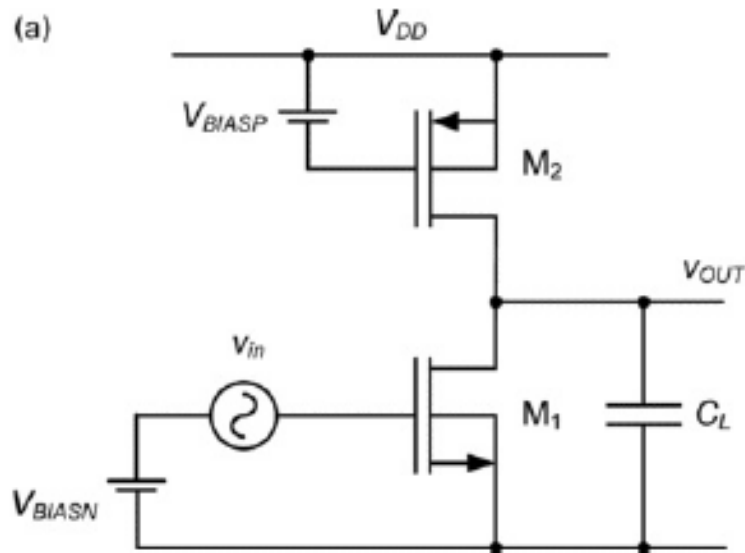


## □ gm/ID metodologija projektovanja-3

- Integrirani pojačavač u spoju sa zajedničkim sorsom i aktivnim opterećenjem



Dodavanje aktivnog opterećenja menja pojačanje na niskim učestanostima

$$A_{v0} = -\frac{g_{m1}}{g_{ds1} + g_{ds2}}$$
$$A_{v0} = -\frac{\left(\frac{g_{m1}}{I_D}\right)_1}{\left(\frac{g_{ds}}{I_D}\right)_1 + \left(\frac{g_{ds}}{I_D}\right)_2} = -\frac{\left(\frac{g_{m1}}{I_D}\right)_1}{\frac{1}{V_{EA1}} + \frac{1}{V_{EA2}}}$$

- Kada su Earlijevi naponi kod oba tranzistora isti pojačanje opada na polovinu unutrašnjeg pojačanja  $A_i$
- Kada je  $C_L \gg C_{db1} + C_{db2} + C_{gd2}$ , tada se GBW ne menja

$$GBW = \omega_u = \frac{g_{m1}}{C_L}$$

- Da bi se smanjio uticaj aktivnog opterećenja na pojačanje na niskim učestanostima, potrebno je da bude

$$\left(\frac{g_{ds}}{I_D}\right)_2 \ll \left(\frac{g_{ds}}{I_D}\right)_1$$

To je zadovoljeno kada je efikasnost transkonduktanse

$$\left(\frac{g_m}{I_D}\right)_2 = 5$$

ali je tada veliki minimalni pad napona za rad tranzistora u zasićenju

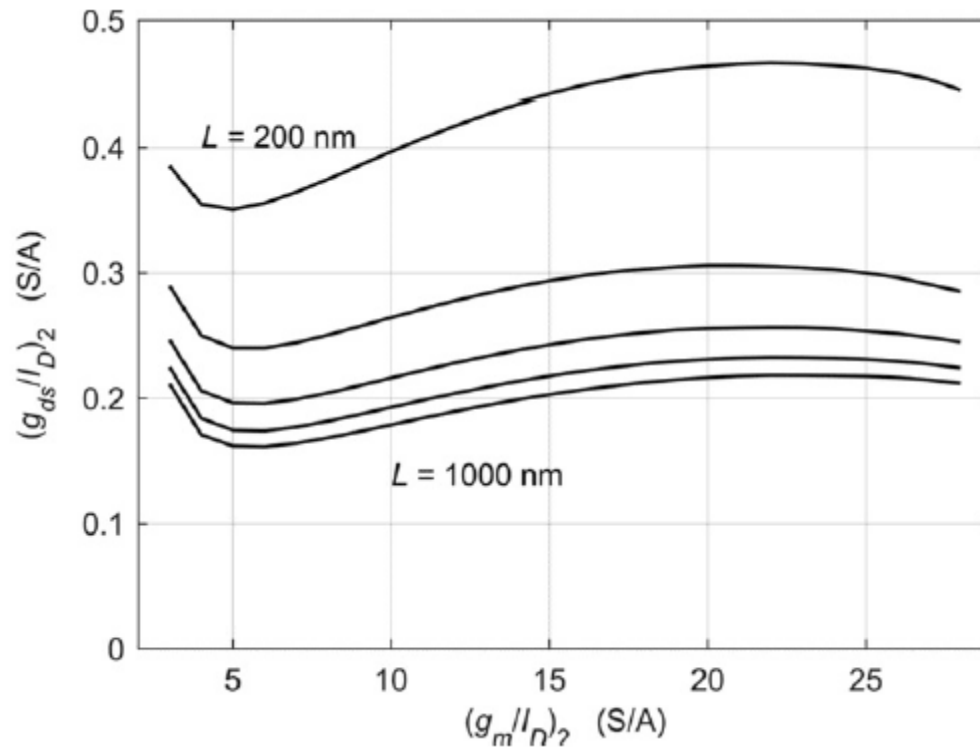
$$V_{DSsat} \approx 2 / \left(\frac{g_m}{I_D}\right)_2 = 0.4 \text{ V}$$

Sa naponom napajanja od 1.2V to je relativno velika vrednost, pa se mora uzimati kompromisna vrednost između zahteva za velikim pojačanjem i velikim opsegom napona na izlazu u kojem su oba tranzistora zasićeni. Kompromis može biti

$$10 \leq \left(\frac{g_m}{I_D}\right)_2 \leq 12$$

$$0.17 \text{ V} \leq V_{DSsat} \leq 0.2 \text{ V}$$

Dužina kanala se takođe mora birati kompromisno između manjeg uticaja Earlyjevog efekta (veće L) i parazitnim kapacitivnostima (manje L).



