



Melexis

INSPIRED ENGINEERING



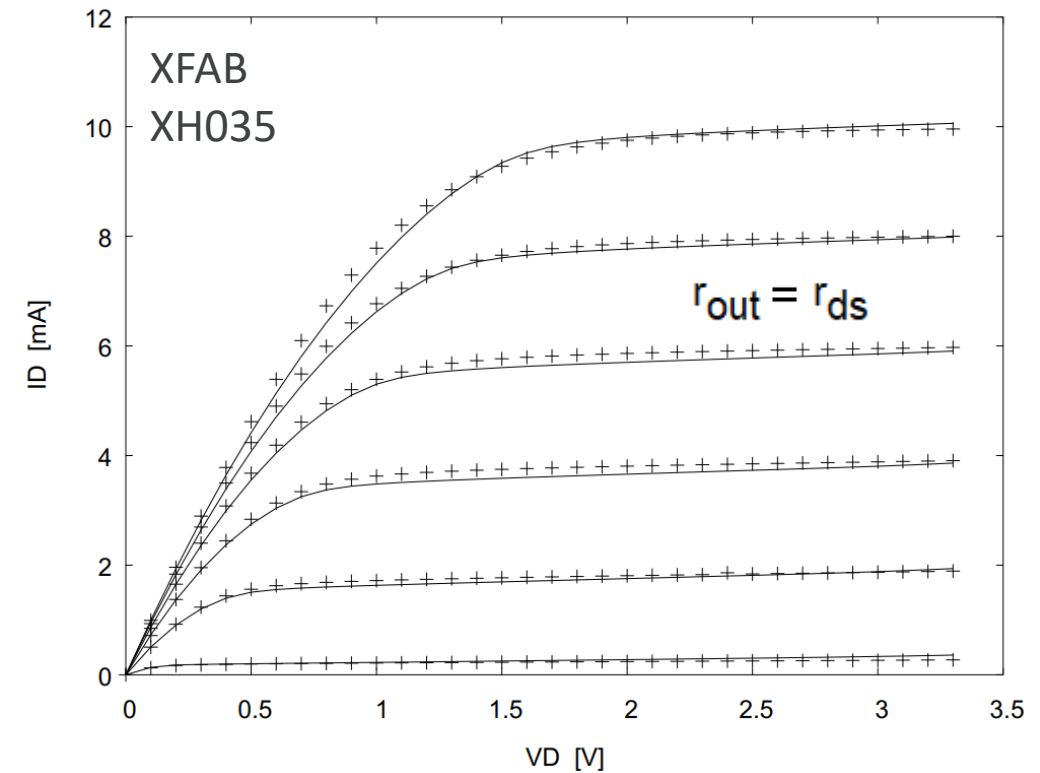
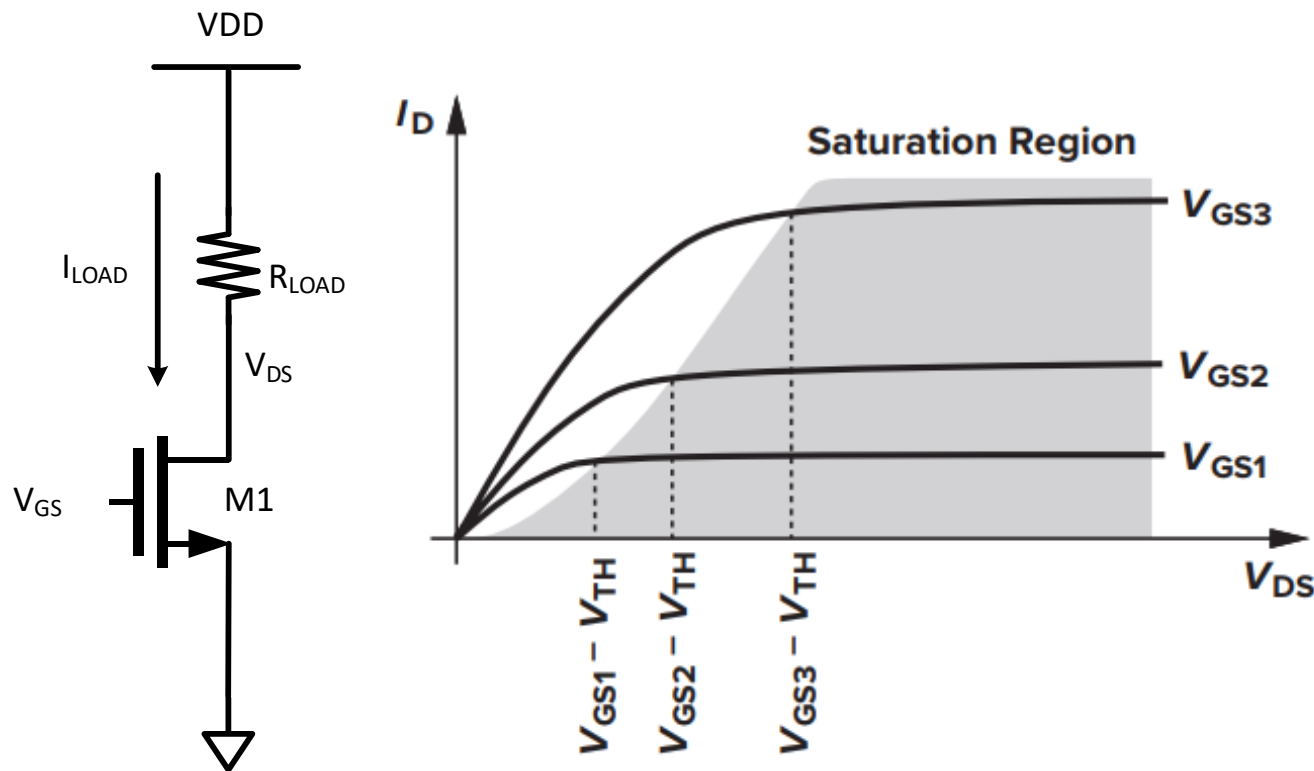
Източници на Ток и Токови Огледала Current Sources and Current Mirrors

Христо Христов
Мелекис България
06.03.2023

ИЗТОЧНИЦИ НА ТОК

MOS транзисторът като източник на ток

- В областта на насищане, MOS транзисторът има изходни характеристики близки до тези на източник на ток



Израз за дрейновия ток на MOS транзистор в насищане

- Дрейновият ток през канала на MOS транзистор в насищане се апроксимира с квадратичния закон

$$I_D = \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{V_{EFF}^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS})}{1 + \left(\frac{\mu}{2 \cdot v_{sat} \cdot L} + \Theta \right) \cdot V_{EFF}}$$

