
Токови огледала

Проектиране на аналогови интегрални схеми

Емил Д. Манолов, edm@tu-sofia.bg, edmanolov@gmail.com
кат. “Електронна техника”, Технически университет - София

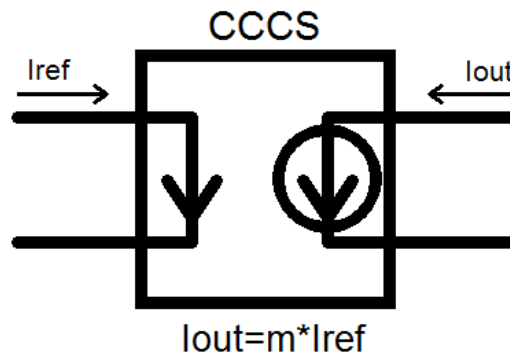
Токови огледала

Токовите огледала са основни елементи на аналоговите интегрални схеми. При тях токът в изхода им е пропорционален на входния ток, т. е.:

$$I_{out} = m \cdot I_{ref}$$

Отношението **m** между двата тока може да бъде равно, по-голямо или по-малко от 1.

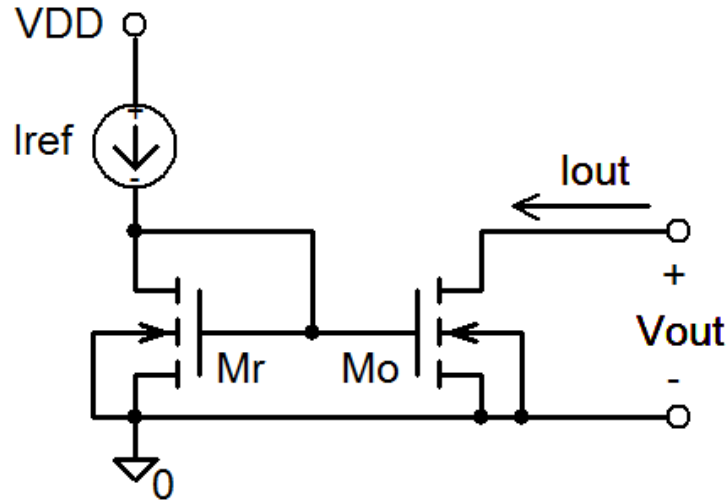
Идеалното токово огледало може да се разглежда като източник на ток, управляван от ток (current controlled current source - CCCS).



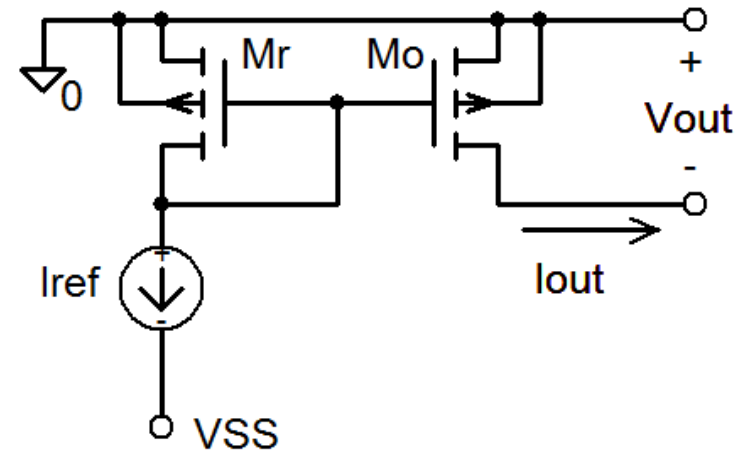
Токовите огледала се характеризират с ниско входно и високо изходно съпротивление.

Просто токово огледало

n-MOS токово огледало



p-MOS токово огледало



Iref – задаващ (входен) ток; Iout – огледален (изходен) ток

Схемите са работоспособна при условие, че и двата транзистора работят в силна инверсия, в областта на насищане.

$$I_{ref} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W_r}{L_r} (V_{GSr} - V_{TNr})^2 (1 + \lambda_r V_{DSr})$$

$$I_{out} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W_o}{L_o} (V_{GSo} - V_{TNo})^2 (1 + \lambda_o V_{DSo})$$

Понеже $V_{TNr} \approx V_{TNo}$:

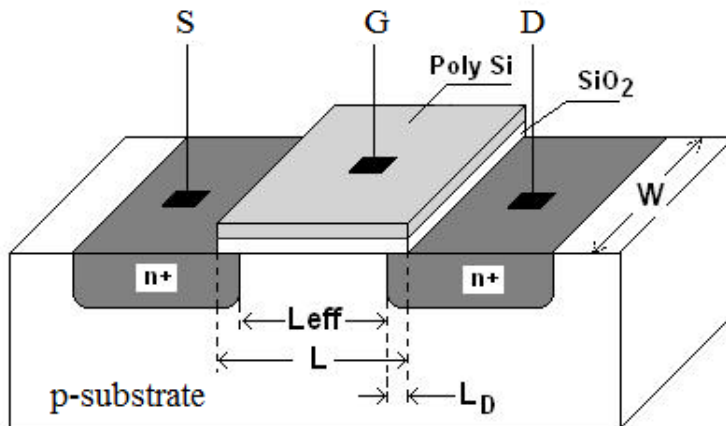
$$\frac{I_{out}}{I_{ref}} = \frac{W_o/L_o}{W_r/L_r} \left(\frac{1 + \lambda_o V_{DSo}}{1 + \lambda_r V_{DSr}} \right)$$

Основна формула за простото токово огледало

$$\frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{ref}}} = \frac{W_o/L_o}{W_r/L_r} \left(\frac{1 + \lambda_o V_{\text{DS}o}}{1 + \lambda_r V_{\text{DS}r}} \right)$$

На практика произведението от коефициентите на модулация на дължината на канала (λ_r и λ_o) и напреженията дрейн-сорс ($V_{\text{DS}r}$ и $V_{\text{DS}o}$) са много по-малки от 1 (и в много случаи близки по стойност), така че горното отношение може да се опрости до:

$$\frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{ref}}} = \frac{W_o/L_o}{W_r/L_r}$$



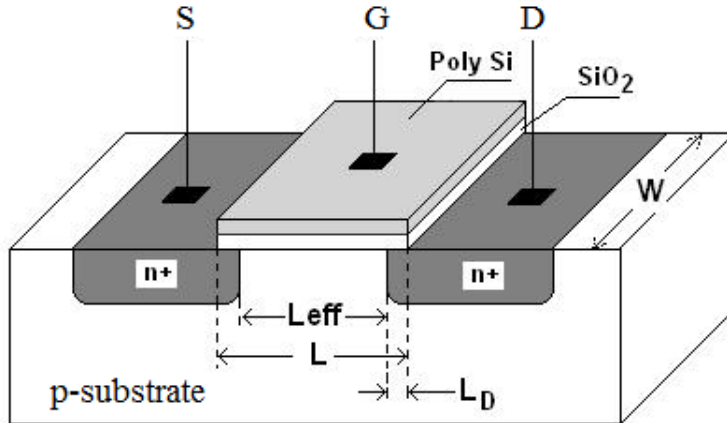
ВАЖНО!

Отношението на токовете зависи главно от хоризонталната геометрия на транзистора, т.е. от широчината W и дължината L на каналите на транзисторите.

