

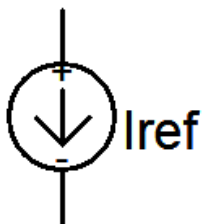
# Задаващи източници на ток

---

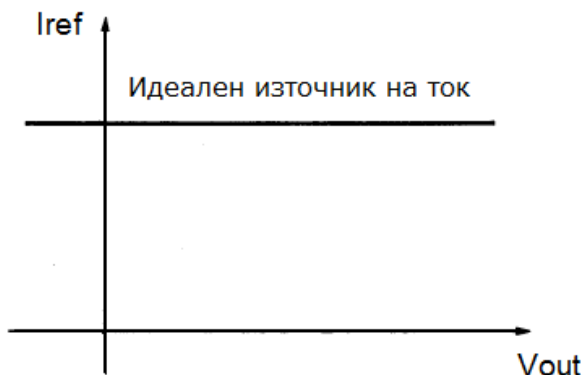
## Проектиране на аналогови интегрални схеми

Емил Д. Манолов, [edm@tu-sofia.bg](mailto:edm@tu-sofia.bg), [edmanolov@gmail.com](mailto:edmanolov@gmail.com)  
кат. “Електронна техника”, Технически университет - София

# ОСНОВНИ ИЗИСКВАНИЯ



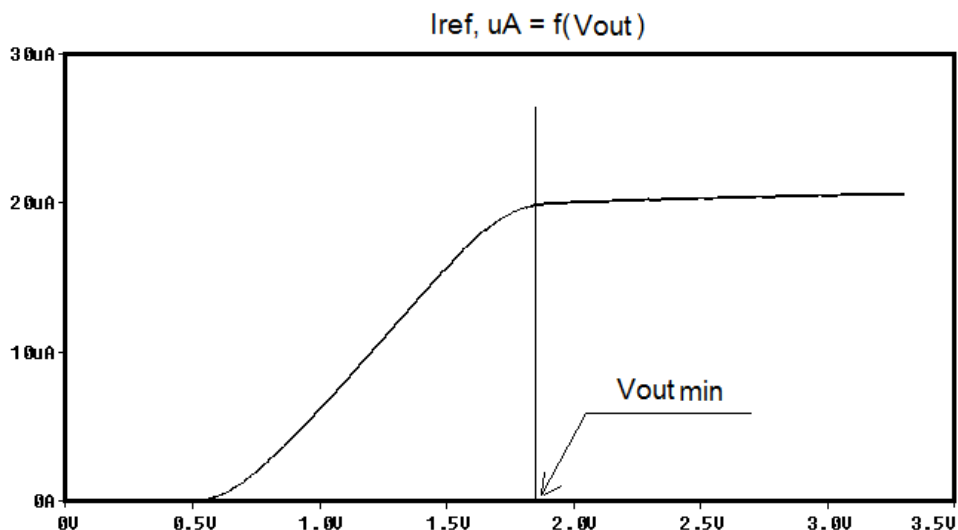
Графично означение



Изходна характеристика

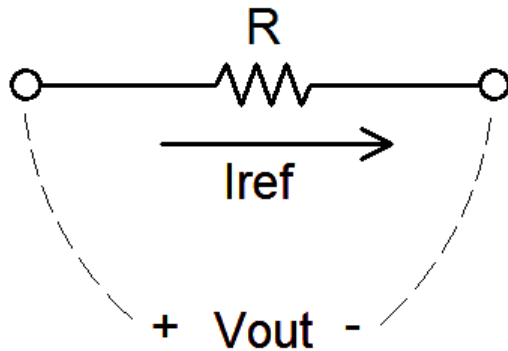
Задаващите източници на ток осигуряват изходен ток с висока точност и стабилност.

Идеалният задаващ източник на ток е независим от захранващото напрежение, температурата и вариациите на технологичния процес.



Реален източник на ток

# Резисторът като задаващ източник на ток



Най-простият задаващ източник на ток се реализира с резистор.

В този случай стойността на тока е:

$$I_{ref} = U_{out} / R$$

Температурният коефициент на задаващия източник зависи от използваната технология и е равен на температурния коефициент на резистора.

$$TC I_{ref} = TCR$$

Чувствителността на  $I_{ref}$  към приложеното напрежение  $U_{out}$  е много висока:

$$S_{U_{out}}^{I_{ref}} = \frac{\frac{dI_{ref}}{I_{ref}}}{\frac{dU_{out}}{U_{out}}} \approx \frac{\Delta I_{ref}}{\Delta U_{out}} \frac{U_{out}}{I_{ref}} = \frac{1}{R} R = 1$$

