



CMOS模拟集成电路设计

第三章：噪声

胡远奇

©2020



噪声 Noise

- **噪声的特点**
- 系统中的噪声
- 电阻的热噪声
- 晶体管的噪声源
- 等效噪声的换算

>>> 噪声

- 为什么它很重要?
- 信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)
 - 信号功率 $P_{\text{sig}} \sim V_{\text{DD}}^2$
 - 噪声功率 $P_{\text{noise}} \sim kT/C$
 - $\text{SNR} = P_{\text{sig}} / P_{\text{noise}}$
- 工艺演进
 - V_{DD} 下降 \rightarrow SNR 下降
 - 保持 SNR \rightarrow 增加 $C \rightarrow$ 功耗提升
- 优秀的低功耗设计意味着对噪声的充分了解

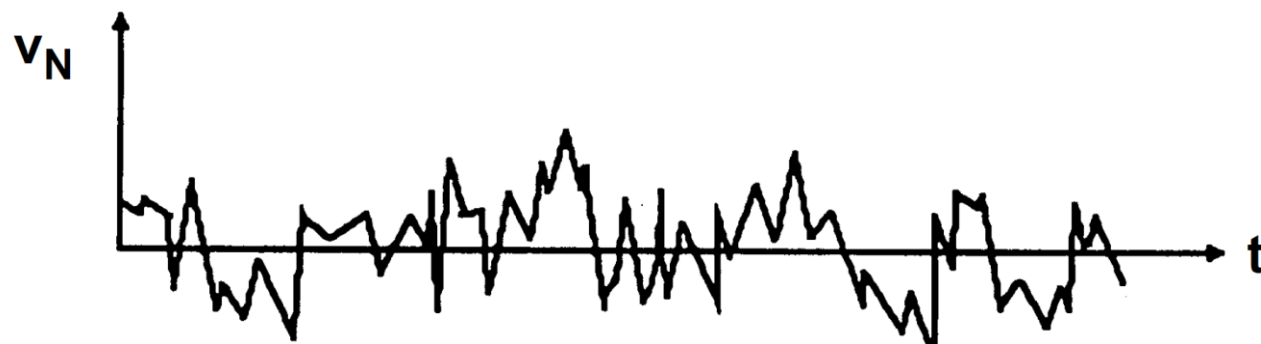


噪声的类型

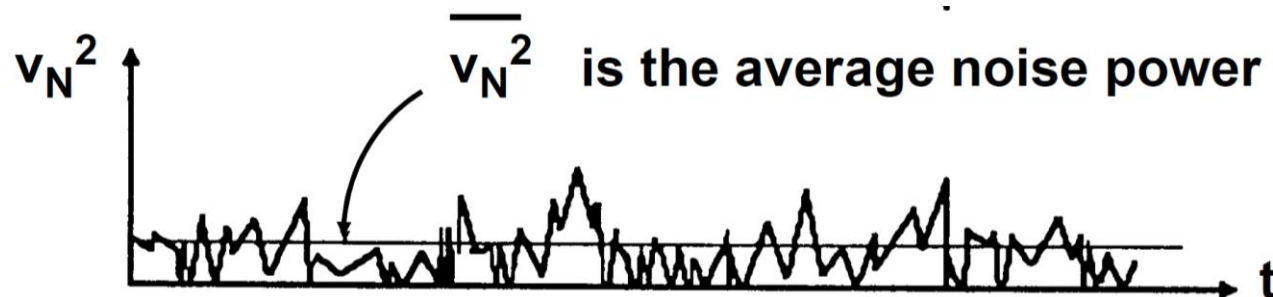
- 干扰（人为造成的）
 - 信号耦合
 - 电容
 - 电感
 - 基底
 - 键合线
 - 电源噪声
 - 解决方案：差分电路、版图技巧
- **器件噪声**
 - 由电荷的不连续性造成
 - 根本性的噪声

>>> 噪声

- 时域上的表现形式：随机出现，通过概率表征

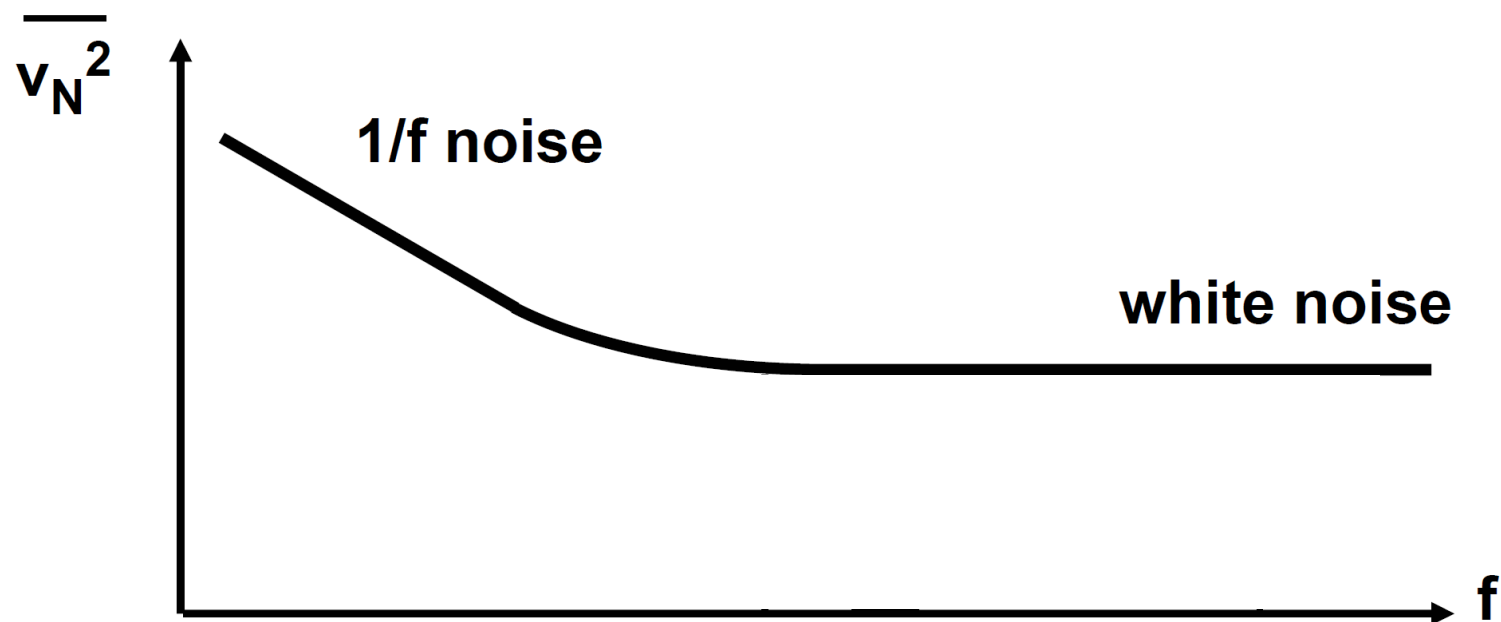


- 噪声的强度通过平均功率表达



>>> 噪声

- 频域上的表现形式:

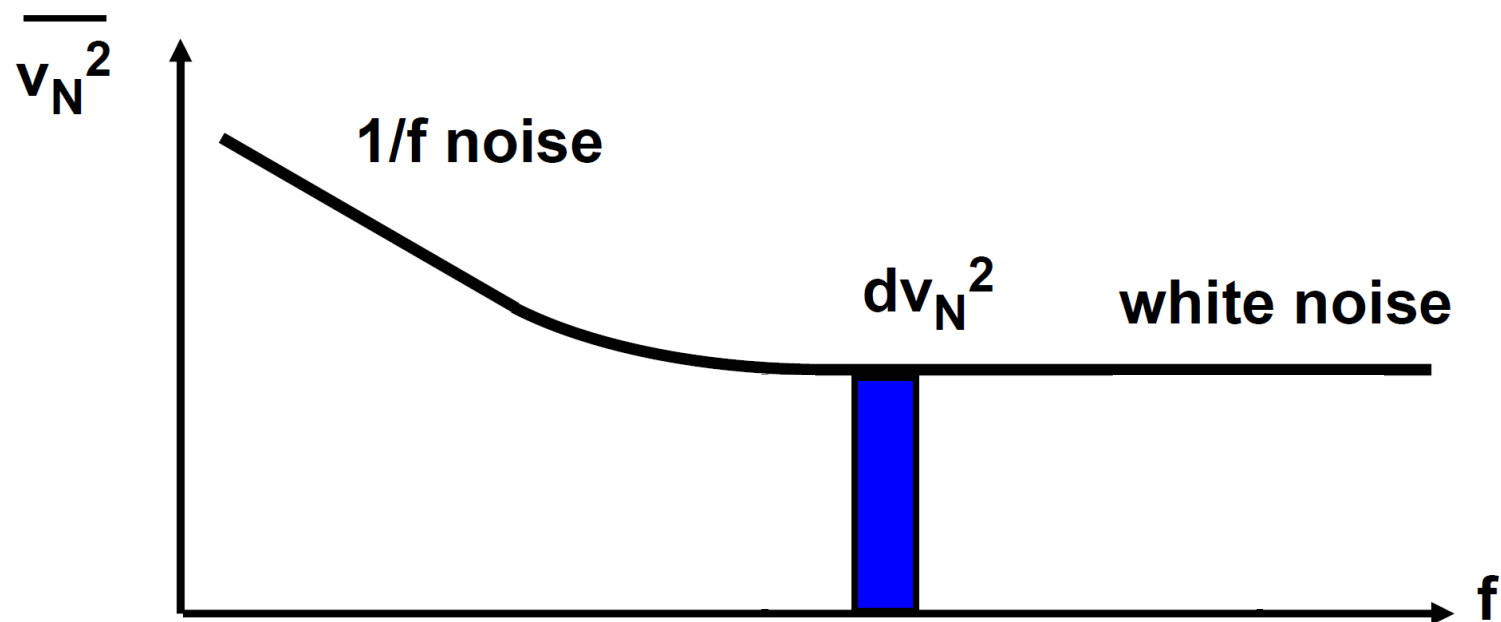


- 低频区域**闪烁噪声**
(Flicker Noise)

