

## □ gm/ID metodologija projektovanja-2

- Sledeći scenario projektovanja je dimenzionisanje tranzistora sa konstantnom jediničnom učestanošću  $f_T$ . Ovaj slučaj je od praktične važnosti u pojačavačima sa fiksnim GBW proizvodom.
- Drugi primer je kaskodni pojačavač, gde želimo da CG transistor unosi nedominantni pol na željenoj višoj učestanosti

**Primer 4:** Učestanost jediničnog pojačanja funkcije prenosa naponskog pojačanja je  $f_u=100$  MHz kada je  $C_L=1$  pF. Smatrati da je  $F_O=10$  i  $V_{DS}=V_{DD}/2=0.6$  V.

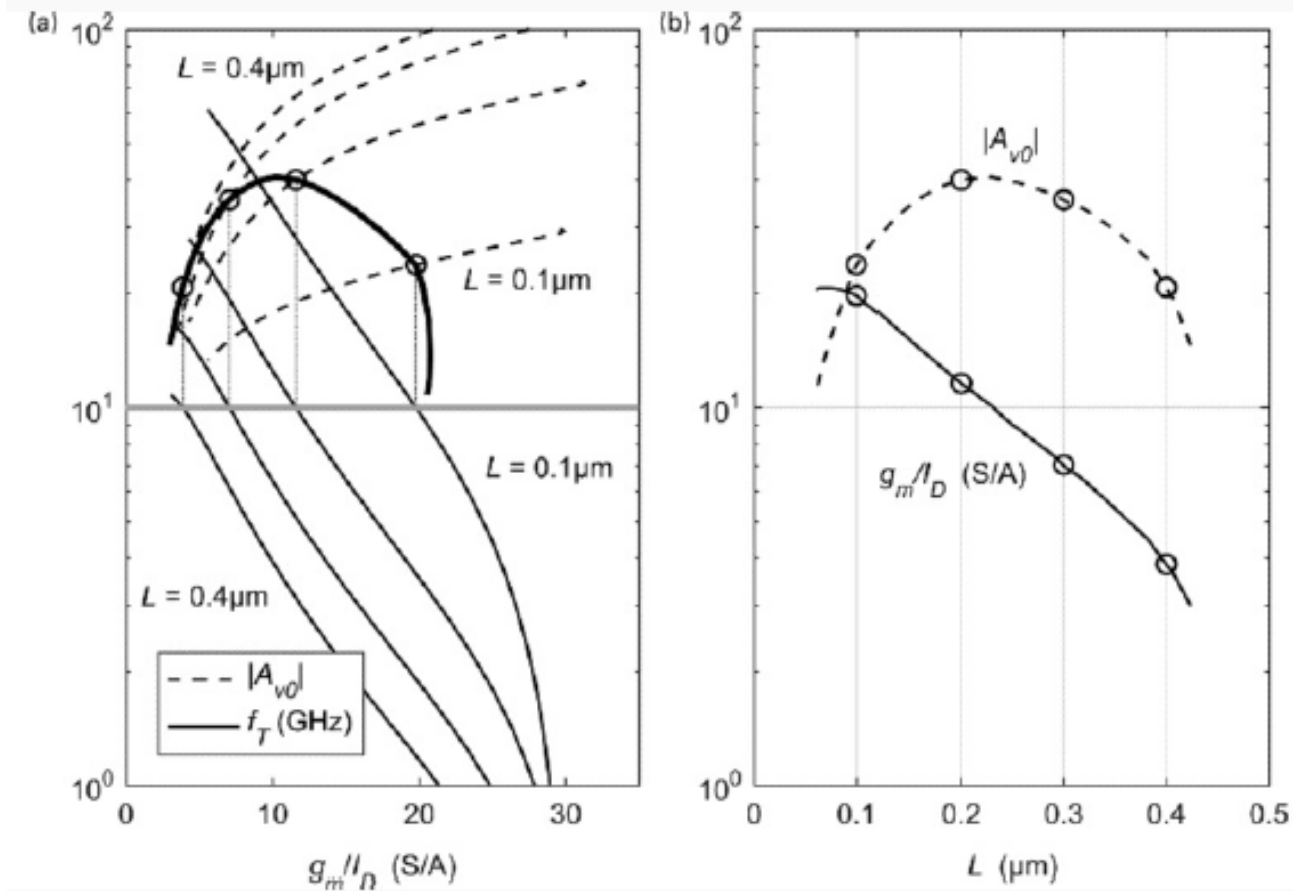
- a) Odrediti dimenzije tranzistora tako da se dobije maksimalno unutrašnje pojačanje na niskim učestanostima
- b) Odrediti dimenzije tranzistora tako da se dobije minimalna disipacija u mirnoj radnoj tački

Na sledećim slikama (a) su prikazane zavisnosti

$$f_T = f \left( \frac{g_m}{I_D} \right) \quad |A_{v0}| = \frac{g_m}{g_{ds}} = f \left( \frac{g_m}{I_D} \right)$$

dok su na slici (b)

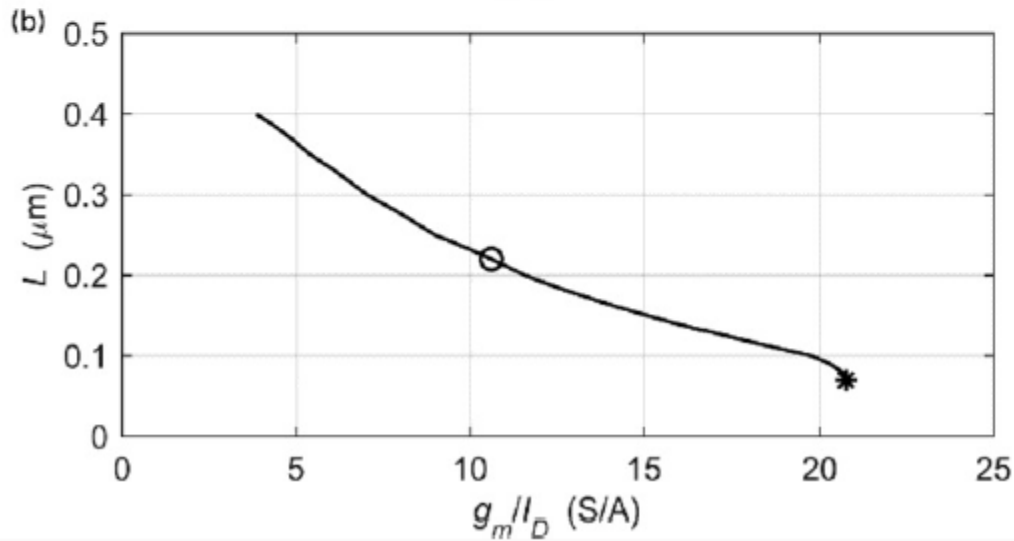
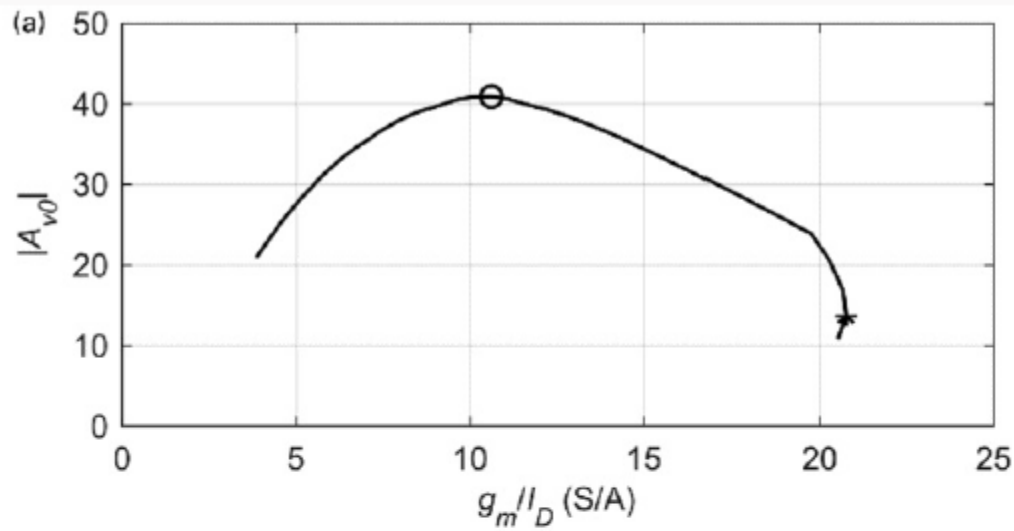
$$\frac{g_m}{I_D} = f(L) \quad |A_{v0}| = g(L)$$