**Primer 8:** U pojačavaču iz primera 3 sa  $f_u=1\text{GHz}$ ,  $C_L=1\text{pF}$  i  $FO=10$  dodat je umesto strujnog izvora zasićeni PMOS tranzistor kao aktivno opterećenje. Napon napajanja je  $V_{DD}=1.2\text{V}$ . Uzimajući da je kod PMOS tranzistora  $(g_m/I_D)=10$ , proceniti uticaj dužine kanala  $L_2$  na ostale geometrije tranzistora i struju drejna  $I_D$ . Uporediti rezultate za  $L_2=0.3\mu\text{m}$ ,  $L_2=0.5\mu\text{m}$  i  $L_2=1\mu\text{m}$ .

Prvo ćemo naći pogodnu vrednost dužine kanala L1 i potom izračunati odgovarajući gm/ID i gds/ID za NMOS tranzistor

$$f_T = f_u \cdot FO$$

MATLAB kod:

```
L1 = .06: .001: .4;
```

```
gm_ID1 = lookup(nch,'GM_ID','GM_CGG',2*pi*fu*FO,'L',L1);
```

```
gds_ID1 = diag(lookup(nch,'GDS_ID','GM_ID',gm_ID1,'L',L1));
```

Posle toga se izračunava

$$(g_m / I_D)_1 \quad A_{v0} = - \frac{\left( \frac{g_{m1}}{I_D} \right)_1}{\left( \frac{g_{ds}}{I_D} \right)_1 + \left( \frac{g_{ds}}{I_D} \right)_2}$$

Za dobijeni vektor je potrebno selektovati maksimalno pojačanje Av0max

```
gm_ID2 = 10;
```

```
L2 = [.06 .1*(1:10)];
```

```
for k = 1:length(L2)
```

```
    gds_ID2 = lookup(pch,'GDS_ID','GM_ID',gm_ID2,'L',L2(k))
```

```
    Av0(:,k) = gm_ID1./(gds_ID1 + gds_ID2);
```

```
end
```

```
[a b] = max(Av0);
```

```
gain = a';
```

Iterativno uključivanje parazithih kapacitivnosti  $C_{self}=C_{dd1}+C_{dd2}$

$C_{self} = 0;$

for k = 1:10,

$g_m = 2 * \pi * f_u * (C_L + C_{self});$

$ID = g_m ./ g_{m\_ID1}(b);$

$W1 = ID ./ \text{diag}(\text{lookup}(nch, 'ID\_W', 'GM\_ID', g_{m\_ID1}(b), L1(b)));$

$C_{dd1} = W1 .* \text{diag}(\text{lookup}(nch, 'CDD\_W', 'GM\_ID', g_{m\_ID1}(b), 'L', L1(b)));$

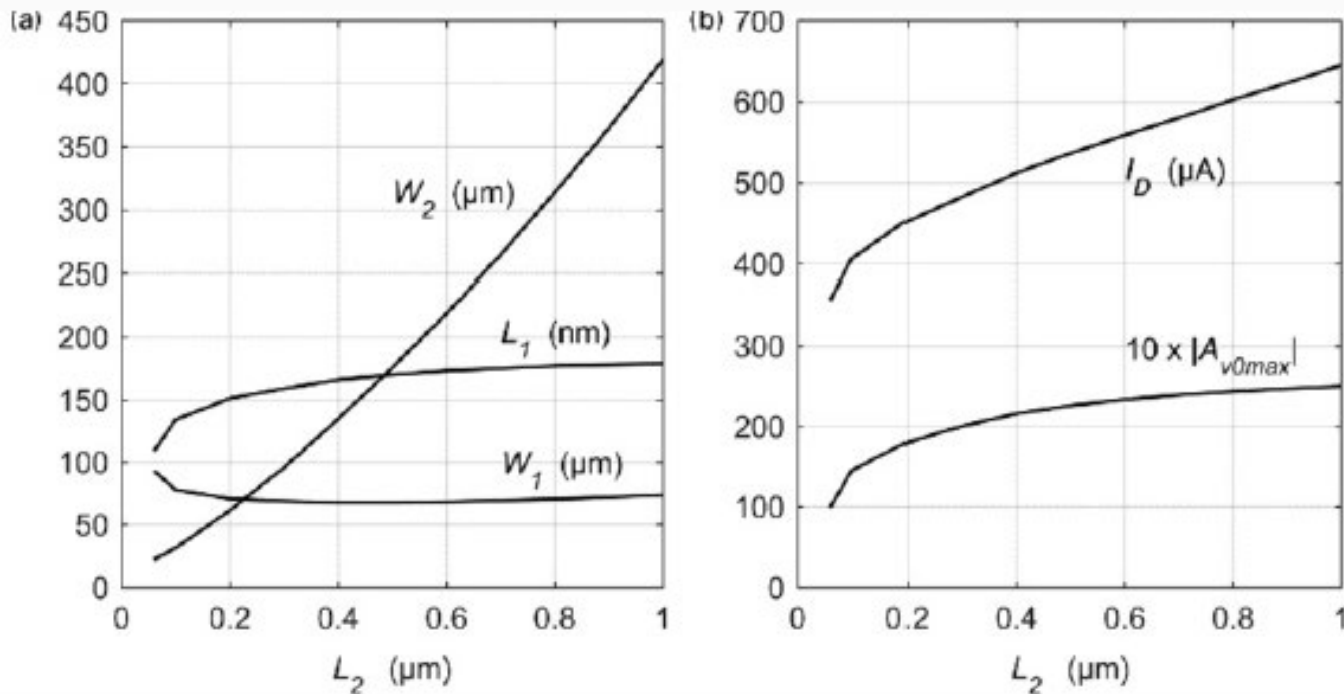
$W2 = ID ./ \text{lookup}(pch, 'ID\_W', 'GM\_ID', g_{m\_ID2}, 'L', L2);$

$C_{dd2} = W2 .* \text{lookup}(pch, 'CDD\_W', 'GM\_ID', g_{m\_ID2}, 'L', L2);$

$C_{self} = C_{dd1} + C_{dd2};$

end

Na sledećoj slici su prikazane zavisnosti potrebnih geometrija tranzistora, kao i struja drejna i maksimalno naponsko pojačanje u funkciji dužine kanala  $L_2$ .



