



الکترونیک 3

فصل دوم

مدل فرکانس بالای ترانزیستور FET

درس: دکتر رحمتی

<http://ee.iust.ac.ir/rahmati/>

آدرس Email و Website برای تکالیف و...:

rahmati@iust.ac.ir

<http://eel.iust.ac.ir/rahmati/>

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

1



FET ها در فرکانس بالا

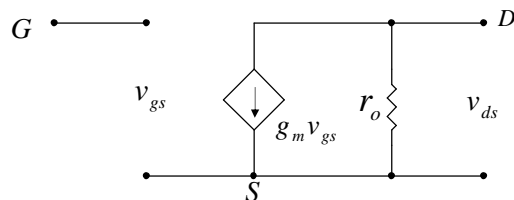
1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

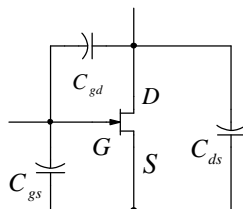
2



مدار معادل FET ها در فرکانس پایین



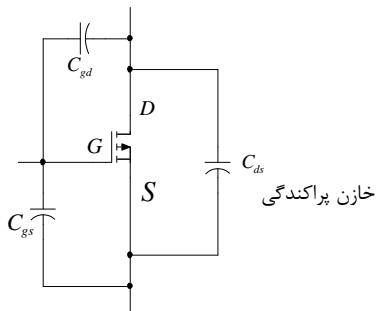
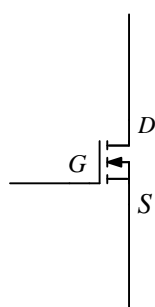
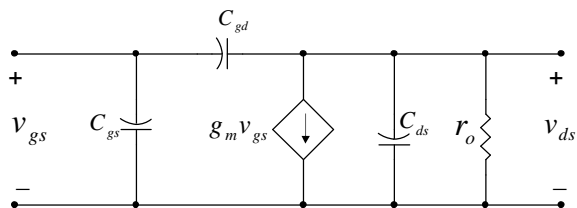
- در ناحیه فعال پیوند گیت و کانال در بایاس مخالف است و یک خازن بین G و D ، و یک خازن بین S و G خواهیم داشت.



1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

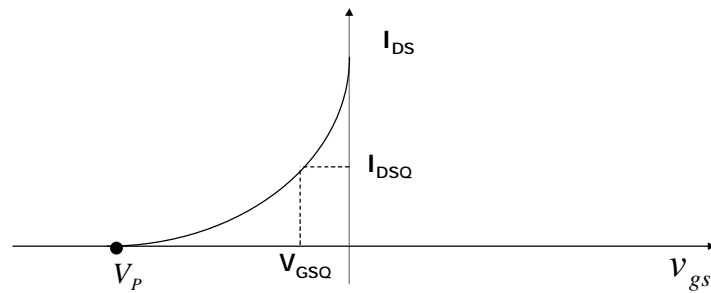
3



1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

4



- در JFET ها خازن ها را معمولا به صورت تقریبی مشخص می کنند ، اما در بعضی موارد به صورت تابعی از ولتاژ دو سر آن ها داده می شود.
- در MOSFET ها نیز خازن آن ها را معمولا به صورت تقریبی مشخص می کنند.

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

5



- خازن ورودی در حالت سورس مشترک C_{iss} : به شرطی که خروجی اتصال کوتاه باشد.

$$C_{iss} = C_{gd} + C_{gs}$$

- خازن خروجی در حالت سورس مشترک C_{oss} : در حالی که ورودی اتصال کوتاه باشد.

$$C_{oss} = C_{ds} + C_{gd}$$

$$\left. \begin{aligned} wC_{rss} &= \left| \frac{i_g}{v_{ds}} \right|_{v_{gs}=0} \text{ وقتی ورودی اتصال کوتاه باشد} \\ i_g &= -jwC_{gd}v_{ds} \Rightarrow \left| \frac{i_g}{v_{ds}} \right| = wC_{gd} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_{gd} = C_{rss}$$

$$\frac{v_{ds}}{v_{gs}} = -g_m r_d = -m \quad \text{بهره ولتاژ مدار باز در فرکانس پایین:}$$