- 高频区域**白噪声**

>>> 噪声

- 频域上的表现形式:

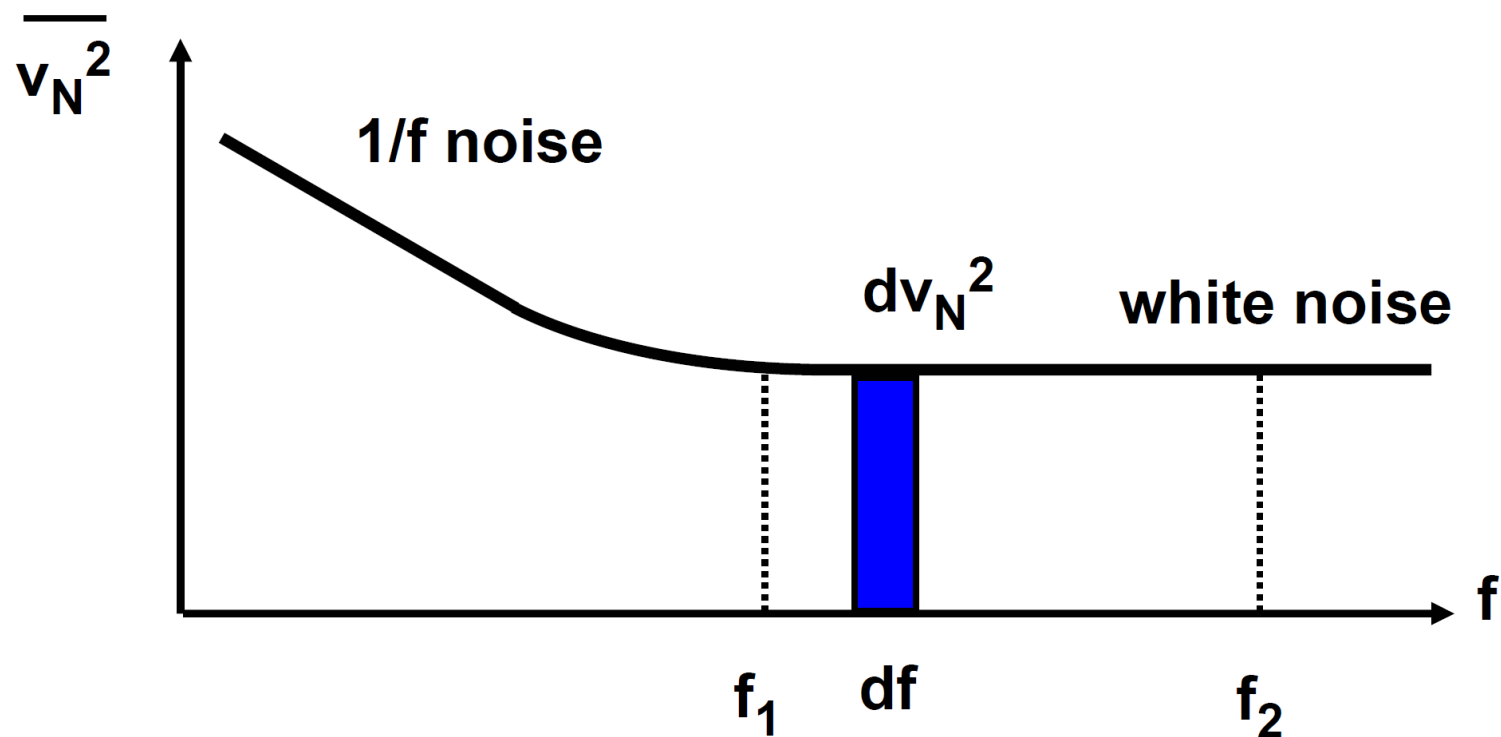


- 噪声的**功率谱密度**: V^2/Hz

- **如何计算总噪声?**

>>> 噪声

- 频域上的表现形式:



- 积分噪声: $\overline{v_{N,int}^2} = \int_{f_1}^{f_2} d\overline{v_N^2} df = (f_2 - f_1) \overline{v_N^2}$

»» 噪声

- 当我们描述一个噪声时，通常的形式是：
 1. 特定**频率**下表述其**功率谱密度**（均方根）
 2. 一定**带宽**内，表述其**积分噪声**总量



噪声 Noise

- 噪声的特点
- **系统中的噪声**
- 电阻的热噪声
- 晶体管的噪声源
- 等效噪声的换算

噪声因子(Noise Factor)

- 一个系统噪声性能的衡量指标:

$$\text{噪声因子} F = \frac{\text{总的噪声输出功率}}{\text{输入噪声源引起的噪声功率}}$$

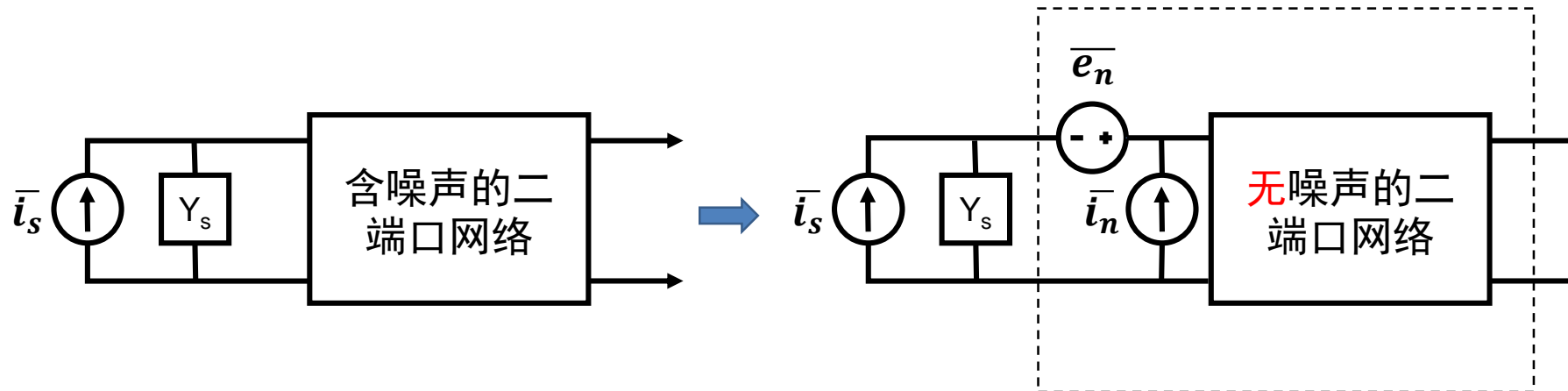


图：噪声源驱动一个含噪声的二端网络

>>> 噪声因子(Noise Factor)

- 一个系统噪声性能的衡量指标:

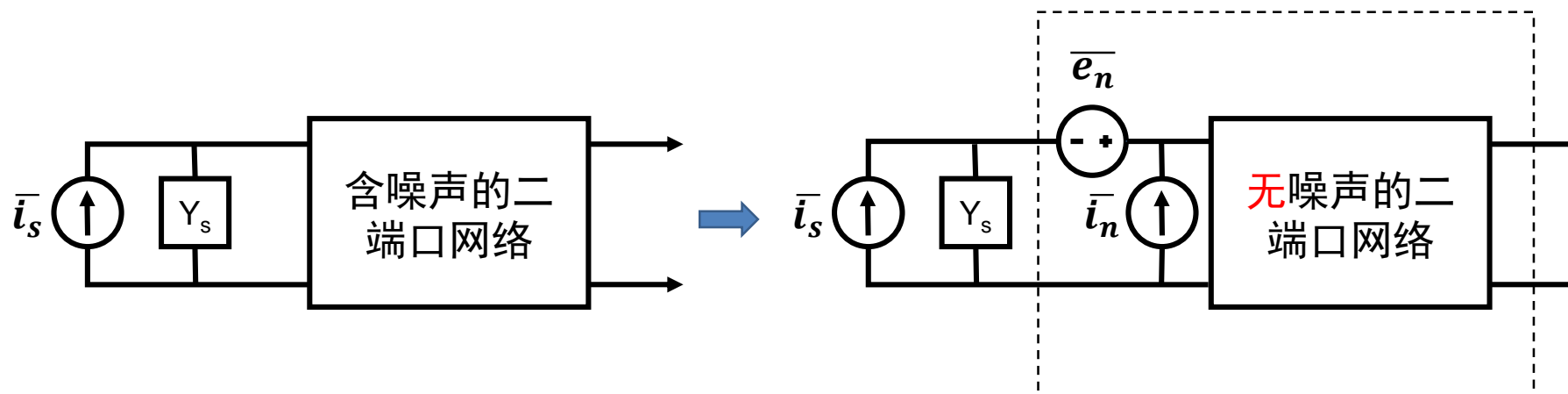
$$\text{噪声因子 } F = \frac{\text{总的噪声输出功率}}{\text{输入噪声源引起的噪声功率}}$$



- 通常我们更关注系统或电路的**输入参考**噪声 (Input-Referred Noise)

>>> 噪声因子(Noise Factor)