Опростена формула за простото токово огледало

$$\frac{I_{out}}{I_{ref}} = \frac{W_o/L_o}{W_r/L_r} \left(\frac{1 + \lambda_o V_{DSo}}{1 + \lambda_r V_{DSr}} \right)$$

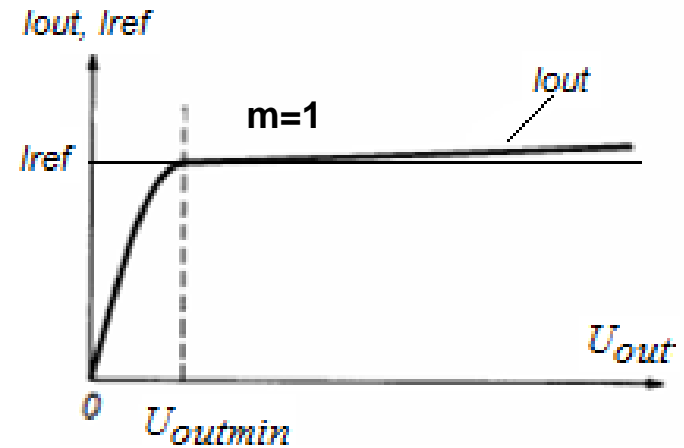
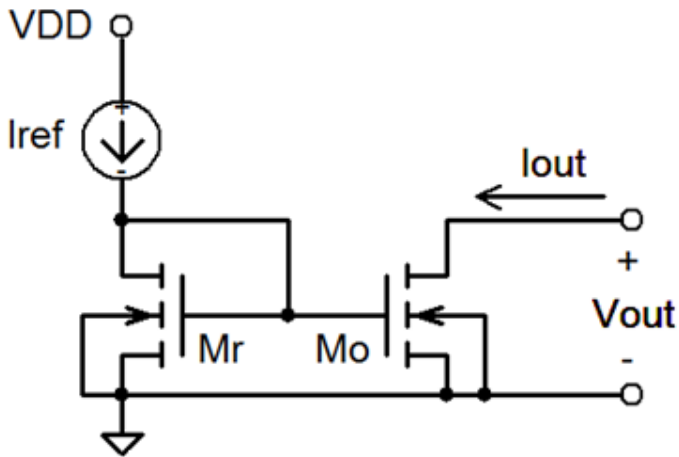
$$\frac{I_{out}}{I_{ref}} = \frac{W_o/L_o}{W_r/L_r}$$



За да се уеднакви грешката от страничната дифузия за сорса и дрейна L_D транзисторите и се избират най-често с еднаква дължина на канала. Тогава:

$$\frac{I_{out}}{I_{ref}} \approx \frac{W_o}{W_r}$$

Изходна характеристика на токово огледало



Основни параметри :

- Минимално изходно напрежение U_{outmin} ; -Изходно съпротивление r_{out} .

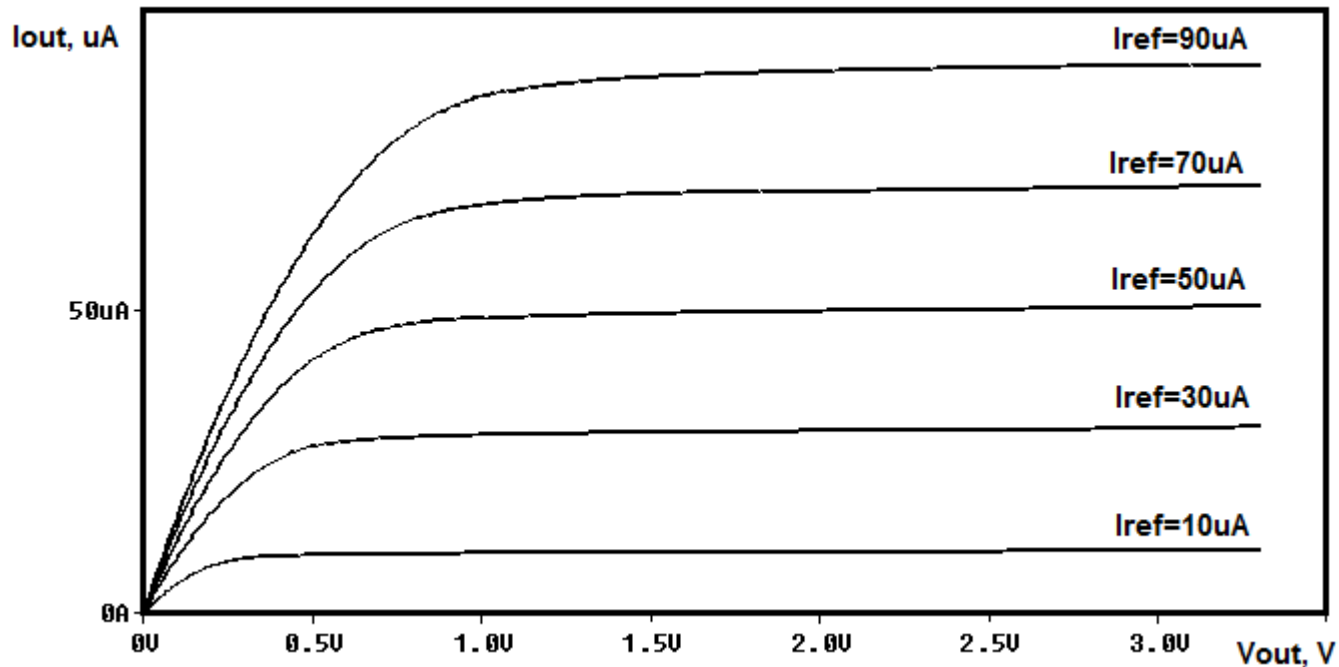
U_{outmin} е минималното изходно напрежение, при което се гарантира работата на транзистора **Mo** в насищане.

$$U_{outmin} \geq U_{DSAT} = U_{GS} - U_{TN0} = U_{eff}$$

Изходното съпротивление по променлив ток r_{out} характеризира зависимостта на изходния ток I_{out} от изходното напрежение U_{out} (наклонът на I_{out} vs. I_{ref}). Това съпротивление е равно на изходното съпротивление на транзистора **Mo**.

$$r_{out} \approx \frac{1}{\lambda_o I_{out}}$$

Фамилия от изходни характеристики на токово огледало

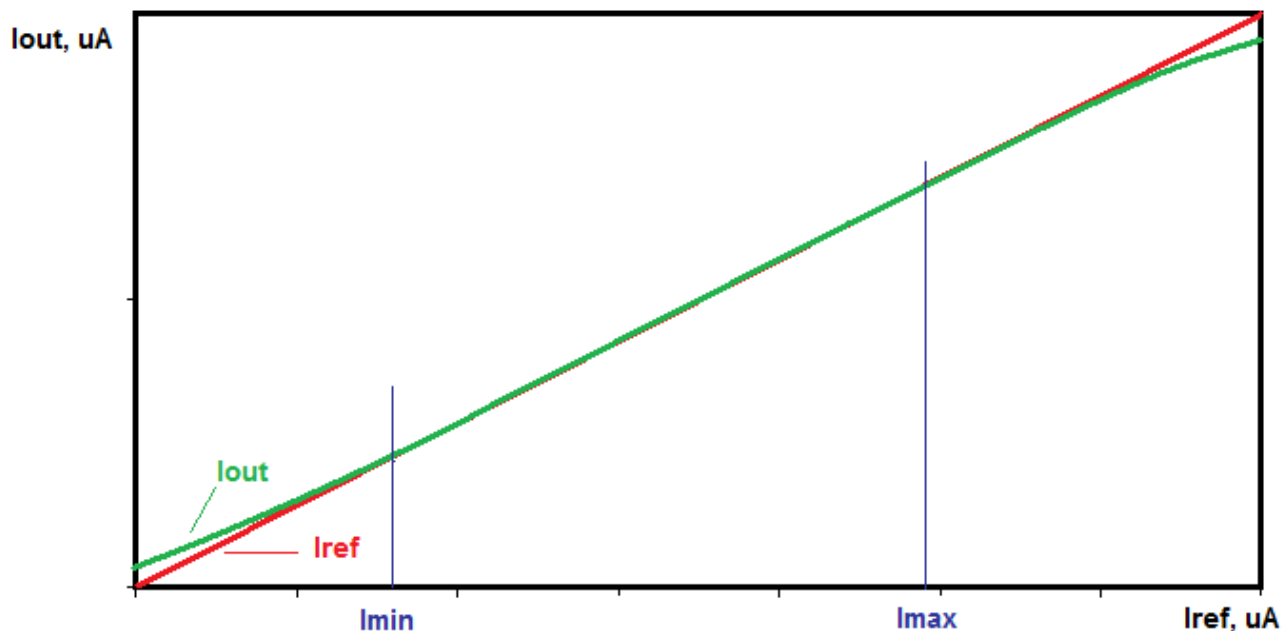


Колкото по-голямо е I_{ref} – толкова по-голямо е U_{outmin} и толкова по-малко е r_{out} .

$$U_{outmin} \geq U_{DSAT} = U_{GS} - U_{TN0} = U_{eff}$$

$$r_{out} \approx \frac{1}{\lambda_o I_{out}}$$

Предавателна характеристика на токово огледало



Фигурата представя идеалната (в червено) и реалната (в зелено) предавателни характеристики на токовото огледало. Най-доброто съгласуване е между стойностите **I_{min}** и **I_{max}** на входния ток **I_{ref}** . Границите зависят от избраното отношение на токовете и са различни за различните видове огледала. Обикновено тези граници определят препоръчваната работна област на огледалото.