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

6



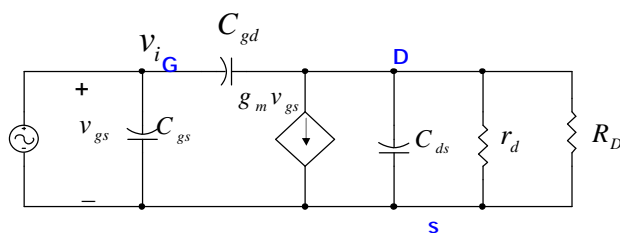
تقویت کننده سورس مشترک

بدون مقاومت منبع

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

7



$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

$$v_o \left(\frac{1}{R_D} + \frac{1}{r_d} + j\omega C_{ds} \right) + (v_o - v_s) j\omega C_{gd} + g_m v_{gs} = 0 \quad v_{gs} = v_s = v_i$$

$$A_{v_s}(j\omega) = \frac{v_o}{v_s} = \frac{j\omega C_{gd} - g_m}{G_D + g_d + j\omega(C_{ds} + C_{gd})}$$

$$A_v(0) = \frac{-g_m}{G_D + g_d} = -g_m r_D \quad r_D = R_D \parallel r_d$$

$$|A_v(j\omega)| = \frac{|A_v(0)|}{\sqrt{2}} \Rightarrow \omega_H \Rightarrow f_H$$

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

8



تمرین:

- فرکانس قطع مدار مورد بحث را با پارامتر های زیر محاسبه کنید.

$$C_{ds} = 2\text{ pF} \quad C_{gs} = C_{gd} = 10\text{ pF} \quad r_D = R_D \parallel r_d = 2\text{ k}\Omega$$

$$I_{DSS} = 10\text{ mA} \quad I_{DQ} = 5\text{ mA} \quad V_P = -4\text{ V} \quad \text{JFET}$$



- اگر منبع دارای مقاومت R_S باشد ، دو معادله گره ، در گره های v_i و v_o خواهیم نوشت.
- اگر $R_S = 0$ یک قطب خواهیم داشت.
- یک ثابت زمانی از بین می رود \Rightarrow مقاومت دو سر C_{gs} برابر صفر است $\Rightarrow R_S = 0$
- اگر $R_S \neq 0$ تابع تبدیل یک صفر و دو قطب خواهد داشت.
- نکته:
- اگر بتوان در یک حلقه شامل فقط خازن ها ، KVL نوشت ، تعداد خازن ها بیش از تعداد ثابت زمانی های مستقل خواهد بود.



تحليل تقويت کننده سورس مشترك با استفاده از قضيه ميلرو تقريب هاي قابل قبول

1/2/2006

مدل فرکانس بالاي ترانزیستور

11



با استفاده از قضيه ميلر براي C_{gd} خواهیم داشت:

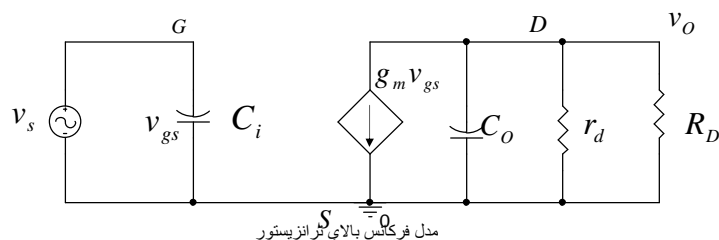
$$K \cong -g_m r_D$$

$$C_{gd_1} = C_{gd} (1 + g_m r_D)$$

$$C_{gd_2} = C_{gd} \left(1 + \frac{1}{g_m r_D}\right) \cong C_{gd} = C_{rss}$$

$$C_i = C_{gs} + C_{gd} (1 + g_m r_D)$$

$$C_o = C_{ds} + C_{gd} = C_{oss}$$



1/2/2006

مدل فرکانس بالاي ترانزیستور

12



چند نکته:

- در مدار هایی که R وجود دارد ثابت زمانی ورودی قطب غالب را تعیین می کند.
- پهنای باند FET در فرکانس های بالا توسط ثابت زمانی ورودی محدود می شود.
- در فرکانس های بالا، امپدانس ورودی تقویت کننده کاهش می یابد.

