

# ИЗХОДНИ СТЬПАЛА

# Изисквания към изходните стъпала на CMOS ИС

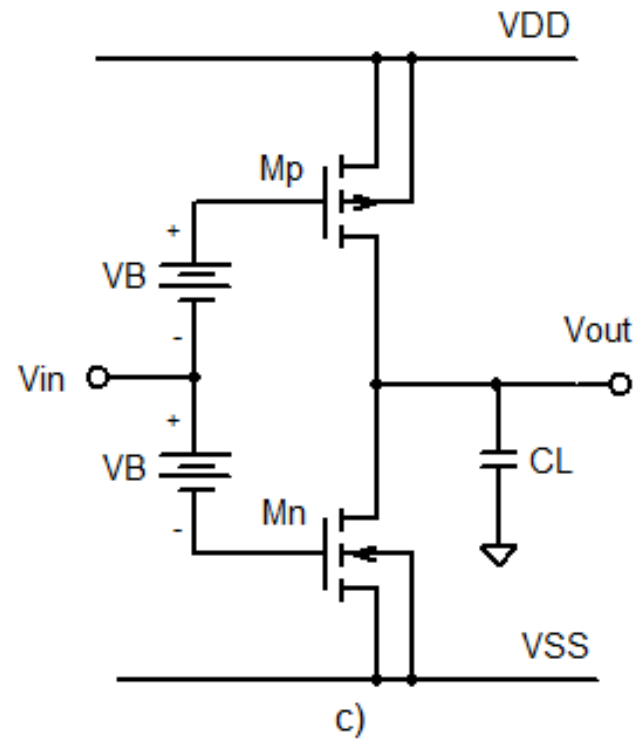
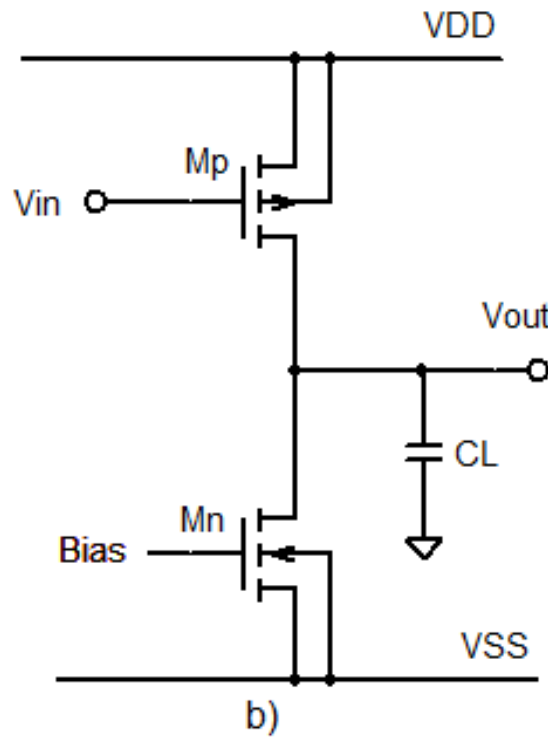
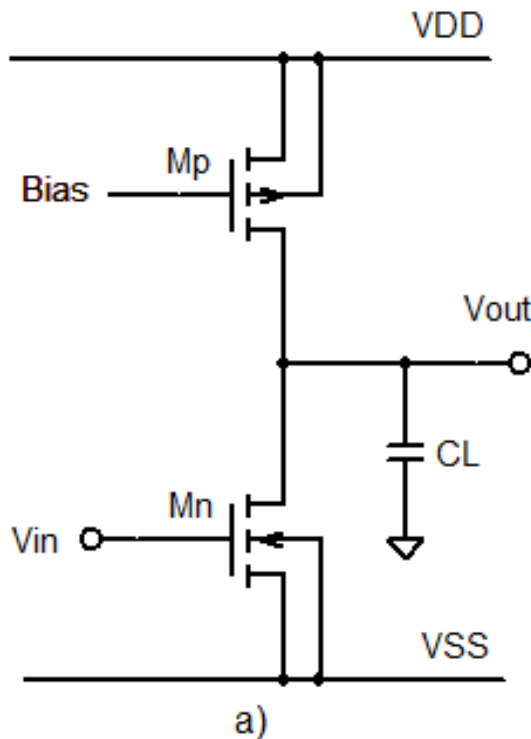
## Товар извън чипа:

- малък товарен резистор ( $50 \dots 1000 \Omega$ ) – получава се делител между товара и изходното съпротивление на стъпалото;
- товарен капацитет между  $5 \text{pF} \dots 5 \text{nF}$ ;
- за да се осигури максимален размах на изходния сигнал **се изисква малко изходно съпротивление.**

## Товар вътре в чипа:

- огромен товарен резистор ( входното съпротивление на MOST);
- товарен капацитет между  $0.5 \text{pF} \dots 5 \text{pF}$ ;
- **не се изисква малко изходно съпротивление**, достатъчно е да се осигури голям изходен ток за зареждане на товарния капацитет.

# Изходни стъпала с общ сорс (с високо изходно съпротивление)



$$A_u = -\frac{g_{mn}}{g_{dsn} + g_{dsp}}$$

$$r_o = \frac{1}{g_{dsn} + g_{dsp}}$$

$$BW = \frac{g_{dsn} + g_{dsp}}{2\pi C_L}$$

$$GBW = \frac{g_{mn}}{2\pi C_L}$$

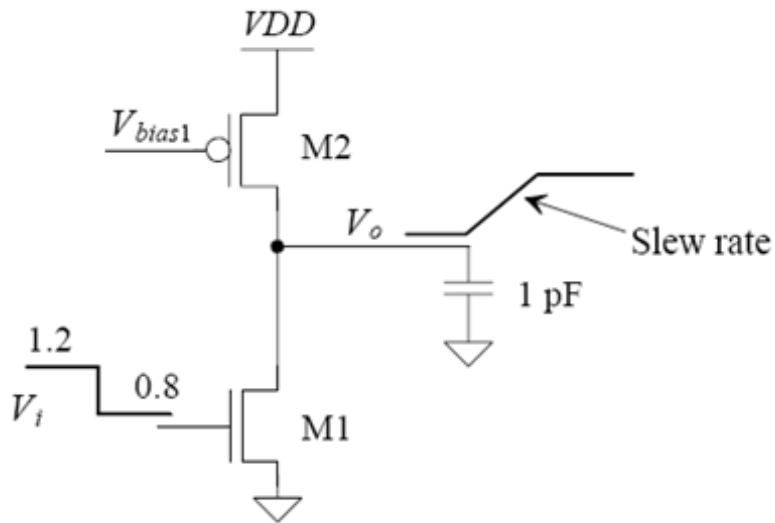
$$A_u = -\frac{g_{mn} + g_{mp}}{g_{dsn} + g_{dsp}}$$

$$r_o = \frac{1}{g_{dsn} + g_{dsp}}$$

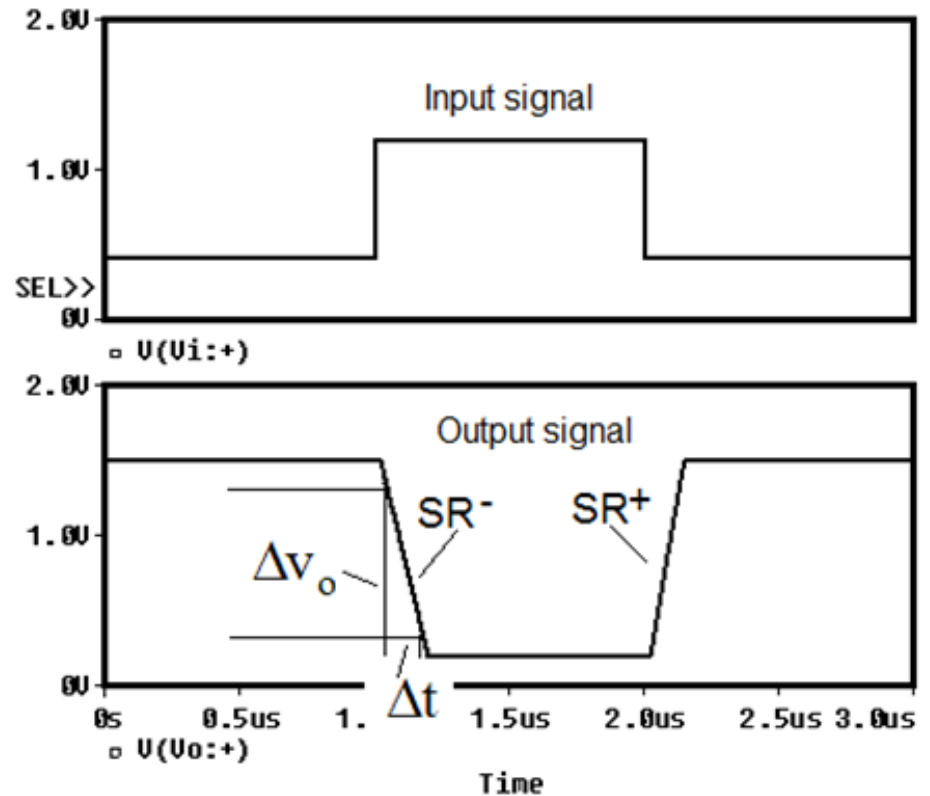
$$BW = \frac{g_{dsn} + g_{dsp}}{2\pi C_L}$$