- Najbrže se menja širina kanala  $W_2$ . Sa slike se da uočiti da nije potrebno ići na dužine kanala veće od  $0.5\mu\text{m}$ .
- Sa daljim povećanjem  $L_2$  maksimalno pojačanje se neznatno povećava, a struja drena i širina kanala  $W_2$  značajno rastu.
- U sledećoj tabeli date su uporedo vrednosti parametara pojačavača sa strujnim izvorom u dregnu (Intrinsic Gain Stage-IGS) i sa aktivnim opterećenjem sa PMOS tranzistorom

	IGS	L2=1u	L2=0.5u	L2=0.3u
Av0max	40.82	25	22.6	20.1
(gm/ID) <sub>1</sub>	10.62	12.92	13.55	14.38
ID[uA]	592	645	537	483
L1[nm]	220	179	170	159
W1[um]	45.9	73.4	67.2	68.5
W2[um]		419.3	176	95.6
Cself[fF]		327	157	104

U slede'oj tabeli je prikazana promena parametara pojačavača kada je L2=500nm, a menja se gm/ID NMOS tranzistora oko nominalne vrednosti 10

(gm/ID) <sub>2</sub>	Av0max	(gm/ID) <sub>1</sub>	L <sub>1</sub> [nm]	W <sub>1</sub> [um]	W <sub>2</sub> [um]	I <sub>D</sub> [uA]
9	22.85	13.48	171	65.32	135.1	526.8
10	22.61	13.55	170	67.21	175.6	536.6
11	22.37	13.63	169	69.52	225.6	548.8

Dobijene vrednosti parametara pri dizajnu:  $L_1=170\text{nm}$ ,  $L_2=500\text{nm}$ ,  $W_1=67.2\mu\text{m}$  i  $W_2=175.6\mu\text{m}$ ,  $(g_m/ID)_1=13.55$ ,  $(g_m/ID)_2=10$ ,  $I_D=536.6\mu\text{A}$ ,  $A_{v0}=22.61$ ,  $V_{GS1}=521.1\text{mV}$ ,  $V_{GS2}=585.7\text{mV}$ ,  $C_{\text{self}}=157\text{fF}$

Pomoću lookupa tabele se može nacrtati i prenosna karakteristika pojačavača:

```
VDS1 = .05: .01: 1.15;
```

```
ID2 = Wp*lookup(pch,'ID_W','VGS',VGS2,'VDS',VDDVDS1,'L',L2);
```

```
ID1 = Wn*lookup(nch,'ID_W','VGS',nch.VGS,'VDS',VDS1,'L',L1)';
```

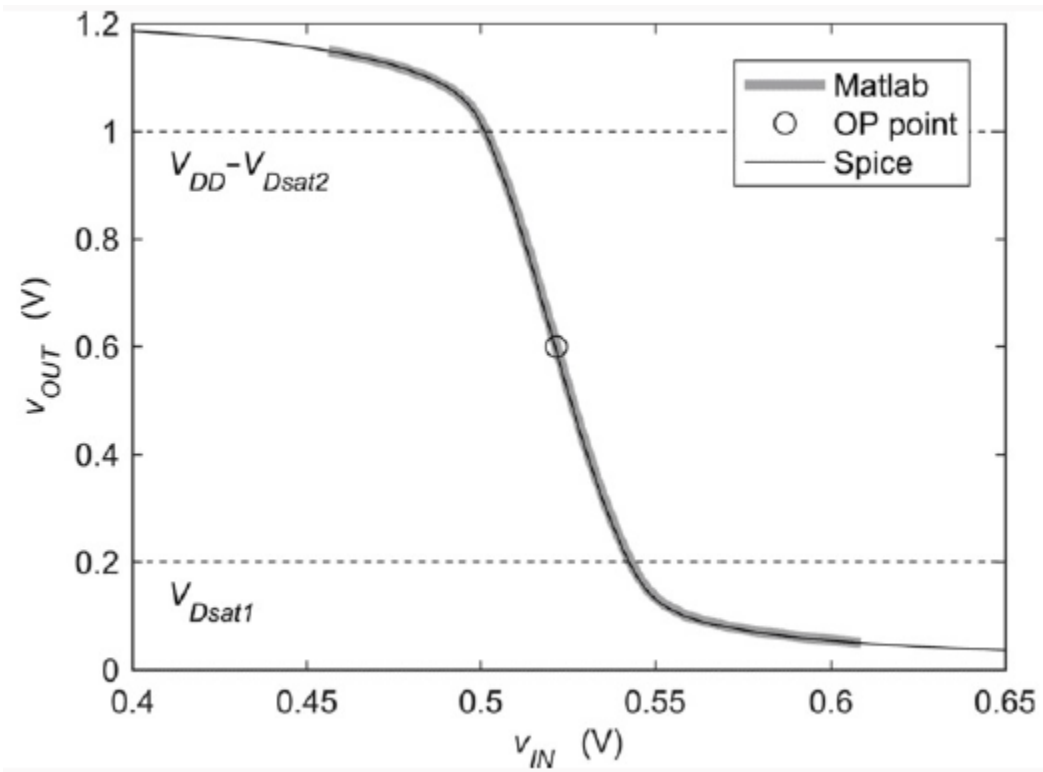
```
for m = 1:length(VDS1),
```

```
    VGS1(:,m) = interp1(ID1(m,:),nch.VGS,ID2(m));
```