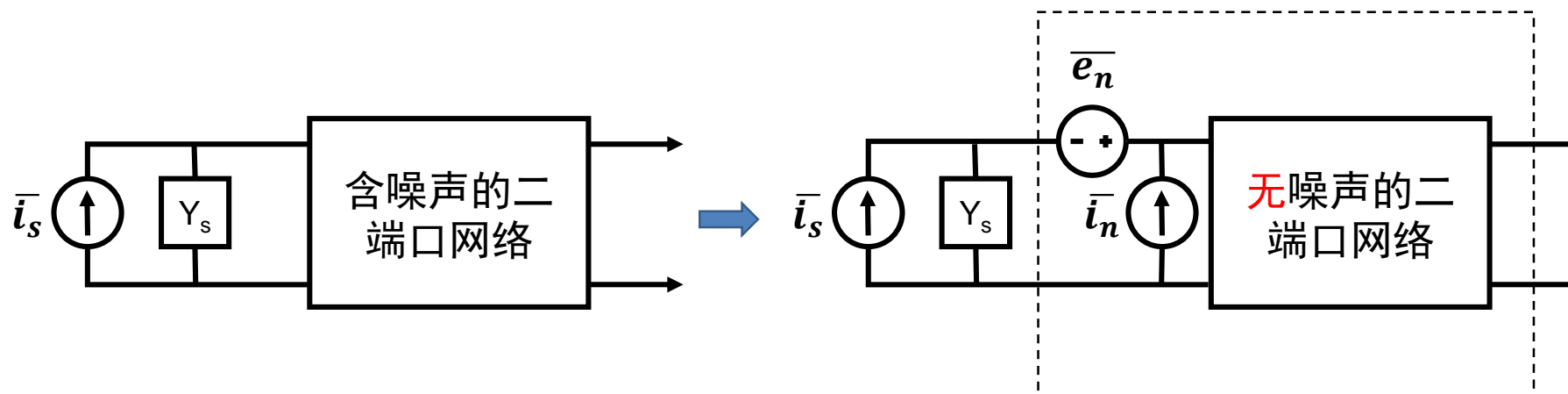
- 一个系统噪声性能的衡量指标:



噪声因子 $F =$

噪声因子(Noise Factor)

- 一个系统噪声性能的衡量指标:

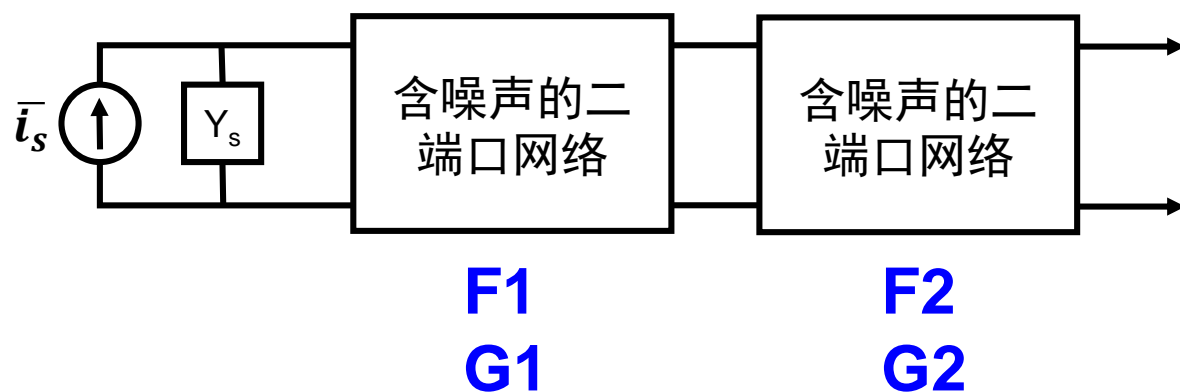


$$\text{噪声因子} F = \frac{\overline{i_s^2} + \overline{|i_n + Y_s e_n|^2}}{\overline{i_s^2}} = \frac{SNR_{IN}}{SNR_{OUT}}$$

- 注意: 输入参考噪声电压/电流 e_n 和 i_n 可能具有相关性

噪声因子(Noise Factor)

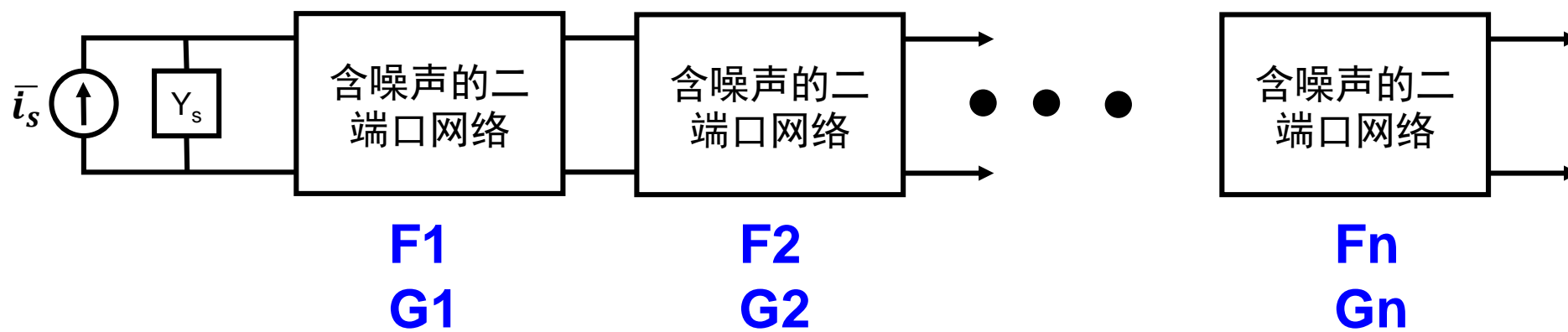
- 一个两级系统的噪声指标:



$$\text{总噪声因子 } F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

噪声因子(Noise Factor)

□求一个n级系统的噪声指标?



$$\text{总噪声因子} F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_n}$$

噪声因子最低的系统在第一级!



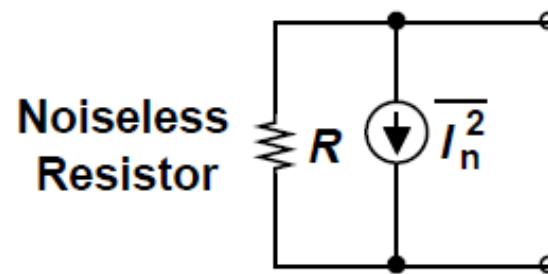
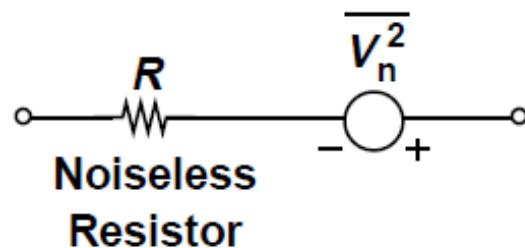
噪声 Noise

- 噪声的特点
- 系统中的噪声
- **电阻的热噪声**
- 晶体管的噪声源
- 等效噪声的换算



电阻的热噪声

- 电阻的热噪声既可以用串联电压源表示，也可以用并联电流源来表示：

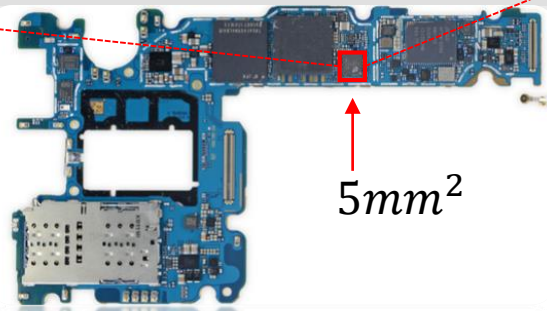
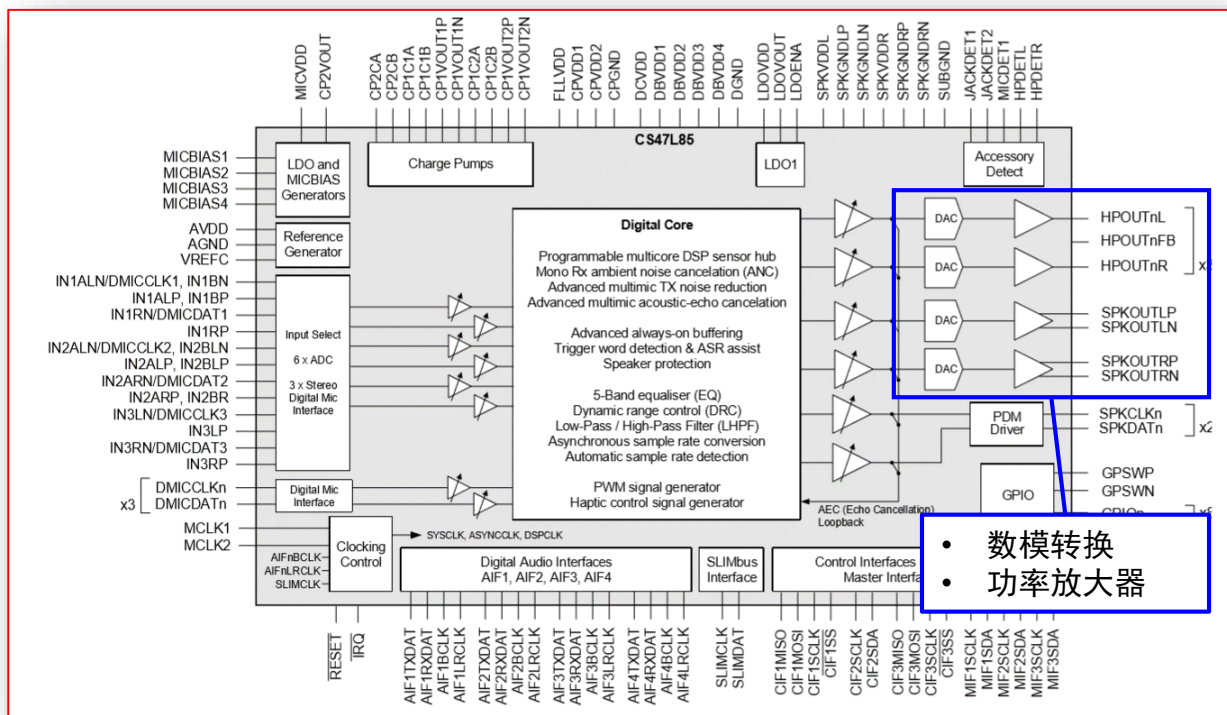