$$Y_o = g_d + j\omega C_o$$

ادمیتانس خروجی

1/2/2006

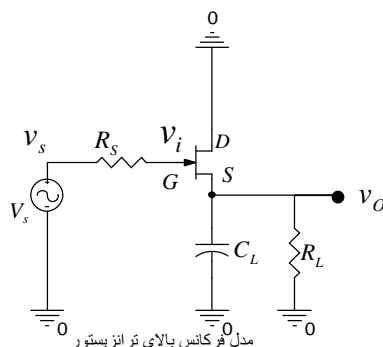
مدل فرکانس بالای ترانزیستور

13



تقویت کننده درین مشترک

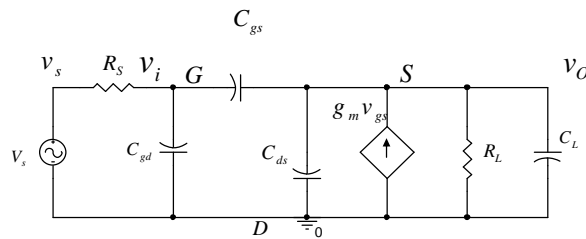
- تقویت کننده درین مشترک نیز مانند تقویت کننده کلکتور مشترک در مواردی استفاده می شود که بار دارای خاصیت خازنی باشد.



1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

14



$$v_{gs} = v_i - v_o \quad R_S \cong 0 \Rightarrow v_o = v_i$$

$$\begin{cases} v_o (G_L + j\omega C_L + j\omega C_{ds}) + (v_o - v_i) j\omega C_{gs} = g_m (v_i - v_o) \\ v_i = v_s \end{cases}$$

$$A_{v_s}(0) = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L}$$

با صرف نظر از R_S تابع تبدیل یک قطب و یک صفر دارد و مدار دارای یک ثابت زمانی است.

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

15



محاسبه f_H

$$|A_{v_s}| = \frac{A_{v_0}}{\sqrt{2}} \Rightarrow f = f_H$$

• تمرین:

– با همان پارامترهای عددی برای C.S ، پهنای باند را برای C.D را محاسبه کنید.

$$C_{gd} = 2pF \quad C_{gs} = C_{ds} = 10pF \quad r_D = R_D \parallel r_d = 2k\Omega$$

$$I_{DSS} = 10mA \quad I_{DQ} = 5mA \quad V_P = -4V \quad \text{JFET}$$

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

16



مقایسه فرکانس قطع بالایی تقویت کننده های C.D و C.S

$$f_{H_{C.D}} > f_{H_{C.S}}$$

- از آنجا که در تقویت کننده درین مشترک بهره نسبت به تقویت کننده سورس مشترک کاهش یافته است ، افزایش پهنای باند قابل پیش بینی بود.

1/2/2006

مدل فرکانس بالایی ترانزیستور

17



اگر $R_S \neq 0$ باشد:

$$\begin{cases} v_i(j\omega C_{gd}) + (v_i - v_S)G_s + j\omega C_{gs}(v_i - v_o) = 0 \\ v_o(G_L + j\omega C_L + j\omega C_{ds}) + (v_o - v_i)j\omega C_{gs} = g_m(v_i - v_o) \end{cases}$$

$$A_{v_S} = \frac{v_o}{v_S} \quad A_v(0) = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L}$$

تابع تبدیل یک قطب و دو صفر دارد.

در این مدار تعداد ثابت زمانی ها با تعداد ثابت زمانی های مستقل یکی نیست

1/2/2006

مدل فرکانس بالایی ترانزیستور

18



تحلیل تقویت کننده درین مشترک با استفاده از قضیه میلرو تقریب های قابل قبول

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

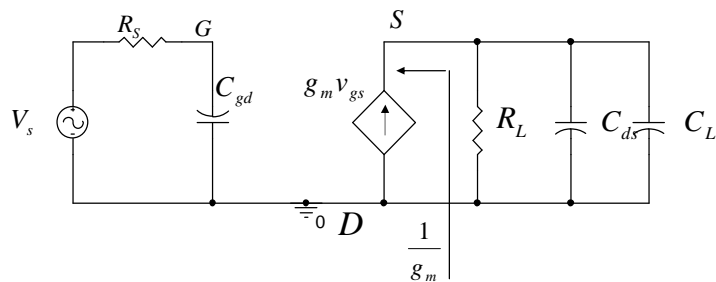
19



$$K = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L} \cong 1 \Rightarrow \text{تأثیر خازن } C_{gs} \text{ صفر می شود.}$$

$$\begin{cases} C_{gs1} = C_{gs} (1 - K) \\ C_{gs2} = C_{gs} (1 - \frac{1}{K}) \end{cases} \xrightarrow{K=1} \begin{cases} C_{gs1} = 0 \\ C_{gs2} = 0 \end{cases}$$

$$C_{is} = C_{gs} + C_{gd} (1 + g_m R_L) \quad \text{خازن در ورودی Common Source}$$



