



山东大学

## 信息科学与工程学院

2021 – 2022 学年第二学期

# 实 验 报 告

课程名称: 高频电子线路实验

实验名称: 高频功率放大器

专 业 班 级 通信工程 一班

学 生 学 号 202000150137

学 生 姓 名 邹宇豪

实 验 时 间 2022 年 4 月 21 日

## 实验二 高频功率放大器实验

### 【实验目的】

- 1、了解丙类高频功率放大器的组成、特点
- 2、进一步理解高频谐振功率放大器的工作原理以及负载阻抗、输入激励电压、电源电压等对高频谐振功率放大器工作状态及性能的影响
- 3、掌握高频谐振功率放大器的调谐、调整方法以及主要质量指标的测量方法
- 4、掌握高频谐振功率放大器的设计方法

### 【实验仪器与设备】

数字双踪示波器、高频毫伏表、万用表、高频信号发生器和实验模块 11—高频功率放大器。

### 【实验原理】

高频功率放大器是发射机的重要组成部分,通常用在发射机末级和末前级,主要作用是对高频信号的功率进行放大,以高效率输出最大的高频功率,使其达到发射功率的要求。通常高频功率放大器工作在丙类状态,负载为 LC 谐振回路,以实现选频滤波和阻抗匹配。

#### 1) 谐振功率放大器的工作原理

放大器按照电流导通角  $\theta$  的范围可分为甲类、乙类及丙类等不同类型。电流导通角  $\theta$  越小,功率放大器的效率越高。丙类功率放大器的电流导通角  $\theta < 90^\circ$ ,效率可达 80%以上,通常作为发射机末级功率放大器,以获得较大的输出功率和较高的效率。为了不失真地放大信号,它的负载必须是 LC 谐振回路。

图 1 是一个谐振放大器的原理图,图中  $V_{BB}$  为基极直流偏置电阻,  $V_{CC}$  为集电极直流电源电压。由于丙类谐振功率放大器采用的是反向偏置,因此  $V_{BB}$  应为负值 (NPN 型管),在静态时,管子处于截止状态。只有当激励电压  $v_b$  足够大,超过反偏电压  $V_{BB}$  及晶体管起始导通电压  $V_{BE(on)}$  之和时,管子才导通。这样,管子只在一个周期的一小部分时间内导通。所以集电极电流  $i_c$  是周期性的余弦脉冲,波形如图 2 所示。显然,一个周期集电极电流  $i_c$  只在  $-\theta \sim \theta$  时间内导通,  $2\theta$  是一个周期内的集电极电流导通角,为方便起见,后面将  $\theta$  称为集电极电流导通角。

要得到集电极电流和激励电压  $v_b$  的关系,应从晶体管的转移特性入手,三极管的转移特性与  $i_c$  和  $v_b$  的关系如下所示。

为了分析集电极电流与激励电压  $v_b$  的关系,最简单的办法是从图 2 所示的晶体管的转移特性曲线入手,工程上常采用折线近似处理。

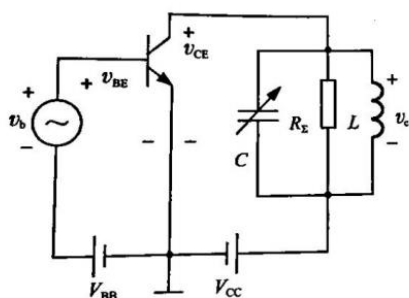


图1 谐振放大器的原理图

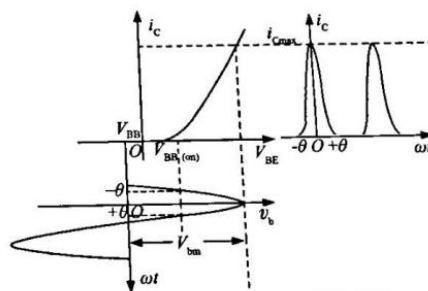


图2 由晶体管的转移特性曲线  
得到的  $i_c$  与  $v_b$  的关系曲线

实际上，工作在丙类状态的晶体管各级电流  $i_B$ 、 $i_C$ 、 $i_E$  均为周期性的余弦脉冲，均可以展开为傅里叶级数形式，其中将  $i_C$  的傅里叶展开式为

