

一、基本要求及参数

1. 实验设计要求

由于本设计采用的是.25工艺，故在设计要求方面进行了部分的更改，具体实验设计要求如下：

V_{DD}	5V
GB	5MHz
SR	5V/us
$ICMR$	1.2V ~ 4.2V
$Phase\ margin$	45°
$V_{OUT}\ Range$	0.5V ~ 4.2V
P_{diss}	2mW
A_v	10000

表 1. 实验设计要求

2. MOS 管工艺

根据 ADEL 仿真中可以读出管子的参数，以 NMOS 为例：

t_{oxe}	16nm
μ_0	$46.034 * 10^{-3} m^2/V$
V_{th0}	760.654 mV

表 2. NMOS 器件部分参数

带入二氧化硅的介电常数 ϵ_{ox} ，从中可以算出 NMOS 管的 K 值，如式(1)所示：

$$K_N = \mu_0 * \frac{\epsilon_{ox}}{t_{oxe}} \approx 99.3 \mu A/V^2 \quad (1)$$

3. PMOS 管工艺

同理，可读出 PMOS 管参数

t_{oxe}	16nm
μ_0	$32.1966 * 10^{-3} m^2/V$
V_{th0}	-947.315 mV

表 3. PMOS 器件部分参数

同理可得 PMOS 管的 K 值，如式(2)所示：

$$K_P = \mu_0 * \frac{\epsilon_{ox}}{t_{oxe}} \approx 69.45 \mu A/V^2 \quad (2)$$

二、电路设计

1. 电路原理

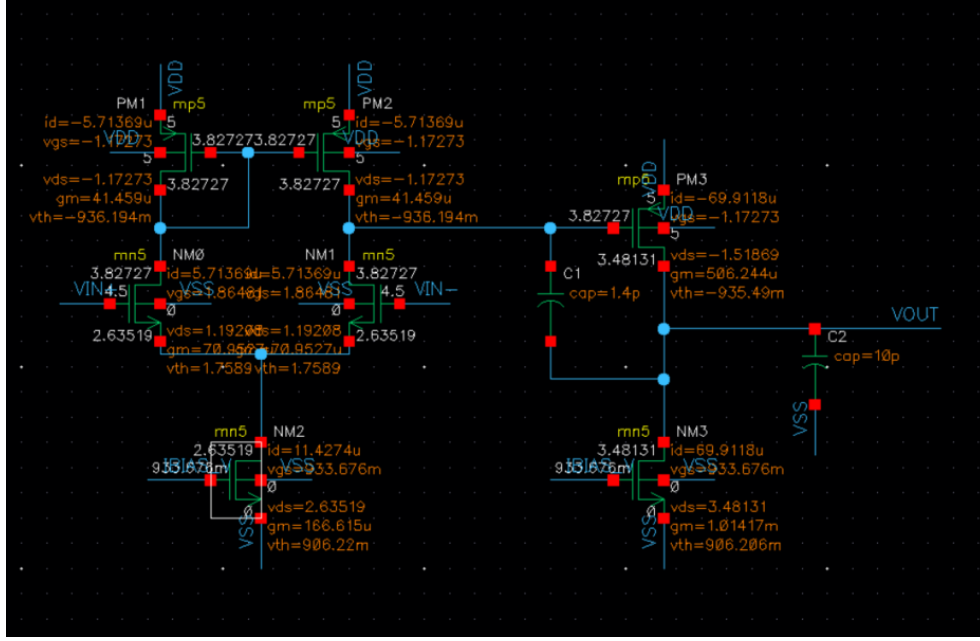


图 1. 二级放大器电路图

该电路由两部分组成，分别是第一级的共源共栅差分运算放大器以及后一级的单输入——输出共源共栅电路。电路的放大倍数由 NM0、NM1 的跨导 gm_1 与 PM1、PM2 的 r_{ds1} 与 PM3 的跨导 gm_2 与 NM3 的 r_{ds2} 的乘积所决定。