Na slici (a) je označena i karakteristika  $A_{v0}$  za koju je  $f_T = f_{v0} \cdot f_u = 1 \text{ GHz}$

Na sledećim slikama je prikazana uvećano zavisnost sa slike (a) i zavisnost dužine kanala u funkciji  $g_m/I_D$  kada je  $f_T = 1 \text{ GHz}$

(a)



$$|A_{v0}|_{\max} = 40.88 \Rightarrow \frac{g_m}{I_D} = 10.62, L = 220 \text{ nm}, V_{GS} = 578.6 \text{ mV}$$

Pri velikim  $g_m/I_D$  i malim dužinama kanala izražen je uticaj DIBL efekta (\*)

(b) Minimalna disipacija se ima u slaboj inverziji ( $g_m/I_D$  veliko), a smanjenja DIBL efekta ćemo uzeti nešto veću dužinu kanala  $L=70\text{nm}$ . Tada je

$$|A_{v0}| = 43.75, \frac{g_m}{I_D} = 20.76, V_{GS} = 410.3 \text{ mV}$$

U sledećoj tabeli su date uporedne vrednosti parametara kola za slučaj maksimalnog pojačanja i minimalne disipacije

	Gm[mS]	W[um]	L[nm]	ID[uA]
Amax	6.283	45.92	220	591.6
PDmin	6.283	114.2	70	302.7

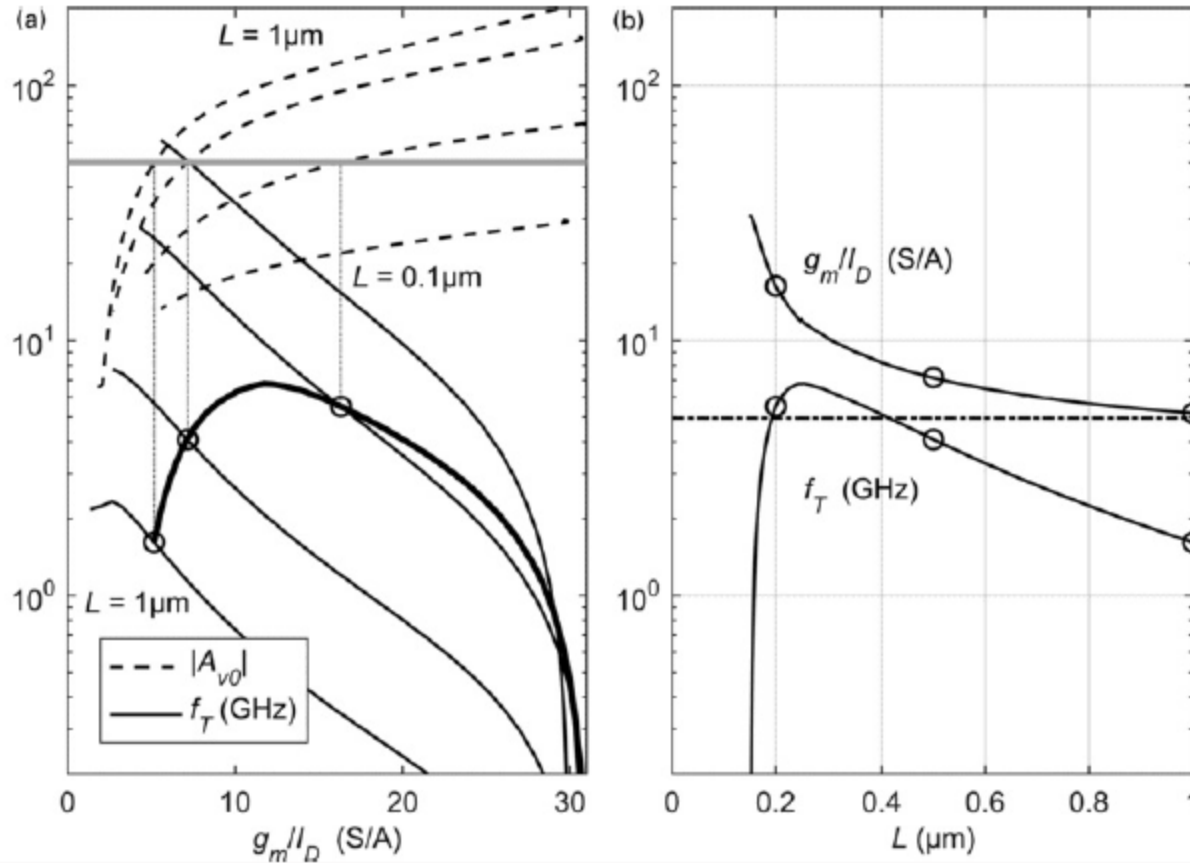
- Poslednji scenario pri odredjivanju karakteristika CS pojačavača je kada se fiksira unutrašnje pojačanje pojačavača, što je situacija koja postoji kod dizajna operacionih pojačavača sa velikim pojačanjem na niskim učestanostima.

**Primer 4:** Unutrašnje pojačanje CS pojačavača treba da je  $A_{v0}=50$  kada je  $C_L=1\text{pF}$ . Smatrati da je  $f_{O}=10$  i  $V_{DS}=V_{DD}/2=0.6\text{V}$ .