$i_C = I_{C0} + I_{C1m} \cos \omega t + I_{C2m} \cos 2\omega t + \dots$  可以看出集电极电流  $i_C$  的谐波分量丰富，于是应当进行滤波以得到正确的集电极输出。

根据谐振功率放大器在工作时是否进入饱和区，可将放大器分为欠压、过压和临界三种工作状态。若在整个周期内，晶体管工作不进入饱和区，即在任何时刻都工作在放大区，则称放大器工作在欠压状态；若刚刚进入饱和区的边缘，则称放大器工作在临界状态；若晶体管工作时有部分时间进入饱和区，则称放大器工作在过压状态。放大器的这三种工作状态取决于电源电压  $V_{CC}$ 、偏置电压  $V_{BB}$ 、激励电压幅值  $V_{bm}$ 。以及集电极等效负载电阻  $R_L$ 。

## 2) 谐振功率放大器的外部特性

### (1) 负载特性

负载特性是指谐振功率放大器维持  $V_{CC}$ 、 $V_{BB}$ 、 $V_{bm}$  不变时放大器的工作状态、性能 ( $V_{CC}$ 、 $I_{C0}$ 、 $I_{C1m}$ 、 $P_D$ 、 $P_o$ 、 $P_c$ 、 $\eta_c$ ) 随  $R_L$  的变化。如图3所示：

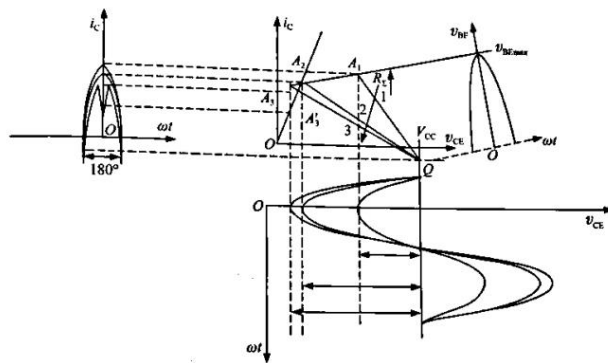


图3 负载变化对放大器工作状态的影响

当  $R_L$  升高时, 由  $V_{cm} = I_{c1m} R_L$  可知  $V_{cm}$  同样升高, 电路工作状态经历了从欠压到临界又到过压状态, 如图3所示。集电极电流  $i_c$  由近似余弦脉冲波形逐渐变化到中间有凹陷的脉冲波, 如图4所示。

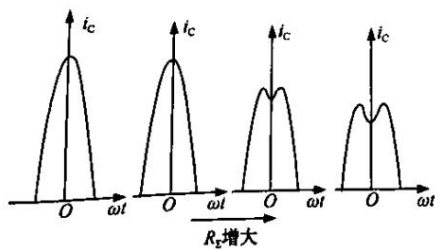


图4 负载变化对电流脉冲的影响

由图4和图5(a)可知: 从欠压状态到临界状态,  $i_{cmax}$  略微减小,  $\theta$  几乎不变,  $I_{c1m}$  和  $I_{c0}$  也几乎不变; 从临界状态到过压状态,  $i_{cmax}$  迅速下降, 曲线出现凹陷,  $I_{c1m}$  和  $I_{c0}$  也迅速下降。当负载电阻增大时, 功率与效率跟随负载变化的关系如图5(b)所示。

