

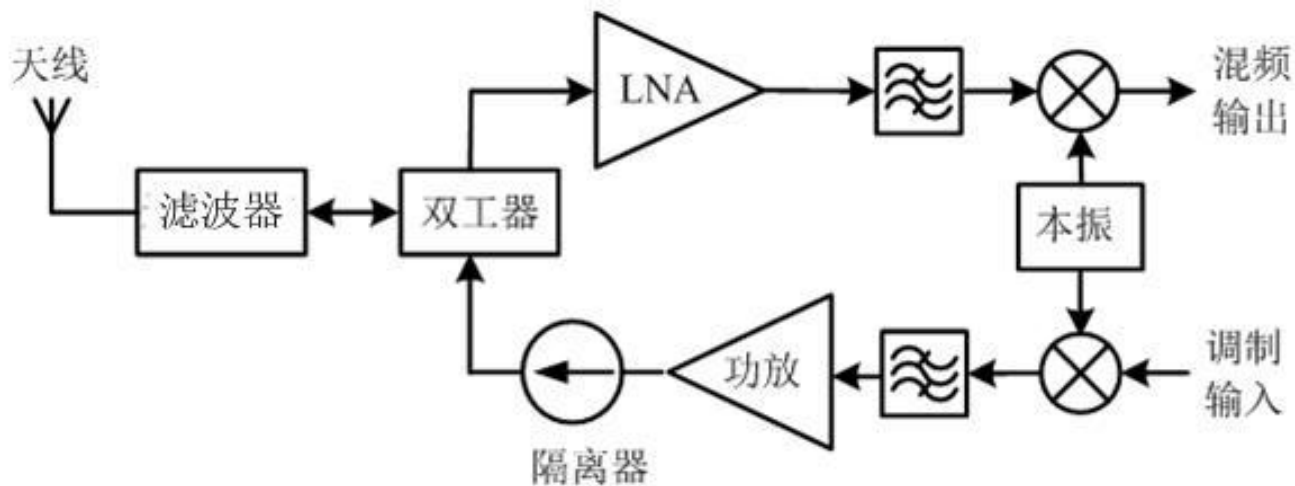
第6章 低噪声放大器

本章内容

- 引言 P.43
- LNA主要指标
- 晶体管高频小信号模型
- 高频小信号单回路选频放大器
- 集成宽带放大器
- LNA的噪声匹配
- LNA设计举例
- 本章要点

引言

- 低噪声放大器在接收通道中的作用与位置



LNA的主要特点

- 1、要求LNA有较低的噪声系数。
- 2、要求LNA有一定的功率增益。
- 3、要求LNA具有足够的线性范围。
- 4、LNA的匹配问题。

本章内容

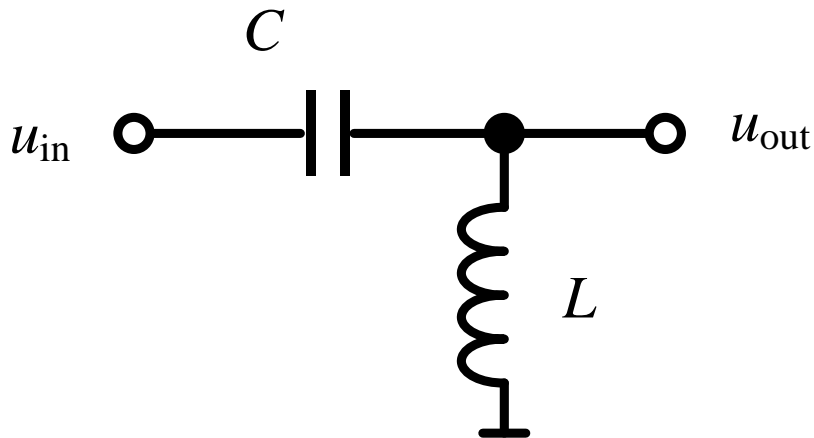
- 引言
- LNA主要指标 P.45
- 晶体管高频小信号模型
- 高频小信号单管选频放大器
- 集成宽带放大器
- LNA的噪声匹配
- LNA设计举例
- 本章要点

LNA主要指标

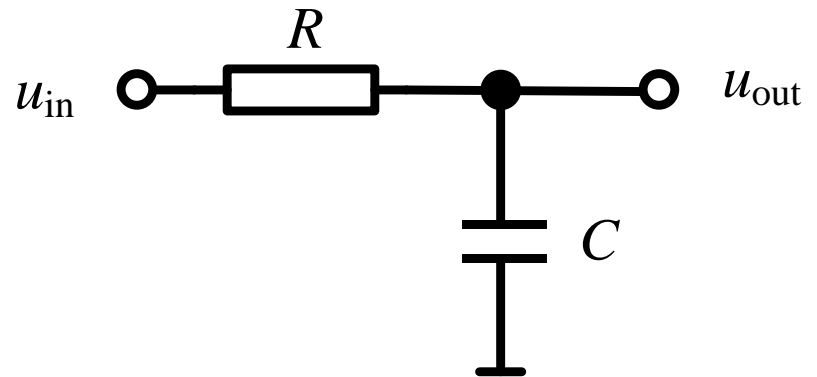
工艺	0.5 μm GaAs FET	0.8 μm Si Bipolar	SiGe
电源电压 (V)	3.0	1.9	2.7-5.5
电源电流 (mA)	4.0	2.0	3.5
工作频率 (GHz)	1.9	1.9	1.4-2.5
噪声系数NF (dB)	2.8	2.8	1.3
增益 (dB)	18.1	9.5	14.4
IIP3 (dBm)	-11.1	-3	-4
反向隔离 (dB)	-21	-21	-30