2. 理论计算

(1) 相位裕度

由要求可知: $C_L = 10pF$, 为了达到相位裕度的要求, 故 $C_M \geq 0.22 * C_L = 2.2pF$. 由于米勒电容取值过大会导致电路的增益带宽积下降, 而且要求的相位裕度为 45° , 故这里取米勒补偿电容为 $1.4pF$ 。

(2) 压摆率

限制压摆率的因素为第一级电路的静态工作电流与米勒补偿电容的大小。 $SR = I_5 / C_M$, 其中 $SR = 5V/us$, 故算出 I_5 的最小值:

$$I_5 = SR * C_M = 7uA \quad (1)$$

这里取 I_5 为 $10uA$

(3) ICMR

输入的静态最大值决定 PM1、PM2 的最小宽长比:

$$S_3 = \frac{I_5}{K_p * (V_{DD} - V_{inmax} - (V_{thn} + V_{ts}) + (V_{thn} - V_{ts}))^2} \quad (2)$$

带入 I_5 得 S_3 最小为 0.4

为了保证 PM1 和 PM2 的压降足够小, 从而使得 NM2 可以正常工作, 这里选取 S_3 为 5.

$$V_{DS5} = V_{inmin} - \left(\frac{I_5}{K_n * S_1} \right) - (V_{thn} + V_{ts}) \quad (3)$$

其中 S_1 将在下文中求得。可以根据 V_{DS5} 求得 S_5

$$S_5 = 2 * \frac{I_5}{K_n * (V_{DS5}^2)} \quad (4)$$

(4) 带宽

带宽主要由第一级电路的输出电阻与米勒补偿电容决定, 其中第一级的输出电阻为 $\frac{1}{gm_1}$

从而有：

$$gm_1 = GB * 2\pi * C_M \quad (5)$$

进而求得 NM0 与 NM1 的宽长比：

$$S_1 = \frac{gm_1^2}{2 * K_n * \left(\frac{I_5}{2}\right)} \quad (6)$$

带入数据得 $S_1 = 2.3$ ，带入到(3)式中，进而求得 S_5 最小值为 0.44。其中为了保证 NM2 可以工作在饱和区，故降低电流镜另一侧电流，并调整 S_5 大小，最后选取 S_5 为 40。

