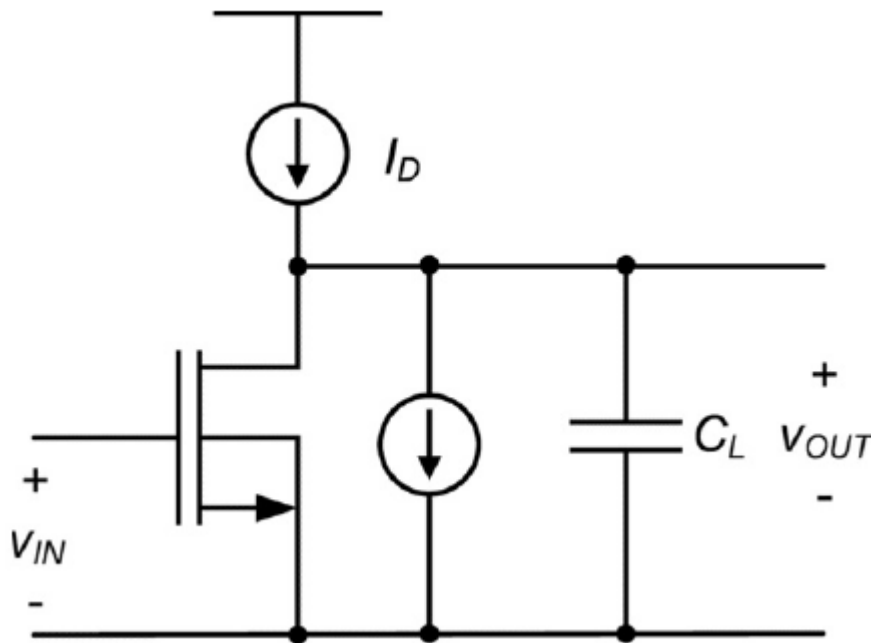


□ Šum

Elektronski šum značajno ograničava performanse elektronskih kola. U MOS tranzistorima postoje dve dominantne vrste šuma: termički šum i flicker šum. Termički šum je usko vezan za termodinamikom, dok je flicker šum posledica nesavršenosti poluprovodničkih materijala. Šumovi su inherentno prisutni u tranzistorima i teško ih je minimizirati.

Modelovanje termičkog šuma



$$\overline{i_d^2} = 4kT\gamma_n g_m \Delta f$$

- Kod dugokanalnih tranzistora u SI oblasti $\gamma_n=2/3$, dok je, zbog sekundarnih efekata, kod tranzistora sa kratkim kanalom u ovoj oblasti parametar γ_n često znatno veći
- U oblasti WI γ_n se približava shot noise granici $\gamma_n=0.5n$, gde je n potprajni faktor strmine

Na sledećoj slici je prikazana zavisnost koeficijenta γ u 65nm tehnologiji. Ovaj parametar je izračunat kao

$$\gamma = \frac{1}{4kTg_m} \frac{\overline{i_d^2}}{\Delta f} = \frac{1}{4kT} \frac{STH}{g_m}$$

STH (spektralna gustina snage termičkog šuma) je dobijena pomoću lookup tabela

```
kB = 1.3806488e-23;
```

```
L = [0.06, 0.1, 0.2, 0.4];
```

```
vgs = 0.2:25e-3:0.9;
```

```
for i=1:length(L)
```