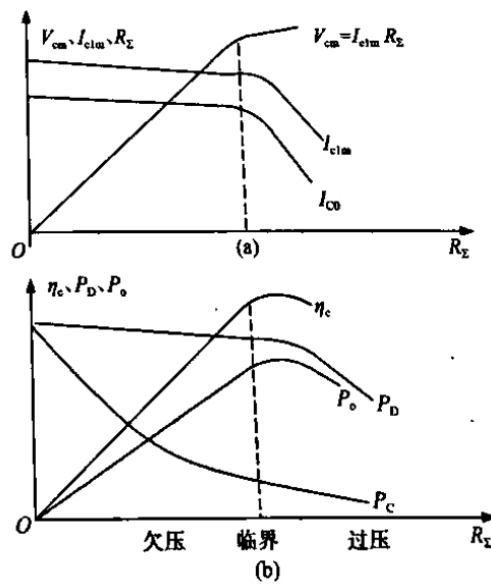


图 5 负载特性曲线

即  $I_{C0}$ 、 $I_{clm}$  都是随着电阻的增大慢慢变小，在临界状态时斜率增大。

而  $P_D$  的变化是在临界前慢慢减小，在达到临界之后迅速下降。

$P_o$  和  $\eta_c$  的变化趋势是先上升，在临界点达到最大，然后减小。

$P_C$  的变化趋势是一直下降。

(2) 放大特性：负载特性是指谐振功率放大器维持  $V_{CC}$ 、 $V_{BB}$ 、 $R_L$  不变时放大器的工作状态、性能 ( $V_{CC}$ 、 $I_{C0}$ 、 $I_{clm}$ 、 $P_D$ 、 $P_o$ 、 $P_C$ 、 $\eta_c$ ) 随  $V_{bm}$  的变化。

由于  $v_{BE\max} = V_{BB} + V_{bm}$ ，当  $V_{bm}$  从 0 开始增加时， $v_{BE\max}$  开始增大，放大器的工作状态经历了从欠压区、临界区到过压区的变化过程，导致以下参数的变化如下：

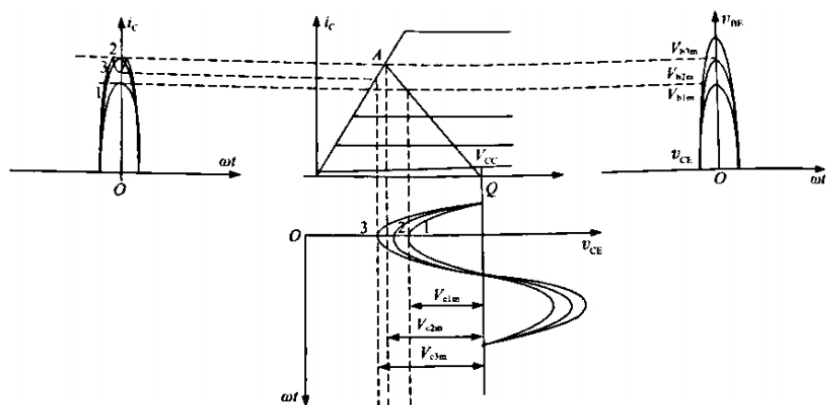


图 6  $V_{bm}$  变化对放大器工作状态的影响

所以随着  $V_{bm}$  的增加，集电极电流  $I_c$  的变化如下所示：

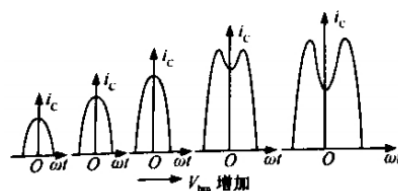


图 7  $V_{bm}$  变化对集电极电流  $i_c$  的影响

发现随着  $V_{bm}$  的增加，过压状态越来越明显，且电流的凹陷越来越深。

得到的参数的变化如下所示：

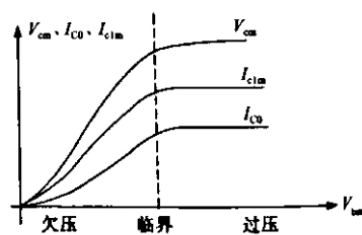


图 8 放大特性曲线

也就是得到  $V_{cm}$ 、 $I_{C0}$ 、 $I_{clm}$  随着  $V_{bm}$  的增加，先增加，在临界之后保持基本不变。

(3) 调制特性：负载特性是指谐振功率放大器维持  $V_{bm}$ 、 $R_L$  不变时放大器的工作状态、性能 ( $V_{cm}$ 、 $I_{C0}$ 、 $I_{clm}$ ) 随  $V_{CC}$ 、 $V_{BB}$  的变化的特性。其中前者称为“集

电极调制特性”，后者称为“基极调制特性”。

①集电极调制特性：集电极调制特性指的是谐振功率放大器维持 $V_{bm}$ 、 $R_z$ 、 $V_{BB}$ 不变时放大器的工作状态、性能（ $V_{cm}$ 、 $I_{C0}$ 、 $I_{c1m}$ ）随 $V_{CC}$ 的变化的特性。