$$GBW = \frac{g_{mn} + g_{mp}}{2\pi C_L}$$

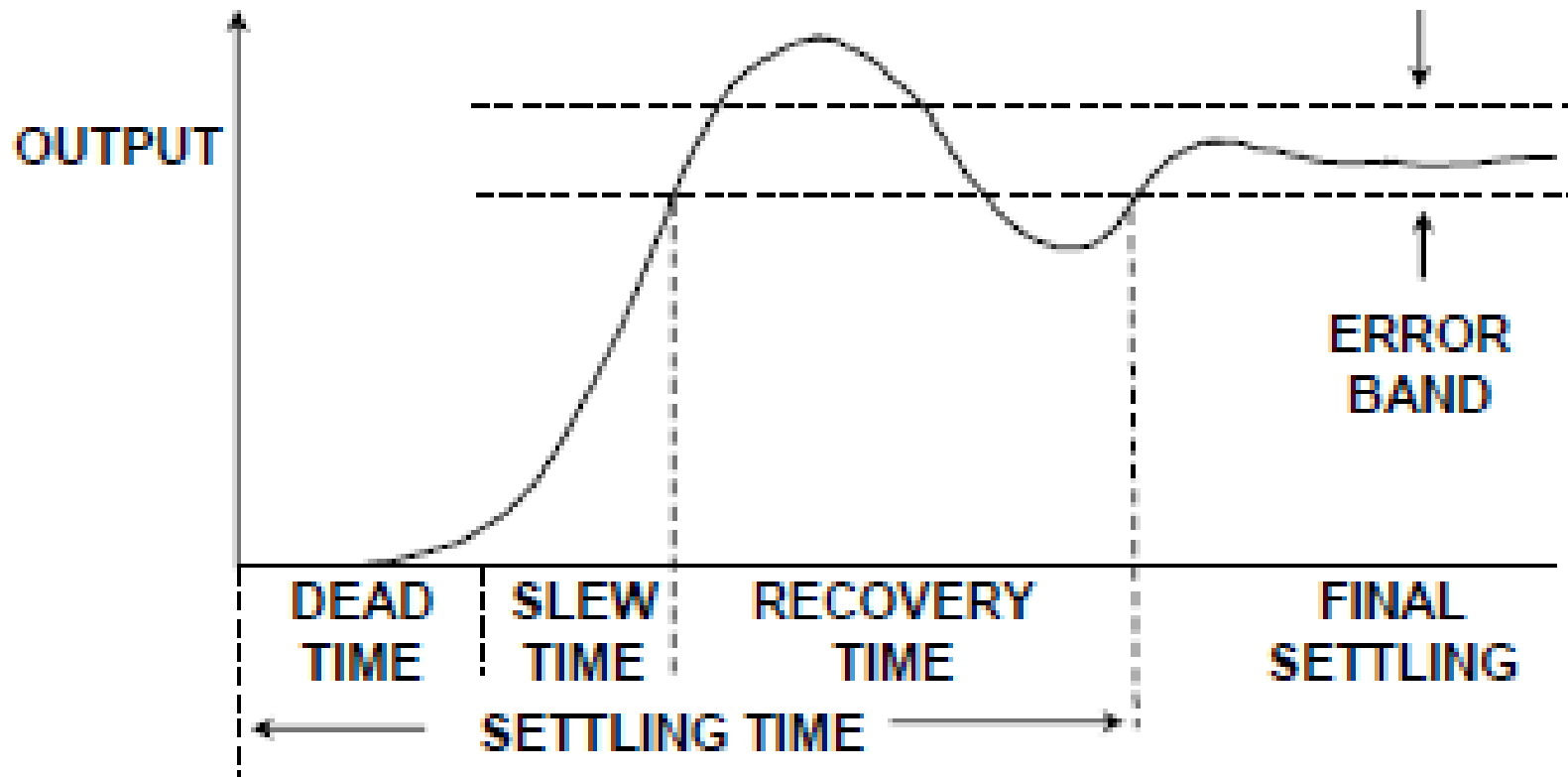
# Скорост на нарастване SR (Slew rate)



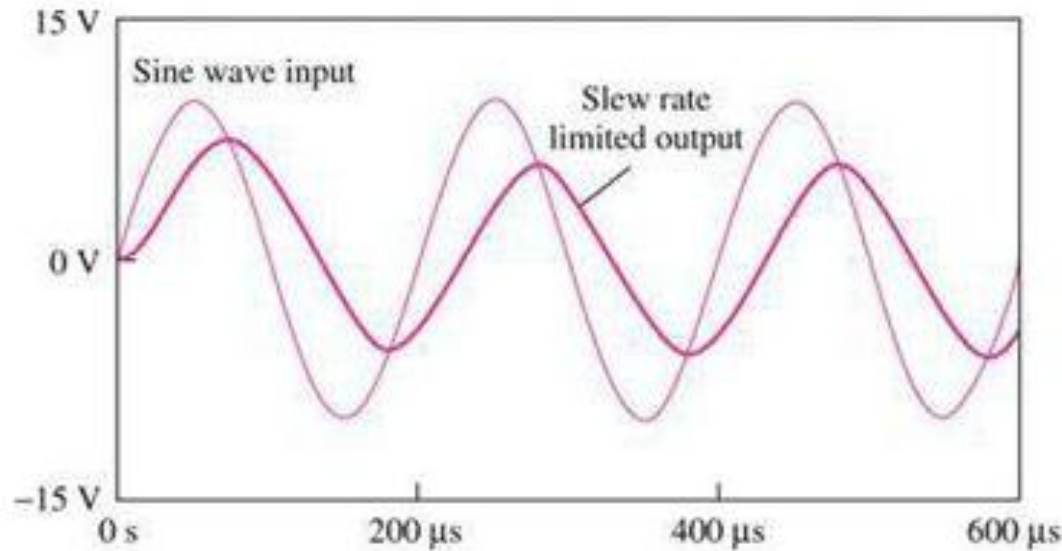
$$SR = \frac{dv_o}{dt} = \frac{\Delta v_o}{\Delta t} = \frac{I}{C_L}$$



# Време за установяване Settling time



# Зависимост на амплитудата на изходния сигнал от SR



## Full-power bandwidth (FPBW)

$$v_{out}(t) = V_o \sin \omega t$$

$$\frac{dv_{out}(t)}{dt} = \omega V_o \cos \omega t$$

$$\left. \frac{dv_{out}(t)}{dt} \right|_{\max} = \omega V_o$$

$$\left. \frac{dv_{out}(t)}{dt} \right|_{\min} = -\omega V_o$$

$$\omega V_o \leq SR^+$$

$$-\omega V_o \geq SR^-$$

$$\omega_{\max} = \min(SR^+/V_o; -SR^-/V_o)$$

# Пример за противотактно изходно стъпало

$$V_o = 1,5 \text{ V}; \quad I = 20 \mu\text{A}; \quad C_L = 10 \text{ pF}$$

$$A_u = -\frac{g_{mn} + g_{mp}}{g_{dsn} + g_{dsp}} = -\frac{\frac{2I}{U_{eff}} + \frac{2I}{U_{eff}}}{\lambda_n I + \lambda_p I} = -\frac{4}{U_{eff}} \frac{1}{\lambda_n + \lambda_p} = \frac{4}{0,2} \frac{1}{0,014 + 0,018} \approx -600$$

$$r_o = \frac{1}{g_{dsn} + g_{dsp}} = \frac{1}{\lambda_n I + \lambda_p I} = \frac{1}{(0,014 + 0,018) * 20e - 6} \approx 1,5 \text{ M}\Omega$$

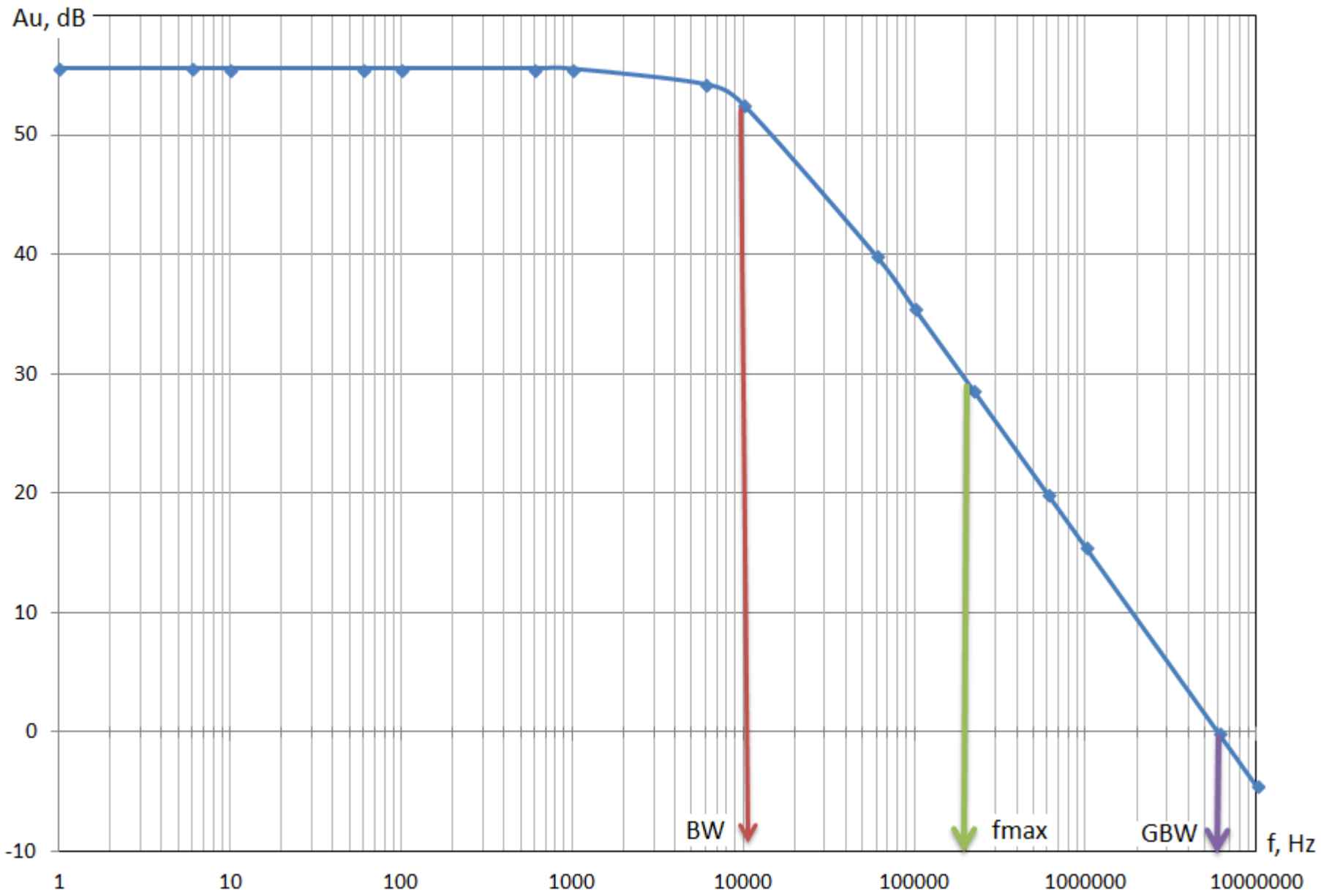
$$BW = \frac{g_{dsn} + g_{dsp}}{2\pi C_L} = \frac{\lambda_n I + \lambda_p I}{2\pi C_L} = \frac{(0,014 + 0,018) * 20e - 6}{2\pi * 10e - 12} \approx 10 \text{ kHz}$$