功率谱： $\overline{dv_n^2} = 4kTR$ $\overline{di_n^2} = 4kT/R$

已知 $R=1\text{k}\Omega$, $T=300\text{K}$, $\sqrt{\overline{dv_n^2}} = 4\text{nV}_{\text{RMS}}/\sqrt{\text{Hz}}$



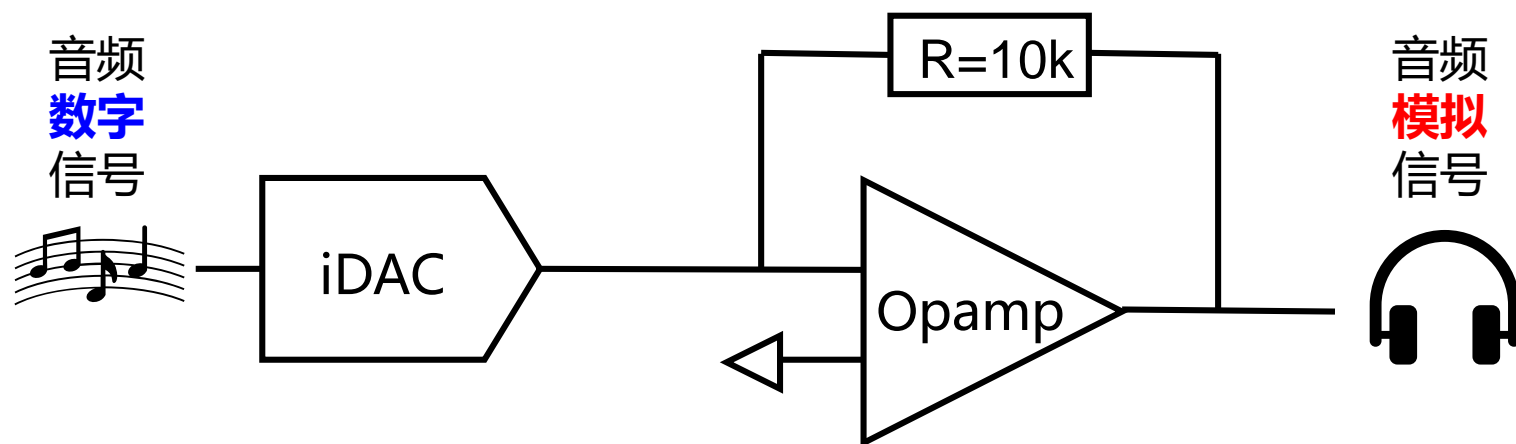
电阻的热噪声





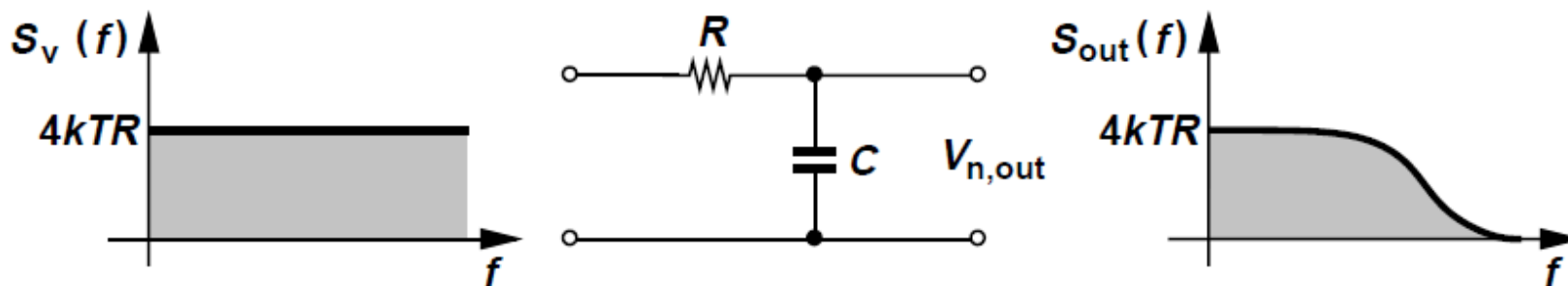
电阻的热噪声

□ 有一音频功放系统，它的基本模块如下图所示，求该系统输出的理论最小噪声？（20-20KHz）





电阻的积分噪声



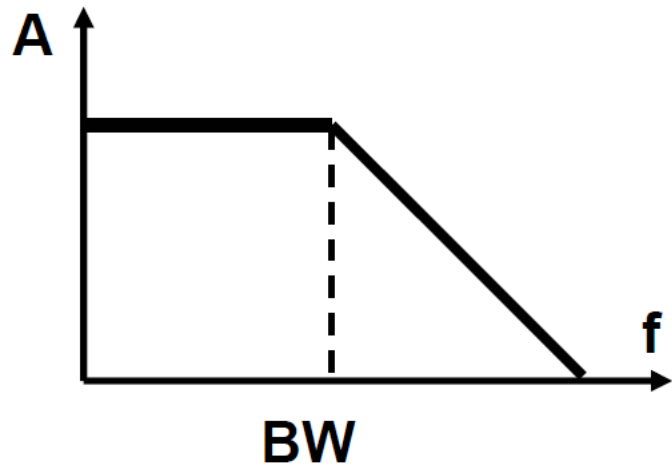
$$\overline{dv_n^2} = 4kTR$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + s \cdot RC}$$

$$\overline{v_n^2} = \int_0^{\infty} 4kTR \cdot H^2(s) ds$$

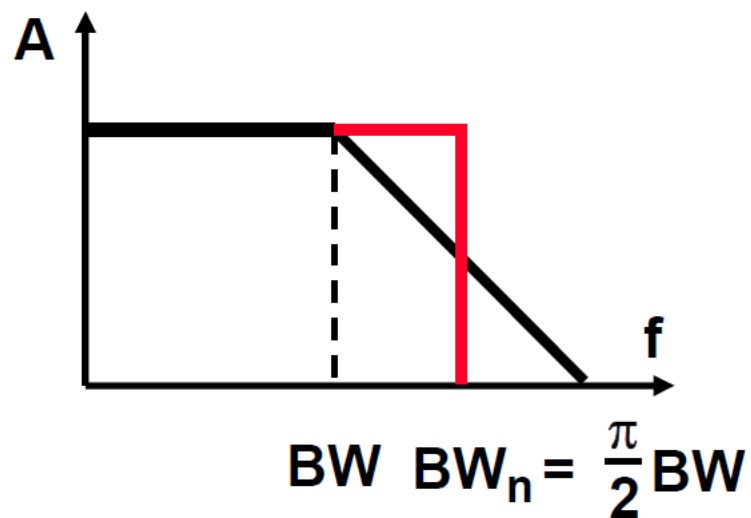


电阻的积分噪声



$$\int_0^{\infty} \frac{1}{1 + (\omega RC)^2} d\omega$$

>>> 电阻的积分噪声



$$\int_0^{\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \frac{\pi}{2}$$

$$\overline{v_n^2} = 4kTR \cdot \frac{1}{2\pi RC} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{kT}{C}$$

$$C_L = 1\text{pF时}$$
$$v_s = 65\mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

- 所有**开关采样**电路的噪声极限由该公式表达



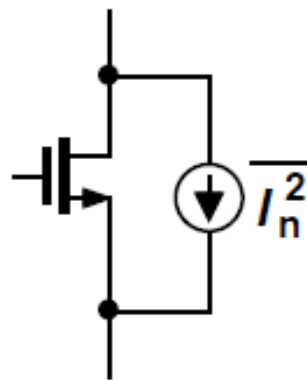
噪声 Noise

- 噪声的特点
- 系统中的噪声
- 电阻的热噪声
- **晶体管的噪声源**
- 等效噪声的换算



晶体管的噪声

- 晶体管的**沟道电阻**和其他电阻一样，也会产生热噪声



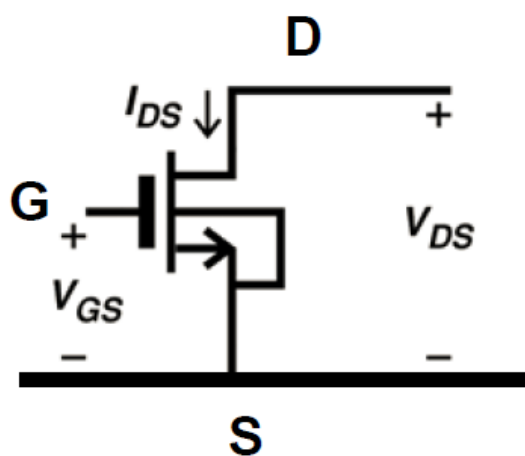
$$\overline{di_n^2} = 4kT/R = 4kT\gamma g_m$$

$$\gamma \approx \frac{2}{3} \text{ for } > 0.35\mu\text{m}; \approx 1 \text{ for } 0.18\mu\text{m}; \approx \frac{4}{3} \text{ for } 0.13\mu\text{m}$$

