

# 第一次作业

韦 先

本次实验使用 aether 平台进行仿真。由于手工计算部分并不是特别多，我选择把手工计算的过程敲在了 word 中。

## 作业 1

要求：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 $\gamma$ 。

NMOS:

为了寻找 NMOS 管的相关参数，我搭建了如下的实验电路，并通过 OP 仿真得到了此时 NMOS 的工作状态和相关参数。

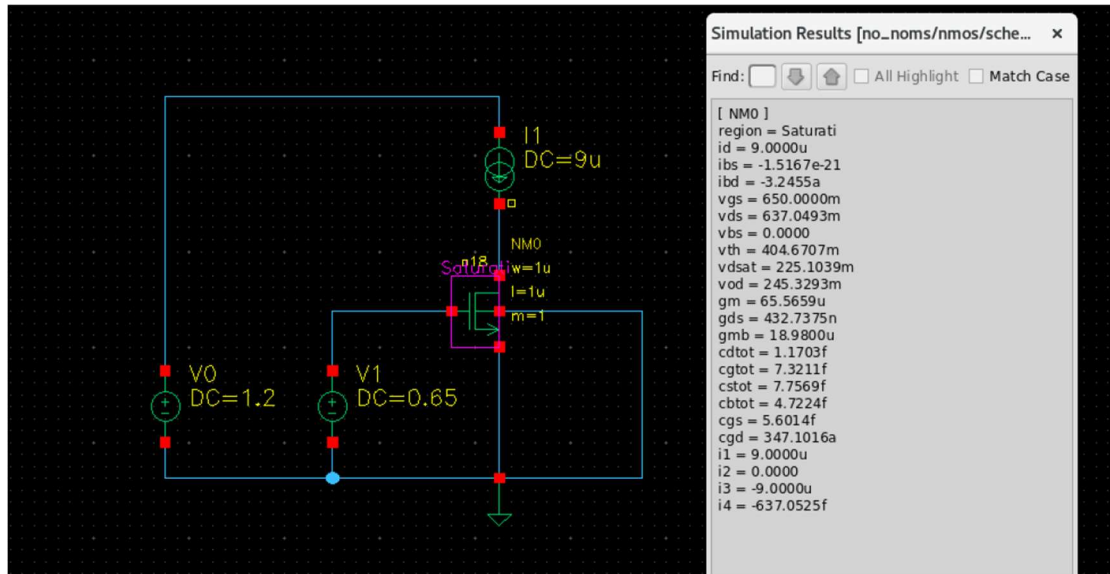


图 1 NMOS 管电路图及相关参数

然后设置 $V_1$ 的交流幅值为 1v，并且在 1Hz——1kHz 之间进行噪声仿真。观测 NMOS 管漏极 (在本段下文中称其为 $V_{out}$ 端)的噪声电压，并把输出噪声等效到 $V_1$  (即下文中的 $V_{in}$ )形成输入参考噪声电压。

经过仿真，我得到了下表所示的参数。

	热噪声	闪烁噪声
1Hz	3.6622p	971.5933n
10Hz	3.6622p	147.7354n
100Hz	3.6622p	22.4639n
1000Hz	3.6622p	3.4157n

表 1 NMOS 输出噪声数据表 (单位 $v^2/Hz$ )

并且通过 Zterm 和图 1 中的参数，我们可以知道

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 151.5136$$

$$g_m = 65.6559 \mu A/v$$

我们先将热噪声在 $V_{out}$ 处的噪声分量等效到 $V_{in}$ 处，并利用热噪声的公式求解 $\gamma$

$$\overline{dV_n^2} = \frac{4kT\gamma}{g_m} = \frac{\overline{di_d^2}}{A_v^2}$$

所以有

$$\gamma = \frac{\overline{dI_d^2} \times g_m}{4kTA_v^2} = \frac{3.6622p \times 65.6559u}{4 \times k \times 300 \times 151.5136^2} \approx 0.63$$

下面我们开始求解 $KF_n$

我们需要将闪烁噪声在 $V_{out}$ 处的噪声分量等效到 $V_{in}$ 处，并利用闪烁噪声的公式求解 $KF$

$$\overline{dV_f^2} = \frac{KF}{WLC_{ox}^2} \times \frac{1}{f} = \frac{\overline{f_n^2}}{A_v^2}$$