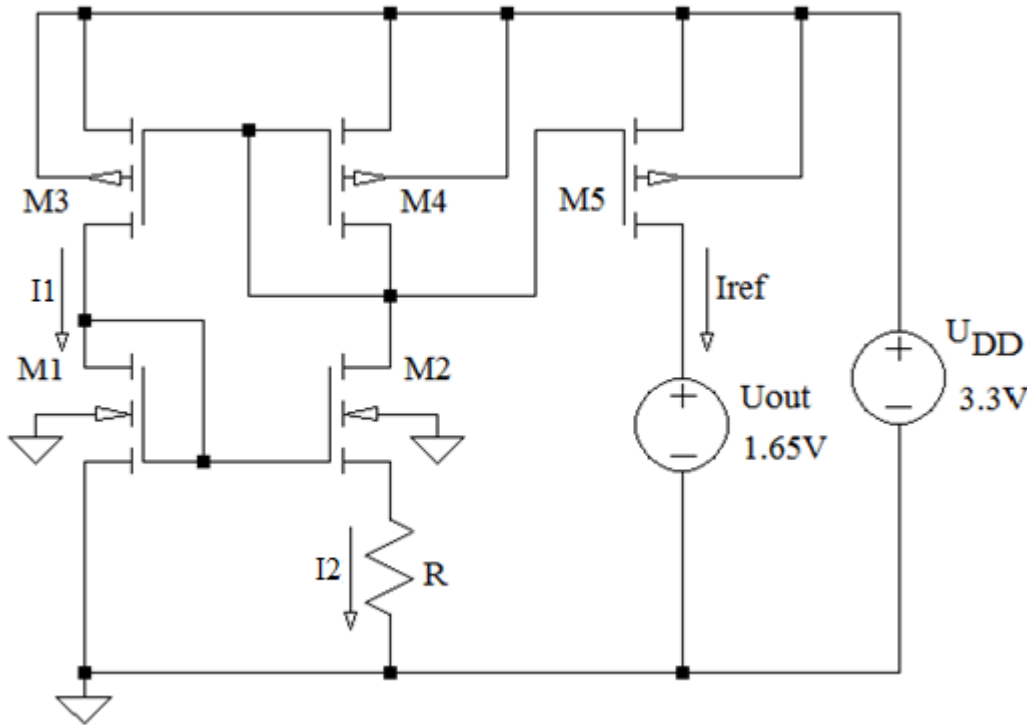
**Токът  $I_{ref}$  е стабилен само ако приложеното напрежение  $U_{out}$  е стабилно.**

# Усъвършенствани задаващи източници на ток

Усъвършенстваните задаващи източници на ток използват като еталон за стабилизиране на  $U_{out}$  :

- праговото напрежение на MOS транзистора  $U_{TN}$ ;
- напрежението на отпушения p-n преход;
- топлинния потенциал  $\varphi_T$  .

# Източник на ток с CMOS транзистор и резистор (при работа на транзисторите в режим на силна инверсия)



$$I_D = \frac{K_n W}{2 L} (U_{GS} - U_{TN})^2 = \frac{K_n W}{2 L} U_{eff}^2$$

$$U_{GS1} = \sqrt{\frac{2I_1}{K_n (W_1/L_1)}} + U_{TN0}$$

$$U_{GS2} = \sqrt{\frac{2I_2}{K_n (W_2/L_2)}} + U_{TN}$$

$$U_{GS1} = U_{GS2} + I_2 R$$

$$W_2/L_2 = m(W_1/L_1)$$

$$\sqrt{\frac{2I_1}{K_n (W_1/L_1)}} + U_{TN0} = \sqrt{\frac{2I_2}{K_n (W_2/L_2)}} + U_{TN} + I_2 R$$