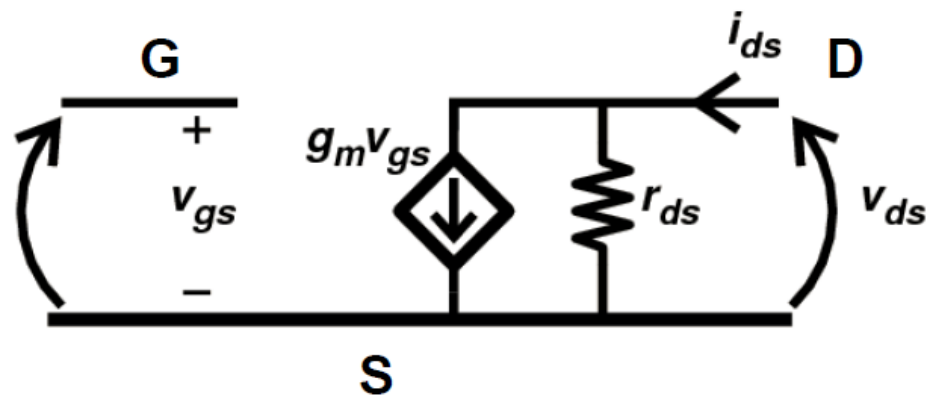


晶体管的噪声

- 晶体管的**输入电阻**和其他电阻一样，也会产生热噪声
- 无噪声小信号模型：



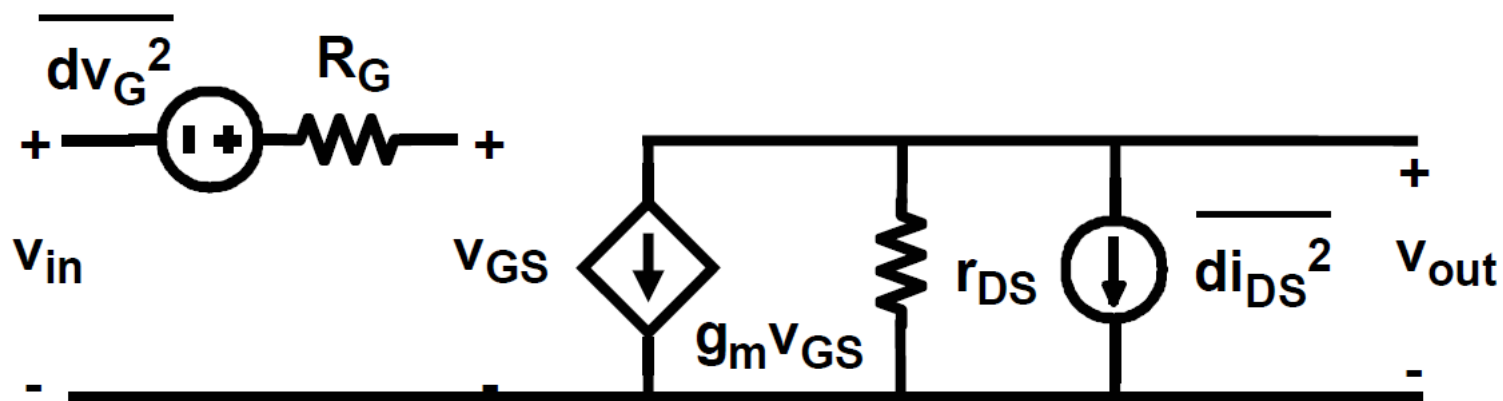
Small-signal equivalent model





晶体管的噪声

- 含噪声小信号模型：



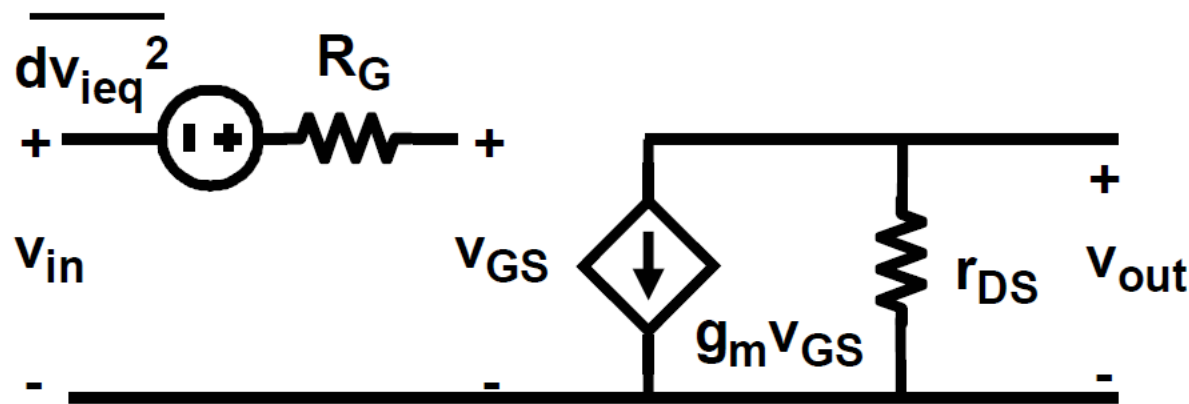
$$\overline{dv_G^2} = 4kT R_G df$$

$$\overline{di_{DS}^2} = \frac{4kT}{R_{CH}} df = 4kT \frac{2}{3} g_m df$$



晶体管的噪声

- 输入等效噪声小信号模型：



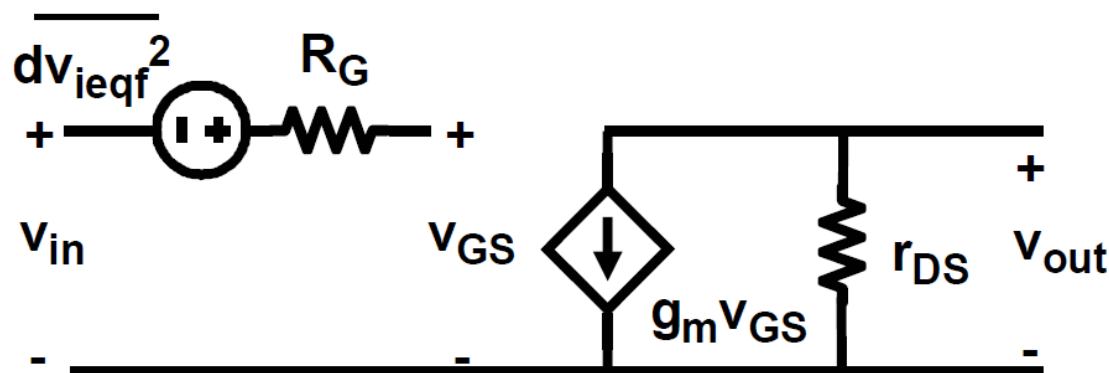
$$\overline{dv_{ieq}^2} = 4kT (R_{eff}) df \quad R_{eff} = \frac{2/3}{g_m} + R_G$$

- 高频时，**电流**可以通过 C_{GS} ，因此也需考虑，同时需注意与输入噪声电压**相关**



晶体管的噪声

- 输入等效噪声小信号模型：**1/f** 噪声



$$\overline{dv_{ieqf}^2} = \frac{KF_F}{WL C_{ox}^2} \frac{df}{f}$$

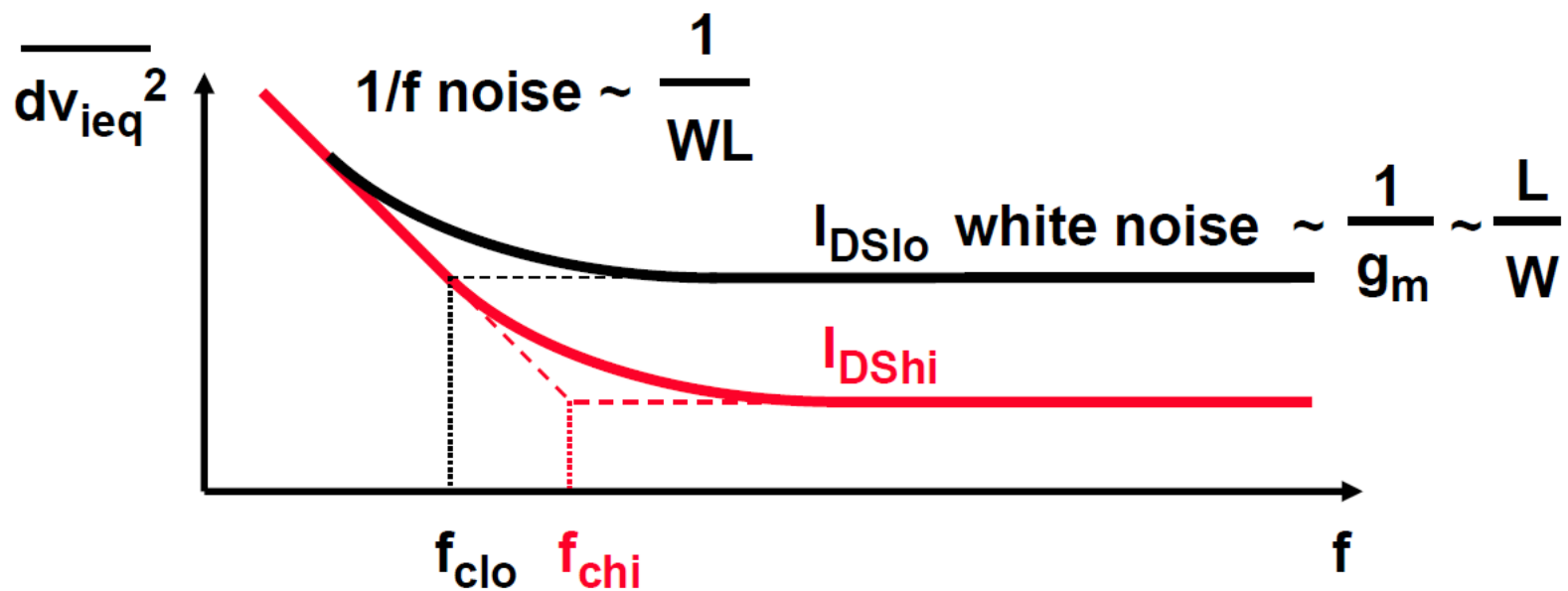
pMOST $KF_F \approx 10^{-32} \text{ C}^2/\text{cm}^2$
nMOST $KF_F \approx 4 \cdot 10^{-31} \text{ C}^2/\text{cm}^2$

W & L in cm; C_{ox} in F/cm^2

- NMOS的闪烁噪声是PMOS的**40**倍!



