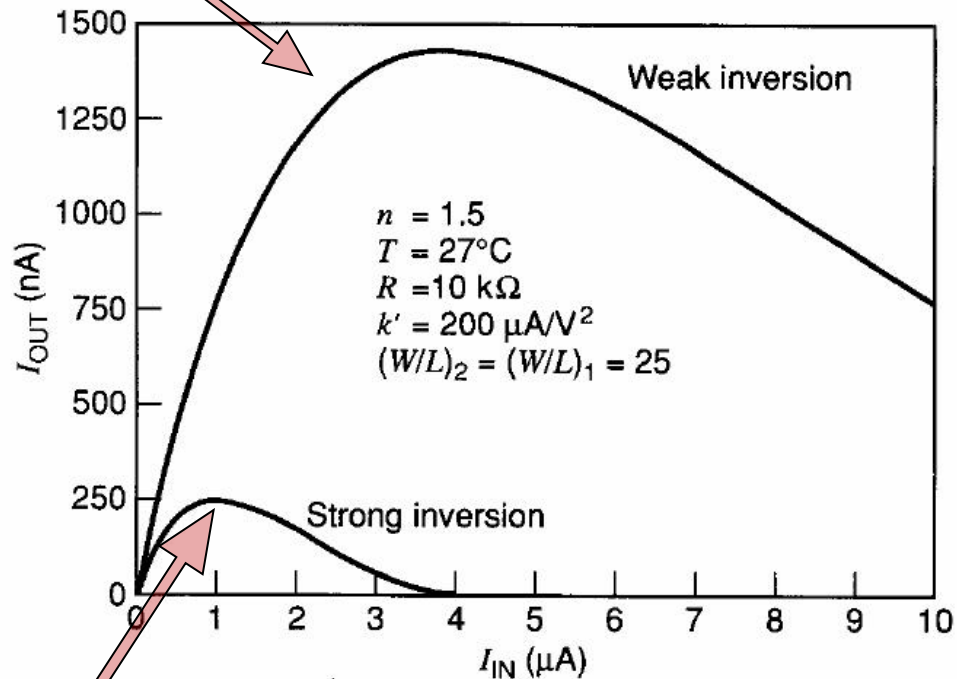
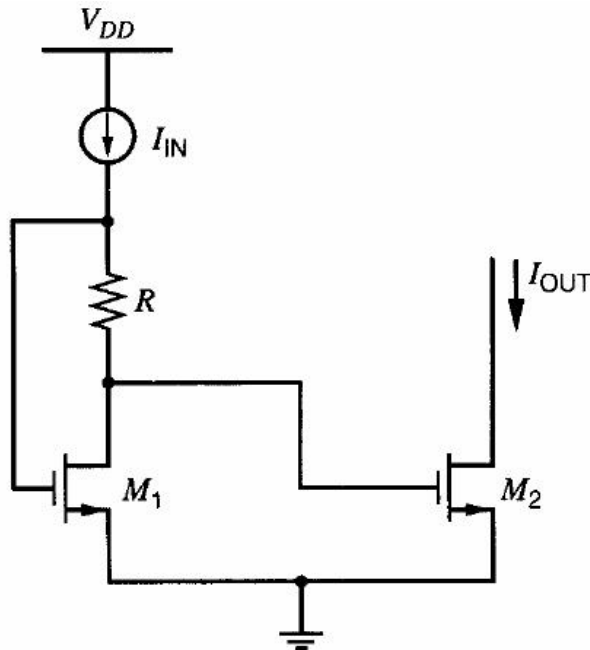
$$\text{θα είναι: } V_{GS2} - V_t \approx nV_T \ln\left(\frac{I_{IN}}{(W/L)_1 I_t}\right) - I_{IN}R$$

$$I_{OUT} \approx \frac{W}{L} I_t \exp\left(\frac{V_{GS2} - V_t}{nV_T}\right) \approx I_{IN} \exp\left(-\frac{I_{IN}R}{nV_T}\right)$$



# Πηγή μεγίστου ρεύματος με MOS τρανζίστορ (2/2)

$$I_{OUT} \approx \frac{W}{L} I_t \exp\left(\frac{V_{GS2} - V_t}{nV_T}\right) \approx I_{IN} \exp\left(-\frac{I_{IN}R}{nV_T}\right)$$

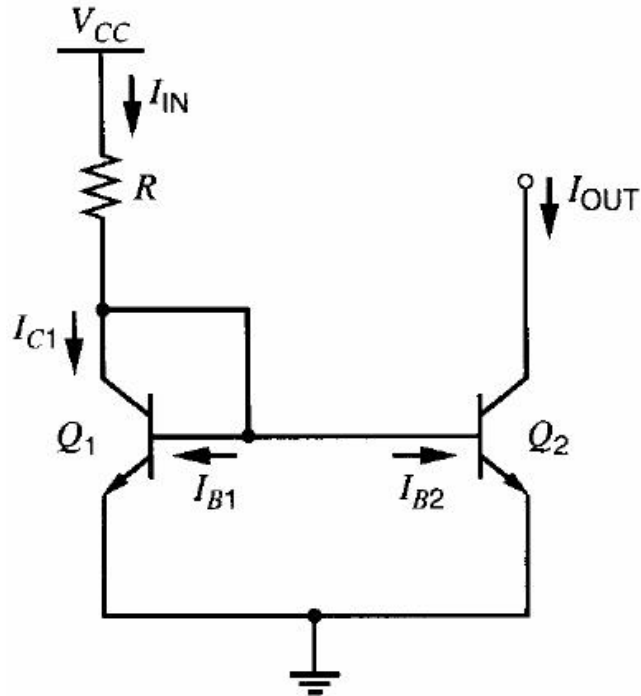


$$I_{OUT} = \frac{k'(W/L)_2}{2} (V_{ov2})^2 = \frac{k'(W/L)_2}{2} (V_{ov1} - I_{IN}R)^2$$



# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας

## Απλός καθρέπτης



$$I_{OUT} \approx I_{IN} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R}$$

$$S_x^y = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x} = \frac{x}{y} \frac{\partial y}{\partial x}$$

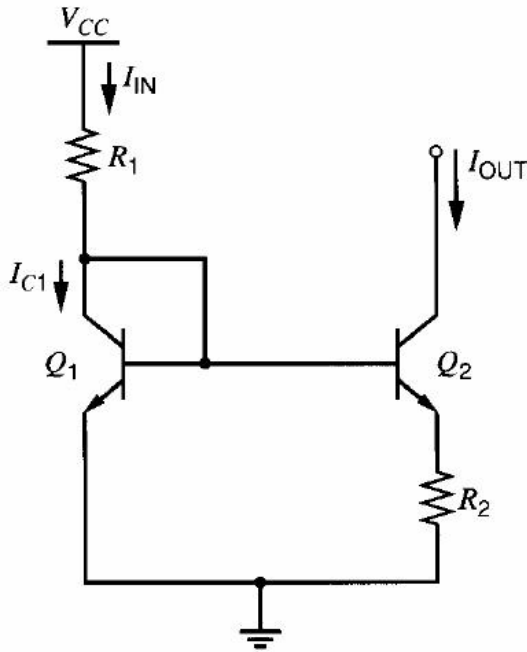
$$S_{V_{SUP}}^{I_{OUT}} = \frac{V_{SUP}}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{SUP}}$$

$$V_{CC} \gg V_{BE(on)} \Rightarrow S_{V_{SUP}}^{I_{OUT}} \approx 1$$



# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας

## Πηγή Widlar με BJT (1/2)



$$V_T \ln \frac{I_{IN}}{I_{OUT}} = I_{OUT} R_2 \quad S_{V_{SUP}}^{I_{OUT}} = \frac{V_{SUP}}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{SUP}}$$

$$V_T \frac{\partial}{\partial V_{CC}} \ln \frac{I_{IN}}{I_{OUT}} = R_2 \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{CC}}$$

$$V_T \left( \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} \right) \left( \frac{1}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{IN}}{\partial V_{CC}} - \frac{I_{IN}}{I_{OUT}^2} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{CC}} \right) = R_2 \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{CC}}$$

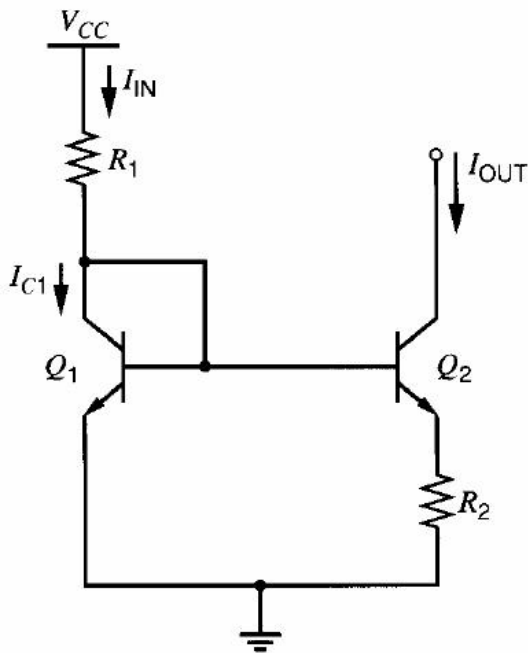
$$\frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{CC}} = \left( \frac{1}{1 + \frac{I_{OUT} R_2}{V_T}} \right) \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} \frac{\partial I_{IN}}{\partial V_{CC}}$$

$$S_{V_{CC}}^{I_{OUT}} = \left( \frac{1}{1 + \frac{I_{OUT} R_2}{V_T}} \right) \frac{V_{CC}}{I_{IN}} \frac{\partial I_{IN}}{\partial V_{CC}} = \left( \frac{1}{1 + \frac{I_{OUT} R_2}{V_T}} \right) S_{V_{CC}}^{I_{IN}}$$

# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας

## Πηγή Widlar με BJT (2/2)

$$S_{V_{CC}}^{I_{OUT}} = \left( \frac{1}{1 + \frac{I_{OUT} R_2}{V_T}} \right) \frac{V_{CC}}{I_{IN}} \frac{\partial I_{IN}}{\partial V_{CC}} = \left( \frac{1}{1 + \frac{I_{OUT} R_2}{V_T}} \right) S_{V_{CC}}^{I_{IN}}$$



$$\text{Αν } V_{CC} \gg V_{BE(on)} \Rightarrow I_{IN} \approx V_{CC}/R_1 \Rightarrow S_{V_{CC}}^{I_{IN}} \approx 1$$

Για παράδειγμα, για:

$$I_{IN} = 1 \text{ mA}, I_{OUT} = 5 \text{ } \mu\text{A}, \text{ and } R_2 = 27.4 \text{ k}\Omega$$

προκύπτει:

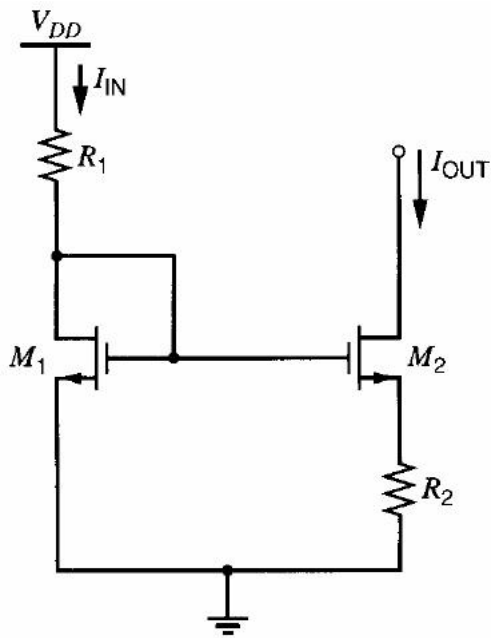
$$S_{V_{CC}}^{I_{OUT}} = \frac{V_{CC}}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{CC}} \approx \frac{1}{1 + \frac{137 \text{ mV}}{26 \text{ mV}}} \approx 0.16$$



# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας

## Πηγή Widlar με MOS τρανζίστορ

$$S_{V_{SUP}}^{I_{OUT}} = \frac{V_{SUP}}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{SUP}}$$



$$\sqrt{I_{OUT}} = \frac{-\sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2}} + \sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2} + 4R_2V_{ov1}}}{2R_2}$$

$$\frac{1}{2\sqrt{I_{OUT}}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{DD}} = \frac{1}{4R_2} \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2} + 4R_2V_{ov1}}} 4R_2 \frac{\partial V_{ov1}}{\partial V_{DD}}$$

$$\frac{\partial V_{ov1}}{\partial V_{DD}} = \sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_1}} \frac{1}{2\sqrt{I_{IN}}} \frac{\partial I_{IN}}{\partial V_{DD}} = \frac{V_{ov1}}{2I_{IN}} \frac{\partial I_{IN}}{\partial V_{DD}}$$

$$S_{V_{DD}}^{I_{OUT}} = \frac{V_{ov1}}{\sqrt{V_{ov2}^2 + 4I_{OUT}R_2V_{ov1}}} S_{V_{DD}}^{I_{IN}}$$

$$I_{OUT}R_2 \approx V_{ov1} \Rightarrow S_{V_{DD}}^{I_{OUT}} \approx \frac{V_{ov1}}{\sqrt{4V_{ov1}^2}} S_{V_{DD}}^{I_{IN}} = 0.5 S_{V_{DD}}^{I_{IN}}$$

$$S_{V_{DD}}^{I_{IN}} \approx 1 \Rightarrow S_{V_{DD}}^{I_{OUT}} \approx 0.5$$



# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας

Άλλες τάσεις για αναφορά (εκτός από την τροφοδοσία):

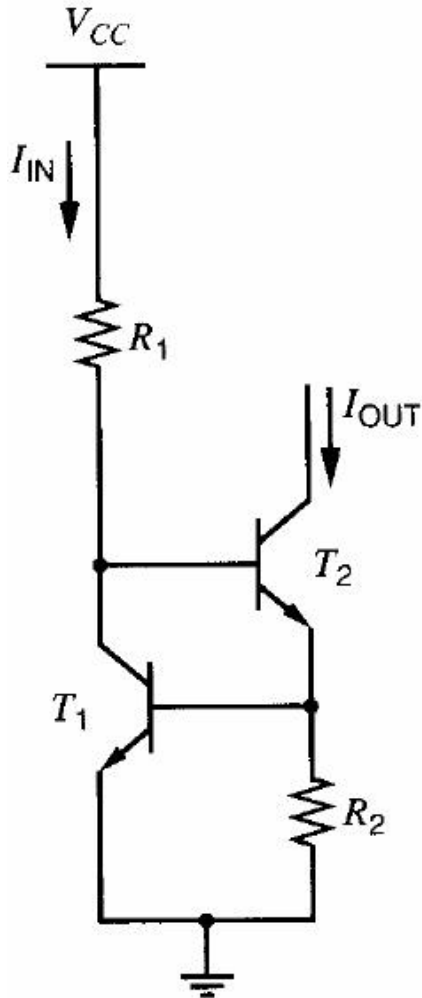
Τάση $V_{BE}$	} εξάρτηση από θερμοκρασία	} (-)
Τάση $V_t$		
Τάση $V_T$ ( $\approx 26$ mV)		
Τάση $V_Z$	πρόβλημα η μεγάλη τιμή της	(+)





# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας

## Αναφορά που βασίζεται στην τάση $V_{BE}$



$$V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_{IN}}{I_{S1}}$$

$$S_{V_{SUP}}^{I_{OUT}} = \frac{V_{SUP}}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{SUP}}$$

$$I_{OUT} = \frac{V_{BE1}}{R_2} = \frac{V_T}{R_2} \ln \frac{I_{IN}}{I_{S1}}$$

$$S_{V_{CC}}^{I_{OUT}} = \frac{V_T}{I_{OUT} R_2} S_{V_{CC}}^{I_{IN}} = \frac{V_T}{V_{BE(on)}} S_{V_{CC}}^{I_{IN}}$$

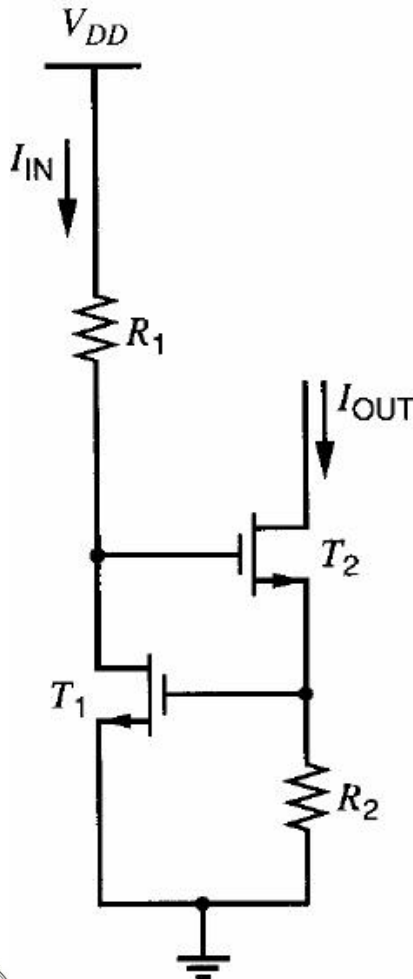
$$\text{Av } V_{CC} \gg 2V_{BE(on)} \Rightarrow I_{IN} \approx V_{CC}/R_1 \Rightarrow S_{V_{CC}}^{I_{IN}} \approx 1$$

$$\Rightarrow S_{V_{CC}}^{I_{OUT}} = \frac{0.026 \text{ V}}{0.7 \text{ V}} \approx 0.037$$



# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας

## Αναφορά που βασίζεται στην τάση $V_t$



$$I_{OUT} = \frac{V_{GS1}}{R_2} = \frac{V_t + V_{ov1}}{R_2} = \frac{V_t + \sqrt{\frac{2I_{IN}}{k'(W/L)_1}}}{R_2}$$

$$S_{V_{SUP}}^{I_{OUT}} = \frac{V_{SUP}}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial V_{SUP}}$$

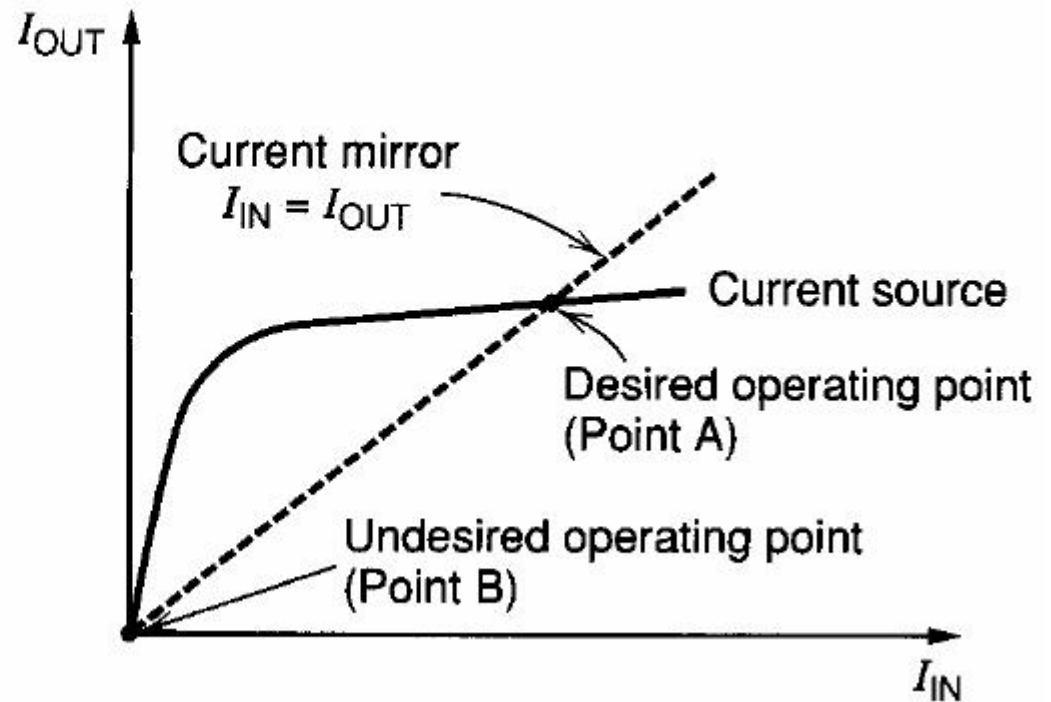
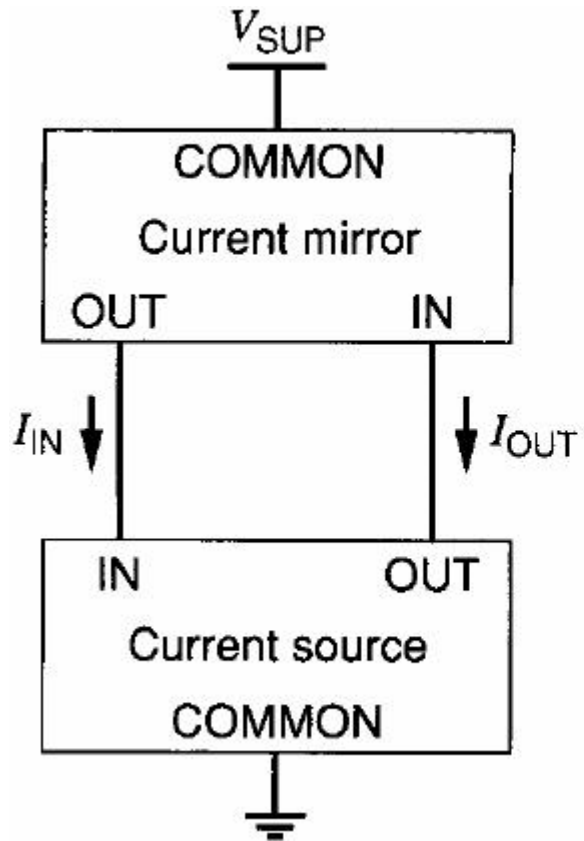
$$S_{V_{DD}}^{I_{OUT}} = \frac{V_{ov1}}{2I_{OUT}R_2} S_{V_{DD}}^{I_{IN}} = \frac{V_{ov1}}{2V_{GS1}} S_{V_{DD}}^{I_{IN}}$$