$$GBW = |A_u| * BW \approx 6 \text{ MHz}$$

$$SR = \frac{I}{C_L} = \frac{20e - 6}{10e - 12} = 2 \text{ V}/\mu\text{s}$$

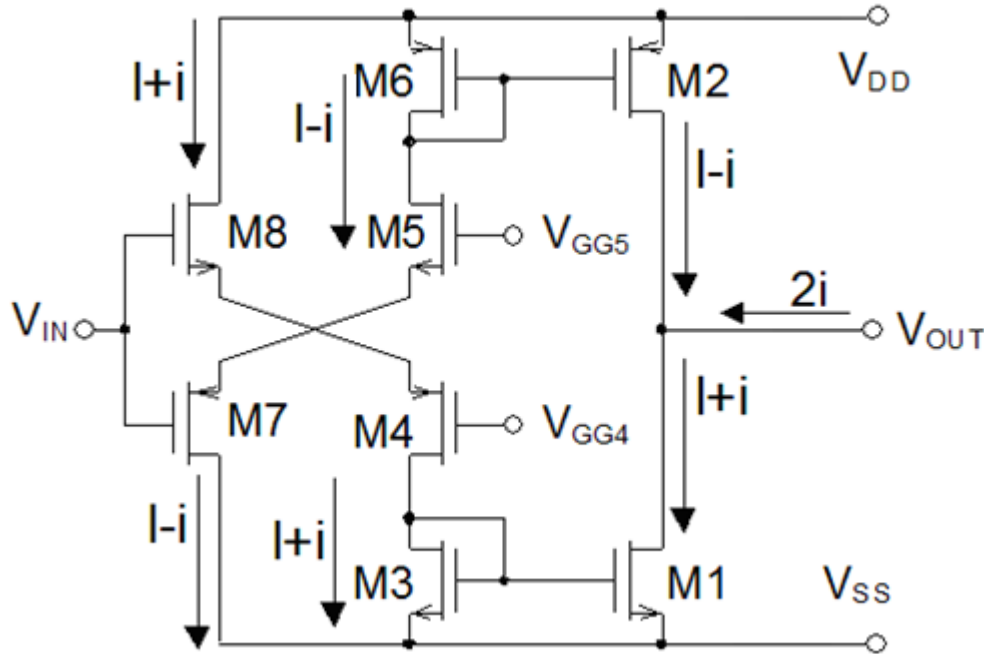
$$SR \geq \omega_{max} V_o \quad \rightarrow \quad f_{max} = \frac{SR}{2\pi V_o} = \frac{2e + 6}{2\pi * 1,5} \approx 200 \text{ kHz}$$

$$V_o(\text{при } f = GBW = 6 \text{ MHz}) = \frac{SR}{2\pi f} = \frac{2e + 6}{2\pi * 6e + 6} \approx 50 \text{ mV}$$





# Примерна схема на противотактен изходен усилвател



$$u_{out} = -i_{out} \cdot r_{out}$$

$$i_{out} = 2i \quad r_{out} = \frac{1}{g_{ds1} + g_{ds2}}$$

$$A_{u8} = \frac{g_{m8}}{g_{m8} + g_{mb8} + g_{ds8} + g_{in4}}$$

$$r_{i4} = \frac{1}{g_{m4} + g_{mb4}} \approx \frac{1}{g_{m8} + g_{mb8}}$$

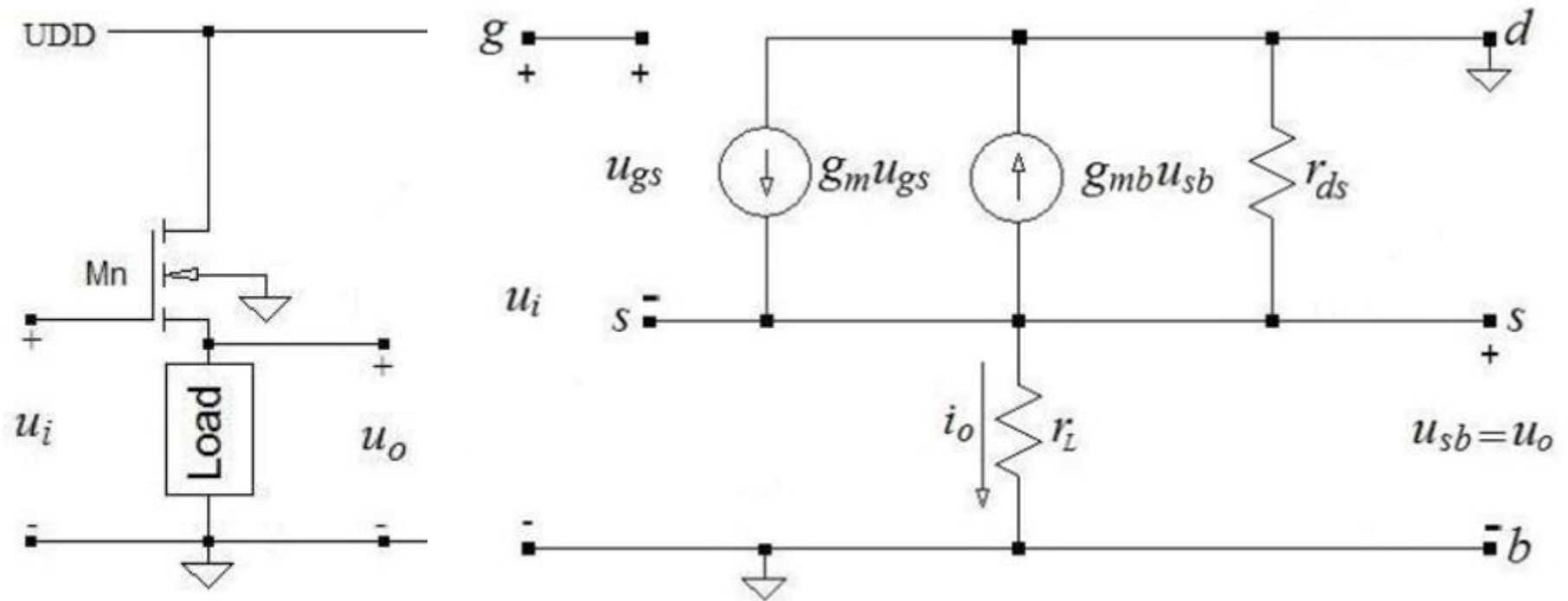
$$g_{i4} = g_{m4} + g_{mb4} \approx g_{m8} + g_{mb8}$$

$$A_{u8} = \frac{g_{m8}}{g_{m8} + g_{mb8} + g_{ds8} + g_{in4}} \approx \frac{g_{m8}}{g_{m8} + g_{mb8} + g_{i4}} = \frac{g_{m8}}{2(g_{m8} + g_{mb8})}$$

$$i = \frac{u_{i4}}{r_{i4}} = \frac{A_{u8}}{r_{i4}} u_{in} = (g_{m4} + g_{mb4}) \frac{g_{m8}}{2(g_{m8} + g_{mb8})} u_{in} \approx \frac{g_{m8}}{2} u_{in}$$

$$u_{out} = -i_{out} \cdot r_{out} = -\frac{2i}{g_{ds1} + g_{ds2}} = -\frac{2}{g_{ds1} + g_{ds2}} \frac{g_{m8}}{2} u_{in} = -\frac{g_{m8}}{g_{ds1} + g_{ds2}} u_{in}$$

## Усилвателно стъпало с общ дрейн



Определяне на коефициента на предаване на входното напрежение  $A_u$

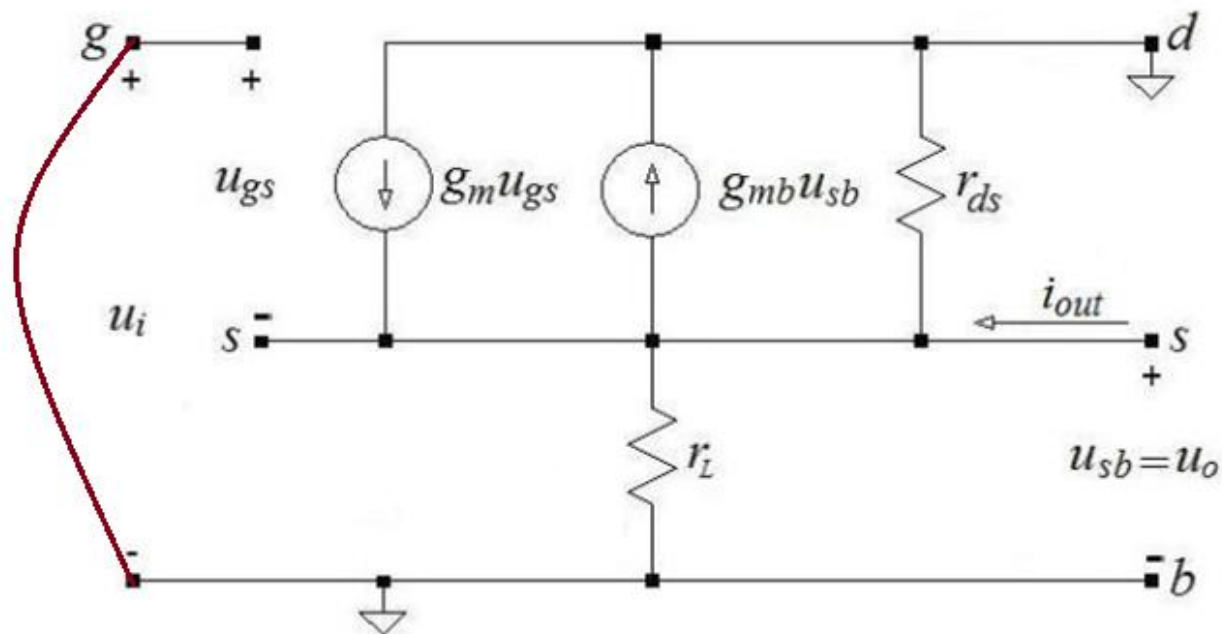
$$g_L u_o = g_m (u_i - u_o) - g_{mb} u_o - g_{ds} u_o$$