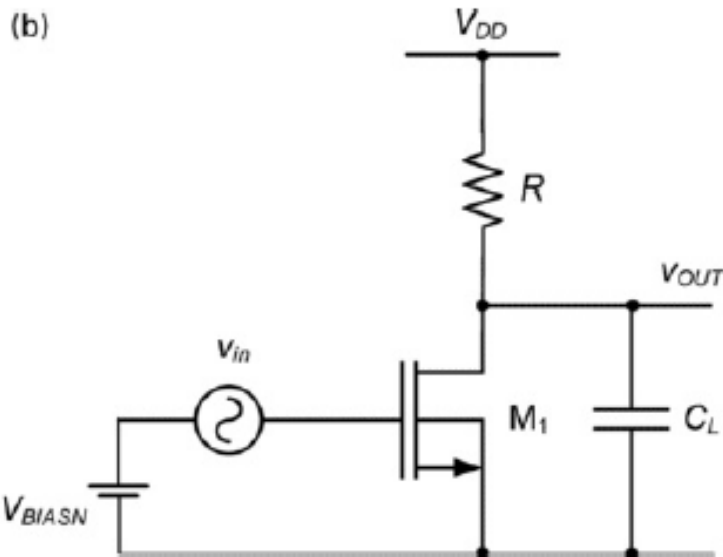
```
end
```

Prenosna karakteristika je prikazana na sledećoj slici. Uočava se dobro slaganje grafika dobijenog iz Matlaba i SPICE simulacijom.





- Integrisani pojačavač u spoju sa zajedničkim sorsom i rezistivnim opterećenjem

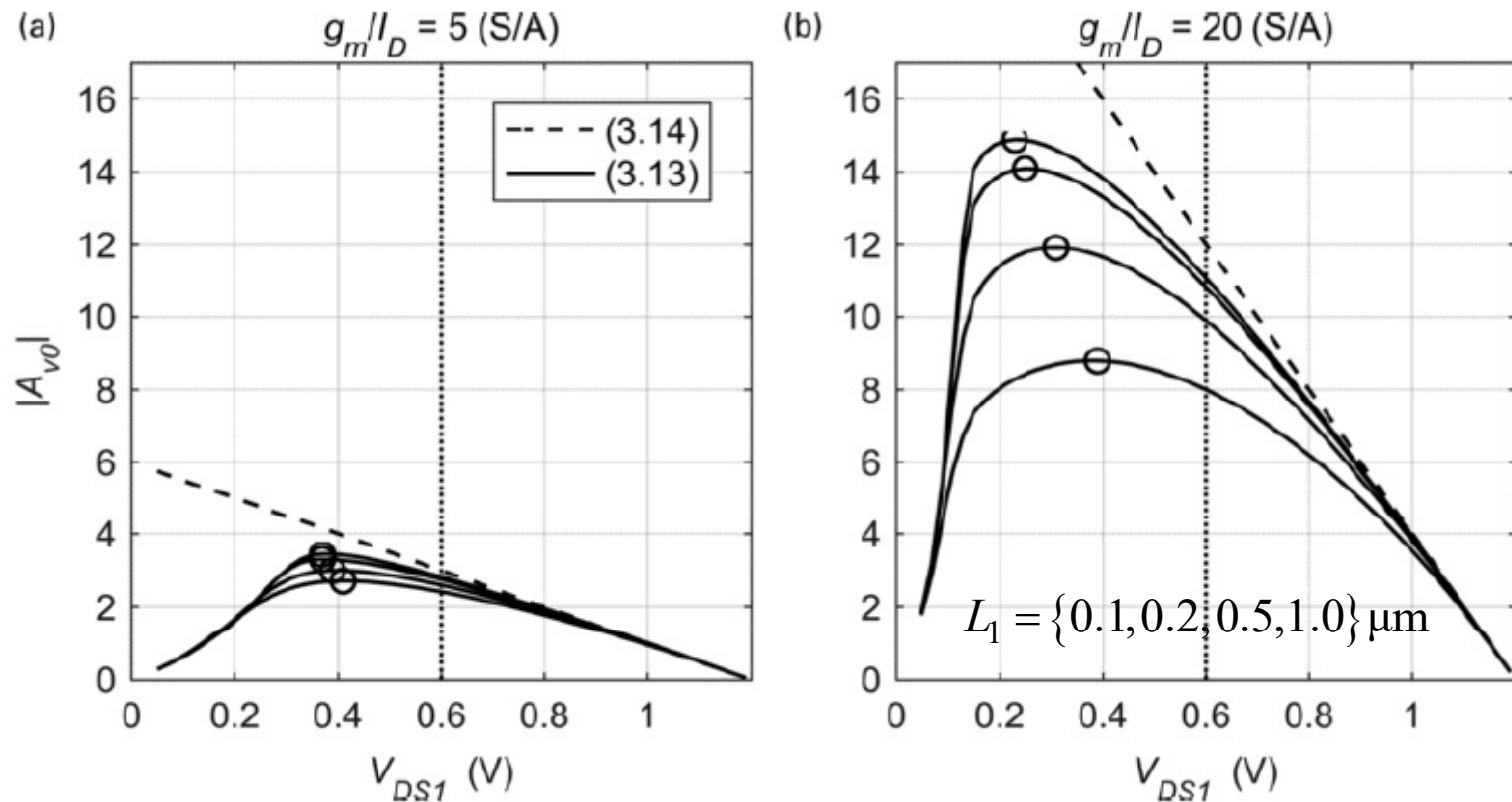


$$A_{v0} = -\frac{g_{m1}}{g_{ds1} + \frac{1}{R}} = -\frac{\left(\frac{g_m}{I_D}\right)_1}{\left(\frac{g_{ds}}{I_D}\right)_1 + \frac{1}{RI_D}} = -\frac{\left(\frac{g_m}{I_D}\right)_1}{\frac{1}{V_{EA1}} + \frac{1}{RI_D}} \quad (3.13)$$

$$V_{EA1} \gg RI_D \Rightarrow A_{v0} = -\left(\frac{g_m}{I_D}\right)_1 RI_D \quad (3.14)$$