- Odrediti dimenzije tranzistora tako da se dobije maksimalno moguća maksimalna učestanost  $f_{Tmax}$
- Odrediti dimenzije tranzistora tako da se dobije minimalna disipacija u mirnoj radnoj tački i da  $f_T$  bude  $0.8f_{Tmax}$

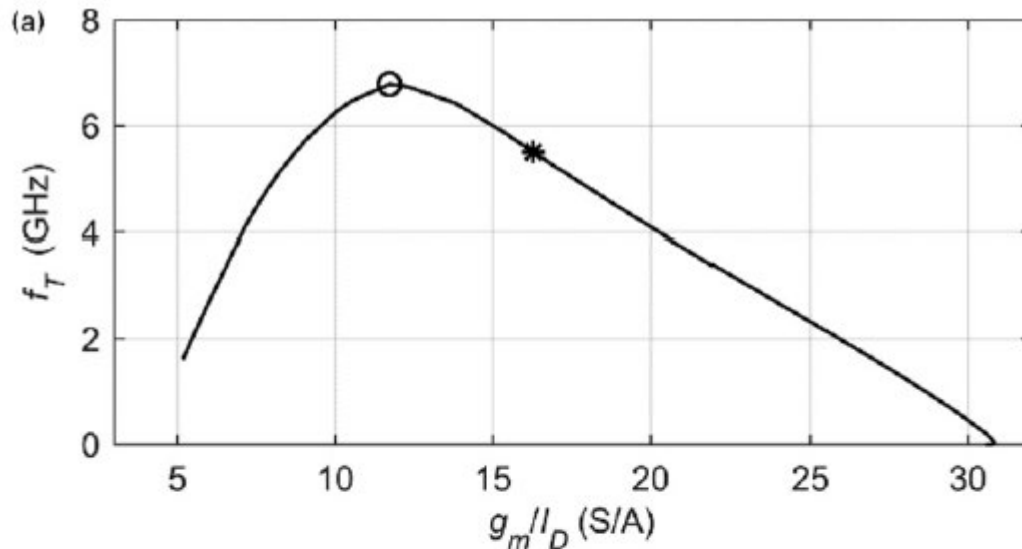
Na sledećoj slici su prikazane zavisnosti

$$f_T = f\left(\frac{g_m}{I_D}\right) \quad |A_{v0}| = \frac{g_m}{g_{ds}} = f\left(\frac{g_m}{I_D}\right) \quad f_T = f(L) \quad \frac{g_m}{I_D} = f(L)$$



Na slici je prikazana i zavisnost  $f_T = f\left(\frac{g_m}{I_D}\right) \Big|_{|A_{v0}|=50}$

Uvećane zavisnosti sa prethodne slike:

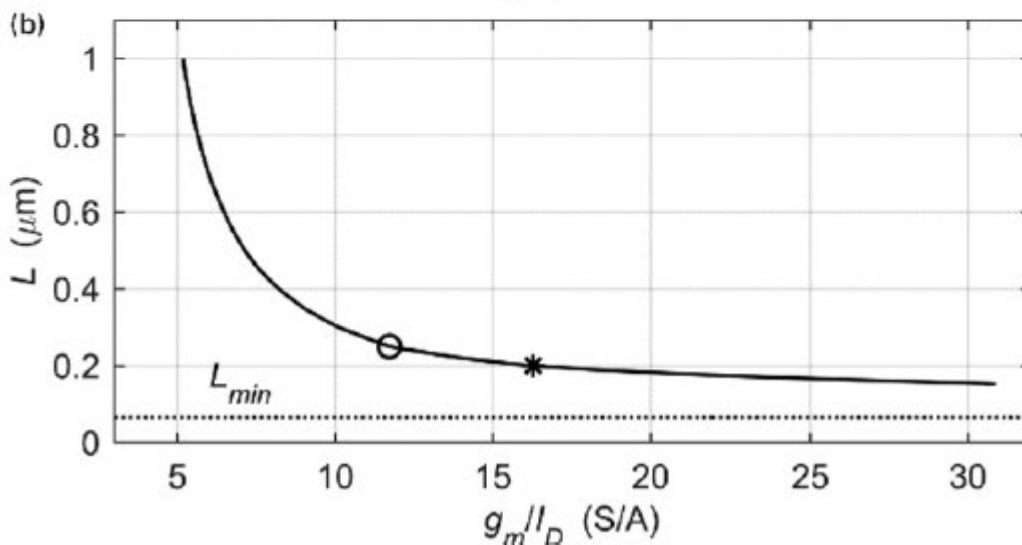


$L$  se povećava značajno sa smanjivanjem  $g_m/I_D$  (jaka inverzija) pri konstantom  $A_{v0}$

$$f_T = f_{T_{\max}} = 6.79 \text{ GHz} \Rightarrow L = 250 \text{ nm}$$

80% od  $f_{T_{\max}}$  je bolje uzeti sa desne strane maksimuma jer je, pri istom  $g_m$ , tada manja struja drejna

$$f_T = 0.8 f_{T_{\max}} \Rightarrow L = 200 \text{ nm}$$



## Sumirani rezultati:

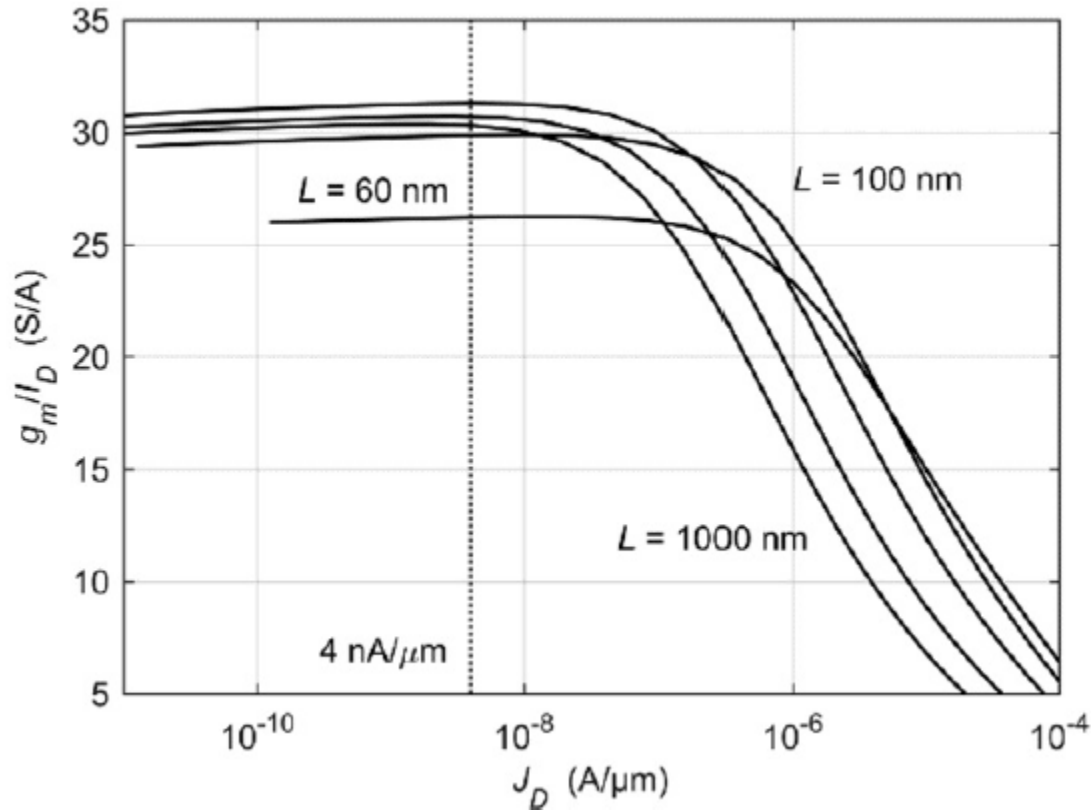
	gm/ID	L[nm]	fu[MHz]	ID[uA]	W[um]	VGS[mV]
fTmax	11.7	250	679	363.8	41.95	553.3
0.8fTmax, PDmin	16.3	200	543	209.5	54.24	481.8