- μ – подвижност на токоносителите [cm^2/Vs]
- C_{ox} – плътност на капацитета под гейта [F/m^2]
- Θ - коефициент, отчитащ корекцията на подвижността на токоносителите с увеличаване на вертикалното електрическо поле [$1/\text{V}$]
- v_{sat} – скорост на насищане на токоносителите с хоризонтално поле [cm/s]
- λ – коефициент, отчитащ модулацията на дължината на канала [$1/\text{V}$]
- $V_{EFF} = V_{GS} - V_{TH}$, където V_{GS} е гейт-сорс напрежението, а V_{TH} – праговото напрежение [V]
- V_{DS} – дрейн-сорс напрежение [V]

Източник на ток с MOS транзистор с вграден канал

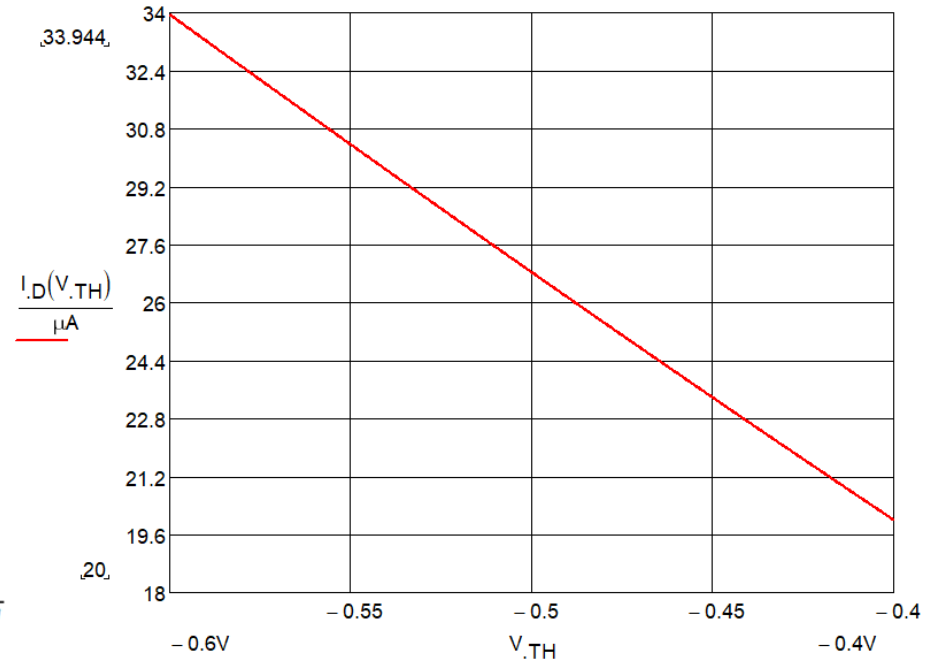
- За схемата е валидно уравнението

$$I_D = \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot K_p \cdot (0 \cdot V_G - I_D \cdot R_{REF} - V_{TH})^2$$

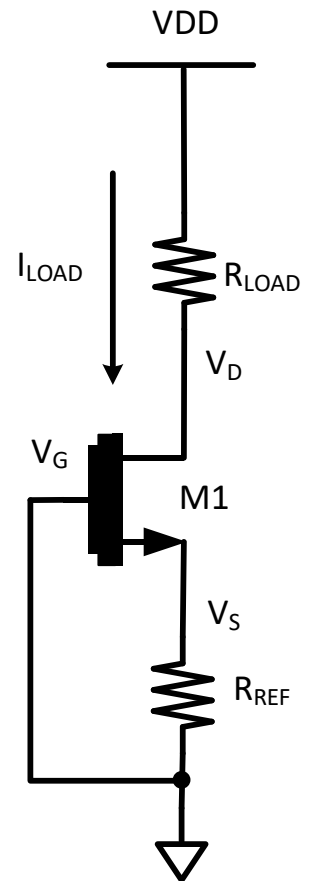
- Ако изразим дрейновия ток, ще получим

$$I_D = \frac{L}{K_p \cdot R_{REF}^2 \cdot W} \left[\frac{V_{TH}}{R_{REF}} - \frac{L \cdot \sqrt{1 - \frac{2 \cdot K_p \cdot R_{REF} \cdot V_{TH} \cdot W}{L}}}{K_p \cdot R_{REF}^2 \cdot W} \right]$$

$$(K_p = \mu \cdot C_{ox})$$



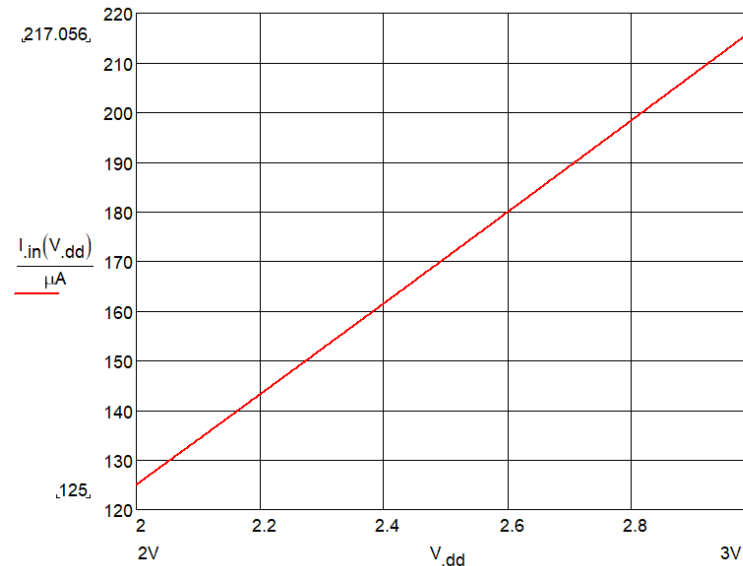
$$W = 10\mu\text{m} \quad L = 1\mu\text{m} \quad K_p = 100 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} \quad M = 4 \quad R_{REF} = 10\text{k}\Omega$$



Източник на ток с MOS транзистор с индуциран канал

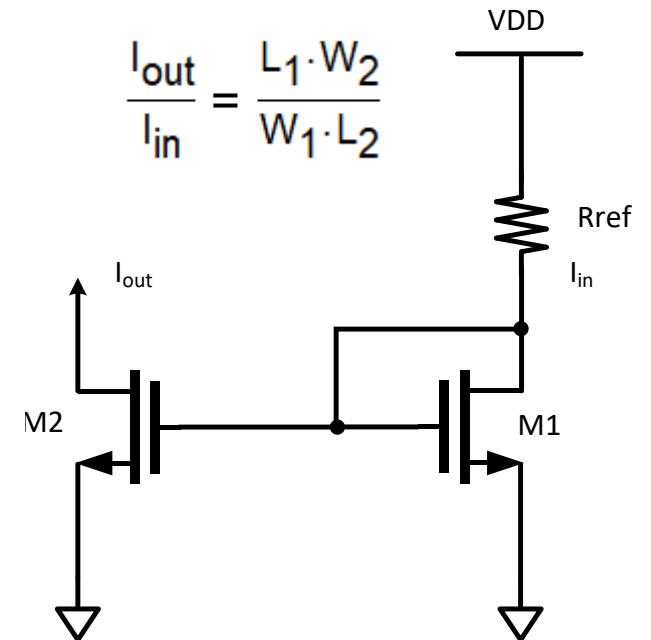
- Пренебрегвайки модуляцията на канала, уравнението, описващо тока във веригата с M1 е

$$I_{in} = \frac{K_p \cdot W \cdot M}{2 \cdot L} \cdot (V_{dd} - V_{TH} - R_{REF} \cdot I_{in})^2$$