- Da bi se maksimizovalo pojačanje  $|A_{v0}|$  treba  $RI_D$  da bude što veće, ali to smanjuje Earlyjev napon ( $V_{DS}$  se smanjuje) i swing napona na izlazu u kojem tranzistor radi u zasićenju
- Na sledećoj slici su prikazane zavisnosti naponskog pojačanja u propusnom opsegu kada je tranzistor u oblasti jake ( $g_m/I_D=5$ ) i umerene inverzije ( $g_m/I_D=20$ ), pri čemu je dužina kanala parametar

$$|A_{v0}| = f(V_{DS1}) \Big|_{g_m/I_D=5} \quad |A_{v0}| = f(V_{DS1}) \Big|_{g_m/I_D=20}$$



- Na slici su kružićima označeni maksimumi pojačanja
- Naponi  $V_{DS}$  pri kojima se dobijaju maksimumi pojačanja su ispod  $V_{DD}/2$ , što znači da je swing manji od maksimalnog swinga (idealno  $\sim V_{DD}/2$ )
- Nepraktično je da pojačavač radi u oblasti jake inverzije sa maksimalnim pojačanjem jer je  $V_{DS}$  blizu  $V_{DSsat}$
- Pri dužim kanalima u umerenoj inverziji povećava se  $V_{EA1}$ , pa je tada aproksimacija (izraz 3.14) opravdana

**Primer 10:** U CS pojačavaču sa otpornikom u drejnu je  $C_L=1\text{pF}$ ,  $f_u=1\text{GHz}$ ,  $V_{DD}=1.2\text{V}$  i  $FO=10$ . Odrediti  $V_{DS}$ ,  $L$  i  $R$  tako da se dobije maksimalno pojačanje  $|A_{v0}|$ .

- Dužine kanala ( $LL$ ) i napon drejn-sors ( $UDS$ ) biće nezavisne promenljive, a odredićemo  $g_m/I_D$  i  $g_{ds}/I_D$

```
UDS = .1*(2:6); %horizontal
```

```
LL = .06: .01: .2; %vertical
```

```
for k = 1:length(UDS)
```

```
    gmID(:,k)=lookup(nch,'GM_ID','GM_CGG',2*pi*fT,'VDS',UDS(k),'L',LL);
```

```
    gdsID(:,k)=lookup(nch,'GDS_ID','GM_CGG',2*pi*fT, 'VDS',UDS(k),'L',LL);
```

```
end
```

- Na osnovu izračunatih vektora  $g_m/I_D$  i  $g_{ds}/I_D$  dobija se  $|A_{v0}|$ , a potom određuje dužina kanala, napon drejn-sors i efikasnost transkonduktanse pri kojima se dobija maksimum  $|A_{v0}|$

```
AvoR = gmID./(gdsID + 1./(VDDUDS(ones(length(LL),1),:))))
```

```
[a b] = max(AvoR);
```

```
[c d] = max(a);
```

```
AvoRmax = c
```

```
L = LL(b(d))
```

```
VDS = UDS(d)
```

```
gm_ID = gmID(b(d),d)
```

- Maksimalno pojačanje iznosi  $|A_{v0}| = 8.49$ , a dobija se pri  $L_1=110\text{nm}$ ,  $g_m/I_D=18.04$  i  $V_{DS}=0.4\text{V}$

- Preostaje još iterativni korak koji uključuje parazitne kapacitivnosti tranzistora  $C_{dd}$ .

```
JD =lookup(nch,'ID_W','GM_ID',gm_ID,'VDS',VDS,'L',L);
```

```
Cdd_W =lookup(nch,'CDD_W','GM_ID',gm_ID,'VDS',VDS,'L',L);
```

```
Cdd = 0;
```

```
for k = 1:5,
```

```
    gm = 2*pi*fT/10*(C+Cdd);
```

```
    ID = gm/gm_ID;
```

```
    W = ID/JD;
```

```
    Cdd = W*Cdd_W;
```

```
end
```