U medicini i senzorskim interfejsima često nije potreban veliki propusni opseg (xkHz), ali je važno da potrošnja bude što manja. Takva kola se najčešće napajaju iz energije okoline (energy harvesting), ili thin-film baterija. Na primer: diferencijalni front-end pojačavač ima potrošnju od svega 1nW, napaja se iz baterije od 0.6V. Struja strujnog izvora u diferencijalnom pojačavaču je 1.6nA!

### Dimenzionisanje tranzistora u oblasti slabe inverzije

- U oblasti slabe inverzije efikasnost transkonduktanse je približno konstantna vrednost
$$\frac{g_m}{I_D} = \frac{1}{nV_t}$$
- Gustina struje ID/W u WI opsegu je vrlo mala npr. 0.8nA/0.20um=4nA-um (65nm proces)
- Subthreshold slope n je funkcija dužine kanala, ali se vrlo malo menja

$$\frac{g_m}{I_D} = f(J_D = I_D / W)$$

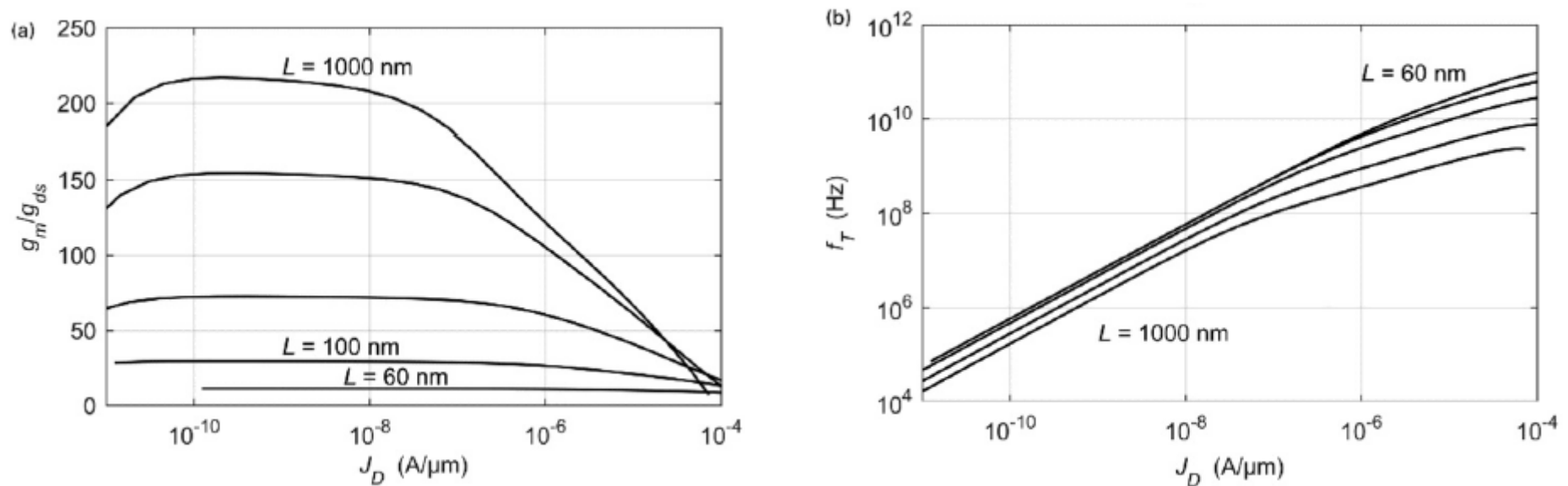


- DIBL efekat dosta utiče na struju drejna kod kratkih kanala. Da bi se izbegao njegov uticaj moraju se koristiti dužine kanala veće od 0.1 $\mu$ m, a tada se, u prvoj aproksimaciji, može smatrati da je  $g_m/I_D$  konstantno.
- Obično se u digitalnim kolima uzimaju minimalne dimenzije tranzistora
- U analognim kolima minimalne dimenzije tranzistora imaju tri loše osobine:



- Smanjuje se unutrašnje pojačanje
- Lošija je uparenost komponenti manjih dimenzija
- Veći je flicker šum

Na sledećoj slici su prikazane zavisnosti unutrašnjeg pojačanja ( $g_m/g_{ds}$ ) i učestanosti jediničnog pojačanja ( $f_T$ ) u funkciji gustine struje  $J_D$



Nezavisna promenljiva nije više  $g_m/ID$  već  $ID/W$ , jer se  $g_m/ID$  vrlo malo menja  
 $f_T$  opada sa povećanjem dužine kanala  $L$  (60nm, 0.1 $\mu$ , 0.2 $\mu$ , 0.5 $\mu$ , 1 $\mu$ )

$$10^{-8} [\text{A}/\mu\text{m}] = 10 [\text{nA}/\mu\text{m}]$$

$$J_D = 4 [\text{nA}/\mu\text{m}] \Rightarrow f_T > 1\text{MHz}$$

- $L > 1 \mu\text{m}$  nedovoljno precizan model
- Dizajner će se zbog toga zaustaviti na dužini kanala za koju se postiže razumna vrednost pojačanja, a  $f_T$  je i dalje znatno veće od radne učestanosti ( $FO \geq 10$ )

**Primer 5:** Odrediti dužinu kanala  $L$  tako da se dobije maksimalno unutrašnje pojačanje niskim učestanostima  $A_{v0} = 150$  kada je  $C_L = 1 \text{pF}$  i  $I_D = 0.8 \text{nA}$ . Smatrati da je  $V_{DS} = V_{DD}/2 = 0.6 \text{V}$  i minimalna širina kanala  $5 \mu\text{m}$ . Izračunati  $V_{GS}$ ,  $f_T$  i  $f_u$ .

$$J_D = \frac{I_D}{W} = \frac{0.8 \text{ nA}}{5 \mu\text{m}} = 0.16 [\text{nA}/\mu\text{m}]$$

$$|A_{v0}| = 150 \Rightarrow \frac{g_m}{g_{ds}} = 150 \Rightarrow L = 0.5 \mu\text{m}$$

