

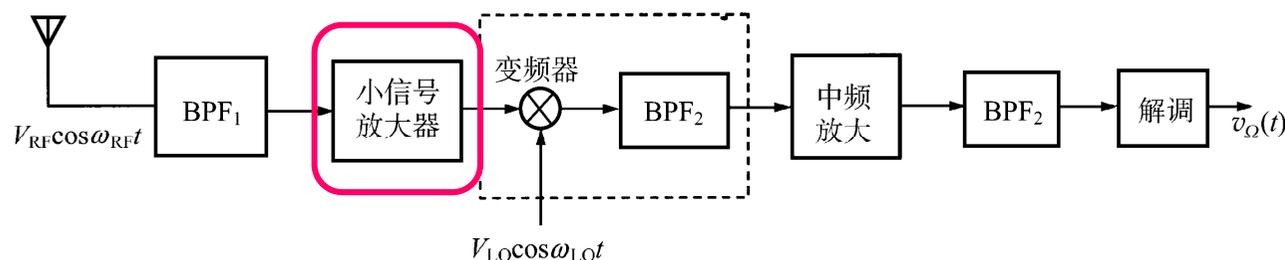
# 第五章 低噪声放大器 (Low-Noise Amplifier, LNA)

## 5.1 晶体管的高频等效电路

## 5.2 低噪声放大器指标

## 5.3 低噪声放大器设计

## 5.4 S参数与放大器设计



# 5.1 晶体管高频等效电路

## 射频集成电路主要工艺

砷化钾 GaAs —— 最高频率达到50~100GHz  
超高速微电子学和光电子学

双极 (bipolar)

| 工艺技术     | 截止频率 $f_T$ (GHz) |
|----------|------------------|
| Bipolar  | 25 – 50          |
| BiCMOS   | 10 – 20          |
| SiGe HBT | 40 – 80          |

CMOS —— 噪声低、线性特性好、与数字集成电路兼容  
3GHz以上

# 5.1.1 BJT晶体管小信号模型

## ● 共射放大器原理图

基极偏置  $V_{BEQ}$

决定基极偏置电流  $I_{BQ}$

集电极电源  $V_{CC}$

负载电阻  $R_L$

共同决定工作点  $Q$

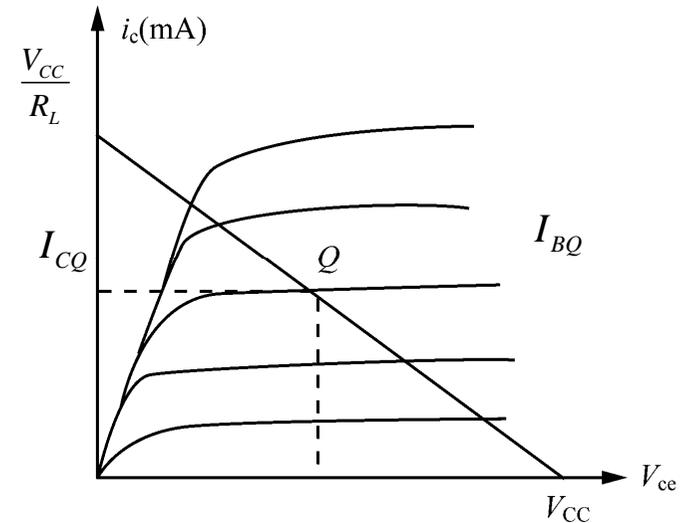
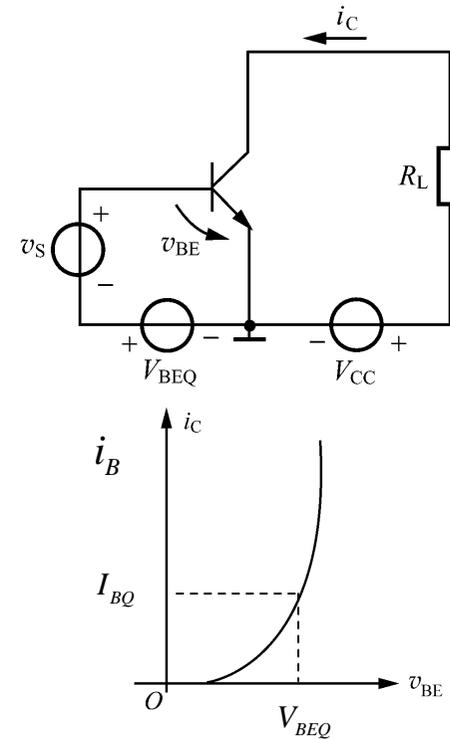
输入信号为  $v_s$ ,  $v_{BE} = V_{BEQ} + v_s$

输出电流公式

$$i_C = I_S e^{\frac{q}{kT} v_{BE}} = I_S e^{\frac{q}{kT} (V_{BEQ} + v_s)} = I_{CQ} e^{\frac{q}{kT} v_s}$$

当  $V_{sm} \ll V_T$  ( $V_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV}$ ) 时

晶体管可用其等效电路代替



# 5.1.1 BJT晶体管小信号模型

## 晶体管作为放大器的本质

★ 一个电压控制的电流源  $i_c = g_m v_{b'e}$  —— 正向传输

$$g_m = \left. \frac{di_c}{dv_{be}} \right|_{v_{be}=V_{BEQ}} = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{I_{CQ}(\text{mA})}{26(\text{mV})}$$

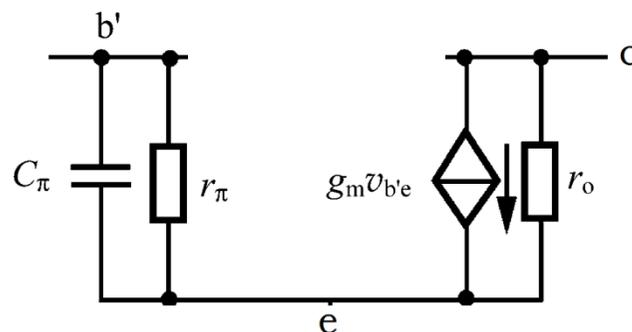
★ 放大器的输入阻抗  $r_\pi (r_{b'e})$ 、 $C_\pi (C_{b'e})$

★ 放大器输出电阻  $r_o (r_{ce})$  (很大)

★ 反向传输器件  $C_\mu$  —— 引起放大器不稳定

★ 极限工作频率  $f_T$  —— 由等效电路中的电容引起

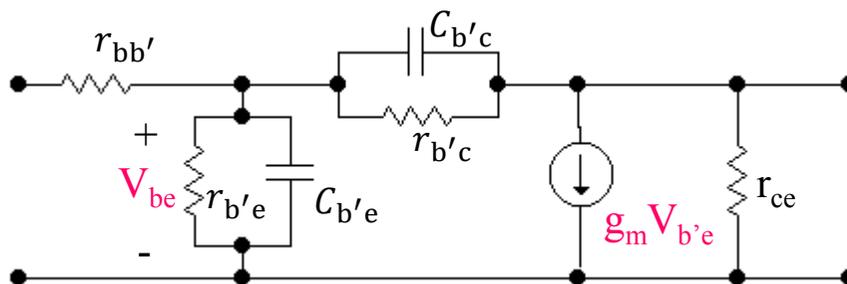
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(c_\pi + c_\mu)} \approx \frac{g_m}{2\pi C_\pi}$$



# 5.1.1 BJT晶体管小信号模型

## 晶体管的高频小信号等效电路模型

由于小信号调谐放大器的信号幅度较小，可以用线性等效电路模型来描述晶体管。在较高频率下工作时，对晶体管通常用混合 $\pi$ 形等效电路模型等效，如图所示：



混 $\pi$ 参数等效电路是以晶体管的基本物理模型为依据提出来的，各个参数基本与频率无关，故适合于较高频率下的分析。

各元件的含义：

## 5.1.1 BJT晶体管小信号模型

- $r_{b'e}$ 是晶体管的发射结正向导通增量电阻 $r_e$ 在基极的折合，与发射极静态电流  $I_{EQ}$ 有关

$$r_{b'e} = (1 + \beta)r_e = (1 + \beta) \frac{26 \text{ (mV)}}{I_{EQ} \text{ (mA)}}$$

- $g_m$ 是晶体管的正向跨导，其值大小反映了晶体管的发射结电压对集电极电流的控制能力
- $r_{bb'}$ 是晶体管的基极导线和基区体电阻的和，其值一般为10~150Ω。
- $C_{b'e}$ 是发射结电容，由扩散电容 $C_D$ 和势垒电容 $C_T$ 之和构成，在正向导通的情况下，以扩散电容为主，值约为10~500pF。
- $r_{b'c}$ 和 $r_{ce}$ 是由集电极电压 $V_{CE}$ 变化导致的基极调宽效应引起的。 $r_{b'c}$ 约为mΩ数量级， $r_{ce}$ 约为几十kΩ数量级，一般可以忽略它们的影响。
- $C_{b'c}$ 是集电结势垒电容，尽管其值很小，一般仅为几到十几pF，但由于它构成了高频条件下集电极到基极的内部反馈通路，会严重影响放大器的工作稳定性，是宽带放大器设计中必须考虑的一个重要因素。

## 5.1.1 BJT晶体管小信号模型

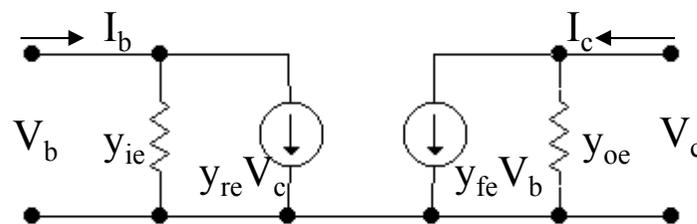
- ✓ 混 $\pi$ 参数等效电路的物理概念清晰，适用于分析高频电路，但其形式较复杂，使用不方便，我们通常将其转换成Y参数等效电路，直接用Y参数等效电路进行分析。

- 晶体管的Y参数等效电路

y参数等效电路是二端口网络的参数模型，由下式定义：

$$\dot{I}_b = y_{ie} \dot{V}_b + y_{re} \dot{V}_c$$

$$\dot{I}_c = y_{fe} \dot{V}_b + y_{oe} \dot{V}_c$$



其中的各个参数可以由端口电流和电压来表示：

$$y_{ie} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{V}_b} \right|_{\dot{V}_c=0}$$