LNA主要指标

- 功耗：在保证放大器指标的前提下，适当减小偏置电流。
- 噪声系数：对于无源互易网络，其损耗等于噪声系数。



(a) LC滤波器



(b) RC滤波器

LNA主要指标

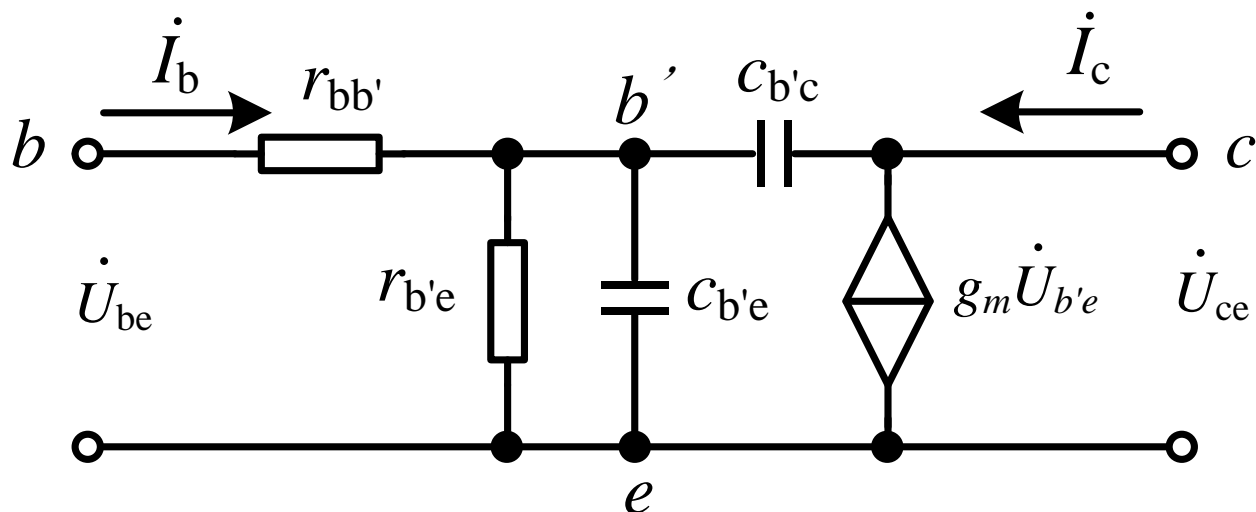
- LNA的增益要适当。既不能过大导致非线性失真也不能过小而影响系统的整体噪声。
- LNA处于接收机的最前端，噪声性能是主要的，因此LNA的匹配设计主要以噪声匹配为主，同时尽量接近阻抗功率匹配的要求。
- LNA的输入信号动态范围也可以用线性动态范围**IERD**来表示，定义为1dB压缩点的输入信号电平与灵敏度之比。

本章内容

- 引言
- LNA主要指标 P.45
- 晶体管高频小信号模型 P.43
- 高频小信号单管选频放大器
- 集成宽带放大器
- LNA的噪声匹配
- LNA设计举例
- 本章要点

双极型晶体管小信号等效模型

- 双极型晶体管共射小信号等效模型



主要参数:

- 发射结的结电阻 $r_{b'e}$ 、发射结电容 $C_{b'e}$ 、集电结电容 $C_{b'c}$
- 基极电阻 $r_{bb'}$ 、 $g_m \dot{U}_{b'e}$ 、特征频率 f_T

双极型晶体管小信号等效模型

- $r_{b'e}$ 为发射结的结电阻

$$r_{b'e} = (1 + \beta)r_e = (1 + \beta)\frac{U_T}{I_{EQ}}$$

- $C_{b'e}$ 为发射结电容，包含势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 两部份， $C_{b'e} = C_T + C_D$
- $C_{b'c}$ 为集电结电容，它也包含势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 两部份

双极型晶体管小信号等效模型

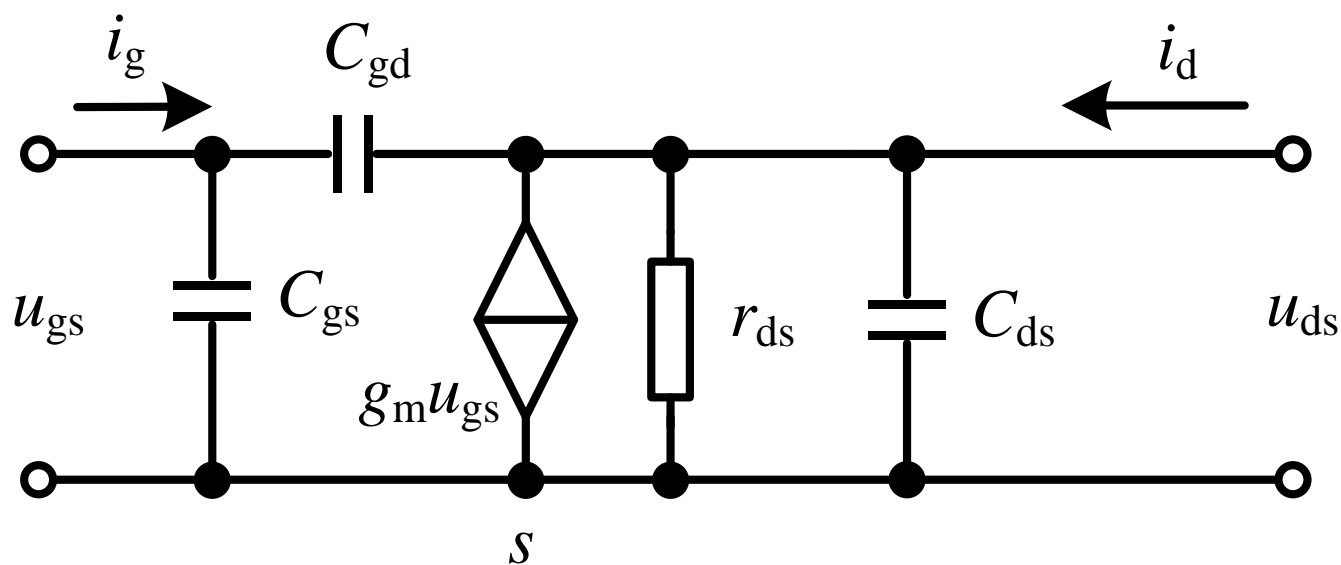
- $r_{bb'}$ 由基极引线电阻和基区体电阻组成，其值约为几十到几百欧。
- $g_m U_{b'e}$ 表示双极型晶体管放大作用的等效电流源。

$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial U_{BE}} \right|_Q = \frac{\beta}{r_{be}} \approx \frac{I_E}{26mV}$$

- 特征频率 f_T ，定义为共射输出短路电流放大倍数 β 下降为1时的频率

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{b'e} + C_{b'c})} \approx \frac{g_m}{2\pi C_{b'e}}$$

场效应晶体管小信号等效模型



主要参数:

- 输出电阻 r_{ds} 、栅源极间电容 C_{gs} 、栅漏极间电容 C_{gd} 、漏源极间电容 C_{ds}
- 跨导 g_m 、最高工作频率 f_m

场效应晶体管小信号等效模型

$$g_m \approx \frac{\mu C_{ox} W}{l} (U_{GSQ} - U_{GS(th)}) \approx 2\sqrt{\frac{\mu C_{ox} W}{2l} I_{DQ}}$$

