



کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

درس ۲۲ = پاسخ فرکانسی آمپلی فایرها (I)

آمپلی فایر سورس مشترک

۱ دسامبر ۲۰۰۵

محتویات

۱- مقدمه




۲- پاسخ فرکانسی ذاتی MOSFET

۳- پاسخ فرکانسی آمپلی فایر سورس - مشترک

۴- اثر میلر



تکلیف خواندنی

Sodini و Howe، فصل ۱۰، بخش‌های ۱۰/۴ - ۱۰/۱

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project 
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

سؤالات کلیدی

- چگونه می توان پاسخ فرکانسی ذاتی یک ترانزیستور را برآورد کرد؟
- چه چیزی پاسخ فرکانسی یک آمپلی فایر را محدود می کند؟
- اثر میلر چیست؟

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

۱- مقدمه

قلمرو فرکانسی یک مسئله مورد اهمیت اساسی در بیشتر مدارهای آنالوگ است. نرخ اطلاعات، عرض باند، فرکانس‌های حامل همگی در حال افزایش هستند.

انگیزه:

- سرعت پروسس کننده ↑
- حجم ترافیک ↑ ⇐ نرخ اطلاعات ↑
- در فرکانس‌های بالای طیف، عرض باند بیشتری در دسترس است

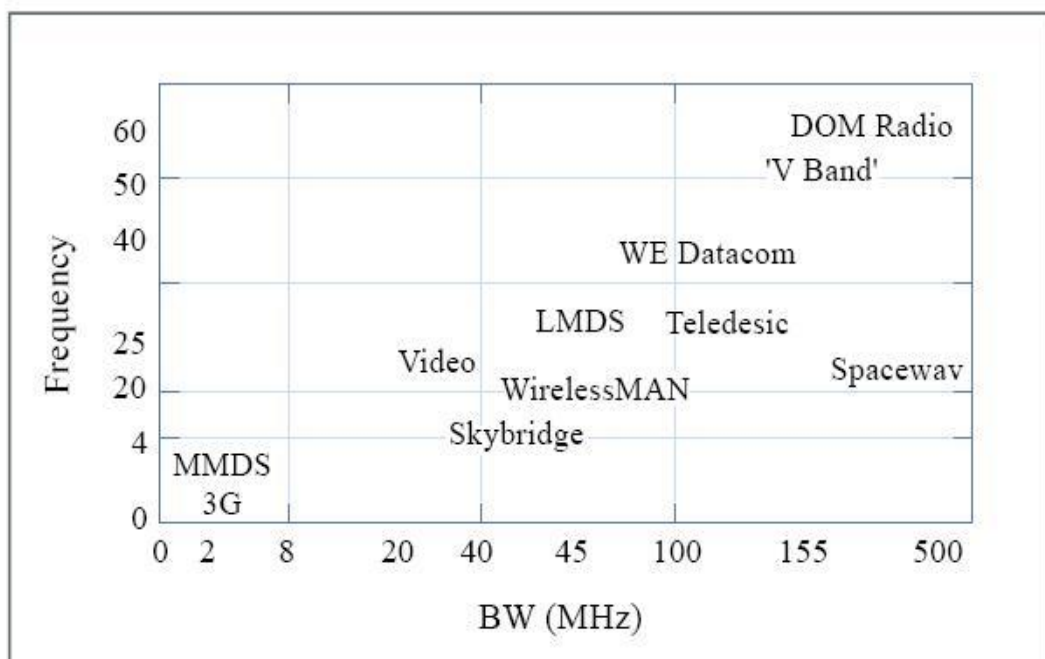




Figure by MIT OCW.