输入导纳，  
仅与输入端  
有关

$$y_{re} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{V}_c} \right|_{\dot{V}_b=0}$$

反向传输导纳，反映输出端对输入端的影响。源于晶体管的内部反馈，会导致自激，影响放大器的稳定性。

## 5.1.1 BJT晶体管小信号模型

$$y_{fe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{V}_b} \right|_{\dot{V}_c=0}$$

正向传输导纳，反映输入端对输出端的控制作用。放大作用主要通过该参数实现。

$$y_{oe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{V}_c} \right|_{\dot{V}_b=0}$$

输出导纳，仅与输出端有关

通常以复数形式给出y参数：

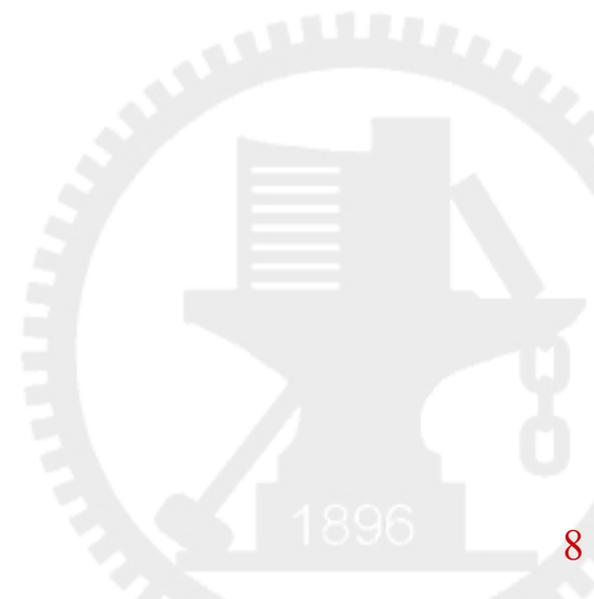
$$y_{ie} = g_{ie} + j\omega C_{ie}$$

$$y_{oe} = g_{oe} + j\omega C_{oe}$$

$$y_{fe} = |y_{fe}| \angle \varphi_{fe}$$

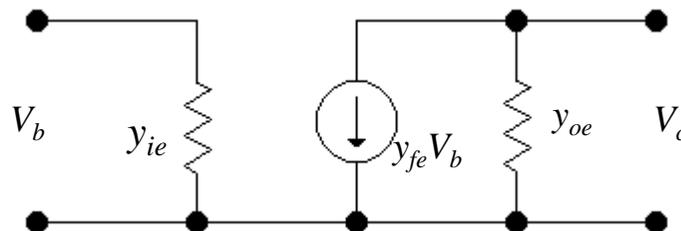
$$y_{re} = |y_{re}| \angle \varphi_{re}$$

y参数是和工作频率有关的



## 5.1.1 BJT晶体管小信号模型

- ✓ 通常在频率不是太高的情况下，可以忽略晶体管的内部反馈，认为  $y_{re} = 0$ ，得到简化的y参数等效电路：



注意：与混 $\pi$ 参数等效电路元件的关系

$$Y_{ie} = \frac{g_{b'e} + j\omega C_{b'e}}{1 + r_{bb'}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \quad (9)$$

$$Y_{re} = \frac{-j\omega C_{b'c}}{1 + r_{bb'}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \quad (10)$$

$$Y_{fe} = \frac{g_m}{1 + r_{bb'}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \quad (11)$$

$$Y_{oe} = g_{ce} + j\omega C_{b'e} + \frac{j\omega C_{b'c} g_m r_{bb'}}{1 + r_{bb'}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} \quad (12)$$

## 5.3 低噪声放大器设计

电路组成：非线性器件（模块）、偏置、输入匹配和负载

电路一：

单管小信号调谐放大电路

晶体管  $Q$

偏置电阻  $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ 、 $R_e$

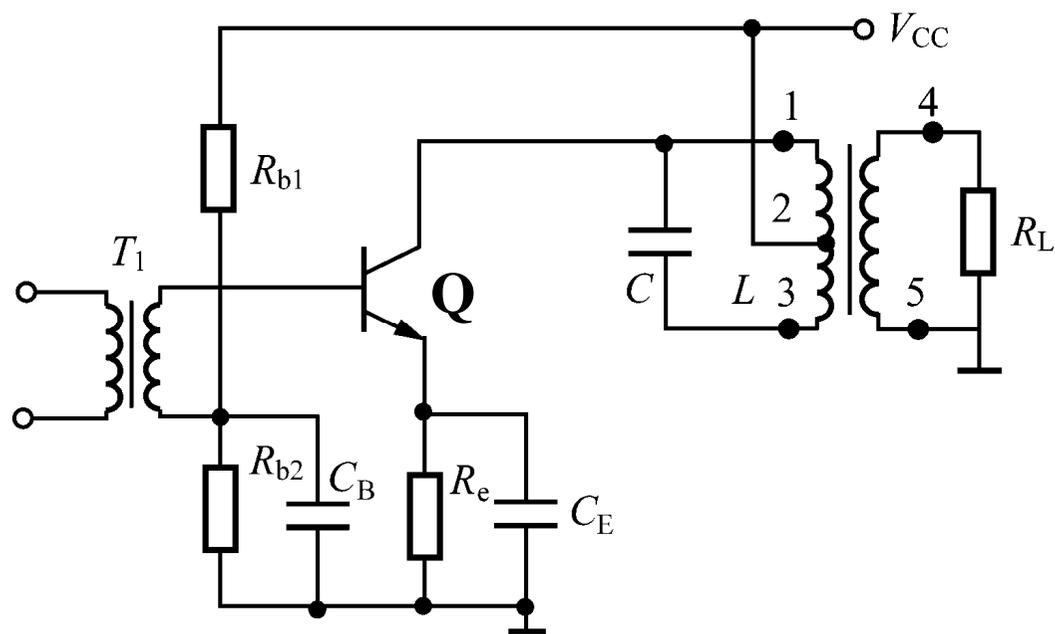
输入匹配网络  $T_1$

负载：选频回路  $LC$

负载电阻  $R_L$

晶体管部分接入

交流旁路电容  $C_B$ 、 $C_E$



## 5.3 低噪声放大器设计

---

### ➤ 分析电路步骤

- (1) 分析直流偏置，决定直流工作点，得出对应工作点的参数
- (2) 画出放大器的交流通路图
- (3) 代入晶体管的小信号等效电路及参数，  
计算放大器的各项指标