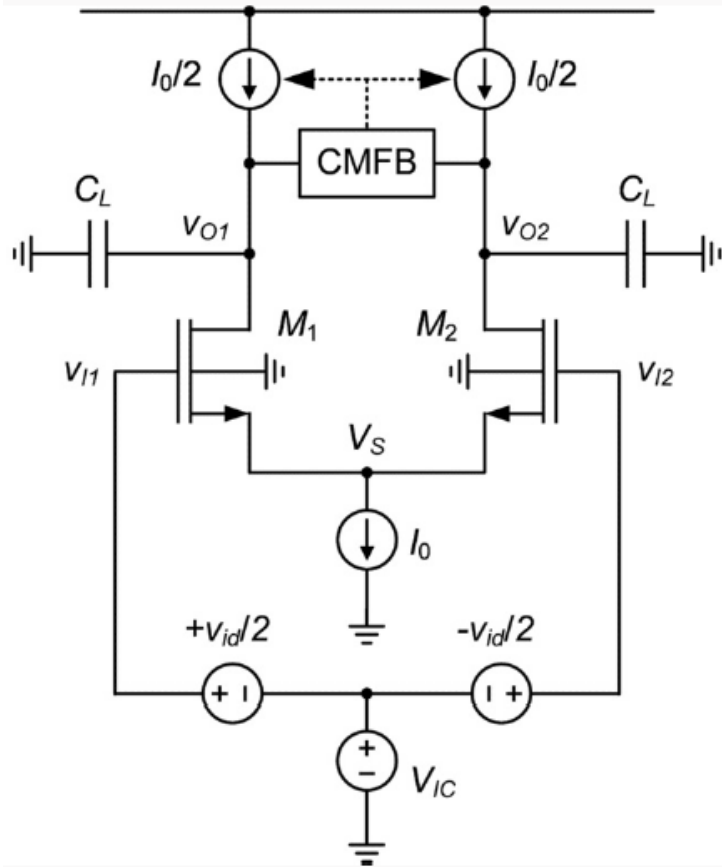
- Na osnovu dobijene struje drejna se određuje potrebna otpornost

$$R = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_D} = 2.172 \text{ k}\Omega$$

- Preostali parametri dizajna imaju vrednosti

$$W = 87.92 \text{ }\mu\text{m}, V_{GS} = 464.6 \text{ mV}$$

**Primer 11:** Dimenzionisati tranzistore u diferencijalnom pojačavaču sa slike tako da pri  $C_L=1\text{pF}$  bude  $f_u=1\text{GHz}$ . Poznato je:  $g_m/I_D=15$ ,  $V_{DD}=1.2\text{V}$ ,  $V_{ICM}=0.7\text{V}$ ,  $V_{OCM}=1\text{V}$ .



- Za diferencijalni signal šema za male signale je ista kao kod CS pojačavača, primer 1. Pošto je osnova na masi, a sors na višem potencijalu od osnove, struja drejna će zavistiti i od napona sors-osnova

$$g_m = 2 \cdot \pi \cdot f_u \cdot C_L;$$

$$I_D = g_m / g_{m\_ID};$$

$$V_{GS} = \text{lookupVGS}(\text{nch}, 'GM\_ID', g_{mID}, 'VDB', 'VDB', 'VGB', 'VGB');$$

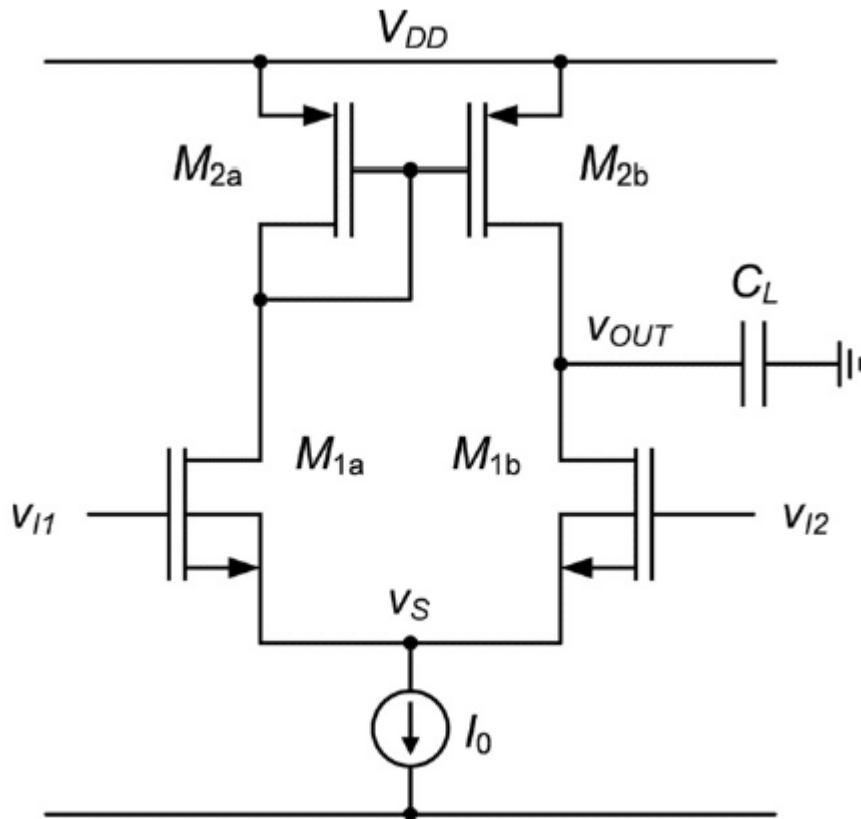
$$J_D =$$

$$\text{lookup}(\text{nch}, 'ID\_W', 'GM\_ID', g_{mID}, 'VSB', 'VSB', 'VDS', 'VDBVSB')$$

$$I_{D1,2} = 419 \mu\text{A}, W_{1,2} = 41.06 \mu\text{m}$$

$$V_{GS} = 475 \text{mV}, V_{SB} = 225 \text{mV}$$

**Primer 12:** Dimenzionisati tranzistore u diferencijalnom pojačavača sa slike tako da pri  $C_L=1\text{pF}$  bude  $f_u=100\text{MHz}$ . Poznato je:  $V_{DD}=1.2\text{V}$  i  $V_{ICM}=0.7\text{V}$ .