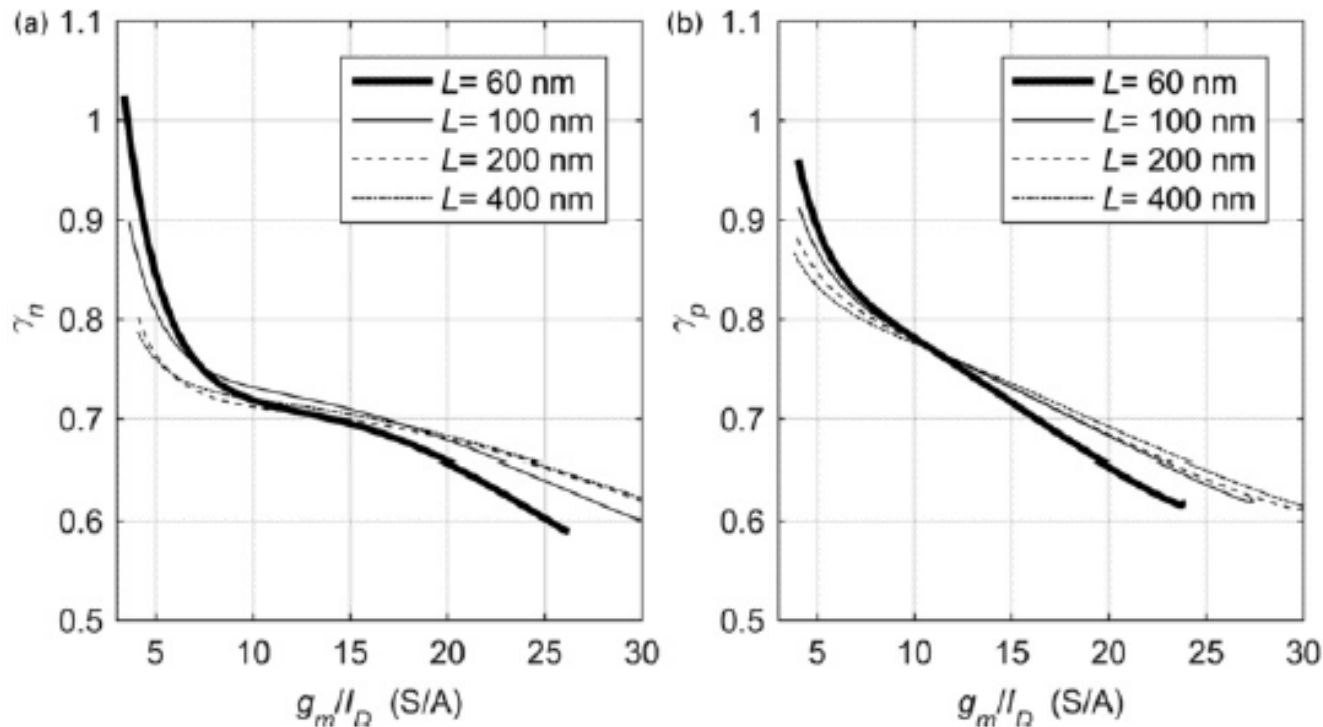
```
gm_id_n(:,i) = lookup(nch, 'GM_ID', 'VGS', vgs, 'L', L(i));
```

```
gm_id_p(:,i) = lookup(pch, 'GM_ID', 'VGS', vgs, 'L', L(i));
```

```
gamma_n(:,i) = lookup(nch,'STH_GM','VGS',vgs,'L', L(i))/4/kB/nch.TEMP;
```

```
gamma_p(:,i) = lookup(pch,'STH_GM','VGS',vgs,'L', L(i))/4/kB/pch.TEMP;
```

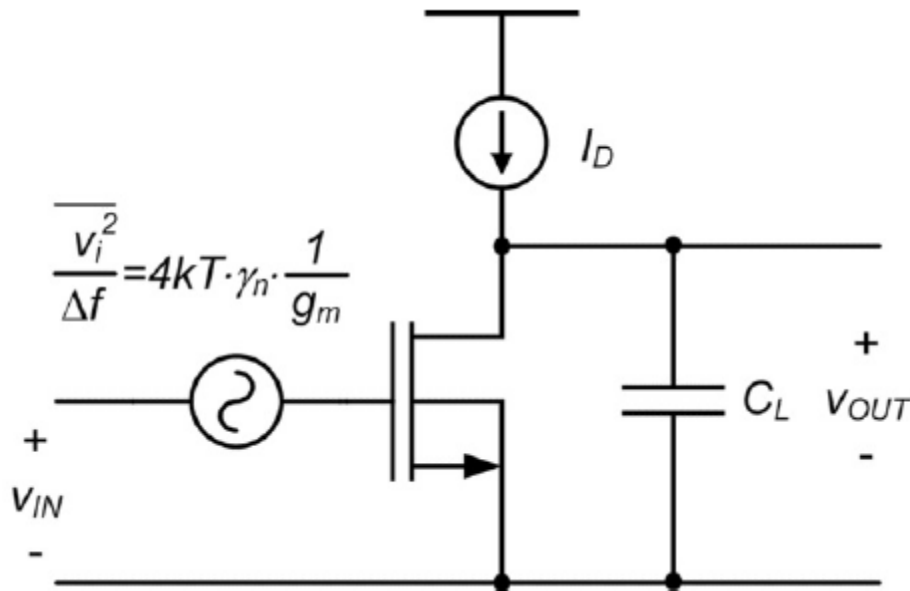
```
end
```



U oblasti umerene inverzije parametar γ se malo menja, dok je u oblasti jake inverzije ($g_m/I_D < 10$) vrlo zavisian od odnosa g_m/I_D