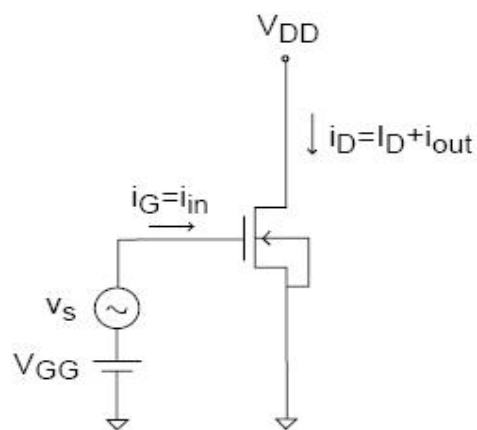
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

۲- پاسخ فرکانسی ذاتی MOSFET

□ چگونه می توان پاسخ فرکانسی ذاتی یک ترانزیستور را برآورد کرد؟

$$f_t \equiv \text{فرکانس قطع بهره جریان اتصال کوتاه [GHz]}$$

MOSFET را در رژیم اشباع بایاس شده در نظر بگیرید با منبع سیگنال کوچک اعمال شده به گیت:





v_s در ورودی $\Leftarrow I_{out}$: اثر ترانزیستور

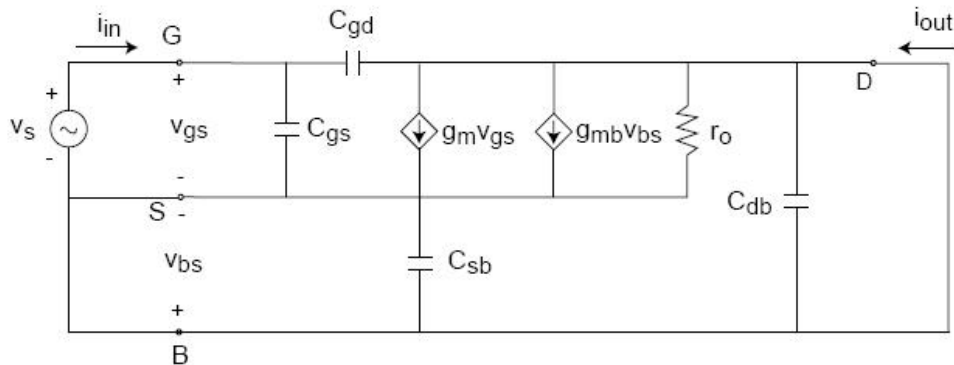
$\Leftarrow i_{in}$ وابسته به ظرفیت خازنی گیت

وابستگی فرکانسی: $f \Leftarrow i_{in} \Leftarrow \left| \frac{i_{out}}{i_{in}} \right|$

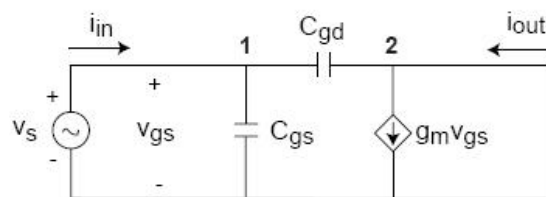
$f_t \equiv$ فرکانسی که در آن $\left| \frac{i_{out}}{i_{in}} \right|$ برابر ۱ است

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

مدل کامل سیگنال کوچک در اشباع:



↓ $v_{bs}=0$





گره ۱: $i_{in} - v_{gs}j\omega C_{gs} - v_{gs}j\omega C_{gd} = 0$

$$\Rightarrow i_{in} - v_{gs}j\omega(C_{gs} + C_{gd}) = 0$$

گره ۲: $i_{out} - g_m v_{gs} + v_{gs}j\omega C_{gd} = 0$

$$\Rightarrow i_{out} = v_{gs}(g_m - j\omega C_{gd})$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

بهره جریان:

$$h_{21} = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{g_m - j\omega C_{gd}}{j\omega(C_{gs} + C_{gd})}$$