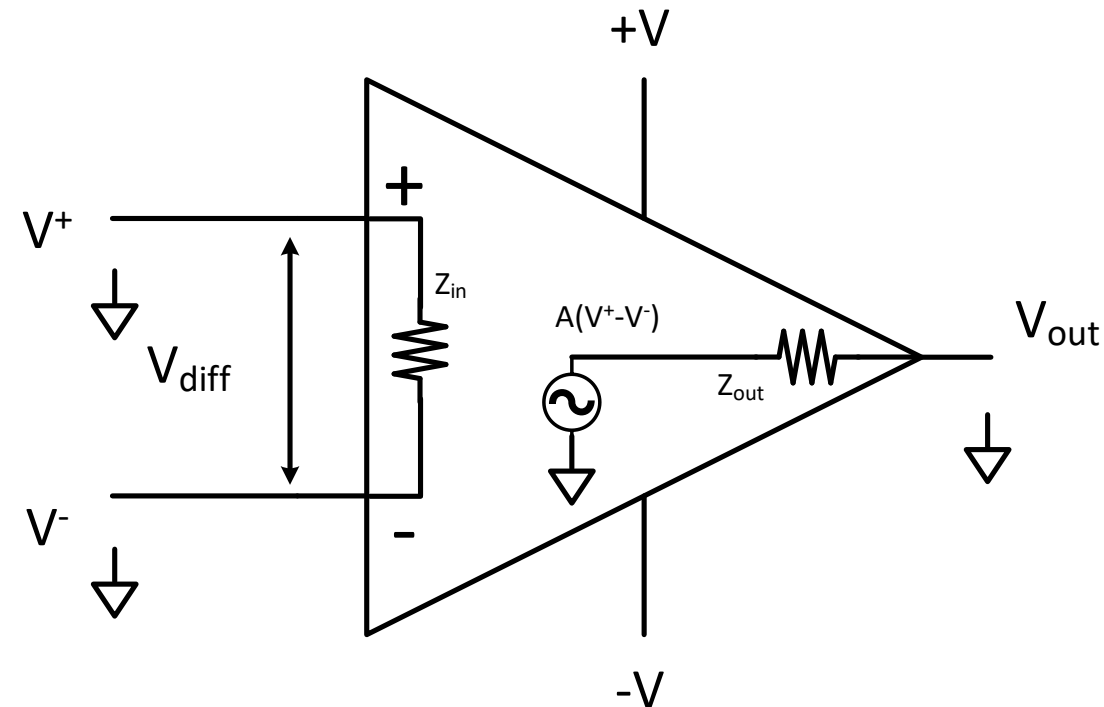
- Ако изразим I_{in}, получаваме

$$I_{in} = \frac{V_{dd} - V_{TH}}{R_{REF}} + \frac{L_1}{K_p \cdot M_1 \cdot R_{REF}^2 \cdot W_1} - \frac{L_1 \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot K_p \cdot M_1 \cdot R_{REF} \cdot W_1 \cdot (V_{dd} - V_{TH})}{L_1}}}{K_p \cdot M_1 \cdot R_{REF}^2 \cdot W_1}$$



Идеален Операционен Усилвател

- $V_{diff} = (V^+ - V^-)$ – диференциално входно напрежение
- $Z_{in} \rightarrow \infty$ – входен импеданс
- $Z_{out} \rightarrow 0\Omega$ – изходен импеданс
- $A \rightarrow \infty$ усилване по диференциален сигнал
- $+V, -V$ – положително и отрицателно хранващо напрежение



Източник на ток с операционен усилвател

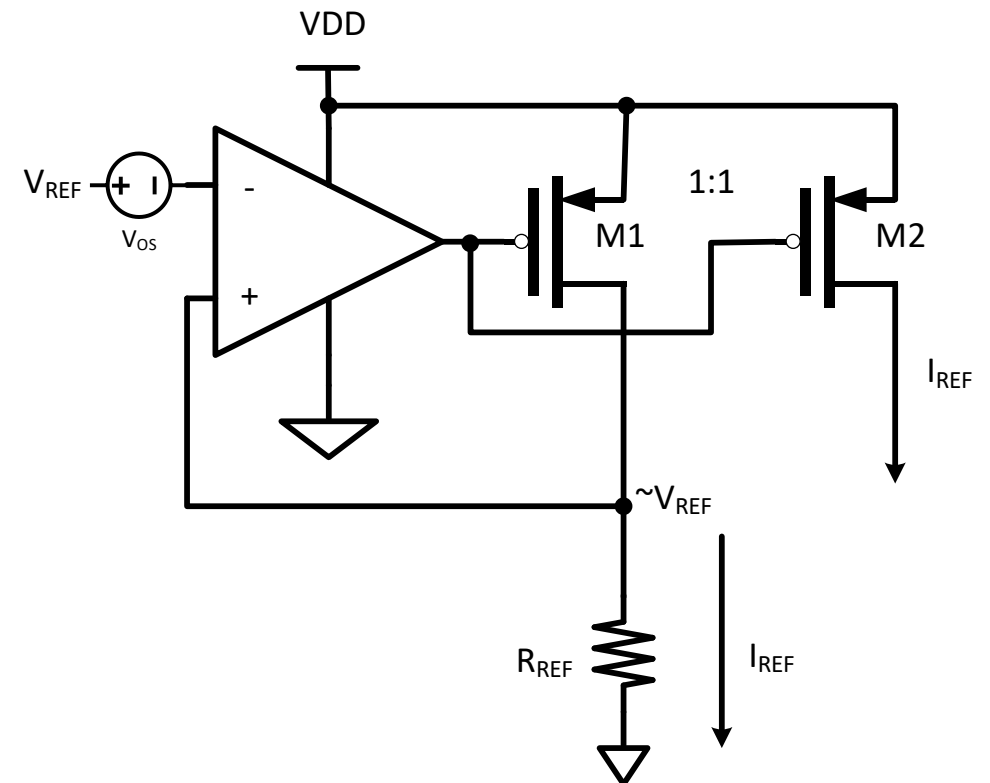
- За да елиминираме процесната вариация, дължаща се на праговото напрежение на MOS транзистора можем да въведем обратна връзка, фиксираща напрежението върху еталонния резистор