Για παράδειγμα, για:  $V_t = 1 \text{ V}$ ,  $V_{ov1} = 0.1 \text{ V}$ ,  $S_{V_{DD}}^{I_{IN}} \approx 1$

$$\Rightarrow S_{V_{DD}}^{I_{OUT}} \approx \frac{0.1}{2(1.1)} \approx 0.045$$

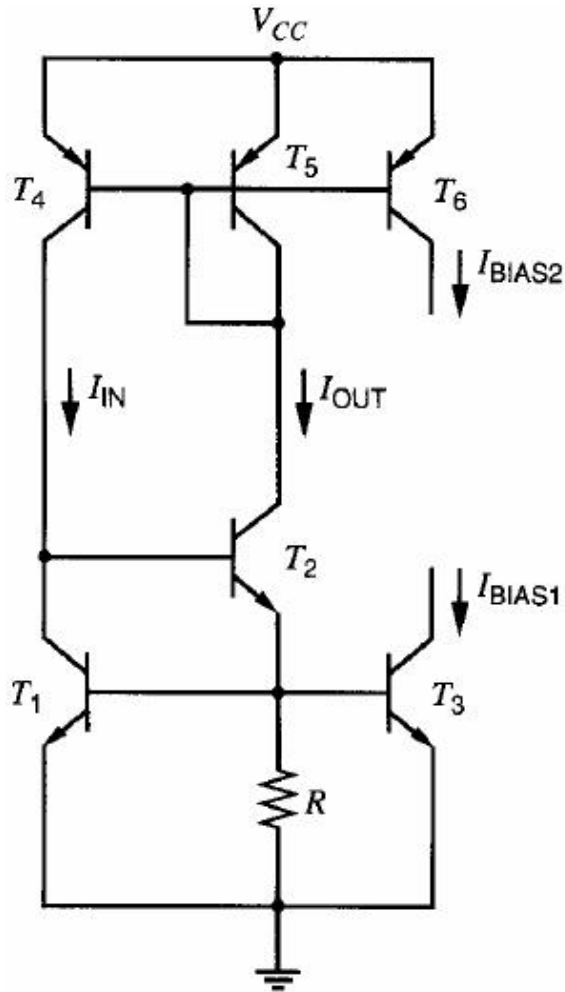


# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας Τεχνική αυτοδιέγερσης ή αυτοπόλωσης

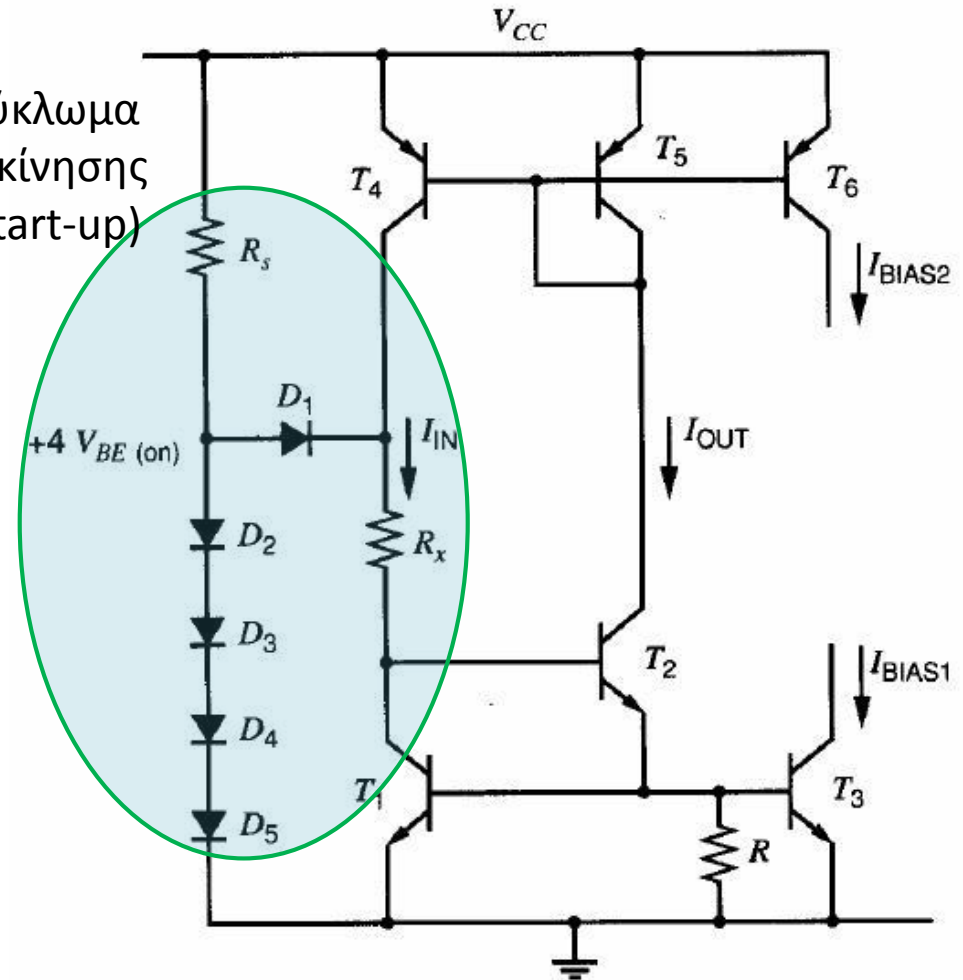


# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας

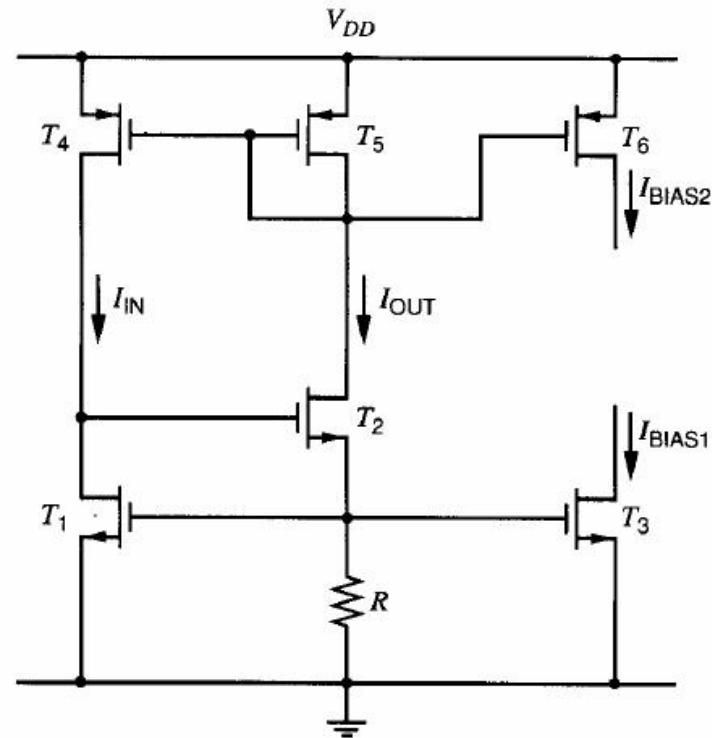
## Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την $V_{BE}$



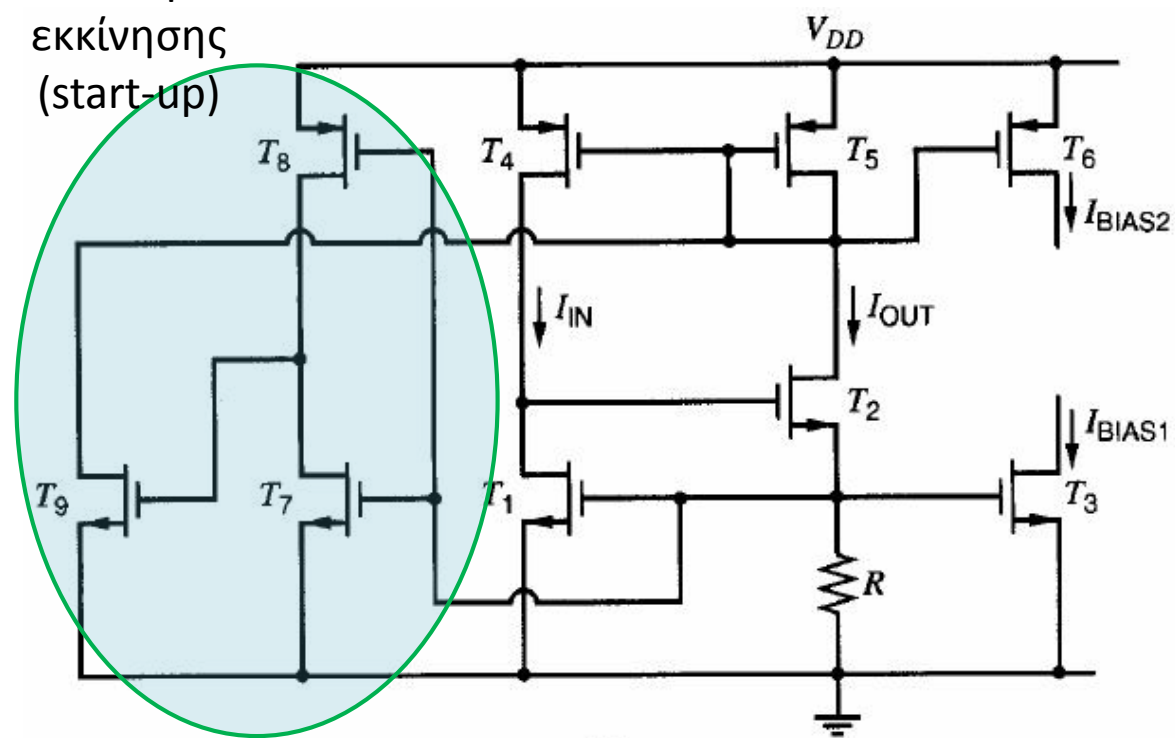
Κύκλωμα εκκίνησης (start-up)



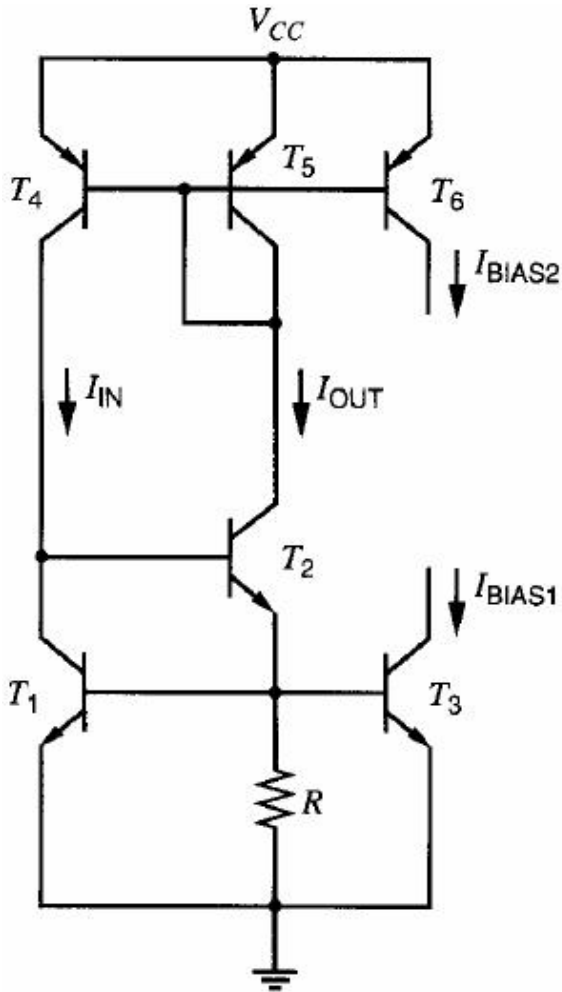
# Ευαισθησία ως προς την τάση τροφοδοσίας Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την $V_t$



Κύκλωμα  
εκκίνησης  
(start-up)



# Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την $V_{BE}$ Εξάρτηση από την θερμοκρασία



Κλασματικός συντελεστής θερμοκρασίας:

$$TC_F = \frac{1}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial T}$$

$$I_{OUT} = \frac{V_{BE1}}{R}$$

$$\frac{\partial I_{OUT}}{\partial T} = \frac{1}{R} \frac{\partial V_{BE1}}{\partial T} - \frac{V_{BE1}}{R^2} \frac{\partial R}{\partial T}$$

$$= I_{OUT} \left( \frac{1}{V_{BE1}} \frac{\partial V_{BE1}}{\partial T} - \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \right)$$

$$TC_F = \frac{1}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial T} = \frac{1}{V_{BE1}} \frac{\partial V_{BE1}}{\partial T} - \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T}$$