$g_{m\_ID} = \text{lookup}(\text{nch}, \text{'GM\_ID'}, \text{'ID\_W'}, \text{JD}, \text{'L'}, 0.5)$

$f_T = \text{lookup}(\text{nch}, \text{'GM\_CGG'}, \text{'ID\_W'}, \text{JD}, \text{'L'}, 0.5) / 2 / \pi$

$$\frac{g_m}{I_D} = 30.5 \text{ S/A} \qquad f_T = 445 \text{ kHz}$$

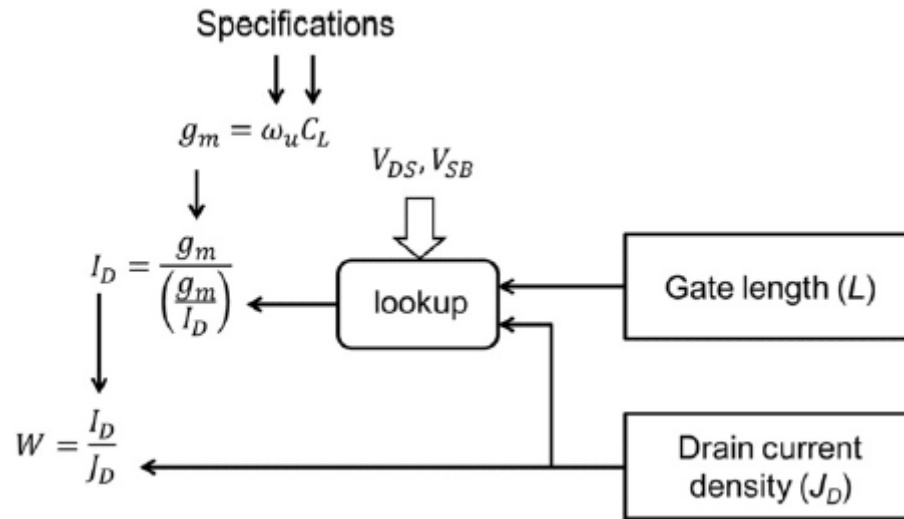
$$g_m = \left( \frac{g_m}{I_D} \right) I_D = 24.4 \text{ nS} \qquad f_u = \frac{g_m}{2\pi C_L} = 3.82 \text{ kHz} \Rightarrow FO = \frac{f_T}{f_u} = 116$$

$V_{GS} = \text{lookupVGS}(\text{nch}, \text{'ID\_W'}, \text{JD}, \text{'L'}, 0.5, \text{'METHOD'}, \text{'linear'})$

$$V_{GS} = 128 \text{ mV}$$

## Dimenzionisanje tranzistora pomoću gustine struje drejna

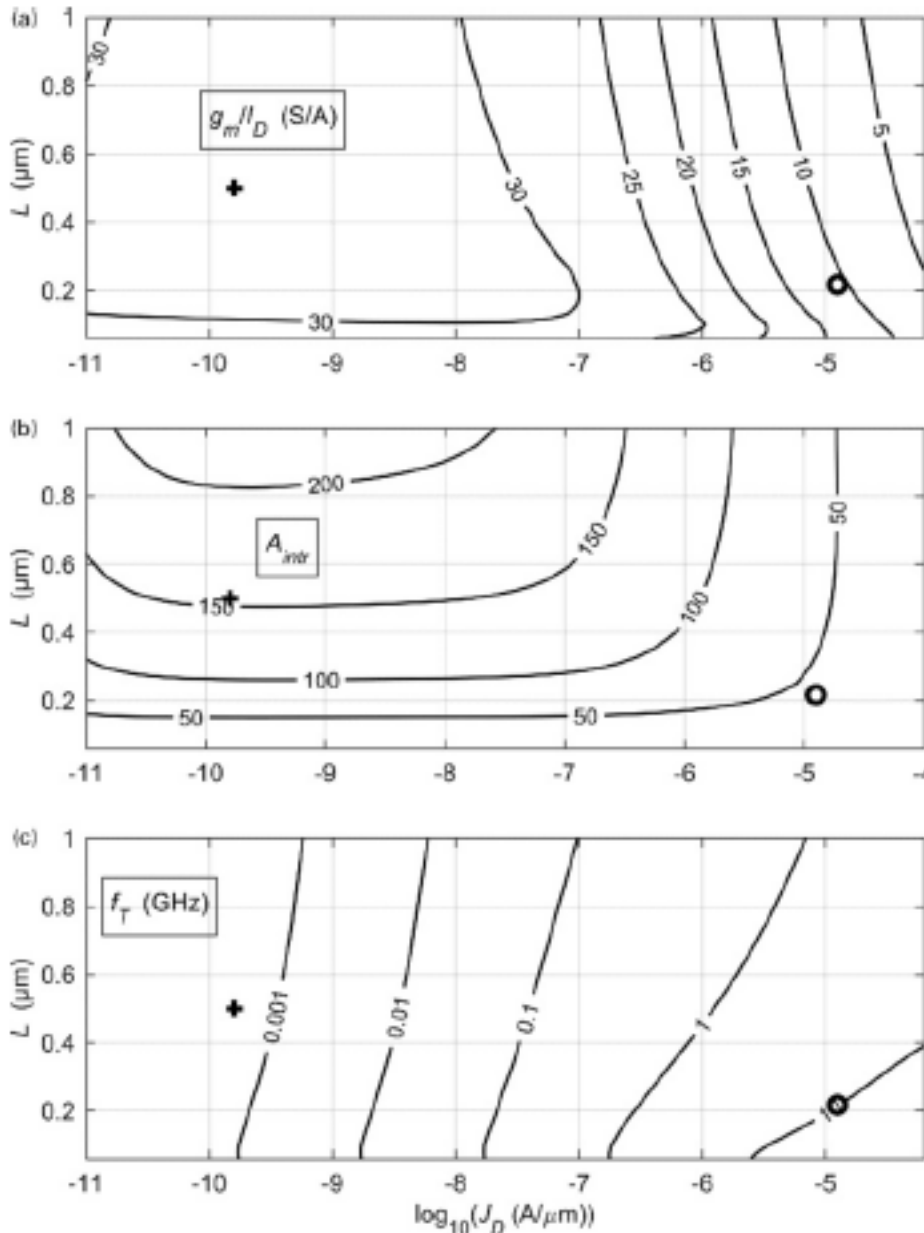
- $g_m / I_D$  više ne definiše jedinstvenu gustinu struje drejna kada tranzistor uđe u slabu inverziju. Postoji opseg vrednosti struja za koji je  $g_m/I_D$  približno konstantno, što znači i širok spektar mogućih rešenja
- Bolji je pristup da gustina struje bude početni parametar pri dizajnu. Mapiranje između  $J_D$  i  $g_m/I_D$  je jednoznačno



Dijagram toka sa prethodne slike se često primenjuje u sledećim situacijama:

- Kada je potrebno, zbog male potrošnje, da tranzistor radi u oblasti slabe inverzije
- Kada apriori ne znamo u kojoj oblasti inverzije radi tranzistor i koristimo sve oblasti inverzije radi postizanja određenog zahteva (pojačanje,  $f_T$ ,  $f_u$ ,  $(W \times L)_{min}$ , ....)