当 $V_{CC}$ 由小到大变化时，静态工作点Q由左向右平移，所以电路的状态变化为从过压区变化到临界状态，然后变化为欠压状态。即状态转化如下：

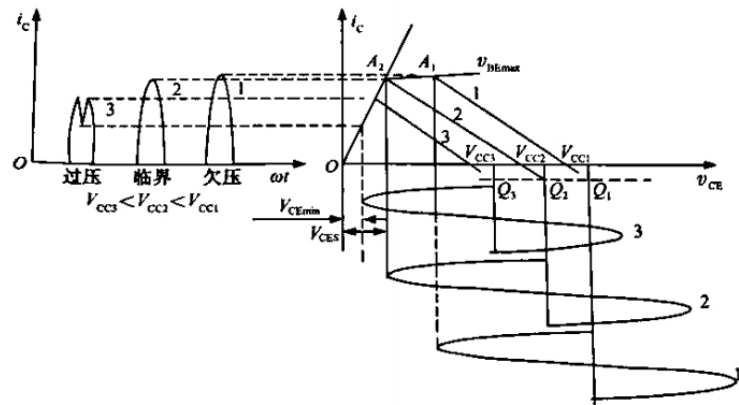
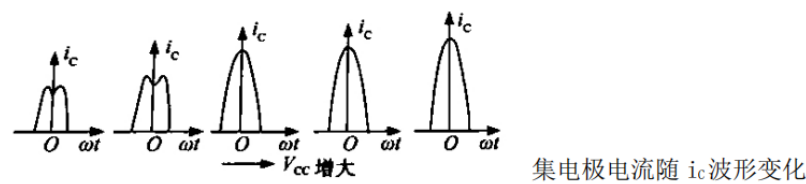


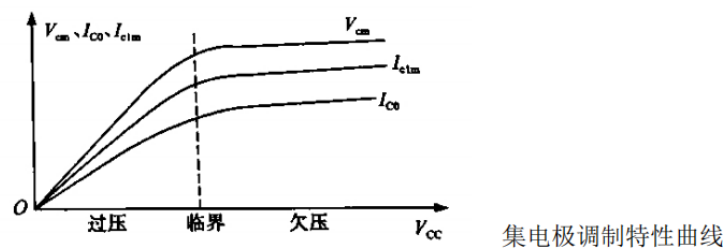
图 9  $V_{cc}$ 对放大器工作状态的影响 z

从而能够得到集电极电流  $I_c$  的输出变化如下所示：



也就是随着  $V_{cc}$  的增大，集电极电流  $I_c$  的凹陷逐渐减小，最后变为欠压状态，接近余弦波。

而其他参数的变化如下所示：



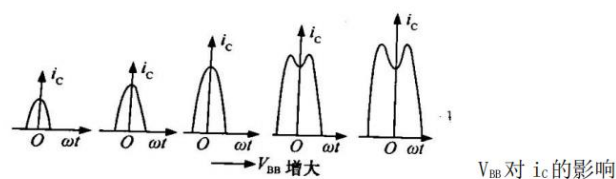


也就是随着  $V_{CC}$  的增大,  $V_{cm}$ 、 $I_{C0}$ 、 $I_{clm}$  都是从零开始逐渐增大, 并且达到临界之后开始保持基本不变。

②基极调制特性: 基极调制特性指的是谐振功率放大器维持  $V_{bm}$ 、 $R_{\Sigma}$ 、 $V_{CC}$  不变时放大器的工作状态、性能 ( $V_{cm}$ 、 $I_{C0}$ 、 $I_{clm}$ ) 随  $V_{BB}$  的变化的特性。

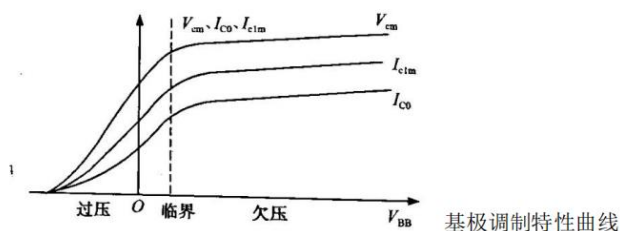
其实改变  $V_{bm}$  和改变  $V_{BB}$  的情况是相似的, 所不同的是  $V_{BB}$  可以实现由负值变为正值, 而  $V_{bm}$  是从零开始变化的。

所以得到的集电极电流  $i_c$  的变化如下图:



也就是随着  $V_{BB}$  的增大, 集电极电流增大并且逐渐进入过压区, 进入过压区之后形成的凹陷逐渐加深。

所得到的其他参数的变化如下所示:



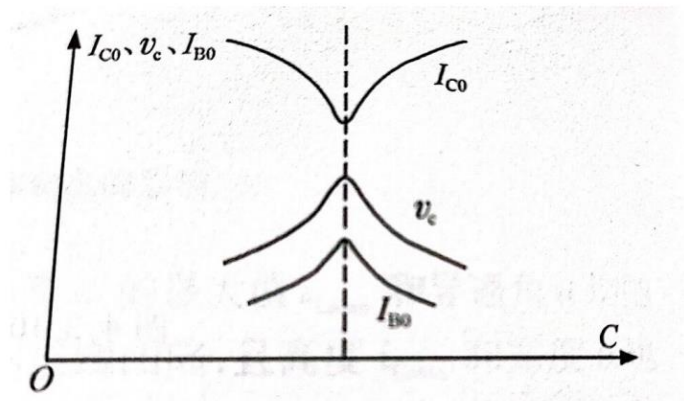
也就是随着  $V_{BB}$  的增大,  $V_{cm}$ 、 $I_{C0}$ 、 $I_{clm}$  都是从零开始增大, 并且在经过临界状态之后变化减小, 几乎不变。

### 3) 谐振功率放大器的调谐与调整

谐振功率放大器的设计基础是集电极回路或匹配网络对信号频率处于谐振状态, 也就是集电极回路成纯电阻状态。经分析可知, 只有集电极回路谐振时, 输出电压才最大, 输出功率也大; 无论是容性失谐还是感性失谐, 输出功率都小。所以调整功率放大电路时, 首先进行回路的调谐, 调回路的电感或电容元件即可, 本实验电路时调电容元件。调谐特性是指谐振功率放大器集电极回路在谐振过程



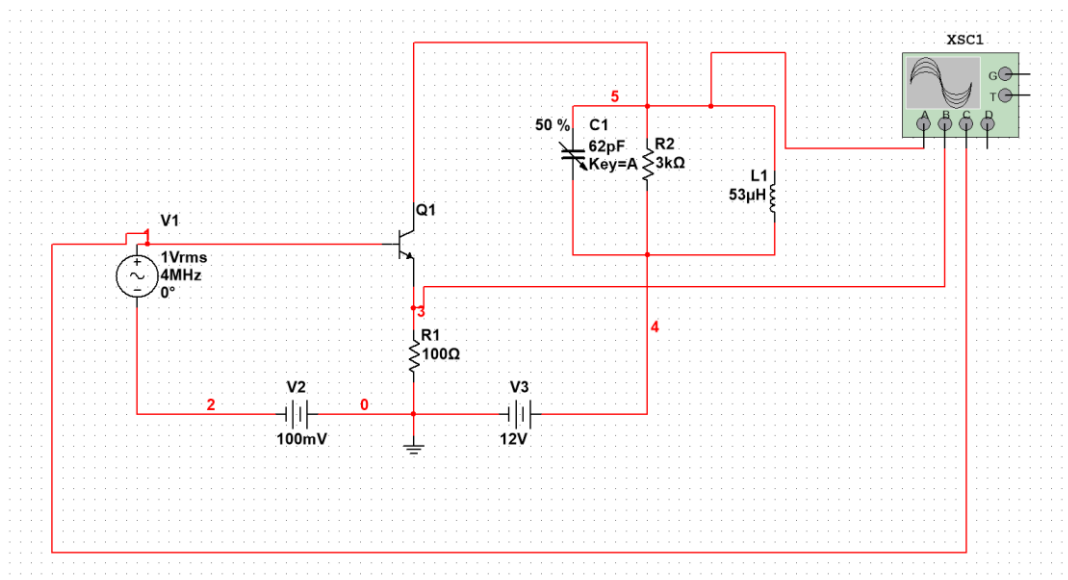
中，集电极平均电流  $I_{C0}$ （或基极平均电流  $I_{B0}$ ）及回路电压  $v_c$  的变化特性，如下图所示。由图可知，当回路自然谐振频率  $f_0$  与信号原频率  $f_c$  恰好一致时，称为“谐振”，此时  $I_{C0}$  最小， $v_c$  最大，故可以以  $I_{C0}$  最小或者  $v_c$  最大作为谐振指示。理论上， $I_{C0}$  最小与  $v_c$  最大应同时出现，而实际放大器由于内部电容  $C_{bc}$  的反馈，使得  $v_c$  最大与  $I_{C0}$  最小往往不是同时出现的。