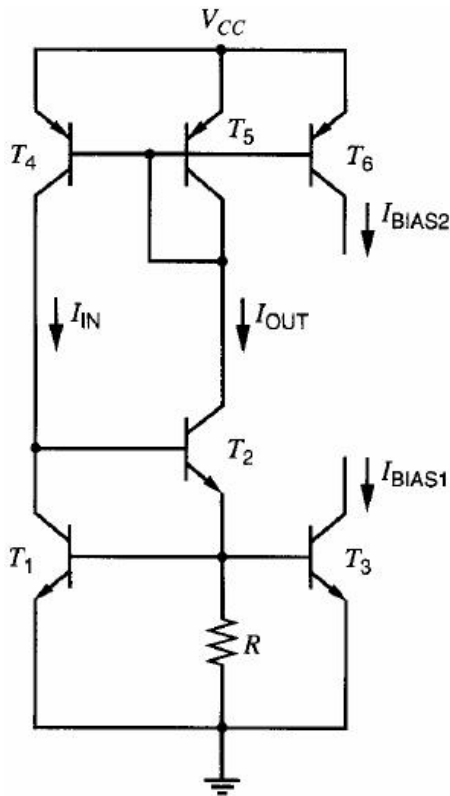
Αρνητικός

Θετικός



# Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την $V_{BE}$

## Παράδειγμα υπολογισμού



Για το  $T_1$  είναι  $I_S = 10^{-14} \text{ A}$ ,  $\partial V_{BE} / \partial T = -2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ,  $(1/R)(\partial R / \partial T) = +1500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  και  $I_{OUT} = 100 \text{ }\mu\text{A}$ . Ζητείται η τιμή της  $R$  και ο κλασματικός συντελεστής θερμοκρασίας  $TC_F$ .

$$V_{BE1} = V_T \ln \frac{I_{IN}}{I_{S1}} \Rightarrow V_{BE1} = V_T \ln \frac{100 \text{ }\mu\text{A}}{10^{-14} \text{ A}} = 598 \text{ mV}$$

$$I_{OUT} = \frac{V_{BE1}}{R} \Rightarrow R = \frac{598 \text{ mV}}{0.1 \text{ mA}} = 5.98 \text{ k}\Omega$$

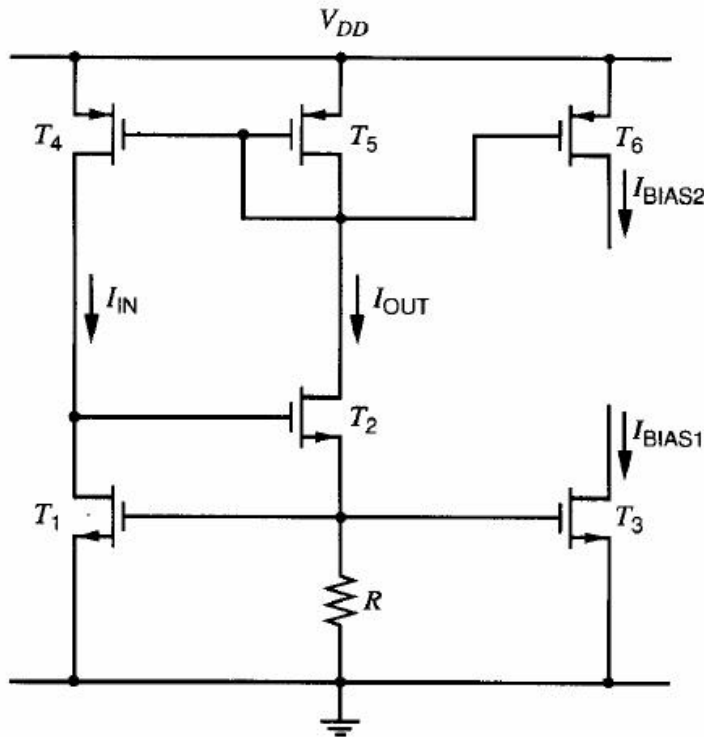
$$TC_F \approx \frac{-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}}{598 \text{ mV}} - 1.5 \times 10^{-3} \approx -3.3 \times 10^{-3} - 1.5 \times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow TC_F \approx -4.8 \times 10^{-3}/^\circ\text{C} = -4800 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$



# Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την $V_t$ Εξάρτηση από την θερμοκρασία

Κλασματικός συντελεστής θερμοκρασίας:



$$TC_F = \frac{1}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial T}$$

$$I_{OUT} = \frac{V_{GS1}}{R} \approx \frac{V_t}{R}$$

$$TC_F = \frac{1}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial T} \approx \frac{1}{V_t} \frac{\partial V_t}{\partial T} - \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T}$$

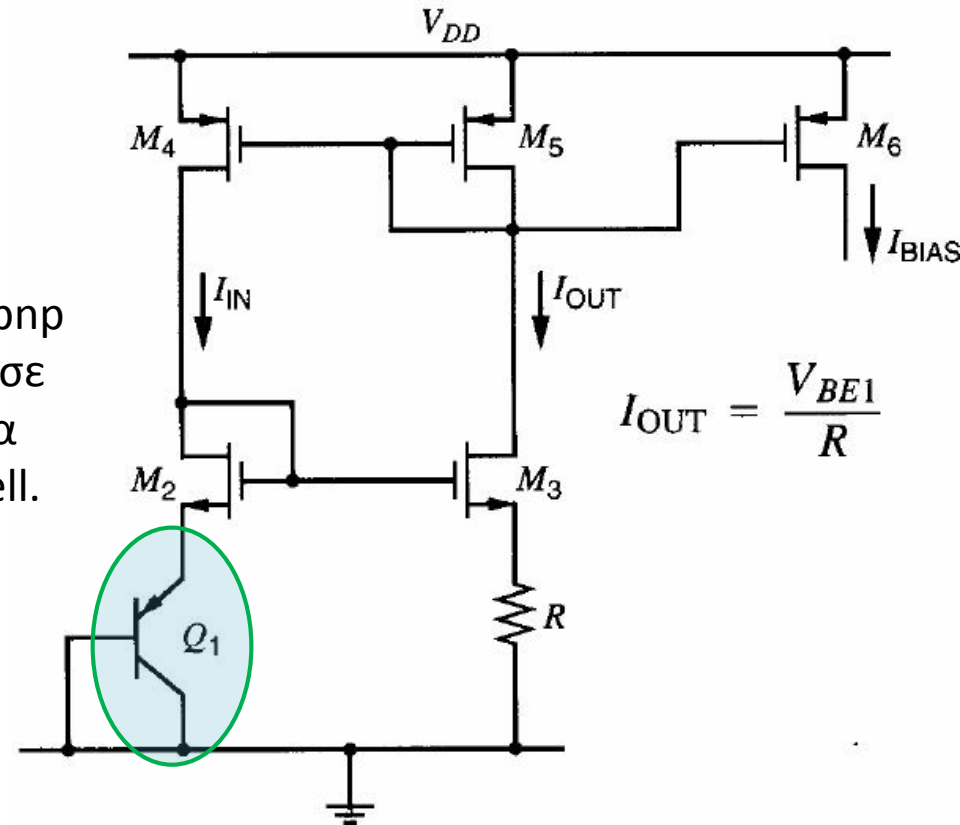
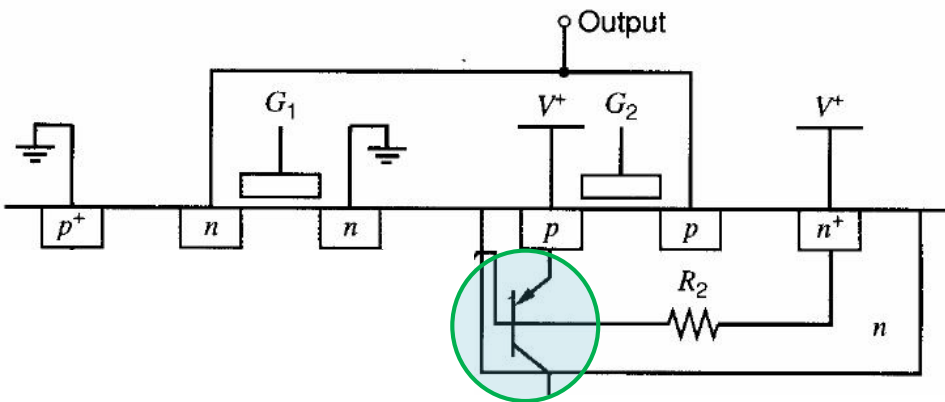
Τιμή συντελεστή παρόμοια με εκείνη της πηγής με αναφορά στην  $V_{BE}$ .





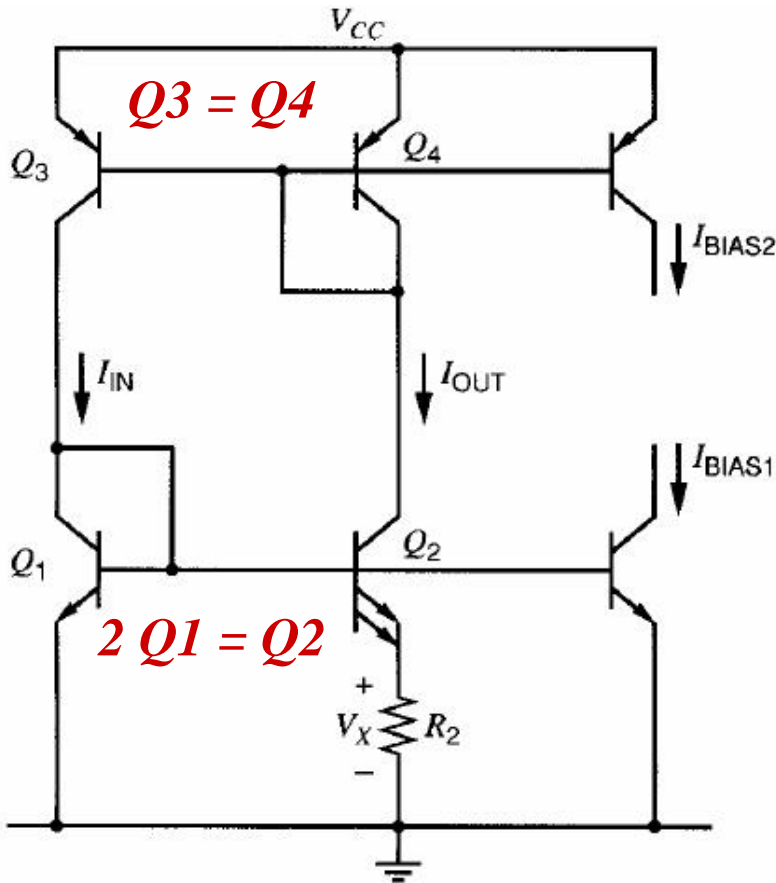
# Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την $V_{BE}$ σε τεχνολογία CMOS

Παρασιτικό pnp τρανζίστορ σε τεχνολογία CMOS n-well.



$$I_{OUT} = \frac{V_{BE1}}{R}$$

# Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την θερμική τάση $V_T$ Εξάρτηση από την θερμοκρασία



$$I_{OUT} R_2 = V_T \ln \frac{I_{IN}}{I_{OUT}} \frac{I_{S2}}{I_{S1}}$$

$$I_{OUT} R_2 = V_T \ln \frac{I_{IN}}{I_{OUT}} \frac{I_{S2}}{I_{S1}} = V_T \ln 2$$

$$I_{OUT} = \frac{V_T}{R_2} \ln 2$$

$$\frac{\partial I_{OUT}}{\partial T} = (\ln 2) \frac{R_2 \frac{\partial V_T}{\partial T} - V_T \frac{\partial R_2}{\partial T}}{R_2^2}$$

$$= \frac{V_T}{R_2} (\ln 2) \left( \frac{1}{V_T} \frac{\partial V_T}{\partial T} - \frac{1}{R_2} \frac{\partial R_2}{\partial T} \right)$$