- В идеалния случай

$$I_{REF} = \frac{V_{REF}}{R_{REF}}$$

- В реалността

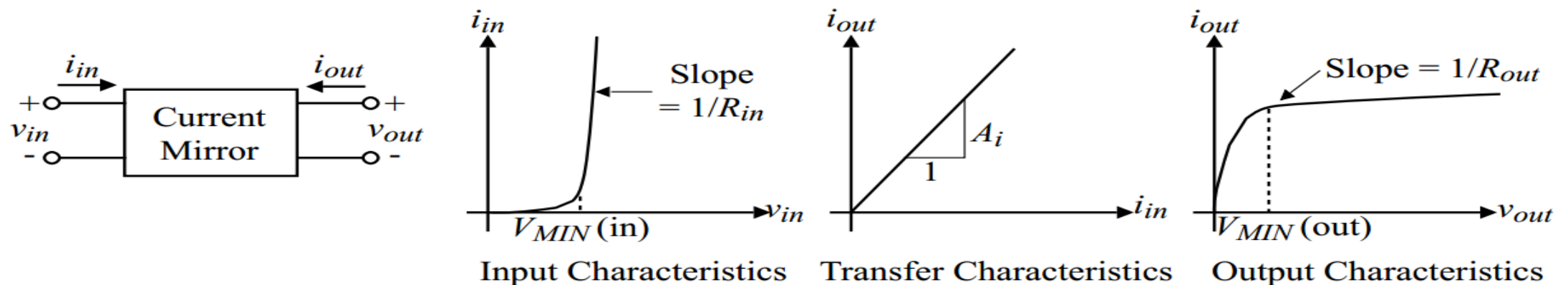
$$I_{REF} = \frac{A_o \cdot g_{m1} \cdot (V_{REF} - V_{OS})}{A_o \cdot R_{REF} \cdot g_{m1} + 1}$$



ТОКОВИ ОГЛЕДАЛА

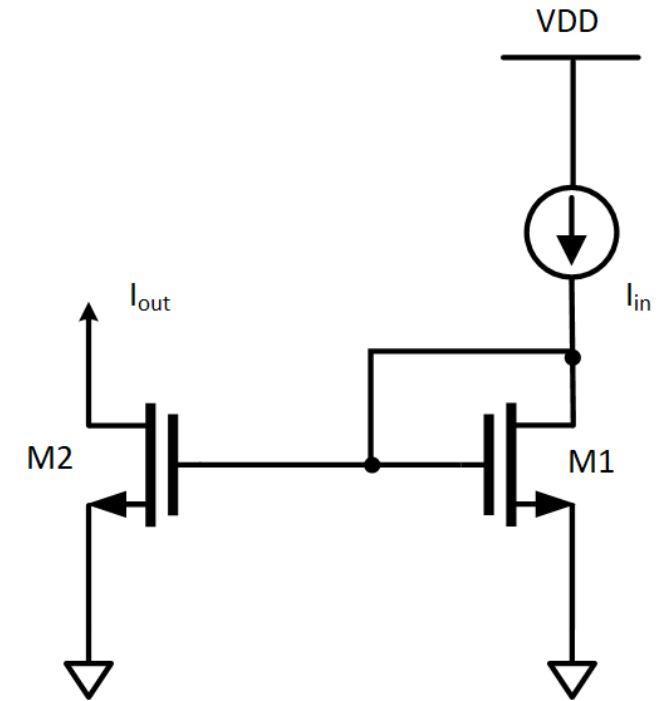
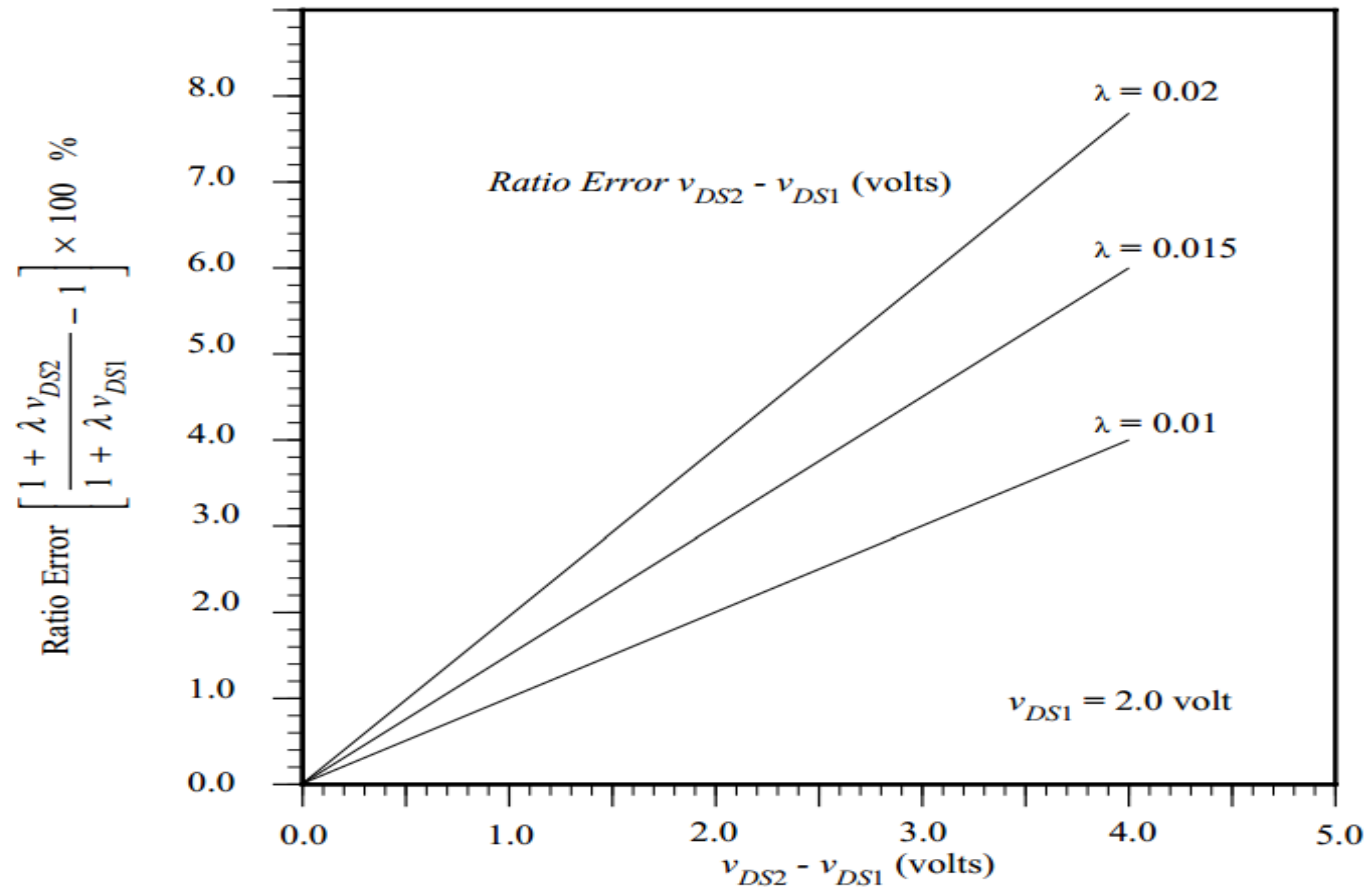
Основни характеристики на токовите огледала