晶体管的噪声：转角频率



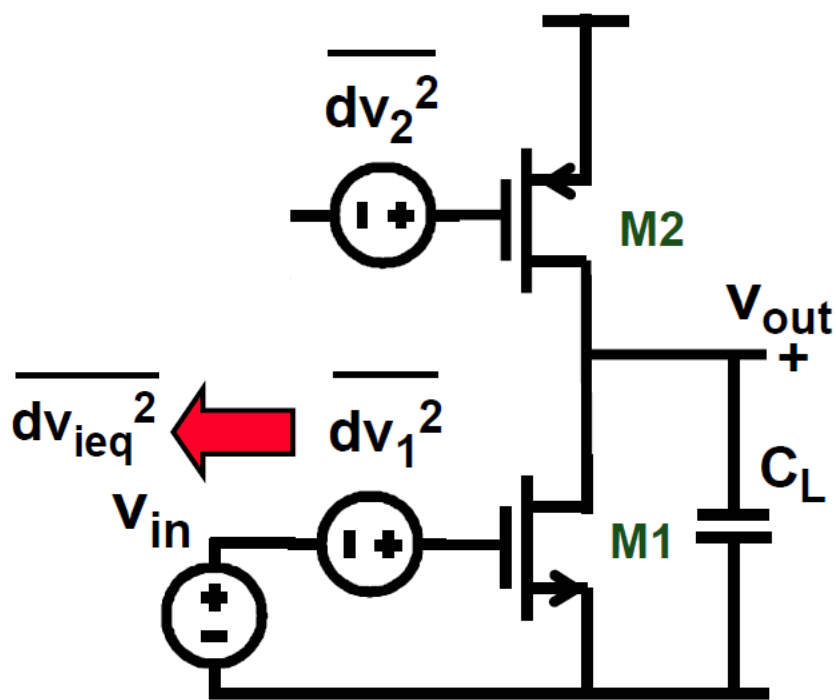
- 偏置电流越大，白噪声越低，拐角频率越大



噪声 Noise

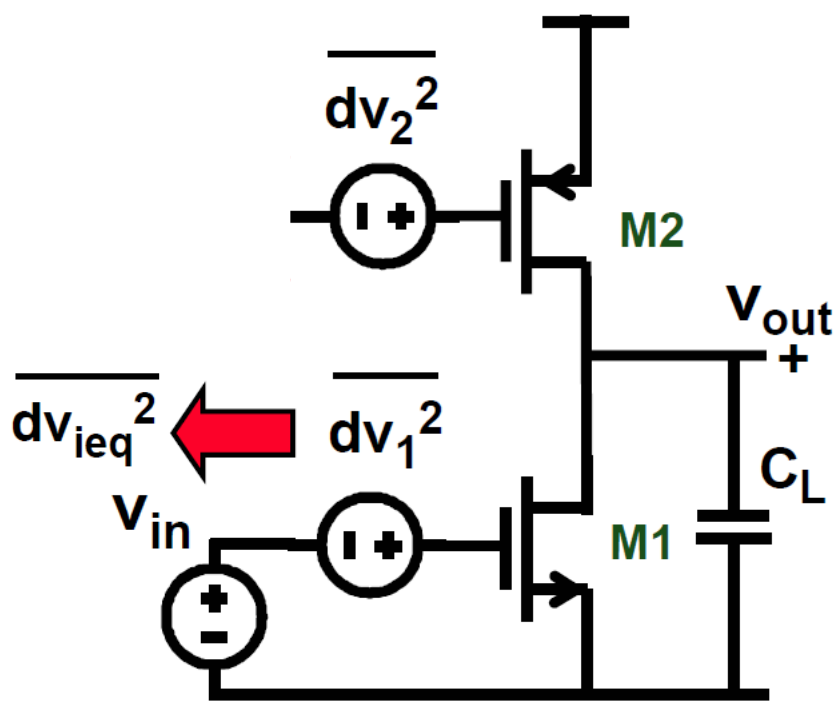
- 噪声的特点
- 系统中的噪声
- 电阻的热噪声
- 晶体管的噪声源
- **等效噪声的换算**

>>> 放大器的噪声



- M1为单晶体管放大器;
M2为有源负载
- v_1 和 v_2 为晶体管M1/M2的输入噪声
- 分析等效输入噪声?

>>> 放大器的噪声



$$\overline{di_{out}^2} = g_{m1}^2 \overline{dv_1^2} + g_{m2}^2 \overline{dv_2^2}$$

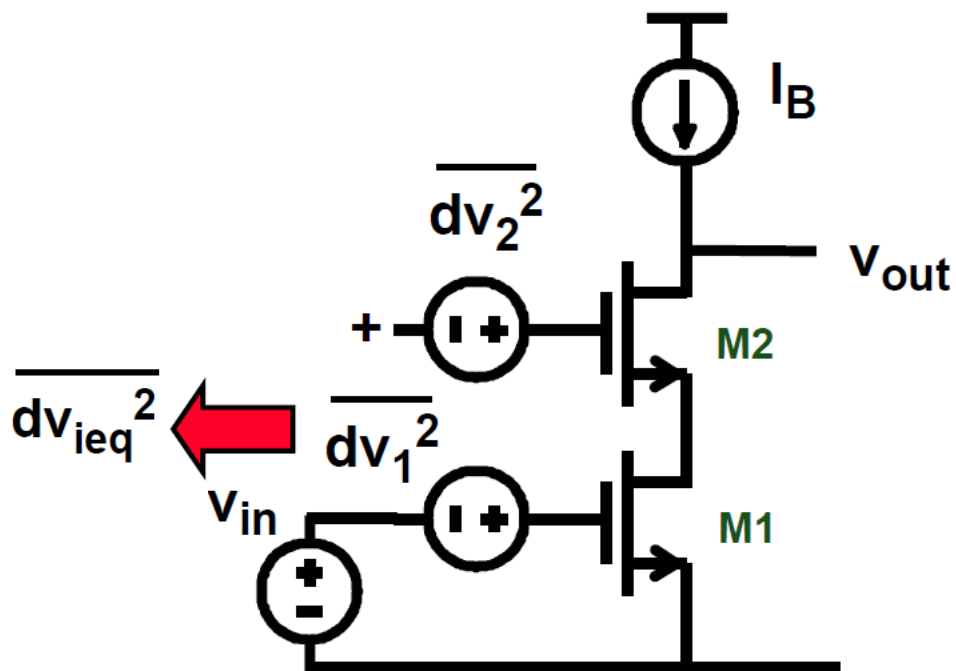
$$\overline{dv_{ieq}^2} = \overline{dv_1^2} \left(1 + \frac{g_{m2}}{g_{m1}} \right)$$

- M1为单晶体管放大器;
M2为有源负载
- v_1 和 v_2 为晶体管M1/M2
的输入噪声
- 分析等效输入噪声?

$g_{m2} \downarrow$	{	$W/L \downarrow$
		$V_{GS} - V_T \uparrow$



Cascode的噪声

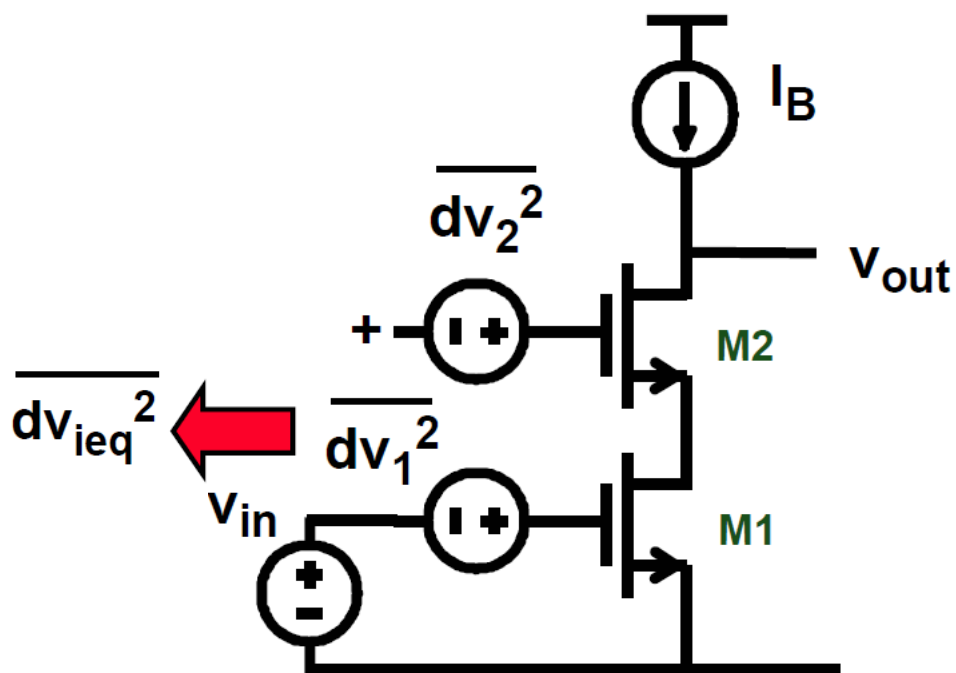


- M1为单晶体管放大器;
M2为Cascode级
- v_1 和 v_2 为晶体管
M1/M2的输入噪声

□ 分析等效输入噪声?