1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

20



$$t_o = \frac{R_L (C_L + C_{ds})}{1 + g_m R_L}$$

- با توجه به کوچک بودن مقدار $\frac{1}{g_m}$ ، ثابت زمانی خروجی کوچک خواهد بود، همچنین مقدار ثابت زمانی ورودی نیز کوچک است.
 $C_i = C_{gd}$

- امپدانس ورودی C.D در مقایسه با C.S بزرگتر است.

$$Z_o = \frac{1}{g_m} \parallel r_d \parallel \frac{1}{j\omega C_{ds}}$$

- امپدانس خروجی هم در فرکانس پایین و هم در فرکانس بالا کم است. معمولاً بهره جریان بزرگ است.

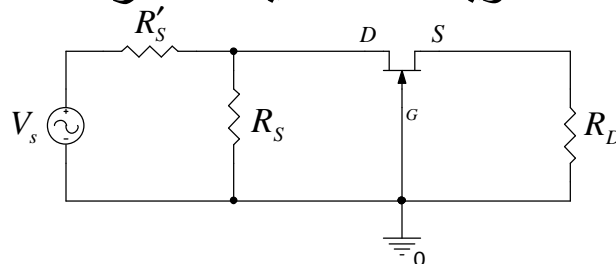
1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

21



تقویت کننده گیت مشترک



- اگر FET مورد استفاده در مدار فوق متقارن باشد بایسینگ مشخص می کند که Drain و Source کدام هستند.

- مقاومت ورودی تقویت کننده های گیت مشترک بسیار کم است و عملیات کاربرد ندارد

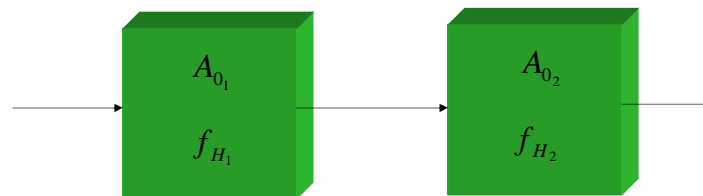
1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

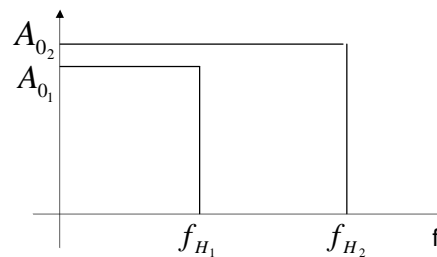
22



تقویت کننده های چند طبقه



اگر بار تقویت کننده A_1 برابر R_{in_2} باشد، تقویت کننده ها اثر متقابل بر روی هم ندارند.



1/2/2006

مدل فرکانس بالایی ترانزیستور

23




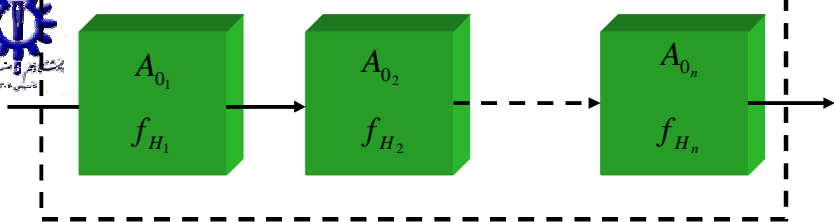
دو نکته:

- اگر از اثر بار گذاری تقویت کننده های Cascade بر روی یکدیگر صرف نظر کنیم پهنای باند تقویت کننده Cascade برابر خواهد بود.
- اما در عمل پهنای باند حتی f_H نیز کمتر خواهد بود.
- می توان پهنای باند تقویت کننده های Cascade را با مقاومت های موازی شبیه دانست.