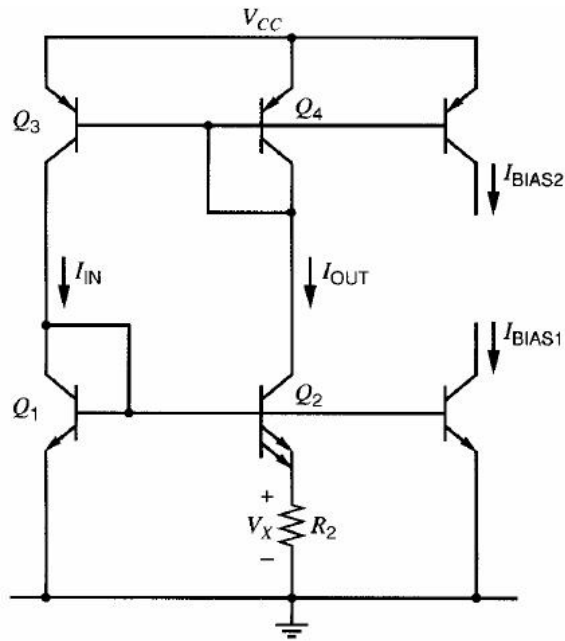
$$TC_F = \frac{1}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial T} = \frac{1}{V_T} \frac{\partial V_T}{\partial T} - \frac{1}{R_2} \frac{\partial R_2}{\partial T}$$

Τιμή συντελεστή πολύ μικρότερη από εκείνη της πηγής με αναφορά στην  $V_{BE}$ , αφού οι δύο ευαισθησίες στο δεξί μέλος είναι θετικές.



# Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την $V_T$

## Παράδειγμα υπολογισμού



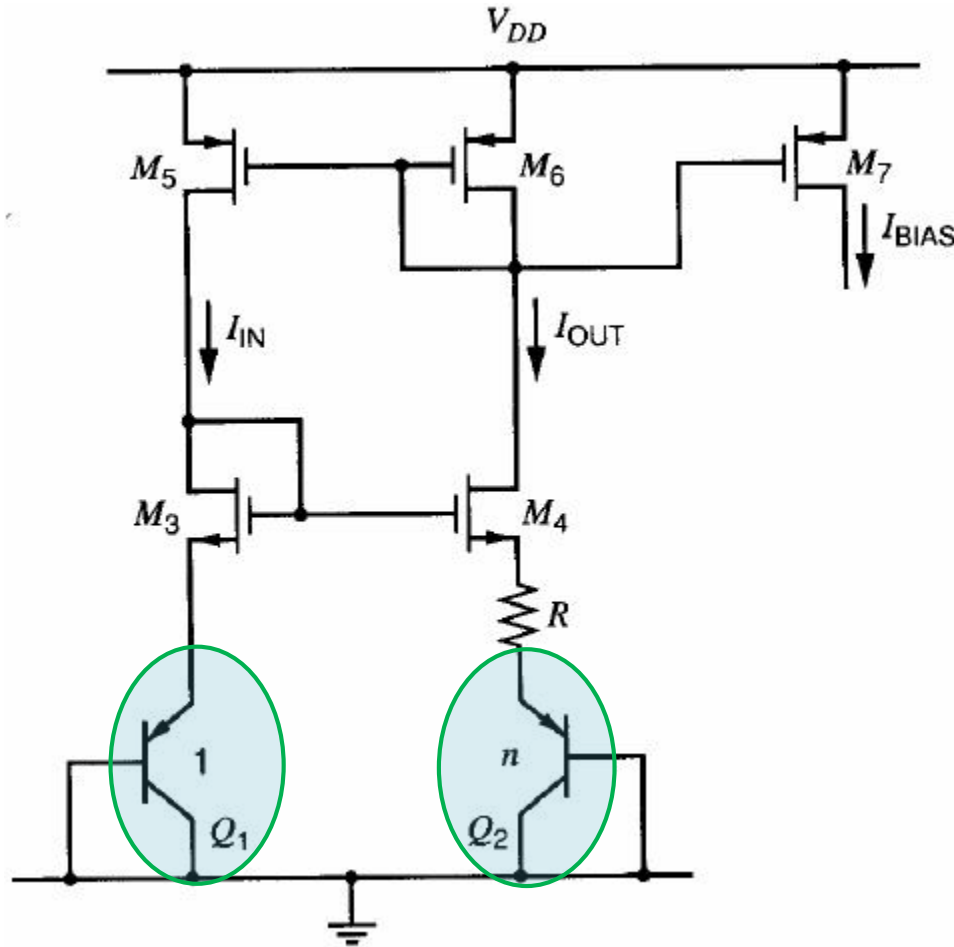
Είναι  $(1/R)(\partial R/\partial T) = +1500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ,  $I_{OUT} = 100 \mu\text{A}$  και  $T = 300^\circ\text{K}$ . Ζητείται η τιμή της  $R_2$  και ο κλασματικός συντελεστής θερμοκρασίας  $TC_F$ .

$$I_{OUT} = \frac{V_T}{R_2} \ln 2 \Rightarrow R_2 = \frac{V_T (\ln 2)}{I_{OUT}} = \frac{(26 \text{ mV})(\ln 2)}{100 \mu\text{A}} \approx 180 \Omega$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial T} &= \frac{1}{V_T} \frac{\partial V_T}{\partial T} - 1500 \times 10^{-6} = \frac{1}{V_T} \frac{V_T}{T} - 1500 \times 10^{-6} \\ &= \frac{1}{T} - 1500 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{I_{OUT}} \frac{\partial I_{OUT}}{\partial T} \approx 3300 \times 10^{-6} - 1500 \times 10^{-6} = 1800 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$

# Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την θερμική τάση $V_T$ σε τεχνολογία CMOS



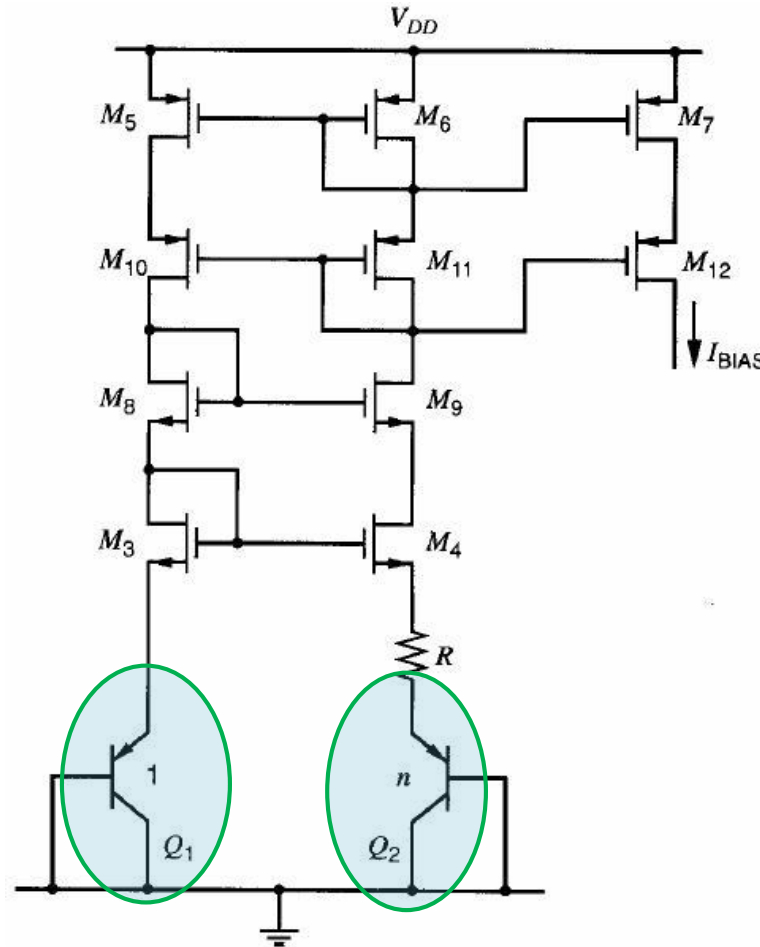
$$I_{OUT} = \frac{V_T \ln(n)}{R}$$

Τα M3 και M4 πρέπει να είναι απόλυτα ταιριασμένα.

Παρασιτικά pnp τρανζίστορ σε τεχνολογία CMOS n-well.



# Πηγή αυτοπόλωσης με αναφορά την θερμική τάση $V_T$ σε τεχνολογία CMOS



$$I_{OUT} = \frac{V_T \ln(n)}{R}$$

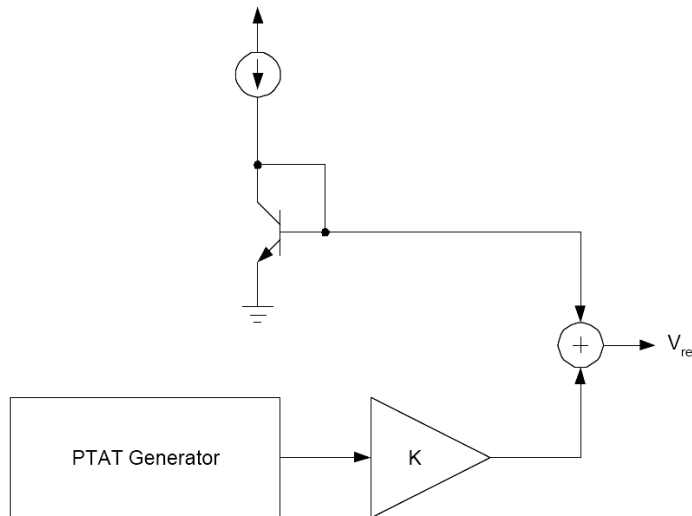
Χρήση  
κασκοδικών  
τρανζίστορ για  
βελτίωση  
ακρίβειας και  
απόρριψης  
τροφοδοσίας.

Παρασιτικά pnp  
τρανζίστορ σε  
τεχνολογία  
CMOS n-well.



# Κύκλωμα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης (Band-gap reference)

- Κύκλωμα αναφοράς ιδανικά ανεξάρτητο της θερμοκρασίας.
- Πρακτικά ανεξάρτητο της θερμοκρασίας για συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος.
- Επειδή, πολλές παράμετροι της τεχνολογίας μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, ένα τέτοιο κύκλωμα θα είναι και ανεξάρτητο της τεχνολογίας!
- Αρχή λειτουργίας: Πρόσθεση δυο σημάτων με αντίθετους θερμοκρασιακούς συντελεστές.



$$V_{ref} = V_{BE} + K \cdot V_{PTAT}$$

$V_{PTAT}$  : Τάση ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας. Δημιουργείται από τη διαφορά τάσεων δυο επαφών ρη με διαφορετικά ρεύματα.