Ekvivalentni naponski generator šuma na ulazu pojačavača

$$\frac{\overline{i_d^2}}{\Delta f} / g_m^2 = \frac{4kT\gamma_n}{g_m}$$



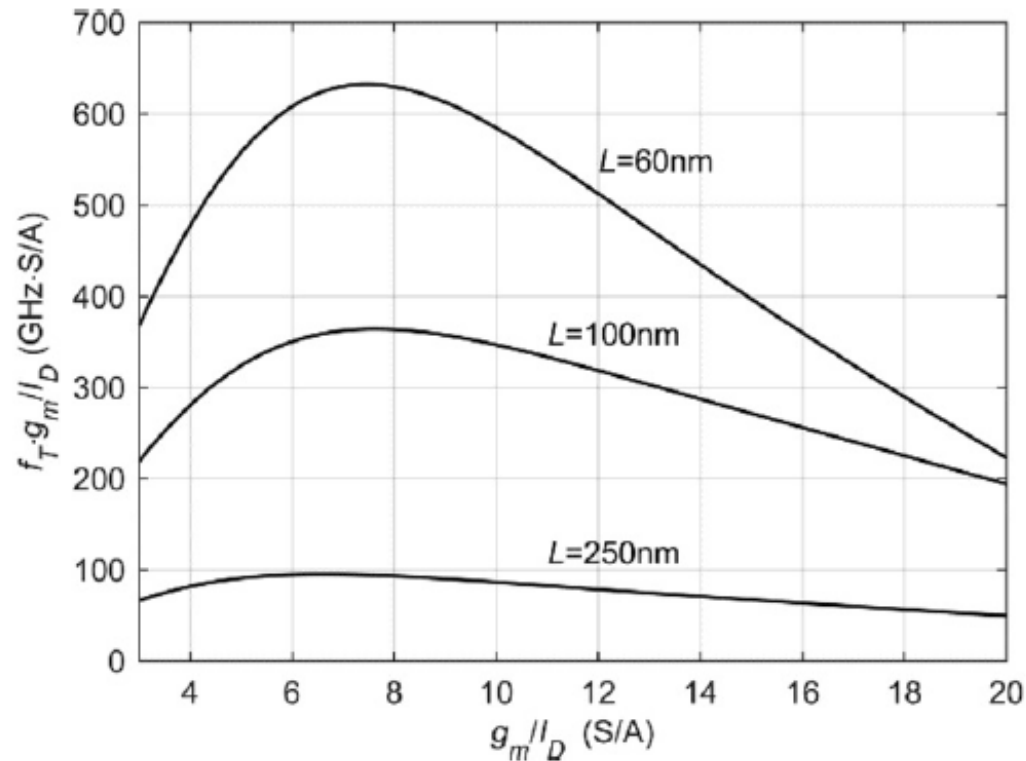
- Minimizacija šuma povećanjem transkonduktanse tranzistora g_m
- Ta promena može biti sa povećanjem struje drejna, ali se tada povećava disipacija u kolu.
- Povećanje dimenzija tranzistora (odnos W/L) povećava g_m/I_D , što dovodi do smanjenja propusnog opsega, odnosno f_T .

Kompromis između termičkog šuma, propusnog opsega (GBW) i struje potrošnje

$$FOM = \frac{G \cdot BW}{V_{n,in}^2 \cdot I_D} = \frac{\frac{f_T}{FO}}{4kT \gamma_n \frac{1}{g_m} I_D} \propto f_T \frac{g_m}{I_D}$$

Na sledećoj slici su prikazane karakteristike

$$f_T \frac{g_m}{I_D} = f \left(\frac{g_m}{I_D} \right)$$



- Optimalna vrednost efikasnosti transkonduktanse je $g_m/I_D=7$ S/A
- Pik zavisnosti je pri najmanjoj dužini kanala $L=60\text{nm}$ jer je f_T najveće u tom slučaju, što znači da tranzistori sa kraćim kanalima imaju manje struje drejna pri zadanom propusnom opsegu i snazi šuma
- Tipičan primer LNA

Primer 1: Dimenzionisati tranzistor tako da ulazni nivo šuma bude jednak 1nV/rt-Hz. Izabрати nivo inverzije u tranzistoru (g_m/I_D) tako da se dobije maksimalni FOM.

$$\frac{g_m}{I_D} = 7 \text{ S/A}$$

Pošto nije specificiran zahtev za pojačanje u propusnom opsegu, uzima se minimalna dužina kanala $L=60\text{nm}$. U suprotnom se uzima dužina kanala za koju se dobija željeno pojačanje i $g_m/I_D=7$.