Чувствителност на токовото огледало.

Важен параметър на токовото огледало е чувствителността S на изходния ток I_{out} спрямо изменението на изходното напрежение U_{out} в работния диапазон $U_{outmin} \leq U_{out} \leq U_{DD}$.

$$S_{U_{out}}^{I_{out}} = \frac{dI_{out}}{dU_{out}} \bigg/ \frac{I_{out}}{U_{out}} \approx \frac{\Delta I_{out}}{\Delta U_{out}} \bigg/ \frac{I_{out}}{U_{out}} = \frac{\Delta I_{out}}{I_{out}} \bigg/ \frac{\Delta U_{out}}{U_{out}}$$

В случай на идеално токово огледало чувствителността е нула.

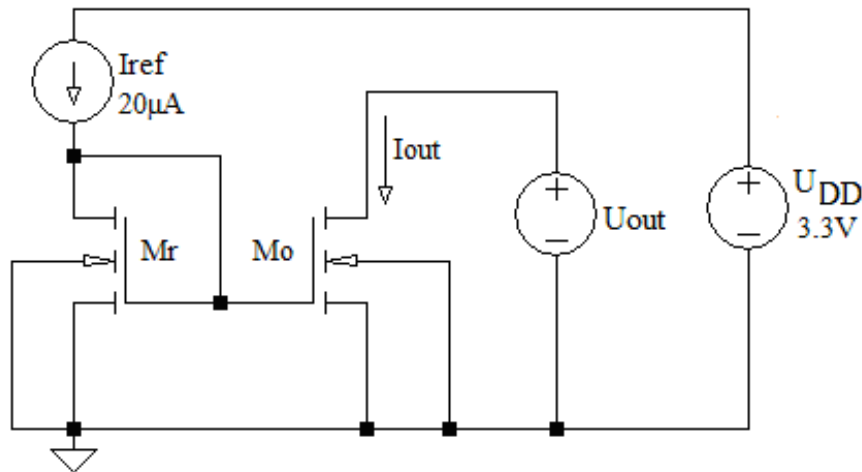
Неточности поради асиметрия (несъгласуване) на транзисторите

Когато отношението на токовете m е различно от 1 , двата транзистора в токовото огледало имат различни отношения W/L и съответно техните размери не са еднакви.

Тази асиметрия води до разлики в параметрите на транзисторите и оттам до отклонения на изходния ток от идеалния.

В зависимост от конкретния случай, грешката може да достигне до 15-20%.

Оразмеряване на просто токово огледало



Дадено:

$$I_{ref} = 20\mu A;$$

$$I_{out} = 60\mu A;$$

0,35μm AMS CMOS технология:

$$U_{TN0} = 0,45V; K_n = 100\mu A/V^2; \lambda_n = 0,014V^{-1}$$

Да се определят:

-Размерите W и L на M_r и M_o ;

-Основните параметри на схемата.

Решение:

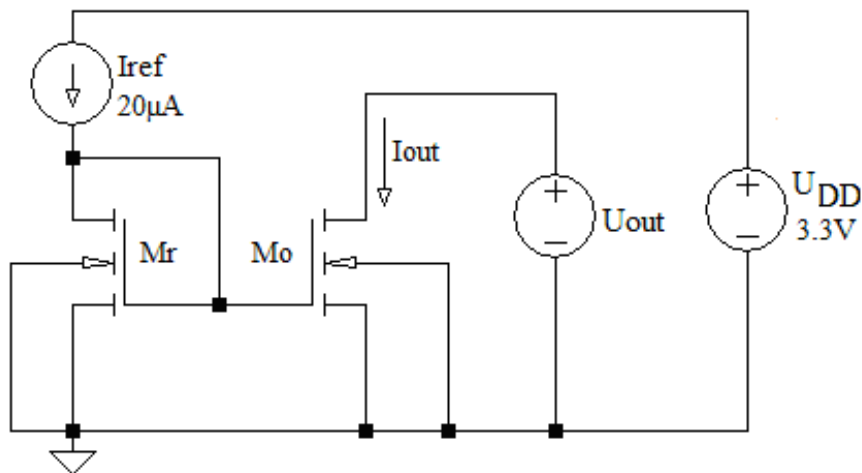
$$I_{ref} \approx \frac{K_n W_r}{2 L_r} (U_{GS} - U_{TN0})^2 = \frac{K_n W_r}{2 L_r} U_{eff}^2$$

Приемаме: $L_o = L_r = 2\mu m$ и $U_{eff} = 0,2V$ (припомнете си защо).

$$I_{ref} \approx \frac{100e-6}{2} \frac{W_r}{2e-6} 0,2^2 = 20\mu A; W_r = 20\mu m$$

$$\frac{W_o}{W_r} = \frac{I_{out}}{I_{ref}} = \frac{60\mu A}{20\mu A} = 3; W_o = 3W_r = 60\mu m$$

Изчисляване на основните параметри - 1



$$U_{GSr} = U_{effr} + U_{TN0r}; \quad U_{GS0} = U_{effo} + U_{TN0o};$$

$$U_{GSr} = U_{GS0}; \quad U_{TN0r} \approx U_{TN0o};$$

$$U_{eff} = U_{GS} - U_{TN0};$$

$$U_{effr} \approx U_{effo}$$

Минималното напрежение на изхода U_{outmin} , при което схемата е работоспособна, се определя от условието транзисторът M_o да работи в областта на насищане:

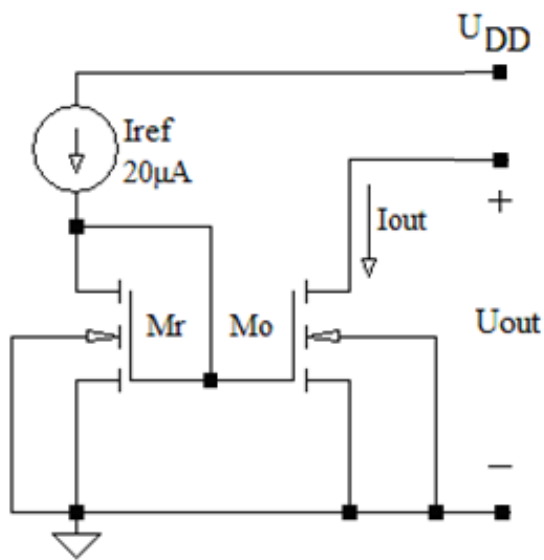
$$U_{DS0} \geq U_{DSAT0} = U_{effo} = U_{effr},$$

където U_{effo} и U_{effr} са ефективните напрежения на M_o и M_r , а U_{DSAT0} е напрежението на насищане. Следователно:

$$U_{outmin} \approx U_{DSAT0} = U_{effo} = U_{effr} = 0.2V.$$

Минималното напрежение на изхода, при което схемата е работоспособна, е $U_{outmin} \approx 0.2V$.