- По същество, токовите огледала са усилватели на ток като коефициентът на усилване може да е >1 или <1 . Характеристиките на идеален токов усилвател са:
 - Линеиност $\rightarrow I_{out} = A_i * I_{in}$
 - Безкрайно малко входно съпротивление
 - Безкрайно голямо изходно съпротивление
 - V_{MINin} – обхват на входното напрежение, при който входното съпротивление е високо
 - V_{MINout} – обхват на изходното напрежение, при който изходното съпротивление е ниско



Просто токово огледало

- При $V_{DS1}=V_{DS2}$ $\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{L_1 \cdot W_2}{W_1 \cdot L_2}$, докато при $V_{DS1} \neq V_{DS2}$ $\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1 + \lambda \cdot V_{ds2}}{1 + \lambda \cdot V_{ds1}}$



Просто Токово Огледало – съгласуване на примитивите (matching)

- Ако $K_1 \neq K_2$ и $V_{T1} \neq V_{T2}$

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{K_2 \cdot (V_{gs} - V_{T2})^2}{K_1 \cdot (V_{gs} - V_{T1})^2}$$

$$\Delta K = K_2 - K_1$$

$$\Delta V_T = V_{T2} - V_{T1}$$

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2}$$

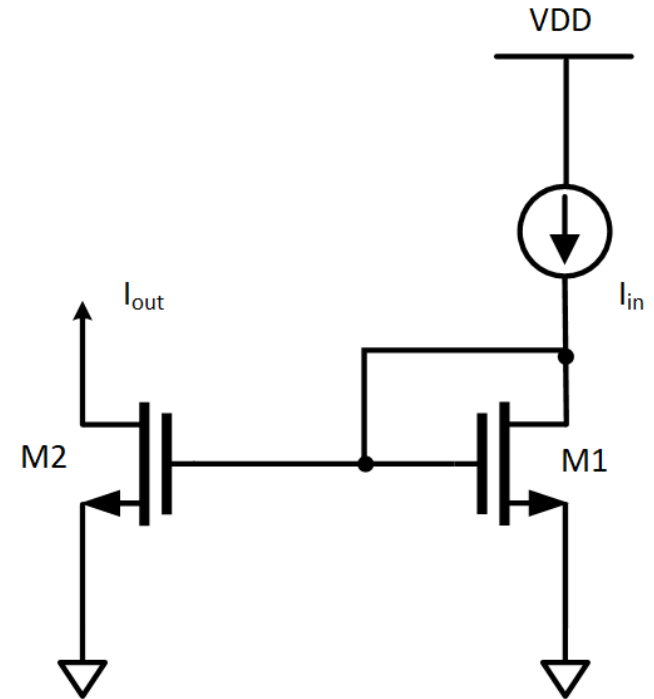
$$V_T = \frac{V_{T1} + V_{T2}}{2}$$

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = 1 + \frac{\Delta K}{K} + \frac{2 \cdot \Delta V_T}{V_{gs} - V_T}$$

- Препоръчително е използването на голямо ефективно напрежение, за да се минимизира влиянието на праговото напрежение

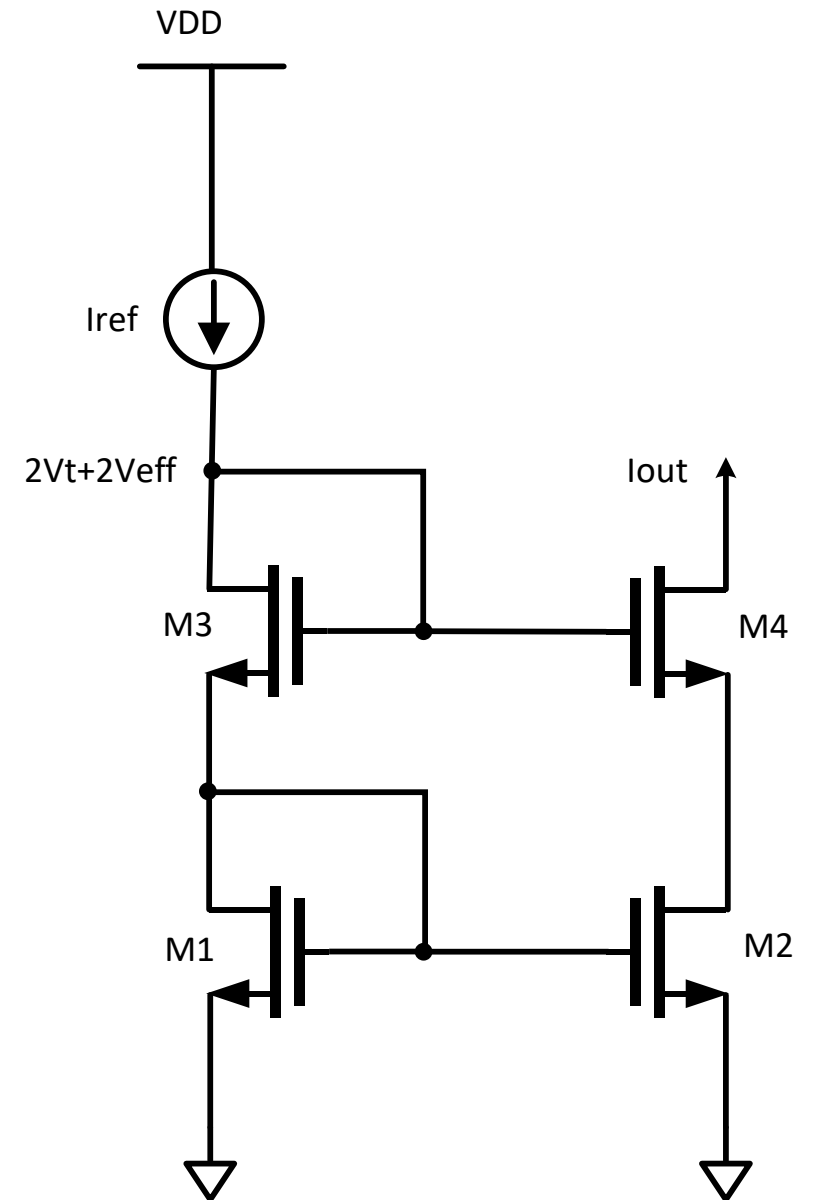
Просто Токово Огледало - Изводи

- $V_{MINin} = V_{TH} + V_{EFF}$
- $V_{MINout} = V_{EFF}$
- Изходно съпротивление
 $R_{out} = 1/(\lambda * I_d)$
- Входно съпротивление $R_{in} = 1/g_m$
- Сравнително лошо предаване по ток (A_i), тъй като $VDS_1 \neq VDS_2$