Cascode的噪声



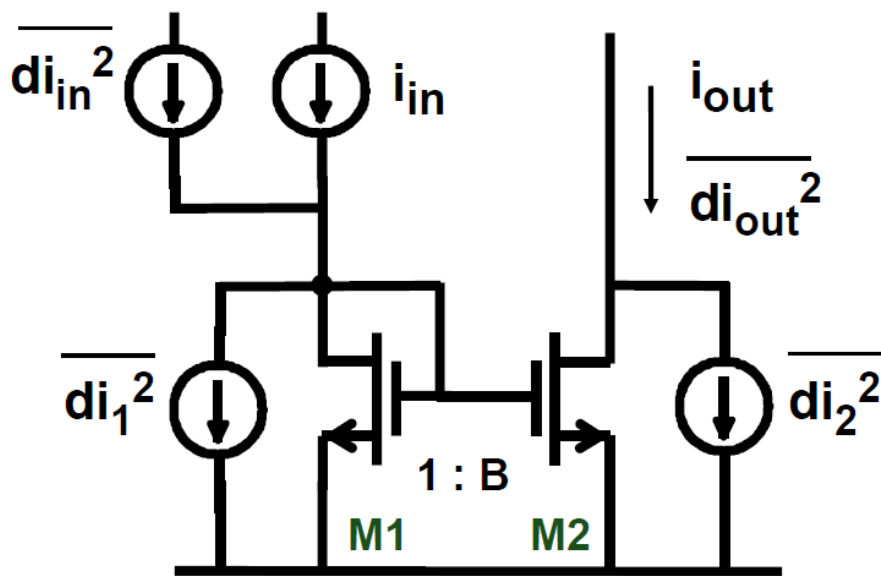
- M1为单晶体管放大器；
M2为Cascode级
- v_1 和 v_2 为晶体管
M1/M2的输入噪声
- 分析等效输入噪声？

$$\overline{dv_{ieq}^2} = \overline{dv_1^2} + \overline{dv_2^2} \frac{1}{(g_{m1} r_{o1})^2} \approx \overline{dv_1^2}$$

Cascode 晶体管M2的噪声忽略不计



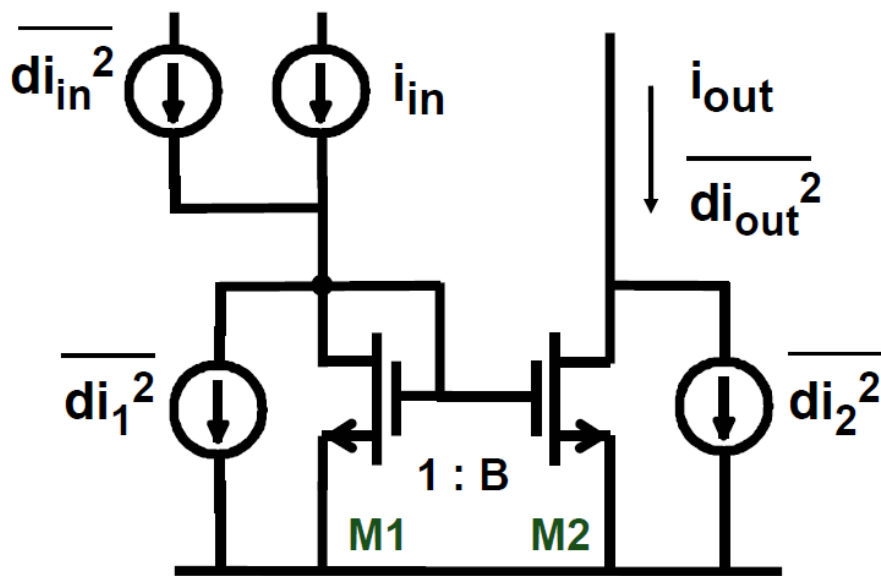
电流镜的噪声



- M1/M2 为放大比例为B的电流镜
- i_1 和 i_2 为晶体管M1/M2的沟道噪声电流
- i_{in} 为输入噪声电流

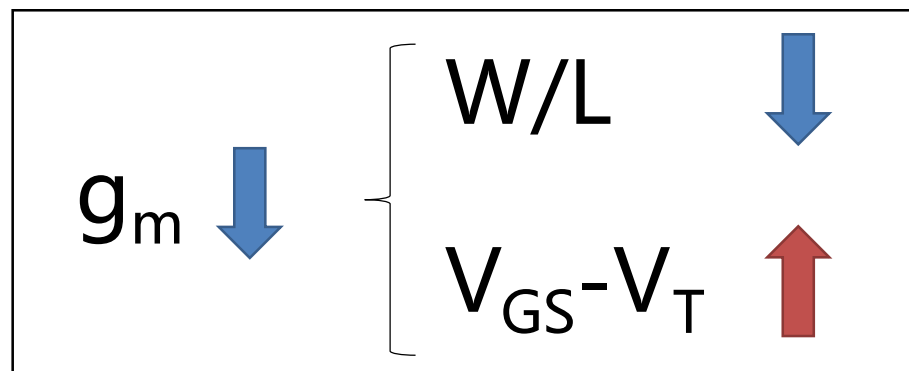


电流镜的噪声



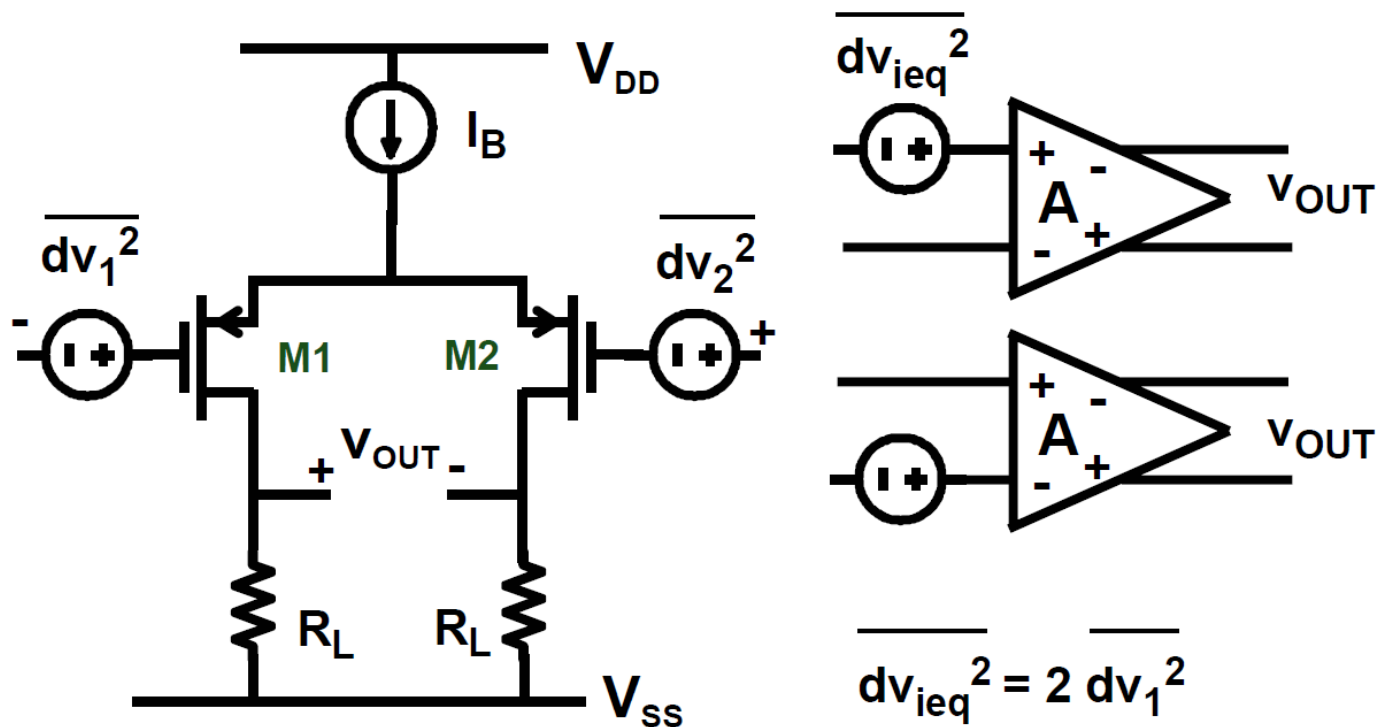
- M1/M2 为放大比例为B的电流镜
- i_1 和 i_2 为晶体管M1/M2的沟道噪声电流
- i_{in} 为输入噪声电流

$$\overline{di_{out}^2} = \overline{di_2^2} + B^2 (\overline{di_{in}^2} + \overline{di_1^2})$$