□ اندازه h_{21} :



$$|h_{21}| = \frac{\sqrt{g_m^2 + \omega^2 C_{gd}^2}}{\omega(C_{gs} + C_{gd})}$$

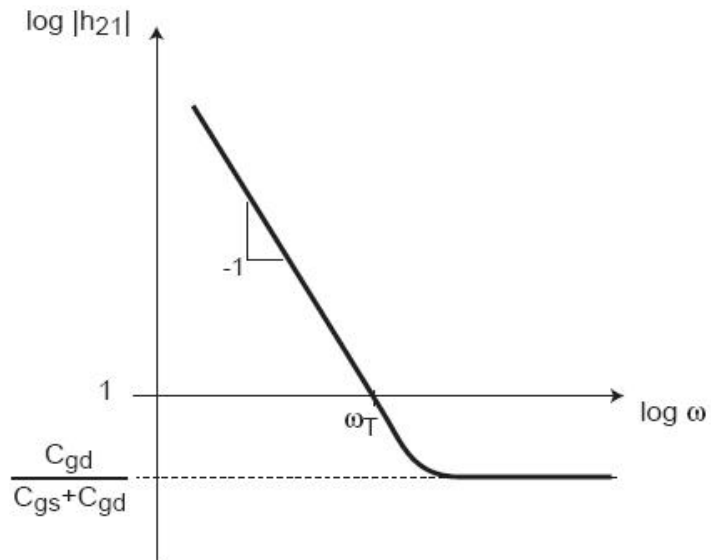
● برای فرکانس پایین، $\omega \ll \frac{g_m}{C_{gd}}$

$$|h_{21}| \approx \frac{g_m}{\omega(C_{gs} + C_{gd})}$$

● برای فرکانس بالا، $\omega \gg \frac{g_m}{C_{gd}}$

$$|h_{21}| \approx \frac{C_{gd}}{C_{gs} + C_{gd}} < 1$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT





$|h_{21}|$ واحد می شود در:

$$\omega_T = 2\pi f_T = \frac{g_m}{C_{gs} + C_{gd}}$$

سپس:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

□ تفسیر فیزیکی f_T :

در نظر بگیرید:

$$\frac{1}{2\pi f_T} = \frac{C_{gs} + C_{gd}}{g_m} \approx \frac{C_{gs}}{g_m}$$

مفهوم فیزیکی قطعه را برای C_{gs} و g_m جایگزین کنید:

$$\frac{1}{2\pi f_T} \approx \frac{C_{gs}}{g_m} = \frac{\frac{2}{3}LWC_{ox}}{\frac{W}{L}\mu C_{ox}(V_{GS} - V_T)} = \frac{L}{\mu \frac{3}{2} \frac{V_{GS} - V_T}{L}}$$

یا

$$\frac{1}{2\pi f_T} \approx \frac{L}{\mu \langle E_{chan} \rangle} = \frac{L}{\langle v_{chan} \rangle} = \tau_t$$



$\tau_t \equiv$ زمان گذر از سورس به درین [s]

سپس:

$$f_T \approx \frac{1}{2\pi\tau_t}$$

f_T ایده ای برای تأخیر ذاتی ترانزیستور می دهد:

معیار شایستگی اولیه خوبی برای پاسخ فرکانسی

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

برای کاهش τ_t و افزایش f_T :

● $L \downarrow$: در عوض قیمت بالا می‌رود

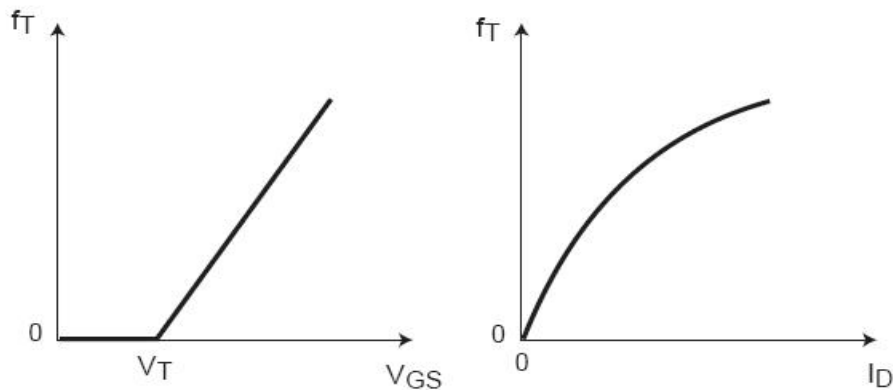
● $I_D \uparrow \Leftarrow (V_{GS} - V_T) \uparrow$: در عوض توان پایین می‌آید