- Prvo treba pronaći pogodne vrednosti  $g_m/I_D$  i dužine kanala NMOS tranzistora
- Na osnovu primera 6 u kome je isti  $f_u=100\text{MHz}$  dobijeno je  $FO=21.2$ ,  $L=0.34\mu\text{m}$  i  $g_m/I_D=17$
- Na osnovu primera 8 zaključeno je da je dobra kompromisna vrednost  $g_m/I_D$  PMOS tranzistora ima vrednost 10 i da veća dužina kanala od  $0.5\mu\text{m}$  ne doprinosi značajnije povećanju pojačanja u propusnom opsegu, ali povećava širinu kanala ovog tranzistora

- Napon  $V_{GS1,2}$  se mora iterativno odrediti, pošto nije poznat napon  $V_{DS1a,b}$ .
- Prvo se odredi  $V_{GS1a,b}$  na osnovu lookup tabele za  $V_{DS1a,b}=0.6\text{V}$

VGS1 = lookupVGS(nch,'GM\_ID',gmID1,'L',L1);

$$V_{GS1} = 466.1 \text{ mV}$$

- Na isti način se dobija i  $V_{GS2}$ , smatrajući da je  $V_{SD2} = V_{DD}/2 = 0.6 \text{ V}$

VGS2 = lookupVGS(pch,'GM\_ID',gmID2,'L',L2);

- Potom se  $V_{GS2}$  određuje sa prethodnom vrednošću  $V_{GS2}$  i uslovom  $V_{GS2} = V_{DS2}$

VGS2 = lookupVGS(pch,'GM\_ID',gmID2,'VDS',VGS2,'L',L2);

$$V_{GS2} = -585.8 \text{ mV} \Rightarrow V_{DS1} = 381.2 \text{ mV}$$

$$V_{GS1} = 467 \text{ mV}, V_S = 233 \text{ mV}$$

- Pojačanje diferencijalnog pojačavača sa aktivnim opterećenjem i jednostrukim izlazom

gdsID1=lookup(nch,'GDS\_ID','GM\_ID',gmID1,'VDS',VDS1,'L',L1);

gdsID2=lookup(pch,'GDS\_ID','GM\_ID',gmID2,'VDS',VGS2,'L',L2);

Av0 = gmID1/(gdsID1 + gdsID2)

$$A_{v0} = 31.06$$

- Da bi dobili struju drejna i širinu kanala, primenićemo istu proceduru kao kod CS pojačavača



$$g_{m1} = 2 \cdot \pi \cdot f_u \cdot C_L;$$

$$I_D = g_{m1} / g_{mID1};$$

$$J_{D1} = \text{lookup}(\text{nch}, 'ID\_W', 'GM\_ID', g_{mID1}, 'VDS', VDS1, 'L', L1);$$

$$W1 = I_D / J_{D1};$$

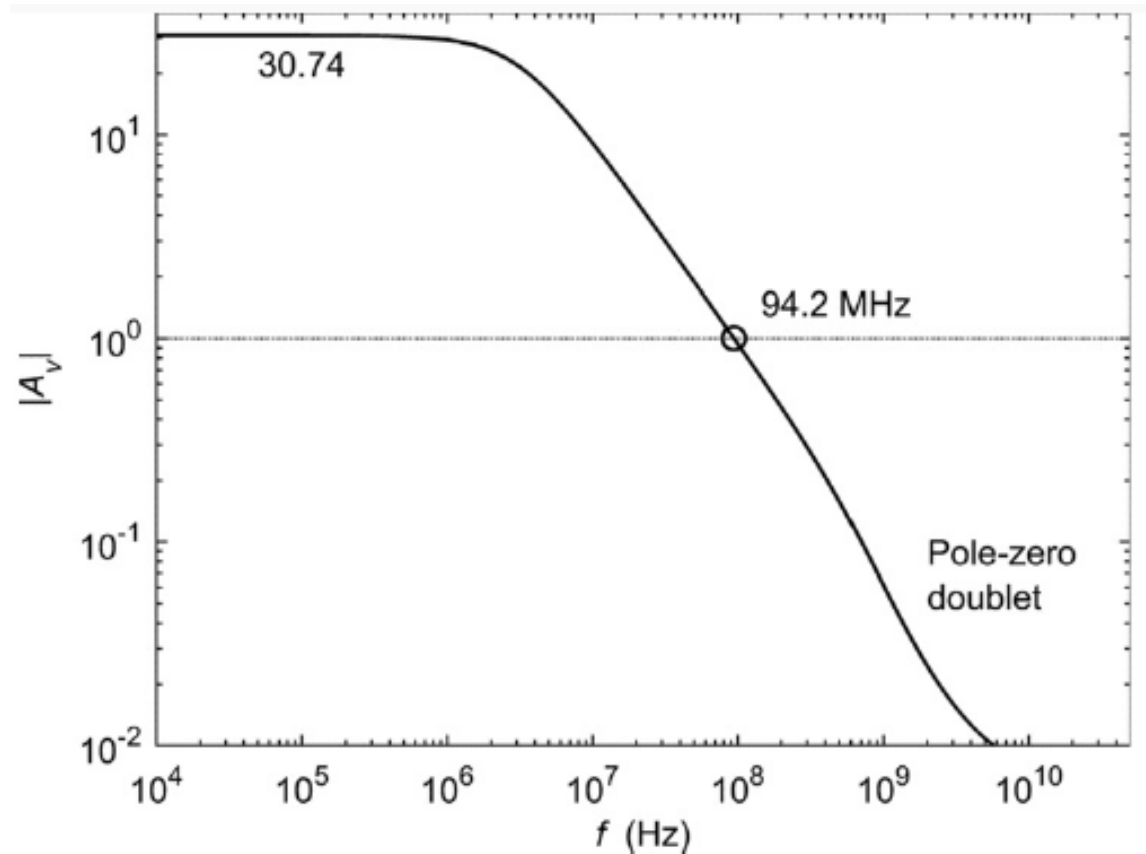
$$J_{D2} = \text{lookup}(\text{pch}, 'ID\_W', 'GM\_ID', g_{mID2}, 'VDS', VGS2, 'L', L2);$$