第二级电路需要满足带宽大于 2.2 倍的 GB 从而保证对电路没有干扰。假定 $V_{GS4} = V_{GS6}$ 的情况下有：

$$gm_6 = 2.2 * gm_2 \left(\frac{C_L}{C_M}\right) \quad (7)$$

进而求得 I_6 以及 NM3 的宽长比 S_7 ：

$$I_6 = \frac{gm_6^2}{2K_p S_6} \quad (8)$$

$$S_7 = \left(\frac{I_6}{I_5}\right) * S_5 \quad (9)$$

由于每个器件最终的 V_{th} 将受到一定的体效应的影响，所以部分各种宽长比和原始计算有较大的出入，最终各个器件的取值如表 4 所示。

元件名称	宽 (um)	长 (um)
NM0	8	1
NM1	8	1
NM2	40	1
NM3	240	1
PM1	5	1
PM2	5	1
PM3	60	1

表 4. 各器件宽长比取值

3. 电流漏

电流漏的电流由负载电阻以及一个 NMOS 管来控制，电阻取值为 5M 来控制电流漏的电流为 1uA 左右



图 2. 电流漏结构图

栅极电压为 900mV 左右，可以较好地控制对应的管子工作在饱和区。

三、测试电路

1. 静态工作点测试

将输入电压的直流偏置设置为 3V，查看各个管子工作情况：

器件名称	工作区域(region)
NM0	2
NM1	2
NM2	2
NM3	2
PM1	2
PM2	2
PM3	2

表 5. 输入偏置为 3V 时各器件静态工作区域

将输入电压的直流偏置调整至 1.2V，查看各个管子的工作情况：

器件名称	工作区域(region)
NM0	2
NM1	2
NM2	2
NM3	2
PM1	2
PM2	2
PM3	2

表 6. 输入偏置为 1.2V 时各器件静态工作区域

将输入电压的直流偏置调整至 1.2V，查看各个管子的工作情况：

器件名称	工作区域(region)
NM0	2
NM1	2
NM2	2
NM3	2
PM1	2
PM2	2
PM3	2

表 7. 输入偏置为 4.5V 时各器件静态工作区域

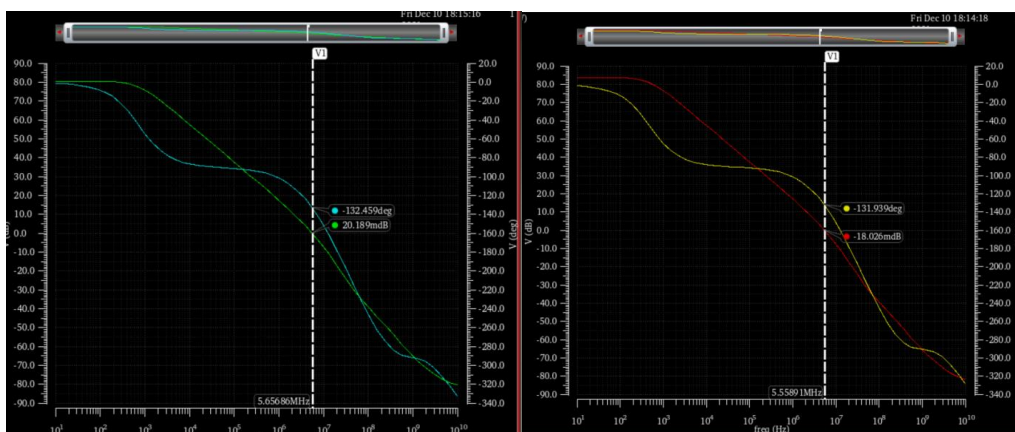
由以上数据可以看出输入从 1.2V 到 4.5V 都可以保持正常的静态工作状态。

2. 开环测试

分别将输入的直流偏置设置为 1.2V，3V 以及 4.5V，观察输出的增益带宽积以及相位裕度是否符合要求。

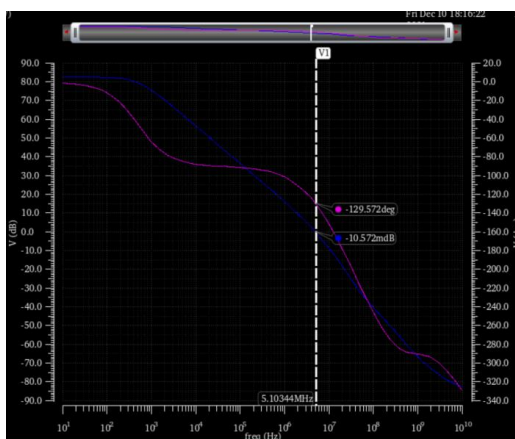
输入直流工作点	单位增益带宽积(MHz)	相位裕度(°)
1.2V	5.1034	51.428
3V	5.5589	48.061
4.5V	5.6568	47.55

表 8. 不同输入静态工作点下的单位增益带宽积与相位裕度



(a)

(b)



(c)

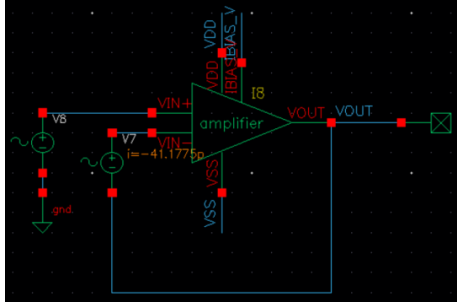
图 3. 不同电压下的相位裕度以及单位增益带宽积示意图; (a) 输入静态工作点为 4.5V (b) 输入静态工作点为 3V (c) 输入静态工作点为 1.2V