## Konture sa konstantnim $g_m/I_D$ , konstantnim unutrašnjim pojačanjem i konstantnim



- Na slici (a) postoji velika oblast u kojoj promena  $J_D$  i  $L$  ne utiče na promenu  $g_m/I_D$
- Na slici (b) se vidi da se sa povećanjem dužine kanala sopstveno pojačanje povećava, ali da je u oblasti jake inverzije za održavanjem istog pojačanja potrebno povećavati dužinu kanala
- U oblasti slabe inverzije  $f_T$  vrlo malo zavisi od gustine struje, što nije slučaj u oblastima umerene i jake inverzije

$$-8 \Leftrightarrow 10 [\text{nA}/\mu\text{m}]$$

- Koordinate rešenja iz primera 3 su označene kružićem, dok su sa + označena rešenja primera 5.

## Matlab kod za određivanje maksimalnog pojačanja

Postavljanje opsega gustine struje i dužine kanala

```
JDx = logspace(-10,-4,100);
```

```
Ly = .06:.01:1;
```

```
[X Y] = meshgrid(JDx, Ly);
```

Zatim koristimo Matlabovu konturnu funkciju da dobijemo gustine struje (JD1) i dužine kanala (L1) koje postižu željenu vrednost fT:

```
fTx = lookup(nch, 'GM_CGG', 'ID_W', JDx, 'L', Ly)/(2*pi);
```

```
[a1 b1] = contour(X, Y, fTx, fT*[1 1]);
```

```
JD1 = a1(1,2:end)';
```

```
L1 = a1(2,2:end)';
```

Potom posmatramo parove JD,L pri kojima se postiže maksimalno unutrašnje pojačanje

```
Av = diag(lookup(nch, 'GM_GDS', 'ID_W', JD1, 'L', L1));
```

```
[a2 b2] = max(Av);
```

```
Avo = a2;
```

```
L = L1(b2);
```

```
JD = JD1(b2);
```

Evaluacija gm/ID i VGS

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

```
VGS = lookupVGS(nch, 'GM_ID', gm_ID, 'L', L);
```

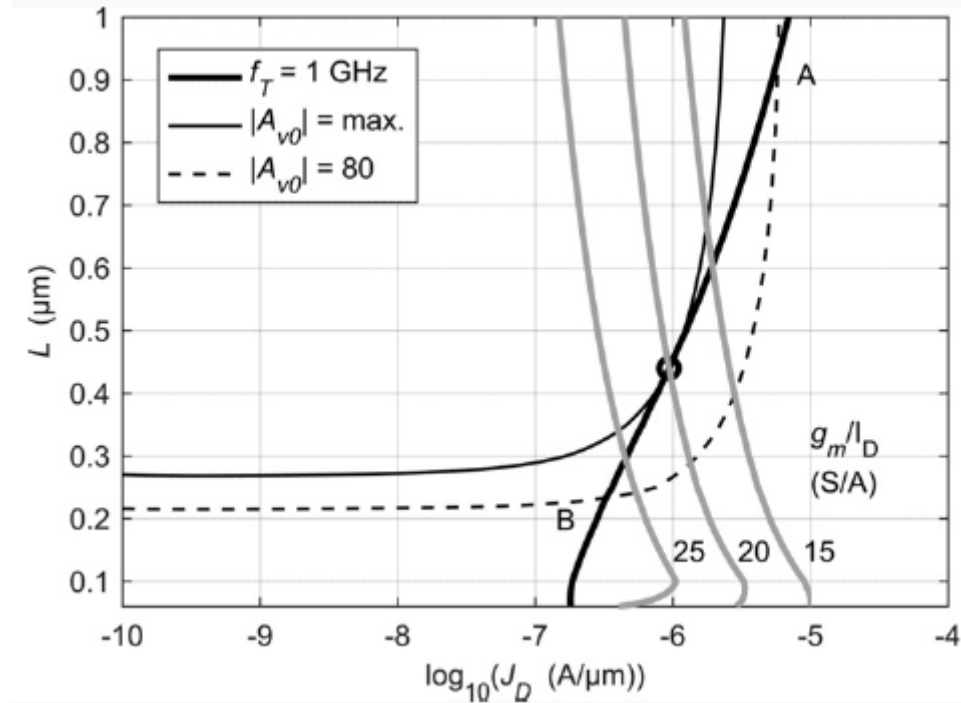
- Vrednosti parametara dizajna pri određivanju maksimalnih unutrašnjih pojačanja

$f_T$ (GHz)	$g_m/I_D$ (S/A)	$J_D$ ( $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ )	$\max( A_{v0} )$	$L$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{GS}$ (V)
0.02	29.93	0.0125	206.4	1.00	0.2861
0.05	28.78	0.0369	196.0	1.00	0.3228
0.10	26.54	0.0986	179.0	0.99	0.3572
0.20	24.85	0.1874	155.1	0.79	0.3773
0.50	22.21	0.4746	124.0	0.57	0.4058
<b>1.00</b>	<b>20.00</b>	<b>0.9371</b>	<b>102.0</b>	<b>0.44</b>	<b>0.4300</b>
2.00	16.42	2.105	81.6	0.37	0.4718
5.00	13.19	5.397	57.6	0.27	0.5242
10.00	10.62	12.90	40.9	0.22	0.5787
20.00	8.75	28.48	27.4	0.17	0.6310
50.00	6.66	75.64	15.5	0.11	0.7050

**Primer 6:** Dimenzionisati tranzistor tako da se dobija maksimalno unutrašnje pojačanje na niskim učestanostima  $A_{v0}=50$  i  $A_{v0}=80$ . Poznato je  $C_L=1\text{pF}$  i  $f_u=100\text{MHz}$  i  $f_T \geq 1\text{GHz}$ . Smatrati da je  $V_{DS}=V_{DD}/2=0.6\text{V}$ . Izračunati  $V_{GS}$ ,  $f_T$  i  $f_u$ .