Изчисляване на основните параметри - 2



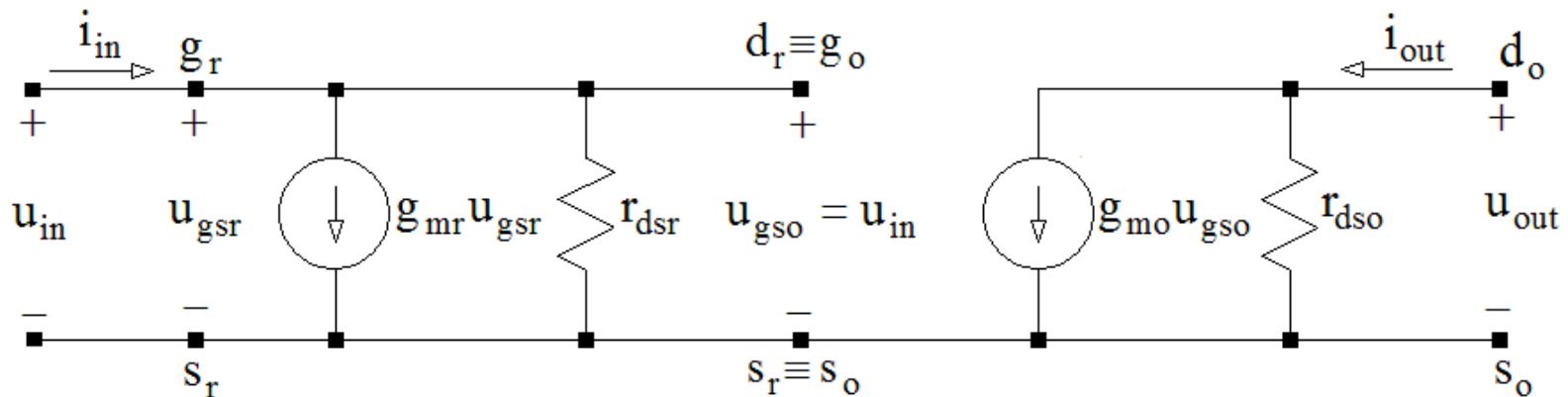
$$r_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = \frac{u_{in}}{g_{mr}u_{in} + \frac{u_{in}}{r_{dsr}}} = \frac{1}{g_{mr} + \frac{1}{r_{dsr}}} = \frac{1}{g_{mr} + g_{dsr}} \approx \frac{1}{g_{mr}}$$

$$g_{mr} = \sqrt{2K_n \frac{W_r}{L_r} I_{ref}} = \sqrt{2 * 100e-6 * \frac{20}{2} * 20e-6} = 200\mu A/V$$

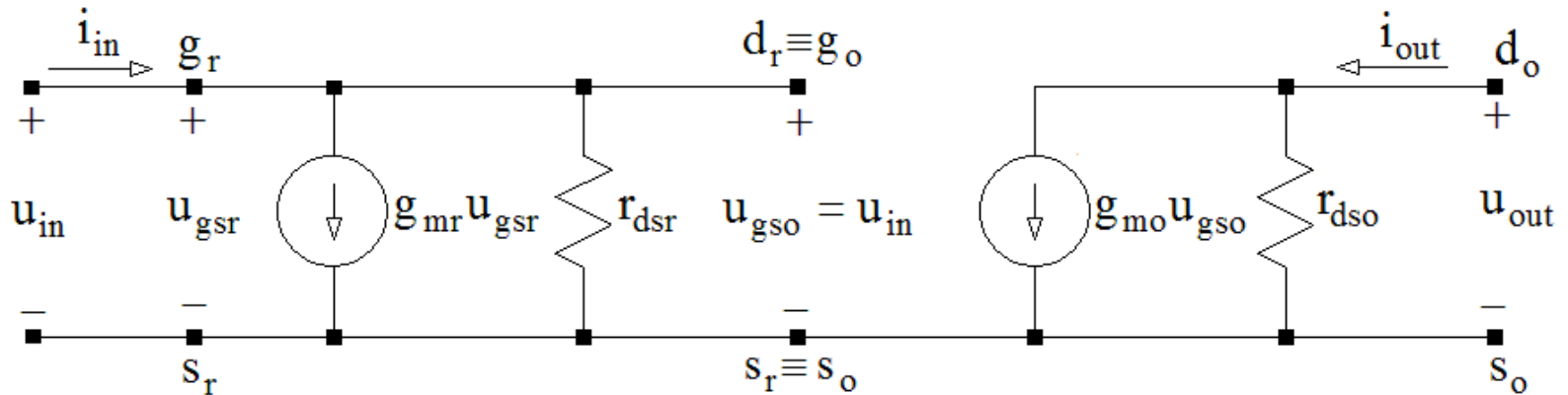
$$g_{dsr} = \lambda_n I_{ref} = 0.014 * 20e-6 = 0.28\mu A/V$$

$$g_{dsr} \ll g_{mr}$$

$$r_{in} \approx 1/g_{mr} = 1/200e-6 = 5k\Omega$$

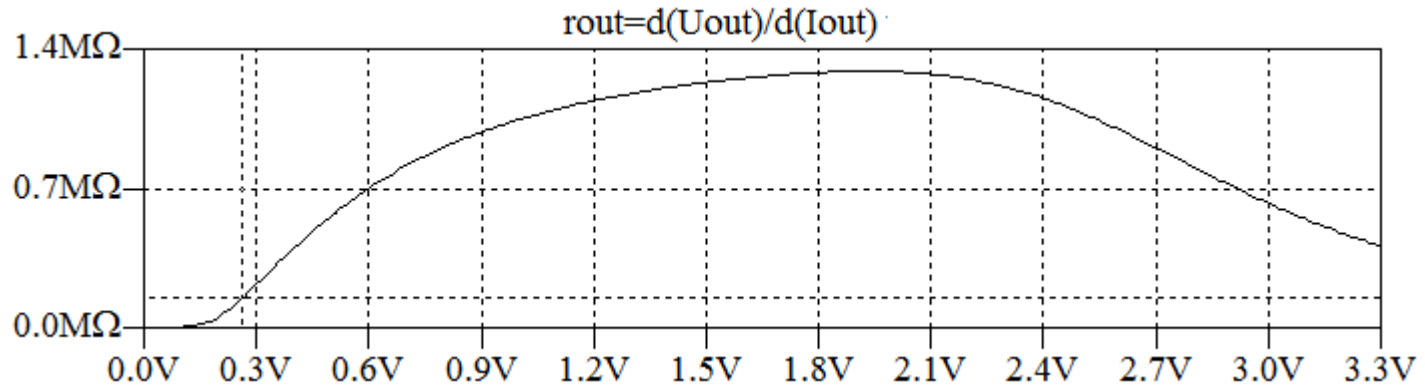


Изчисляване на основните параметри - 3



$$r_{out} = \left. \frac{u_{out}}{i_{out}} \right|_{u_{in}=0} = \frac{u_{out}}{g_{mo}u_{in} + \frac{u_{out}}{r_{dso}}} = \frac{1}{0 + \frac{1}{r_{dso}}} = r_{dso} = \frac{1}{g_{dso}}$$

$$r_{out} = r_{dso} = \frac{1}{\lambda_n I_{out}} = \frac{1}{0.014 * 60e-6} = \frac{1}{0.84e-6} \approx 1.191 M\Omega$$