Vrednost parametra γ za $L=60\text{nm}$ je $\gamma_n=0.8$, tako da je

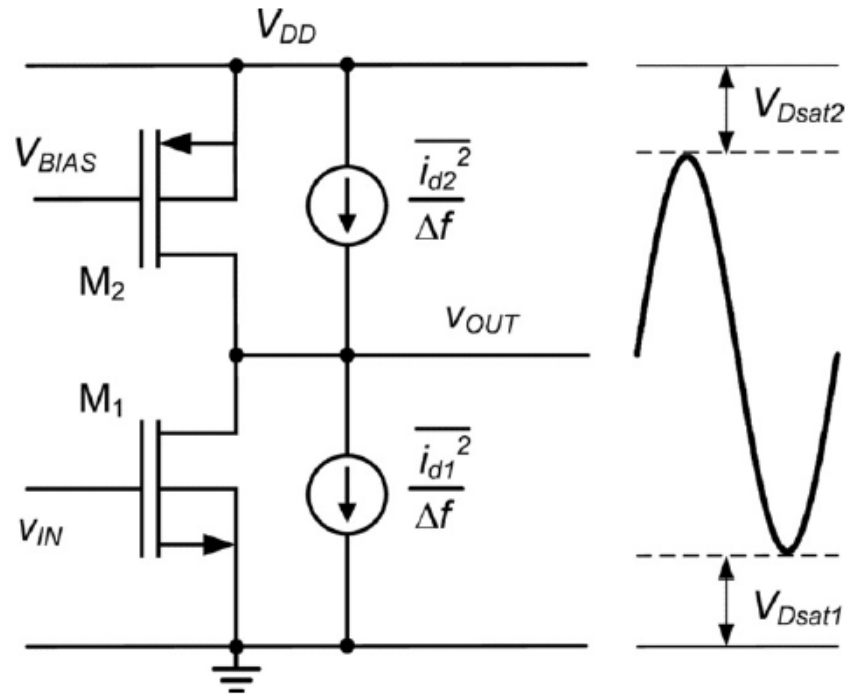
$$g_m = \frac{4kT\gamma_n}{\frac{V_{n,in}^2}{\Delta f}} = \frac{4kT \cdot 0.8}{\left(1 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2} = 13.2 \text{ mS}$$

$$I_D = \frac{g_m}{(g_m / I_D)} = 1.9 \text{ mA}$$

$$W = \frac{I_D}{(I_D / W)} = \frac{1.9 \text{ mA}}{84.4 \mu\text{A}/\mu\text{m}} = 22.4 \mu\text{m}$$

Tradeoff nije uvek tako jednostavan kod složenijih kola kao u ovom prostom primeru

Termički šum CS sa aktivnim opterećenjem



- Ekvivalentna snaga šuma na ulazu kola sa slike je

$$\frac{\overline{V_{n,in}^2}}{\Delta f} = 4kT\gamma_n \frac{1}{g_{m1}} + 4kT\gamma_p \frac{g_{m2}}{g_{m1}^2} = \frac{4kT\gamma_n}{g_{m1}} \left(1 + \frac{\gamma_p g_{m2}}{\gamma_n g_{m1}} \right)$$

- Da bi se minimizirao izraz u zagradi, koji predstavlja dodatak na šum koji unosi NMOS tranzistor potrebno je minimizirati funkciju g_{m2}/g_{m1} , smatrajući da se odnos koeficijenata γ ne menja sa promenom nivoa inverzije

Minimiziranje odnosa g_{m2}/g_{m1} , budući da imaju iste struje drejna, ekvivalentna je minimiziranju funkcije

$$\frac{(g_m / I_D)_2}{(g_m / I_D)_1}$$

Kada se podesi g_{m1}/I_{D1} , šum se minimizira izborom minimalnog g_{m2}/I_{D2} . Međutim tu treba voditi računa o kompromisu između izlaznog swinga i minimalnog šuma na ulazu pojačavača jer je