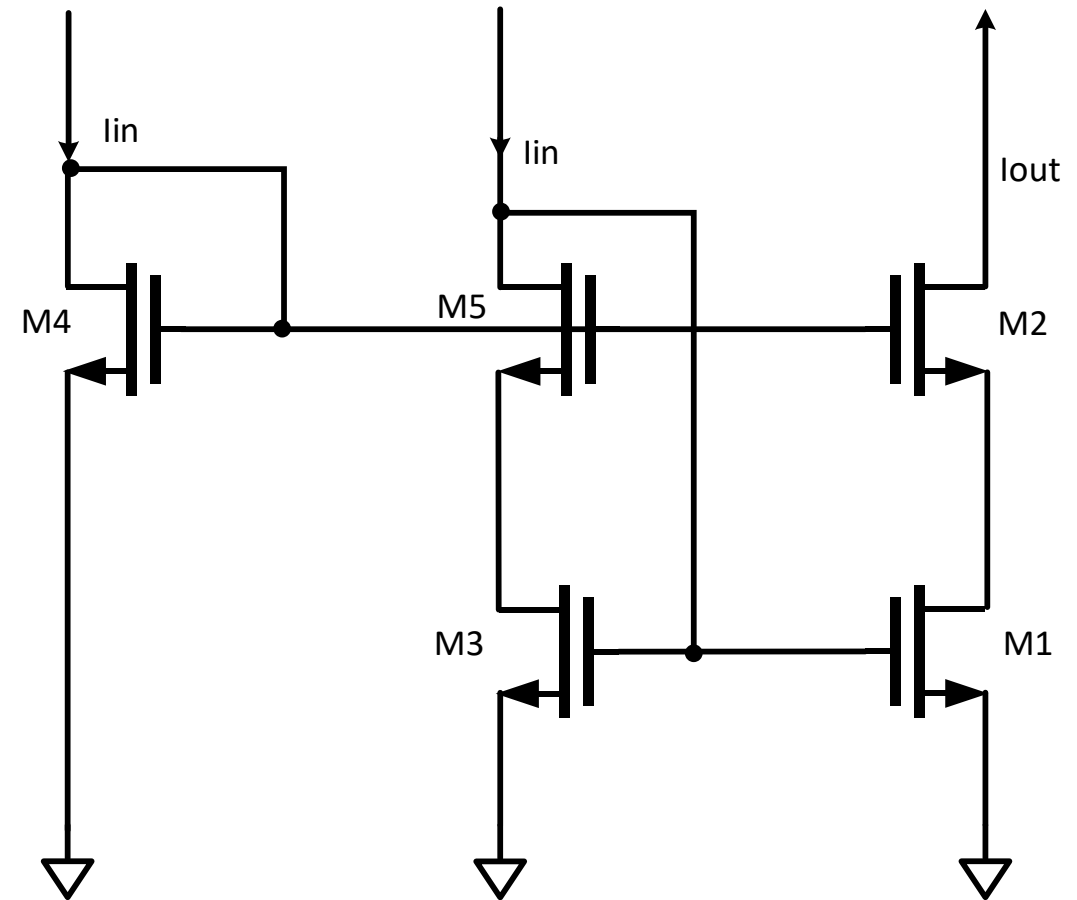
Каскодно Токово Огледало

- $V_{MINin} = 2V_{TH} + 2V_{EFF}$
- $V_{MINout} = V_{TH} + 2V_{EFF}$
- $R_{out} = r_{ds2} g_{m4} r_{ds4}$
- $R_{in} = 1/g_{m1} + 1/g_{m3}$
- Предаването по ток (A_i) е възможно най-добро, тъй като $VDS_1 = VDS_2$