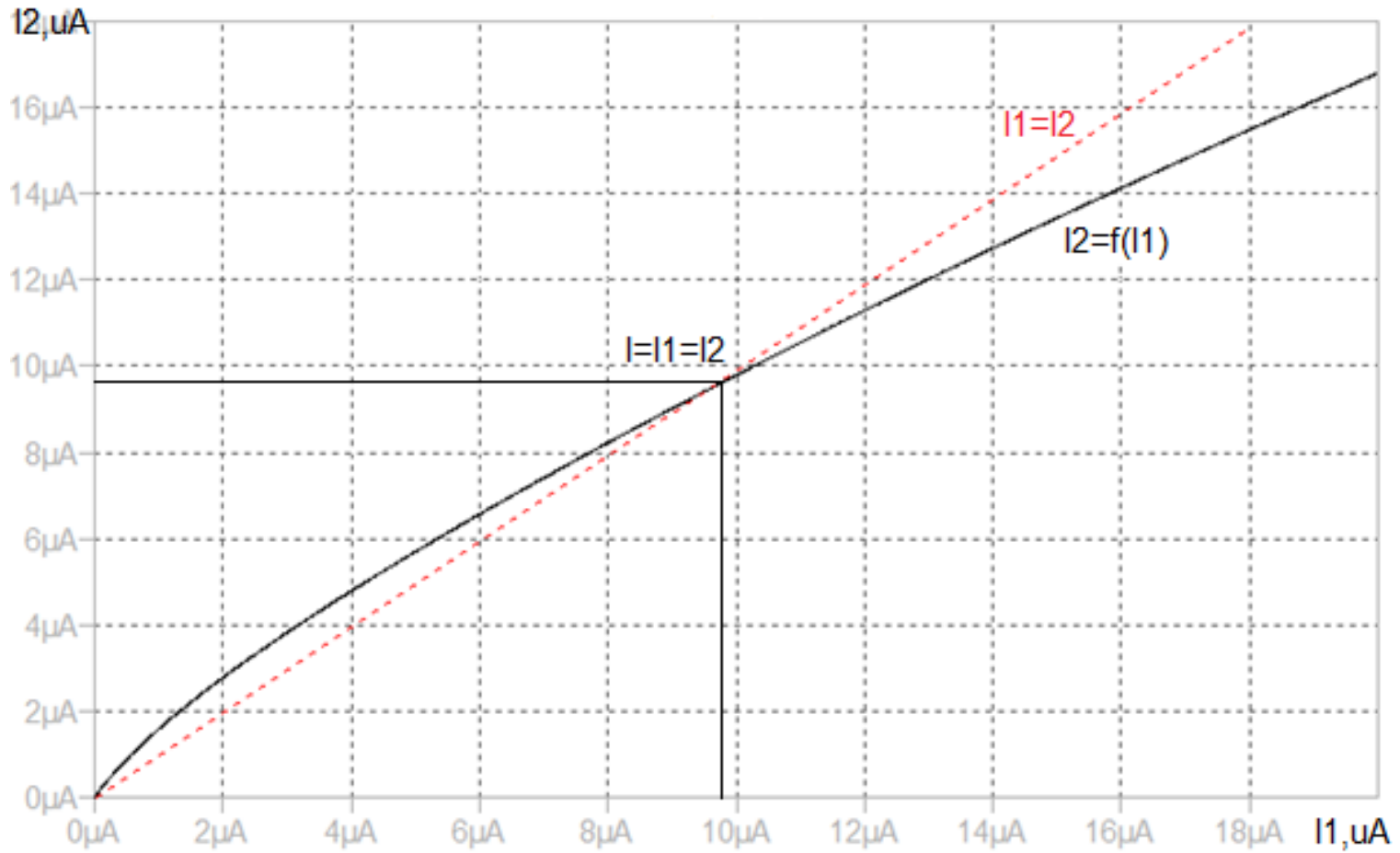
$$I_1 = kI_2$$

Схемата осигурява  
независимост на  $I_1$  и  $I_2$  от  
захранващото напрежение.

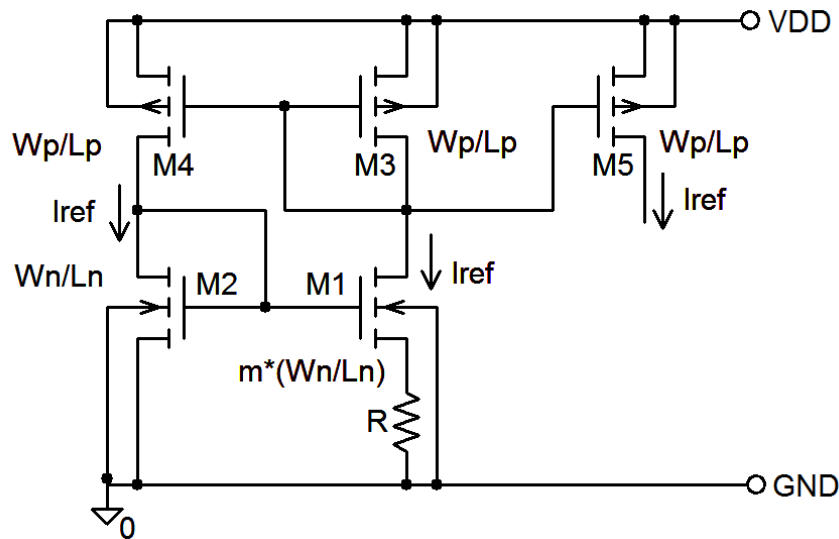
$$U_{TN} = U_{TN0} + \gamma_n \left( \sqrt{U_{SB} + |2\phi_F|} - \sqrt{|2\phi_F|} \right)$$

# Източник на ток с CMOS транзистор и резистор (при работа на транзисторите в режим на силна инверсия)

При  $I_1=I_2=I$  ( $k=1$ ) и  $W_2/L_2=2(W_1/L_1)$  ( $m=2$ )