$$(g_m + g_{mb} + g_{ds} + g_L) u_o = g_m u_i$$

$$A_u = \frac{g_m}{g_m + g_{mb} + g_{ds} + g_L}$$

$$A_u \approx \frac{g_m}{g_m + g_{mb}}$$

## Усилвателно стъпало с общ дрейн



$$r_o = \frac{u_o}{i_{out}}$$

**Определяне на изходното съпротивление  $r_o$**

$$i_{out} = g_L u_o + g_{ds} u_o - g_m u_{gs} + g_m u_{sb}$$

При стойност на входното напрежение  $u_i = 0$ ,  $u_{gs} = -u_o = -u_{sb}$

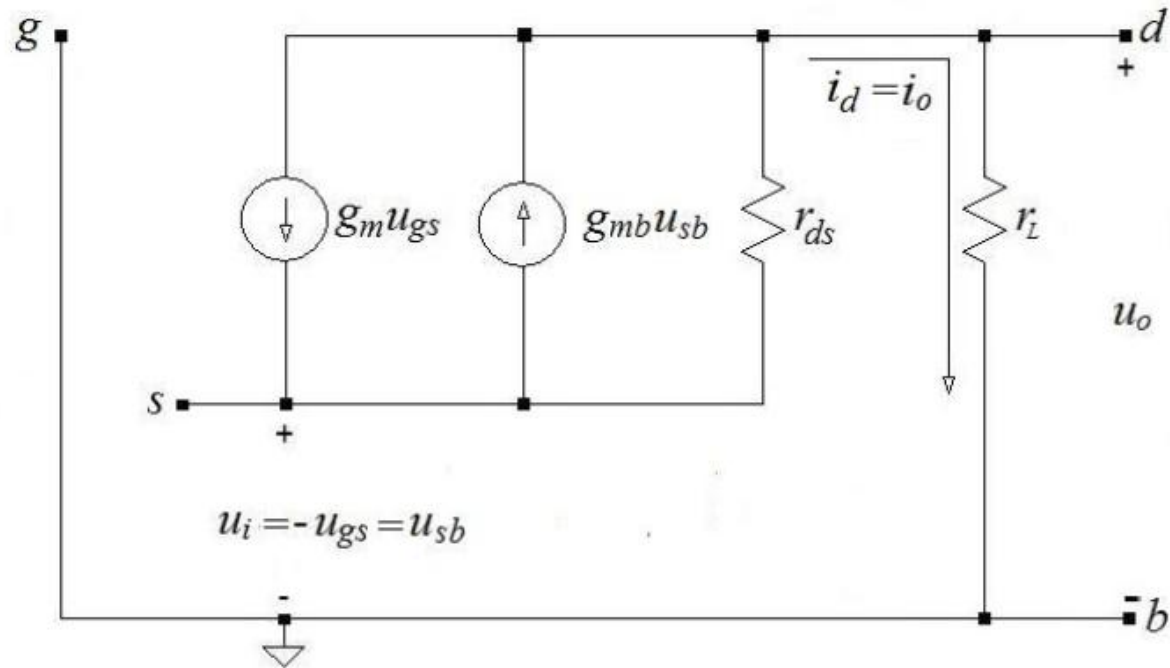
$$i_{out} = g_L u_o + g_{ds} u_o + g_m u_o + g_{mb} u_o$$

$$r_o = \frac{u_o}{i_{out}} = \frac{1}{g_m + g_{mb} + g_{ds} + g_L}$$

$$r_o \approx \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

# Усилвателно стъпало с общ гейт

$$r_i \approx \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$



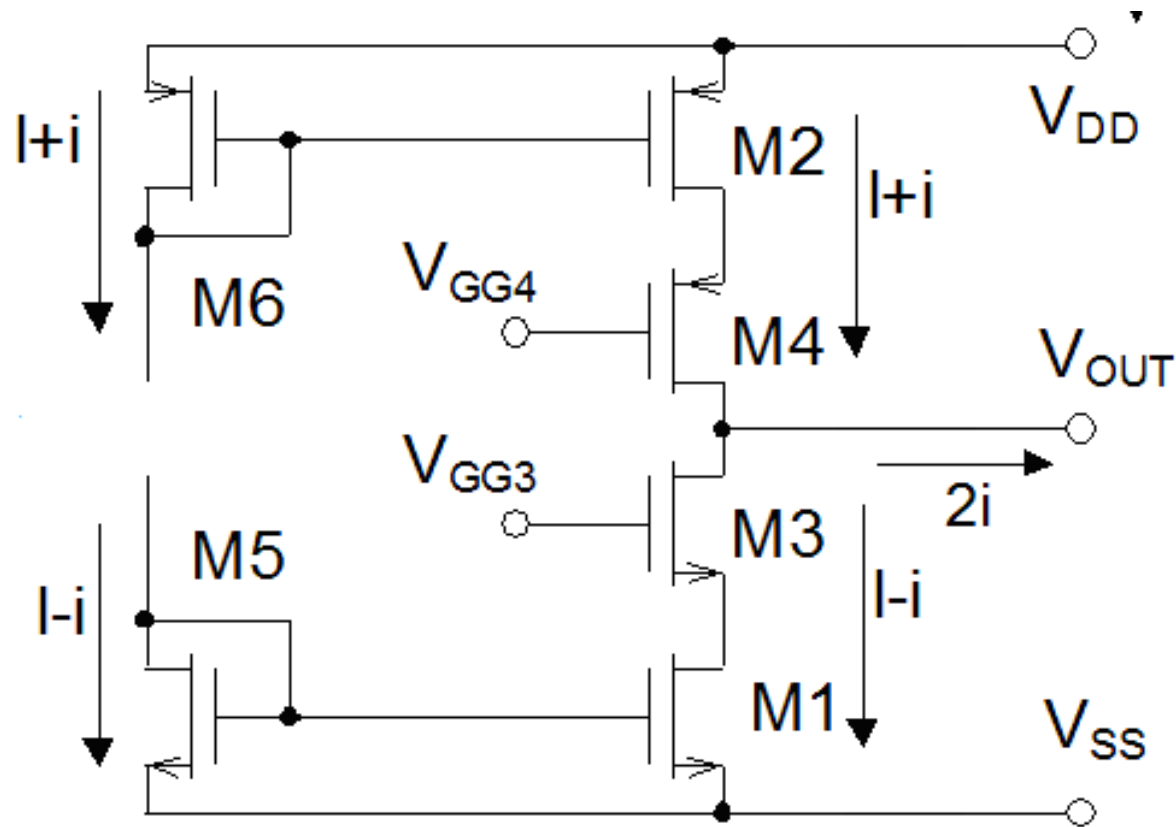
**Определяне на входното съпротивление  $r_i$**

$$i_i = i_s = i_d = i_o = -g_m u_{gs} + g_{mb} u_{sb} + (u_i - u_o) g_{ds} \quad u_o = i_o r_L = \frac{i_i}{g_L}$$

$$i_i = g_m u_i + g_{mb} u_i + g_{ds} u_i - g_{ds} \frac{i_i}{g_L} \quad \left(1 + \frac{g_{ds}}{g_L}\right) i_i = g_m u_i + g_{mb} u_i + g_{ds} u_i$$

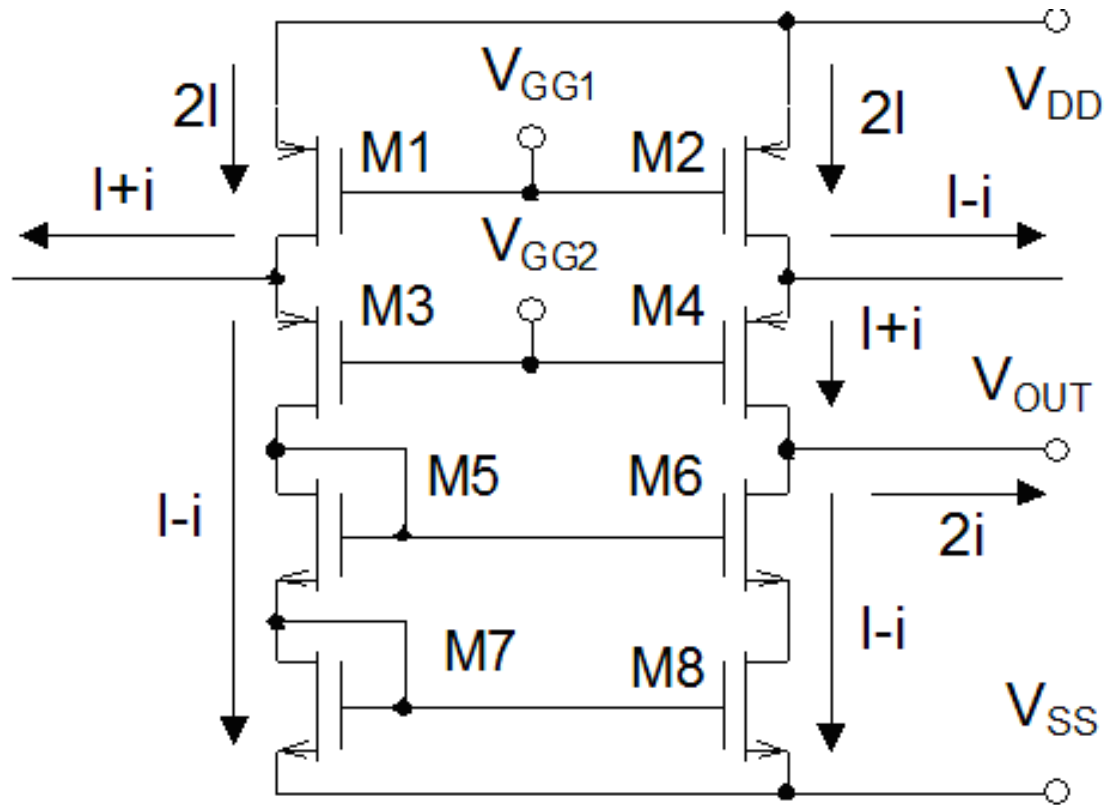
$$r_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{1}{g_m + g_{mb} + g_{ds}} \left(1 + \frac{g_{ds}}{g_L}\right) \approx \frac{1}{g_m + g_{mb}} \left(1 + \frac{g_{ds}}{g_L}\right) \quad r_i \approx \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$