μ 为迁移率，通常为常数。 C_{ox} 为单位面积的栅极电容量， l 为沟道长度， W 为沟道宽度。

$$r_{ds} = \frac{1}{g_{ds}} \approx \frac{1}{\lambda I_{DQ}}$$

$\lambda = -1/U_A$ 称为沟道长度调制系数， U_A 为厄尔利电压

场效应晶体管小信号等效模型

- 栅源极间电容 C_{gs} 和栅漏极间电容 C_{gd} 主要由MOS平板电容组成，工程中可近似估算为

$$C_{gs} = \frac{2}{3} C_{ox} Wl, \quad C_{gd} = \frac{1}{3} C_{ox} Wl$$

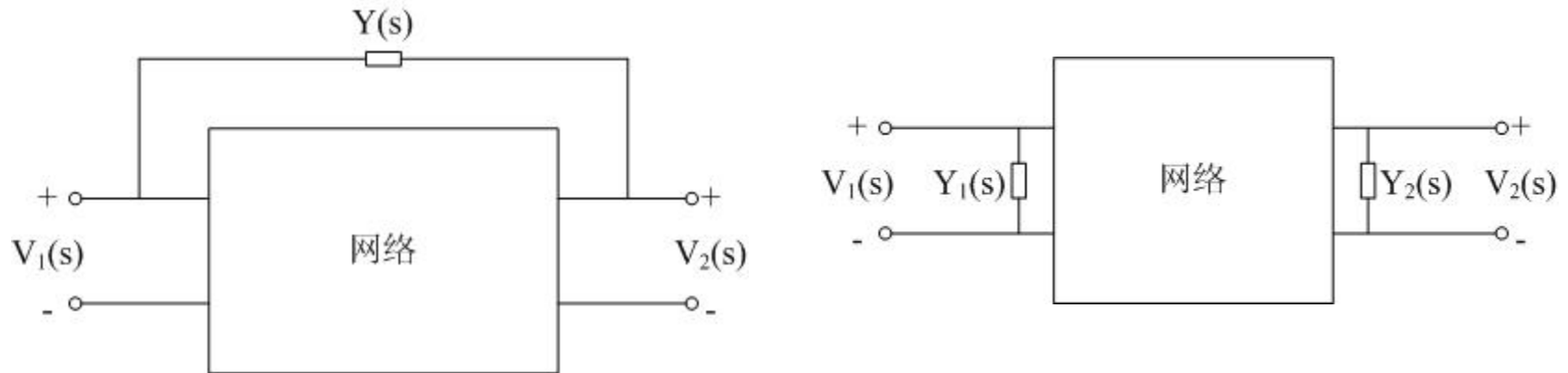
- 漏源极间电容 C_{ds} ，主要由漏、源区分别与衬底之间PN结的势垒电容组成，通常为0.1~1pF左右。

- 最高工作频率 $f_m = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \approx \frac{g_m}{2\pi C_{gs}}$

本章内容

- 引言
- **LNA**主要指标
- 晶体管高频小信号模型
- 高频小信号单管选频放大器 P.48
- 集成宽带放大器
- **LNA**的噪声匹配
- **LNA**设计举例
- 本章要点

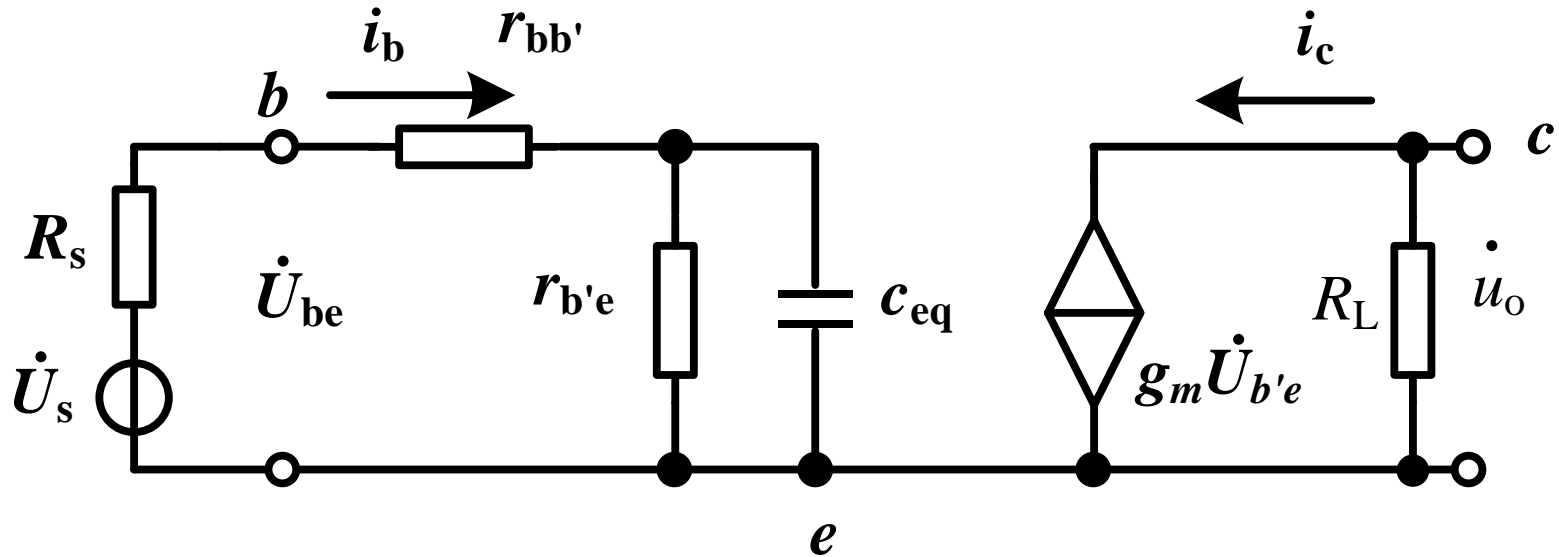
密勒定理



- $Y_1(s) = 1/Z_1(s) = Y(s)[1 - A(s)]$
 - $Y_2(s) = 1/Z_2(s) = Y(s)[1 - 1/A(s)]$
- $A(s)$ 为网络的传递函数

高频小信号单管选频放大器

- 双极型三极管共射极高频小信号电路分析



分析步骤:

- 计算输入端总等效电容 C_{eq} ;
- 把该系统单向化近似, 简化为含一个电容的一阶系统;
- 计算主极点 (输入极点) 的值 ω_p
- 计算系统上限角频率 ω_H 、共发射极放大器增益带宽积 **GBP**

双极型三极管共射极高频小信号电路

• 输入端总等效电容为 $C_{eq} = [1 + g_m R_L' \frac{C_{b'c}}{C_{b'e}}] C_{b'e} = D C_{b'e}$

• 主极点值为 $\omega_p = \frac{1}{R_{eq} C_{eq}}$

• 中频区源电压增益

$$A_{vsI} = -\frac{\beta R_L'}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}$$

• C_{eq} 两端并联等效电阻

$$R_{eq} = (R_s + r_{bb'}) // r_{b'e} = \frac{r_{b'e} (R_s + r_{bb'})}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}$$

• 上限角频率 $\omega_H = \omega_p = \frac{1}{R_{eq} C_{eq}} = \frac{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}{(R_s + r_{bb'}) r_{b'e} D C_{b'e}} = \frac{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}}{\beta (R_s + r_{bb'})} \cdot \frac{\omega_T}{D}$

• 共射小信号放大电路的电压增益

$$A_{us}(s) = \frac{\dot{U}_{out}(s)}{\dot{U}_s(s)} = \frac{A_{vsI}}{1 + s/\omega_p} = \frac{A_{vsI}}{1 + s R_{eq} C_{eq}}$$