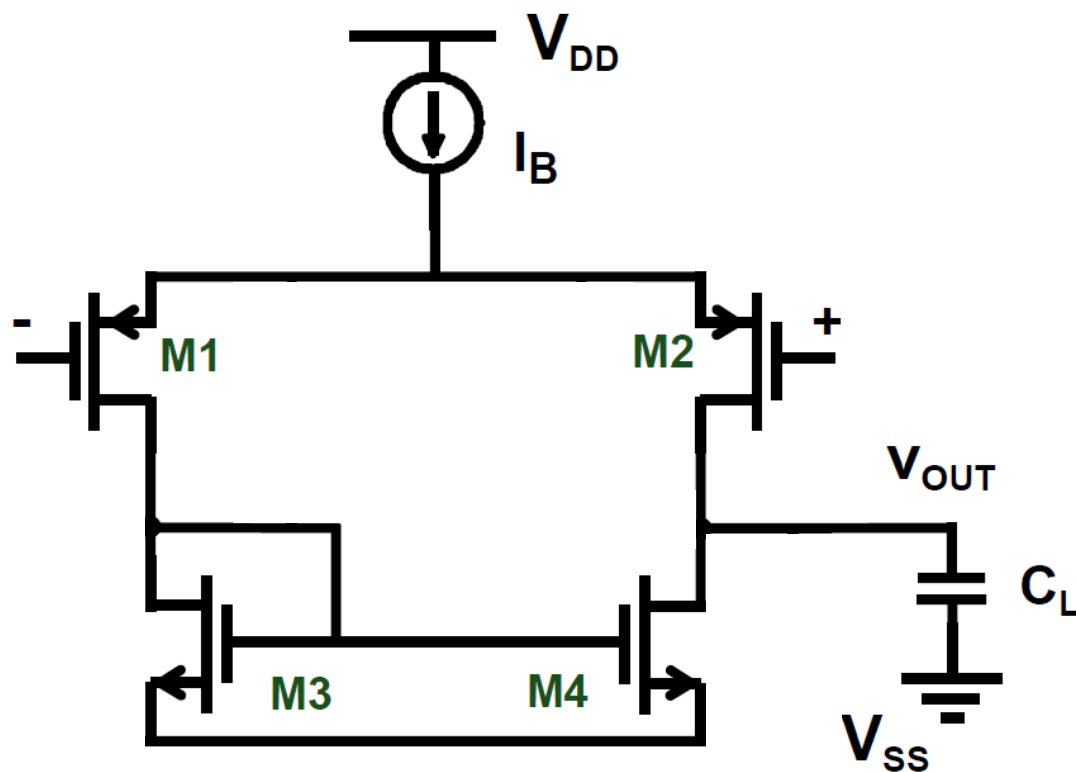
差分对的噪声



差分对的噪声即为两个输入晶体管噪声的和

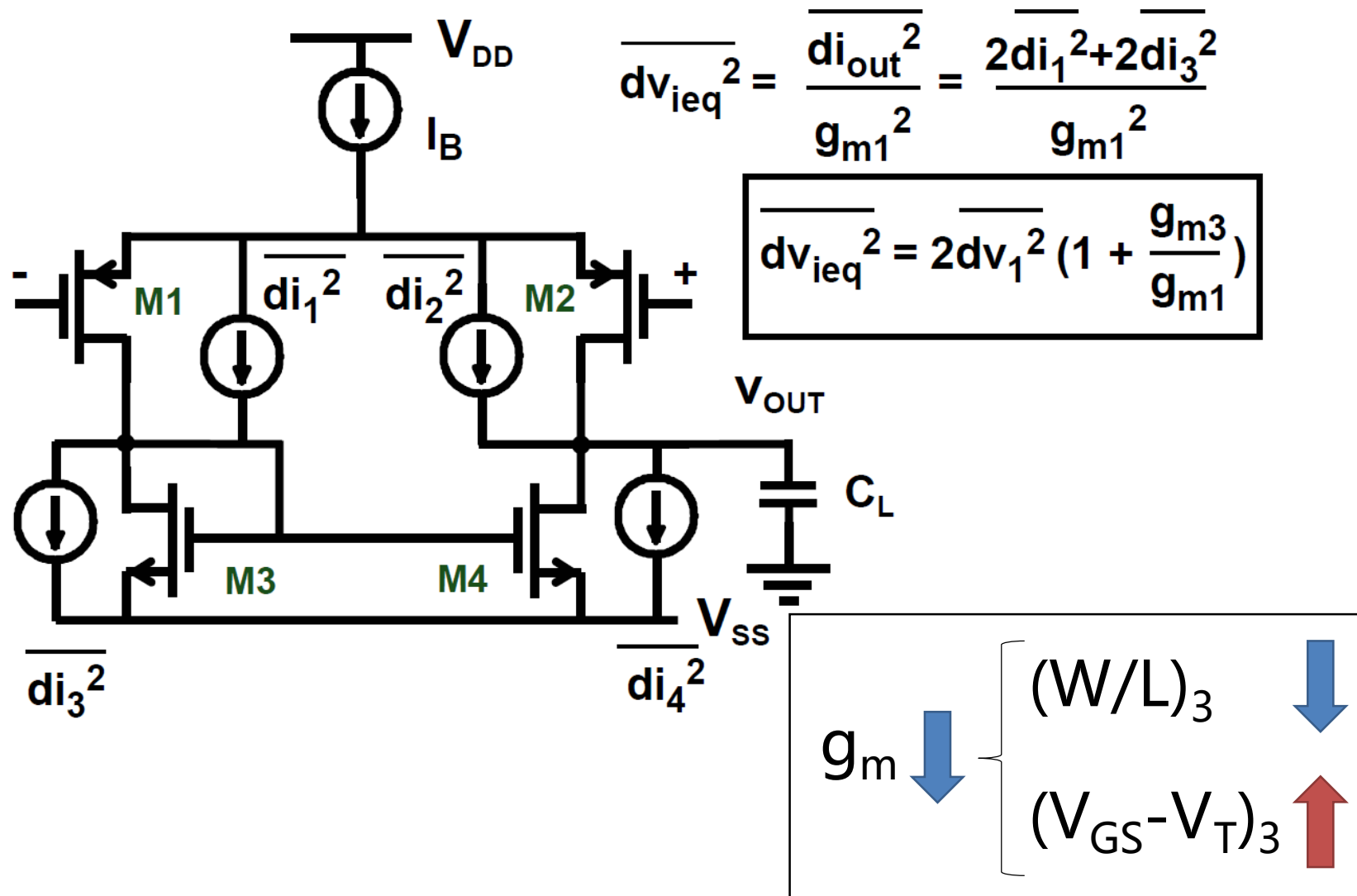


典型运放的噪声



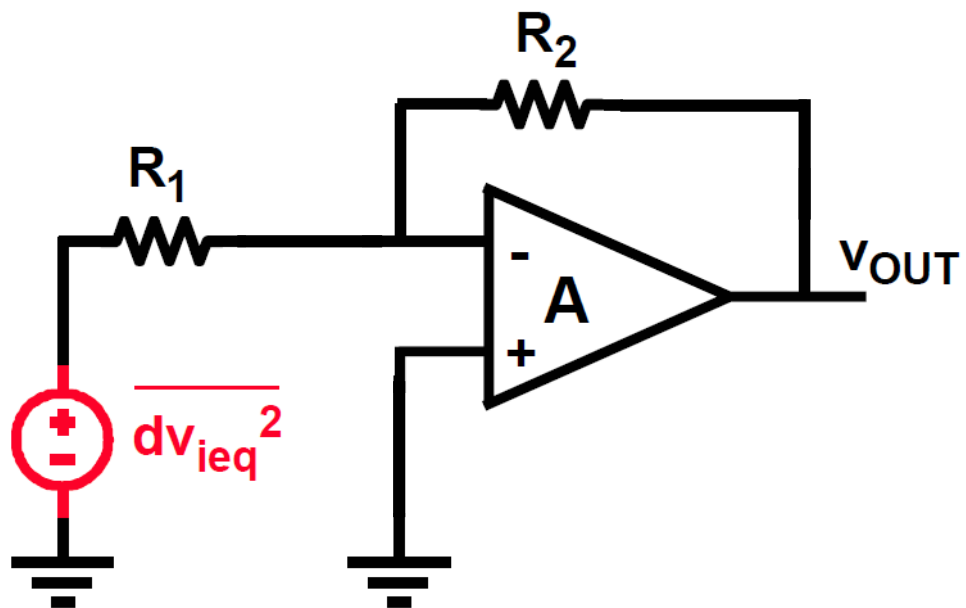


典型运放的噪声



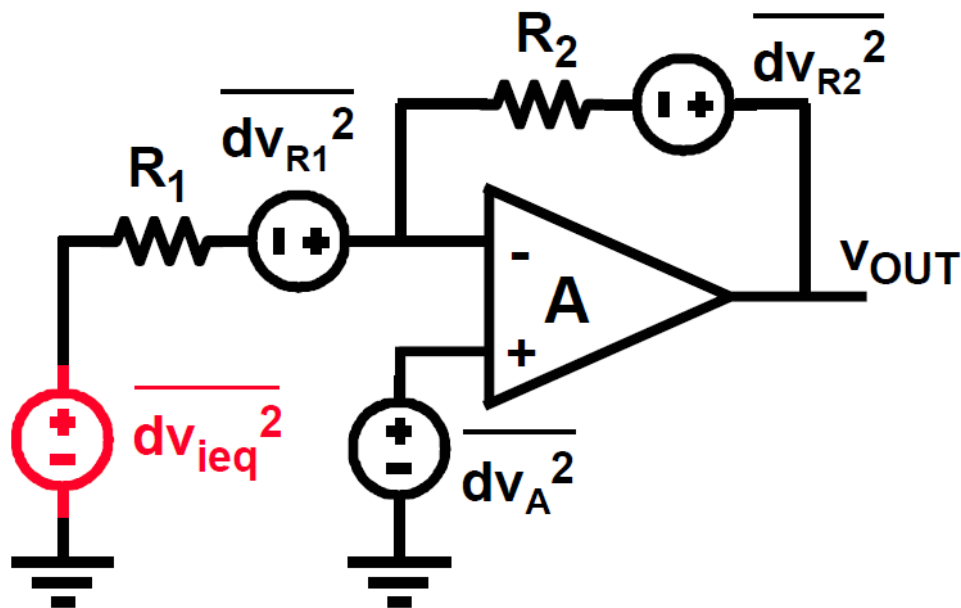


典型运放的噪声





典型运放的噪声



$$dv_{ieq}^2 = \Sigma dv_{out}^2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2$$

$$dv_{out}^2 = dv_{R1}^2 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2$$

$$dv_{out}^2 = dv_{R2}^2$$

$$dv_{out}^2 = dv_A^2 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)^2$$

$$dv_{ieq}^2 = dv_{R1}^2 + dv_{R2}^2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 + dv_A^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \approx dv_{R1}^2 + dv_A^2$$



设计思路总结

1. 噪声通过功率表述
2. 注意噪声源之间的相关性
3. 对于系统噪声性能的分析需要转换成输入参考噪声
4. 输入参考的转换参考电路的跨导计算等

>>> 作业

1. 自由确定晶体管的尺寸，通过仿真寻找NMOS和PMOS的 $1/f$ 噪声的系数 KF ，以及热噪声系数 γ
2. 对一偏置电流为 $100\mu\text{A}$ 的五管OTA，通过晶体管的设计，使其等效输入噪声的80%来源于差分对M1和M2。