$$V_{Dsat2} \approx \frac{2}{(g_m / I_D)_2}$$

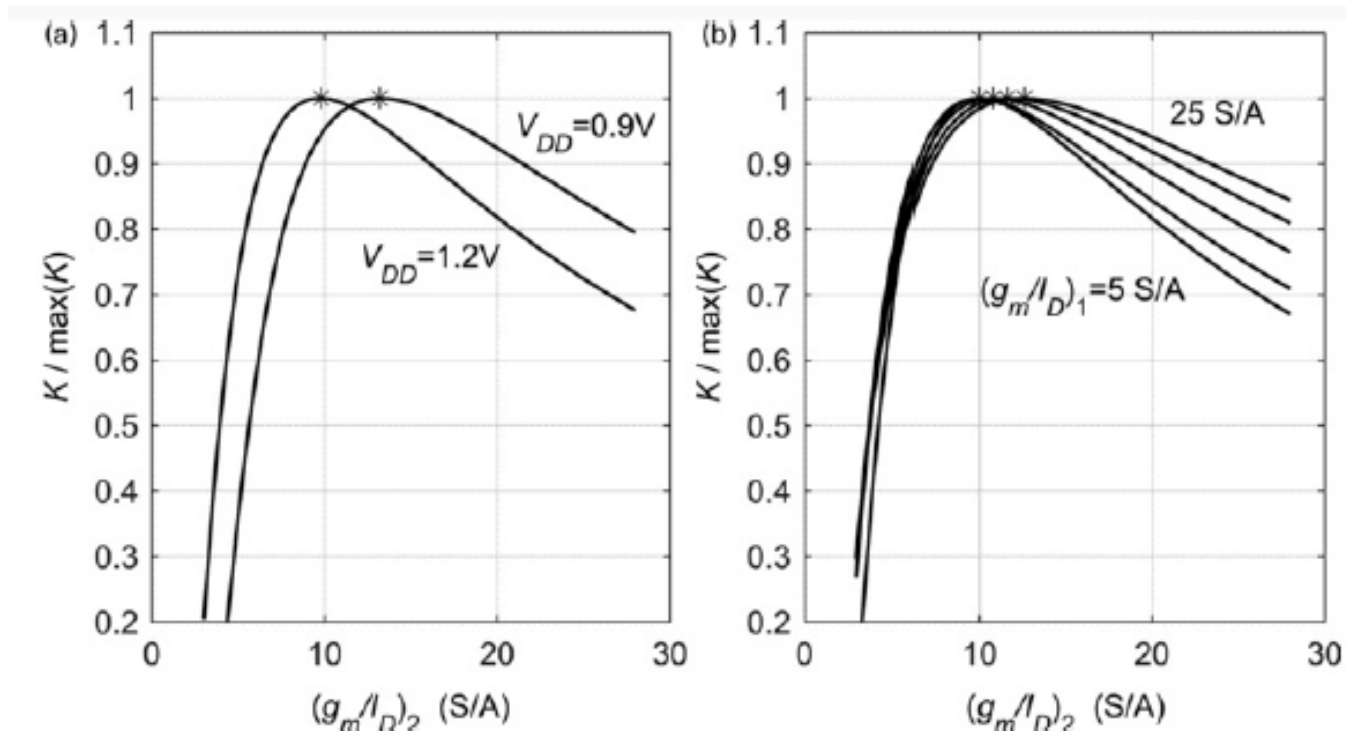
U kolima gde je dinamički opseg (odnos snage maksimalnog signala i snage šuma) ključan postoji optimalna vrednost parametra g_{m2}/I_{D2}

- Dinamički opseg je proporcionalan parametru K, koji treba optimizovati

$$K = \frac{(V_{DD} - V_{Dsat1} - V_{Dsat2})^2}{1 + \frac{\gamma_p g_{m2}}{\gamma_n g_{m1}}} = \frac{\left(V_{DD} - \frac{2}{(g_m / I_D)_1} - \frac{2}{(g_m / I_D)_2} \right)^2}{1 + \frac{\gamma_p (g_m / I_D)_2}{\gamma_n (g_m / I_D)_1}}$$

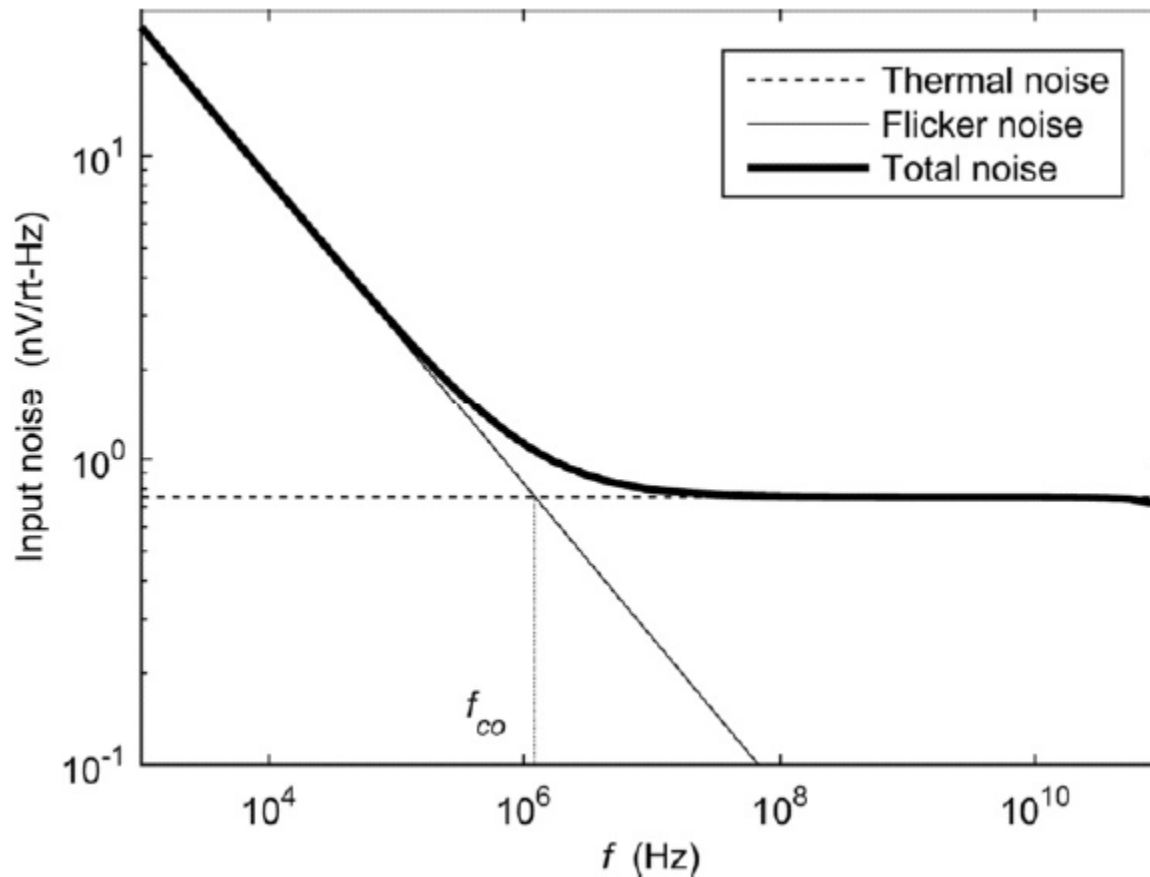
Primer 2:

- (a) Odrediti optimalnu vrednost $(g_m/I_D)_2$ za koju se dobija maksimalan dinamički opseg pojačavača sa prethodne slike. Poznato je: $V_{DD}=1.2V$, $\gamma_n = \gamma_p$, $(g_m/I_D)_1 = 7S/A$.
- (b) Ponoviti tačku (a) kada je napon napajanja $V_{DD}=0.9V$
- (c) Ponoviti tačku (a) kada se $(g_m/I_D)_1$ menja u opsegu $5S/A \leq (g_m/I_D)_1 \leq 25S/A$, sa korakom od $5 S/A$.
- Na sledećoj slici su prikazani relevantni dijagrami.
 - Optimalna vrednost efikasnosti transkonduktanse $(g_m/I_D)_2$ nalazi se u oblasti umerene inverzije.



Flicker šum

- SGS flicker šuma nije konstantna, obrnuto je proporcionalna sa učestanošću i zato se taj šum često zove i $1/f$ šum
- Na niskim učestanostima dominantan je flicker šum, dok je na visokim dominantan termički šum
- Učestanosti gde su spektralne gustine snage termičkog i Flicker šuma podjednake je f_{co}