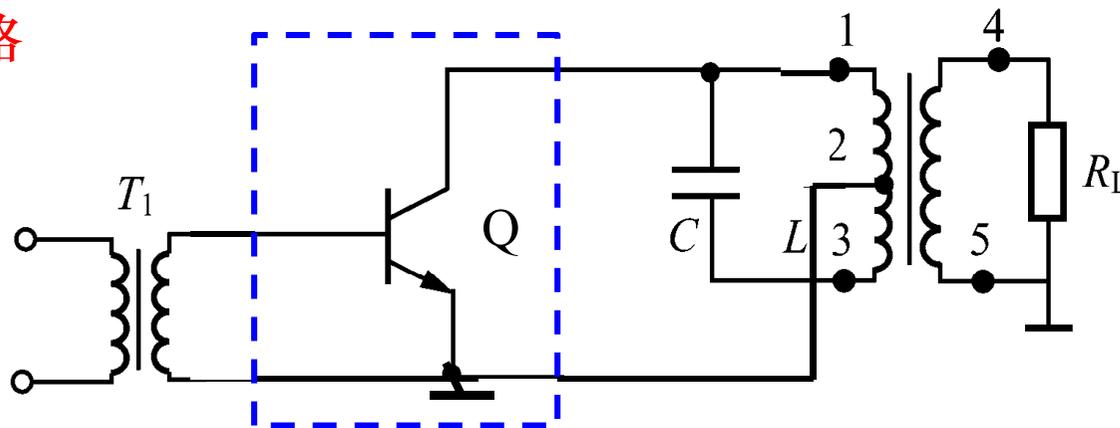
### ➤ 画交流通路图的原则：

- ① 直流电源是交流地
- ② 大电容（交流旁路电容）短路
- ③ 大电感（扼流圈）开路
- ④ 仅做偏置用的直流电阻可不画



# 5.3 低噪声放大器设计

完整电路

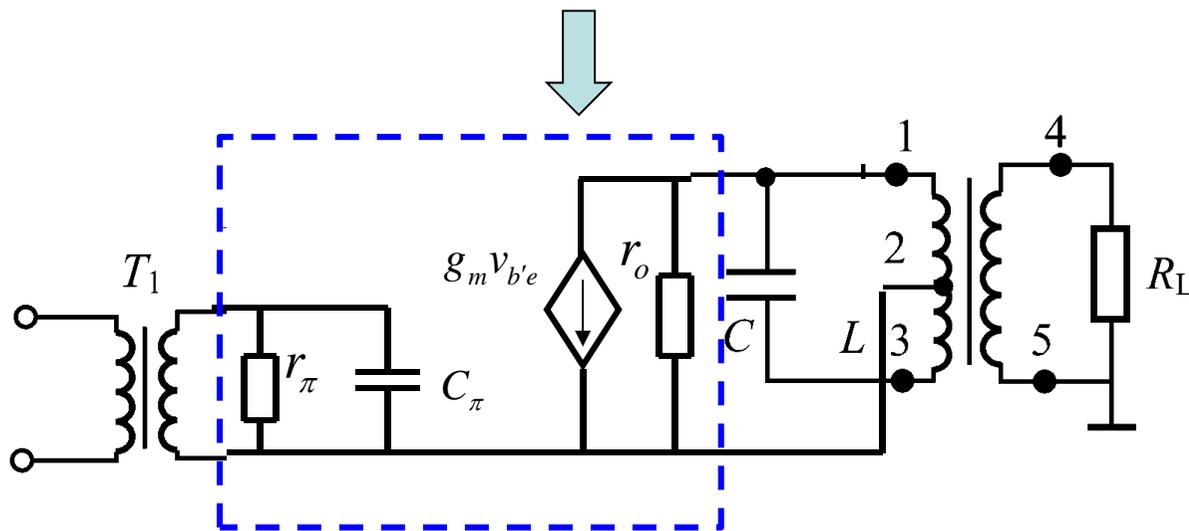


① 画交流图

大电容短路

电源是交流地

去掉偏置



② 代入晶体管等效电路

设晶体管为单向传输

# 计算增益（单向传输）

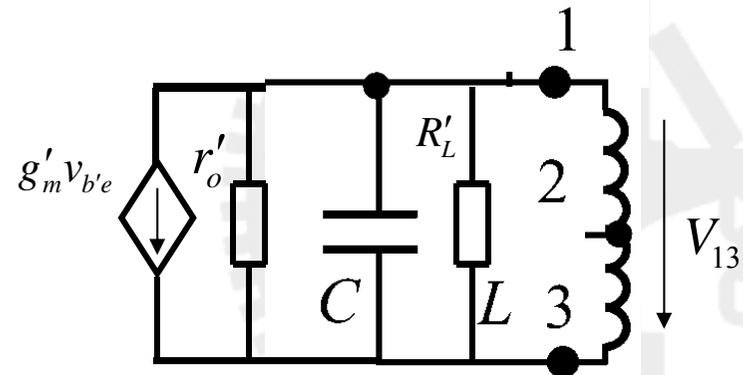
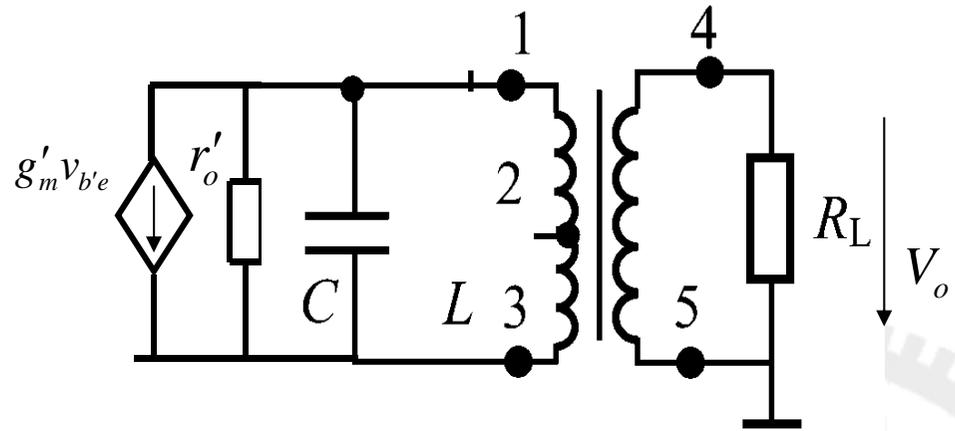
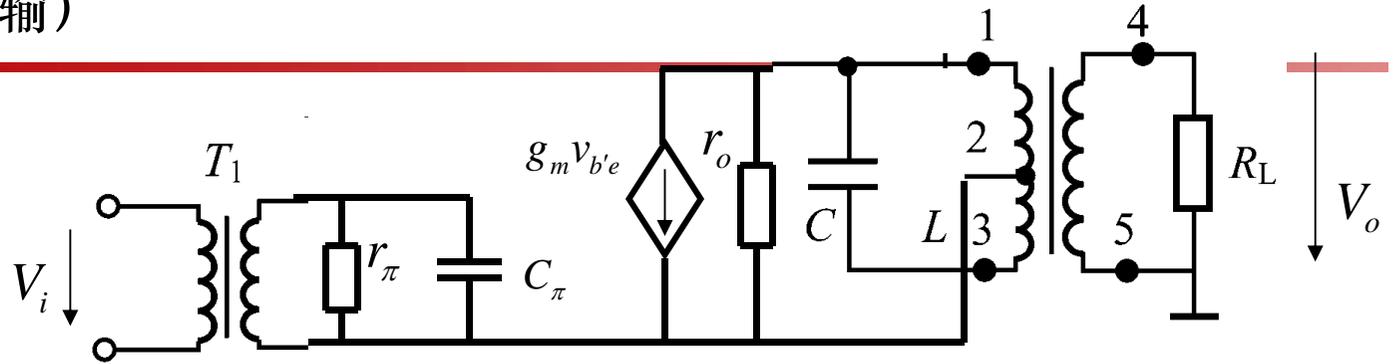
## ① 对线圈部分接入进行折合

电流源  $g_m V_{b'e}$  和  $r_o$  的接入系数

$$p_1 = \frac{N_{12}}{N_{13}} \begin{cases} g'_m V_{b'e} = p_1 g_m V_{b'e} \\ r'_o = r_o / p_1^2 \end{cases}$$

负载接入系数  $p_2 = \frac{N_{45}}{N_{13}}$

$$R'_L = R_L / p_2^2$$

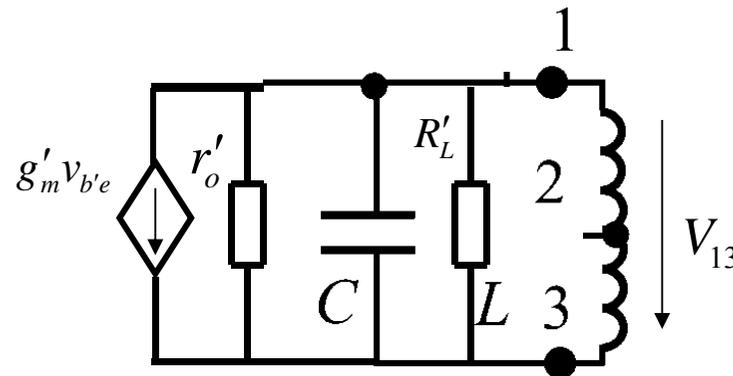


## 5.3 低噪声放大器设计

### ② 回路谐振频率

回路谐振，低噪放工作频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



### ③ 回路谐振阻抗

设LC回路的空载Q为  $Q_0$

回路谐振阻抗  $R_{\Sigma} = R_p // r'_o // R'_L$  (其中  $R_p = \omega_0 L Q_0$ )

### ④ 输出电压

$$\dot{V}_{13} = -g'_m \dot{V}_{b'e} Z(j\omega) = -p_1 g'_m \dot{V}_{b'e} Z(j\omega) \longrightarrow \dot{V}_o = p_2 \dot{V}_{13}$$

## 5.3 低噪声放大器设计

### ⑤ 电压增益

$$\dot{A} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{b'e}} = -p_2 p_1 g_m Z(j\omega)$$

谐振时有

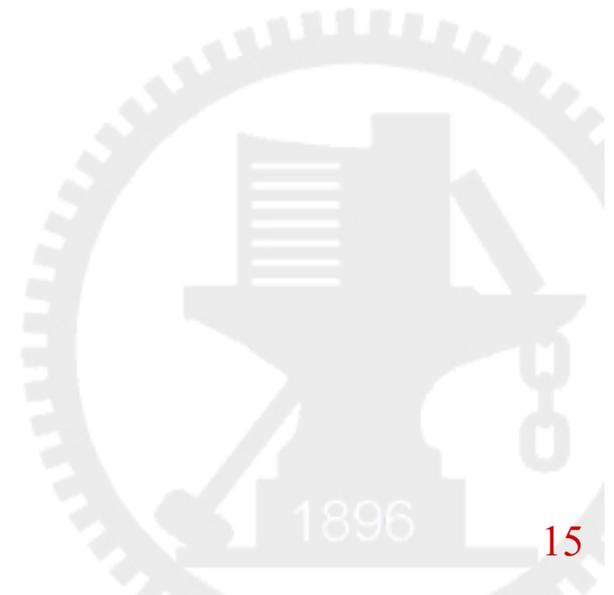
$$A = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_{b'e}} = -p_2 p_1 g_m R_\Sigma$$

低噪放回路带宽

$$BW_{3dB} = \frac{f_0}{Q_e} \quad \text{其中} (Q_e = \frac{R_\Sigma}{\omega_0 L})$$

矩形系数

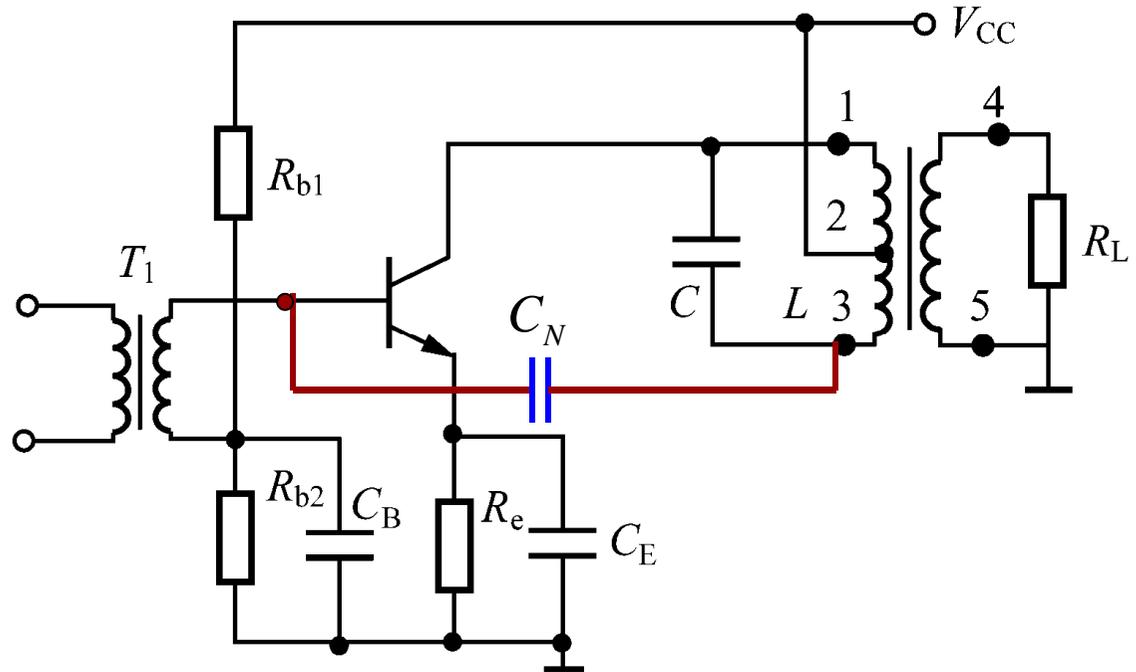
$$K_{0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} = \sqrt{99}$$