由上述结果可以看出此电路可以在题目要求的静态输入范围内正常地工作。

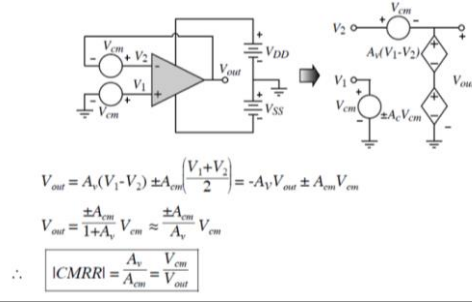
3. 闭环测试

1. CMRR

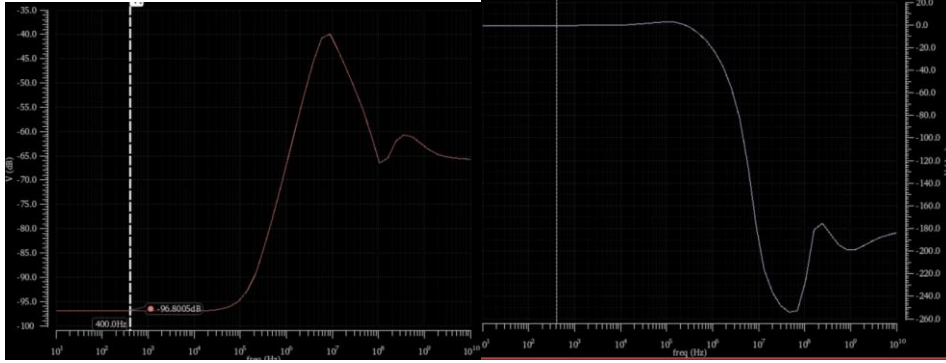
具体的测试电路如图 4(a) 所示: 将两个相同的电压源 V_{cm} , 其中 V_{cm} 的幅度为 1V, 与单位增益结构的运算放大器的两输入端相接, 电路的原理如图 4(b) 所示, 对应的幅频曲线与相频曲线分别在图 4(c) 与图 4(d) 所示, 经过图 4(c) 可以测出其 CMRR 为 96.8dB:



(a)



(b)



(c)

(d)

图 4. CMRR 测量具体电路: (a)测试电路图; (b)电路测试原理; (c) $\frac{1}{CMRR}$ 与频率的变化曲线 (d) 输出的相位与频率的变化曲线

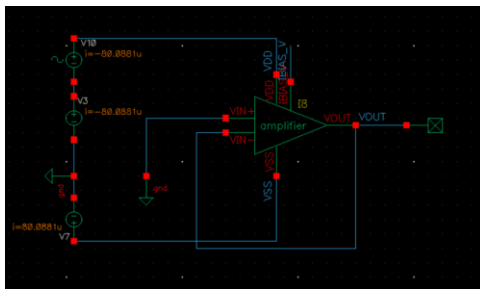
2. PSRR

(1) 正电源的 PSRR

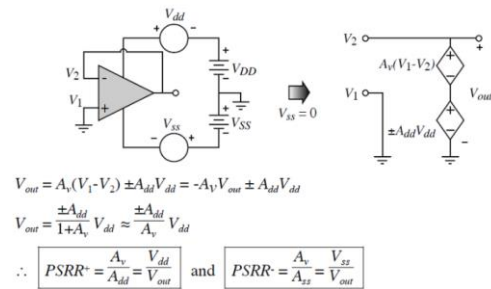
具体的测试电路如图 5(a) 所示: 将一个正弦波输入 V_{DDAC} 接到正电压上, 对应的幅度为 1V。具体的原理以及公式推导如图 5(b) 所示, $PSRR_+$ 的幅频与相频曲线分别如图 5(c)、5(d) 所示, 根据图 5(c) 可以测出 $PSRR_+$ 为 88.95dB。