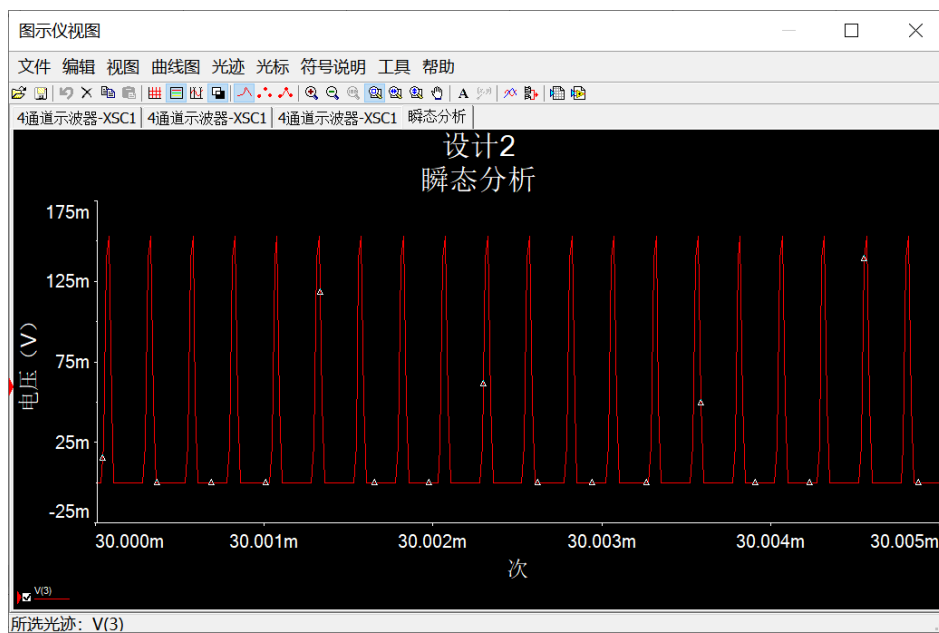
回路谐振时  $I_{C0}$ 、 $I_{B0}$ 、 $v_c$  随回路电容的变化