# Източник на ток с CMOS транзистор и резистор (при работа на транзисторите в режим на слаба инверсия)



$$I_D \cong I_{D0} \frac{W}{L} \exp\left(\frac{U_{GS} - U_{TN}}{n\phi_T}\right)$$

$$U_{GS1} = n\phi_T \ln \frac{I_{ref}}{m I_{D0} (W_n/L_n)} + U_{TN}$$

$$U_{GS2} = n\phi_T \ln \frac{I_{ref}}{I_{D0} (W_n/L_n)} + U_{TN0}$$

$$U_{GS2} = U_{GS1} + I_{ref} R$$

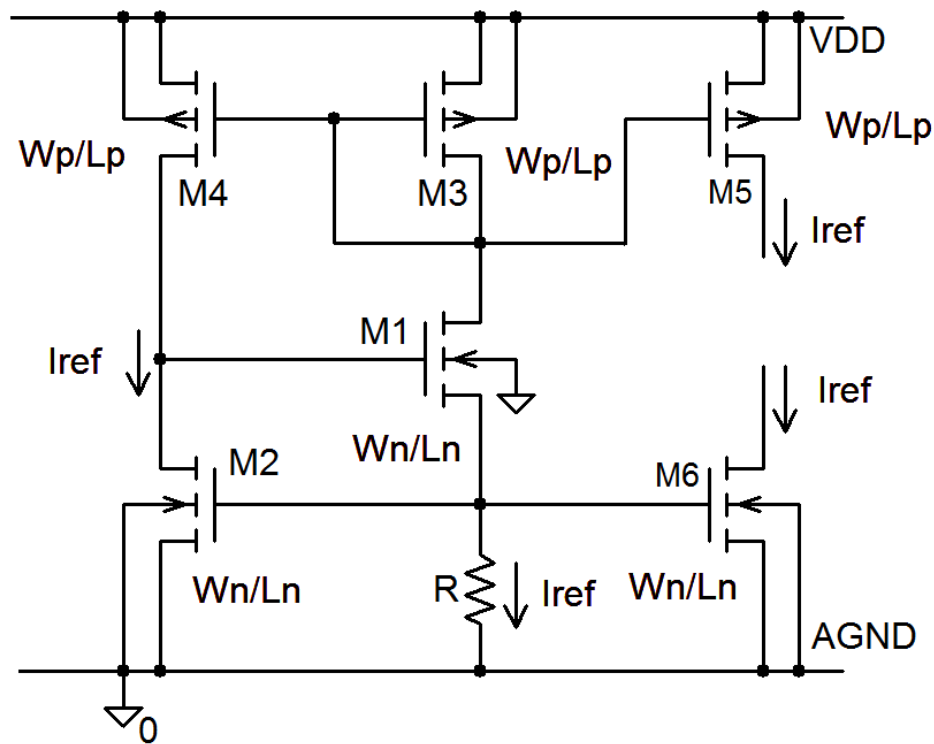
$$I_{ref} = (U_{GS2} - U_{GS1}) / R$$

$$I_{ref} = \left( n\phi_T \ln \frac{I_{ref}}{I_{D0} (W_n/L_n)} + U_{TN0} - n\phi_T \ln \frac{I_{ref}}{m I_{D0} (W_n/L_n)} - U_{TN} \right) / R$$

$$I_{ref} = \frac{n\phi_T \ln(m) + U_{TN0} - U_{TN}}{R}$$

$$U_{TN} = U_{TN0} + \gamma_n \left( \sqrt{U_{SB} + |2\phi_F|} - \sqrt{|2\phi_F|} \right)$$

# Източник на ток пропорционален на праговото напрежение



$$I_{ref} = \frac{U_{GS2}}{R}$$

$$U_{GS2} = U_{TN0} + U_{eff2}$$

$$U_{eff2} = \sqrt{\frac{2I_{ref}}{K_n(W_n/L_n)}}$$

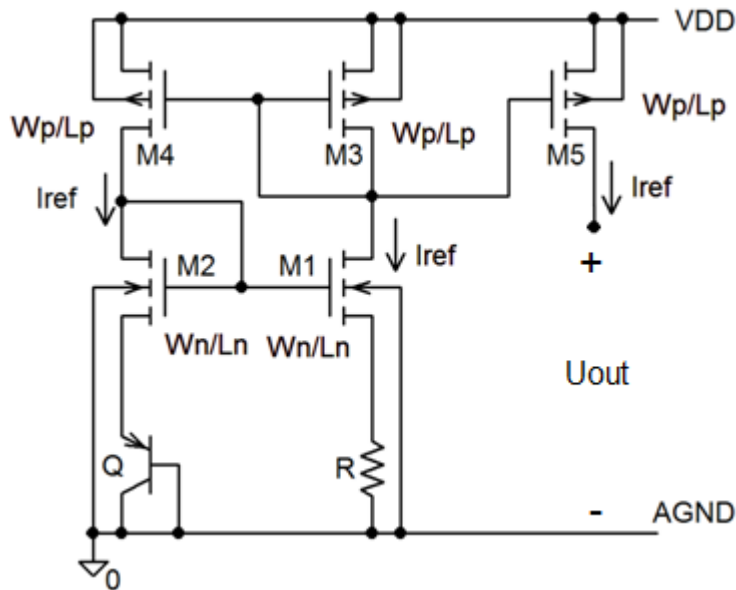
$$I_{ref} = \frac{U_{TN0}}{R} + \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2I_{ref}}{K_n(W_n/L_n)}}$$