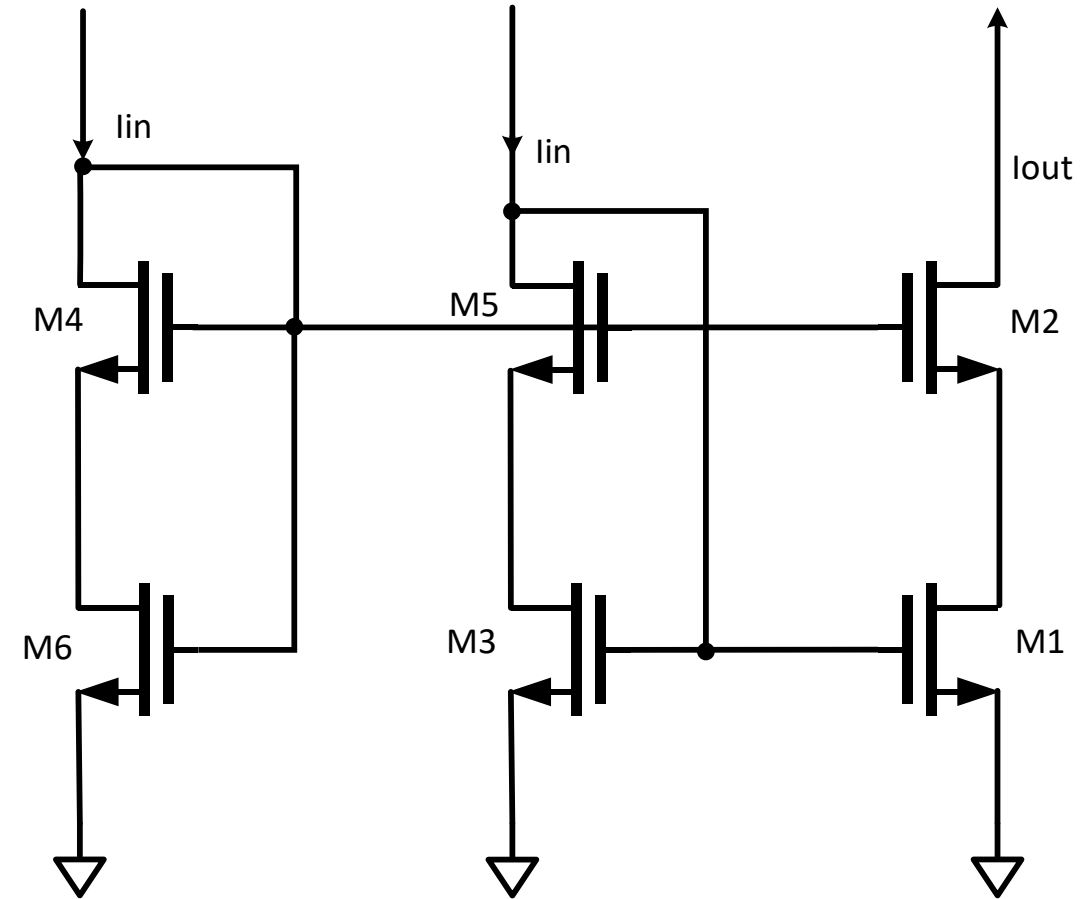
Нисковолтово Каскодно Токово Огледало

- $V_{MINin} = V_{TH} + V_{EFF}$
- $V_{MINout} = 2V_{EFF}$
- $R_{out} = g_{m2} r_{ds2} r_{ds1}$
- $R_{in} \approx 1/g_{m3}$
- Предаването по ток (A_i) е възможно най-добро, тъй като $V_{DS1} = V_{DS3}$
- Ефект на подложката при M2 и M4?



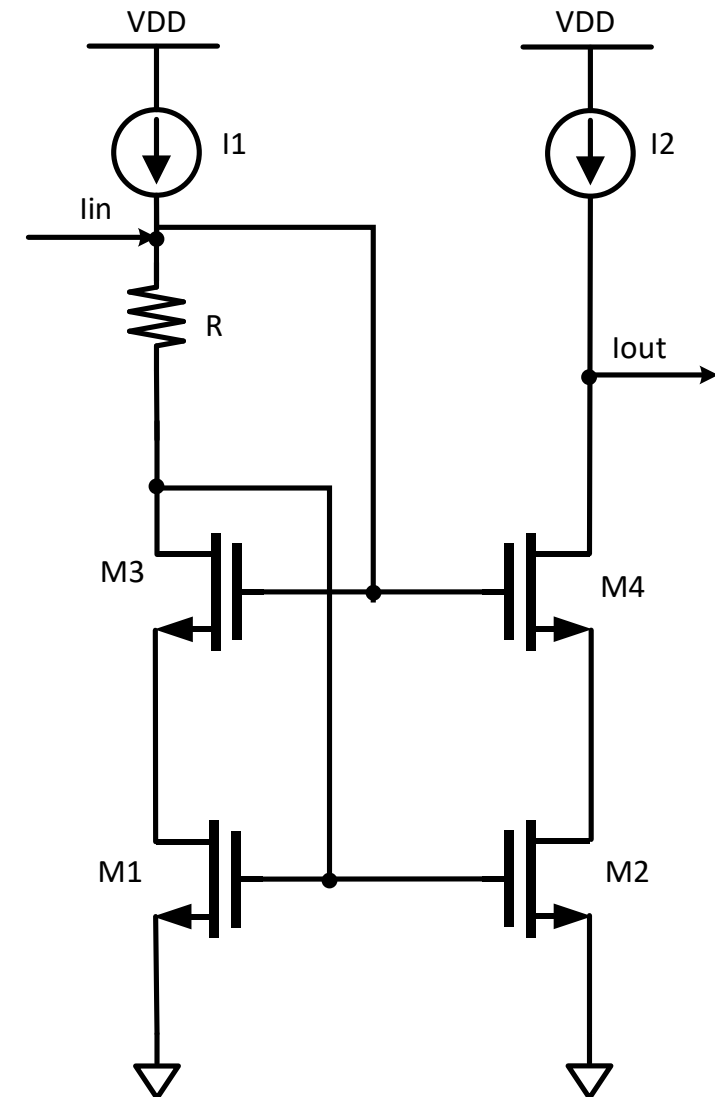
Нисковолтово Каскодно Токово Огледало (2)

- Съгласуването е по-добро, тъй като ефектът на подложката при каскодите е отчетен
- В какъв режим работи M6?
- Какви размери би имал, ако $W/L_{M1} = W/L_{M3}$?
- Приемете $V_{EFF4/5/2} = V_{EFF3/1}$



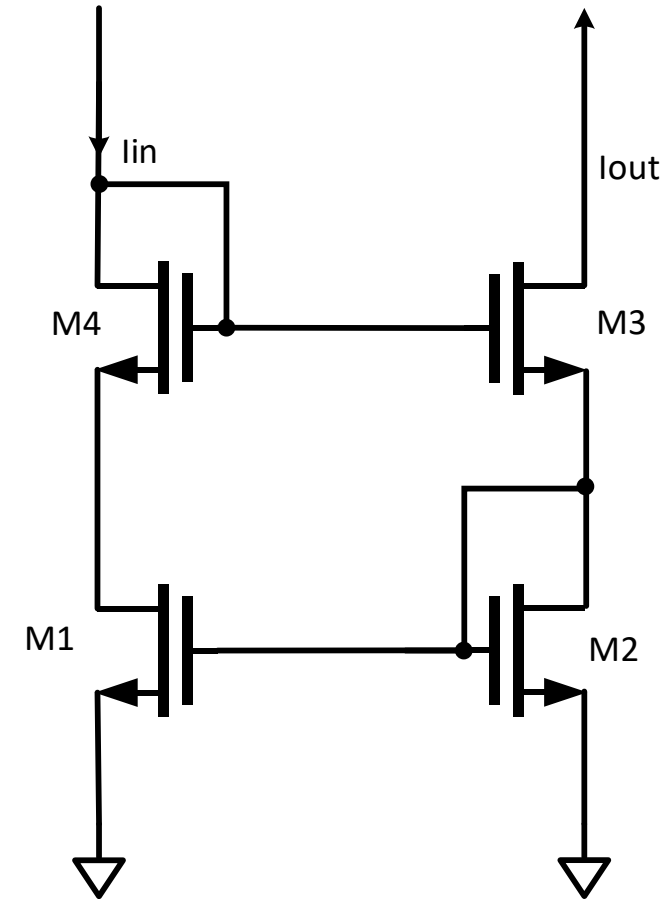
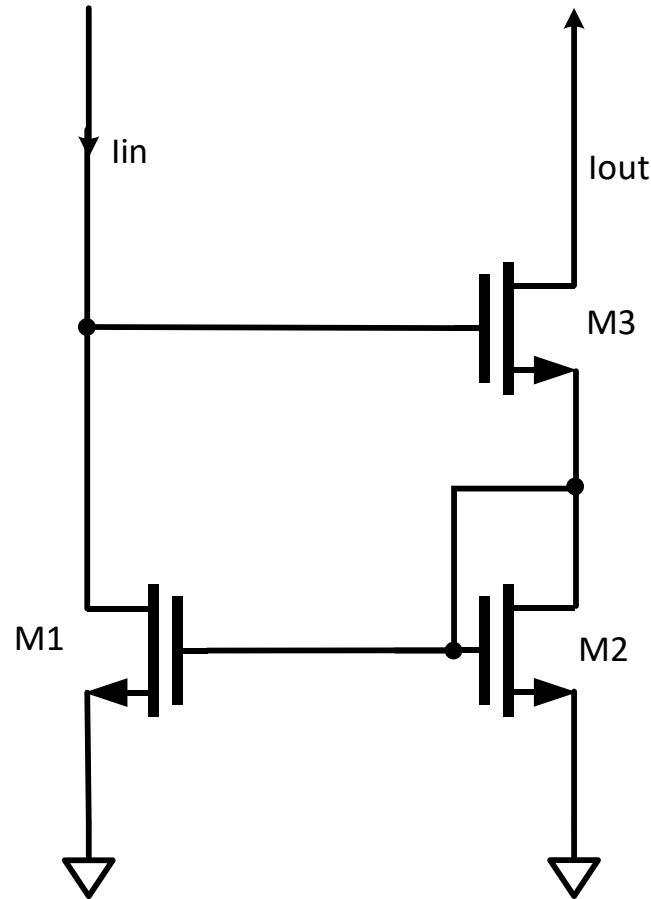
Каскодно Токово Огледало със Собствена Работна Точка (Self-Biased)

