5.2 电流源电路及其应用

5.2 $I_{R1}=I_{D1}=\frac{1}{2}\mu_{\mathrm{n}}C_{\mathrm{ox}}\left(\frac{W}{L}\right)_1(V_{GS1}-V_t)^2=1.5\times10^{-4}\times(V_{GS1}-2)^2$

$$I_{D1}=\frac{V_{DD}-V_{GS1}}{R_1}=\frac{5-V_{GS1}}{20k}$$

带入求解得到$V_{GS1}=2.85V\left(V_{GS1}=0.82V\text{舍去}\right)$，

$$I_{D1}=0.11mA$$

$$I_{D2}=I_{D1}\frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}=0.022mA$$

5.3 $I_{REF}=I_{D1}=\frac{1}{2}k_n'\left(\frac{W}{L}\right)_1(V_{GS1}-V_t)^2=1.25\times10^{-3}\times(V_{GS1}-0.5)^2=50\mu A$

所以$V_{GS1}=0.6V\left(V_{GS1}=0.4V\text{舍去}\right)$

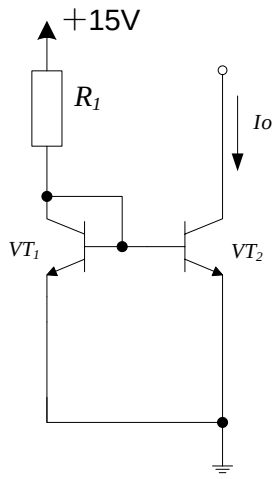
$$I_{REF}=\frac{V_{DD}-V_{GS1}}{R}\Rightarrow R=\frac{1.8-0.6}{50\mu A}=24k\Omega$$

$$V_o=V_{D2},V_{GS2}=V_{GS1}$$

由于 VT2 工作在饱和区，所以

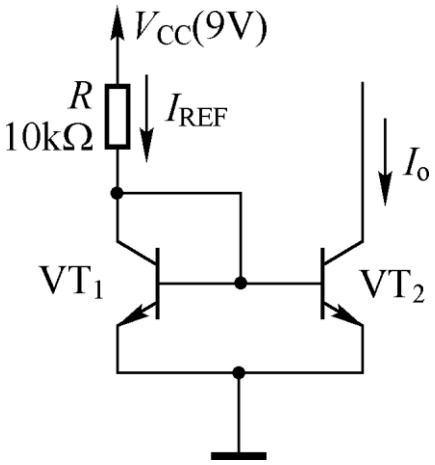
$$V_{DS2}=V_{D2}>V_{GS2}-V_t=V_{GS1}-V_t=0.1V$$

5.4、电流源电路如图所示，设两个三极管完全匹配，V_{BE} = 0.7V，β 足够大，V_A=35V，$R_1=14.3\mathrm{k}\Omega$。试求I_o和r_o的值。



$I_{REF}=\dfrac{15-0.7}{14.3k}=1\text{mA}$ ， $I_o=I_{REF}=1\text{mA}$ ， $r_o=\dfrac{V_A}{I_o}=35\text{k}\Omega$

5.5、电路如图题所示，两管参数相同，β=100，$V_{\text{BE}}=0.7\text{V}$ ，求输出电流 I_{o}。

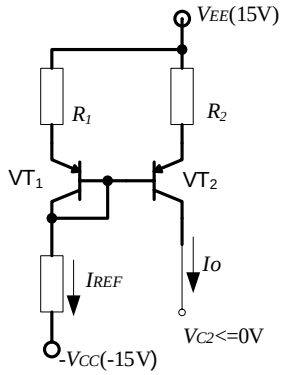


解： $I_{\text{R}EF}=\dfrac{V_{CC}-V_{BE}}{R}=0.83\text{mA}$ ， $I_{REF}=I_{C1}+I_{B1}+I_{B2}=I_{C1}(1+\dfrac{2}{\beta})$

$$\therefore I_O=I_{C1}=\frac{I_{REF}}{1+\dfrac{2}{\beta}}=0.814\text{mA}$$

5.6、一电流源电路如图所示，设 VT_1，VT_2 管参数相同，β=100，V_{BE} = -0.6V，$V_{CE(sat)}$ = -0.3V。

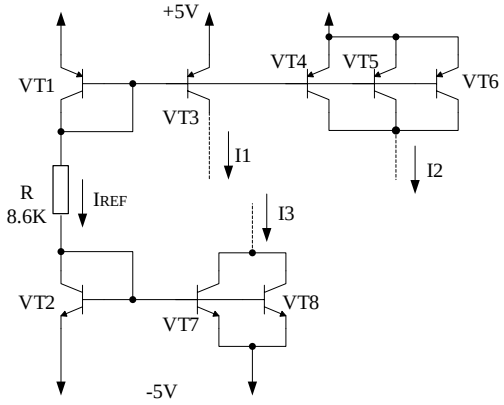
若要使 I_o=1mA，$V_{C2}\leq$0V，且 R_1=R_2，试确定电阻 R_1、R_2 的最大允许值。



$\because V_{EC2} \geq 0.3\text{V}$，又$\because V_{C2} \leq 0 \therefore V_{E2} - V_{C2} \geq 0.3$，$V_{E2} \geq V_{C2} + 0.3 \therefore V_{E2\min} = 0.3\text{V}$

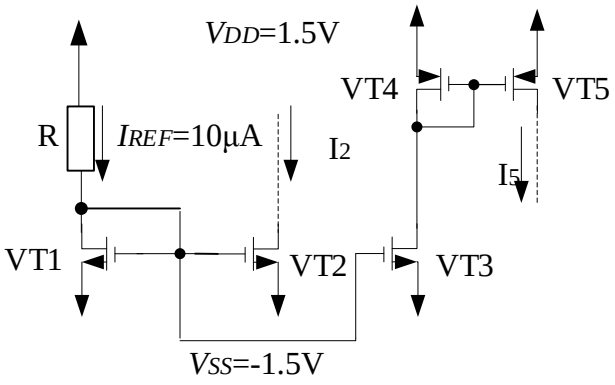
$\because I_o = \dfrac{15 - V_{E2}}{R_2}$，$\therefore R_{2\max} = \dfrac{15 - V_{E2\min}}{I_o} = 14.7\text{k}\Omega$，$R_1$和$R_2$的最大允许值为$14.7\text{k}\Omega$。

5.7、如图所示，假设所有 BJT 均匹配，且 β 都很大，求图中标识的四个电流大小。



$I_{REF} = \dfrac{5 - 0.7 - 0.7 - (-5)}{8.6k} = 1\text{mA}$，$I_1 = 1\text{mA}$，$I_2 = 3\text{mA}$，$I_3 = 2\text{mA}$。

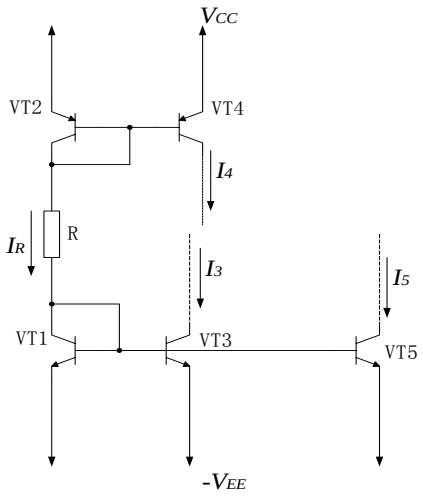
5.8、如图所示，已知 $(W/L)_1 = (W/L)_2 = 0.5(W/L)_3$，$(W/L)_4 = 0.25(W/L)_5$，假设所有晶体管其他参数均匹配，且都工作在饱和区，求电路中的 I_2 和 I_5 的大小。



解：$I_2=\dfrac{(W/L)_2}{(W/L)_1}I_{REF}=10\mu A$ ，$I_3=\dfrac{(W/L)_3}{(W/L)_1}I_{REF}=20\mu A$ ，$I_4=I_3=20\mu A$ ，

$I_5=\dfrac{(W/L)_5}{(W/L)_4}I_4=80\mu A$

5.9、如图所示，$I_5=2mA$ ，$V_{CC}=-V_{EE}=10V$ ，$|V_{BE}|=0.7V$ ，β 足够大。若各管其他参数匹配，结面积关系为 $A_{E1}:A_{E3}:A_{E5}=1:2:2$ ，$A_{E2}:A_{E4}=2:1$，则求 R 值及图中所标的其他电流值。



解：由于结面积关系为 $A_{E1}:A_{E3}:A_{E5}=1:2:2$ ，故 $I_3=\dfrac{A_{E3}}{A_{E5}}I_5=2mA$ ，

$I_R=\dfrac{A_{E1}}{A_{E5}}I_5=1mA$。$\because I_R=\dfrac{10-0.7-0.7-(-10)}{R}=1mA$ ，$\therefore R=18.6k\Omega$

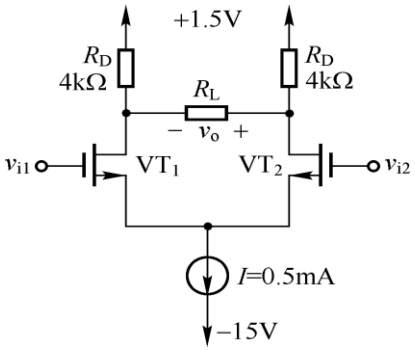
$\because A_{E2}:A_{E4}=2:1$ ，$\therefore I_4=\dfrac{A_{E4}}{A_{E2}}I_R=0.5mA$

5.3 差分放大单元电路

5.10、如图题所示电路，已知$W/L=50$ ，$\mu_{\mathrm{n}}C_{\mathrm{ox}}=250\mu\mathrm{A/V}^2$ ，$V_{\mathrm{A}}=10\mathrm{V}$ ，恒流源 I 的输出电阻为 400kΩ，$R_{\mathrm{L}}=8\mathrm{k}\Omega$ ，求：

（1）差分输出时的差模增益 A_{d} ；

（2）如果 R_{L} 接在 VT_1 的漏极与地之间，求共模抑制比 CMRR。



解：直流分析：$I_{D1}=I_{D2}=I/2=0.25\mathrm{mA}$

小信号参数：$g_m=g_{m1}=g_{m2}=\sqrt{2\mu_nC_{ox}(W/L)I_{D1}}=2.5\mathrm{mA/V}$ ，

$r_o=r_{o1}=r_{o2}=\dfrac{V_A}{I_{D1}}=40\mathrm{k}\Omega$。

（1）差分输出时的差模增益：$A_d=g_m(r_o//R_D//\dfrac{R_L}{2})=4.762\mathrm{V/V}$

（2）单端输出时的差模增益为：$A_{d1}=-\dfrac{1}{2}g_m(r_o//R_D//R_L)=-3.125\mathrm{V/V}$

共模增益为：$A_{vcm1}=-\dfrac{R_D//R_L}{2R_{SS}}=-0.0033\mathrm{V/V}$

共模抑制比为：$CMRR=|\dfrac{A_{d1}}{A_{vcm1}}|=937.5$

5.11

5.12 解：（1）对于 VT_1 VT_2 组成的差分放大器的增益为 10V/V，则

$|A_{vd}|=g_mR_D=10V/V\Rightarrow g_{m1}=g_{m2}=1ms$

对于 VT_1 VT_2 ，有 $I_{D1}=I_{D2}=\frac{1}{2}I_{SS}=0.2\text{mA}$

则有

$$g_{m1}=\frac{2I_{D1}}{V_{OV1}}=\frac{2I_{D1}}{V_{GS1}-V_t}=1ms\Rightarrow V_{GS1}-V_t=0.4V$$

由 $I_{D1}=\frac{1}{2}k_n'\left(\frac{W}{L}\right)_1(V_{GS1}-V_t)^2\Rightarrow\left(\frac{W}{L}\right)_1=\left(\frac{W}{L}\right)_2=25$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_3=\left(\frac{W}{L}\right)_4=50$$

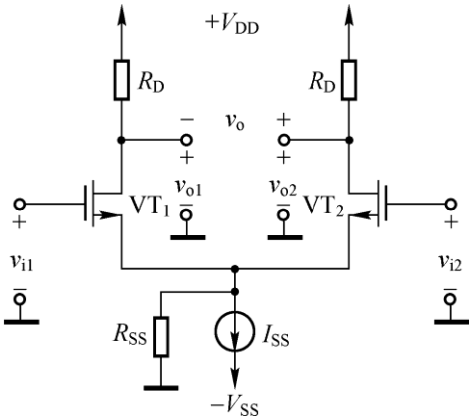
（2）对于 VT_3 有 $I_R=I_{D3}=I_{SS}=0.4mA$

$$I_{D3}=\frac{1}{2}k_n'\left(\frac{W}{L}\right)_3(V_{GS3}-V_t)^2\Rightarrow V_{GS3}=1V(\text{舍去-0.2}V)$$

$$R=\frac{V_{DD}-V_{GS3}-(-V_{SS})}{I_{D3}}=15k\Omega$$

5.13、电路如图所示，NMOS 差分对由 $I_{SS}=0.2\text{mA}$ 的电流源提供偏置，电流源的输出电阻 $R_{SS}=100\text{k}\Omega$。放大器的漏极电阻 $R_D=10\text{k}\Omega$ ，$V_{DD}=V_{SS}=2.5\text{V}$。使用的晶体管的 $k_n'W/L=3\text{mA/V}^2$ ，$V_t=0.8\text{V}$ ，且 r_o 很大。

（1）求直流工作点电压 V_D 和 V_S。（2）如果是单端输出，求 $|A_d|$ ，$|A_{cm}|$ 和 CMRR。



解：（1）、$I_D=I_{D1}=I_{D2}=\frac{1}{2}I_{SS}=0.1\text{mA}$ ，$V_D=V_{DD}-I_DR_D=1.5\text{V}$

$I_{D1}=\frac{1}{2}k_n'\frac{W}{L}(V_{GS1}-V_t)^2$ ，$V_{GS}=1.058\text{V}$或$V_{GS}=0.542\text{V}$(舍去），

$\because V_G=0,\therefore V_S=$-1.058V

（2）、$g_m=\frac{2I_D}{V_{OV}}=0.775\text{mA/V}$ ，$|A_d|=\frac{1}{2}g_mR_D=3.875\text{V/V}$

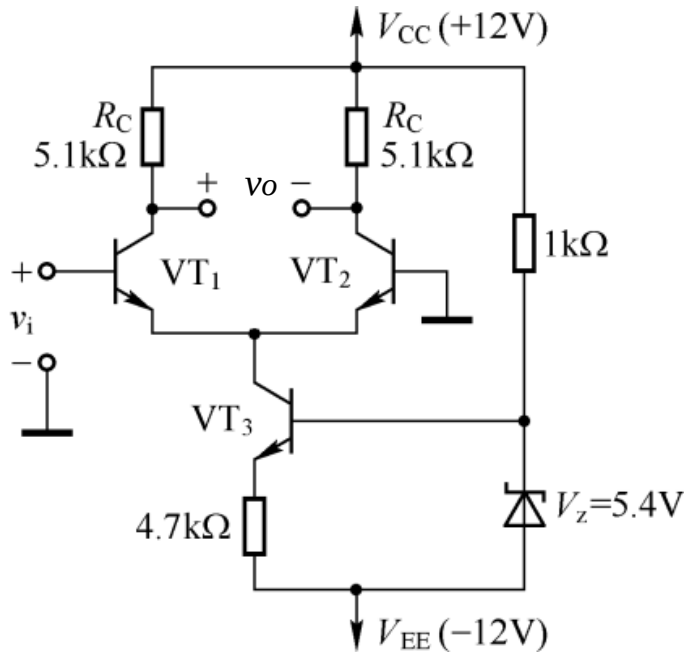
$|A_{cm}|=\frac{R_D}{2R_{SS}}=0.05\text{V/V}$ ，$CMRR=\frac{|A_d|}{|A_{cm}|}=77.5$

5.14、如图题所示，设三极管参数β=100，$V_{\text{BE}}=0.7\text{V}$ ，求：

（1）静态工作点；

（2）差模电压增益 A_{d}；

（3）当 v_{i} 为一直流电压 16mV 时，计算输入端信号的差模分量与共模分量。



解：（1）直流分析：假设所有 BJT 都工作在放大区

$I_{E3}=\frac{V_Z-V_{BE}}{4.7k}=0.978\text{mA}$ ，$\therefore I_C=I_{C1}=I_{C2}=I_{C3}/2=\alpha I_{E3}/2=0.485\text{mA}$

$V_{E1}=V_{E2}=V_{C3}=-0.7\text{V}$ ，$V_{C1}=V_{C2}=V_{CC}-I_CR_C=9.5265\text{V}$

$V_{E3}=V_{EE}+V_Z-V_{BE}=$-7.4V ，显然三个 BJT 都工作在放大区

(2)小信号参数：$g_m=I_C/V_T=19.4\text{mA/V}$

差模电压增益 $A_d = -g_m R_C = -98.94\text{V/V}$

(3) $v_{i1} = 16\text{mV}, v_{i2} = 0 \therefore v_{id} = 16\text{mV}, v_{icm} = 8\text{mV}$

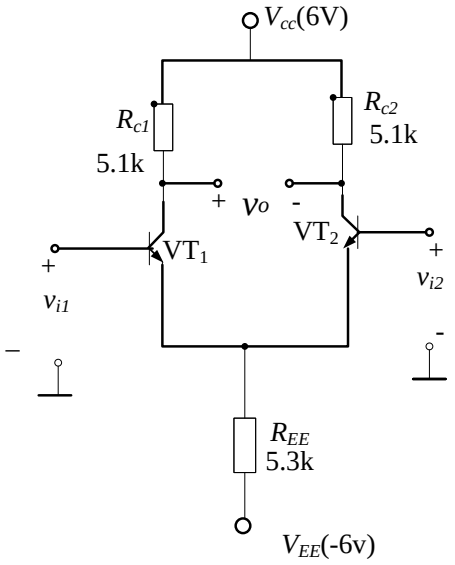
5.15、差动放大电路如图所示，设两管的特性相同，β=100, $V_{BE(ON)}$=0.7V，r_{ce} 可忽略，求：

（1）差模电压放大倍数 A_{vd}=vo/vi;

（2）差模输入电阻 R_{id} 和差模输出电阻 R_{od}。

（3）T_1 管单端输出时的差模电压放大倍数 A_{vd1}。

（4）求单端输出时的共模抑制比 $CMRR$。



解：(1)、$I_{EE} = \dfrac{0 - 0.7 - (-6)}{5.3\text{k}} = 1\text{mA}$ ，$I_{C1} = I_{C2} = \dfrac{1}{2} I_{EE} = 0.5\text{mA}$

$g_m = \dfrac{I_{C1}}{V_T} = 20\text{mA/V}$ ，$A_{vd} = -g_m R_{C1} = -102\text{V/V}$

(2)、$r_\pi = \dfrac{\beta}{g_m} = 5\text{k}\Omega$ ，$R_{id} = 2r_\pi = 10\text{k}\Omega$ ，$R_{od} = 2R_C = 10.2\text{k}\Omega$。

(3)、$A_{vd1} = \dfrac{1}{2} A_{vd} = -51$V

(4)、$CMRR = g_m R_{EE} = 106$V

5．16　解：（1）由于静态时$V_o = 5V$

所以$I_{C2} = \dfrac{V_{CC} - V_o}{R_{c2}} = 0.2mA$，而β足够大，则$I_{E2} \approx 0.2\text{mA}$

$$I_{\text{Re}2} = 0.4\text{mA} \Rightarrow \text{Re} = \frac{\text{0-0.7-（-V}_{EE}\text{）}}{I_{\text{Re}2}} = 23.25k\Omega$$

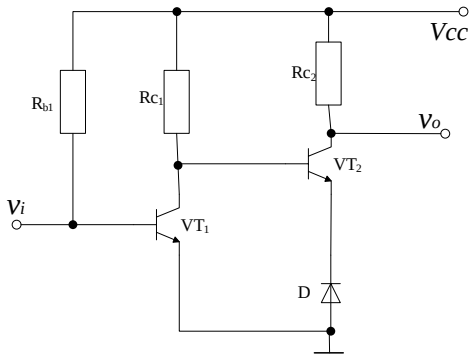
（2）小信号参数$g_m = \dfrac{I_{C2}}{V_T} = 8\text{mA/V}$

$$A_{vd} = -g_m R_{C2} = -80\text{V/V}$$

（3）$A_{\text{cm}} = 0$

5.4 组合放大单元电路——中间放大级设计

5.17、如图所给出的两级直接耦合放大电路中，V_{BEQ1}=V_{BEQ2}=0.7V，已知R_{b1}=240 kΩ，R_{c1}=3.9 kΩ，R_{c2}=500Ω，稳压管 D 的工作电压V_Z=4V，三极管 T1 的β_1=45，T2 的β_2=40，V_{CC}=24V，试计算各级的静态工作点I_{C1}、V_{CE1} 和I_{C2}、V_{CE2}。



假设 T1 管工作在放大区：$I_{B1} = \dfrac{24 - 0.7}{240k} = 97\mu\text{A}$，$I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = 4.365\text{mA}$，忽略 T2 管的基极电流，$V_{CE1} = 24 - 4.365m \times 3.9k = 6.9765\text{V} > 0.3\text{V}$，故 T1 管工作在放大区。∵$D_Z$反向击穿，∴$V_{C1} = V_{B2} = 0.7 + 4 = 4.7\text{V}$，$V_{CE1} = V_{C1} = 4.7\text{V}$。$I_{RC1} = \dfrac{24 - 4.7}{3.9k} = 4.95\text{mA}$，

$I_{B2} = I_{RC1} - I_{C1} = 4.95\text{m} - 4.365\text{m} = 0.585\text{mA}$，$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = 23.4\text{mA}$，

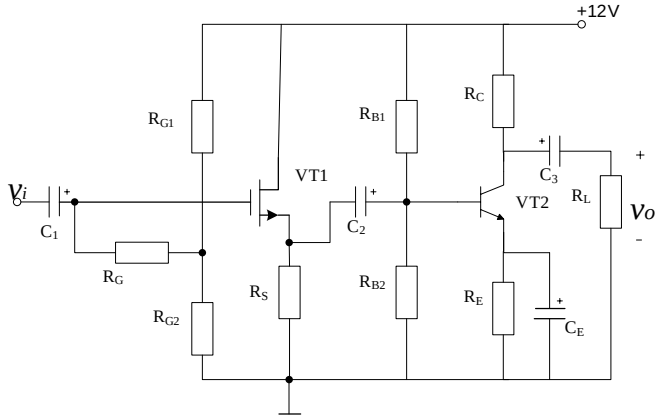
$V_{CE2} = 24 - 23.4\text{m} \times 500 - 4 = 8.3\text{V}$

5.18、两级阻容耦合放大电路如图所示，设旁路电容和耦合电容的容抗可忽略不计。

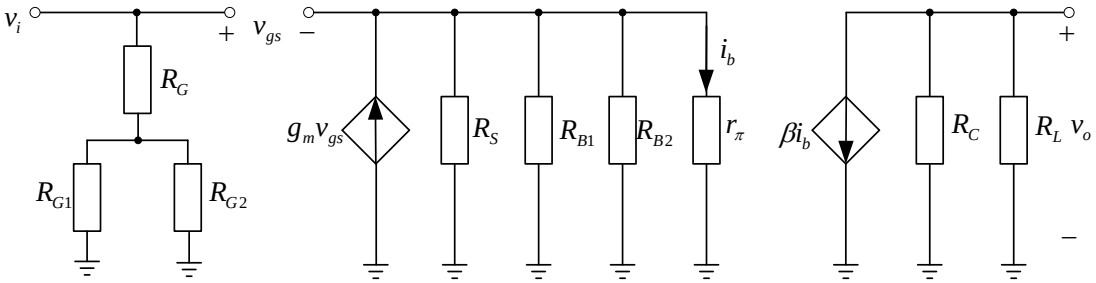
求：1）画出整个电路在中频段的小信号模型电路；

2）第一级放大电路的电压增益 A_{V1} 的表达式；

3）放大电路总的电压放大倍数 A_V 的表达式。



（1）、



（2）、$A_{v1}=\dfrac{v_{o1}}{v_i}=\dfrac{g_m v_{gs}(R_s // R_{i2})}{v_{gs}+g_m v_{gs}(R_s // R_{i2})}=\dfrac{g_m(R_s // R_{i2})}{1+g_m(R_s // R_{i2})}$,其中：$R_{i2}=R_{B1} // R_{B2} // r_\pi$

（3）、$A_{v2}=\dfrac{v_o}{v_{o1}}=-g_{m2}(R_C // R_L)$ ，$A_v=A_{v1}A_{v2}$

5.19

5.20 解（1）Casecode 电路

（2）直流偏置，保证 VT1 和 VT2 工作在放大区或饱和区

（3）均增大

5.21

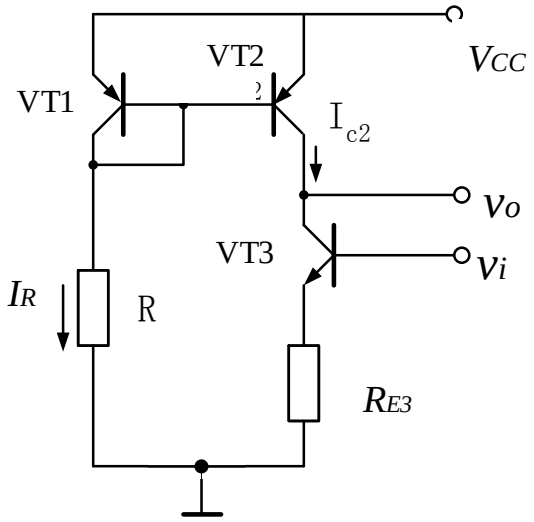
5.5 有源负载放大器

5.22、某集成运放的单元电路如图所示，设 V_{cc}、R、晶体管的 β、$V_{BE(on)}$ 和 V_A 均为已知，

VT1、VT2 管特性相同，

1) 写出 I_R 和 I_{c2} 的表达式；

2) 写出 VT2 管集电极的输出电阻的表达式。

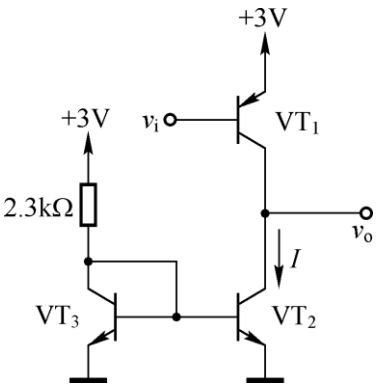


解：(1)、$I_{C2}=I_R=\dfrac{V_{CC}-V_{BE(on)}}{R}$，(2)、$r_{o2}=r_{o1}=\dfrac{V_A}{I_{C2}}$，

$$R_{o2}=r_{o1}\,//\,r_{o2}=\frac{V_A}{2}\frac{R}{V_{CC}-V_{BE(on)}}$$

5.23、如图题所示，已知各晶体管 $|V_{BE}|=0.7\text{V}$，$|V_{A1}|=|V_{A2}|=50\text{V}$，$\beta_1=50$，$\beta_2$ 和 β_3 很大，

求：(1) 假设 VT_2 的集电结面积和 VT_3 相等，求 I 的值；(2) A_v、R_i 和 R_o 的值。



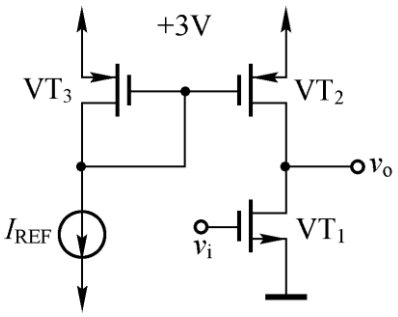
解：(1)、VT2 和 VT3 构成一对电流源，为 VT1 提供直流偏置，并作为 VT1 的有源负载

$$I=\frac{3-V_{BE}}{2.3}=1\text{mA}$$

（2）$r_{\pi 1}=\beta_1\frac{V_T}{I}=1.25\text{k}\Omega$，$g_{m1}=\frac{I_C}{V_T}=40\text{mA/V}$，$r_{o1}=r_{o2}=\frac{|V_A|}{I}=50\text{k}\Omega$

$A_v=-g_{m1}(r_{o1}//r_{o2})=-1000\text{V/V}$，$R_i=r_{\pi 1}=1.25\text{k}\Omega$，$R_o=r_{o1}//r_{o2}=25\text{k}\Omega$

5.24、如图题所示，已知$V_{\text{tn}}=|V_{\text{tp}}|=0.6\text{V}$，$\mu_{\text{n}}C_{\text{ox}}=200\mu\text{A/V}^2$，$\mu_{\text{p}}C_{\text{ox}}=65\mu\text{A/V}^2$，$V_{\text{An}}=20\text{V}$，$|V_{\text{Ap}}|=10\text{V}$，$I_{\text{REF}}=200\mu\text{A}$。对于 VT_1、VT_2 有 $L=0.4\mu\text{m}$，$W=4\mu\text{m}$，对于 VT_3 有 $L=0.4\mu\text{m}$，$W=8\mu\text{m}$。求 A_{v}、R_{i} 和 R_{o}。



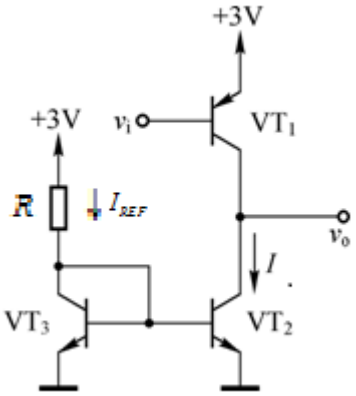
解：VT2 和 VT3 组成恒流源电路，作为放大管 VT1 的有源负载，则

$$I_{D1}=I_{D2}=\frac{(W/L)_2}{(W/L)_3}I_{REF}=100\mu\text{A}，g_{m1}=\sqrt{2\mu_nC_{ox}(W/L)_1I_{D1}}=0.632\text{mA/V}$$

$$r_{o1}=\frac{V_{An}}{I_{D1}}=200\text{k}\Omega，r_{o2}=\frac{|V_{Ap}|}{I_{D2}}=100\text{k}\Omega$$

$$A_v=-g_{m1}(r_{o1}//r_{o2})=-42.164\text{V/V}，R_i=\infty，R_o=r_{o1}//r_{o2}=66.667\text{k}\Omega$$

5.25、（设计题）如图所示电路，假设 VT2 管发射结的面积是 VT3 管的 5 倍，各晶体管的 $|V_{BE}|=0.7\text{V}$，β_2、β_3 均很大。（1）、设计 R 值，使参考电流 $I_{REF}=0.1\text{mA}$。（2）、若放大器的输出电阻 $R_o=50\text{k}\Omega$，求 A_v。



解：（1）、$I_{REF}=\dfrac{3-0.7}{R}=0.1\text{mA}$，$R=23\text{k}\Omega$

（2）、$\because \dfrac{I}{I_{REF}}=5,\therefore I=0.5\text{mA}$，$g_{m1}=I/V_T=20\text{mA/V}$

$A_v=-g_{m1}R_o=-1000\text{V/V}$

5.26

解：$I_{D1}=I_{D2}=I_{D3}=I_{D4}=\dfrac{1}{2}I$

$I_{D2}=\dfrac{1}{2}k_n'\dfrac{W}{L}V_{OV2}{}^2\Rightarrow V_{OV2}{}^2=\dfrac{I}{k_n'\dfrac{W}{L}}=\dfrac{I}{3.2}$

$\dfrac{v_o}{v_{id}}=\dfrac{1}{2}g_m r_o=80$，$g_m=\dfrac{2I_D}{V_{OV}}=\dfrac{I}{V_{OV}}$，$r_o=\dfrac{V_A}{I_D}=\dfrac{2V_A}{I}$

则 $\dfrac{I}{V_{OV}}\times\dfrac{2V_A}{I}=160=\dfrac{40}{V_{OV}}\Rightarrow V_{OV}{}^2=\dfrac{1}{16}V^2$

则 $I=3.2\times\dfrac{1}{16}=0.2mA$

5.27

5.28

5.29

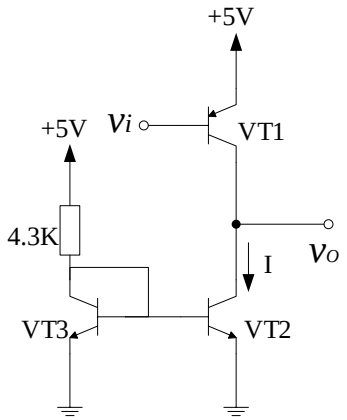
5.6 单级集成放大器的频率响应

5.30、BJT 的有源负载共射放大电路如图所示，已知各晶体管$|V_{BE}|$=0.7V，$|V_{A1}|=|V_{A2}|$=50V，β_1=50，β_2 和 β_3 都很大，$C_p=10\,\text{pF}$，$C_\mu=0.5\,\text{pF}$。

（1）求共射放大器的输出电阻 R_o；

（2）求共射放大器的电压增益 v_o/v_i；

（3）不考虑 VT2 输出电容的影响，求 f_H 的值（利用米勒等效）。



解：（1）、$I=I_3=\dfrac{5-0.7}{4.3\text{k}}=1\text{mA}$，$r_{o1}=r_{o2}=\dfrac{|V_{A`}|}{I}=50\text{k}\Omega$，$R_o=r_{o1}//r_{o2}=25\text{k}\Omega$

（2）、$g_{m1}=\dfrac{I}{V_T}=40\text{mA/V}$，$A_v=\dfrac{V_o}{V_i}=-g_{m1}R_o=-1000\text{V/V}$

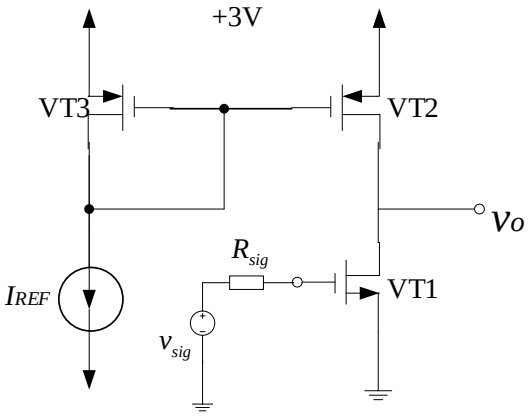
（3）、$C_{eq}=(1+g_{m1}R_o)C_\mu=500.5\text{pF}$，$C_{in}=C_{eq}+C_\pi=510.5\text{pF}$

$r_{\pi1}=\dfrac{\beta_1}{g_{m1}}=1.25\text{k}\Omega$，$f_H=\dfrac{1}{2\pi C_{in}r_\pi}=250\text{kHz}$

5.31、如图所示，已知$V_{tn}=|V_{tp}|=0.6\text{V}$，$\mu_nC_{ox}=200\mu\text{A/V}^2$，$\mu_pC_{ox}=65\mu\text{A/V}^2$，$V_{An}=|V_{Ap}|=10\text{V}$，$I_{REF}=100\mu\text{A}$，$R_{sig}=5\text{k}\Omega$。所有晶体管的 $L=0.4\mu\text{m}$，$W=0.8\mu\text{m}$

VT_1 的 $C_{gs}=0.02\text{pF}$ ，$C_{gd}=0.005\text{pF}$。试求 :1)中频增益 A_M ;2)电流源 VT2 的输出电阻；

3)不考虑 VT2 输出电容的影响，求 f_H 的值（利用米勒等效）。



解 :（1）、$\because I_1=I_2=I_3=I_{REF}=100\mu\text{A}$ ，$\therefore g_{m1}=I_1/V_T=4\text{mA/V}$ ，

$r_{o1}=r_{o2}=|V_A|/I_{REF}=100\text{k}\Omega$ ， $A_M=-g_{m1}(r_{o1}//r_{o2})=-200\text{V/V}$

（2）、电流源的输出电阻为： $r_{o2}=100\text{k}\Omega$

（3）、$C_{in}=[1+g_{m1}(r_{o1}//r_{o2})]C_{gd}+C_{gs}=1.025\text{pF}$

$$f_H=\frac{1}{2\pi R_{sig}C_{in}}=31\text{MHz}$$

5.32