Независимост на  $I_{ref}$  от захранващото напрежение.

Отрицателна стойност на температурния коефициент  $TCI_{ref}$ , обусловена от отрицателната стойност на  $TCU_{TN0}$  и положителната стойност на  $TCR$ .



# Източник на ток с диод



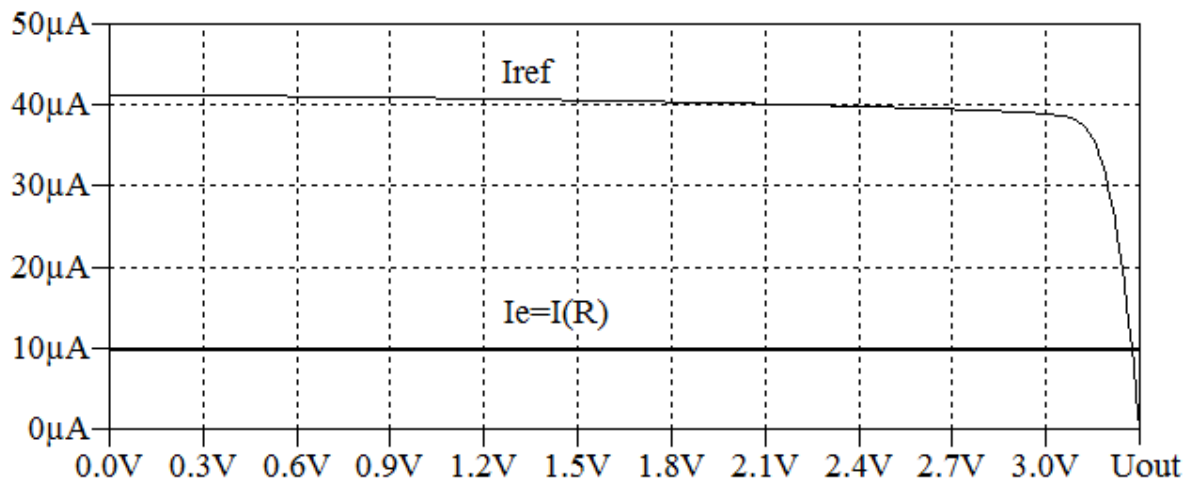
Генераторната част на източника включва MOS транзисторите M1 ÷ M4, биполярния транзистор Q и резистора R. Състои се от токоопределящата верига (M1, M2, Q и R) и простото токово огледало (M3-M4), използвано като обратна връзка за стабилизиране на тока. Простото токово огледало M3-M5 служи за прехвърляне на генерирания ток към товара.

Напрежението върху резистора R е равно на напрежението върху отпушения емитерен преход на транзистора Q в диодно свързване. Следователно:

$$I_{ref} = \frac{U_{EB}}{R} = \frac{n\varphi_T}{R} \ln \frac{I_{ref}}{I_s}$$

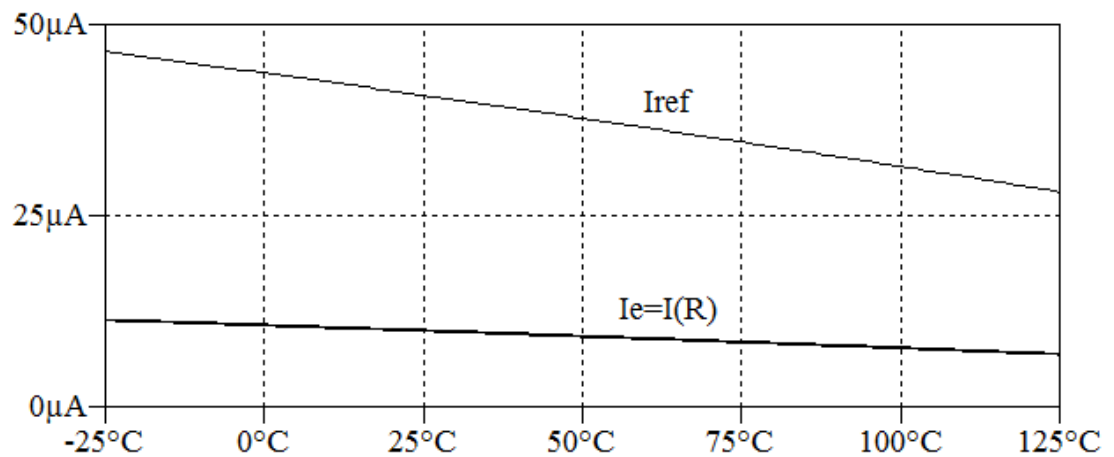
където  $\varphi_T$  е топлинния потенциал (25.8 mV при 300K),  $I_s$  – ток на насищане на емитерния преход,  $n$  - емпиричен коефициент (между 1 и 2).