双极型三极管共射极高频小信号电路

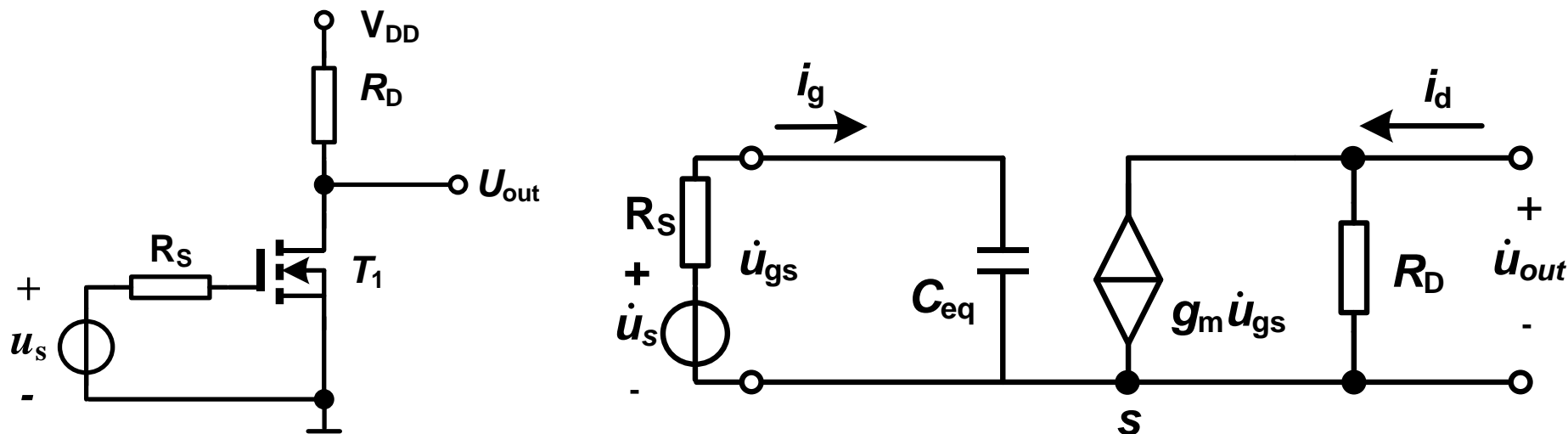
- 由于 C_{eq} 大于 $C_{b'c}$ ，因此可以省略密勒输出电容 $C_{b'c}$ ，系统可以单极点化。对于单极点系统，上限角频率等于系统的极点频率。
- 评价高性能放大器的另一个指标就是增益带宽积，用**GBP**表示，定义为中频区电压增益与上限频率的乘积的绝对值。
- $GBP = |A_{vsl} * f_H| = [\omega_T / (2\pi D)] * R'_L / (R_s + r_{b'b})$
- 密勒倍增因子 $D = 1 + g_m R'_L * C_{b'c} / C_{b'e} = 1 + \omega_T R'_L C_{b'c}$
- 特征频率 $\omega_T = g_m / C_{b'e} = \beta / (r_{b'e} C_{b'e})$

双极型三极管共射极高频小信号电路

- 要有效增大 ω_H 和GBP，要选用 $r_{b'b}$ 和 $C_{b'c}$ 小， ω_T 高的晶体管。
- 管子选定后，要尽可能的减小 R_s ，使 R_{eq} 减小。当 $R_s=0$ ， R_{eq} 最小，可使的管子的上限频率 ω_H 接近截止频率 ω_T 。反之， $R_s \rightarrow \infty$ ， R_{eq} 最大，相应的 ω_H 显著降低。
- 减少 R'_L ，使得 D 减小， ω_H 提高，但同时也会降低 A_{vsI} 。因此 R'_L 应兼顾 ω_H 和 A_{vsI} 两方面的要求。
- 总之要提高共发射放大器的 ω_H ，应使其输入和输出节点为低阻节点，但最终受到管子特征频率 ω_T 的限制。以上结论同样适用于场效应管共源放大器。

场效应管共源极高频小信号电路分析

P.50



共源电路及密勒近似简化电路

分析步骤:

- 计算输入端等效电容 C_{eq} 、一阶系统主极点（输入极点） ω_p 、电路的电压增益为 A_{US} 、上限角频率 ω_H

场效应管共源极高频小信号电路分析

- 输入端等效电容

$$C_{eq} = C_{gs} + (1 + g_m R_D) C_{gd} \approx C_{gs} + g_m R_D C_{gd} = (1 + \frac{C_{gd}}{C_{gs}} g_m R_D) C_{gs} = DC_{gs}$$

- 主极点值为

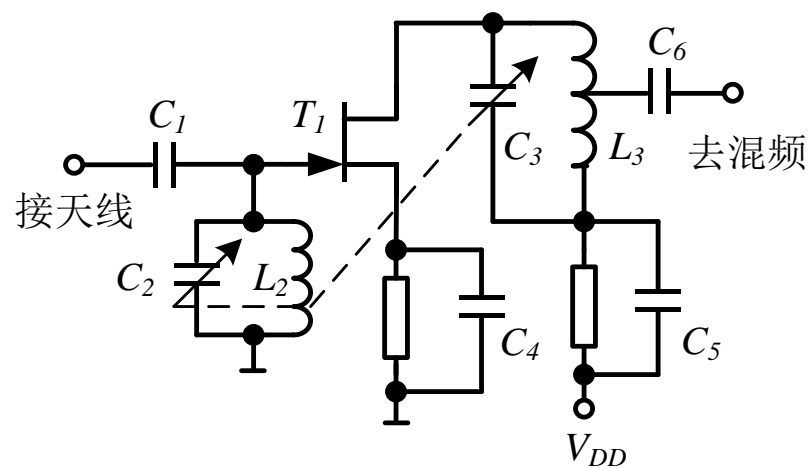
$$\omega_p = \frac{1}{R_S C_{eq}}$$

- 上限角频率 ω_H 为

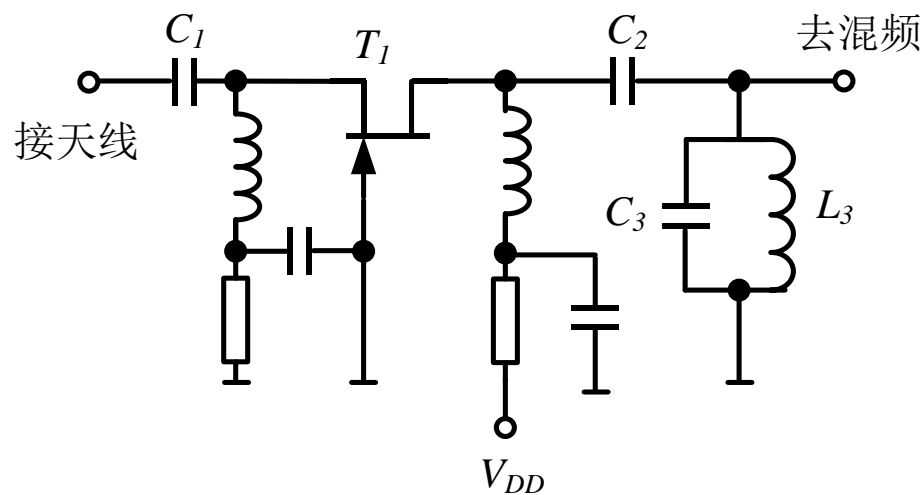
$$\omega_H = \omega_p = \frac{1}{R_S C_{eq}} = \frac{1}{R_S DC_{gs}}$$