### 三、高频仿真

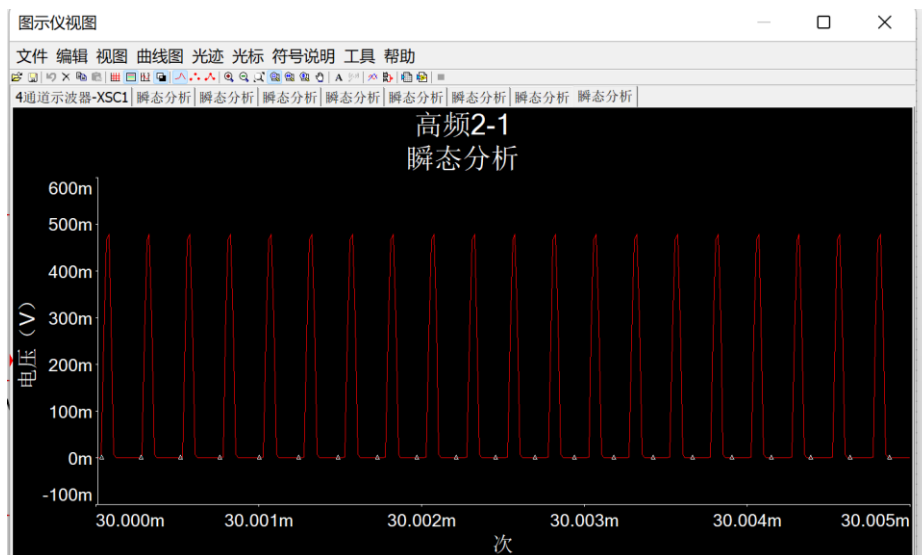
#### (1) 集电极电流 $I_c$ 与输入信号之间的非线性关系的测量



集电极电流与输入信号之间的非线性关系的仿真电路



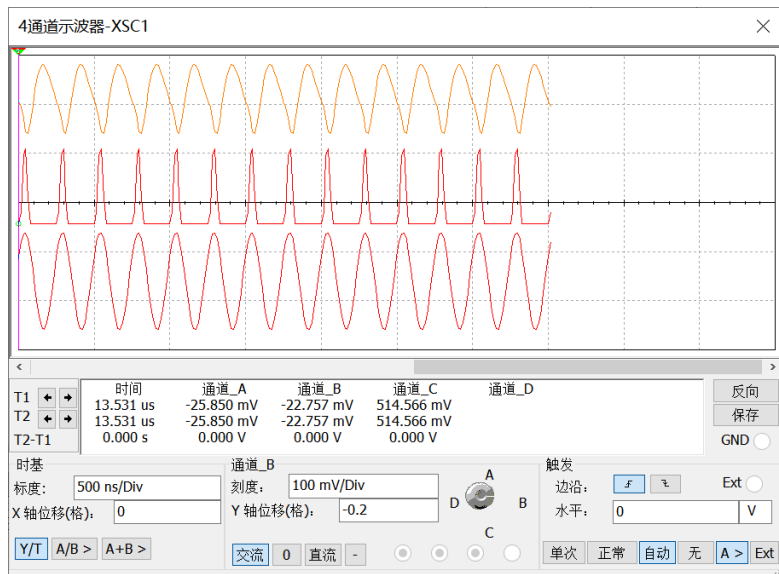
幅度为0.7V



幅度为1V

结论：集电极电流  $I_c$  与输入信号之间呈非线性关系。

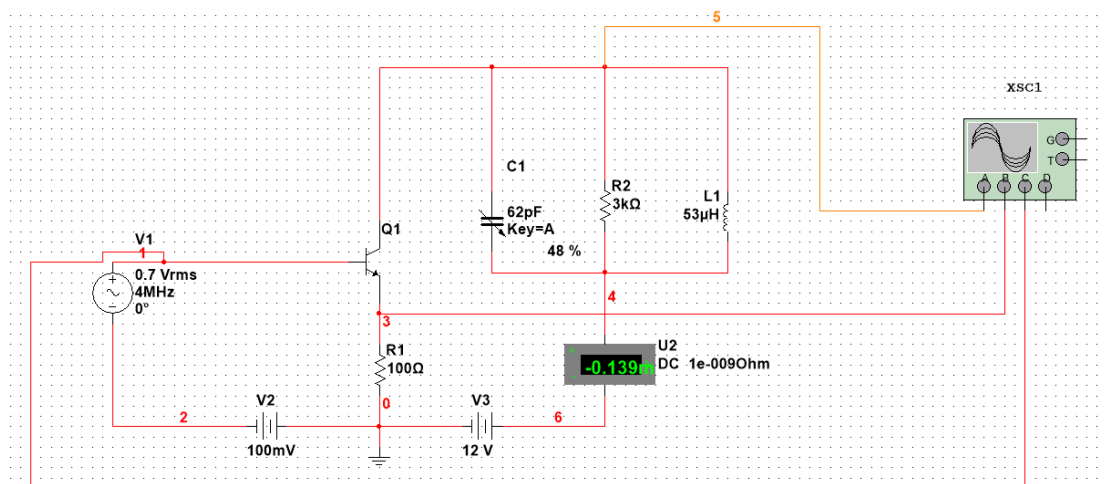
(2) 输入与输出信号之间的线性关系



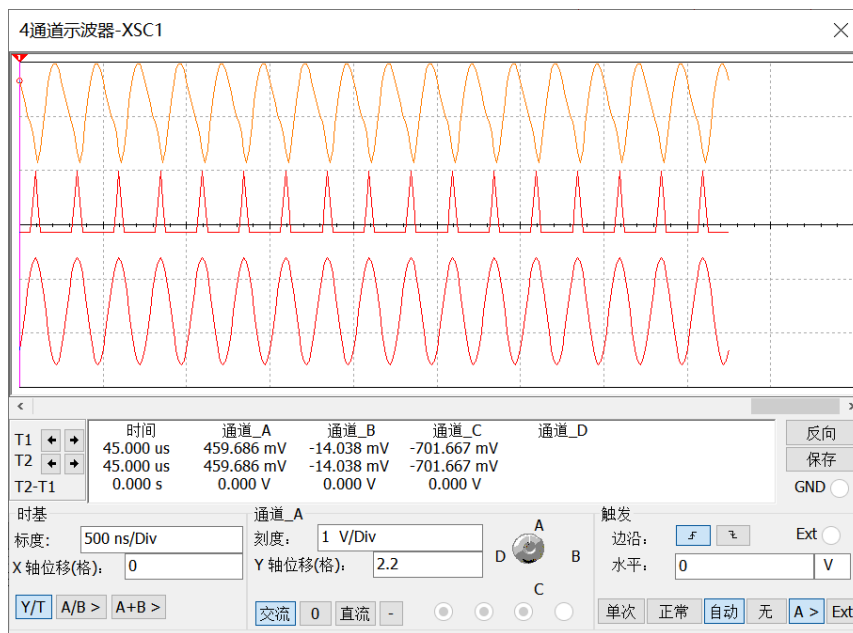
(图中从上到下依次为输出、发射级、输入信号的波形)