- Kada se uzmu parametri iz prethodne tabele za  $f_T=1\text{GHz}$ , dobija se da maksimalno unutrašnje pojačanje iznosi  $A_{v0}=102$

Posmatrajmo konture sa slika (a), (b) i (c) na istom dijagramu



- Kontura sa konstantnim  $f_T=1\text{GHz}$  preseca konturu sa konstantnim naponskim pojačanjem  $A_{v0}=80$  u tačkama A i B. Tačka B je u oblasti slabe inverzije, dok je tačka A u oblasti jake inverzije

```
Av = lookup(nch,'GM_GDS','ID_W',JD,'L',L);
```

```
[a3 b3] = contour(X,Y,Av,80*[1 1]);
```

```
JD3 = a3(1,2:end)';
```

```
L3 = a3(2,2:end)';
```

	gm/ID	L[nm]	VGS[mV]
Tačka A	8.78	930	612
Tačka B	27.02	233	372

Kada se uzme da je  $FO > 10$  dobija se

$$M = FO \geq FO_{min}$$

$$FO = \text{diag}(\text{lookup}(\text{nch}, 'GM\_CGG', 'ID\_W', JD3, 'L', L3)) / (2 * \pi * f_u);$$

$$FO4 = FO(M);$$

$$JD4 = JD3(M);$$

$$L4 = L3(M);$$

$$gm\_ID4 = \text{diag}(\text{lookup}(\text{nch}, 'GM\_ID', 'ID\_W', JD4, 'L', L4));$$

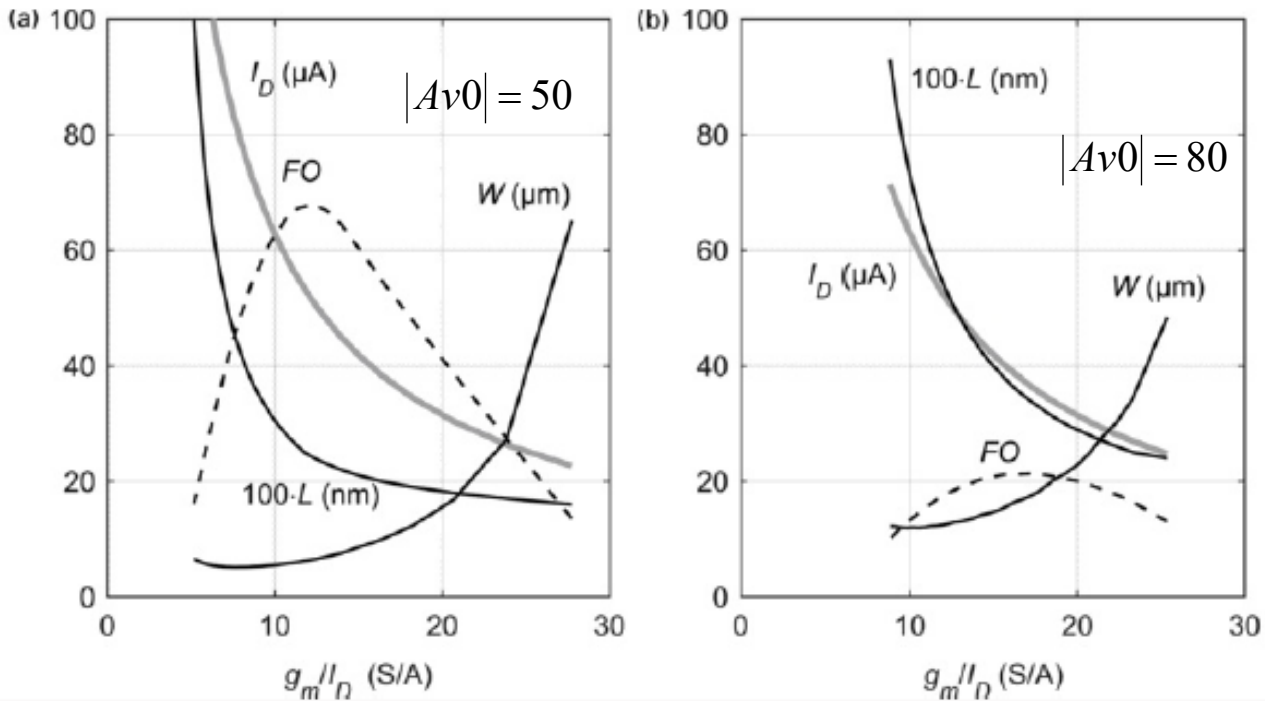
$$gm = 2 * \pi * f_u * CL;$$

$$ID = gm. / gm\_ID4;$$

$$W = ID. / JD4;$$

Rezultati prethodnih operacija su prikazani na sledećoj slici za dve vrednosti unutrašnjeg pojačanja  $Av_0 = 80$  i  $Av_0 = 50$





- Uočiti da se zahtevi dizajna ispunjavaju za širok spektar efikasnosti transkonduktanse, u okviru kojih se struje menjaju za oko 3-5 puta. Ovo je u suprotnosti sa dizajnom pri maksimalnim pojačanju, koji sužava prostor dizajna na jednu jedinu tačku. Treba imati na umu da se opseg mogućih vrednosti  $g_m / I_D$  proširuje za dizajn sa nižim unutrašnjim pojačanjem.
- Veći fan-out (FO) znači manju ulaznu kapacitivnost  $C_{gg} = CL/FO$
- U sledećoj tabeli su dati sumarno rezultati dizajna i SPICE simulacija

	(a)	SPICE verification	(b)	SPICE verification
$ A_{v0} $	50	50.5	80	80.45
$L$ ( $\mu\text{m}$ )	0.240	–	0.340	–
$W$ ( $\mu\text{m}$ )	6.479	–	17.41	–
$I_D$ ( $\mu\text{A}$ )	50.74	–	36.59	–
$FO$	68.0	–	21.2	–
$g_m/I_D$ (S/A)	12.38	12.31	17.17	17.03
$f_u$ (MHz)	100	99.0	100	98.0
$V_{GS}$ (V)	0.541	0.544	0.465	0.465
$C_{gg}$ (fF)	14.7	14.6	47.0	46.2

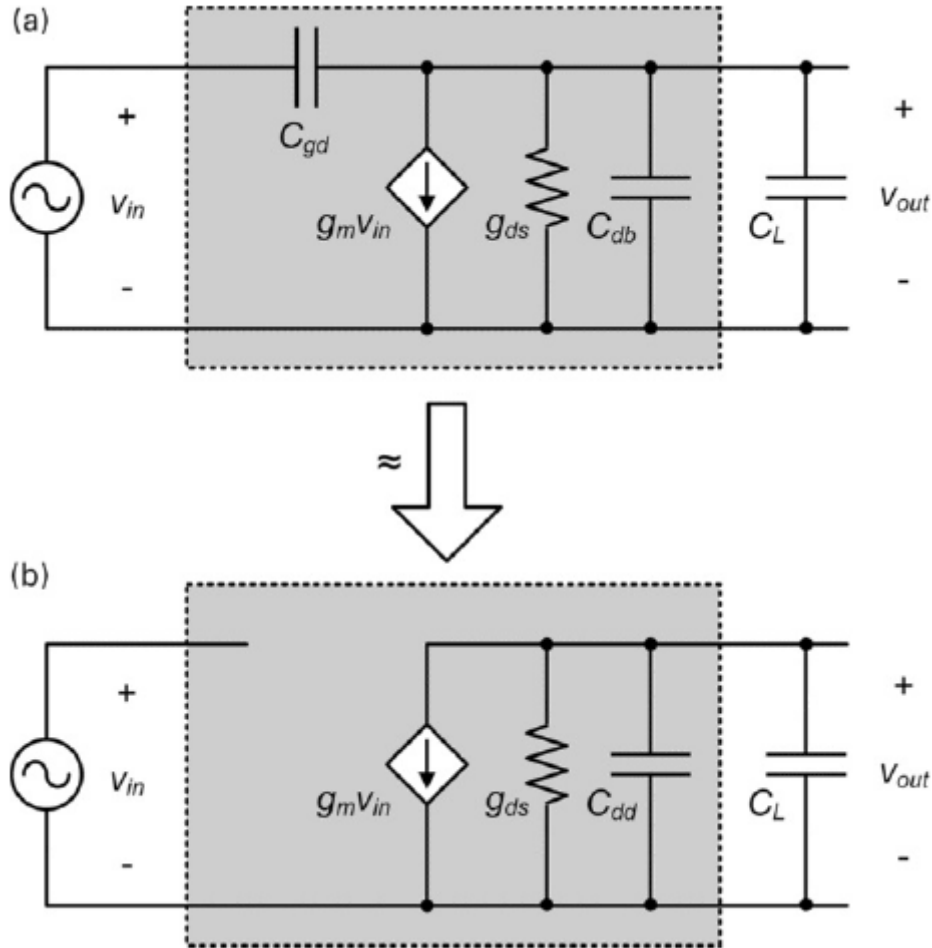
$$\left(\frac{g_m}{I_D}\right)_{WI} = \frac{1}{nV_t}$$