- 电压增益

$$A_{us}(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_s(s)} = \frac{A_{vsI}}{1 + s / \omega_p} = \frac{A_{vsI}}{1 + s R_S C_{eq}} = \frac{-g_m R_D}{1 + s R_S \cdot DC_{gs}}$$



JFET构成的共源LNA放大电路

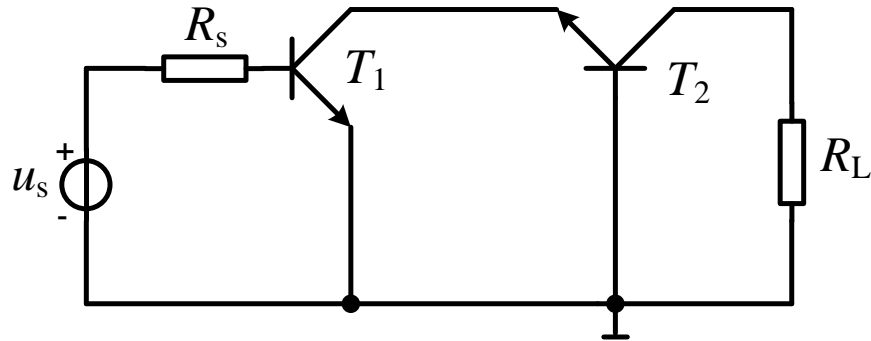


JFET共栅LNA放大电路

本章内容

- 引言
- LNA主要指标
- 晶体管高频小信号模型
- 高频小信号单回路选频放大器
- 集成宽带LNA放大器 P.51
- LNA的噪声匹配
- LNA设计举例
- 本章要点

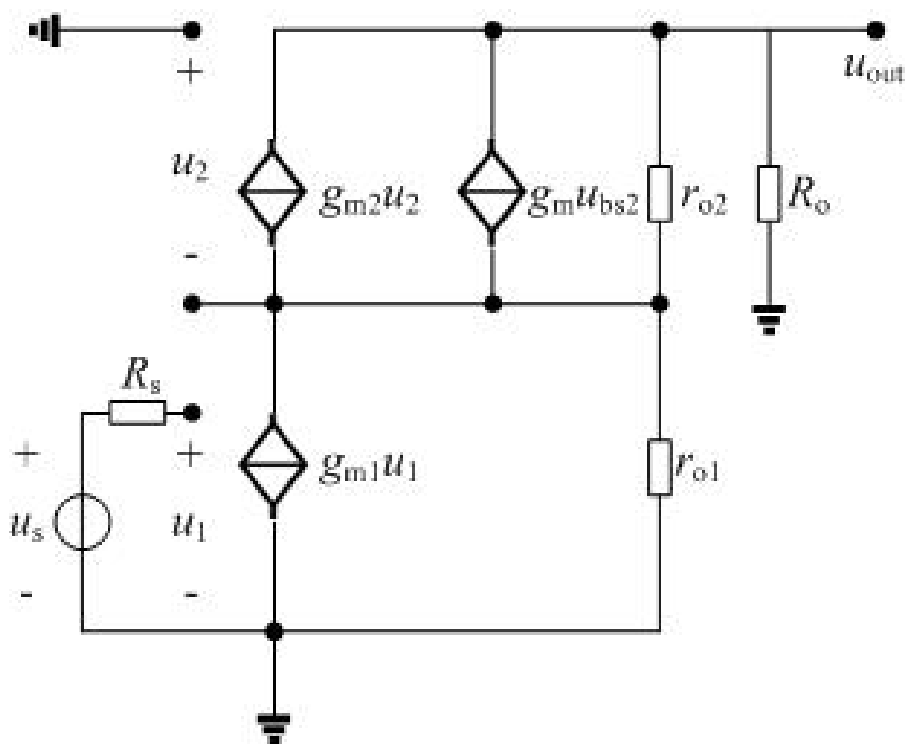
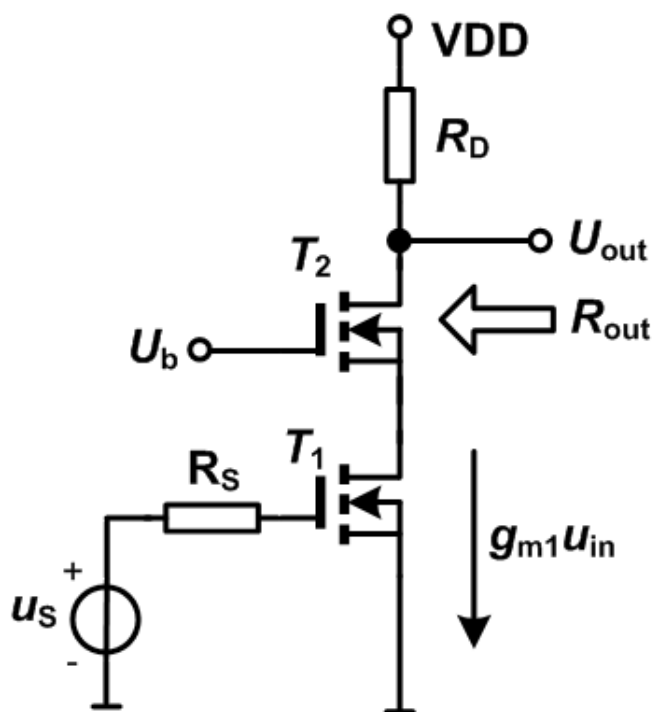
双极型晶体管组合LNA电路



- 组合电路的上限频率主要取决于共发电路。
- 利用共基电路输入阻抗低的特性，将它作为共发电路的负载，就可有效地克服共发电路中的密勒倍增效应并提高组合电路的截止频率。