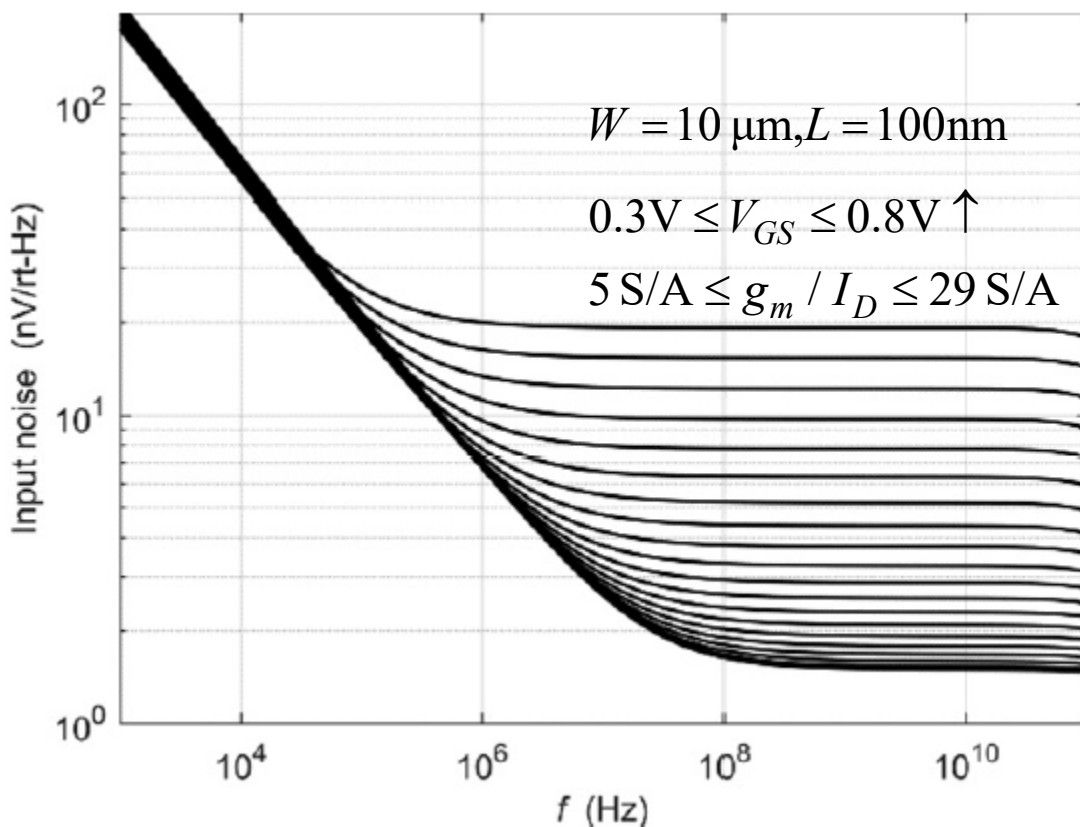


Model Flicker šuma na ulazu tranzistora

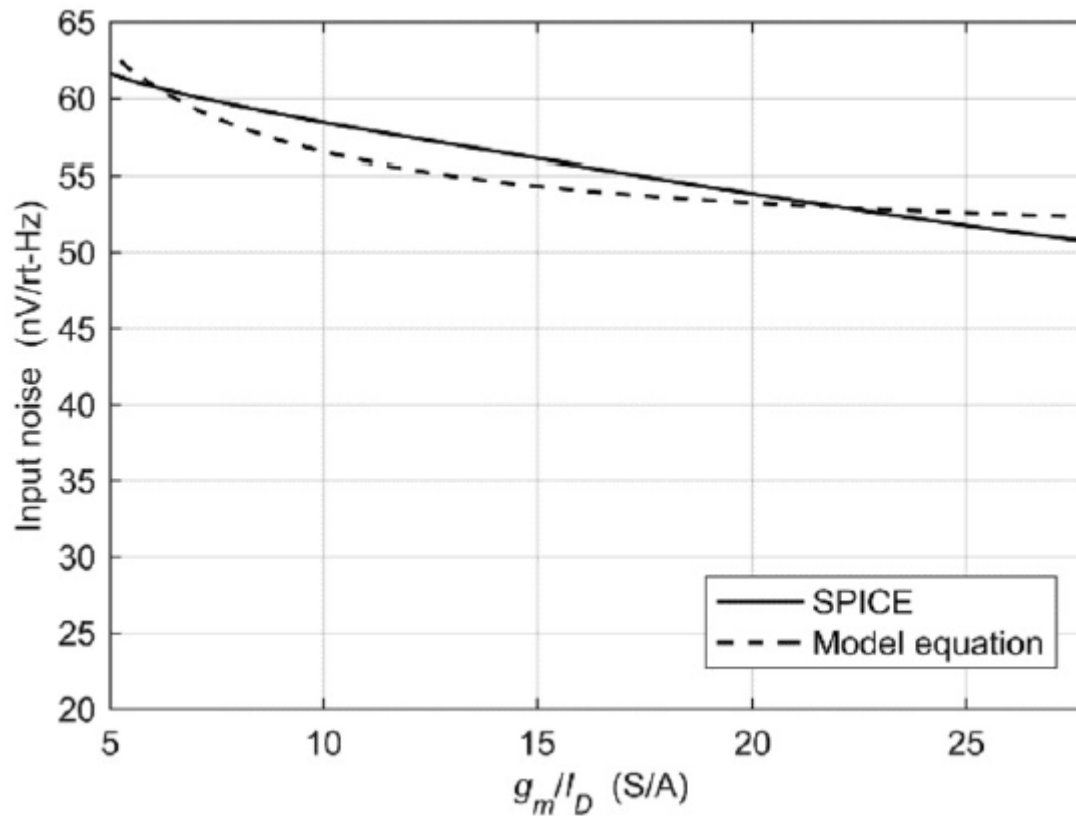
$$\frac{\overline{V_{n,in}^2}}{\Delta f} = \left(1 + \alpha \mu C_{ox} \frac{I_D}{g_m} \right)^2 \left(\frac{q}{C_{ox}} \right)^2 \frac{kT \lambda N_t}{WL} \frac{1}{f} = \frac{K_f}{WL} \frac{1}{f}$$

Na sledećoj slici je prikazana zavisnost SGS Flicker šuma na ulazu tranzistora

Termički šum se značajno menja sa promenom polarizacije gejta, dok je Flicker šum vrlo malo zavisan od nje.