# Усилвател с повишено изходно съпротивление и управление по ток



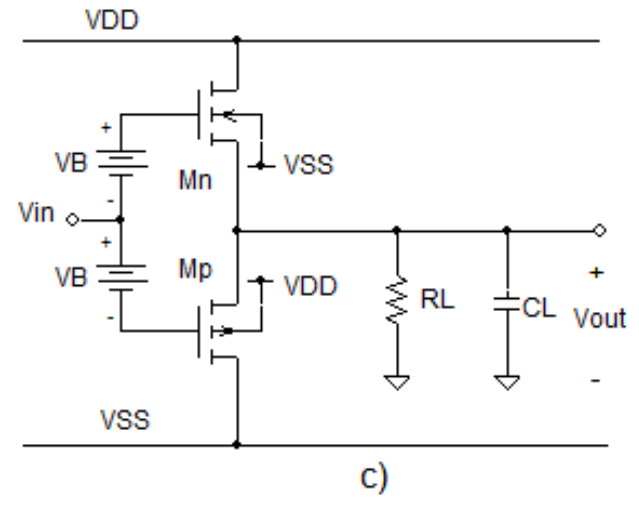
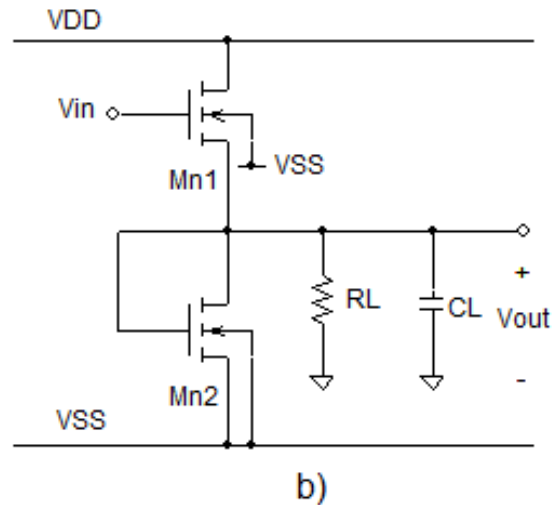
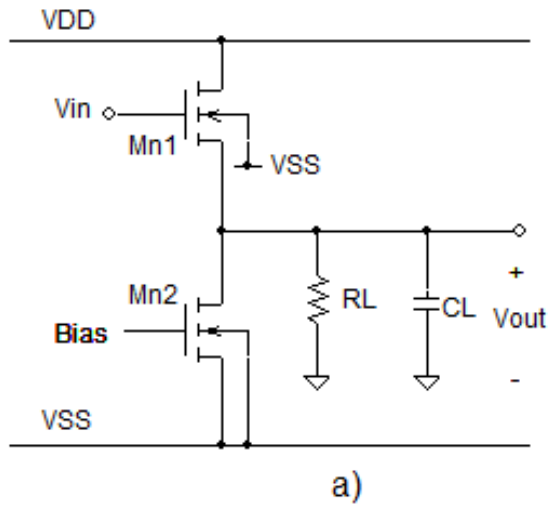
$$u_{out} = i_{out} \cdot r_{out} = \frac{2i}{g_{o3-1} + g_{o4-2}} \quad g_{o3-1} \approx \frac{g_{ds3} \cdot g_{ds1}}{g_{m3}}$$

Изходен усилвател с диференциален вход и повишено  
изходно съпротивление  
Folded cascode /прегънат каскод/



$$u_{out} = i_{out} \cdot r_{out} = \frac{2i}{g_{o6-8} + g_{o4-2}}$$

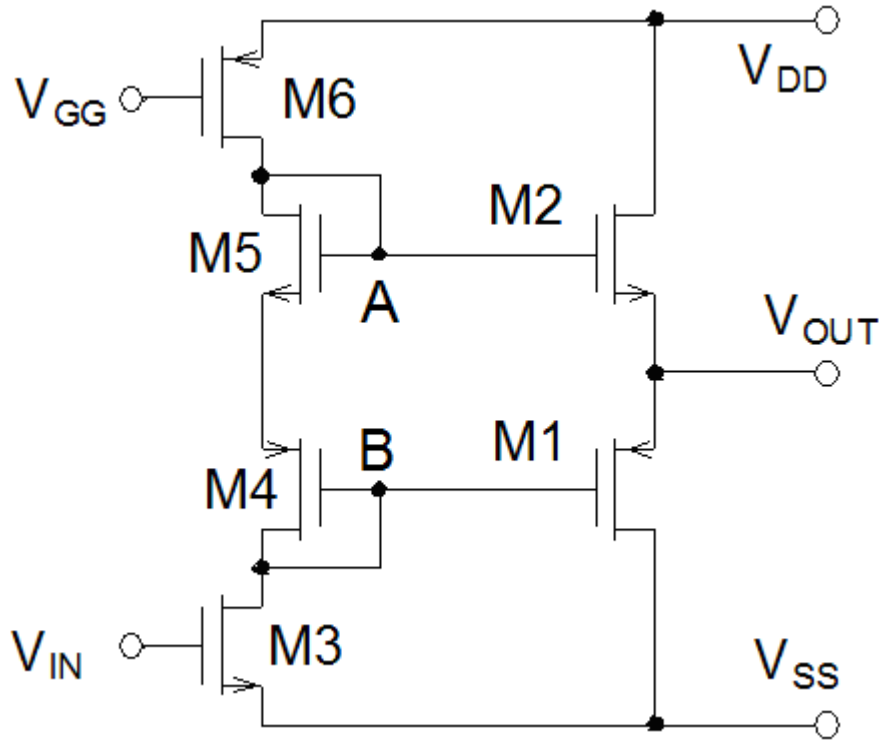
# Изходни стъпала с общ дрейн (с ниско изходно съпротивление)



## Подходящи за нискоомен товар

- a) Стъпало с общ дрейн, клас А, с NMOS транзистор и източник на ток;
- b) Стъпало с общ дрейн, клас А, с NMOS транзистор и активен MOS резистор;
- c) Противотактно стъпало (клас В или клас АВ)  $U_B \approx U_{TN} + U_{effn} \approx |U_{TP}| + |U_{effp}|$ .

# Исходно стъпало клас АВ /вариант 1/



$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2}$$

$$A_{u1} \approx -\frac{g_{m3}}{g_{ds3} + g_{ds6}}$$

$$A_{u2} = \frac{g_{m1} + g_{m2}}{g_{m1} + g_{mb1} + g_{m2} + g_{mb2}}$$

$$A_{u2} = \frac{g_{m1} + g_{m2}}{(1,1 \div 1,2)(g_{m1} + g_{m2})} \approx 0,8 \div 0,9$$

$$A_u \approx -\frac{(0,8 \div 0,9) \cdot g_{m3}}{g_{ds3} + g_{ds6}}$$

$$A_u = -\frac{(0,8 \div 0,9) \cdot 2}{(\lambda_{n3} + \lambda_{p6})U_{eff3}} \approx -(250 \div 280)$$

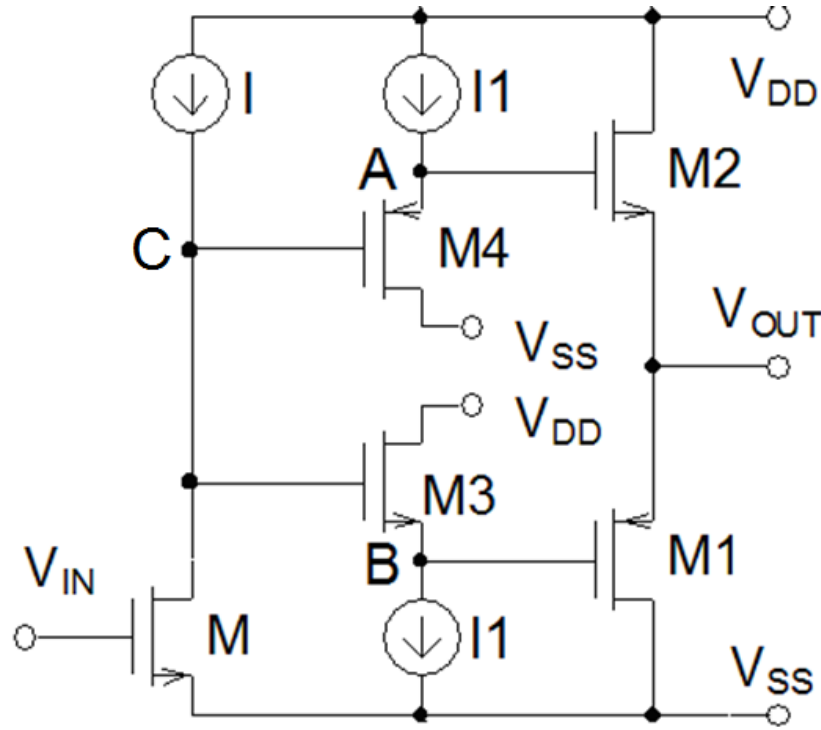
$$U_{GS} = U_{TN} + U_{EFFN} = U_{TN} + \sqrt{\frac{2 \cdot I_D}{K_n (W/L)}}$$

$$U_A = V_{OUT} + U_{TN} + U_{EFFN}$$

$$U_B = V_{OUT} - |U_{TP}| - |U_{EFFP}|$$



# Исходно стъпало клас АВ /вариант 2/



$$A_u = A_{u1} A_{u2} A_{u3}$$

$$A_{u1\max} = -\frac{g_{mn}}{g_{ds}}$$

$$A_{u3} \approx 0,8 \div 0,9 \qquad A_{u3} \approx 0,8 \div 0,9$$

$$A_{u\max} = -\frac{g_{mn}}{g_{ds}} (0,8 \div 0,9)^2$$

$$A_{u\max} = -\frac{(1,28 \div 1,62)}{\lambda_n U_{\text{eff}}} = -(450 \div 580)$$