场效应管共源—共栅电路

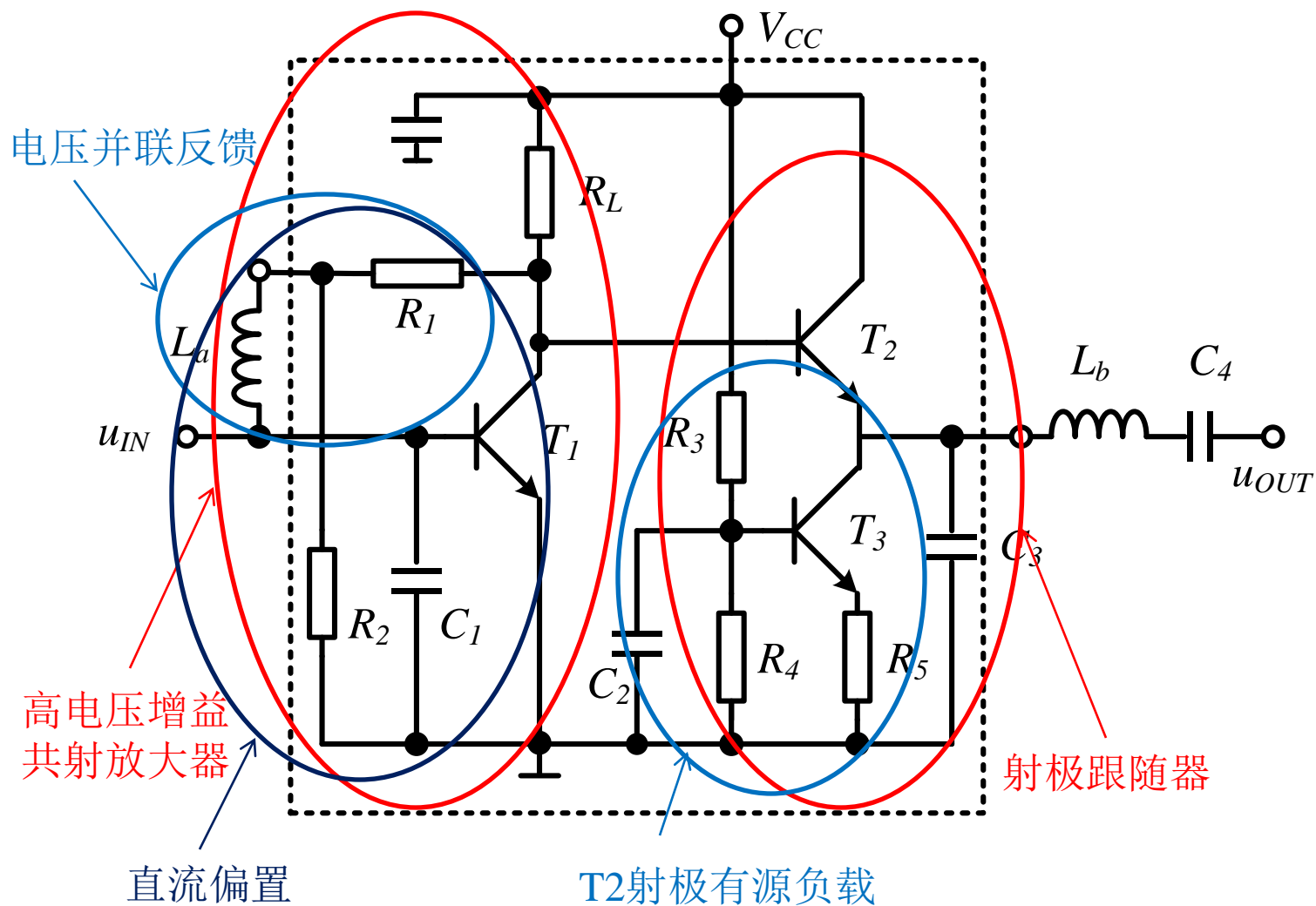
- 共源极和共栅极的级联称作共源共栅结构(cascode)



场效应管共源—共栅电路

- 共源共栅结构的跨导大于共源极电路的跨导，可以有效地提高电压增益。
- 通过抑制密勒效应提高共栅极放大器的工作速率，并可为共源极提供很高的输入阻抗。
- $|A_{vs}| = G_m R_{out} = g_{m1} r_{o1} [(g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} + 1]$
- 输出电阻 $R_{out} = [1 + (g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2}] r_{o1} + r_{o2}$ ，假设 $g_m r_o \gg 1$ ， $R_{out} \approx (g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2} r_{o1}$ ，即 T_2 把 T_1 的输出阻抗提高至原来的 $(g_{m2} + g_{mb2}) r_{o2}$ 倍。

集成LNA电路



本章内容

- 引言
- LNA主要指标
- 晶体管高频小信号模型
- 高频小信号单回路选频放大器
- 集成宽带放大器
- LNA的噪声匹配 P.54
- LNA设计举例
- 本章要点

双极型LNA的匹配

双极型LNA为共射组态且工作在射频段时输入阻抗为

$$Z_{in} \approx r_{bb'} + \frac{1}{j\omega C_{b'e}}$$

共射LNA放大器的噪声因数为

$$F = 1 + \frac{r_{bb'}}{R_S} + \frac{1}{2g_m R_S} + \frac{g_m R_S}{2\beta}$$

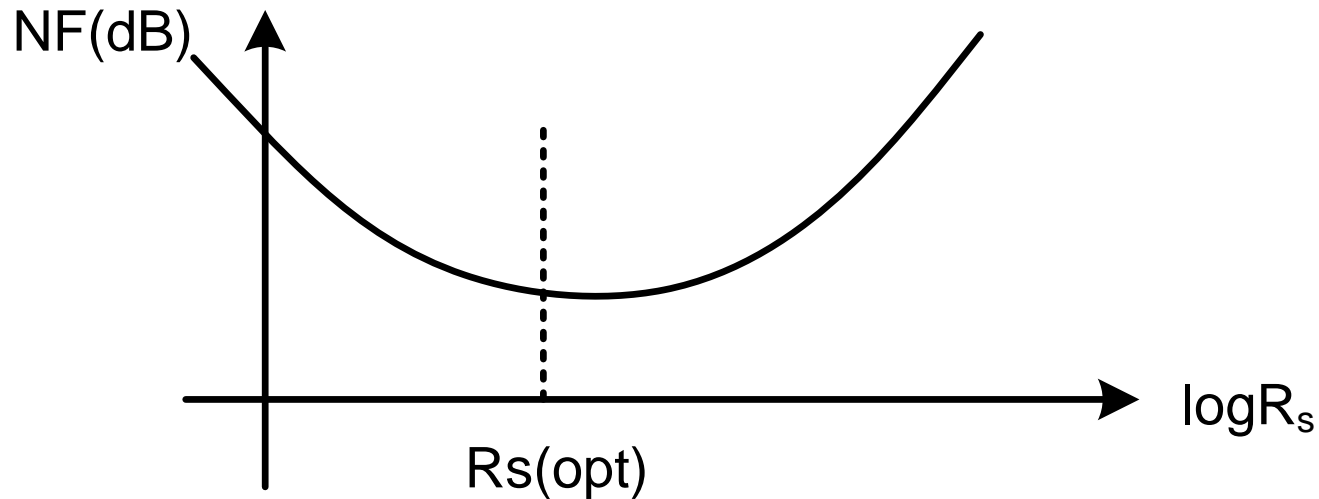
可以得出最小噪声因数

$$F_{\min} = 1 + \sqrt{\frac{1 + 2g_m r_{bb'}}{\beta}}$$

最佳源阻抗为

$$R_{S(opt)} = \frac{\sqrt{\beta(1 + 2g_m r_{bb'})}}{g_m}$$

双极型LNA的匹配



噪声系数与源阻抗之间关系

- 例2.6.1 当共射放大器的射极电流 $I_c = 1\text{mA}$, $\beta = 100$, $r_{bb'} = 50\Omega$, 求最佳源阻抗 $R_{s(\text{opt})}$ 和最小噪声系数 N_F 。