# Band-gap reference (1/2)

- Έστω ότι  $V_{o1} = V_{o2}$

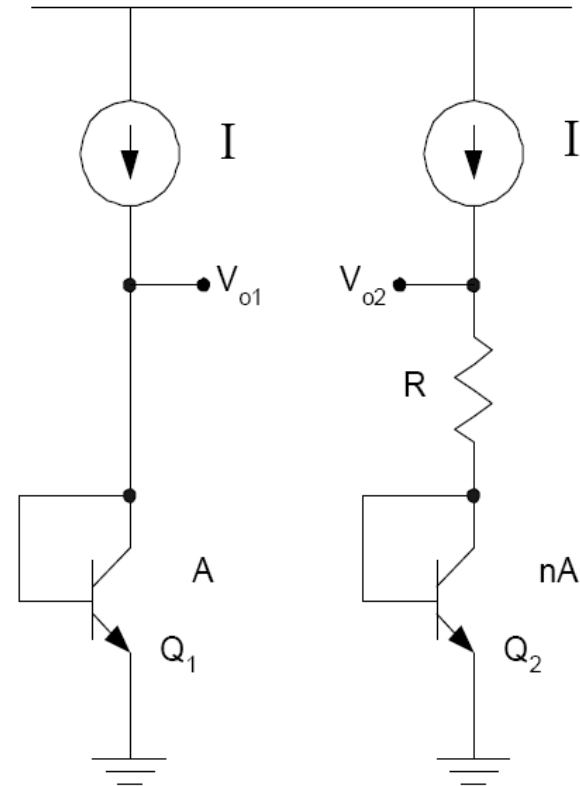
- Τότε:

$$V_{BE1} = V_{BE2} + IR$$

- Επομένως:

$$IR = V_{BE1} - V_{BE2}$$

- Το πετύχαμε!
- Απομένει λοιπόν να αναπαράγουμε το ρεύμα της αντίστασης.



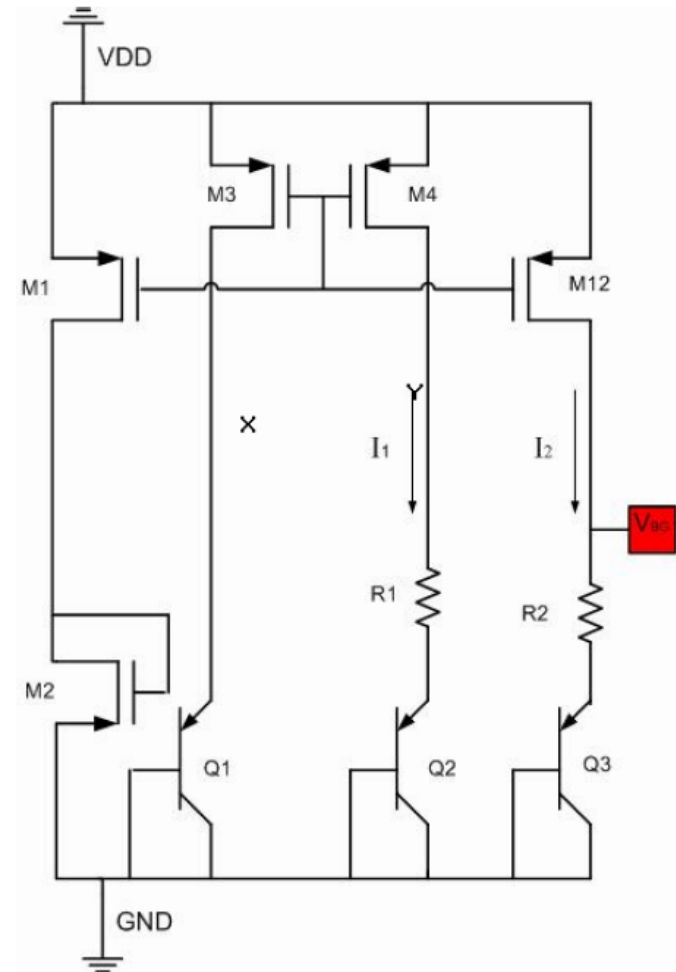
# Band-gap reference (2/2)

- Αφού  $V_{BE1} = V_T \ln(I_c/I_s)$
- $V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln(\kappa) = IR_1$
- Επομένως

$$V_{ref} = V_{BE3} + \frac{V_T \ln(n)}{R_1} R_2 = 1.26V$$

Αρνητικός  
θερμοκρασιακός  
συντελεστής

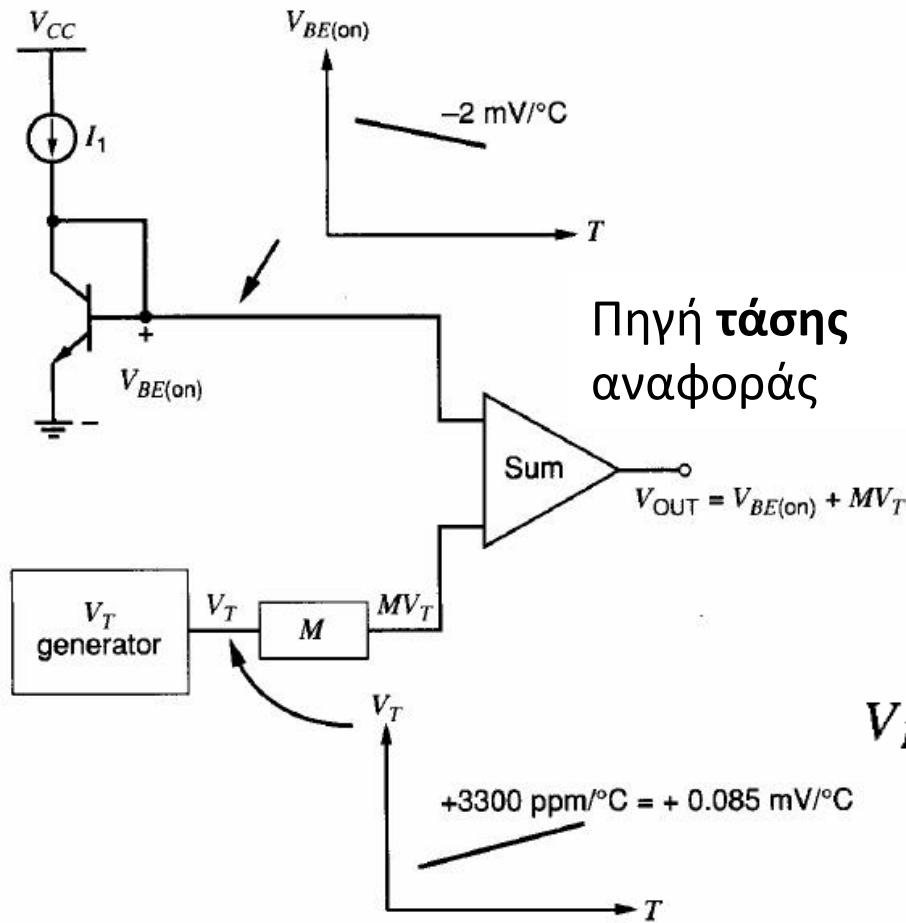
Θετικός  
θερμοκρασιακός  
συντελεστής





# Πόλωση με χαμηλή ευαισθησία ως προς την θερμοκρασία

## Διπολικό κύκλωμα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης (band-gap reference) (1/3)



$$V_{BE(on)} = V_T \ln \frac{I_1}{I_S} \quad \boxed{V_{G0} = 1.205 \text{ V}}$$

$$I_S = \frac{qAn_i^2 \bar{D}_n}{Q_B} = Bn_i^2 \bar{D}_n = B'n_i^2 T \bar{\mu}_n$$

$$\bar{\mu}_n = CT^{-n} \quad n_i^2 = DT^3 \exp\left(-\frac{V_{G0}}{V_T}\right)$$

$$V_{BE(on)} = V_T \ln\left(I_1 T^{-\gamma} E \exp\frac{V_{G0}}{V_T}\right)$$

$$\gamma = 4 - n \quad I_1 = GT^\alpha$$

$$V_{BE(on)} = V_{G0} - V_T[(\gamma - \alpha) \ln T - \ln(EG)]$$

$$\boxed{V_{OUT} = V_{BE(on)} + MV_T} \Rightarrow$$

$$V_{OUT} = V_{G0} - V_T(\gamma - \alpha) \ln T + V_T[M + \ln(EG)]$$



# Πόλωση με χαμηλή ευαισθησία ως προς την θερμοκρασία

## Διπολικό κύκλωμα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης (band-gap reference) (2/3)

$$V_{\text{OUT}} = V_{G0} - V_T(\gamma - \alpha) \ln T + V_T[M + \ln(EG)]$$

$$0 = \left. \frac{dV_{\text{OUT}}}{dT} \right|_{T=T_0} = \frac{V_{T0}}{T_0} [M + \ln(EG)] - \frac{V_{T0}}{T_0} (\gamma - \alpha) \ln T_0 - \frac{V_{T0}}{T_0} (\gamma - \alpha)$$

$$[M + \ln(EG)] = (\gamma - \alpha) \ln T_0 + (\gamma - \alpha)$$

$$\Rightarrow V_{\text{OUT}} = V_{G0} + V_T(\gamma - \alpha) \left( 1 + \ln \frac{T_0}{T} \right)$$

$$V_{\text{OUT}} \Big|_{T=T_0} = V_{G0} + V_{T0}(\gamma - \alpha)$$

Για παράδειγμα, για μηδενικό  $TC_F$

στους 27°C, με  $\gamma=3.2$  και  $\alpha=1$  θα είναι:  $V_{\text{OUT}} \Big|_{T=T_0=25^\circ\text{C}} = V_{G0} + 2.2V_{T0}$

$$\Rightarrow V_{\text{OUT}} \Big|_{T=T_0=25^\circ\text{C}} = 1.205 \text{ V} + (2.2)(0.026 \text{ V}) = 1.262 \text{ V}$$



# Πόλωση με χαμηλή ευαισθησία ως προς την θερμοκρασία

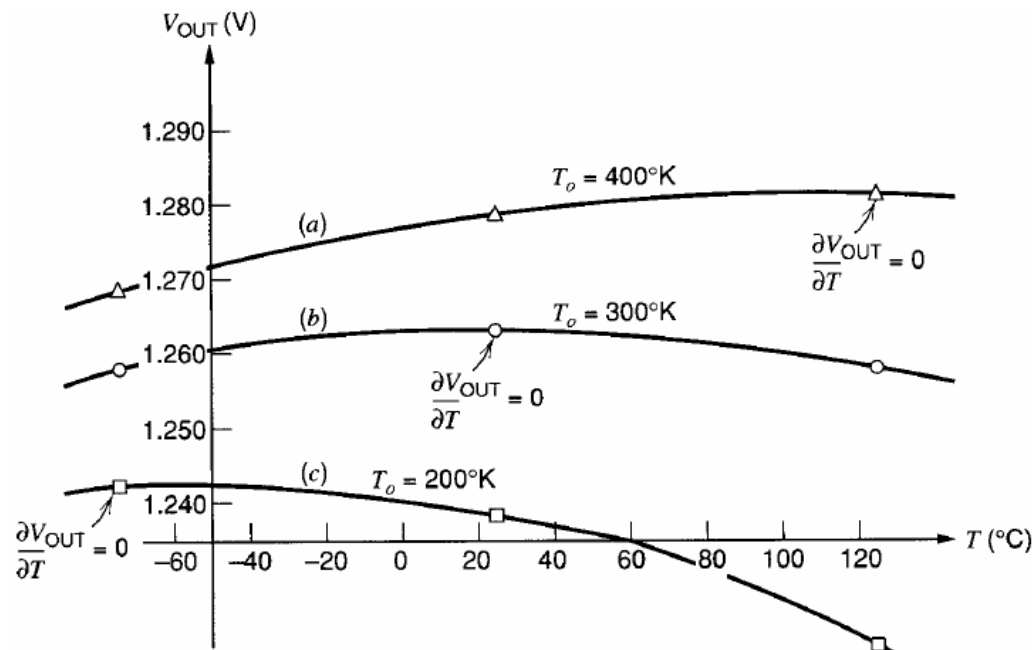
## Διπολικό κύκλωμα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης (band-gap reference) (3/3)

$$\frac{dV_{OUT}}{dT} = \frac{1}{T} \left[ V_T(\gamma - \alpha) \left( 1 + \ln \frac{T_0}{T} \right) \right] - \frac{V_T}{T}(\gamma - \alpha)$$

$$= (\gamma - \alpha) \frac{V_T}{T} \left( \ln \frac{T_0}{T} \right)$$

$$\ln \frac{T_0}{T} = \ln \left( 1 + \frac{T_0 - T}{T} \right) \approx \frac{T_0 - T}{T}$$

$$\frac{dV_{OUT}}{dT} \approx (\gamma - \alpha) \frac{V_T}{T} \left( \frac{T_0 - T}{T} \right)$$