$$U_A = U_C + |U_{TP}| + U_{\text{eff}}$$

$$U_B = U_C - U_{TN} - U_{\text{eff}}$$

$$U_{\text{OUT}} = U_A - U_{TN} - U_{\text{eff}} \approx U_C$$

$$U_{\text{OUT}} = U_B + |U_{TP}| + U_{\text{eff}} \approx U_C$$

# Диференциален усилвател

# Диференциални усилватели

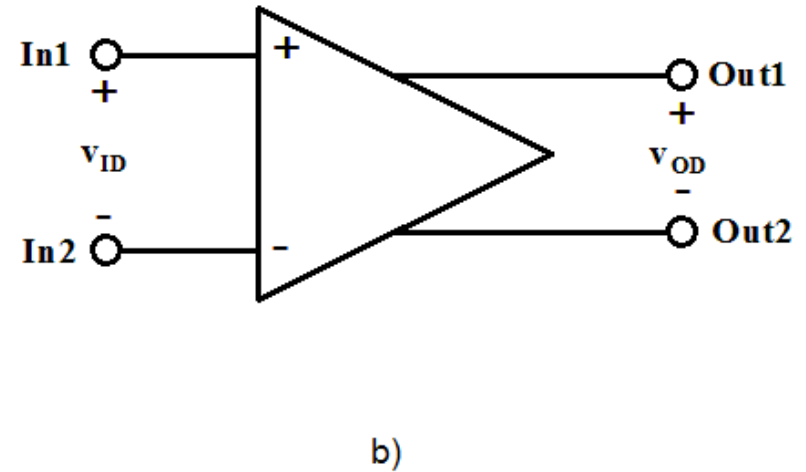
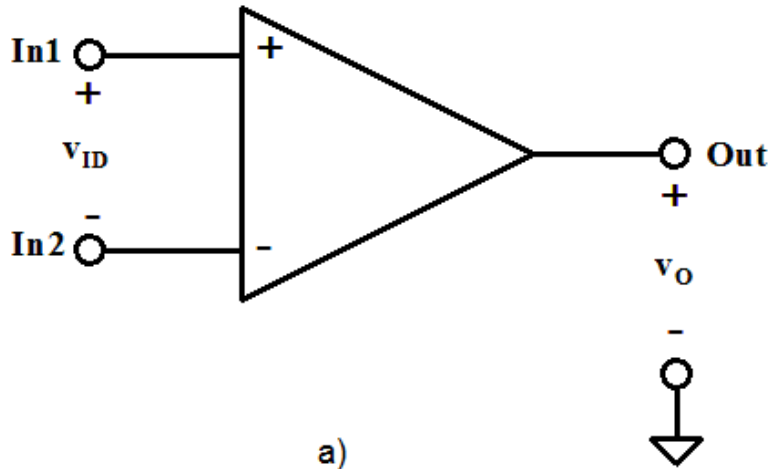


Схема а) диференциален усилвател с несиметричен изход;

Схема б) диференциален усилвател със симетричен изход.

# Парафазни и синфазни сигнали

Парафазни /диференциални/ сигнали – сигнали с противоположна полярност.

В практиката парафазните сигнали са носители на полезната информация.

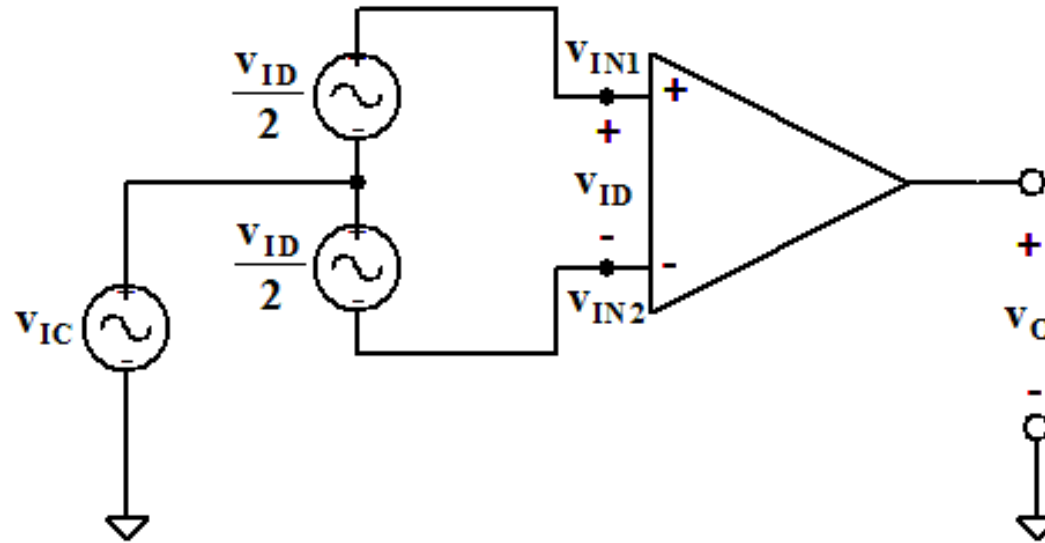
Синфазни сигнали – сигнали с еднаква полярност.

Синфазните сигнали могат да съдържа постояннотокова съставка (напр. за установяване на режима) и променливотокова съставка (напр. шум).

Задачата на диференциалния усилвател е да усилва парафазните сигнали и да потиска синфазните.

Използва се главно като първо стъпало в аналоговите схеми, където е необходимо да се изчисти шума.

# Парафазни (диференциални) и синфазни сигнали



$$V_{IN1} = V_{IC} + \frac{V_{ID}}{2}$$

$$V_{ID} = V_{IN1} - V_{IN2}$$

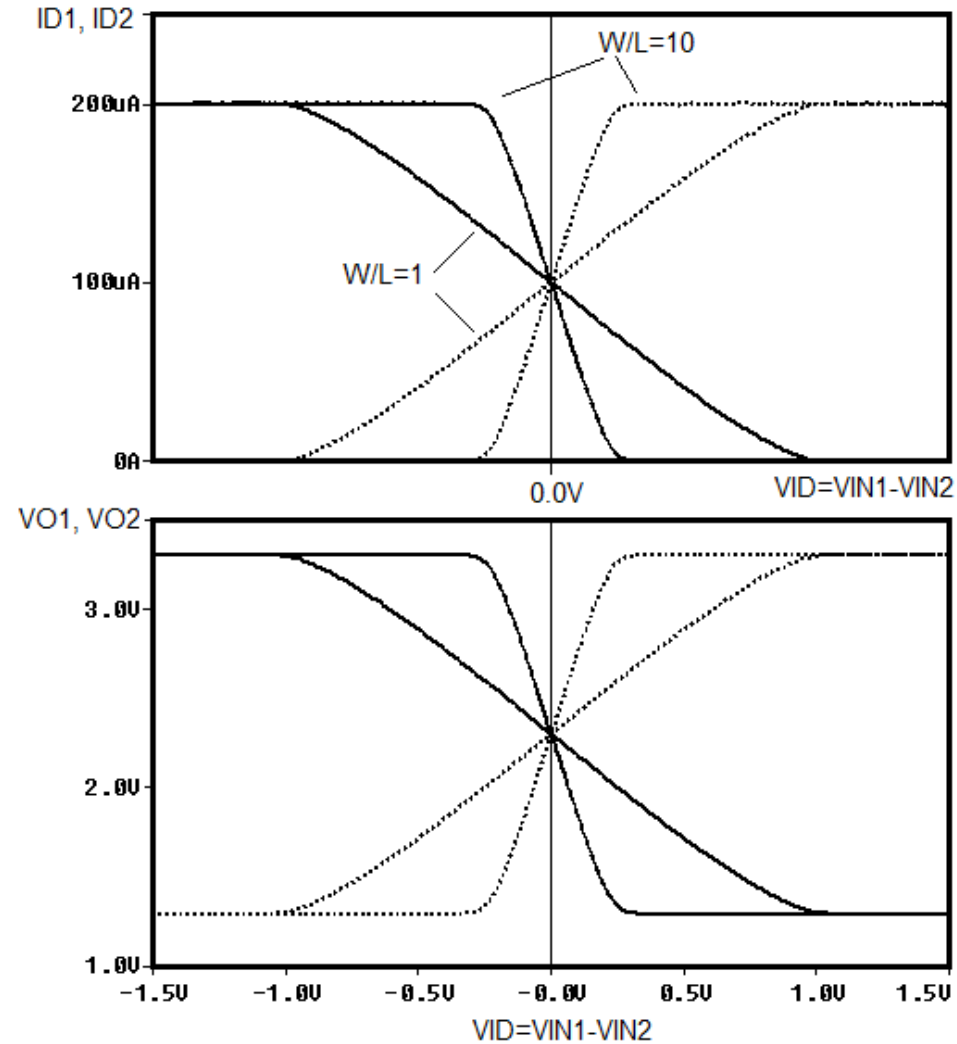
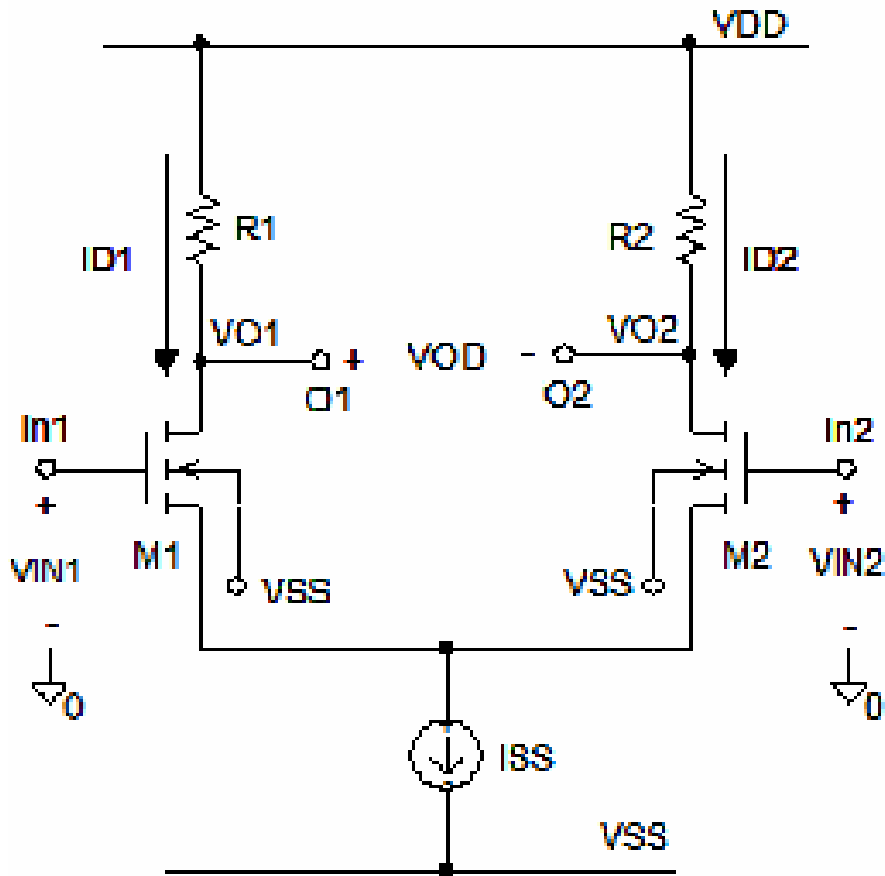
$$V_{OD} = A_{uD} V_{ID}$$

