

模拟集成电路设计实验

——第五次实验

信息科学技术学院

姓名：胡睿 PB17061124

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

【实验题目】 运算放大器设计指标的验证优化与应用电路设计

【实验目的】

1. 对前一次实验中设计的运放核心电路，构成反馈应用电路，加载合理设计的激励信号，通过适当的仿真验证方法，验证所要求的各个设计指标；
2. 构建一个增益为-10 的反向放大器， 培养学生运用理论知识，进行电路前端设计、分析与解决问题的能力。

【实验内容】

采用合理的输入激励，利用常用的应用电路（如电压跟随器、 反向放大电路等）， 验证和完善实验四中设计的核心电路的性能指标仿真和电路优化设计；使单个电阻不超过 10M 欧姆构建反向放大器，增益约为-10；仿真其闭环增益和输入、输出电压动态范围。仅仿真 27° 和 tt 工艺角。

完成 3 方面实验设计工作：

1. 实验前，设计反向放大器；
2. 进行 Schematic 电路图编辑；
3. 通过采取适当的仿真方法，验证是否可以满足主要的性能设计指标。

【设计指标】（优化核心电路指标）

电源电压 VDD: 1.8V;	直流增益 A_o : > 90dB;
单位增益带宽 f_u : ~80MHz;	负载电容 C_L : 2 pF;
输入电容 C_{in} : < 0.2pF;	相位裕量 PM: ~60° ;
转换速率 SR: > 25V/us;	输出摆幅: > CM (共模) 0.3V;
输入共模电压范围: ~ 0.7-- 1.3V;	功耗: <1.6mW;

实验报告

评分:

信院系 17 级 姓名 胡睿 日期 2021-01-09 NO. _____

【初步设计】

$$A_v = 90 \text{ dB} \quad BW = 80 \text{ MHz} \quad \text{Phase Margin } 60^\circ$$

$$V_{DD} = 1.8 \text{ V} \quad \text{摆幅 } \pm 0.3 \text{ V} \rightarrow 31.62278 \text{ k}$$

$$\text{共模电压范围 } 0.7 \sim 1.3 \text{ V} \quad \text{功耗 } < 1.6 \text{ mW}$$

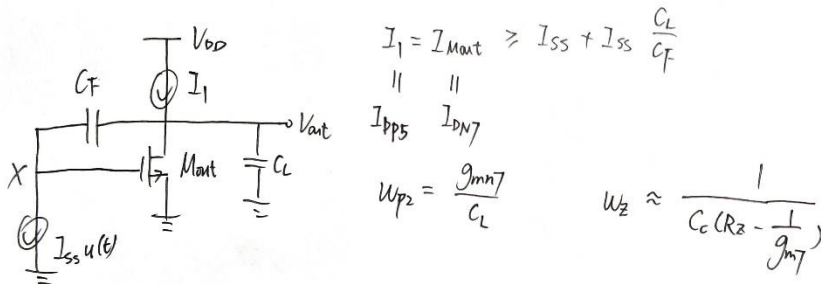
$$\text{输入管 NM1 NM2 : } L = 0.8 \mu$$

$$\text{其他 : } L_n = 1 \mu \quad L_p = 0.8 \mu$$

$$\text{由实验1可得 } V_{thn} = 418.485 \text{ mV} \quad g_{mn} = 1134.09 \mu \quad \mu_n C_{ox} = 324.661 \mu$$

$$V_{thp} = 430.261 \text{ mV} \quad g_{mp} = 241.425 \mu \quad \mu_p C_{ox} = 67.0221 \mu$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} V_{DD}^2$$



$$I_1 = I_{Mant} \geq I_{SS} + I_{SS} \frac{C_L}{C_F}$$

$$I_{pp5} \quad I_{DN7}$$

$$W_{p2} = \frac{g_{mn7}}{C_L}$$

$$W_z \approx \frac{1}{C_c (R_z - \frac{1}{g_{m7}})}$$

$$R_z \geq \frac{1}{g_{m7}} \quad \text{取 } R_z = \frac{2}{g_{m7}} = \frac{2}{1134.09 \mu} = 1.76353 \text{ k} \Omega$$

$$W_{p2} = W_z \quad \frac{g_{mn7}}{2p} = \frac{g_{mn7}}{C_c} \quad C_c = 2p$$

$$\text{cascode } SK: \quad SK_1 = \frac{dV_{o1}}{dt} = \frac{I_{c \max}}{C_c} \approx \frac{I_{no}}{C_c} = \frac{I_{SS}}{C_c}$$

$$SK_1 = 25 \text{ V}/\mu\text{s} \quad I_{SS} = 25 \times 10^6 \times 2 \times 10^{-12} = 50 \mu$$

$$\text{即 } I_{DNO} = 50 \mu\text{A}$$

$$\text{最大信号频率 } f_{max} = 31.62278 \text{ k}$$

$$I_{p5} = 2 \times 31.62278 \text{ k} \times 0.6 \times 4p = 0.144 \mu\text{A}$$

$$\text{取最大值, 故 } I_{DNO} = 50 \mu\text{A}$$

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

由以上计算结果为各个 Mos 管分配漏极电流

$$NM0: 50 \mu A \quad NM1,2: 25 \mu A$$

$$NM8,9: 50 \mu A \quad PM0: 50 \mu A$$

$$PM1,2: 50 \mu A \quad PM3,4: 25 \mu A$$

$$NM3,4,5,6: 25 \mu A$$

输入共模电压范围为 $0.7 \sim 1.3V$ 设为 $1V$

PM 管过驱动电压比 NM 管稍大一点, 电压摆幅 $> 0.6V$

$$\text{设 } V_{DDN} = 0.1V \quad V_{DDP} = 0.15V$$

由于输出的最小和最大电压分别为 $0.2V$ 和 $1.5V$, 因此输出共模电平 $0.8V$

$$NM3,4 \text{ 饱和} \quad V_j > V_m - V_{thn} \quad V_m < V_j + V_{thn}$$

$$NM5,6 \text{ 饱和} \quad V_m - V_j > V_b - V_j - V_{thn} \quad V_m > V_b - V_{thn}$$

$$PM3,4 \text{ 饱和} \quad V_x - V_m > V_x - V_b - V_{thp} \quad V_b > V_m - V_{thp}$$

$$PM1,2 \text{ 饱和} \quad 1.8 - V_x > 1.8 - V_{bp} - V_{thp} \quad V_x < V_{bp} + V_{thp}$$

$$V_m - V_{thp} < V_b < V_m + V_{thn}$$

$$\text{令 } V_m = 0.8V \quad \text{故 } V_b = 0.8V$$

$$\frac{W}{L} = \frac{2I_D}{\mu_n C_{ox} (V_{gs} - V_{th})^2}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{NM0} = \frac{100 \mu}{324.661 \mu \cdot 0.1^2} = 30.0801 = 30$$

$$\text{故 } W_{n0} = W_{n8} = W_{n9} = 30 \mu$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{NM1} = \frac{50 \mu}{324.661 \mu \cdot 0.1^2} = 15.04 = 15$$

$$\text{故 } W_{n1} = W_{n2} = 15 \mu$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{NM3} = \frac{50 \mu}{324.661 \mu \cdot 0.1^2} = 15.04 = 15$$

$$\text{故 } W_{n3} = W_{n4} = W_{n5} = W_{n6} = 15 \mu$$

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{PM0} = \left(\frac{W}{L}\right)_{PM1} = \left(\frac{W}{L}\right)_{PM2} = \frac{100\mu}{67.022\mu \cdot 0.02^2} = 66.3131$$

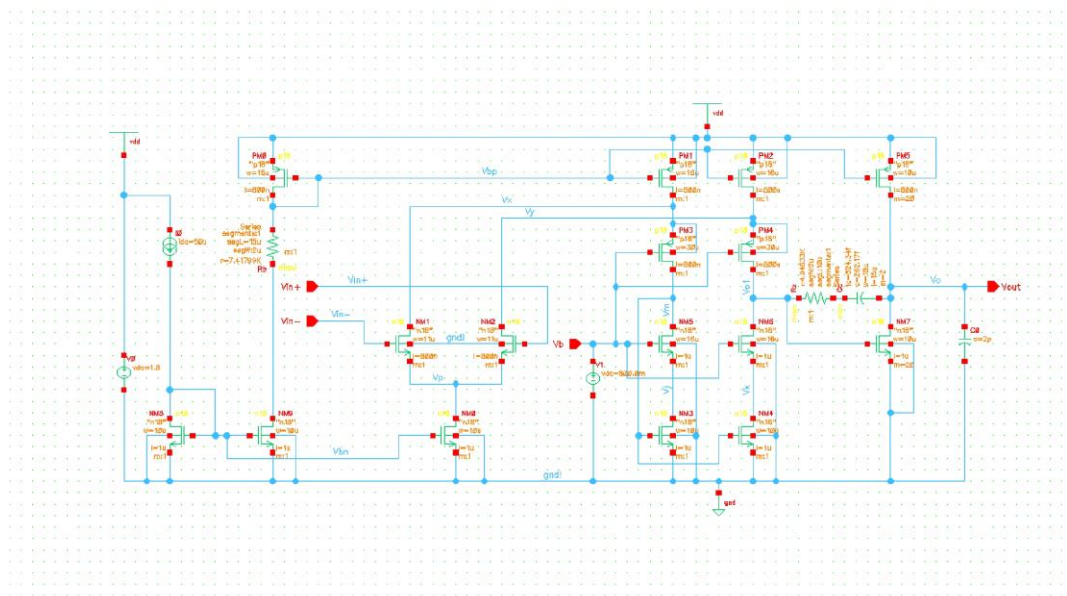
$$\left(\frac{W}{L}\right)_{PM3} = \left(\frac{W}{L}\right)_{PM4} = \frac{50\mu}{67.022\mu \cdot 0.02^2} = 33.156$$

$$W_{P0} = W_{P1} = W_{P2} = 52.8 \mu = 50 \mu$$

$$W_{P3} = W_{P4} = 26.4 \mu = 30 \mu$$

在 schematic 电路图窗口中按照计算值修改各参数并仿真

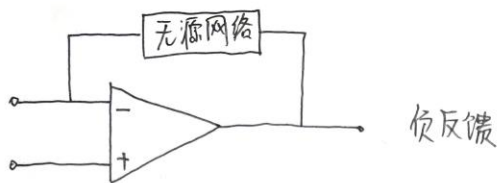
在schematic中绘制电路图，电路图及参数如下图所示：



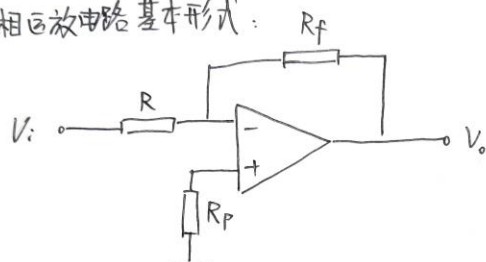
实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓 名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____



反相运放电路基本形式:



假设实验 4 中我们设计的是理想运放

$$\text{则 } V_+ = V_- = 0$$

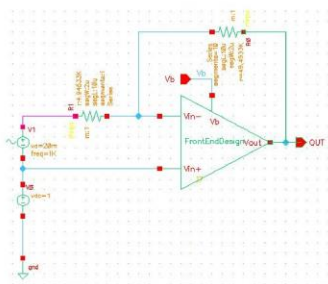
$$\frac{V_i - V_-}{R} = \frac{V_- - V_o}{R_f}$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R} V_i$$

$$\text{要使增益为 } -10 \quad \text{则 } R_f = 10 R$$

设计电路如下图所示: $R_1 \approx 5 \text{ k}\Omega$

则 R_o 的 seg 应为 10 使得 $R_o = 10 R_1 \approx 50 \text{ k}\Omega$



实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

实验 4 中经过仿真及调整后 $C_c = 524.34 \text{ fF}$ $R_z = 4.94333 \text{ k}\Omega$

估算电路主极点: 单位增益频率 $\omega_u \approx \frac{g_{m1}}{C_c}$

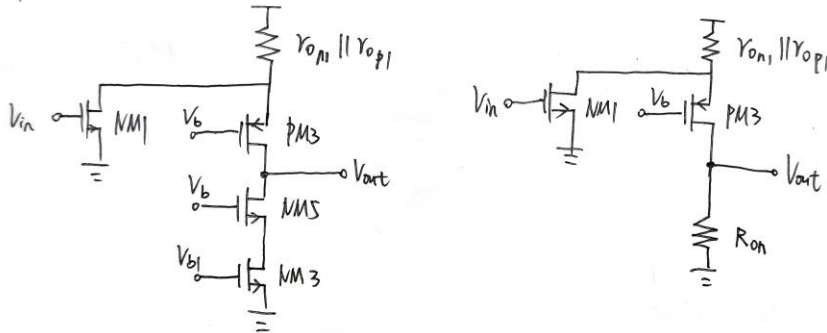
$$\omega_u = \frac{1134.09 \mu}{524.34 \text{ f}} = \frac{1134.09}{524.34} \times 10^9 = 2.16289 \text{ G rad/s} \quad \omega_z > \omega_u$$

$$f_u = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{g_{m1}}{2\pi C_c} \quad f_u = 344.23463 \text{ MHz}$$

第 2 极点: $\omega_{p2} > \sqrt{3} \omega_u \approx 2 \omega_u = 4.32578 \text{ G rad/s}$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{R_{out1} g_{m1} (r_{op5} \parallel r_{on7}) C_c}$$

计算第 1 级共源共栅级输出的输出阻抗 R_{out1}



$$R_{on} = (g_{m5} + g_{mb5}) r_{on5} r_{on3}$$

$$R_{out1} = R_{on} \parallel (g_{m3} + g_{mb3}) r_{op3} (r_{on1} \parallel r_{op1})$$

由实验 1 可得 $r_{on} = 83.09098 \text{ k}\Omega$ $r_{op} = 508.90585 \text{ k}\Omega$

$$\text{故 } R_{on} \approx 1134.09 \mu \times 83.09098^2 \text{ M} \approx 7.827883 \text{ M}\Omega$$

$$R_{out1} = R_{on} \parallel [241.415 \mu \times 508.90585 \text{ k} \times 71.42855 \text{ k}]$$

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

$$\begin{aligned} R_{out1} &= 7.829883 \text{ M} \parallel 8.77589 \text{ M} \\ &= \frac{7.829883 \times 8.77589}{7.829883 + 8.77589} \text{ M} \\ &= 4.13797 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{p1} &= \frac{1}{4.13797 \text{ M} \times 1134.09 \mu \times 71.4285 \text{ k} \times 524.34 \text{ f}} \\ &= 5.68958 \text{ k rad/s} \end{aligned}$$

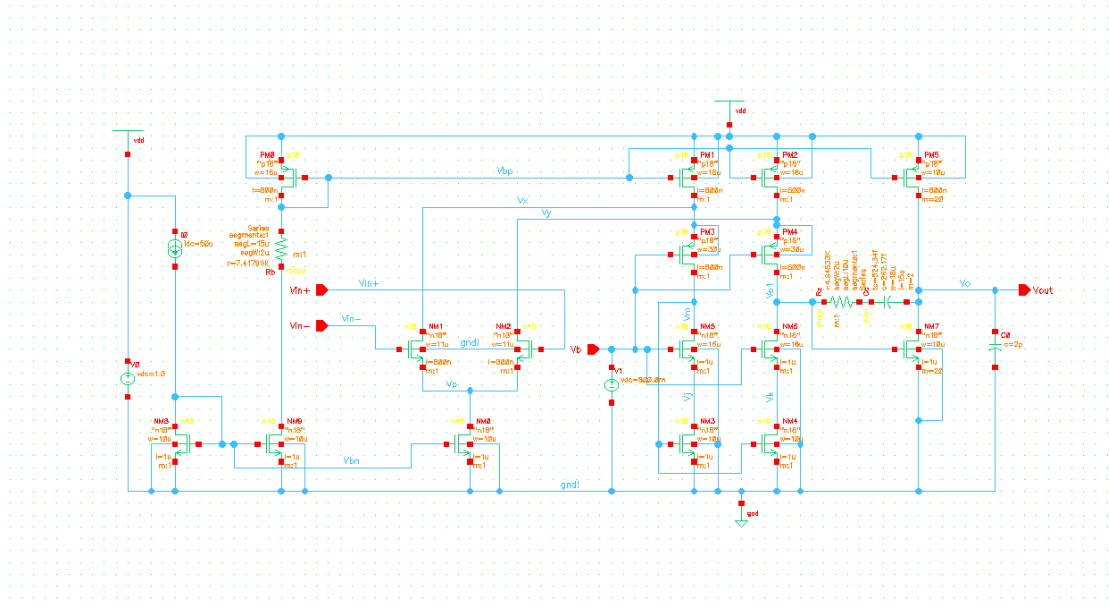
实 验 报 告

评分：

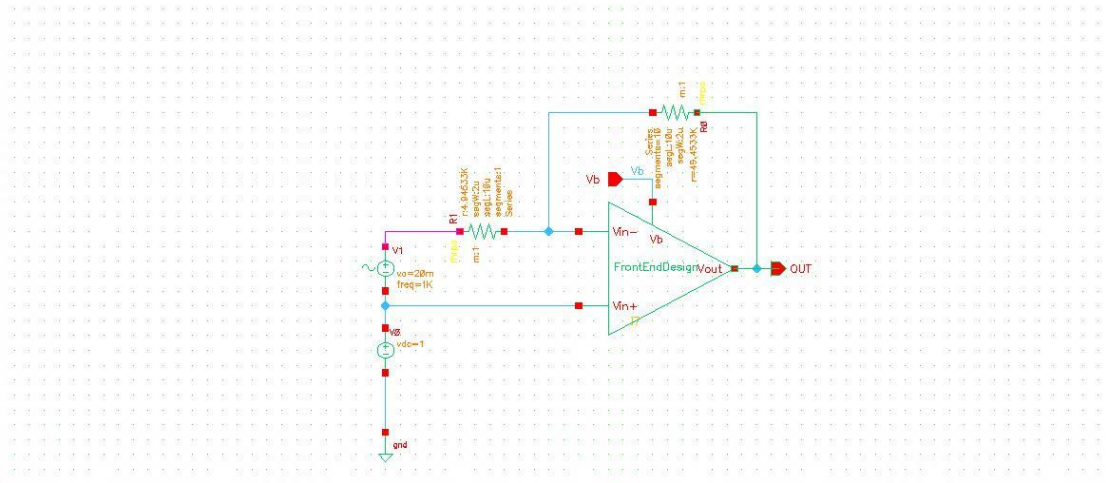
信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

【电路模型】

在 schematic 电路图窗口中绘制电路图如下图所示：



设计增益为-10 的反向放大器如下图所示：



【器件参数】

经过仿真和调整使放大器各个指标均达标后电路中各个器件参数如上图所示，整理参数如下表所示：

实 验 报 告

评分:

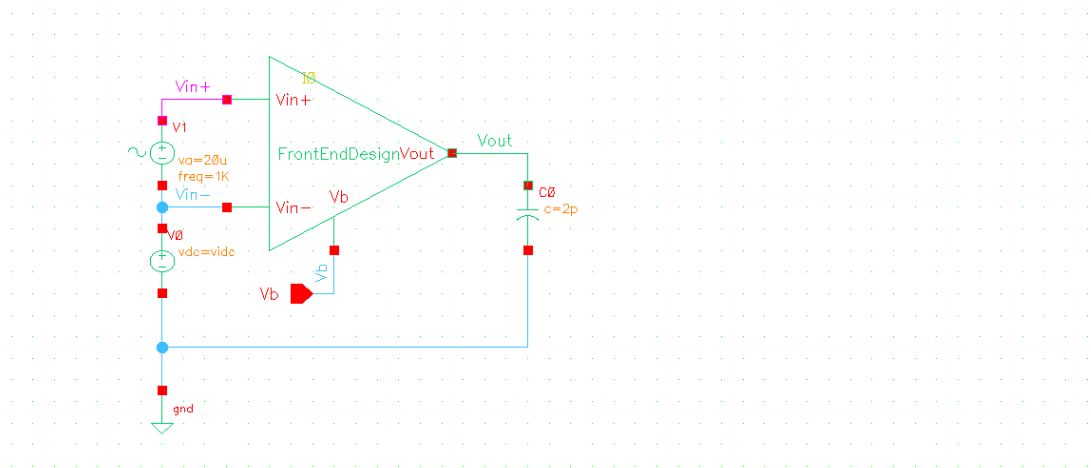
信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

宽长比	PMOS管	宽W//u	长L	宽长比	电阻	阻值/Ω
10	PM0	16	800n	20	Rb	7.41799k
13.75	PM1	16		20	Rz	4.94533k
13.75	PM2	16		20		
10	PM3	30		37.5	电容	电容/fF
10	PM4	30		37.5	Cc	524.34
16	PM5	10		12.5		
16					源	取值
10					V0	1.8V
10					V1	0.8V
10					I0	50uA

【仿真电路】

在对放大器进行封装时将负载电容删去,进行封装后在仿真时将负载电容放置在输出端口。

仿真增益和带宽的电路如下图所示:

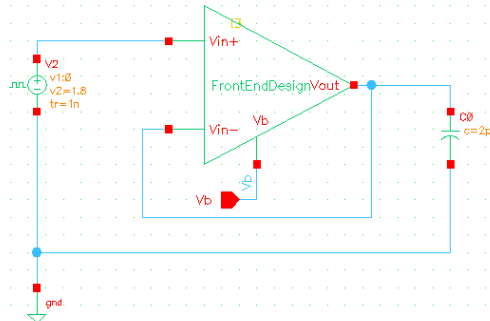


仿真转换速率的电路如下图所示:

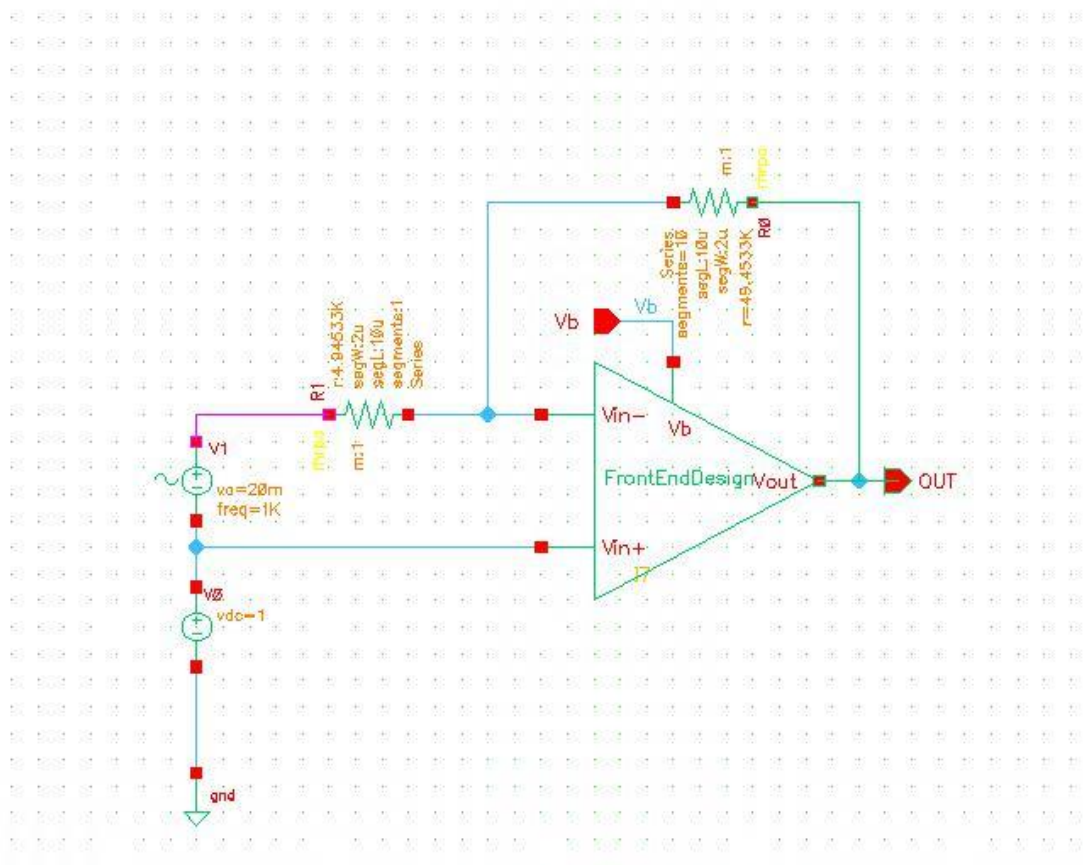
实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO.



反向放大器的电路如下图所示：



经过仿真和调整使放大器各个指标均达标后电路中各个器件参数如上图所

示，整理激励信号及各个电阻电容设定的参数如下表所示：

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

仿真直流增益、带宽和相位裕度

元件	取值
V0	DC voltage=vidc V(0~1.8V扫描)
V1	AC magnitude=1V Amplitude=20uV Frequency=1KHz
C0	2pF

仿真转化速率

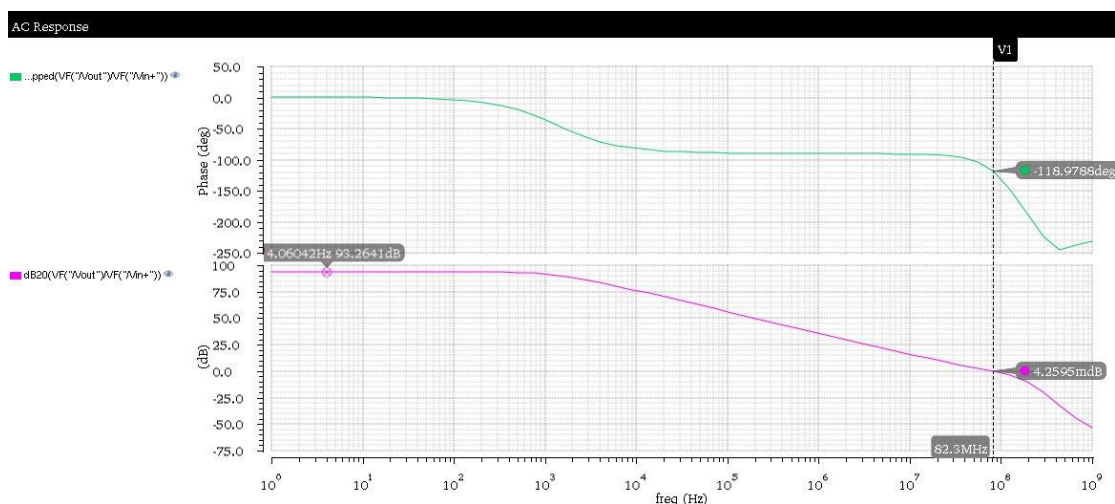
V2	voltage1=0V voltage2=1.8V period=40us Delay time=10us Rise time=1ns Fall time=1ns Pulse width=20us
C0	2pF

增益为-10的反向放大器

V0	DC voltage=1V
V1	AC magnitude=1V Amplitude=20mV Frequency=1KHz
R0	49.4533k Ω
R1	4.94533k Ω

【仿真结果】

仿真得到核心电路的直流增益、单位增益带宽和相位裕度如下图所示：

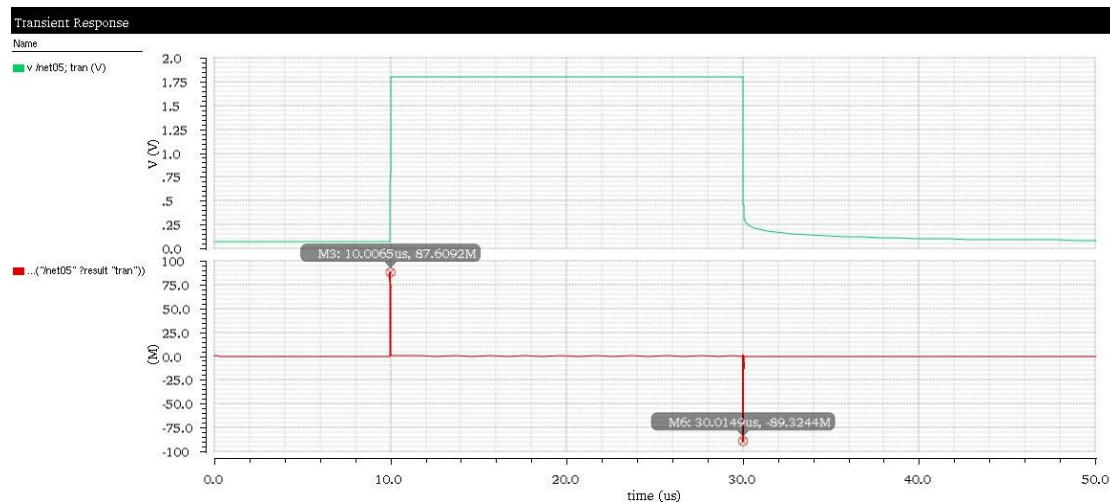


实 验 报 告

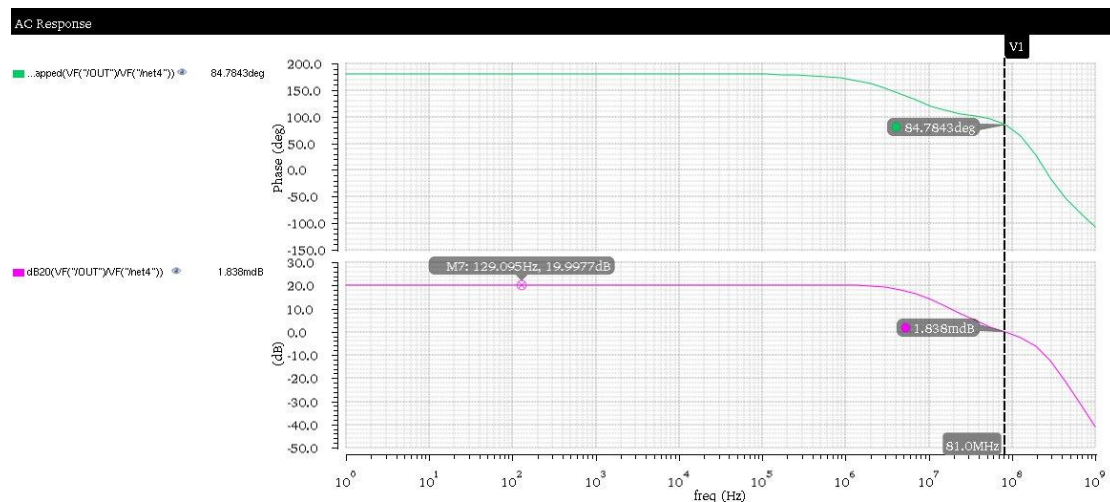
评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

仿真得到核心电路的转换速率如下图所示:



仿真得到反向放大器电路的直流增益和单位增益带宽如下图所示:

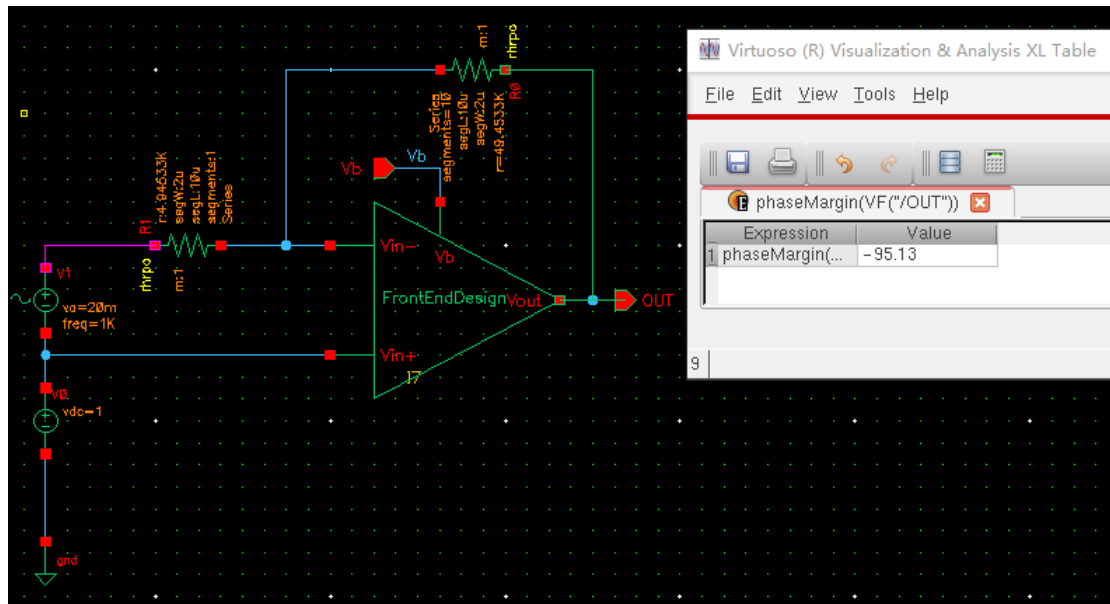


仿真并用计算器计算得到反向放大器电路的相位裕度如下图所示:

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____



整理核心电路指标和仿真结果如下表所示：

指标		指标要求	仿真结果
直流增益		>90dB	93.2641dB
单位增益带宽		80MHz	82.3MHz
相位裕度		60°	61.0212°
转换速率	上升	>25V/us	87.6092M
	下降		89.3244M
输出摆幅		0.6V	1.166481V
电源电压		1.8V	
负载电容		2pF	
功耗		<1.6mW	0.36mW

整理反向放大器电路指标和仿真结果如下表所示：

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

指标	指标要求	仿真结果
直流增益	20dB	19.9977dB
单位增益带宽	80MHz	81MHz
相位裕度	60°	84.87°
输出摆幅	0.6V	1.166481V
电源电压	1.8V	
功耗	<1.6mW	0.36mW

核心放大器零极点仿真结果:

```
*****
PZ Analysis 'pz'
*****

Warning from spectre during PZ analysis 'pz'.
WARNING: BSIM3v3 MOS Transistor - frequency dependent components are present in the circuit, apj

Poles (Hz)

      Real              Imaginary      Qfactor
1  -1.35337e+03          0.00000e+00      5.00000e-01
2  -3.18623e+07          0.00000e+00      5.00000e-01
3  -1.02631e+08          +/- 8.84331e+07      6.60011e-01
4  -2.31036e+08          0.00000e+00      5.00000e-01
5  -2.91690e+08          0.00000e+00      5.00000e-01
6  -3.53136e+08          0.00000e+00      5.00000e-01
7  -2.98148e+08          +/- 2.70928e+08      6.75601e-01
8  -6.54222e+08          0.00000e+00      5.00000e-01
9  -1.10676e+09          0.00000e+00      5.00000e-01
10 -2.14436e+09          0.00000e+00      5.00000e-01
11 -8.60202e+11          0.00000e+00      5.00000e-01
12 -8.85434e+11          0.00000e+00      5.00000e-01
13 -9.36783e+11          0.00000e+00      5.00000e-01

Zeros (Hz)
at V(Vout,0)/V1

      Real              Imaginary      Qfactor
1  -3.37898e+07          0.00000e+00      5.00000e-01
2  -6.31311e+07          0.00000e+00      5.00000e-01
3  -2.50027e+08          0.00000e+00      5.00000e-01
4  -3.55446e+08          0.00000e+00      5.00000e-01
5  -2.67566e+08          +/- 4.96426e+08      1.05384e+00
6  -6.53910e+08          0.00000e+00      5.00000e-01
7  -1.02650e+09          0.00000e+00      5.00000e-01
8  -1.63127e+09          0.00000e+00      5.00000e-01
9  -2.45575e+09          0.00000e+00      5.00000e-01
10  8.10425e+09          +/- 3.65819e+09      -5.48579e-01
11 -5.22180e+11          0.00000e+00      5.00000e-01
12 -8.85544e+11          0.00000e+00      5.00000e-01
13 -9.01696e+11          0.00000e+00      5.00000e-01

Constant factor = 2.93434e-05
DC_gain = 4.63104e+04
```

反向放大器零极点仿真结果:

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

Poles (Hz)			
	Real	Imaginary	Qfactor
1	-5.78863e+06	0.00000e+00	5.00000e-01
2	-3.25675e+07	0.00000e+00	5.00000e-01
3	-1.86596e+08	+/- 1.02923e+08	5.71018e-01
4	-2.08361e+08	+/- 1.60049e+08	6.30482e-01
5	-2.64026e+08	0.00000e+00	5.00000e-01
6	-3.48481e+08	0.00000e+00	5.00000e-01
7	-6.26098e+08	0.00000e+00	5.00000e-01
8	-6.96977e+08	0.00000e+00	5.00000e-01
9	-9.29251e+08	+/- 2.54519e+08	5.18416e-01
10	-2.14752e+09	0.00000e+00	5.00000e-01
11	-8.03516e+11	0.00000e+00	5.00000e-01
12	-8.84209e+11	0.00000e+00	5.00000e-01
13	-8.84688e+11	0.00000e+00	5.00000e-01
14	-9.33898e+11	0.00000e+00	5.00000e-01
Zeros (Hz)			
at V(Vout,0)/V1			
	Real	Imaginary	Qfactor
1	-3.45563e+07	0.00000e+00	5.00000e-01
2	-6.32157e+07	0.00000e+00	5.00000e-01
3	-2.90590e+08	0.00000e+00	5.00000e-01
4	-3.29978e+08	0.00000e+00	5.00000e-01
5	-3.83595e+08	+/- 2.00473e+08	5.64165e-01
6	-6.95513e+08	0.00000e+00	5.00000e-01
7	-1.02943e+09	0.00000e+00	5.00000e-01
8	-1.23556e+09	0.00000e+00	5.00000e-01
9	1.26162e+09	0.00000e+00	-5.00000e-01
10	-2.06129e+09	0.00000e+00	5.00000e-01
11	-3.07272e+11	+/- 7.89785e+10	5.16252e-01
12	-6.89890e+11	0.00000e+00	5.00000e-01
13	-8.83617e+11	0.00000e+00	5.00000e-01
14	-8.84888e+11	0.00000e+00	5.00000e-01
Constant factor = 3.55825e+05			
DC gain = 9.99735e+00			
Accumulated DC solution time = 265.36 ms.			
Intrinsic pz analysis time = -383.958 ms.			

【文件路径】

实验四设计的放大器:

/bks2/Chenglin_Stu2019/PB17061124/analogIC/icbaslab/FrontEndDesign

实验五设计的反向放大器:

/bks2/Chenglin_Stu2019/PB17061124/analogIC/icbaslab/FrontEndDesignFeedback

实验四设计的放大器增益带宽的仿真电路:

/bks2/Chenglin_Stu2019/PB17061124/analogIC/icbaslab/FrontEndDesignTst

实验四设计的放大器转换速率的仿真电路:

/bks2/Chenglin_Stu2019/PB17061124/analogIC/icbaslab/FrontEndDesignTstSR

实 验 报 告

评分:

信 院 系 17 级 姓名 胡 睿 日期 2021-01-09 NO. _____

仿真结果截图:

/bks2/Chenglin_Stu2019/PB17061124/screenshot/2021experimentCourse

【实验收获】

- 1、复习了模拟集成电路设计的知识;
- 2、熟悉了模拟集成电路设计的流程;
- 3、设计了一个实用 CMOS 运算放大器开环核心电路;
- 4、设计了一个增益为-10 的反向放大器电路;
- 5、锻炼了运用理论知识分析、结合 EDA 工具仿真技术进行高增益运算放大器电路前端设计的能力。
- 6、掌握使用 Calculator 工具进行电路频率特性分析、相位裕度以及噪声特性分析等模拟电路设计基本方法。