- $V_{MINin} = V_{TH} + 2V_{EFF}$
- $V_{MINout} = 2V_{EFF}$
- $R_{out} = g_{m4} r_{ds2} r_{ds4}$
- $R_{in} \approx 1/g_{m1} + R$
- Предаването по ток (A_i) е възможно най-добро



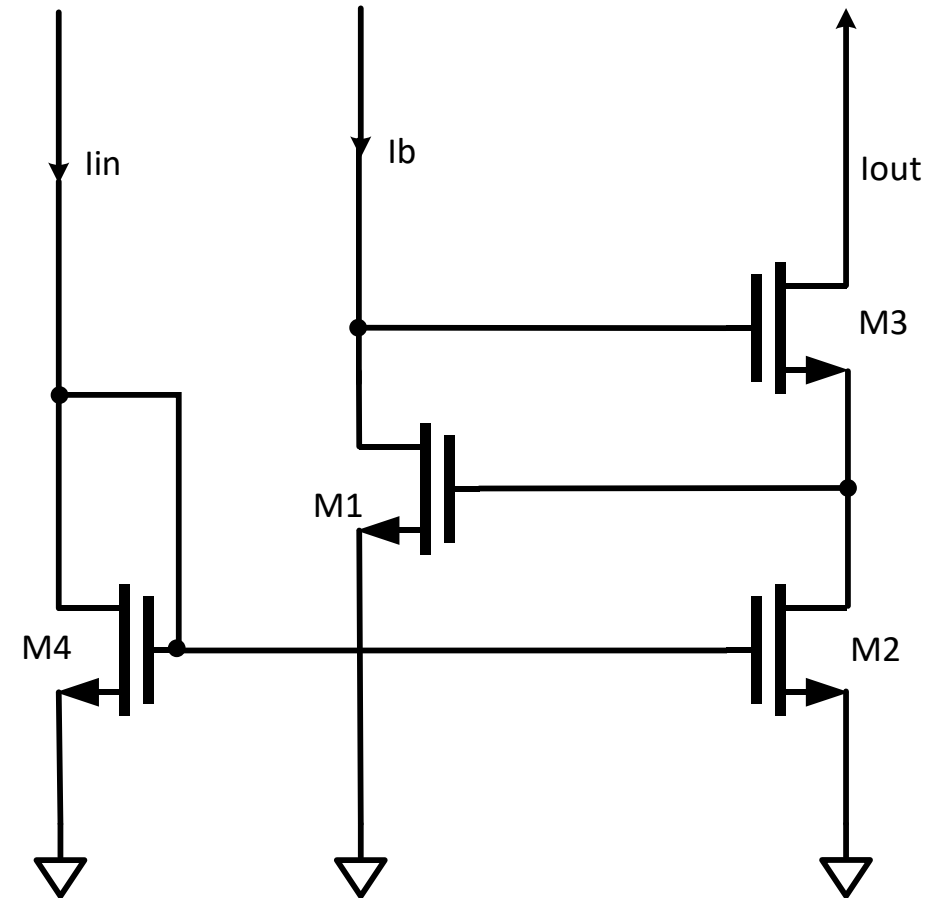
Токово Огледало на Уилсън (Wilson)

- $V_{MINin} = 2V_{TH} + 2V_{EFF}$
- $V_{MINout} = V_{TH} + 2V_{EFF}$
- $R_{out} = g_{m1}r_{ds1}g_{m3}r_{ds3}/g_{m2}$
- $R_{in} \approx (g_{m2} + g_{m3})/g_{m3}/g_{m1}$
- Сравнително лошо предаване по ток (A_i), тъй като $VDS_1 \neq VDS_2$
- Има ли начин да подобрим това?



MOS Регулиран Каскод

- $V_{MINin} = V_{TH} + V_{EFF}$
- $V_{MINout} = V_{TH} + 2V_{EFF}$
- $R_{out} = g_{m1} g_{m3} r_{ds1} r_{ds2} r_{ds3}$
- $R_{in} \approx 1/g_{m1}$
- Добро предаване по ток A_i , ако $V_{ds4} = V_{ds2}$
- Използва се за увеличаване на изходното съпротивление (респ. усилването) в много операционни усилватели



Токови Огледала - Обобщение

Токово Огледало	Точност на предаване по ток	Изходно съпротивление	Входно съпротивление	Минимално изходно напрежение	Минимално входно напрежение
Просто	Лошо	r_{ds}	$1/g_m$	V_{EFF}	$V_{TH}+V_{EFF}$
Каскодно	Отлично	$g_m r_{ds}^2$	$2/g_m$	$V_{TH}+2V_{EFF}$	$2V_{TH}+2V_{EFF}$
Нисковолтов каскод	Отлично	$g_m r_{ds}^2$	$1/g_m$	$2V_{EFF}$	$V_{TH}+V_{EFF}$
Каскод със собствена работна точка	Отлично	$g_m r_{ds}^2$	$R+1/g_m$	$2V_{EFF}$	$V_{TH}+2V_{EFF}$
Уилсън	Лошо	$g_m r_{ds}^2$	$2/g_m$	$2V_{TH}+2V_{EFF}$	$V_{TH}+2V_{EFF}$
Регулиран каскод	Добро-Отлично	$g_m^2 r_{ds}^3$	$1/g_m$	$V_{TH}+2V_{EFF}$	$V_{TH}+V_{EFF}$



INSPIRED ENGINEERING