# Διπολικό κύκλωμα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης

## Παράδειγμα υπολογισμού

Κύκλωμα τάσης αναφοράς band-gap σχεδιάστηκε για έξοδο 1.262 V και να έχει μηδενικό  $TC_F$  στους 27 °C. Λόγω διακύμανσης όμως των παραμέτρων η τάση εξόδου στους 27 °C είναι 1.280 V. Ζητείται η πραγματική θερμοκρασία μηδενισμού του  $TC_F$ , να γραφεί η  $V_{OUT}$  σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και να βρεθεί ο  $TC_F$  στους 27°C. ( $\gamma=3.2$ ,  $\alpha=1$ ).

$$V_{OUT} = V_{G0} + V_T(\gamma - \alpha) \left( 1 + \ln \frac{T_0}{T} \right) \Rightarrow 1.280 \text{ V} = 1.205 + (0.026 \text{ V})(2.2) \left( 1 + \ln \frac{T_0}{300^\circ\text{K}} \right)$$

$$\Rightarrow T_0 = 300^\circ\text{K} \left( \exp \frac{18 \text{ mV}}{57 \text{ mV}} \right) = 411^\circ\text{K} \quad (= 138^\circ\text{C})$$

$$V_{OUT} = 1.205 \text{ V} + 57 \text{ mV} \left( 1 + \ln \frac{411^\circ\text{K}}{T} \right)$$

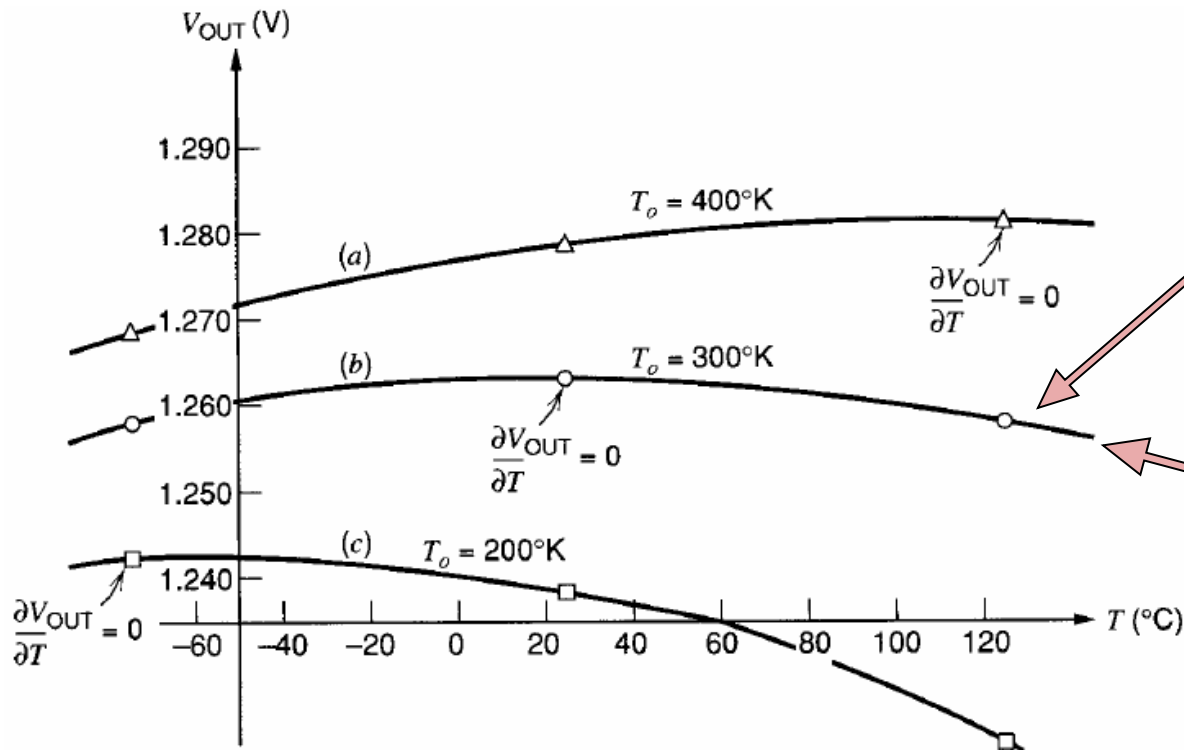
$$\frac{dV_{OUT}}{dT} \approx (\gamma - \alpha) \frac{V_T}{T} \left( \frac{T_0 - T}{T} \right) \Rightarrow \frac{dV_{OUT}}{dT} \approx (2.2) \frac{26 \text{ mV}}{300^\circ\text{K}} \left( \frac{411 - 300}{300} \right) \approx 70 \mu\text{V}/^\circ\text{K} = 70 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

$$TC_F = \frac{1}{V_{OUT}} \frac{dV_{OUT}}{dT} \approx \frac{70 \mu\text{V}/^\circ\text{C}}{1.280 \text{ V}} \approx 55 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$



# Διπολικό κύκλωμα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης Ενεργός θερμικός συντελεστής

$$TC_{F(\text{eff})} = \frac{1}{V_{\text{OUT}}} \left( \frac{V_{\text{MAX}} - V_{\text{MIN}}}{T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}}} \right)$$

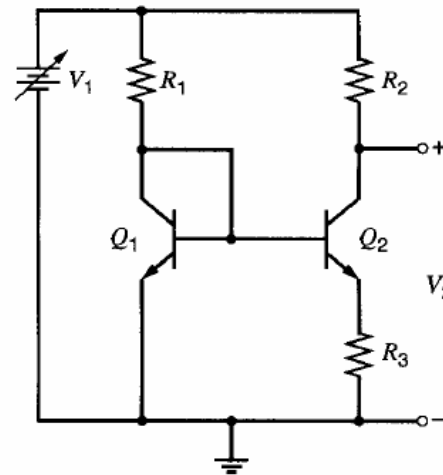
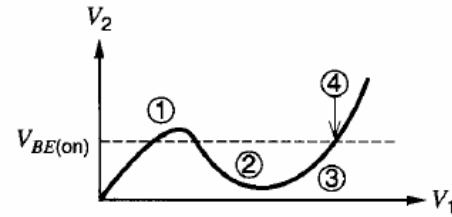
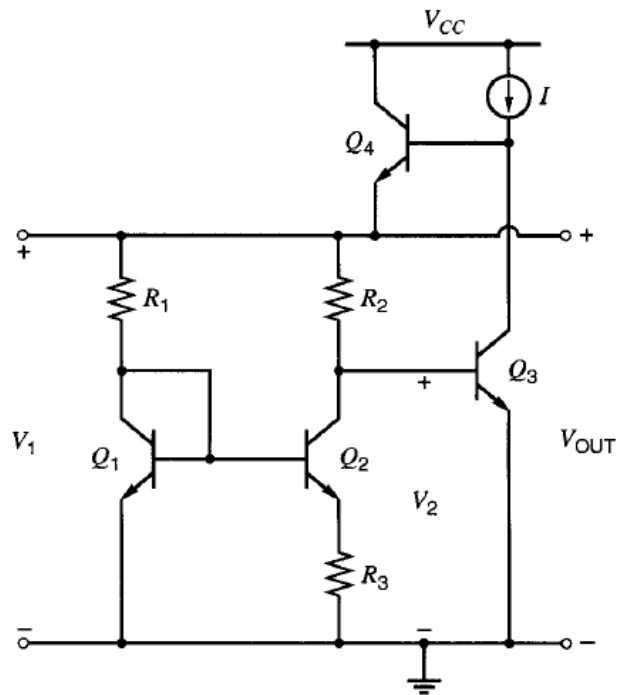


$-55^\circ\text{C} < T < 125^\circ\text{C} \Rightarrow$   
 $TC_F = 44 \text{ ppm}/^\circ\text{C}.$

$0^\circ\text{C} < T < 70^\circ\text{C} \Rightarrow$   
 $TC_F = 17 \text{ ppm}/^\circ\text{C}.$



# Διπολικό κύκλωμα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης Υλοποίηση (1/2)



Μειονέκτημα η εξάρτηση του  $I$  από την τάση τροφοδοσίας.

$$V_{R3} = \Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_1 I_{S2}}{I_2 I_{S1}} = V_T \ln \frac{R_2 I_{S2}}{R_1 I_{S1}}$$

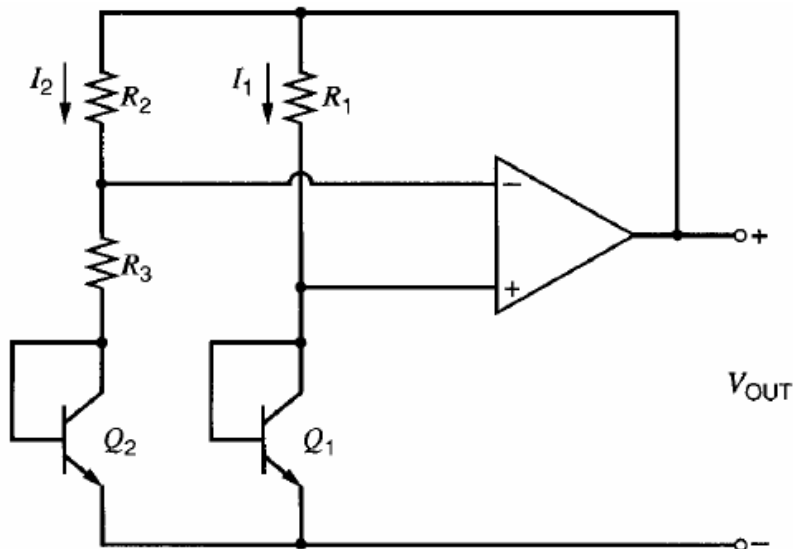
$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_3} V_{R3} = \frac{R_2}{R_3} \Delta V_{BE} = \frac{R_2}{R_3} V_T \ln \frac{R_2 I_{S2}}{R_1 I_{S1}}$$

$$V_{OUT} = V_{BE3} + V_{R2} = V_{BE3} + M V_T$$



# Διπολικό κύκλωμα με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης Υλοποίηση (2/2)

$$V_{R3} = \Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln \frac{I_1 I_{S2}}{I_2 I_{S1}} = V_T \ln \frac{R_2 I_{S2}}{R_1 I_{S1}}$$



$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_3} V_{R3} = \frac{R_2}{R_3} \Delta V_{BE} = \frac{R_2}{R_3} V_T \ln \frac{R_2 I_{S2}}{R_1 I_{S1}}$$

Proportional To Absolute Temperature,  
PTAT.