● $\mu \uparrow$: انجام آن مشکل است

● توجه: f_T مستقل از W



اثر نقطه بایاس روی f_T :

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} = \frac{\frac{W}{L} \mu C_{ox} (V_{GS} - V_T)}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} = \frac{\sqrt{2} \frac{W}{L} \mu C_{ox} I_D}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

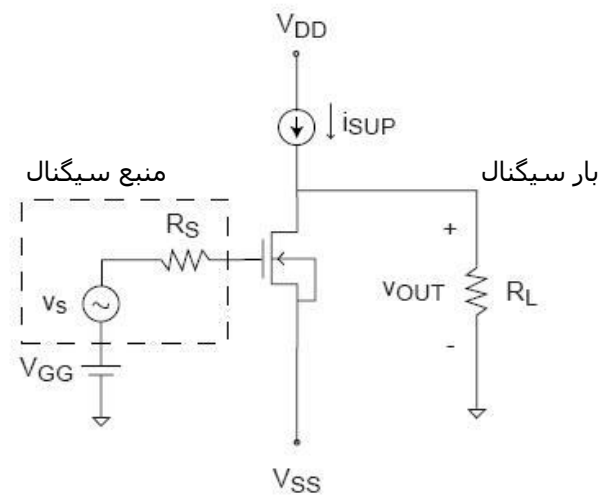


در MOSFET معمولی در نقاط بایاس متداول:

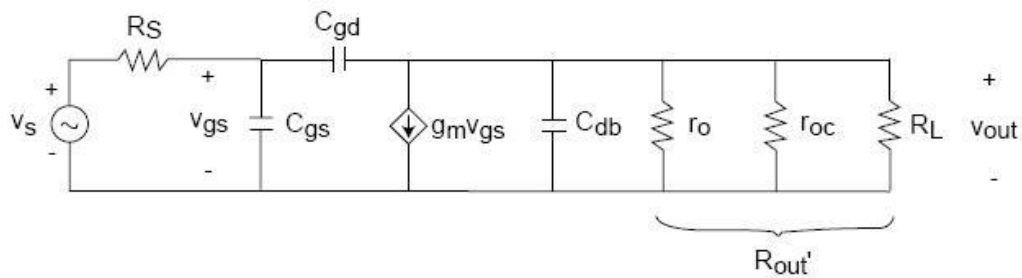
$$f_T \sim 5 - 50 \text{GHz}$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

۳- پاسخ فرکانسی آمپلی فایر سورس مشترک





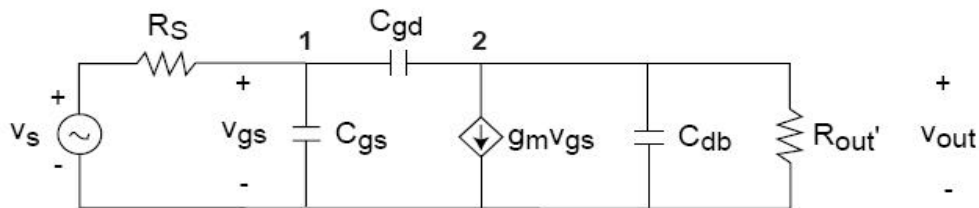
مدل مدار معادل سیگنال کوچک (فرض بر این است که منبع جریان هیچ گونه ظرفیت خازنی انگلی ندارد):



بهره ولتاژ فرکانس پایین:

$$A_{V,LF} = \frac{v_{out}}{v_s} = -g_m (r_o // r_{oc} R_L) = -g_m R'_{out}$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT



گره ۱:
$$\frac{v_s - v_{gs}}{R_s} - v_{gs} j\omega C_{gs} - (v_{gs} - v_{out}) j\omega C_{gd} = 0$$

گره ۲:
$$(v_{gs} - v_{out}) j\omega C_{gd} - g_m v_{gs} - v_{out} j\omega C_{db} - \frac{v_{out}}{R'_{out}} = 0$$