## 5.3 低噪声放大器设计

增加稳定性 —— 抵消极间电容  $C_{\mu}$  ( $C_{b'c}$ ) 的影响

添加中和电容



## 5.3 低噪声放大器设计

---

### 讨论:

- $p_1$ ,  $p_2$ 既影响电压比, 又影响总阻抗, 故其值过大或过小都会使得电压增益和功率增益下降。存在着最佳的 $p_1$ ,  $p_2$ 值可以使电压增益和功率增益达到最大。
- 增益带宽积
  - 有源器件或电路的增益与规定带宽的乘积。增益带宽积是评价放大器性能的一项指标
  - 反馈通路的存在会限制增益带宽积



## 5.1.2 场效应管小信号模型

➤ 场效应管工作的两个区——以 $v_{DS}$ 大小划分

✓ 可变电阻区特性 ( $v_{DS}$ 很小)

$$i_D = \beta_n [(v_{GS} - V_{GS(th)})v_{DS}]$$

理解:

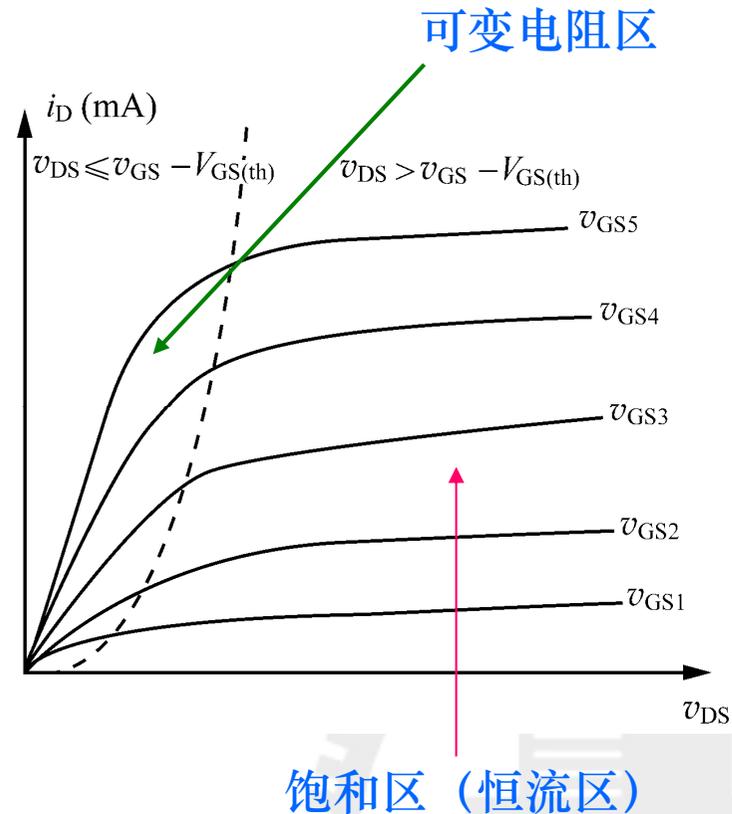
①  $i_D$ 和 $v_{DS}$ 成线性关系

电导值为

$$g = \frac{i_D}{v_{DS}} = \beta_n (v_{GS} - V_{GS(th)})$$

② 此电阻受栅源电压 $v_{GS}$ 的控制 (可变电阻)

✓ 恒流区 —— 场效应管等效为一个理想的电压控制电流源



● 恒流区特性

伏安特性为： $i_D = \frac{1}{2} \beta_n (v_{GS} - V_{GS(th)})^2$       $i_D \sim v_{GS}$ 成平方律关系

转移跨导（ $v_{GS}$ 对 $i_D$ 的控制能力）

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_Q = \beta_n (V_{GSQ} - V_{GS(th)}) = \sqrt{2\beta_n I_{DQ}}$$

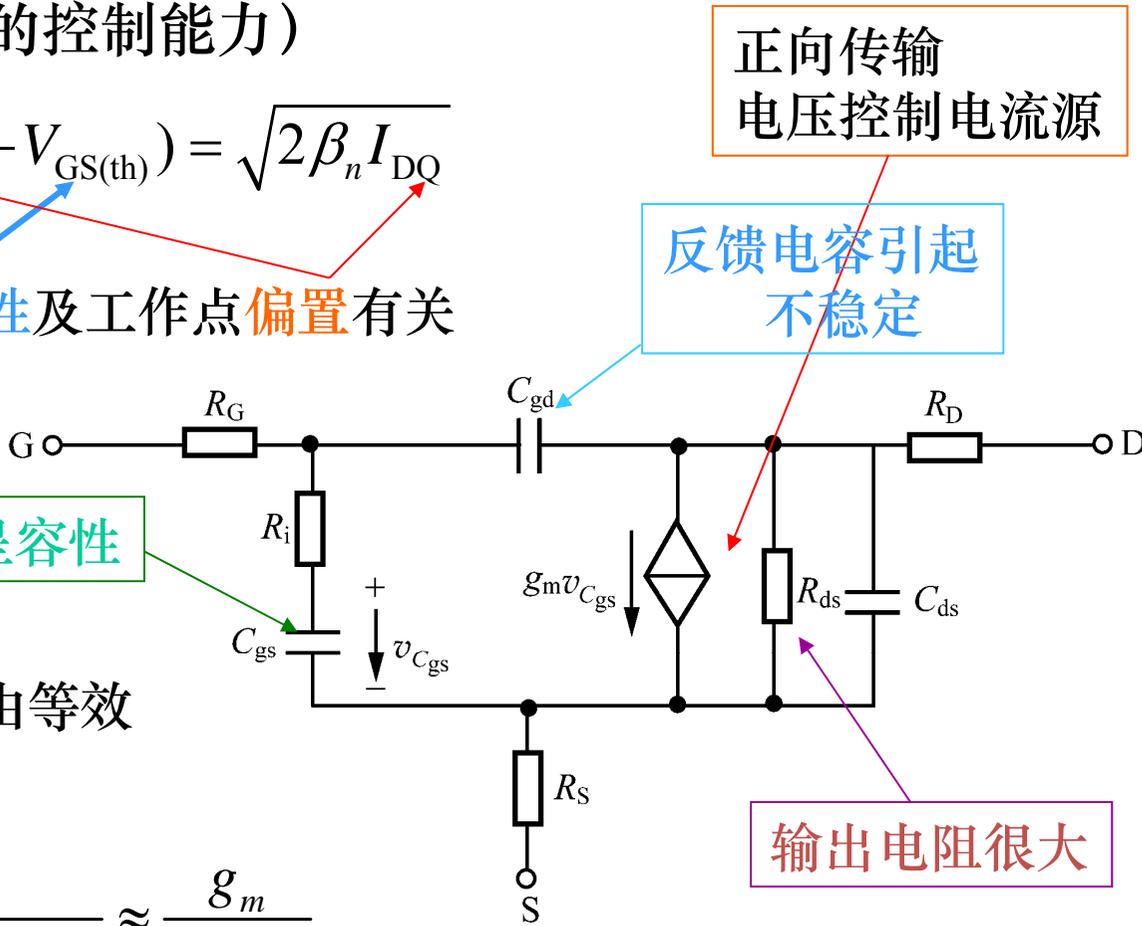
小信号跨导与管子特性及工作点偏置有关

● 小信号等效电路

输入阻抗呈容性

★ 极限工作频率  $f_T$  —— 由等效电路中的电容引起

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

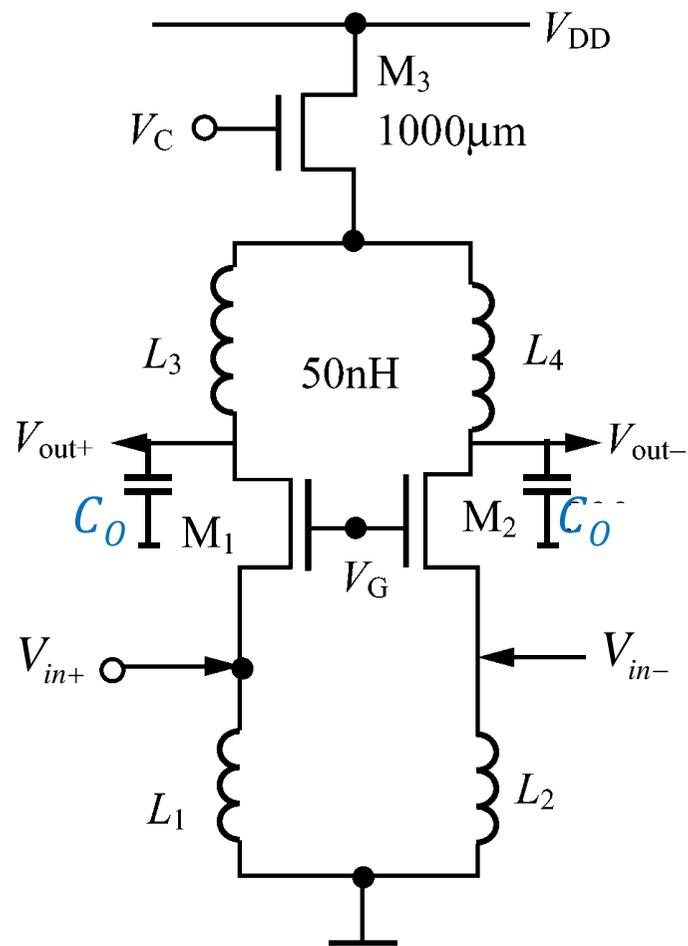


# 例题1——电路2

## 例5.3.1 1GHz CMOS 低噪声放大器

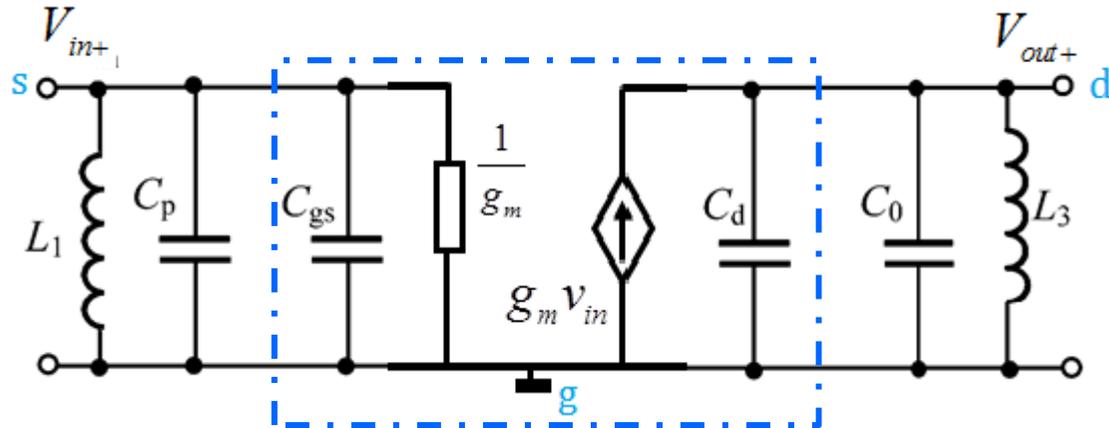
### 1. 电路结构:

- ① 场效应管 $M_1$ 和 $M_2$ 、共栅组态
- ② 接成双端输入双端输出差动放大器
- ③ 输入端采用电感 $L_1$ 和 $L_2$ 组成匹配网络
- ④ 输出端采用LC回路选频  
电感 $L_3$  ( $L_4$ ) 下级输入电容 $C_0$
- ⑤ 偏置为 $V_G$  (偏置电路省略),  
电感 $L_1$ 和 $L_2$ 提供了各管子直流通路
- ⑥  $M_3$  交流短路 (作用见后面分析)



## 电路分析

画交流通路图(以 $M_1$ 为例)

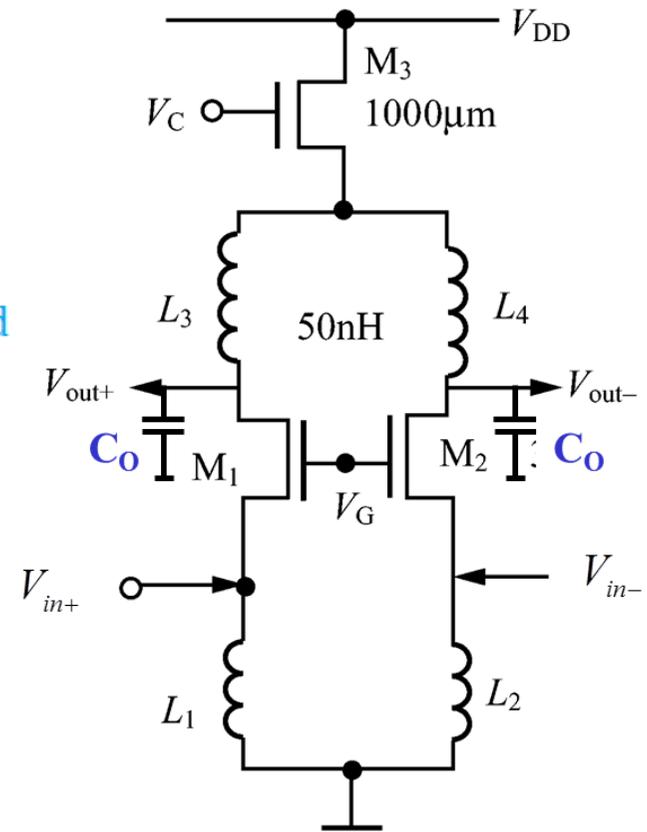


栅源电容 $C_{gs}$

杂散及分布电容  $C_p$

漏极电容 $C_d$  (包括栅漏电容  $C_{gd}$ )

杂散电容  $C_0$  (包括下级混频器的输入电容)



# 例题1

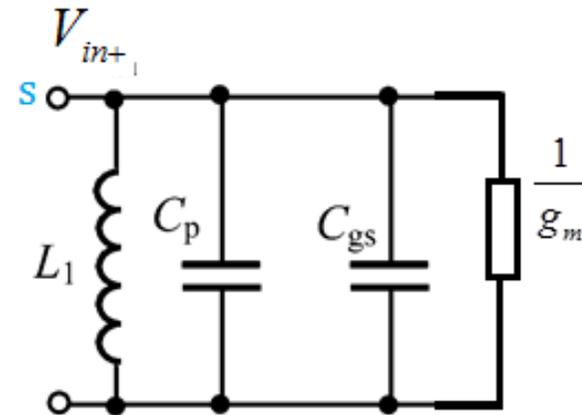
## (1) 输入匹配网络

$L_1$ 、 $C_{gs}$ 、 $C_p$  构成并联回路

谐振频率 = 工作频率1GHz

共栅极输入阻抗为  $\frac{1}{g_m}$

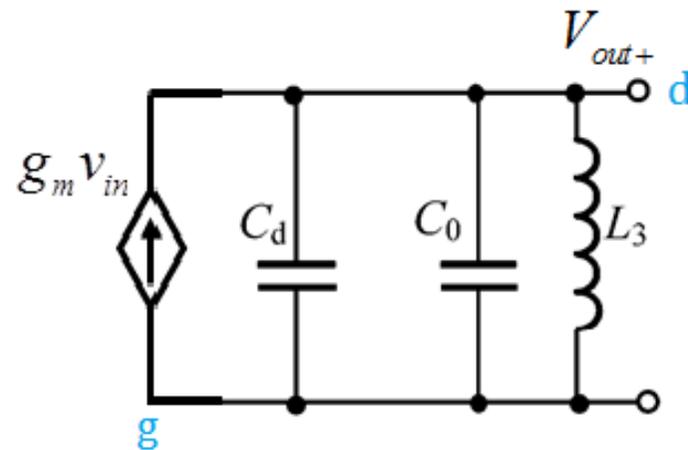
调节  $M_1$ 和 $M_2$  的偏置电压 $V_G$  —— 改变  $M_1$   $M_2$  的跨导  $g_m$ ，  
使  $1/g_m = R_s$ ，完成与源阻抗匹配



## (2) 输出回路

$L_3$ 、 $C_d$ 、 $C_0$  构成并联回路

$$\omega_{RF} = \frac{1}{\sqrt{L_3(C_d + C_0)}}$$



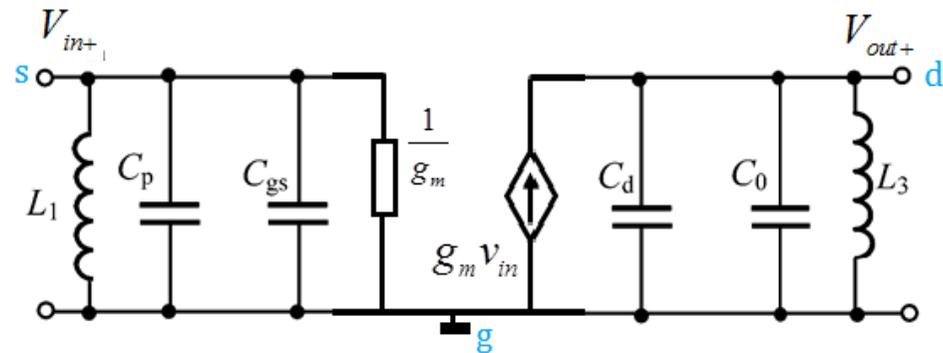
# 例题1

## 2. 性能指标

### (1) 增益

$$R_p = \rho Q_0 = \omega_{RF} L_3 \times \frac{\omega_{RF} L_3}{r}$$

$r$ 为线圈 $L_3$ 的串联损耗电阻



输出阻抗为：

$$Z(j\omega) = \frac{1}{\frac{1}{R_L // R_p} + j\omega C_0 + j\omega C_d + \frac{1}{j\omega L_3}}$$

$$\dot{A}_v = g_m Z(j\omega)$$

### ● 放大器总增益

总输出  $V_o = V_{out+} - V_{out-}$       总输入  $V_{in} = V_{in+} - V_{in-}$

$$A_\Sigma = \frac{V_{out+} - V_{out-}}{V_{in+} - V_{in-}} = \frac{2V_{out+}}{2V_{in+}} = \frac{V_{out+}}{V_{in+}}$$

差分放大器总增益与单管相同

## (2) 带宽

电路特点:

输入 } 并联回路  
输出 } 选频  
          阻抗变换

带宽? ——由两个回路共同决定

① 当两个回路  $Q$  值相同时

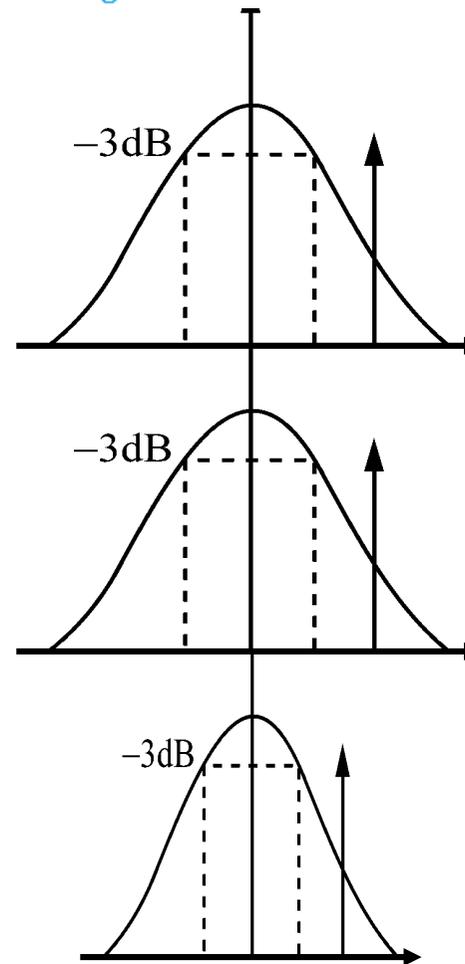
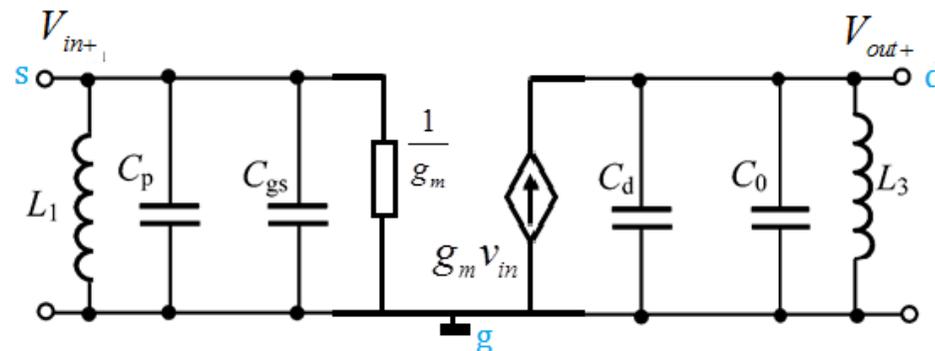
设每个回路带宽为  $BW_1$