所以有

$$KF = \frac{\overline{f_n^2}}{A_v^2} \times WLC_{ox}^2 f$$

分别将四个频率下的数据带入公式，取平均值我们得到(其中 $C_{ox} = 8.85 \frac{fF}{\mu m^2}$ )

$$KF_n = 6.46 \times 10^{-31} C^2/cm^2$$

PMOS:

为了寻找 PMOS 管的相关参数, 我搭建了如下的实验电路, 并通过 OP 仿真得到了此时 PMOS 的工作状态和相关参数。

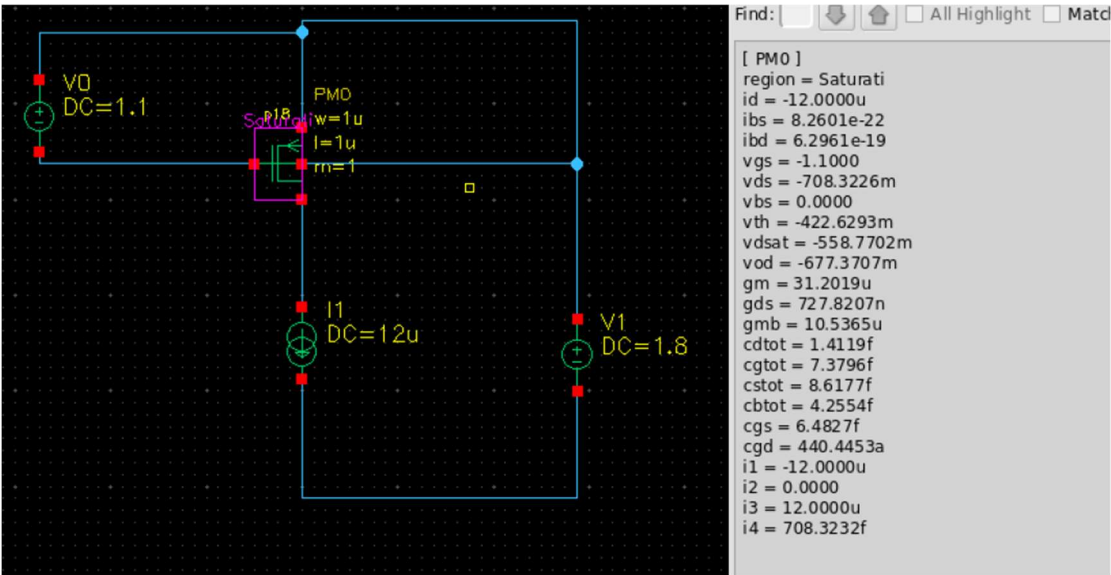


图 2 PMOS 管电路图及相关参数

然后设置 $V_0$ 的交流幅值为 1v, 并且在 1Hz——1kHz 之间进行噪声仿真。观测 PMOS 管漏极 (在本段下文中称其为 $V_{out}$ 端)的噪声电压, 并把输出噪声等效到 $V_0$  (即下文中的 $V_{in}$ )形成输入参考噪声电压。

经过仿真, 我得到了下表所示的参数。

	热噪声	闪烁噪声
1Hz	778.2287f	1.0067u
10Hz	778.2287f	74.5071n
100Hz	778.2287f	5.5144n
1000Hz	778.2287f	408.1294p

表 2 PMOS 输出噪声数据表 (单位 $v^2/Hz$ )

并且通过 Zterm 和图 2 中的参数, 我们可以知道

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 42.8719$$

$$g_m = 31.2019 \mu A/V$$

我们先将热噪声在 $V_{out}$ 处的噪声分量等效到 $V_{in}$ 处，并利用热噪声的公式求解 $\gamma$

$$\overline{dV_n^2} = \frac{4kT\gamma}{g_m} = \frac{\overline{di_d^2}}{A_v^2}$$

所以有

$$\gamma = \frac{\overline{di_d^2} \times g_m}{4kTA_v^2} = \frac{778.2287f \times 31.2019\mu}{4 \times k \times 300 \times 42.8719^2} \approx 0.80$$