Определяне на чувствителността на изходния ТОК

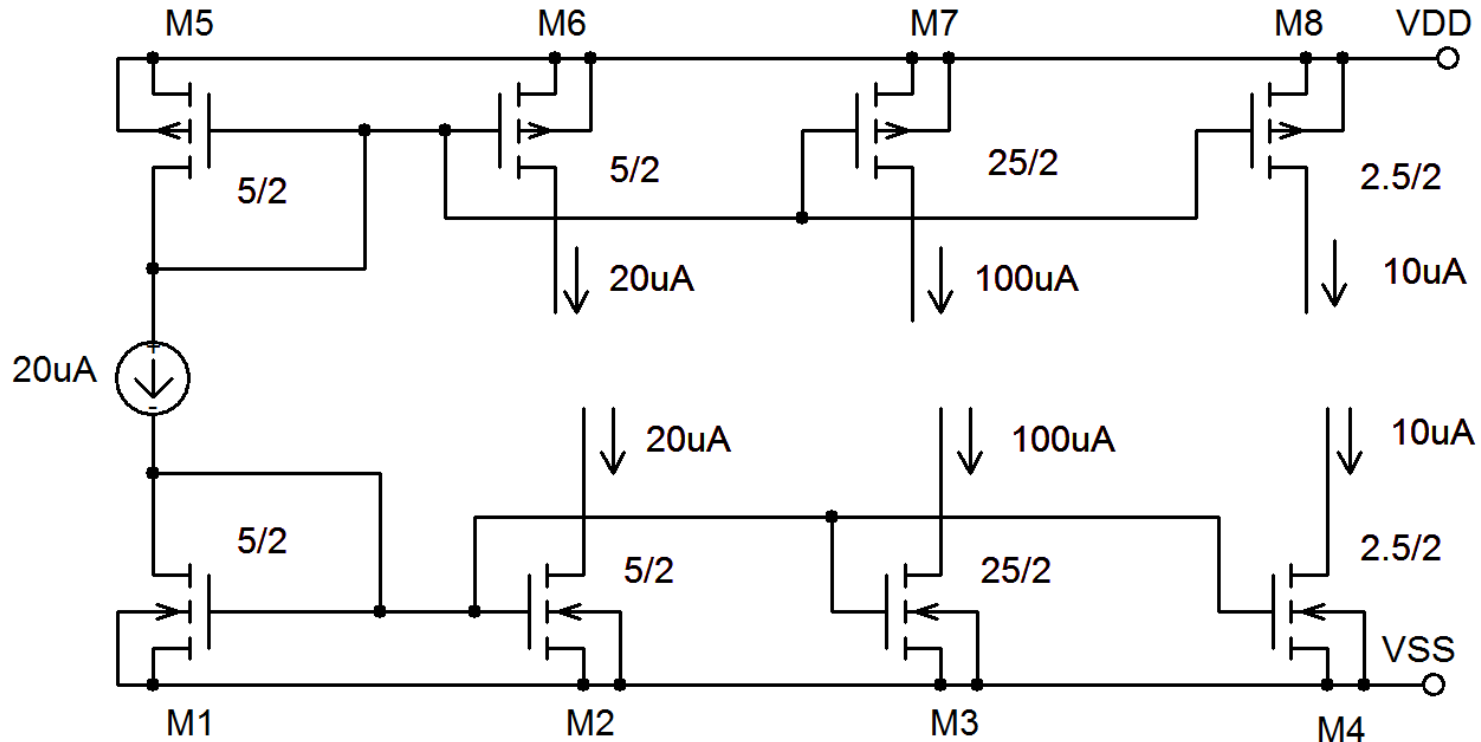
$$S_{U_{out}}^{I_{out}} = \frac{dI_{out}}{dU_{out}} \bigg/ \frac{I_{out}}{U_{out}} \approx \frac{\Delta I_{out}}{\Delta U_{out}} \bigg/ \frac{I_{out}}{U_{out}} = \frac{\Delta I_{out}}{I_{out}} \bigg/ \frac{\Delta U_{out}}{U_{out}}$$

$$\begin{aligned} S_{U_{out}}^{I_{out}} &= \frac{\Delta I_{out}}{\Delta U_{out}} \bigg/ \frac{I_{out}}{U_{out}} = \frac{I_{out}(U_{DD}) - I_{out}(U_{outmin})}{U_{DD} - U_{outmin}} \cdot \frac{U_{DD}/2}{I_{out}(U_{DD}/2)} = \\ &= \frac{62.64\mu\text{A} - 58.76\mu\text{A}}{3.3\text{V} - 0.25\text{V}} \cdot \frac{1.65\text{V}}{60.76\mu\text{A}} \approx 0.035 \end{aligned}$$

Резултат - $S_{U_{out}}^{I_{out}} \approx 0.035$.

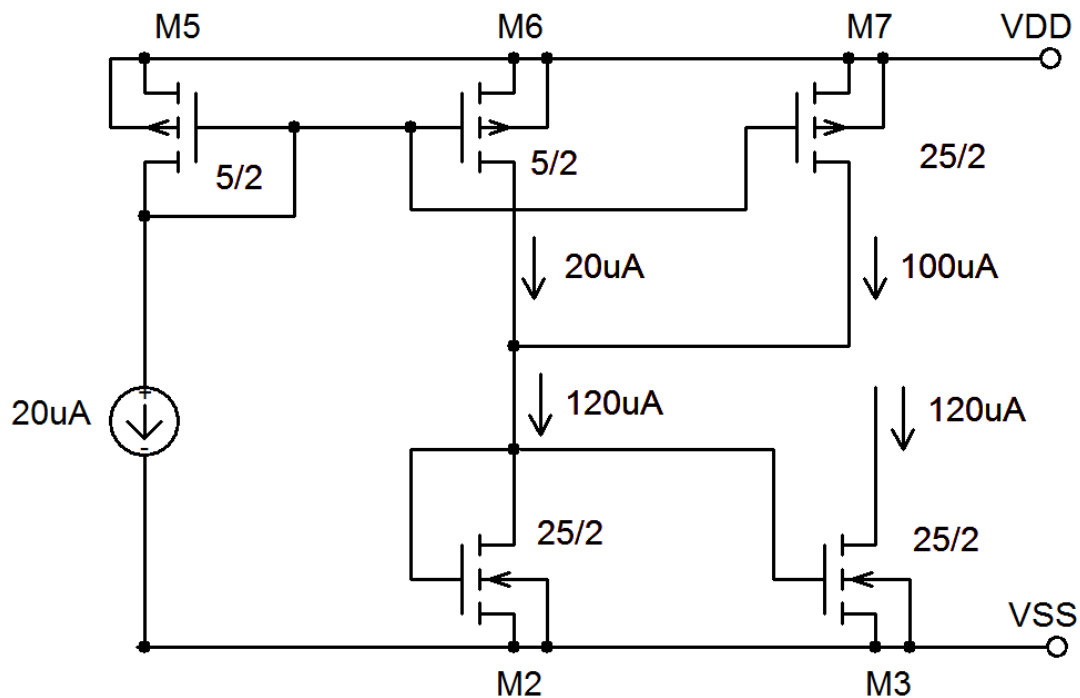
Следователно, при промяна на изходното напрежение U_{out} с 10% изходният ток I_{out} се променя с не повече от 0.35%.

Верига от токови огледала



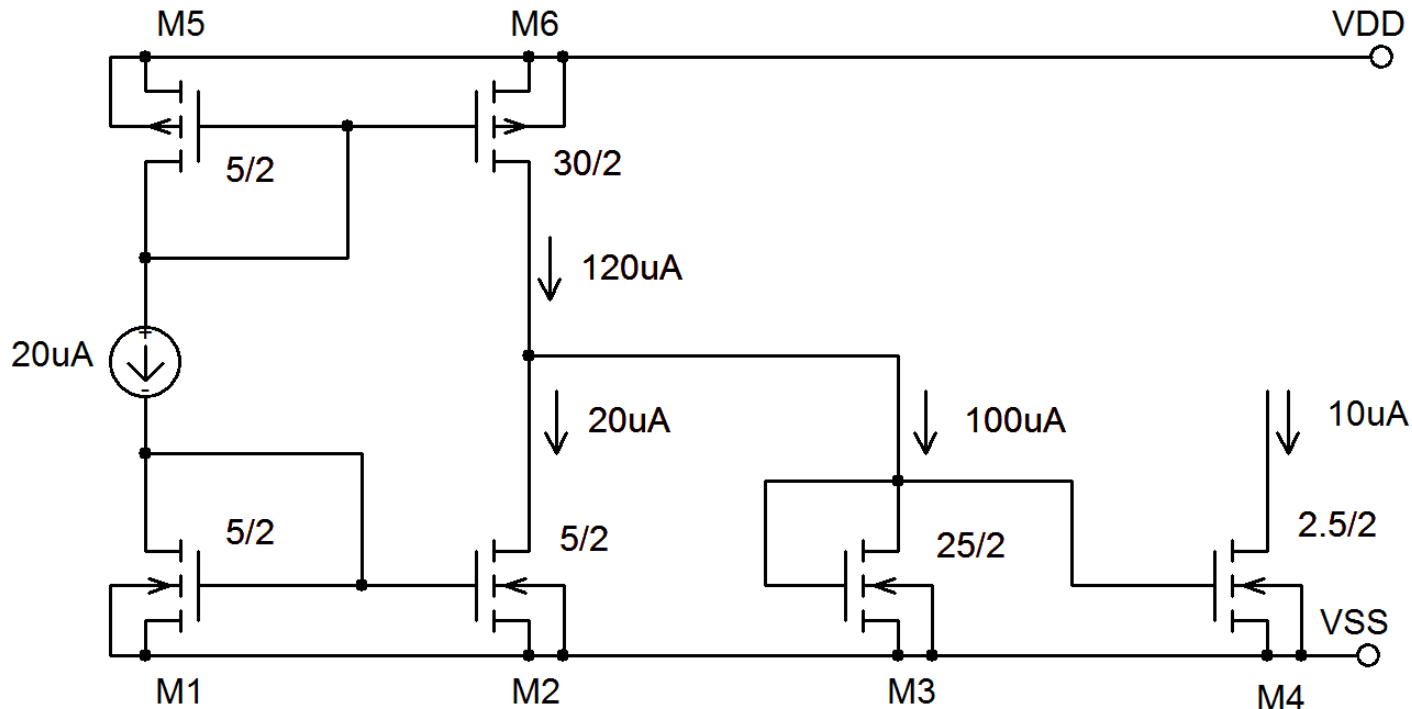
Веригата от токови огледала се състои от прости токови огледала с **NMOS** и **PMOS** транзистори. До всеки транзистор е дадено неговото **W/L** отношение.