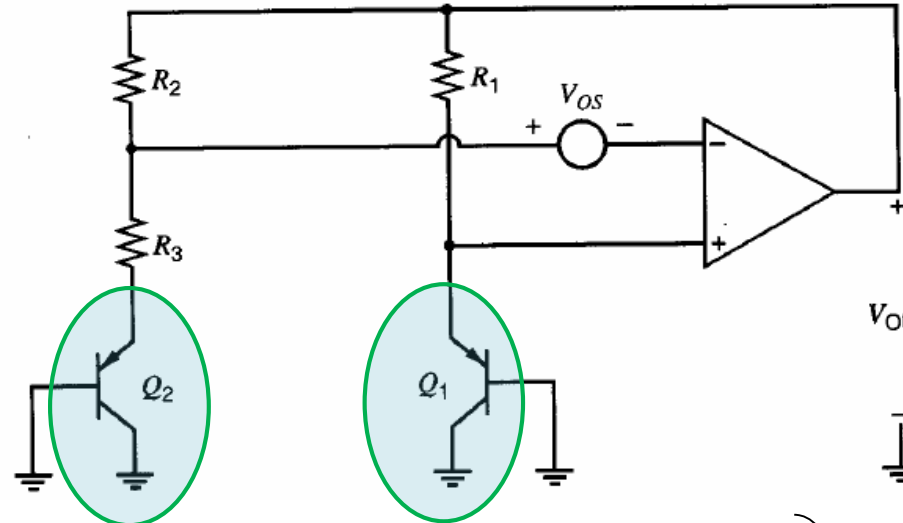
$$\begin{aligned} V_{OUT} &= V_{BE2} + V_{R3} + V_{R2} = V_{BE2} + \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \Delta V_{BE} \\ &= V_{BE2} + \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) V_T \ln \frac{R_2 I_{S2}}{R_1 I_{S1}} = V_{BE2} + M V_T \end{aligned}$$

# Κύκλωμα CMOS με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης

Παρασιτικά ηχη τρανζίστορ σε τεχνολογία CMOS n-well.

$$V_{R3} = V_{EB1} - V_{EB2} + V_{OS} = \Delta V_{EB} + V_{OS}$$

$$V_{R2} = \frac{R_2}{R_3} V_{R3} = \frac{R_2}{R_3} (V_{EB1} - V_{EB2} + V_{OS}) = \frac{R_2}{R_3} (\Delta V_{EB} + V_{OS})$$



$$V_{OUT} = V_{EB2} + V_{R3} + V_{R2}$$

$$= V_{EB2} + \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) (\Delta V_{EB} + V_{OS})$$

$$V_{OUT} = V_{EB2} + \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) (\Delta V_{EB}) + V_{OS(out)}$$

$$V_{OS(out)} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) V_{OS}$$

$$\left. \frac{dV_{OUT}}{dT} \right|_{T=T_0} = - \left( \frac{V_{OS(out)}}{\Delta V_{EB}} \right) \frac{d\Delta V_{EB}}{dT} \quad \left. \frac{dV_{OUT}}{dT} \right|_{T=T_0} = - \frac{V_{OS(out)}}{HV_T} \frac{HV_T}{T} \bigg|_{T=T_0} = - \frac{V_{OS(out)}}{T_0}$$

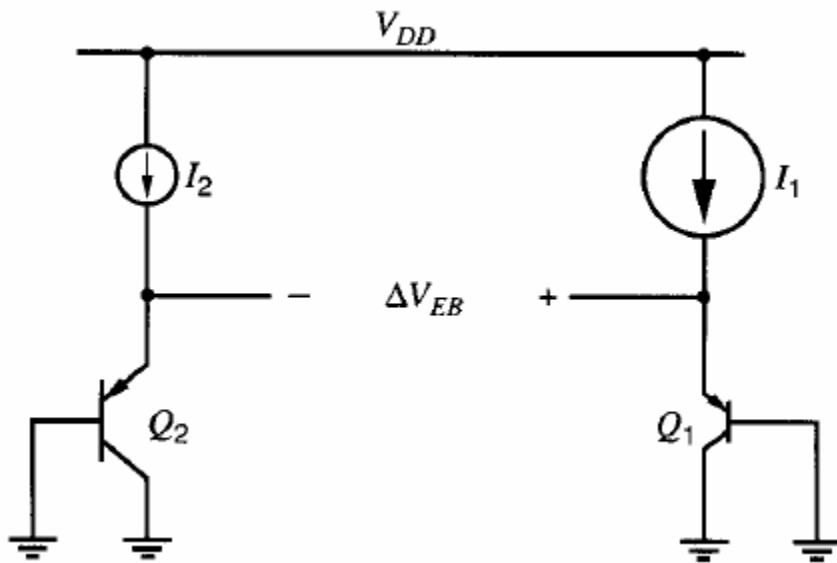
$$\Delta V_{EB} = HV_T$$

Επιθυμητό μεγάλο  $\Delta V_{EB}$ .



# Κύκλωμα CMOS με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης

## Μεγιστοποίηση $\Delta V_{EB}$ (1/2)



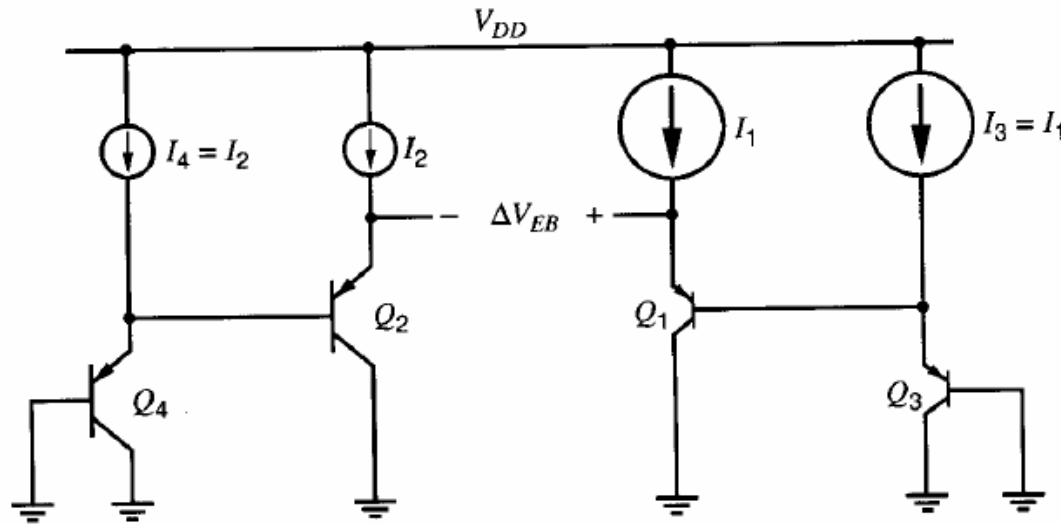
$$\Delta V_{EB} = V_{EB1} - V_{EB2} = V_T \ln \left( \frac{I_1 I_{S2}}{I_2 I_{S1}} \right)$$

Για πρακτικές τιμές λόγων ρευμάτων περίπου 10, προκύπτει  $\Delta V_{EB} = 120$  mV. Για διπλασιασμό της  $\Delta V_{EB}$  ( $\Delta V_{EB} = 240$  mV) πρέπει οι λόγοι από 10 να γίνουν 100 που συνεπάγεται 100πλασιασμό της επιφάνειας πυριτίου.



# Κύκλωμα CMOS με αναφορά την τάση χάσματος ζώνης

## Μεγιστοποίηση $\Delta V_{EB}$ (2/2)



$$\Delta V_{EB} = V_{EB3} - V_{EB4} + V_{EB1} - V_{EB2}$$

$$I_3 = I_1, I_4 = I_2 \quad I_{S3} = I_{S1} I_{S4} = I_{S2}$$

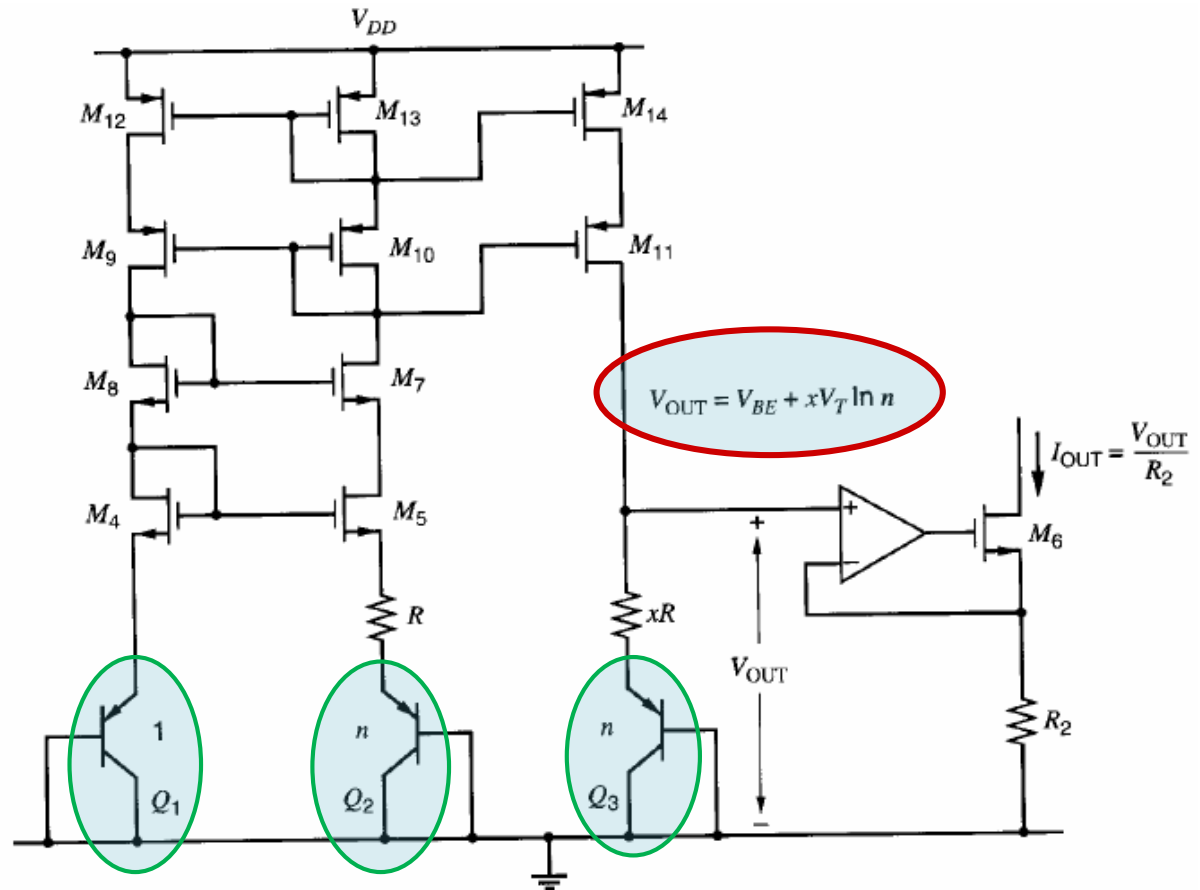
$$\Delta V_{EB} = 2(V_{EB1} - V_{EB2}) = 2V_T \ln \left( \frac{I_1 I_{S2}}{I_2 I_{S1}} \right)$$

Για διπλασιασμό της  $\Delta V_{EB}$  αρκεί ο διπλασιασμός της επιφάνειας πυριτίου.



# Κύκλωμα CMOS band-gap υψηλών επιδόσεων

Παρασιτικά  
ρηρ τρανζίστορ  
σε τεχνολογία  
CMOS n-well.



Παράδειγμα κυκλώματος με αυτοπόλωση και αναφορά την θερμική τάση  $V_T$ .



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙΙ, Κυκλώματα αναφοράς». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: [http://opencourses.auth.gr/eclass\\_courses](http://opencourses.auth.gr/eclass_courses).



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

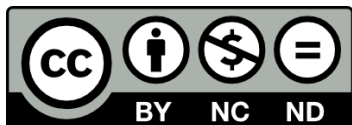
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2013-2014



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

---

# Σημειώματα

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