1/2/2006

مدل فرکانس بالایی ترانزیستور

24

تقویت کننده ها یک قطبی هستند.

$$A_1 = \frac{A_{01}}{1 + j \frac{f}{f_{H1}}}$$

$$A = \frac{A_{01} A_{02} \dots A_{0n}}{(1 + j \frac{f}{f_{H1}})(1 + j \frac{f}{f_{H2}}) \dots (1 + j \frac{f}{f_{Hn}})} \quad \left| (1 + j \frac{f}{f_{H1}})^2 (1 + j \frac{f}{f_{H2}})^2 \dots (1 + j \frac{f}{f_{Hn}})^2 \right|_{f=f_H} = 2$$


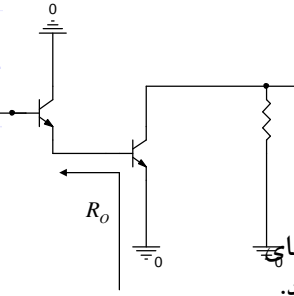
$$f_{H1} = f_{H2} = \dots = f_{Hn} = f_h \Rightarrow f_H = f_h (\sqrt{2^n} - 1)$$

$$\frac{1}{f_H} \cong K \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \dots + \frac{1}{f_{Hn}^2}} \quad K \cong 1.1$$

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

1/2/2006

25

• پهنای باند حاصل از این دو طبقه از پهنای باند R_D تقویت کننده امیتر مشترک بیشتر است.

تمرین:

با همان پارامترهای داده شده نسبت $\frac{V_o}{V_i}$ و پهنای باند را بدست آورید. از r_m و r_{CE} صرفاً نظر کنید.

چند نکته:

- ثابت زمانی های تقویت کننده کلکتور مشترک کوچکتر از ثابت زمانی تقویت کننده امیتر مشترک است.
- از آنجا که $t_{inCE} > t_{outCE}$ ثابت زمانی ورودی امیتر مشترک ثابت زمانی غالب است و پهنای باند را تعیین می کند.

چون r_e خیلی کوچک است ، ثابت زمانی ورودی که ثابت زمانی غالب است را کاهش می دهد. و در نتیجه پهنای باند را افزایش می دهد.

$$R_{O_{c.c}} = r_e = \frac{1}{g_m}$$

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

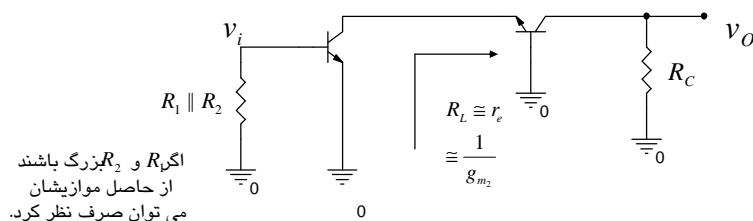
1/2/2006

26



Cascode تقویت کننده

- تقویت کننده Cascode (حالت خاصی از Cascade) است که در آن طبقه اول امیتر مشترک و طبقه دوم آن بیس مشترک است.



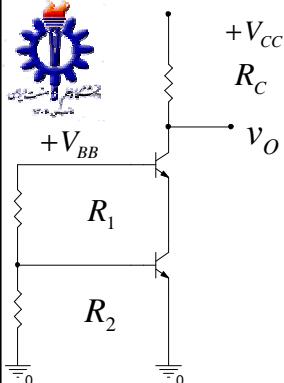
اگر R_1 و R_2 بزرگ باشند از حاصل موازی‌شان می‌توان صرف نظر کرد.

- تمرین
- f_H را از هر دو روش محاسبه کنید.

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

27



- پهنای باند تقویت کننده بیس مشترک از پهنای باند تقویت کننده امیتر مشترک بیشتر است.

$$C_e = C_m \left(1 + g_m R_L \right) = C_m \left(1 + \frac{g_{m_1}}{g_{m_2}} \right) = 2C_m$$


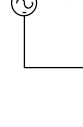
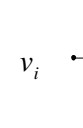

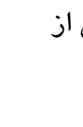
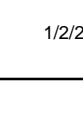






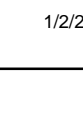


- خازن میلر شده به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است، و در نتیجه ثابت زمانی ورودی کاهش می‌یابد و بر اثر آن پهنای باند افزایش می‌یابد.

- تقویت کننده Cascode کار یک تقویت کننده امیتر مشترک را انجام می‌دهد. با این مزیت که دارای پهنای باند بیشتری است.

1/2/2006

مدل فرکانس بالای ترانزیستور

28



پایان

1/2/2006

مدل فرکانس بالایی ترانزیستور

31