Сумиране на токове



$$I_{DM5} = 20\mu\text{A}; \quad I_{DM6} = I_{DM5} = 20\mu\text{A}; \quad I_{DM7} = 5 \cdot I_{DM5} = 5 \cdot 20\mu\text{A} = 100\mu\text{A};$$
$$I_{DM2} = I_{DM7} + I_{DM6} = 20\mu\text{A} + 100\mu\text{A} = 120\mu\text{A}; \quad I_{DM3} = I_{DM2} = 120\mu\text{A}$$

Изваждане на токове



$$I_{DM5} = I_{DM1} = 20\mu\text{A}; \quad I_{DM6} = 6 \cdot I_{DM5} = 6 \cdot 20\mu\text{A} = 120\mu\text{A}; \quad I_{DM2} = I_{DM1} = 20\mu\text{A};$$

$$I_{DM3} = I_{DM6} - I_{DM2} = 120\mu\text{A} - 20\mu\text{A} = 100\mu\text{A}; \quad I_{DM4} = I_{DM3} / 10 = 100\mu\text{A} / 10 = 10\mu\text{A}$$

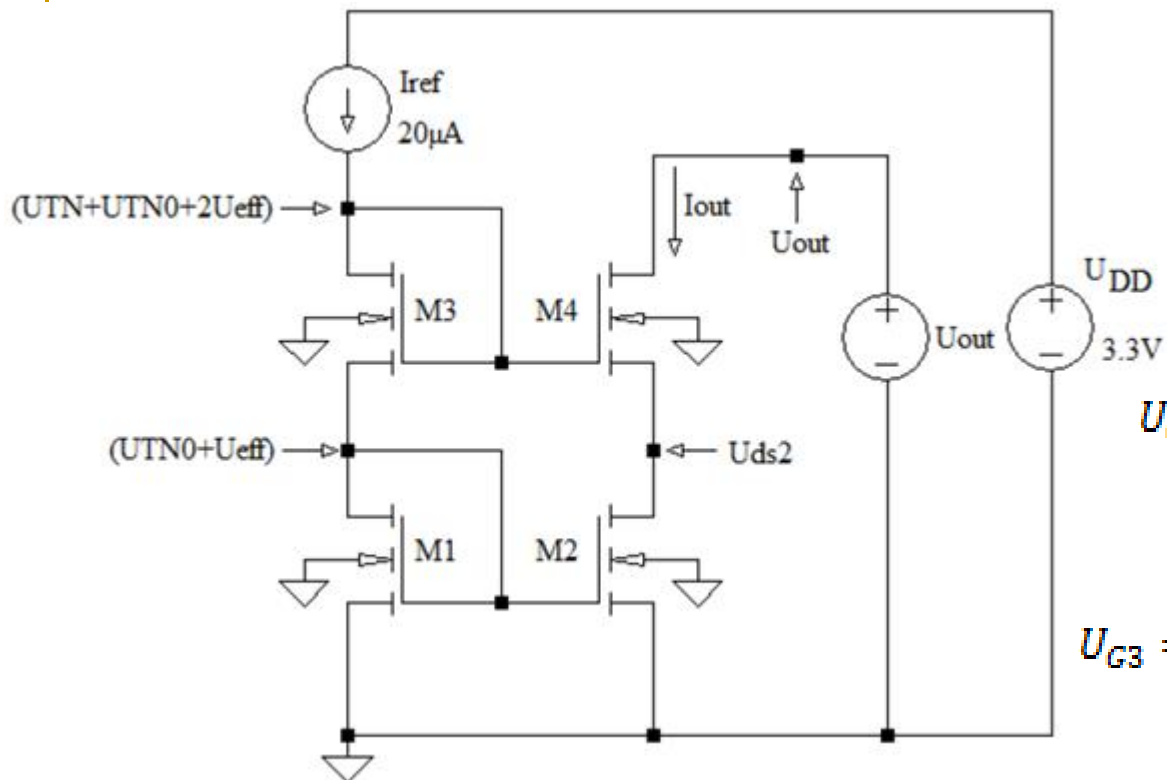
Усъвършенствани токови огледала

Усъвършенстваните токови огледала имат повишен изходен импеданс спрямо простите токови огледала. За целта, към огледалния транзистор се добавят последователно един или няколко допълнителни транзистори. Този подход увеличава многократно изходното съпротивление, но повишава значително и минималното изходно напрежение U_{outmin} . За избягването на този недостатък се прилагат специфични схемни решения.

Най-популярните усъвършенствани токови огледала са:

- каскодно токово огледало (cascode current mirror);
- каскодно токово огледало с понижена стойност на минималното изходно напрежение (high-swing cascode current mirror);
- токово огледало на Уилсън (Wilson current mirror);
- токово огледало с регулируем каскод (regulated cascode current mirror).