(2) 负电源的 PSRR

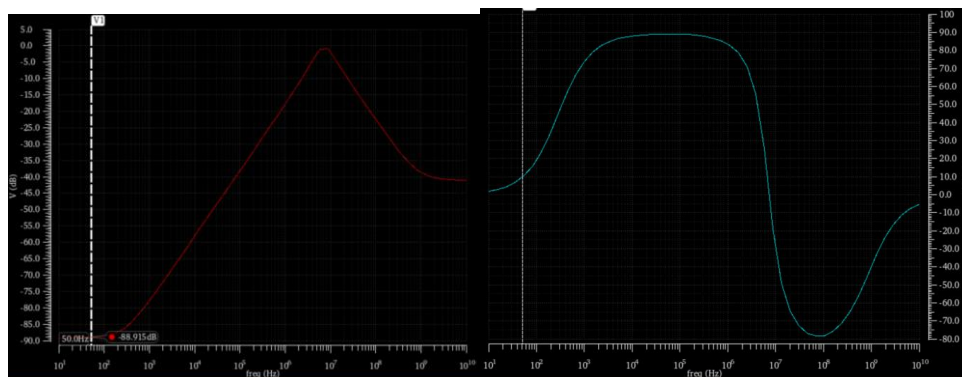
具体的测试电路如图 5(e) 所示: 将一个正弦波输入 V_{SSAC} 接到负电压上, 对应的幅度为 1V。具体的原理以及公式推导如图 5(b) 所示, $PSRR_-$ 的幅频与相频曲线分别如图 5(f)、5(g) 所示, 根据图 5(f) 可以测出 $PSRR_-$ 为 101.3dB。



(a)

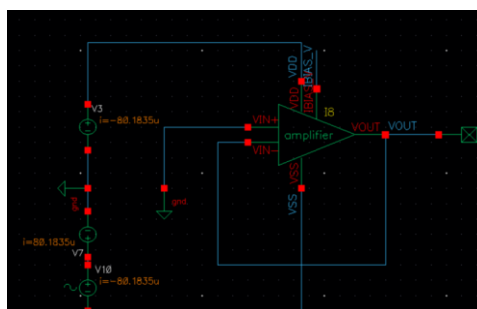


(b)

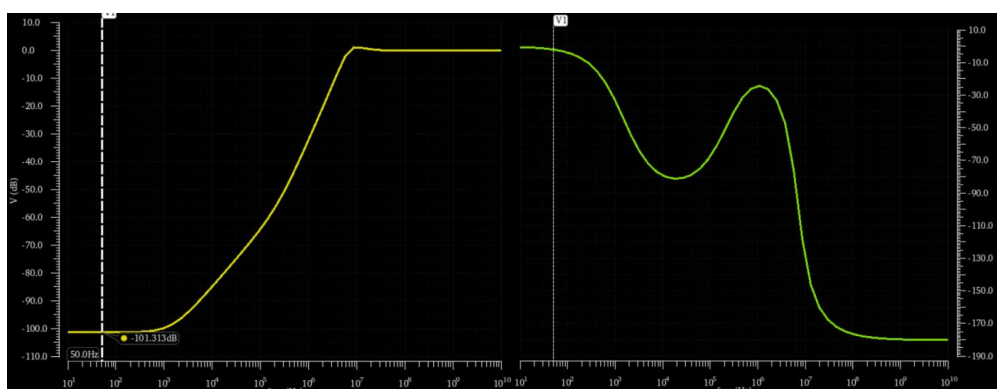


(c)

(d)



(e)



(f)

(g)