# Източник на ток с диод – характеристики

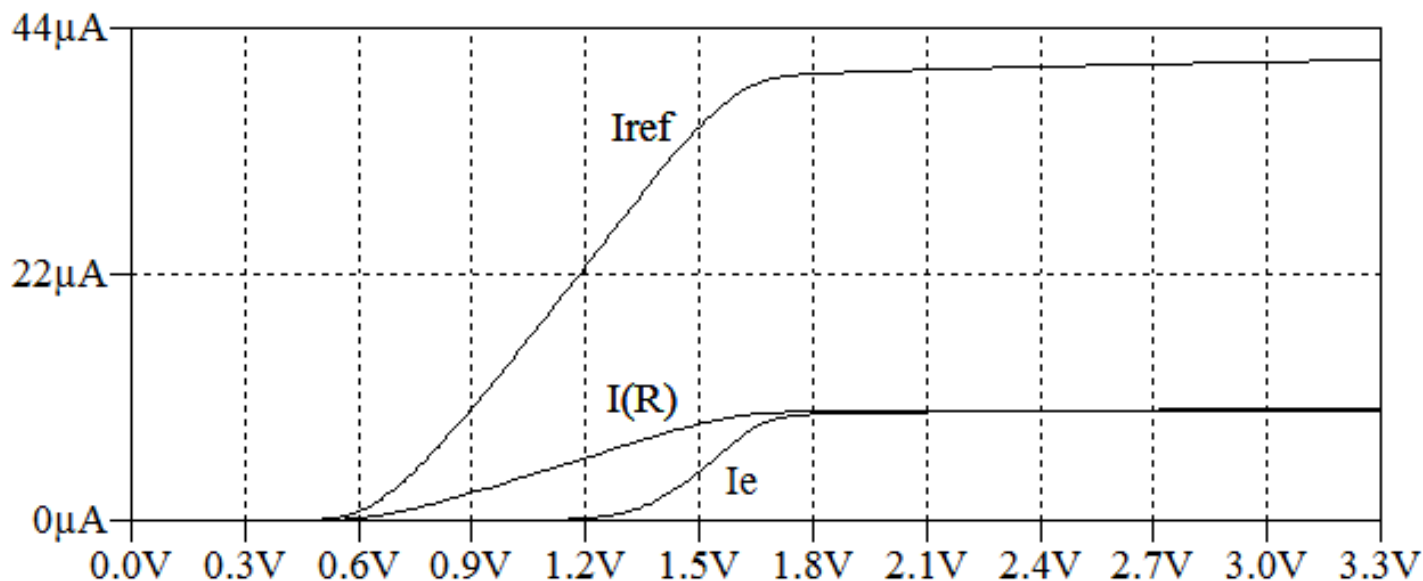


$$\left(\frac{W^5/L_5}{W^3/L_3}\right) = 4$$

Напрежението върху емитерния преход има отрицателен температурен коефициент, който заедно с положителния температурен коефициент на резистора R, определя отрицателна стойност на  $TCI_{\text{ref}}$ .