下面我们开始求解 $KF_p$

我们需要将闪烁噪声在 $V_{out}$ 处的噪声分量等效到 $V_{in}$ 处，并利用闪烁噪声的公式求解 $KF$

$$\overline{dV_f^2} = \frac{KF}{WLC_{ox}^2} \times \frac{1}{f} = \frac{\overline{f_n^2}}{A_v^2}$$

所以有

$$KF = \frac{\overline{f_n^2}}{A_v^2} \times WLC_{ox}^2 f$$

分别将四个频率下的数据带入公式，取平均值我们得到(其中 $C_{ox} = 9.12 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ )

$$KF_n = 3.06 \times 10^{-30} \text{ C}^2/\text{cm}^2$$

作业 2

要求：对一偏置电流为 100uA 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。

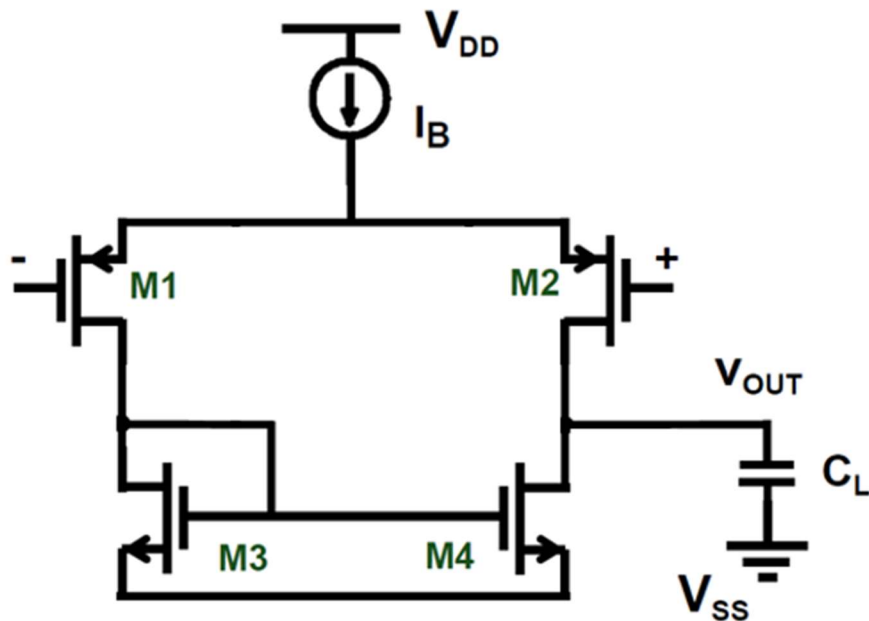


图 3 五管 OTA 电路结构示意图

为了解决这个问题，我们首先要计算一下 NMOS 管和 PMOS 的宽长比之比大概在多大。由公式

$$\overline{dV_{ie}^2} = \overline{dV_1^2} \times \left(1 + \frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)$$

即使得

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{g_{m3}}{g_{m1}}\right)} > 80\%$$

由  $g_m = \sqrt{\mu C_{ox} \frac{W}{L} I_d}$ ，并且流过 PMOS 管的电流和 NMOS 管的电流可以认为近似相同解得