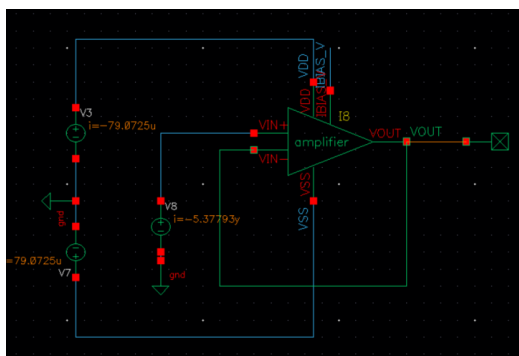
图 5. CMRR 测量具体电路：(a) $PSRR_+$ 测试电路图；(b) 电路测试原理；(c) $\frac{1}{PSRR_+}$ 与频率的变化曲线

(d) 输出 $\frac{1}{PSRR_+}$ 的相位与频率的变化曲线 (e) $PSRR_-$ 测试电路图 (f) $\frac{1}{PSRR_-}$ 与频率的变化曲线 (g) 输出 $\frac{1}{PSRR_-}$

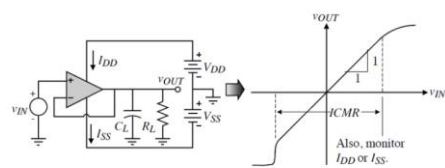
的相位与频率的变化曲线

3. ICMR

通过闭环来测量电路的 ICMR，进行直流仿真，输入电压将从 0 扫描到 5V，来观察电路的正常工作范围。测试电路如图 6(a) 所示，原理如图 6(b) 所示，结果如图 6(c) 所示，根据图 6(c) 的结果可以看出，该电路的 ICMR 约为 $400mV \sim 4.8V$ ，满足项目的要求。

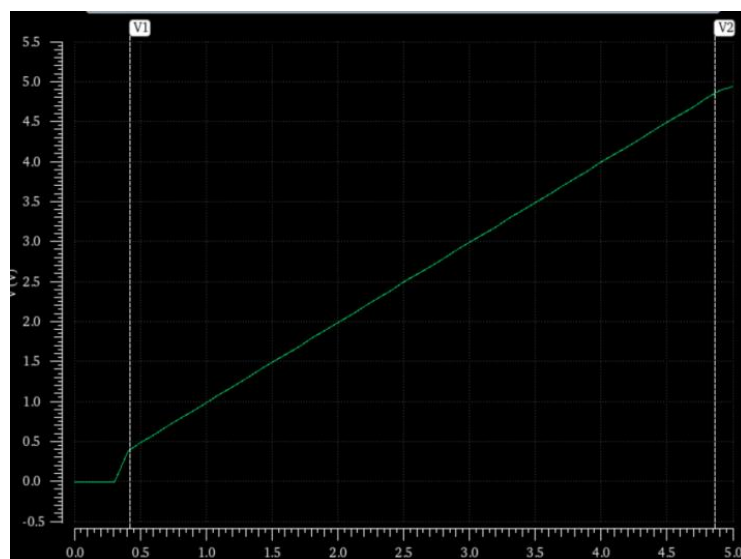


(a)



Initial jump in sweep is due to the turn-on of M5.
Should also plot the current in the input stage (or the power supply current).

(b)



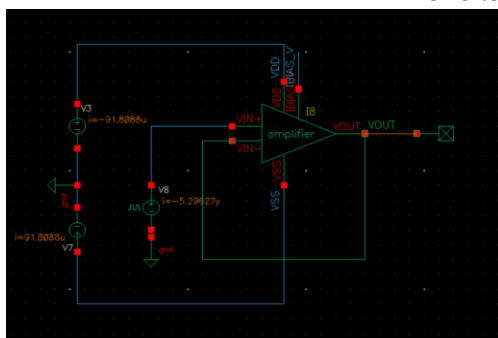
(c)

图 5. ICMR 测量具体电路：(a) ICMR 测试电路图；(b) 电路测试原理；(c) 输入——输出对应曲线

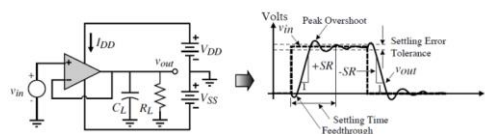
4. SR

放大器对方波的响应需要一定的时间，上升的最大斜率就是压摆率。压摆率决定单位时间内输出电压的最大变化值。如果压摆率不够的话，正弦波就很容易变化为三角波。测试电路如图 6(a) 所示，原理图如图 6(b) 所示，结果如图 6(c) 所示。由图 6(c) 可以算出具体的压摆率，如式 (10) 所示

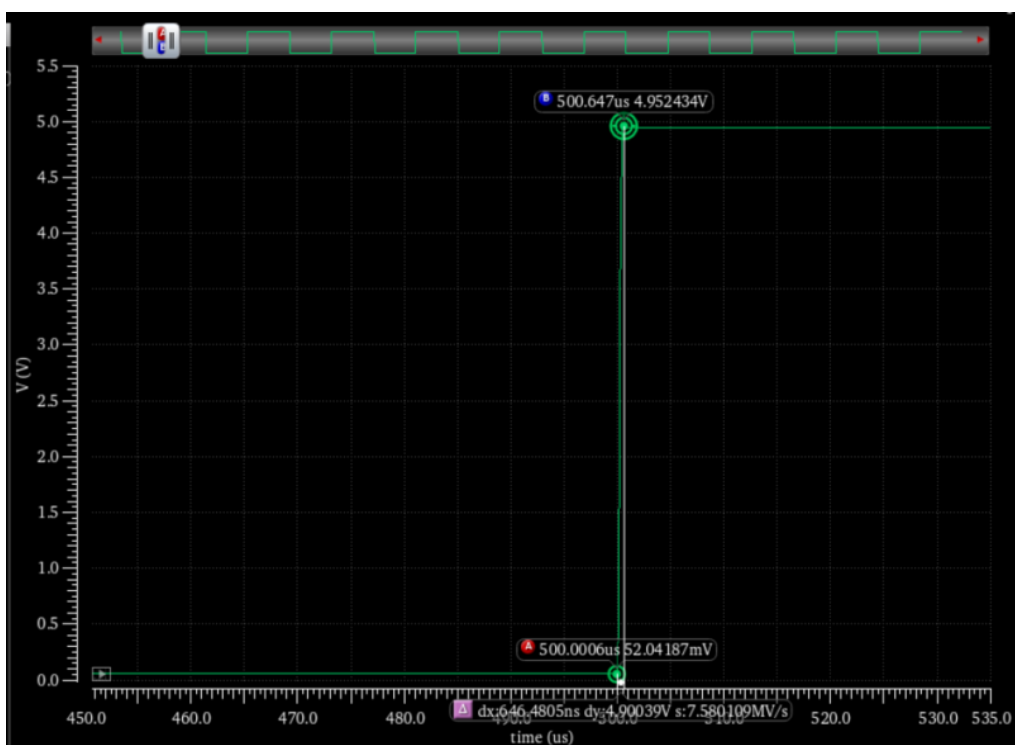
$$SR = \frac{4.9V}{646ns} \approx 7.58V/\mu s \quad (10)$$



(a)



(b)



(c)

图 5. SR 测量具体电路：(a) SR 测试电路图； (b) 电路测试原理； (c) 输出方波结果图；

5. P_{diss}

对双级放大电路以及电流漏进行消耗功率分析，如式(11)所示

$$P_{diss} = (V_{DD} - V_{SS}) * (I_{漏} + I_5 + I_7) \approx 455uW \quad (11)$$

满足项目要求。

四、后仿

进行 layout 制图，部分版图如图 6(a)所示，并提取出 no RC, C+CC 以及 R+C+CC 三种不同的后仿模型，如图 6(b)所示，以这三种模型对上面的参数进行重新计算。由于数据较多而且测量方式与上文相同，故只列出测量结果。