$$BW_{\text{总}} = BW_1 \sqrt{2^{\frac{1}{2}} - 1}$$

称  $\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}$  为缩减因子

② 当两回路  $Q$  相差很大时

带宽取决于高  $Q$  回路 ——本例中输出回路  $Q$  值高



### (3) 放大器噪声

放大器噪声源  $\overline{I_{nd}^2} = 4kT\gamma g_m B$

电路变形，将噪声源分裂成两个

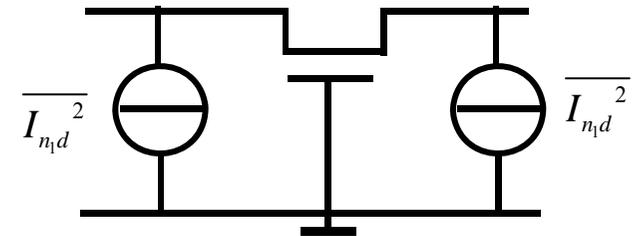
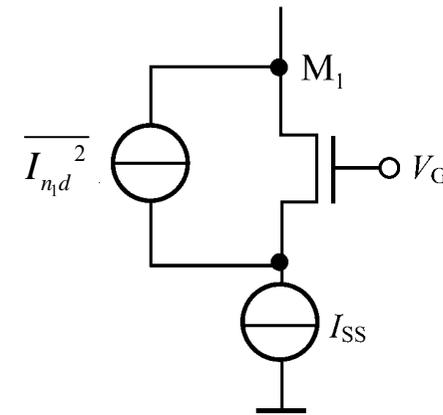
输出端  $\overline{I_{n1d}^2}$  折合到输入端：

$$\overline{I_n'^2} = \frac{\overline{I_{n1d}^2}}{g_m^2 |Z_i|^2}$$

所以等效输入噪声源  $\overline{I_n^2} = \overline{I_{n1d}^2} + \overline{I_n'^2}$

放大器噪声系数

$$F = 1 + \frac{\overline{I_n^2} R_S}{4kTB}$$



## (4) 线性

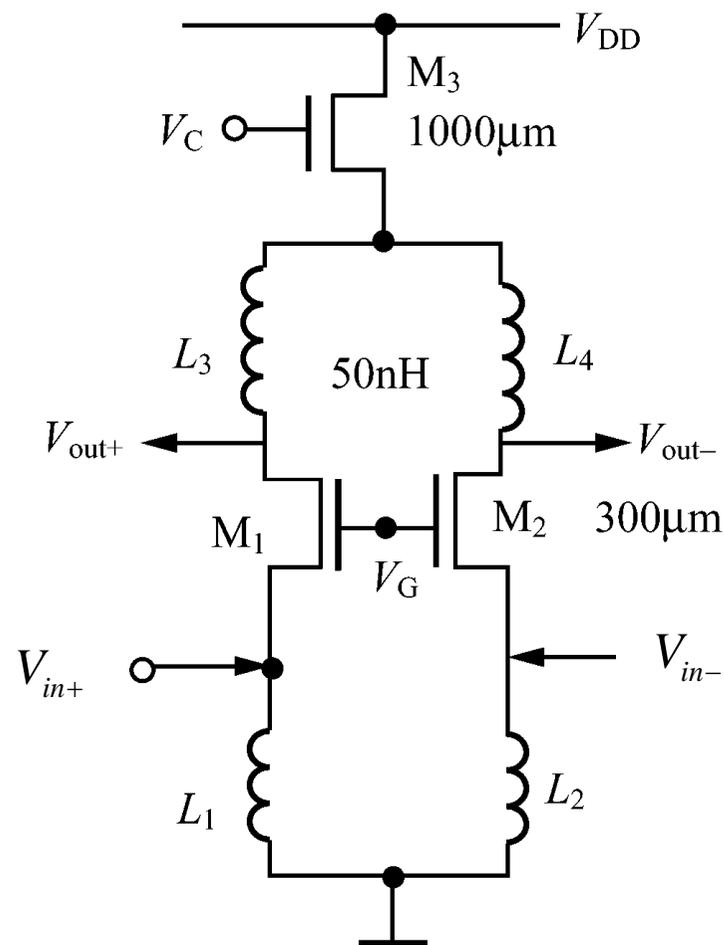
差动输入方式——

- ✓ 输入信号动态范围大于单管

差动输出方式——

输出电流是 $M_1$ 和 $M_2$ 的输出电流之差

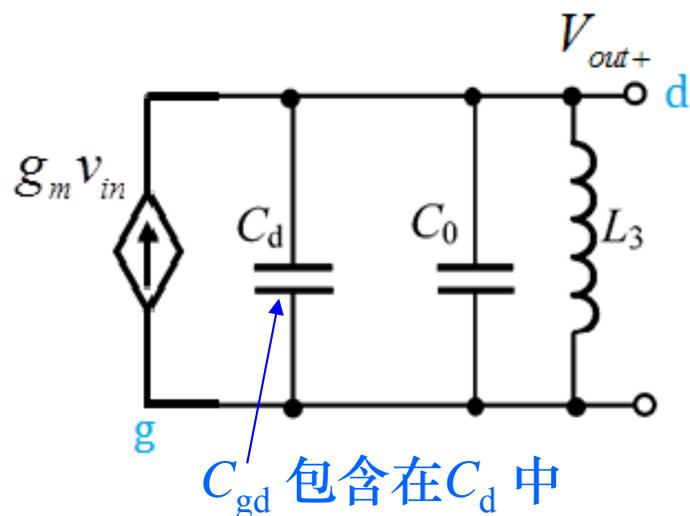
- ✓ 抵消非线性失真的偶次谐波
- ✓ 扩大了线性范围



## (5) 隔离——增强稳定性

不稳定原因——极间电容 $C_{gd}$

共栅组态—— $C_{gd}$  没有反馈



## (6) 输出电平调节

目的：取决于下一级电路的需求

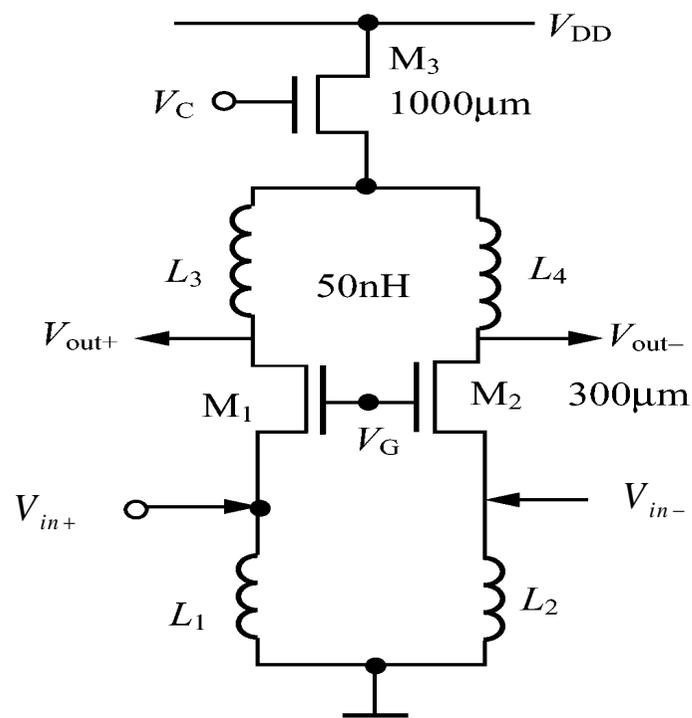
$M_3$ 工作在可变电阻区

调节 $M_3$ 的栅极偏压 $V_C$

改变了 $M_3$ 等效电阻

改变了输出直流电平

$M_1M_2$ 交流电流大小相等方向相反，在 $M_3$ 上没有交流压降。



## 5.2 低噪声放大器指标

LNA的特点:

- 1) 位于接收机的最前端
  - 噪声越小越好
  - 要求有适当的稳定的增益
- 2) 接收的信号很微弱且变化
  - 小信号线性放大器
  - 线性动态范围大
  - 增益自动控制
- 3) 通过传输线直接和天线或滤波器相连 —— 匹配
- 4) 应具有选频功能，抑制带外和镜象频率干扰

## 5.2 低噪声放大器指标

低噪放 (LNA) —— 高频、小信号、线性、选频放大器

| 指标               | 0.5 $\mu$ m GaAs FET | 0.8 $\mu$ m Si Bipolar |
|------------------|----------------------|------------------------|
| 电源电压             | 3.0 V                | 1.9 V                  |
| 电源电流             | 4.0 mA               | 2.0 mA                 |
| 频率               | 1.9 GHz              | 1.9 GHz                |
| 噪声系数 NF          | 2.8 dB               | 2.8 dB                 |
| 增益Gain           | 18.1 dB              | 9.5 dB                 |
| IIP <sub>3</sub> | -11.1 dBm            | -3 dBm                 |
| Input VSWR       | 1.5                  | 1.2                    |
| Output VSWR      | 3.1                  | 1.4                    |
| 隔离               | 21dB                 | 21dB                   |

## 5.2 低噪声放大器指标

### ● 低噪放 (LNA) 指标分析

(1) 低功耗——移动通信的必然要求

低电源电压

小的静态电流——跨导 $g_m$ 小

(2) 工作频率——取决于晶体管的特征频率 $f_T$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)} \approx \frac{g_m}{2\pi C_\pi}$$