$$W2 = I_D / J_{D2};$$

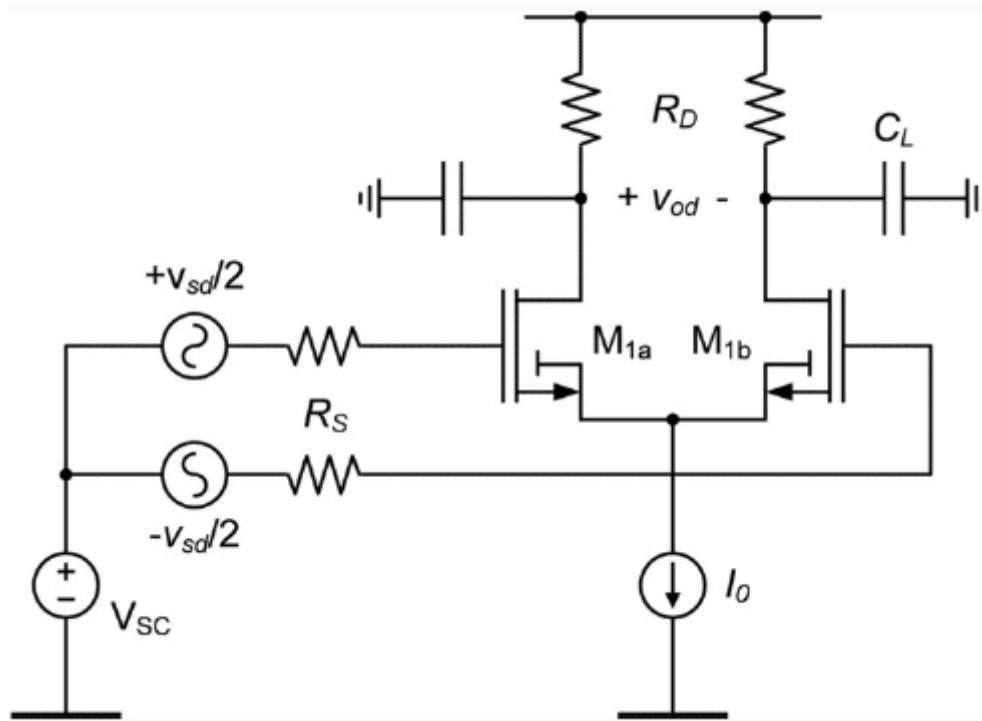
$$I_{D1} = I_{D2} = 36.96 \mu\text{A}, W_1 = 18.07 \mu\text{m}, W_2 = 12.13 \mu\text{m}$$

Simulacije:

Vrednosti malo odstupaju od zadatih jer nije urađena korekcija zbog postojanja izlazne kapacitivnosti  $C_{dd1}$  i  $C_{dd2}$ . Korekcija se obavlja na isti način kao i kod CS pojačavača.



**Primer 13:** Dimenzionisati tranzistore u diferencijalnom pojačavača sa slike tako da pri  $C_L=1\text{pF}$ ,  $R_D=1\text{k}$ ,  $R_S=10\text{k}$ ,  $V_{SC}=0.7\text{V}$  i  $V_{DD}=1.2\text{V}$  bude  $A_{v0}=4$ . Poznato je  $L=100\text{nm}$  i  $g_m/I_D=15$ .



$$A_{v0} = g_m (R_D \parallel r_{ds}) = \frac{g_m}{\frac{1}{R_D} + g_{ds}} = \frac{g_m}{\frac{1}{R_D} + g_{ds}} = \frac{1}{\frac{1}{g_m R_D} + \frac{1}{a_i}}$$

$$a_i = \frac{g_m}{g_{ds}}$$

- Prvi korak odredjivanje unutrašnjeg pojačanja  
 $gm\_gds = \text{lookup}(\text{nch}, 'GM\_GDS', 'GM\_ID', gm\_ID, 'L', L);$
- Određivanje  $g_m$   
 $gm = 1/RL*(1/Av0 - 1./gm\_gds).^{-1};$

$$g_m = 4.93 \text{ mS}$$

$$I_D = \frac{g_m}{g_m / I_D} = 328 \mu\text{A}$$

$$W = \frac{I_D}{I_D / W} = 36.46 \mu\text{m}$$

$$A(s) = A_{PO} \frac{1 + s / \omega_z}{1 + b_1 s + b_2 s^2} \quad |\omega_z| = \frac{g_m}{C_{gd}} \gg \omega_T$$

$$b_1 = R_S [C_{gs} + C_{gb} + C_{gd} (1 + |A_{PO}|)] + R_L (C'_L + C_{gd}) \quad C'_L = C_L + C_{db}$$

$$b_2 = R_S R_L (C_{gs} C'_L + C_{gs} C_{gd} + C'_L C_{gd})$$

$$f_{p1} \approx \frac{\omega_{p1}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{b_1}, \quad f_{p2} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{b_1}{b_2}$$

$C_{gs} = W \cdot \text{lookup}(\text{nch}, 'CGS\_W', 'GM\_ID', \text{gm\_ID}, 'L', L)$

$C_{gd} = W \cdot \text{lookup}(\text{nch}, 'CGD\_W', 'GM\_ID', \text{gm\_ID}, 'L', L)$

$C_{dd} = W \cdot \text{lookup}(\text{nch}, 'CDD\_W', 'GM\_ID', \text{gm\_ID}, 'L', L)$

$C_{db} = C_{dd} - C_{gd}$

$CL_{tot} = CL + C_{db}$ ;

$$C_{gs} = 27.94 \text{ fF}, C_{gd} = 12.13 \text{ fF}, C_{db} = 10.76 \text{ fF}$$

Učestanosti polova:

$$f_{p1} = 166 \text{ MHz}, f_{p2} = 5.5 \text{ GHz}$$