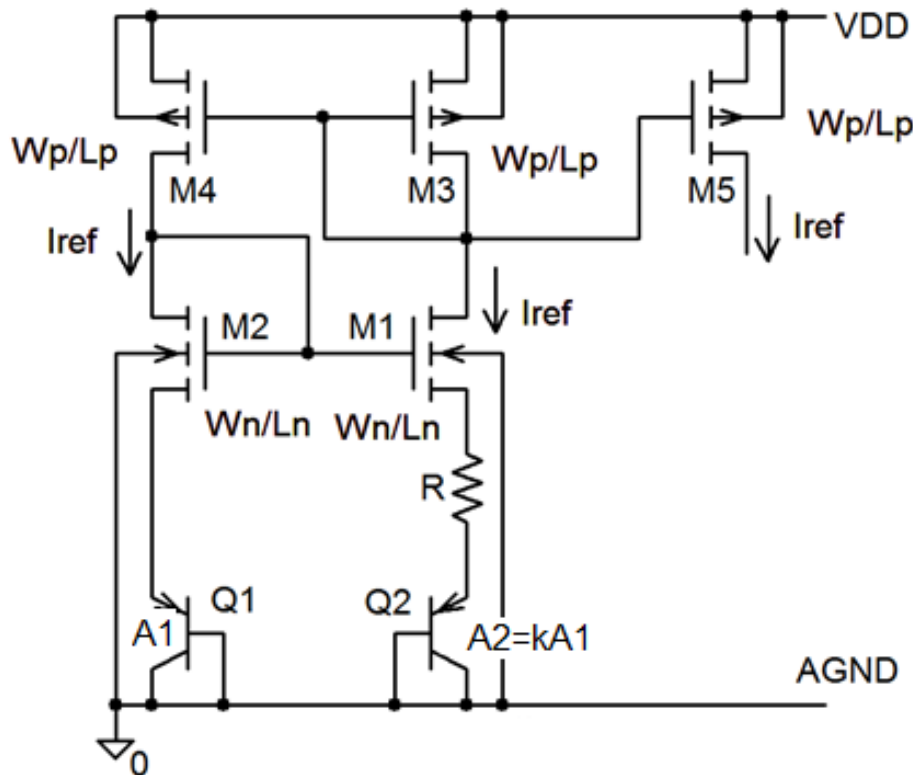


# Източник на ток с диод - характеристики



Зависимост на изходния ток  $I_{ref}$ , тока през резистора  $I(R)$  и тока през биполярния транзистор  $I_e$  от стойността на захранващото напрежение  $U_{DD}$ . Схемата е работоспособна при захранващи напрежения над 1.8V.

# Задаващ източник с ток пропорционален на $\varphi_T$ – вариант 1 ( $A_2=kA_1$ )



$$I_E = I_{EB0} \exp\left(\frac{U_{EB}}{n\varphi_T}\right) = A \cdot J_s \exp\left(\frac{U_{EB}}{n\varphi_T}\right)$$

$$U_{EB} = n\varphi_T \ln \frac{I_E}{A \cdot J_s}$$

$$U_{EB1} = U_{EB2} + U_R$$

$$n\varphi_T \ln \frac{I_{ref}}{A1 \cdot J_s} = n\varphi_T \ln \frac{I_{ref}}{kA1 \cdot J_s} + I_{ref} R$$

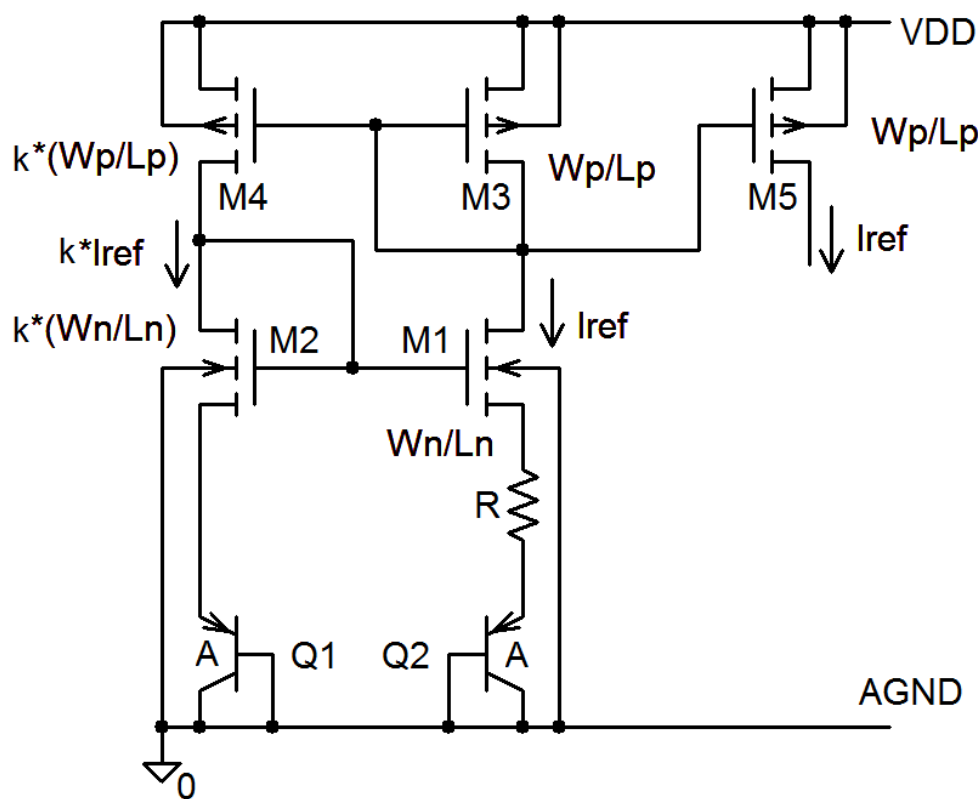
$$I_{ref} R = n\varphi_T \ln(k)$$

$$I_{ref} = \frac{n\varphi_T \ln(k)}{R} = \frac{n \left(\frac{k_B T}{q}\right) \ln(k)}{R}$$

$A_1, A_2=kA_1$  – площи на емитерния преход на Q1 и Q2.

Положителен температурен коефициент на задаващия ток  $T C I_{ref}$

# Задаващ източник с ток пропорционален на $\varphi_T$ – вариант 2 ( $I_{E2}=kI_{E1}$ )



$$I_E = I_{EB0} \exp\left(\frac{U_{EB}}{n\varphi_T}\right) = A \cdot J_s \exp\left(\frac{U_{EB}}{n\varphi_T}\right)$$

$$U_{EB} = n\varphi_T \ln \frac{I_E}{A \cdot J_s}$$

$$U_{EB1} = U_{EB2} + U_R$$

$$n\varphi_T \ln \frac{kI_{ref}}{A \cdot J_s} = n\varphi_T \ln \frac{I_{ref}}{A \cdot J_s} + I_{ref}R$$

$$I_{ref}R = n\varphi_T \ln(k)$$

$$I_{ref} = \frac{n\varphi_T \ln(k)}{R} = \frac{n \left(\frac{k_B T}{q}\right) \ln(k)}{R}$$

$A_1 = A_2 = A$  – площи на емитерния преход на Q1 и Q2.

Положителен температурен коефициент на задаващия ток  $T C I_{ref}$

# Температурни коефициенти

Температурните коефициенти на представените схеми зависят от използвания принцип за стабилизация на задаващия ток.

За успешно изчисляване (симулиране) на съответните температурни коефициенти могат да се ползват следните данни:

- Температурният коефициент на напрежението върху право свързания емитерен преход е  $-3300$  [ppm/°C], ( $1$  [ppm/°C] =  $1 \cdot 10^{-6}$  [1/°C]) или  $-2$  [mV/°C].

$$TCU_{BE} [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}] = \frac{TCU_{BE} [\text{mV}/^{\circ}\text{C}]}{U_{BE} [\text{mV}]} \cdot 10^6;$$

$$TCU_{BE} [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}] = \frac{-2 [\text{mV}/^{\circ}\text{C}]}{600 [\text{mV}]} \cdot 10^6 = 0,0033 [1/^{\circ}\text{C}] \cdot 10^6 = 3300 [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}]$$

$$TCU_{BE} [\text{mV}/^{\circ}\text{C}] = TCU_{BE} [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}] \cdot U_{BE} [\text{mV}] \cdot 10^{-6}$$

$$TCU_{BE} [\text{mV}/^{\circ}\text{C}] = -3300 [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}] \cdot 600 [\text{mV}] \cdot 10^{-6} \approx -2 [\text{mV}/^{\circ}\text{C}]$$

При промяна на температурата с  $50^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$ ):

$$\Delta U_{BE} [\text{mV}] = \Delta T [^{\circ}\text{C}] \cdot TCU_{BE} [\text{mV}/^{\circ}\text{C}] = \Delta T [^{\circ}\text{C}] \cdot TCU_{BE} [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}] \cdot 10^{-6} \cdot U_{BE} [\text{mV}] = -100 [\text{mV}]$$

# Температурни коефициенти

- Температурният коефициент на топлинния потенциал е около +3300 [ppm/°C] или 0,085[mV/°C].

- Температурният коефициент на праговото напрежение е около -3000 [ppm/°C].

- Типичните стойности на TCR за n джоб, n+/p+ области и полirezисторите са съответно 10000, 2000 и 1000 [ppm/°C].

$$TCR [ppm/^\circ C] = \frac{\Delta R [\Omega]}{R [\Omega] \cdot \Delta T [^\circ C]} 10^6$$

$$\Delta R [\Omega] = TCR [ppm/^\circ C] \cdot R [\Omega] \cdot \Delta T [^\circ C] \cdot 10^{-6}$$

При  $\Delta T = 50^\circ C$ ,  $R = 10k\Omega$  и  $TCR = 2000 [ppm/^\circ C]$ :

$$\Delta R [\Omega] = 2000 [ppm/^\circ C] \cdot 10000 [\Omega] \cdot 50 [^\circ C] \cdot 10^{-6} = 1000 [\Omega]$$

$$TCR [%/^\circ C] = \frac{\Delta R [\Omega]}{R [\Omega] \cdot \Delta T [^\circ C]} 100$$

$$1000ppm = 0,1\%$$

---

Благодаря за вниманието!

---