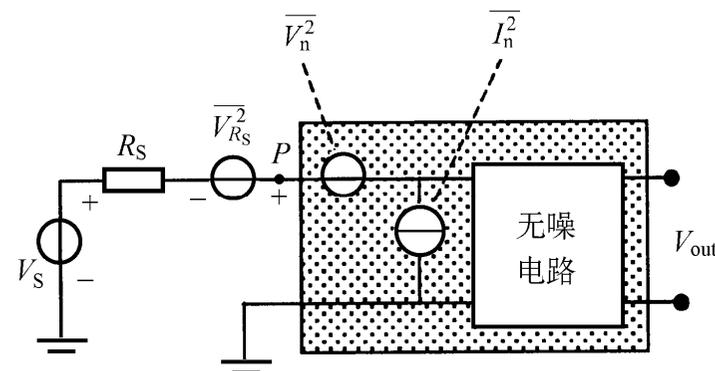
与工作点有关

取决于半导体工艺

### (3) 噪声系数

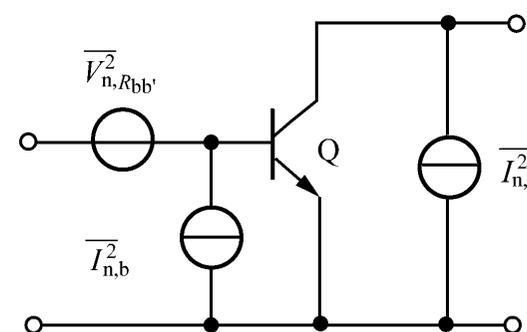
线性网络:

$$F = 1 + \frac{\overline{(V_n + I_n R_S)^2}}{4kTBR_S}$$



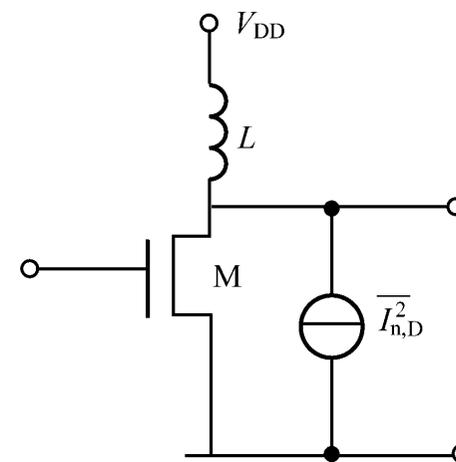
双极晶体管

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



场效应管

$$F = 1 + \frac{1}{R_S} \gamma \frac{1}{g_m}$$



分析:

- ① 放大器的噪声与工作点有关 ——  $g_m$
- ② 双极晶体管放大器的噪声与基区体电阻  $r_{bb'}$  有关
- ③ 放大器噪声系数与信号源内阻  $R_S$  有关

## 5.2 低噪声放大器指标

### (4) 增益

增益要**适中** { 增益大——可降低后级对**系统噪声系数**的影响  
但后级易产生**非线性失真**

增益取决于 { 跨导  $g_m$  ——由工作点决定  
负载

LNA的负载形式 { LC谐振回路 ——  $Q$  值、谐振阻抗  
集中参数选频滤波器 —— 注意阻抗匹配

### (5) 自动增益控制

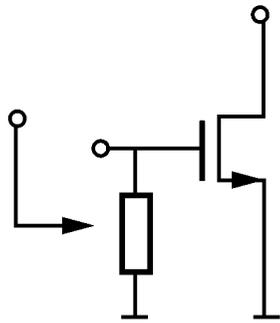
根据接收信号的强弱自动控制增益 { 信号弱，增益大  
信号强，增益小，以防  
后级非线性失真

## (6) 输入阻抗匹配

放大器与输入源的匹配

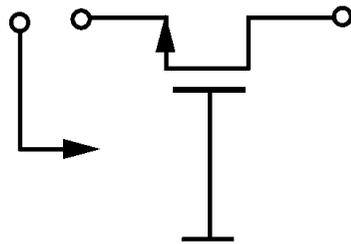
- 最大功率传输 —— 共轭匹配
- 噪声系数最小 —— 噪声匹配

### 匹配方式



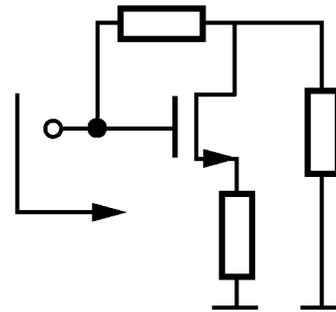
#### a. 共源组态

输入阻抗很大  
并联电阻等于  
信号源内阻



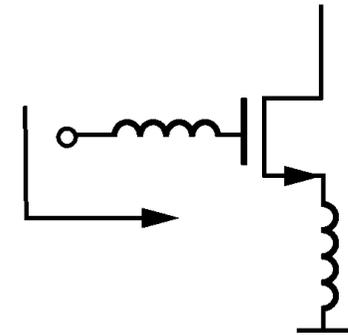
#### b. 共栅组态

输入阻抗  $\approx 1/g_m$   
改变  $g_m$  达匹配



#### c. 电阻

负反馈改变  
输入阻抗



#### d. 电感

负反馈改变  
输入阻抗

## (7) 线性范围

衡量指标：三阶互调截点 $IIP_3$ 、1dB增益压缩点

## (8) 隔离度和稳定性

正向传输 —— 压控电流源  $g_m v_{b'e}$

反向传输 —— 极间电容  $C_{b'c}$

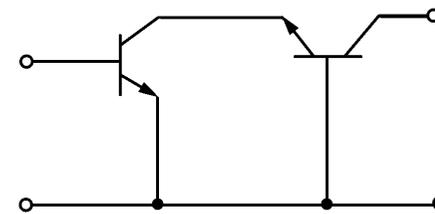
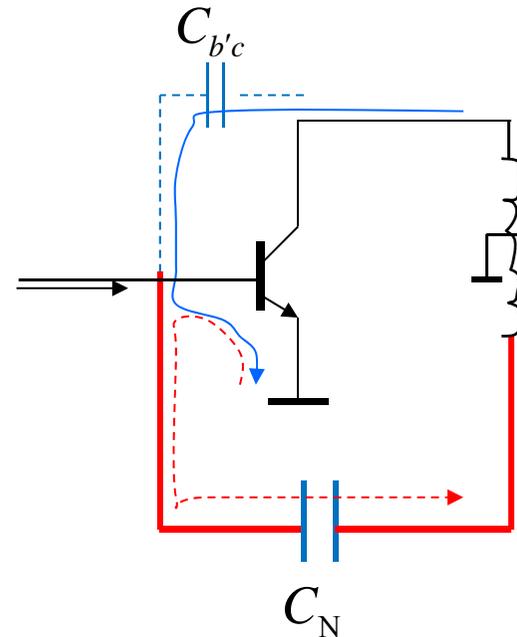
引起不稳定的原因

改进措施

① 中和法 —— 用中和电容抵消

由  $C_{b'c}$  引起的反向传输

② 失配法 —— 采用共射共基  
(共源共栅) 组合连接

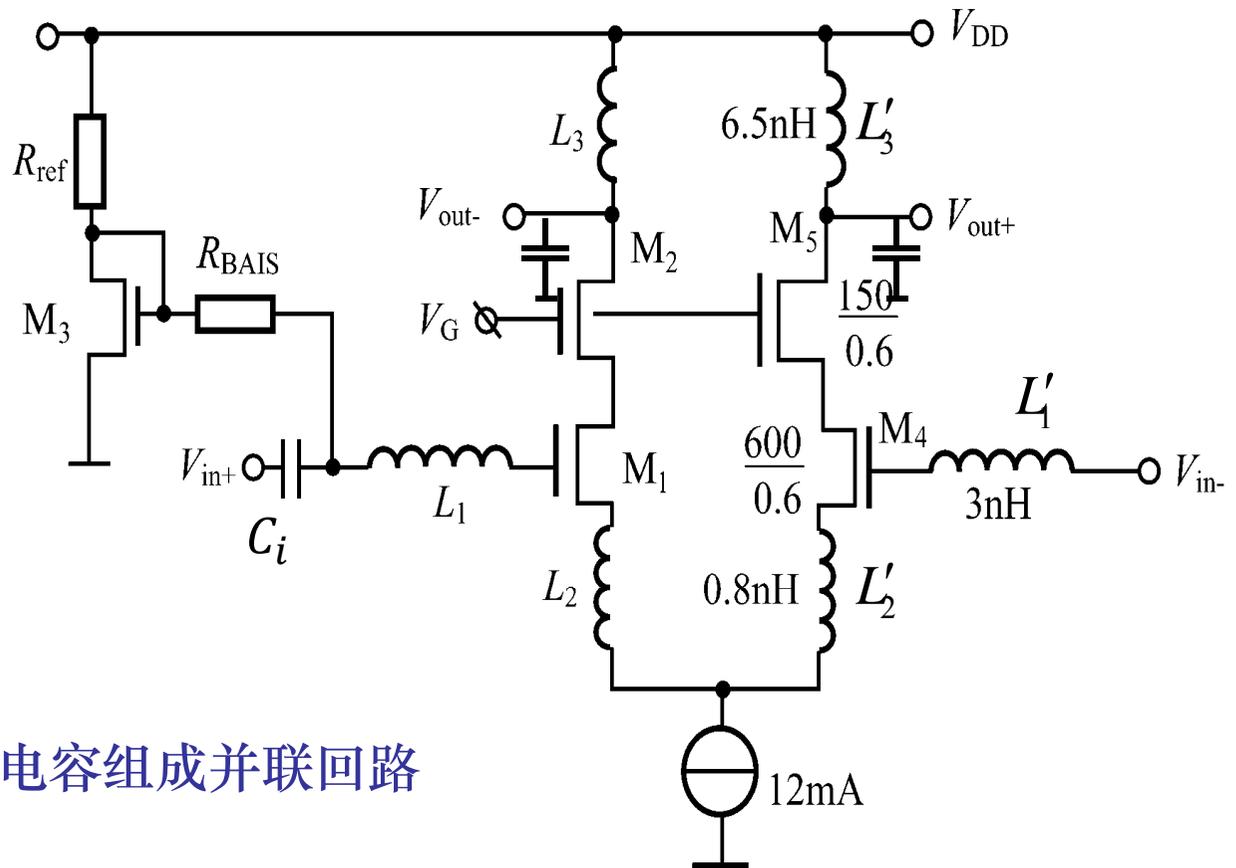


## 例题2——电路3

### 例5.3.2 1.9 GHz CMOS 低噪声放大器

电路特点:

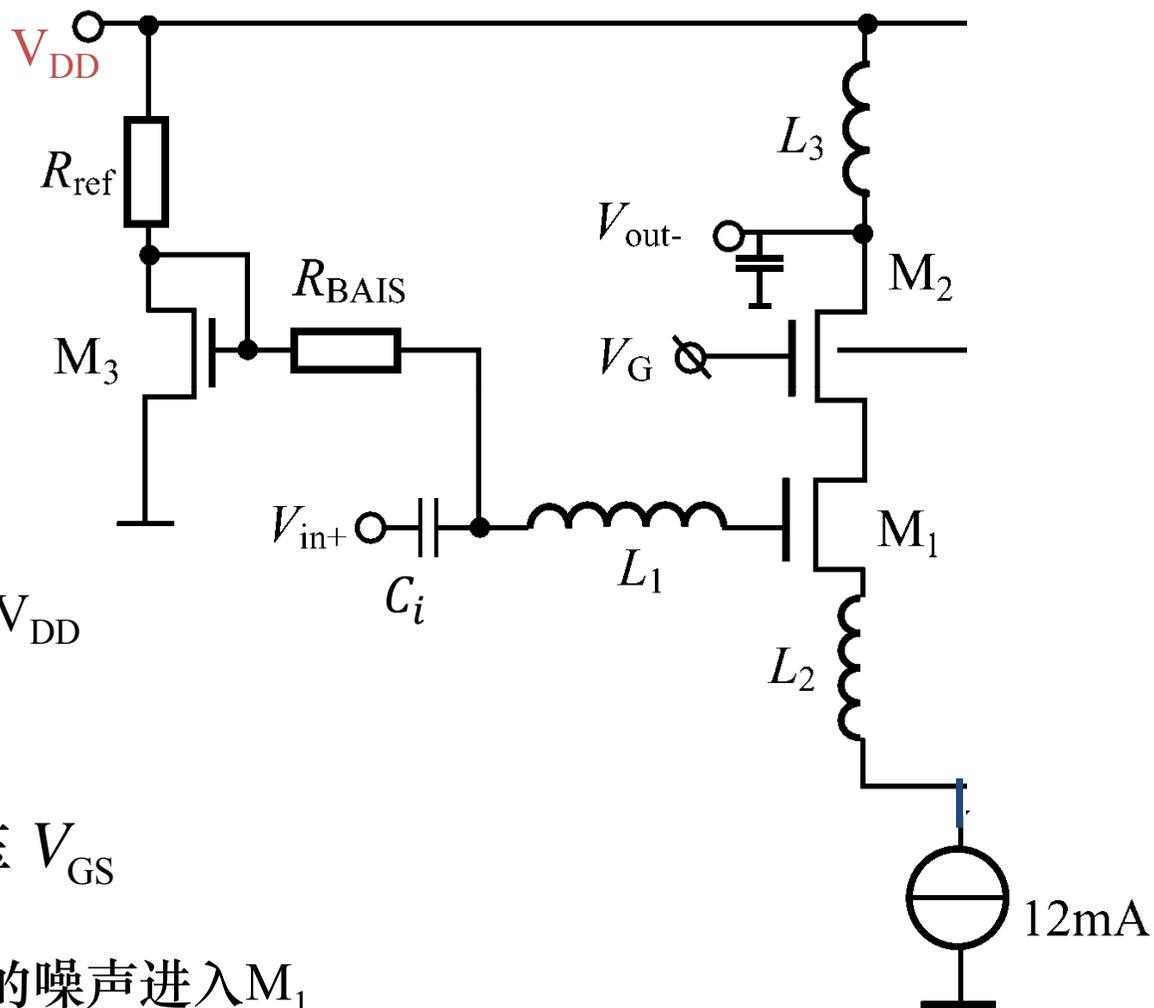
- ① 对称双端输入  
双端输出差分形式
- ② 共源共栅级联电路
- ③ 输入回路串联电感 $L_1$
- ④ 源极电感负反馈 $L_2$
- ⑤ 负载用 $L_3$ 与下级输入电容组成并联回路
- ⑥ 有源偏置



# 电路分析

## (1) 偏置电路

M<sub>3</sub>与M<sub>1</sub>组成镜像电流源



M<sub>3</sub>的电流

- 电源电压  $V_{DD}$
- 电阻  $R_{ref}$
- M<sub>3</sub>的偏压  $V_{GS}$

电阻  $R_{BIAS}$  很大，以阻止M<sub>3</sub>的噪声进入M<sub>1</sub>

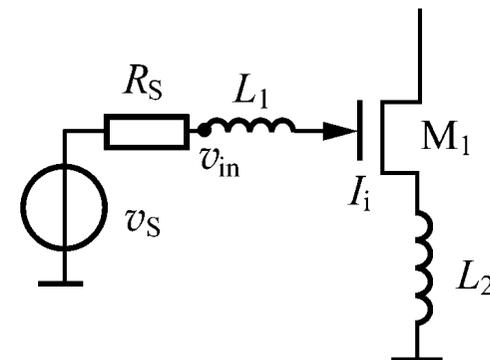
## (2) 输入阻抗匹配

➤ 输入回路方程

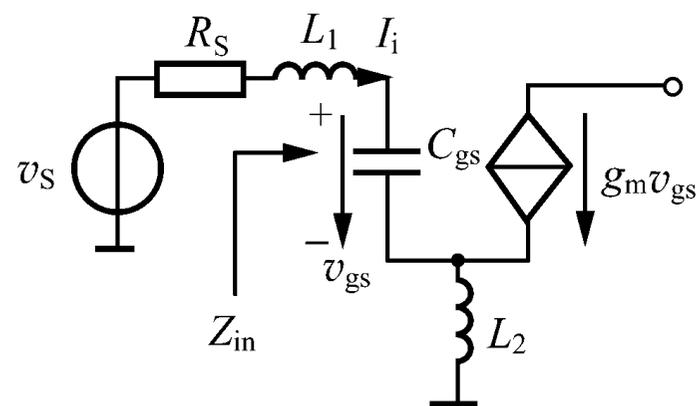
$$v_S = \dot{I}_i R_S + j\dot{I}_i \omega L_1 + \frac{\dot{I}_i}{j\omega C_{gs}} + j\omega L_2 (\dot{I}_i + g_m \dot{V}_{gs})$$

$$\begin{aligned} v_{in} &= j\dot{I}_i \omega L_1 + \frac{\dot{I}_i}{j\omega C_{gs}} + j\omega L_2 (\dot{I}_i + g_m \dot{V}_{gs}) \\ &= j\dot{I}_i \omega L_1 + \frac{\dot{I}_i}{j\omega C_{gs}} + j\omega L_2 \left( \dot{I}_i + g_m \frac{\dot{I}_i}{j\omega C_{gs}} \right) \end{aligned}$$

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_i} = j\omega(L_1 + L_2) + \frac{1}{j\omega C_{gs}} + \frac{g_m}{C_{gs}} L_2$$



输入电路



代入场效应管  
等效电路的输入级

## (2) 输入阻抗匹配

➤ 输入阻抗

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_i} = j\omega(L_1 + L_2) + \frac{1}{j\omega C_{gs}} + \frac{g_m}{C_{gs}} L_2$$

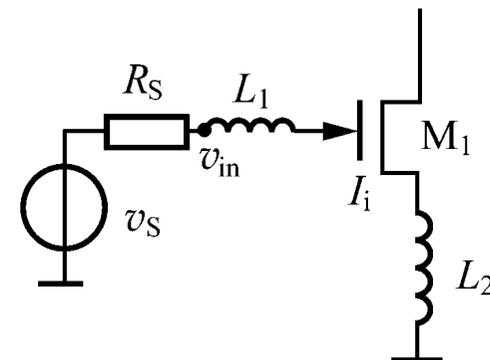
➤ 调谐输入回路串联谐振于工作频率

$$\omega_{RF} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2)C_{gs}}}$$

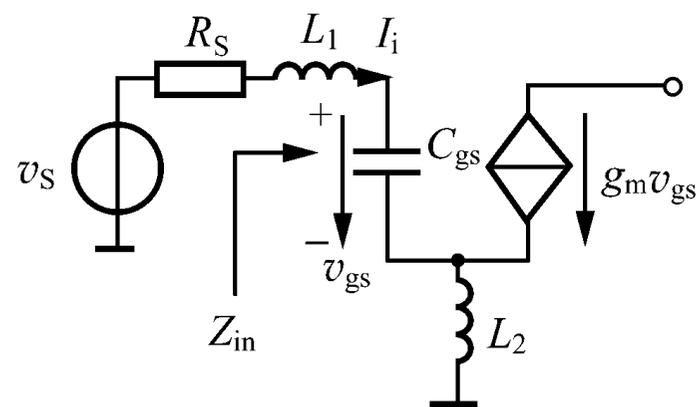
➤ 与源阻抗匹配

$$R_S = \frac{g_m}{C_{gs}} \cdot L_2$$

调节



输入电路



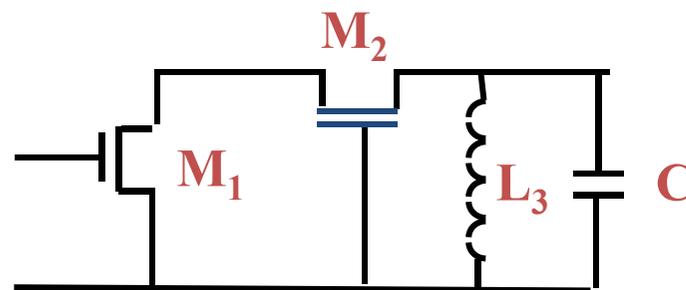
代入场效应管  
等效电路的输入级

### (3) 噪声

仅考虑由场效应管 $M_1$ 的沟道电阻噪声  $F = 1 + \gamma \frac{1}{R_S} \cdot \frac{1}{g_m} \frac{1}{Q_{in}^2}$   
 $Q_{in}$ 为输入回路的有载 $Q$

### (4) 增益

共源共栅级连、负载 $LC$ 回路



### (5) 线性

双端输入和输出差分对结构  
源极采用电感 $L_2$ 负反馈匹配

} 扩大线性范围

### (6) 隔离

共源共栅接连组态——失配法，提升了输入输出间的隔离性

# 本章要点

---

- 掌握晶体管的混 $\pi$ 参数等效电路
- 掌握单级小信号调谐放大器的电路结构、工作原理
- 掌握求解放大器电路增益、带宽和选择性等指标的方法
- 了解晶体管静态工作点与其小信号等效参数的关系
- 了解实现低噪声放大器的基本思路和具体电路措施



# 作业

---

- 5-3、5-6、5-7、5-9<sub>(1,2,4)</sub>