Zavisnost SGS Flicker šuma u funkciji efikasnosti transkonduktanse pri $f=12\text{kHz}$



- Flicker šume je relativno malo zavisan od polarizacije, a primarni način na koji se može smanjiti je povećanje površine (geometrija) tranzistora WL
- Ako se povećanjem geometrija ne dobije zadovoljavajući nivo Flicker šuma može se primeniti tehnika kompenzacije šuma pomoću čoperskih pojačavača

Granična učestanost f_{co}

$$4kT\gamma_n \frac{1}{g_{m1}} = \frac{K_f}{WL} \frac{1}{f_{co}} \Rightarrow f_{co} = \frac{K_f}{4kT\gamma_n} \frac{g_m}{WL}$$

Primer 3: Nacrtati zavisnost granične učestanosti f_{co} u funkciji g_m/I_D

Lookup tabela sadrži tabelarnu funkciju

$$SFL = \frac{i_{d,\text{flicker}}^2}{\Delta f} \Bigg|_{f=1 \text{ Hz}} \quad f_{co} = \frac{SFL}{STH}$$

Matlab kod:

```
L = [0.06, 0.1, 0.2, 0.4];
```

```
vgs = 0.2:25e-3:0.9;
```

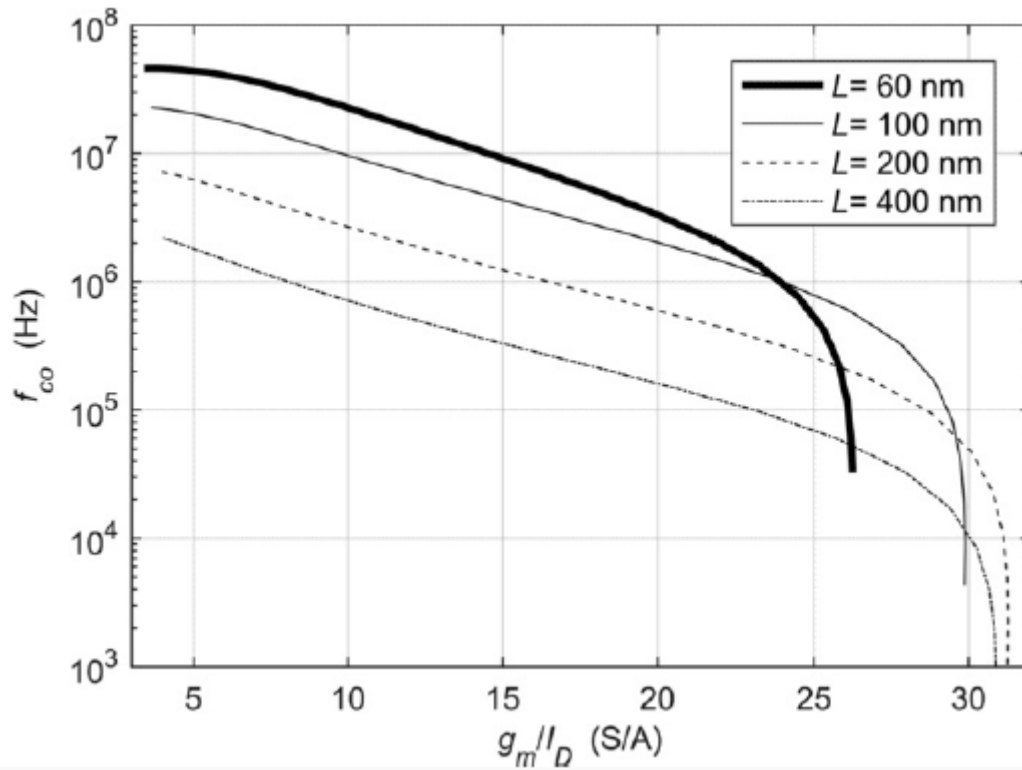
```
for i=1:length(L)
```

```
    gm_id_n(:, i) = lookup(nch, 'GM_ID', 'VGS', vgs, 'L', L(i));
```

```
    fco(:, i) = lookup(nch, 'SFL_STH', 'VGS', vgs, 'L', L(i));
```

```
End
```

Pomoću prethodnog koda je dobijena zavisnost granične učestanosti f_{co} u funkciji g_m/I_D



- Granična učestanost f_{co} opada sa povećanjem g_m/I_D i sa povećanjem dužine kanala L
- U oblasti jake inverzije pri $L=60$ nm učestanost f_{co} ima vrednost oko 50MHz