$$\frac{W_p}{L_p} > \frac{\mu_n}{\mu_p} \times \frac{W_n}{L_n}$$

当取  $\frac{\mu_n}{\mu_p} = 4.5$  时有

$$\frac{W_p}{L_p} > 72 \frac{W_n}{L_n}$$

所以可以通过令 PMOS 的宽长比为 NMOS 的 72 倍即可。

下面进行仿真验证。

我搭建了下图所示的电路图。

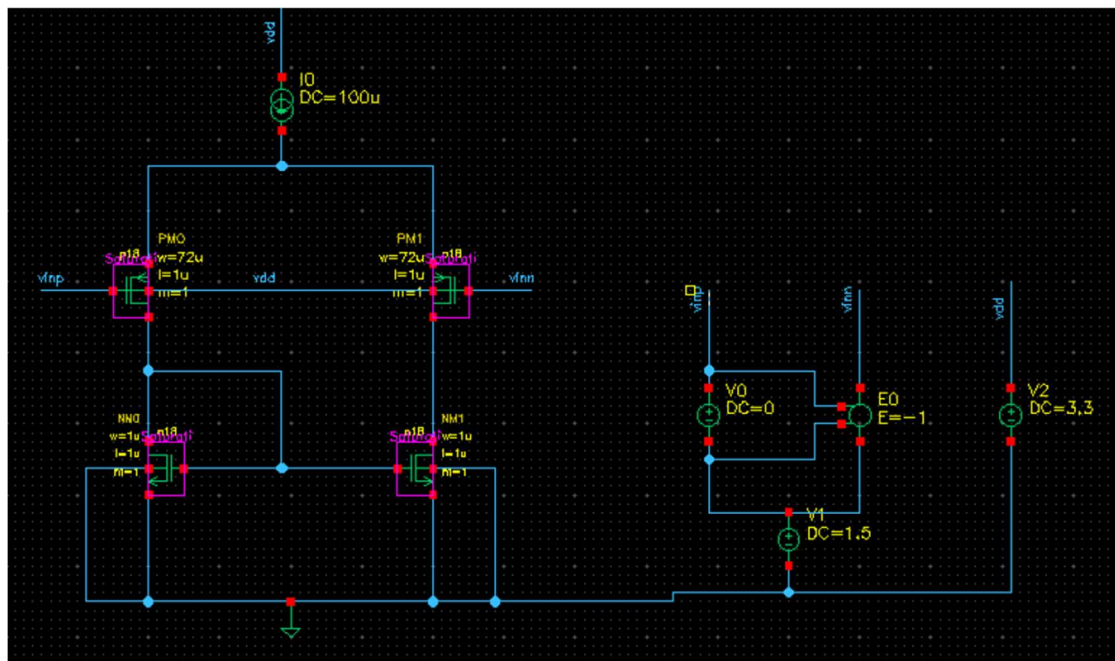


图 4 五管 OTA 电路和 MOS 管状态图

然后进行噪声仿真，通过 NOSIE 仿真对图 3 中  $V_{out}$  处的噪声进行观测。因为输出噪声和输入参考噪声之间是倍数的关系，所以我们只需要关注各个 MOS 管的噪声在  $V_{out}$  处的占比即可。当频率为 1Hz 时，此时以闪烁噪声为主，得到的结果如下图所示。

```
##### noise analysis result at frequency 1.0000 #####
hierarchy
device      0:mnml
rd          1.3182e-20
rs          186.7781a
id          202.2590f
rx          340.3053k
fn          110.0762n
total       110.0764n

hierarchy
device      0:mnmo
rd          1.2622e-20
rs          178.8408a
id          193.6638f
rx          332.9960k
fn          105.3984n
total       105.3986n

hierarchy
device      0:mpm0
rd          6.1757e-21
rs          1.5057f
id          651.1452f
rx          326.6014k
fn          34.0108n
total       34.0114n

hierarchy
device      0:mpm1
rd          6.1757e-21
rs          1.5057f
id          651.1452f
rx          326.6014k
fn          34.0108n
total       34.0114n
```

图 5 1Hz 时 MOS 管的输出噪声

此时 M1 和 M2 的噪声占比为

$$\eta = \frac{34.0114n + 34.0114n}{283.4978n} = 25\%$$

当频率为 1GHz 时，此时以热噪声为主。

```

##### noise analysis result at frequency 1.0000g #####
hierarchy
device      0:mpm1
rd          2.4507e-20
rs          1.6000e-20
id          22.1511a
rx          31.9124
fn          7.7096e-23
total       22.1917a

hierarchy
device      0:mnm1
rd          1.1407e-23
rs          6.1338e-21
id          7.3133a
rx          26.5351
fn          1.7294e-19
total       7.4924a

hierarchy
device      0:mpm0
rd          1.2656e-21
rs          1.6000e-20
id          2.6399a
rx          11.0428
fn          9.1883e-24
total       2.6572a

hierarchy
device      0:mnm0
rd          2.6953e-25
rs          3.6433e-22
id          3.7759e-19
rx          6.0298
fn          8.9290e-21
total       3.8688e-19

```

图 6 1GHz 时 MOS 管的输出噪声

此时 M1 和 M2 的噪声占比为

$$\eta = \frac{22.1917a + 2.6572a}{32.7282a} = 76\%$$

可以发现在该宽长比下，低频时的噪声以 NMOS 管为主，高频时的噪声以 PMOS 管为主。但是均没有达到设计要求的 80%。需要继续增大 PMOS 的宽长比才能满足设计的要求。