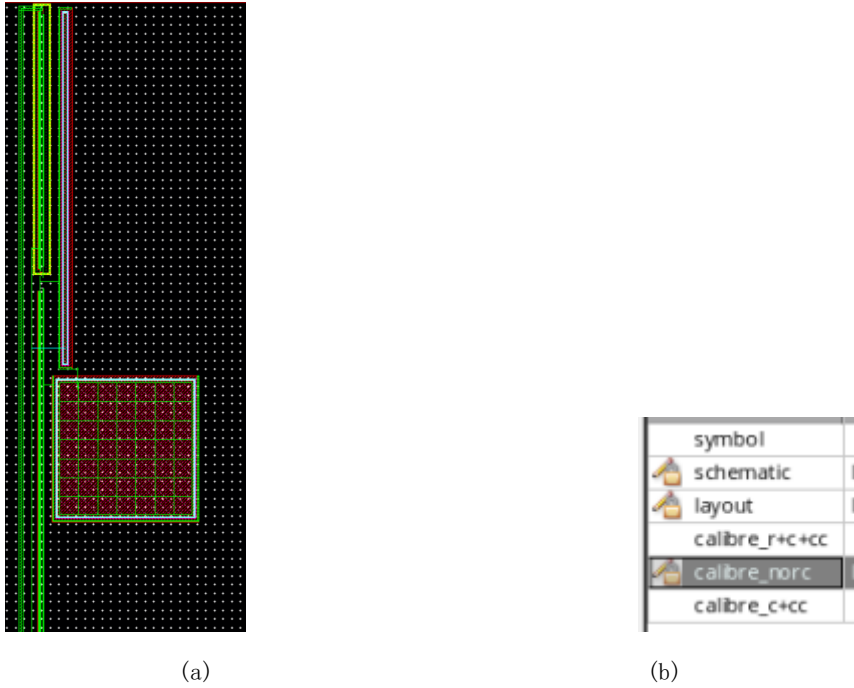


图 6. (a) layout 版图; (b) calibre 三种结果

1. 开环增益带宽积，相位裕度

仿真参数	输入电压 (V)	GBW (MHz)	相位裕度 (°)
No RC	2.5	5.378	47.8
No RC	1.25	5.080	49.2
No RC	4.2	5.656	46.3
C+CC	2.5	4.4	54.2
C+CC	1.25	4.105	55.2
C+CC	4.2	4.568	54.6
R+C+CC	2.5	4.392	54.5
R+C+CC	1.25	4.091	55.5
R+C+CC	4.2	4.551	54.0

表 9. 不同后仿提取下的不同输入电压的 GBW 和相位裕度

2. CMRR

仿真参数	CMRR (dB)
No RC	66.27
C+CC	66.27
R+C+CC	64.54

表 10. 不同后仿提取下的 CMRR

3. PSRR

仿真参数	PSRR+ (dB)	PSRR- (dB)
No RC	89.045	101.38
C+CC	89.040	101.39
R+C+CC	87.465	95.42

表 11. 不同后仿提取下的 PSRR

4. ICMR

仿真参数	ICMR
No RC	494mV~4.9V
C+CC	490mV~4.8979V
R+C+CC	482mV~4.88V

表 12. 不同后仿提取下的 ICMR

5. SR

仿真参数	SR(V/us)
No RC	11.23
C+CC	10.60
R+C+CC	7.08

表 13. 不同后仿提取下的 SR

五、实验总结

本次项目是基于双击宽带放大器的设计，由于本人能力有限，故只能勉强将性能提升到项目要求的指标上，而无法再进一步对于一些重要指标进行优化，目前 P_{diss} 指标还有很大的剩余空间，本人认为可以从电流下手，进而改善电路的一些参数。

从后仿的结果来看，一些版图带来的电容、电阻主要对 GBW、相位裕度以及压摆率会造成比较大的影响，而对各种共模抑制不会产生较大的改变。

除此之外，目前此电路对于方波的上升沿和下降沿的压摆率不同，据了解是因为上升和下降所对应的电流不同，从而引起了压摆率不同。目前本人由于实力原因，尚未能有效解决这种现象。