Каскодно токово огледало



$$U_{GS1} = U_{DS1} = U_{GS2} = U_{TN0} + U_{eff}$$

$$U_{GS3} = U_{TN} + U_{eff}$$

$$U_{G3} - U_{S3} = U_{TN} + U_{eff}$$

$$U_{G3} = U_{D3} = U_{G4} = U_{S3} + U_{TN} + U_{eff}$$

$$U_{S3} = U_{DS1} = U_{TN0} + U_{eff}$$

$$U_{G3} = U_{D3} = U_{G4} = U_{TN} + U_{TN0} + 2U_{eff}$$

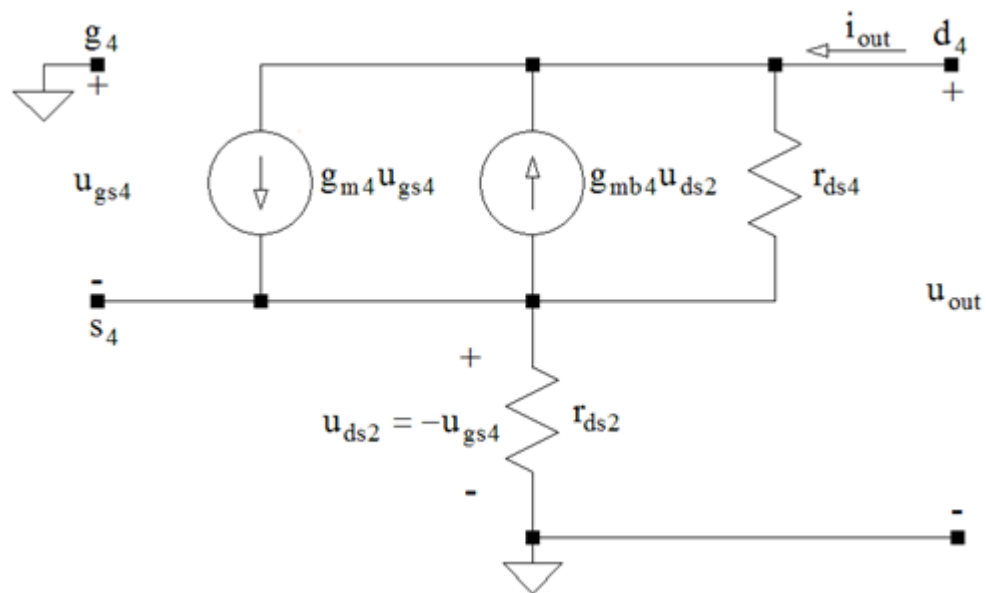
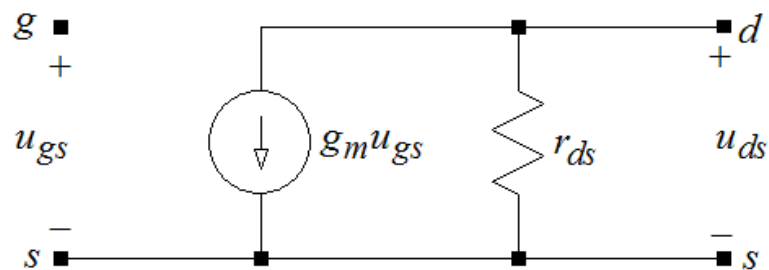
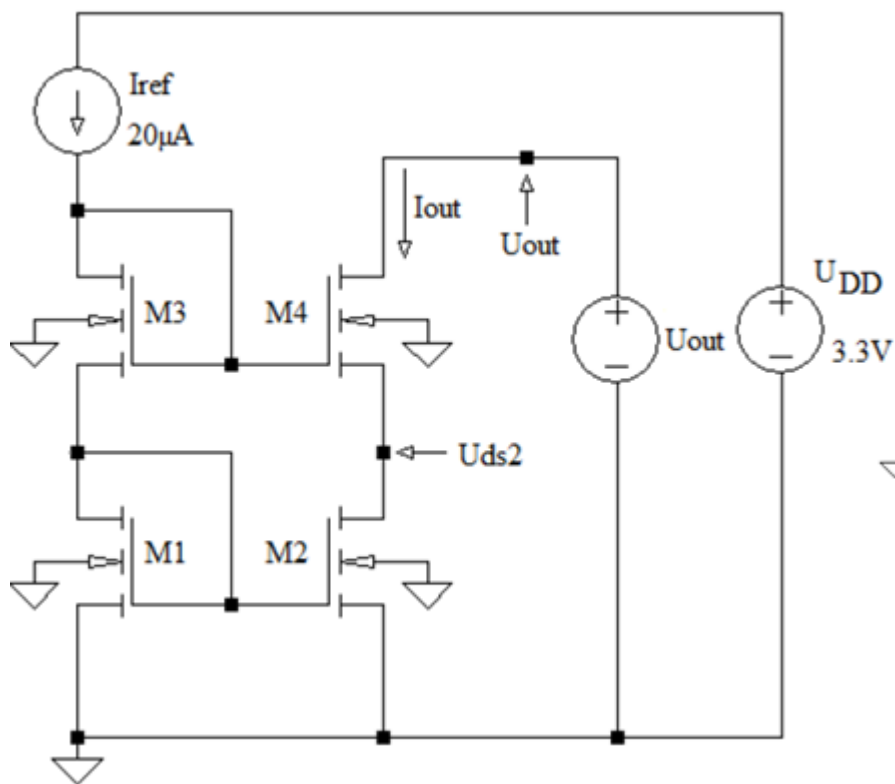
M2 sat.: $U_{DS2} \geq U_{GS2} - U_{TN0} = U_{TN0} + U_{eff} - U_{TN0} = U_{eff}; \quad U_{DS2} \geq U_{eff}$

M4 sat.: $U_{DS4} \geq U_{GS4} - U_{TN} = U_{G4} - U_{DS2} - U_{TN} = U_{TN} + U_{TN0} + 2U_{eff} - U_{DS2} - U_{TN};$ 💬

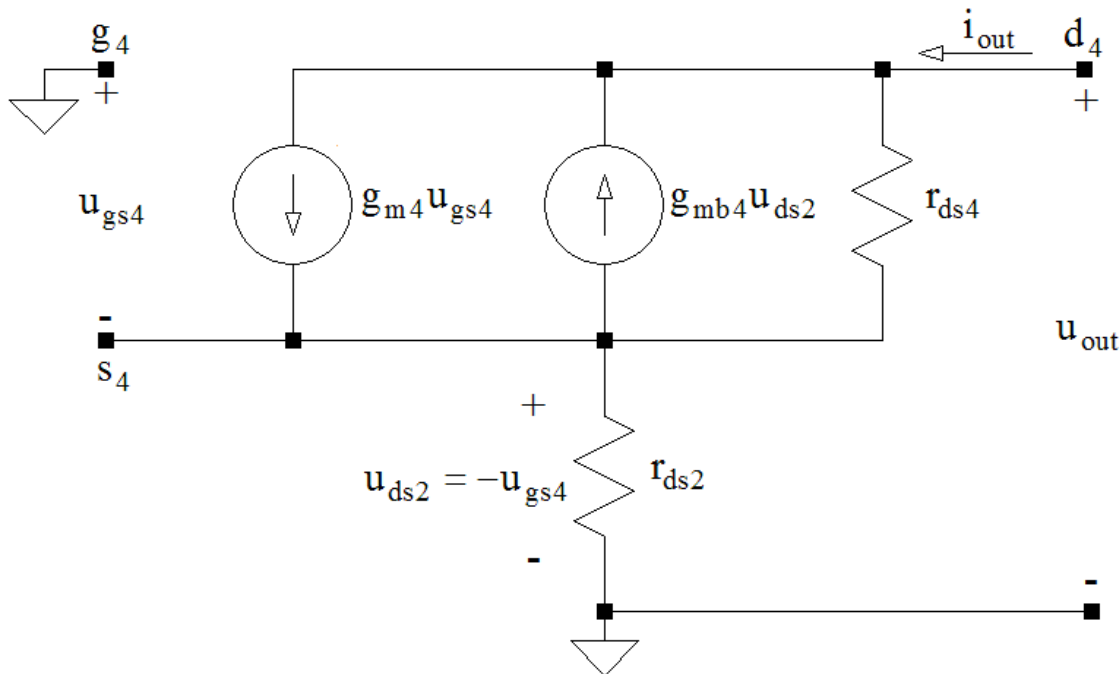
$$U_{DS4} \geq U_{TN0} + 2U_{eff} - U_{DS2}$$

$U_{out} = U_{DS4} + U_{DS2} \geq U_{TN0} + 2U_{eff} - U_{DS2} + U_{DS2} = U_{TN0} + 2U_{eff};$ $U_{outmin} = U_{TN0} + 2U_{eff}$

Каскодно токово огледало



Каскодно токово огледало



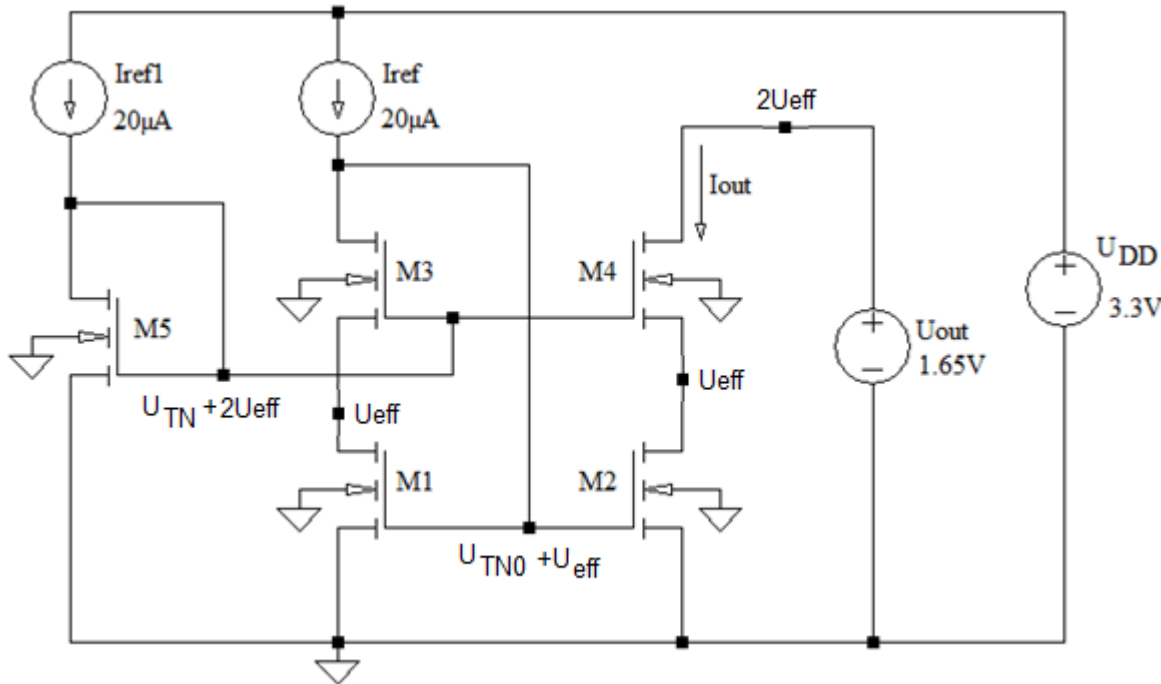
$$r_{out} \approx g_{m4} r_{ds4} r_{ds2} = \frac{g_{m4}}{g_{ds4} g_{ds2}}$$

$$r_{out} = \frac{u_{out}}{i_{out}} = \frac{r_{ds4}(i_{out} - g_{m4}u_{gs4} + g_{mb4}u_{ds2}) + u_{ds2}}{i_{out}}$$

$$-u_{gs4} = u_{ds2} = r_{ds2}i_{out}$$

$$\begin{aligned} r_{out} &= \frac{r_{ds4}(i_{out} + g_{m4}u_{ds2} + g_{mb4}u_{ds2}) + u_{ds2}}{i_{out}} = \\ &= r_{ds4} + g_{m4}r_{ds4}r_{ds2} + g_{mb4}r_{ds4}r_{ds2} + r_{ds2} \approx (g_{m4} + g_{mb4})r_{ds4}r_{ds2} \end{aligned}$$

Каскодно токово огледало с понижена стойност на минималното изходно напрежение



$$U_{outmin} \approx 2U_{eff}$$

$$r_{out} \approx g_{m4}r_{ds4}r_{ds2} = \frac{g_{m4}}{g_{ds4}g_{ds2}}$$

За работа на M3 в насищане:

$$U_{DSM3} \geq U_{GSM3} - U_{TN};$$

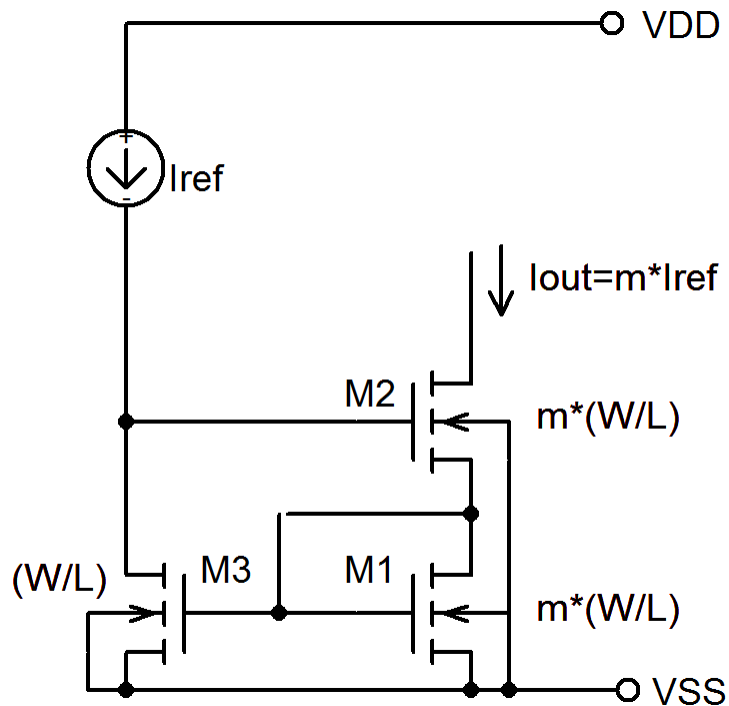
$$U_{DM3} - U_{SM3} \geq U_{GM3} - U_{SM3} - U_{TN};$$

$$U_{DM3} \geq U_{GM3} - U_{TN};$$

$$U_{TN0} + U_{eff} \geq U_{TN} + 2U_{eff} - U_{TN};$$

$$U_{TN0} > U_{eff}$$

Токово огледало на Уилсън



Схемата използва допълнителен сериен транзистор M1 и отрицателна обратна връзка (M1-M3) за подобряване на изходното съпротивление и стабилизиране на изходния ток.

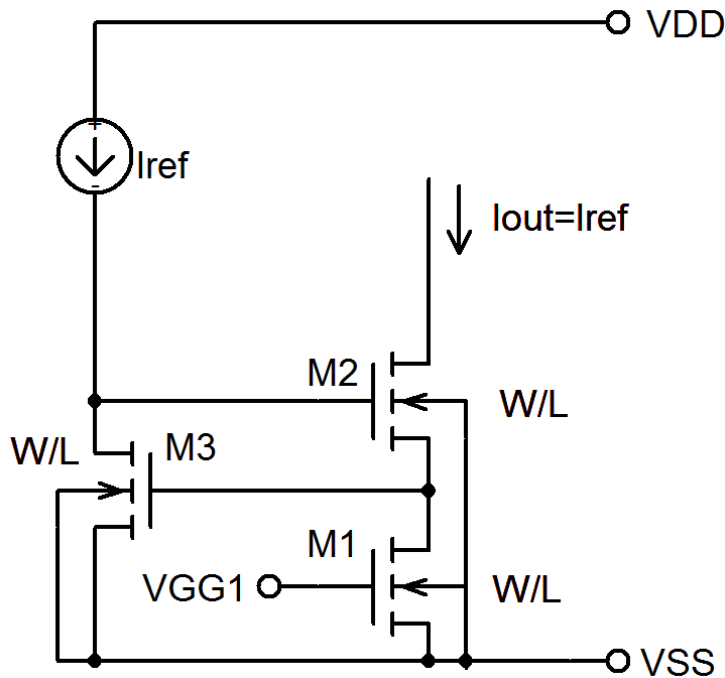
$I_{out} \uparrow \rightarrow U_{GS1} \uparrow \rightarrow U_{GS3} \uparrow$
 и понеже $I_{ref} = const. \rightarrow$
 $\rightarrow U_{DS3} \downarrow \rightarrow U_{GS2} \downarrow \rightarrow I_{out} \downarrow$

$$I_D \approx \frac{K_n W}{2 L} (U_{GS} - U_{TN0})^2 (1 + \lambda_n U_{DS})$$

$$U_{outmin} \geq 2U_{eff} + U_{TN0}$$

$$U_{GS} \approx \sqrt{\frac{2I_D}{K_n \frac{W}{L}}} + U_{TN0}$$

Токово огледало с регулируем каскод



Схемата използва допълнителен транзистор $M1$ и отрицателна обратна връзка ($M3$) за повишаване на изходното съпротивление и стабилизиране на изходния ток.

$$I_{out} \uparrow \rightarrow U_{DS1} \uparrow \rightarrow U_{GS3} \uparrow$$

$$\text{и понеже } I_{ref} = const. \rightarrow$$

$$\rightarrow U_{DS3} \downarrow \rightarrow U_{GS2} \downarrow \rightarrow I_{out} \downarrow$$

$$I_D \approx \frac{K_n W}{2 L} (U_{GS} - U_{TN0})^2 (1 + \lambda_n U_{DS})$$

$$U_{GS} \approx \sqrt{\frac{2I_D}{K_n \frac{W}{L}}} + U_{TN0}$$

$$U_{outmin} \geq 2U_{eff} + U_{TN0}$$

Благодаря за вниманието!