Na kraju ove analize ćemo posmatrati dizajn sa minimalnom strujom drejna ID, pri čemu je minimalna dozvoljena vrednost fan-out-a FO=10 .

Radna tačka je, očekivano, u oblasti slabe inverzije

$ A_{v0} $	50	80
$g_m/I_D$ (S/A)	28.53	27.02
$L$ ( $\mu\text{m}$ )	0.158	0.233
$I_D$ ( $\mu\text{A}$ )	22.02	23.26
$W$ ( $\mu\text{m}$ )	88.90	71.02

## Uključivanje uticaja izlazne kapacitivnosti Cdd



Izlazna kapacitivnost se ne zna pri određivanju dimenzija tranzistora i zato je ovaj postupak iterativan

1. Prvo se odrede dimenzije tranzistora pri  $C_{dd}=0$
2. Na osnovu dobijenih dimenzija se izračuna  $C_{dd}=C_{dd1}$
3. Potom se skaliraju širina gejta tranzistora i struja drejna faktorom

$$S = \frac{1}{1 - \frac{C_{dd1}}{C_L}}$$

Kada se skalira sa ovom vrednošću struja drejna i širina gejta tranzistora, gustina struje i  $g_m/ID$  ostaju nepromenjeni, dok se  $C_{dd}$  i  $g_m$  skaliraju linearno sa  $S$ . Zbog toga je

$$\omega_u = \frac{Sg_m}{C_L + SC_{dd1}} = \frac{g_m}{C_L}$$

- Ova metoda dobro funkcioniše za razmatrane jednostavne primere i ograničena je na slučajeve kada se parazitna kapacitivnost linearno skalira sa transkonduktansom  $g_m$ , kojom se podešava učestanost  $f_T$
- To nije slučaj sa svim kolima, pa se tada ne koristi analitičko skaliranje, već iterativni postupak
  1. Prvo se odrede parametri sa  $C_{dd}=0$
  2. Odrediti dimenzije tranzistora da se ostvari željeni GBW za  $C+C_{dd}$  (u prvoj iteraciji je  $C_{dd}=0$ )
  3. Estimirati vrednost  $C_{dd}$
  4. Vratiti se na korak 2. sa novom vrednošću  $C_{dd}$
  5. Prethodne korake od 2 do 4 ponavljati dok se ne postigne konvergentno rešenje

**Primer 7:** Ponoviti primer 3 bez zanemarivanja kapacitivnosti  $C_{dd}$ , tako da se minimizira snaga disipacije sa  $C_L=1\text{pF}$  i  $f_u=1\text{GHz}$ .

Početne vrednosti:  $g_m/I_D=20.76$  i  $L=70\text{nm}$

Pomoću lookup tabela se odredi  $J_D$  i  $C_{dd}$

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

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

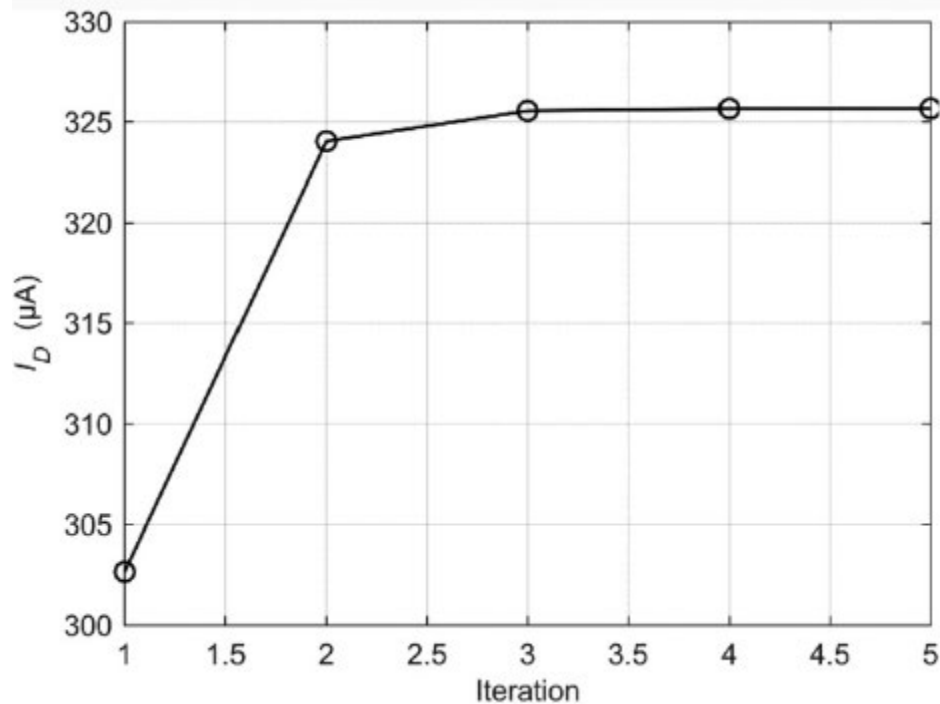
Potom se primeni iterativni process:

```

Cdd = 0;
for m = 1:5,
gm = 2*pi*GBW*(CL + Cdd);
ID(m,1) = gm./gm_ID;
W(m,1) = ID(m,1)./JD;
Cdd = W*CDD_W;
end

```

Na sledećoj slici je grafički prikazan iteracioni postupak (5 iteracija) pri određivanju konačne vrednosti struje drejna



$$I_D(1) = 302,7 \mu\text{A}$$

$$I_D(2) = 324.0 \mu\text{A}$$

$$I_D(3) = 325.6 \mu\text{A}$$

$$W(1) = 114.2 \mu\text{m}$$

$$W(3) = 122.8 \mu\text{m}$$