$$V_{IN2} = V_{IC} - \frac{V_{ID}}{2}$$

$$V_{IC} = \frac{V_{IN1} + V_{IN2}}{2}$$

$$V_{OC} = A_{uC} V_{IC} \rightarrow 0$$

# Предавателна характеристика на диференциална двойка

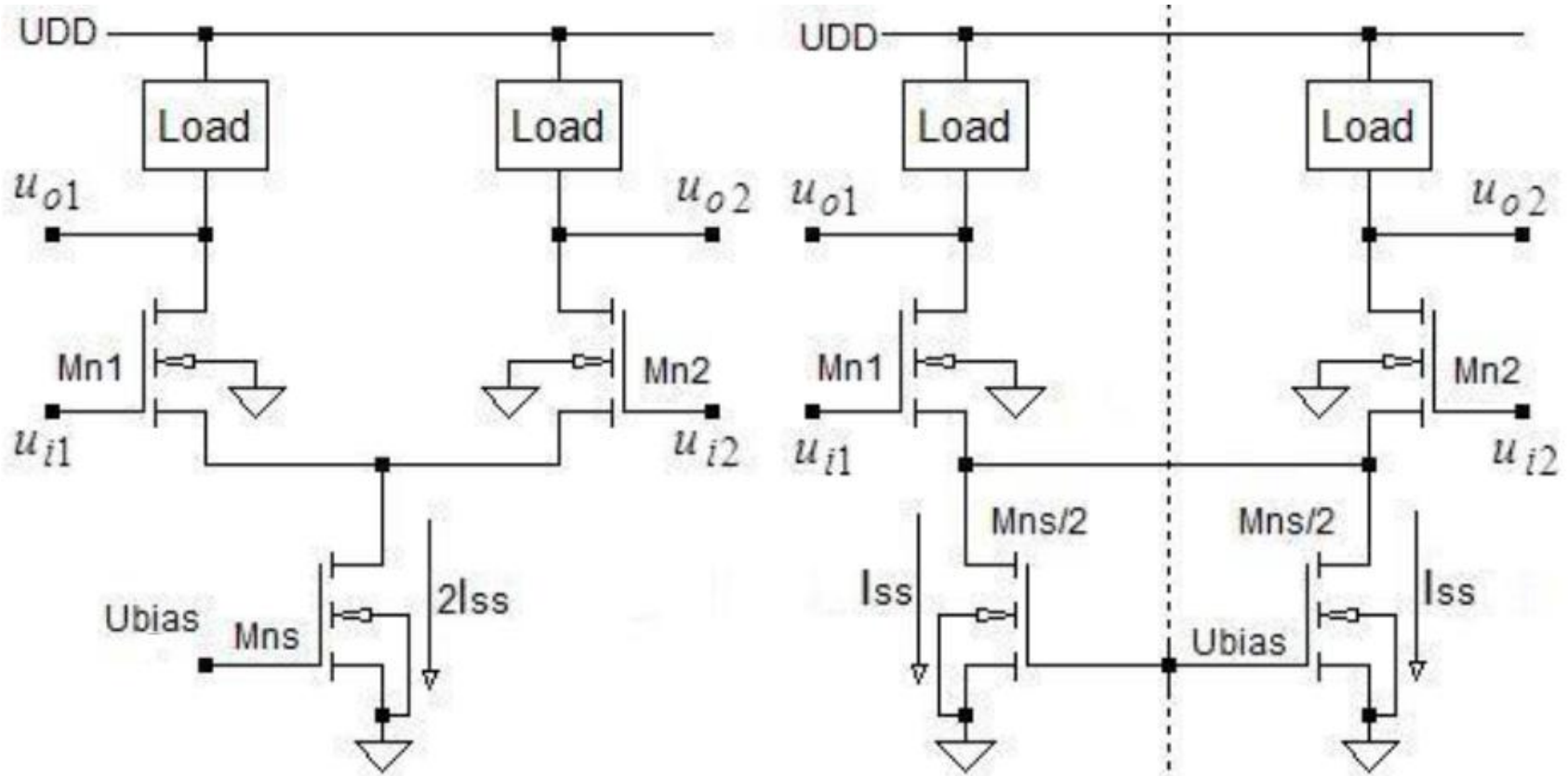


# Анализ при малък входен сигнал

## Теорема за разполовяването на симетрични схеми

- Всяка симетрична схема се дели от оста на симетрия на две еднакви части, всяка от които е огледално изображение на другата .
- Това позволява за целите на анализа да се разглежда само едната половина от схемата, след което резултатите могат да се обобщят за цялата схема.

# Диференциалният усилвател като симетрична схема



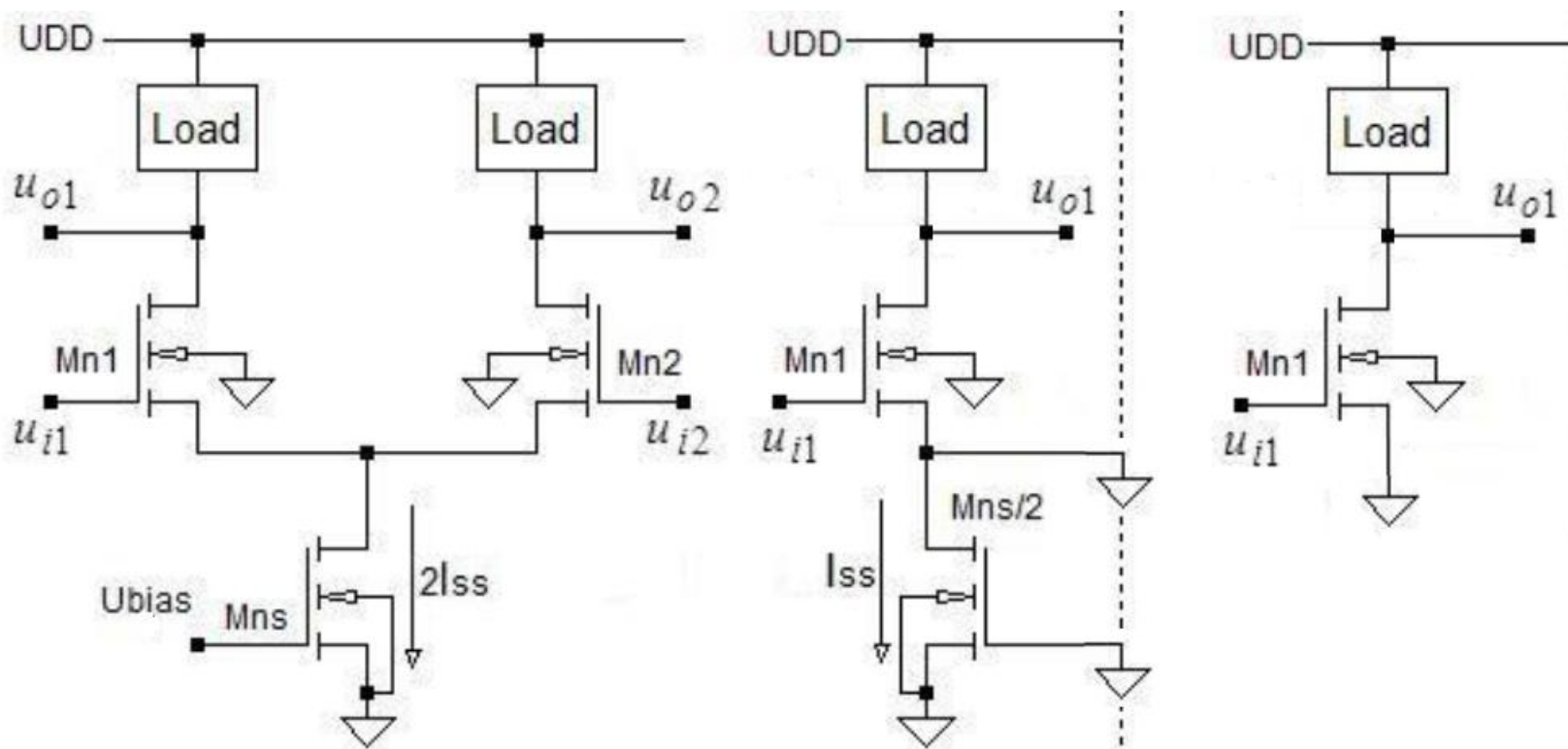
Диференциален усилвател – принципна схема (в ляво) и схема за онагледяване на симетрията (в дясно) – за целта транзисторът  $Mns$  е представен чрез двата паралелни транзистора  $Mns/2$ , които са с два пъти по-малка широчина на канала.



# Теорема за разполовяването за парафазни (диференциални) сигнали

- Ако на входа на симетричната схема се подаде парафазен сигнал , тогава токовете и напреженията във двете половини ще се променят противоположно. В следствие на това, напреженията във всички точки от схемата, които лежат на оста на симетрията  $\gamma$ , ще останат непроменени, т.е. по-отношение на парафазните сигнали, всички точки по оста на симетрия се държат като виртуална земя.