双极型LNA的匹配

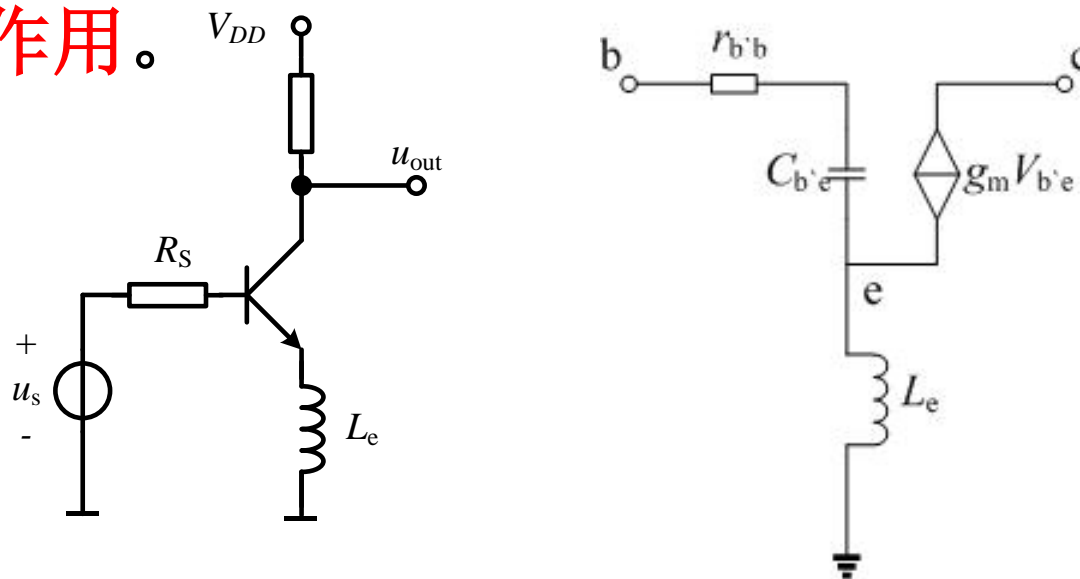
- 解: $r_e = U_T / I_{EQ} = 0.026 / 0.001 = 26(\Omega)$
- 共基交流电流传输系数
- $\alpha \approx 1$, $g_m = \alpha / r_e \approx 1 / r_e = 38.4(\text{mS})$ 。
- 最小的噪声 $F_{\min} = 1 + [(1 + 2g_m r_{b'b}) / \beta]^{0.5} = 1.22$
- $N_F = 10 \lg F_{\min} = 0.9(\text{dB})$

最佳源阻抗为

- $R_{S(\text{opt})} = [\beta^*(1 + 2g_m r_{b'b})]^{0.5} / g_m = 573(\Omega)$

双极型LNA的匹配

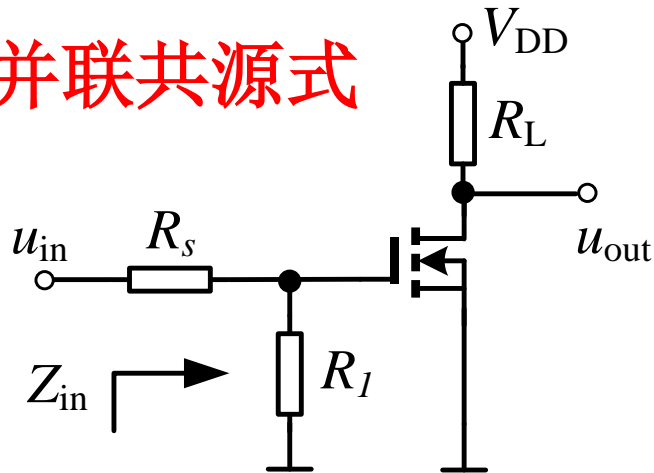
- 为了达到最小噪声系数和 50Ω 阻抗匹配，在双极型LNA的发射极串联一个电感。该电感的主要作用是与信号源内阻进行共轭匹配，以抵消输入容抗的作用。



$$Z_{in} = r_{bb'} + \frac{g_m L_e}{C_{b'e}} + L_e s + \frac{1}{s C_{b'e}}$$

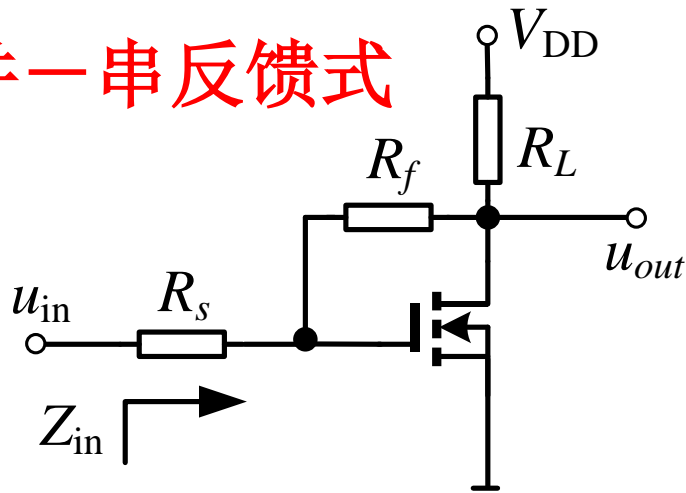
MOS LNA输入阻抗匹配

并联共源式



- 并联共源结构直接引入了一个与电源一样大的热噪声，使得信号在未到晶体管前就衰减了一半。

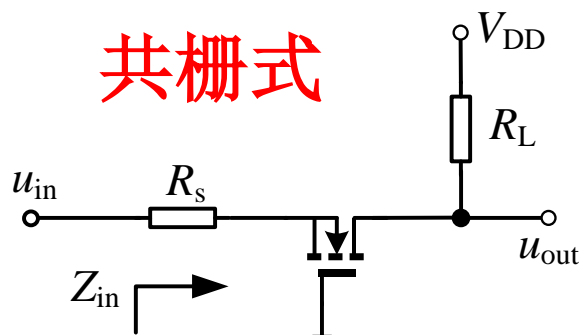
并一串反馈式



- 并-串反馈式结构中 R_f 不会对信号衰减，因此噪声较并联电阻式降低很多。

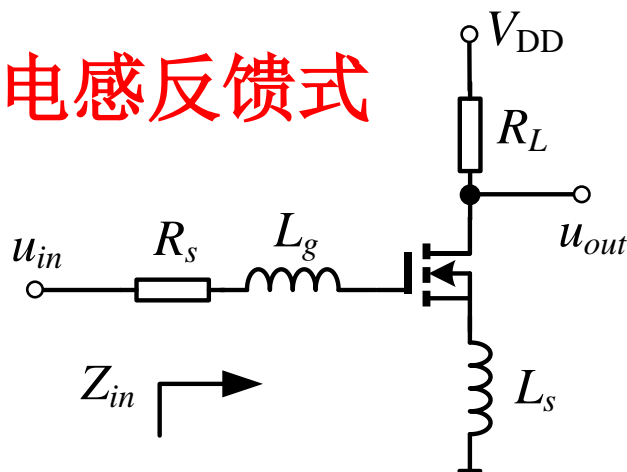
MOS LNA输入阻抗匹配

共栅式



- 共栅式结构可以通过选择适当的偏置电流和晶体管的尺寸，就可以实现匹配而无需任何外部元件。

源极电感反馈式

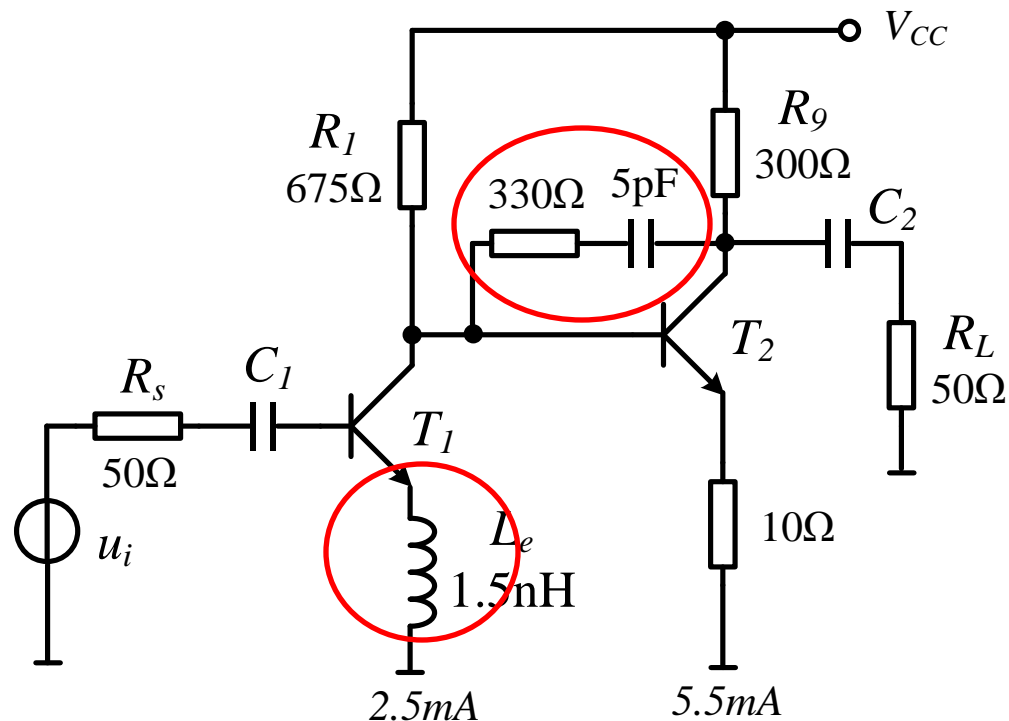


- 源极反馈式的输入阻抗为 $Z_{in} \approx sL_s + sL_g + 1/sC_{gs} + \omega_T L_s$ ($\omega_T = g_m/C_{gs}$)，这种结构由于在信号的通道上避免了噪声电阻，大大降低了噪声系数。

本章内容

- 引言
- LNA主要指标
- 晶体管高频小信号模型
- 高频小信号单回路选频放大器
- 集成宽带放大器
- LNA的噪声匹配
- LNA设计举例
- 本章要点

LNA设计举例

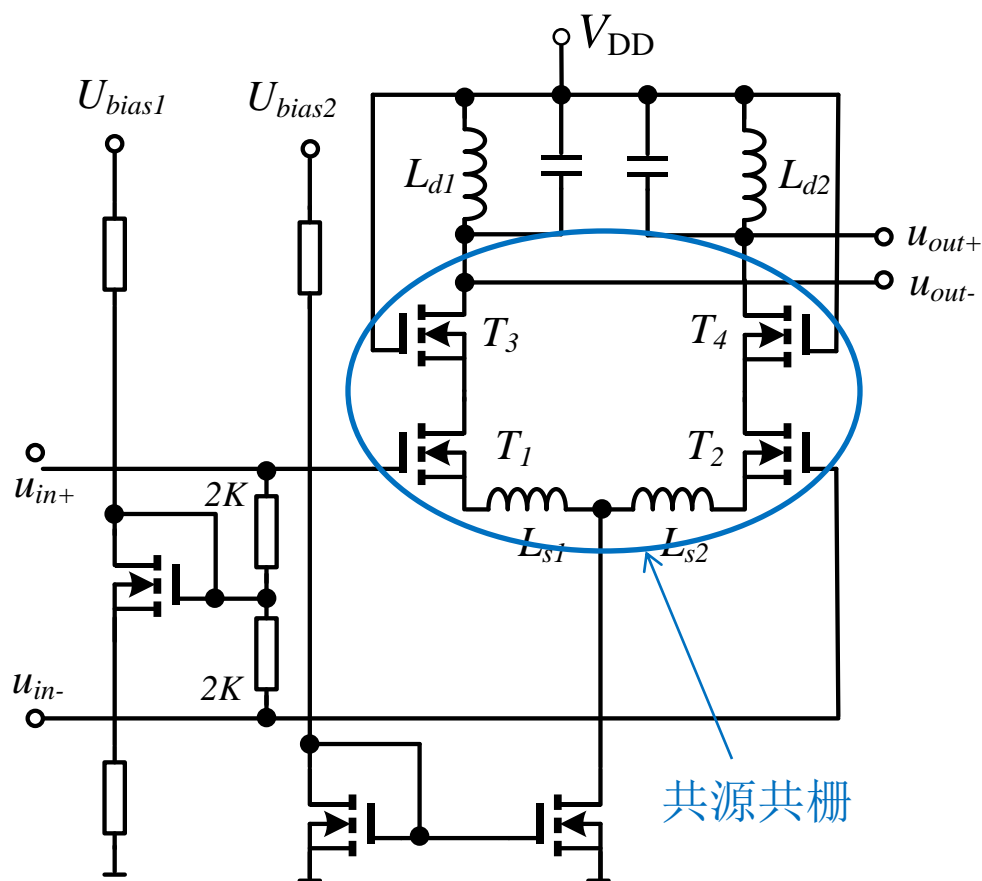


•该单端双极型LNA在第二级放大器中采用了RC串联支路构成电压并联负反馈稳定增益和输出阻抗。在输入极用了射极电感进行输入阻抗匹配以获得最小噪声系数。

•当截止频率 $f_T = 5 \text{ GHz}$, $L_e = 1.5 \text{ nH}$, 输入阻抗的实部为

$$Z_i \approx \beta(j\omega)Z_e = \frac{\omega_T}{j\omega} j\omega L_e = \omega_T L_e = 2\pi f_T L_e \approx 47\Omega$$

LNA设计举例



- 差分MOS LNA 电路结构可以有效地减小寄生电感对电路的影响。
- LNA的输入端采用源极电感负反馈实现与信号源的匹配。
- 共源共栅级联结构可增加隔离度。

本章内容

- 引言
- LNA主要指标
- 晶体管高频小信号模型
- 高频小信号单回路选频放大器
- 集成宽带放大器
- LNA的噪声匹配
- LNA设计举例
- 本章要点

本章要点

- 1、晶体管高频小信号模型，LNA的主要指标，BJT和FET放大电路的分析。
- 2、集成宽带放大器原理，BJT组合放大电路的高频特点，FET共源一共栅放大电路特点，以及集成LNA的电路结构。
- 3、LNA的噪声匹配原理，最小噪声因数 F_{\min} 和最佳源阻抗 $R_{s(\text{opt})}$ 的计算方法。MOSLNA的四种输入匹配电路结构的特点，LNA的电路结构设计及电路结构特点。