برای v_{gs} در ۲ حل کنید:

$$v_{gs} = v_{out} \frac{j\omega(C_{gd} + C_{db}) + \frac{1}{R'_{out}}}{j\omega C_{gd} - g_m}$$



۱ را جایگزین کنید و برای v_{out}/v_s حل کنید:

$$A_v = \frac{-(g_m - j\omega C_{gd}) R'_{out}}{DEN}$$

با

$$DEN = 1 + j\omega \{ R_s C_{gs} + R_s C_{gd} [1 + R'_{out} (\frac{1}{R_s} + g_m)] + R'_{out} C_{db} \} - \omega^2 R_s R'_{out} C_{gs} (C_{gd} + C_{db})$$

[چک کنید برای $\omega = 0$, $A_{v,LF} = -g_m R'_{out}$]

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

به طور ساده:

$$1- \text{ در } \omega \ll \omega_T = \frac{g_m}{C_{gs} + C_{gd}} \text{ عمل می کند } \Leftarrow$$

$$g_m \gg \omega(C_{gs} + C_{gd}) > \omega C_{gs}, \omega C_{gd}$$

۲- فرض کنید gm به اندازه کافی بالاست که

$$\frac{1}{R_S} + g_m \approx g_m$$



۳- ω^2 را در مخرج A_v حذف کنید \Leftarrow بدترین حالت تخمین عرض باند

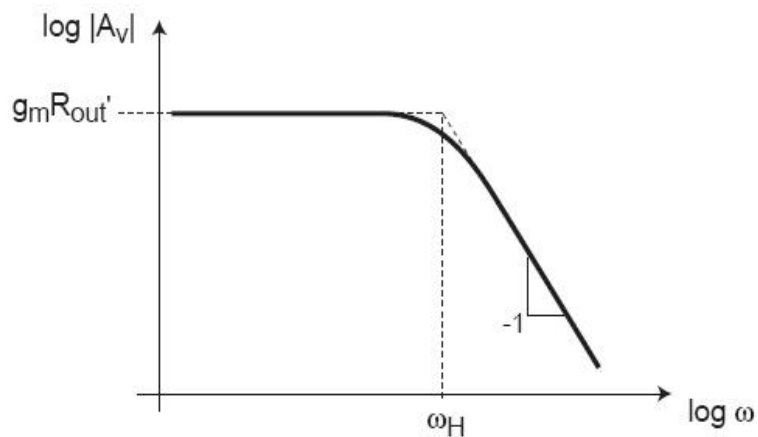
سپس:

$$A_v \approx \frac{-g_m R'_{out}}{1 + j\omega[R_S C_{gs} + R_S C_{gd}(1 + g_m R'_{out}) + R'_{out} C_{db}]}$$

این فرم زیر را دارد:

$$A_v(\omega) = \frac{A_{v,LF}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_H}}$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT





در $\omega = \omega_H$:

$$|A_v(\omega_H)| = \frac{1}{\sqrt{2}} |A_{v,LF}|$$

ω_H از فرکانسی که فراتر از آن $|A_v|$ شروع به افت سریع می‌کند ایده‌ای می‌دهد \Leftarrow عرض باند برای آمپلی فایر سورس مشترک:

$$\omega_H = \frac{1}{R_S C_{gs} + R_S C_{gd} (1 + g_m R'_{out}) + R'_{out} C_{db}}$$

پاسخ فرکانسی آمپلی فایر سورس مشترک توسط C_{gs} و C_{gd} که ورودی را اتصال کوتاه می‌کند و C_{db} که خروجی را اتصال کوتاه می‌کند، محدود می‌شود.

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

می توان باز نویسی کرد به صورت:

$$f_H = \frac{1}{2\pi\{R_S[C_{gs} + C_{gd}(1 + |A_{v,LF}|)] + R'_{out}C_{db}\}}$$

مقایسه کنید با:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

□ به طور کلی: $f_H \ll f_T$ به دلیل

● به طور نمونه: $g_m \gg \frac{1}{R_S}$

● C_{db} وارد f_H می شود نه f_T

● حضور $|A_{v,LF}|$ در مخرج


□ برای بهبود عرض باند،

● C_{gs} و C_{gd} و $C_{db} \downarrow \Leftarrow$ ترانزیستور کوچک با انگل های کم

● $|A_{v,LF}| \downarrow \Leftarrow$ بهره ای بیش از آنچه واقعاً مورد نیاز است نمی خواهد

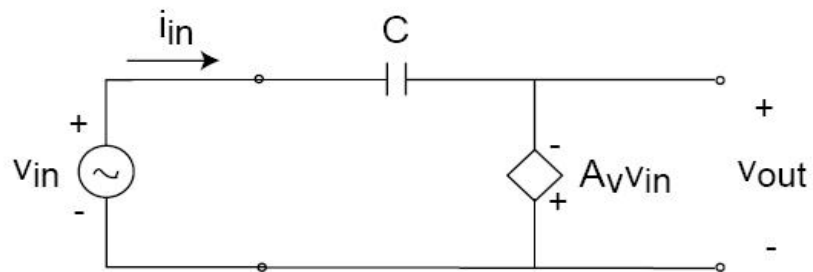
اما...

به چه دلیل اثر C_{gd} روی f_H به نظر می رسد توسط $|A_{v,LF}| + 1$ تقویت می شود؟؟!!

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	بهشتی عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

۴- اثر میلر

در آمپلی فایر سورس مشترک، C_{gd} بسیار بزرگتر از آنچه واقعاً هست به نظر می‌رسد. وضعیت ساده بهره ولتاژ را در نظر بگیرید:



مقاومت ظاهری ورودی چیست؟




$$i_{in} = (v_{in} - v_{out})j\omega C$$

اما

$$v_{out} = -A_v v_{in}$$

سپس:

$$i_{in} = v_{in} (1 + A_v) C$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project 
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

یا

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{1}{j\omega(1 + A_v)C}$$

از ورودی، C، بسیار بزرگتر از آنچه واقعاً هست به نظر می‌رسد. این اثر میلر خوانده می‌شود. وقتی که یک خازن در گره‌ها، محلی که بهره ولتاژ وجود دارد، نصب می‌شود، اثر آن روی عرض باند توسط بهره ولتاژ تقویت می‌شود \Leftarrow ظرفیت خازنی میلر:



$$C_{Miller} = C(1 + A_v)$$

چرا؟

$$v_{in} \uparrow \Rightarrow v_{out} = -A_v v_{in} \downarrow \Rightarrow (v_{in} - v_{out}) \uparrow \uparrow \Rightarrow i_{in} \uparrow \uparrow$$

در طبقات آمپلی فایر با بهره ولتاژ، داشتن ظرفیت خازنی کوچک در دو سر گره‌های بهره ولتاژ بحرانی است.

به عنوان نتیجه اثر میلر، یک مبادله اصولی بهره - عرض باند در آمپلی فایرها وجود دارد.

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

نتایج کلیدی

● f_T (فرکانس قطع بهره جریان اتصال کوتاه): معیار شایستگی برای برآورد کردن پاسخ فرکانسی ذاتی ترانزیستورها.

● در MOSFET، در نظر اول،

$$f_t = \frac{1}{2\pi\tau_t}$$

در حالی که τ_t زمان عبور الکترون‌ها از طریق کانال است

● در آمپلی فایر سورس مشترک، بهره ولتاژ در فرکانس بالا افت می‌کند زیرا C_{gs} و C_{gd} ورودی را اتصال کوتاه می‌کنند و C_{db} خروجی را

● در آمپلی فایر سورس مشترک، اثر C_{gd} روی عرض باند توسط بهره ولتاژ آمپلی فایر چند برابر می‌شود

● اثر میلر، اثر ظرفیت خازنی در امتداد گره‌های بهره ولتاژ توسط بهره ولتاژ چندین برابر می‌شود \Leftarrow مبادله بین بهره و عرض باند.