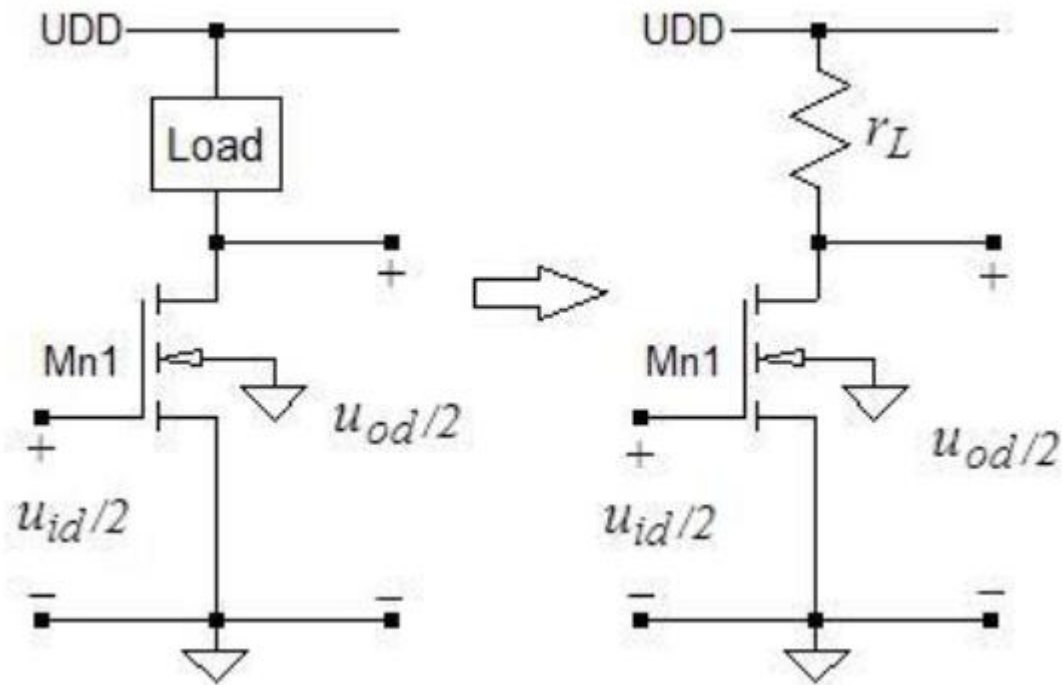
# Анализ за парафазни сигнали



Полусхема за диференциални сигнали.

Схемата съвпада усилвателното стъпало с общ сорс

# Анализ за парафазни сигнали



$A_{ud} = -\frac{g_{mn}}{g_{dsn} + g_L}$
$r_o = \frac{1}{g_{dsn} + g_L}$
$i_o = g_{mn} \frac{u_{id}}{2}$

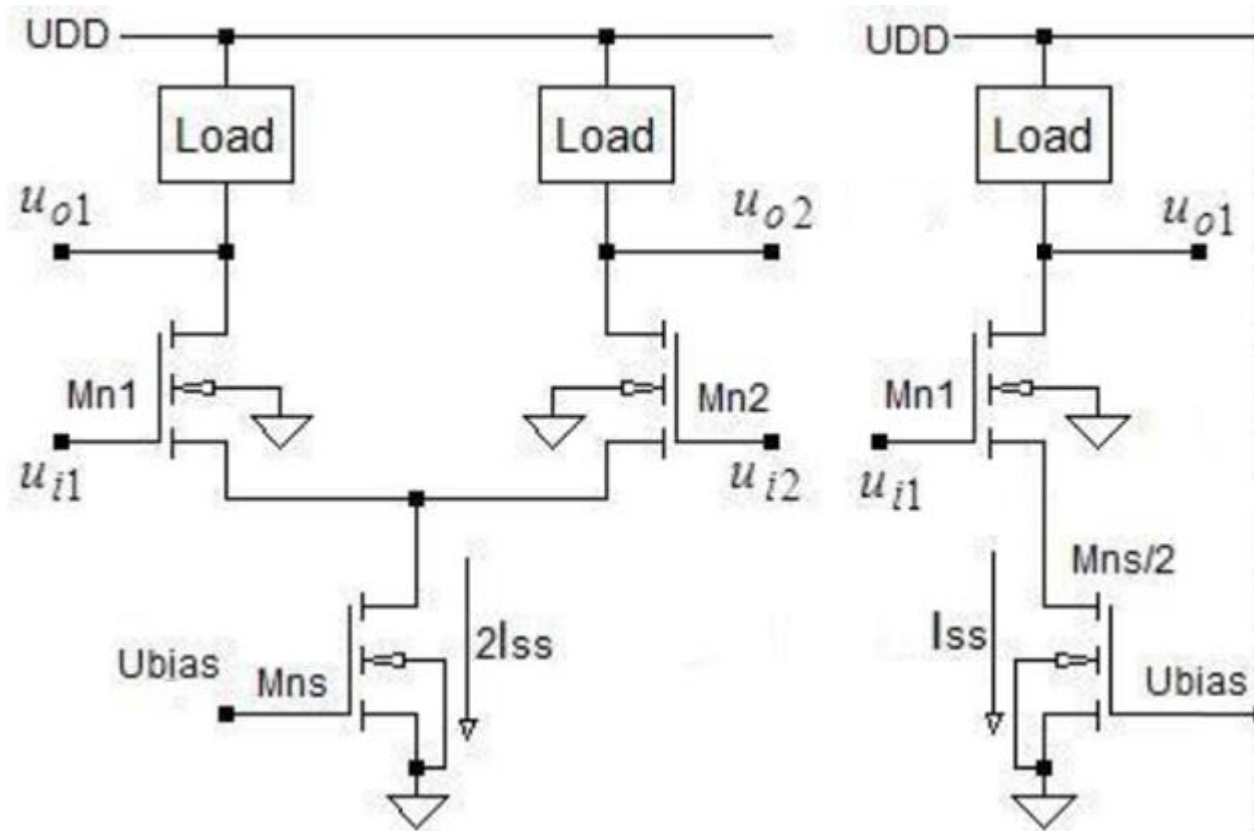
Полусхема за диференциални сигнали.

Схемата съвпада усилвателното стъпало с общ сорс

# Теорема за разполовяването на синфазни сигнали

- Ако на входа на симетричната схема се подаде синфазен сигнал, токовете и напреженията във всяка половина на схемата ще се променят идентично, т.е. потенциалите в огледалните точки от схемата ще бъдат еднакви, а токовете между двете части на схемата ще бъдат равни на нула. Това позволява схемата да се раздели на две еднакви части без необходимост от анализ за преразпределяне на токовете.

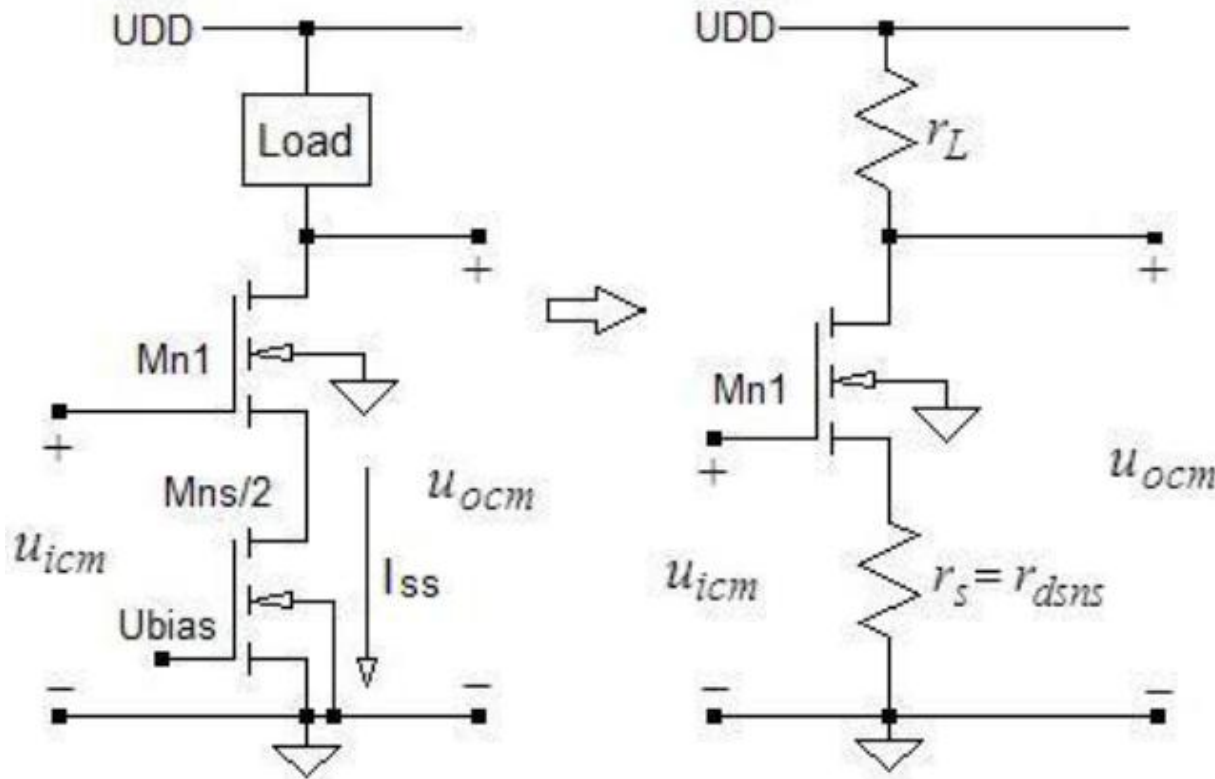
# Анализ за синфазни сигнали



Полусхема за синфазни сигнали.

Схемата съвпада с усилвателното стъпало с резистор в сорса.

# Анализ за синфазни сигнали



$$r_s = r_{dsns} = \frac{1}{\lambda_n I_{SS}}$$

$$r_o = \frac{1}{g_{ds-s} + g_L} \approx r_L$$

$$Au = -g_{m(eff)} r_o \approx -\frac{r_L}{r_s}$$

Полусхема за синфазни сигнали.

Схемата съвпада с усилвателното стъпало с резистор в сорса.

$$g_{m(eff)} = \frac{g_{mn}}{1 + (g_{mn} + g_{mbn}) r_s} \approx \frac{1}{r_s}$$

**БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО**