第一章：半导体

一. 本征半导体：略

二. PN结：

浓度差产生运动：扩散运动

电场力作用运动：漂移运动

多数子　空间电荷区 耗尽层 阻挡层 势垒　少数子

电流方程. $i = I_S(e^{\frac{qu}{kT}}-1)$

$U_T = \frac{kT}{q} \approx 26mV$ (300k)

击穿：高掺杂、电压小，齐纳击穿

低掺杂、电压大，雪崩击穿

电容：势垒电容 C_b，扩散电容 C_d

耗尽层宽度变　载流子累积释放

二极管

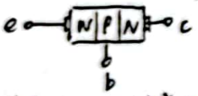
	U_{on}	导通电压	反向饱和 I_S
Si	0.5V	0.6~0.8	<0.1
Ge	0.1V	0.1~0.3	几十

微变等效：

$\frac{1}{r_d} = \frac{\partial i_D}{\partial u_D} \approx \frac{di}{du} = \frac{I_S}{U_T}e^{\frac{u}{U_T}} = \frac{I_D}{U_T}$

$r_d = U_T/I_D$

三极管：



b浓度小，e.c浓度大.

放大：be通，bc断

饱和：be通，bc通

截止：be.bc断

判断工作状态

电位；

电流

$I_B=I_C=I_E=0$ 截止

$I_B>0$ $I_C=\beta I_B$ 放大

$I_B>0$. $I_C<\beta I_B$ 饱和

判断性质与结构

(1) 0.7V Si；0.25V Ge

(2) 剩下的为C

(3) U_C最高→NPN→$U_B>U_E$

U_C最低→PNP→$U_E>U_B$

升温，电流变大

场效应管：

结型场：$U_{GS}=0V$. ds通

$U_{GS} \in (U_{GS(off)}, 0)$ ds通，电流小

$U_{GD}=U_{GS}-U_{DS} \le U_{GS(off)}$ 夹断 i_D恒流

$U_{GD} > U_{GS(off)}$，d-s为不同值电阻

$i_D = I_{DSS}(1-\frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}})^2$

I_{DSS}：$U_{GS}=0$ 预夹断下 I_D

绝缘栅：

$U_{GS} > U_{GS(th)}$ ds通.

当 $U_{GD} > U_{GS(th)}$ ds 电阻

$U_{GD} < U_{GS(th)}$ i_D恒流

$i_D = I_{DO}(\frac{U_{GS}}{U_{GS(th)}}-1)^2$

$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}}\sqrt{I_{DO}i_D}$

I_{DO}：$U_{GS}=2U_{GS(th)}$ 时 i_D

第二章：放大电路

输入电阻：$R_i = \frac{U_i}{I_i}$

输出电阻：$R_o = (\frac{U_o'}{U_o}-1)R_L$

$U_o = \frac{R_L}{R_o+R_L}U_o'$

U_o'：空载时电压

分析电路：

先静态：　①信号源短路

直流通路：①C开路 ②L短

$I_{BQ} = \frac{V_{BB}-U_{BEQ}}{R_b}$

$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$

$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C$

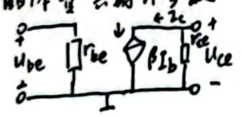
交流通路：

①大电容短 ② V_{CC}短

失真：饱和失真 — 下半失真

截止失真 — 上半失真

晶体管共射h参数



$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e'} + r_e = r_{bb'} + r_{b'e}$

$\frac{1}{r_{b'e}} = \frac{I_S}{U_T}e^{\frac{u}{U_T}} = \frac{i_E}{U_T} = \frac{I_{EQ}}{U_T}$

$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + (1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}}$

r_e ~ 几欧，$r_{bb'}$ ~ 几十~几百

r_{ce} ~ 很大，当断路

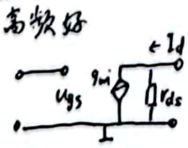
共射：放大电路，R_o大，频带窄

共集：R_i大，R_o小，电压跟随

共基：放大电压不放大电流

R_i小，高频好

场效应管



r_{ds} ~ 几十千欧，几百千欧

$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}}\sqrt{I_{DO}I_{DQ}}$

复合管：前管主管，后管放大

①电流固定 ②前管c或e在后b

第三章：

多级放大：

直接耦合，阻容~

变压器~，光电~

分析：

①明确多级

②明确耦合

③明确放大组态

④多级与单级变化

直接：列多程

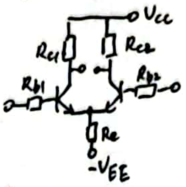
阻容：多级独立

交流：$A_u = \prod A_{ui}$

(A_{ui}在级内算)

直接耦合的零漂：

差分放大电路



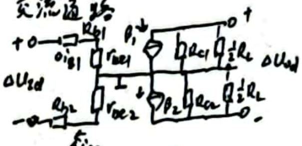
$I_{Re} = I_{EQ1} + I_{EQ2} = 2I_{EQ}$

$I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + 2I_{EQ}R_e = V_{EE}$

$I_{EQ} = \frac{V_{EE}-U_{BEQ}}{2R_e}$

$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1+\beta}$

交流通路



$A_d = -\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$

$R_i = 2(R_b + r_{be})$

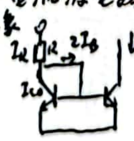
$R_o = 2R_c$

四种输入.输出

改进：V_{EE} 改为电流源.

电流源电路：

镜像



$I_R = \frac{V_{CC}-U_{BE}}{R}$

$= I_C + \frac{2I_C}{\beta}$

$I_C = \frac{\beta}{\beta+2}I_R$

比例：

$U_{BE0} + I_{E0}R_{e0}$

$= U_{BE1} + I_{E1}R_{e1}$

$U_{BE0} - U_{BE1} \approx U_T \ln\frac{I_{E0}}{I_{E1}}$

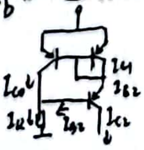
$I_{C1} = \frac{R_{e0}}{R_{e1}}I_R$

微电流源

$I_{C1} = I_{E1} = \frac{U_{BE0}-U_{BE1}}{R_e}$

则 I_{C1} ~ 几十微安

威尔逊电流源



$I_{E2} = I_C + 2I_B = I_C + \frac{2I_C}{\beta}$

$I_C = \frac{\beta}{\beta+2}I_{E2} = \frac{\beta+1}{\beta+2}I_{C2}$

$I_R = I_{B2} + I_C = \frac{\beta^2+2\beta+2}{\beta^2+2\beta}I_{C2}$

$I_{C2} = (1-\frac{2}{\beta^2+2\beta+2})I_R \approx I_R$

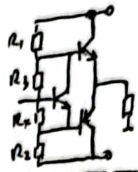
互补输出级：

上下各一半，有交越失真.

$U_{B1} \approx U_{B2} = U_i$

$U_{B1B2} = U_{D1} + U_{D2}$

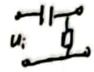
无交越



$U_{B1B2} = U_{CE}$

$= \frac{R_3+R_4}{R_4}U_{BE}$

第四章 频响



高通电路：

$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1+\frac{1}{j\omega RC}}$　$f_L = \frac{1}{2\pi RC}$

$A_u = \frac{1}{1+\frac{f_L}{jf}}$　$|A_u| = \frac{f/f_L}{\sqrt{1+(\frac{f}{f_L})^2}}$

$\varphi = 90° - \tan^{-1}\frac{f}{f_L}$

$f \gg f_L$　$|A_u|=1$. $\varphi=0°$

$f = f_L$　$|A_u| = \frac{1}{\sqrt{2}}$　$\varphi=45°$

$f \ll f_L$　$|A_u| = f/f_L$　$\varphi \to +90°$

低通电路

$A_u = \frac{1}{1+j\omega RC}$　$f_H = \frac{1}{2\pi RC}$

$A_u = \frac{1}{1+jf/f_H}$　$|A_u| = \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_H)^2}}$

$\varphi = -\tan^{-1}\frac{f}{f_H}$

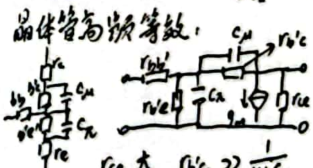
$f \ll f_H$　$|A_u|=1$　$\varphi=0°$

$f = f_H$　$|A_u| = 1/\sqrt{2}$　$\varphi = -45°$

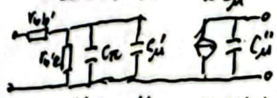
$f \gg f_H$　$|A_u| = f_H/f$　$\varphi \to -90°$

波特图：$20\lg|A_u| = 20\lg\frac{f}{f_L} - 20\lg\sqrt{1+(\frac{f}{f_L})^2}$

晶体管高频等效：



r_{ce}大，$r_{b'c} \gg \frac{1}{\omega C_\mu}$



$\because I_{C\mu} = \frac{U_{b'e}-U_{ce}}{X_{C\mu}} = \frac{(1-K)U_{b'e}}{X_{C\mu}}$ ($K = \frac{U_{ce}}{U_{b'e}}$)

$X_{C\mu}' = \frac{U_{b'e}}{I_{C\mu}} = \frac{X_{C\mu}}{1-K}$

$C_\mu' = (1-K)C_\mu \approx (1+|K|)C_\mu$

$C_\pi' = C_\pi + C_\mu'$　$C_\mu'' = \frac{K-1}{K}C_\mu$

一般可忽略 C_μ''

$r_{b'e} = (1+\beta_0)\frac{U_T}{I_{EQ}}$　(β_0低频下放大倍数)

$I_c = g_m U_{b'e} = \beta_0 I_b$

$g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} = \frac{I_{EQ}}{U_T}$

$C_\pi' = C_\pi + C_\mu$

$\dot\beta = \frac{\beta_0}{1+j\omega r_{b'e}C_\pi'}$　$f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e}C_\pi'}$

$\dot\beta = \frac{\beta_0}{1+jf/f_\beta}$　$f_T = \beta_0 f_\beta$

f_T：$|\dot\beta|$下降到1时的频率

单管频响：

① 中频段：如第二章

② 低频段

$A_{usl}=A_{usm}\dfrac{jf/f_L}{1+jf/f_L}=\dfrac{A_{usm}}{1+f_L/jf}$

$f_L=\dfrac{1}{2\pi(R_C+R_L)C}$

$20\lg|A_{usl}|=20\lg|A_{usm}|+20\lg\dfrac{f/f_L}{\sqrt{1+(f/f_L)^2}}$

$\varphi=-90^\circ-\tan^{-1}(f/f_L)$

③ 高频段

$A_{ush}=A_{usm}\dfrac{1}{1+jf/f_H}$　$f_H=\dfrac{1}{2\pi RC_n'}$

$R=r_{b'e}//(r_{bb'}+R_S//R_b)$

$\therefore A_{us}=A_{usm}\dfrac{1}{(1+\frac{f_L}{jf})(1+\frac{jf}{f_H})}$

$|A_{usm}\cdot f_{bw}|=\dfrac{1}{2\pi C_\mu(r_{bb'}+R_s)}$ 增益带宽积

$f_{bw}=f_H-f_L\approx f_H$

多级：$A_u=\prod A_{uk}$

$f_L=\sqrt{\Sigma f_{Lk}^2}\approx1.1\sqrt{\Sigma f_{Lk}^2}$

$1/f_H=\sqrt{\Sigma\frac{1}{f_{Hk}^2}}\approx1.1\sqrt{\Sigma\frac{1}{f_{Hk}^2}}$

第五章：反馈

相异端子，极性 同→负，反→正 （串）

相同端子，极性 同→正，反→负 （并）

$X_i'=X_i-X_f$

$A=\dfrac{X_o}{X_i'}$　$A_f=\dfrac{X_o}{X_i}$

$F=\dfrac{X_f}{X_o}$　$AF=\dfrac{X_f}{X_i'}$

$A_f=\dfrac{A}{1+AF}$　负反馈 $AF>0$

正反馈 $AF<0$

$\approx\dfrac{1}{F}$　深度负反馈 $|1+AF|\gg1$

（实质忽略 X_i'）

①串联负反馈 增大 输入电阻 $R_{if}=(1+AF)R_i$

②并联负～ 减小 ～ $R_{if}=\dfrac{R_i}{1+AF}$

③电压负～ 减小 输出电阻 $R_{of}=\dfrac{R_o}{1+AF}$

④电流负～ 增大输出电阻 $R_{of}=(1+AF)R_o$

⑤展宽频带：$f_{Hf}=(1+AF)f_H$

$f_{Lf}=f_L/(1+AF)$

自激振荡：$X_o=AX_i'=-AFX_f\Rightarrow AF=-1$

即维持 $|AF|=1$　$\varphi_A+\varphi_F=(2n+1)\pi$

起振 $|AF|>1$

负反馈稳定判断：

(1) 满足~~相位~~自激相位的 f_0，幅值 f_c

(2) 不存在 f_0，电路稳定

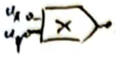
(3) $f_0<f_c$，不稳定；$f_0>f_c$ 稳定

幅值裕度：$f=f_0$ 时 $20\lg|AF|=G_m<0$ 幅值裕度

一般 $G_m\le-10$ dB 够稳

$f=f_c$ 时 $\varphi_m=180^\circ-|\varphi_A+\varphi_F|>0$ 相位裕度

$\varphi_m>45^\circ$ 稳定



乘法器

$\therefore u_o=ku_Xu_Y$

第七章：波形发生

产生正弦波：满足自激振荡

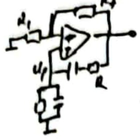
正弦振荡电路组成：

①放大电路 ②选频 ③正反馈网 ④稳幅

$F=\dfrac{u_f}{u_o}=\dfrac{R//\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}+R//\frac{1}{j\omega C}}$

$=\dfrac{1}{3+j(\omega RC-\frac{1}{\omega RC})}$

$f_0=\dfrac{1}{2\pi RC}$　$F=\dfrac{1}{3+j(\frac{f}{f_0}-\frac{f_0}{f})}$



$A_u=\dfrac{u_o}{u_p}=1+\dfrac{R_f}{R_1}\ge3$

$\therefore R_f\ge2R_1$

在 R_f 处加二极管，稳定电压

LC 选频，$f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

$Q=\dfrac{\omega_0L}{R}\approx\dfrac{1}{R}\sqrt{\dfrac{L}{C}}$

C↓，L↑，Q↑ 选频好

变压器反馈：$\beta>\dfrac{r_{be}R'C}{M}$

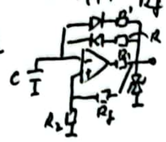
电感反馈：$\beta>\dfrac{L_1+M}{L_2+M}\dfrac{r_{be}}{R_L''}$

$R_L''=$

矩形波

$T=2RC\ln(1+\dfrac{2R_2}{R_f})$

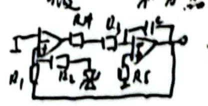
方波



$T=RC\ln(1+\dfrac{2R_2}{R_f})+R'C\ln(1+\dfrac{2R_2}{R_f})$

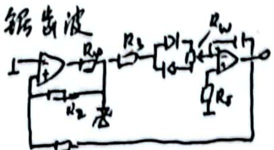
三角波

滞回　积分器



$T=\dfrac{4R_1R_3C}{R_2}$

锯齿波



电位器最上端　$R_W\gg R_3$

$T_1=\dfrac{2R_1}{R_2}R_3C$　$T_2=\dfrac{2R_1}{R_2}(R_3+R_W)C$

$T=T_1+T_2\approx T_2$

$\dfrac{T_1}{T}=\dfrac{R_3}{2R_3+R_W}$

方→三角：积分

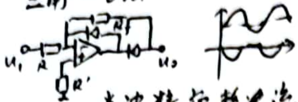
矩形→锯齿 积分

方/矩→正弦 滤波

正弦→方/矩 电压比较器

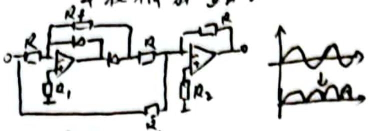
三角→方 微分

三角→正弦



$u_o=-\dfrac{R_f}{R}u_i$

半波精密整流



全波精密整流　$u_o=u_I$　$u_I>0$

$u_o=-u_I$　$u_I<0$