结论：观察发现输入与输出信号为线性关系。

### (3) 调谐特性的仿真



高功率放大器调谐特性的仿真电路

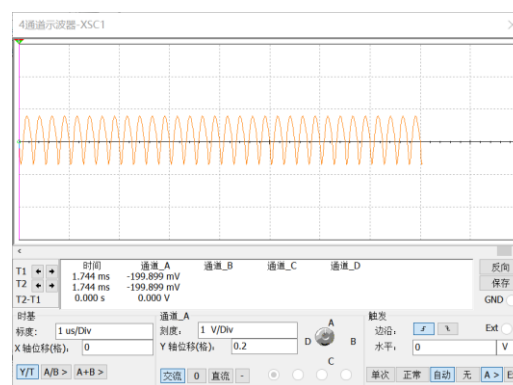


电容百分比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
输入(mV)	0.7									
输出(V)	X	X	X	0.83	0.73	0.55	0.45	0.36	0.29	0.25

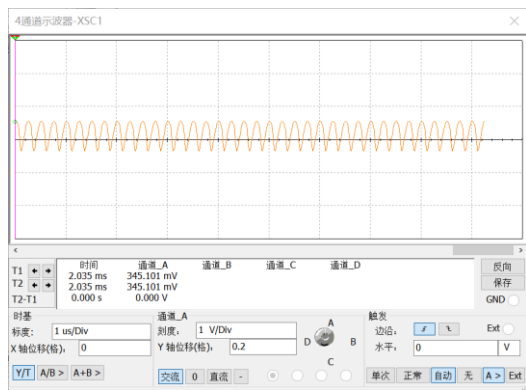
结论：由上图可知，在电容百分率40%左右电路达到谐振状态，此时电流表显示为-0.137m。随着电容的增大，电流表示数会逐渐增大。



N=40%



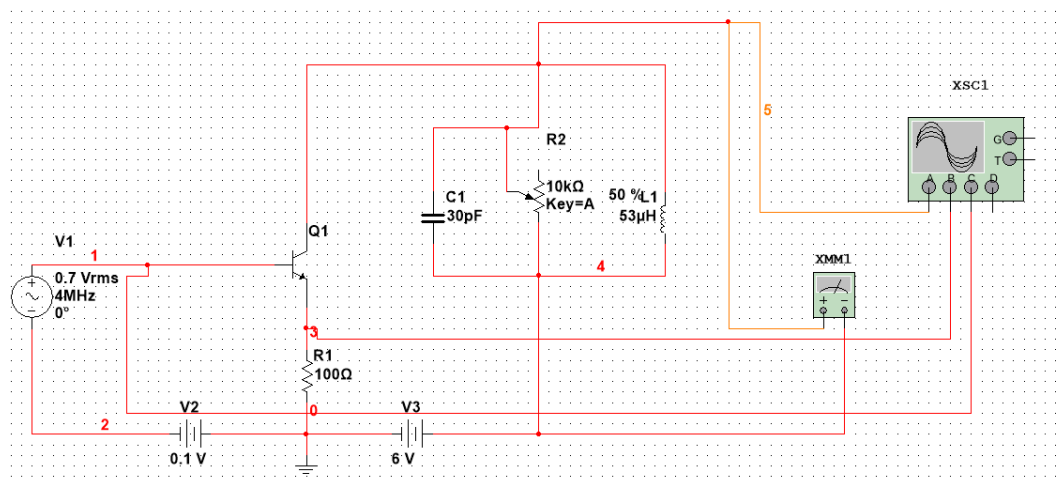
N=60%



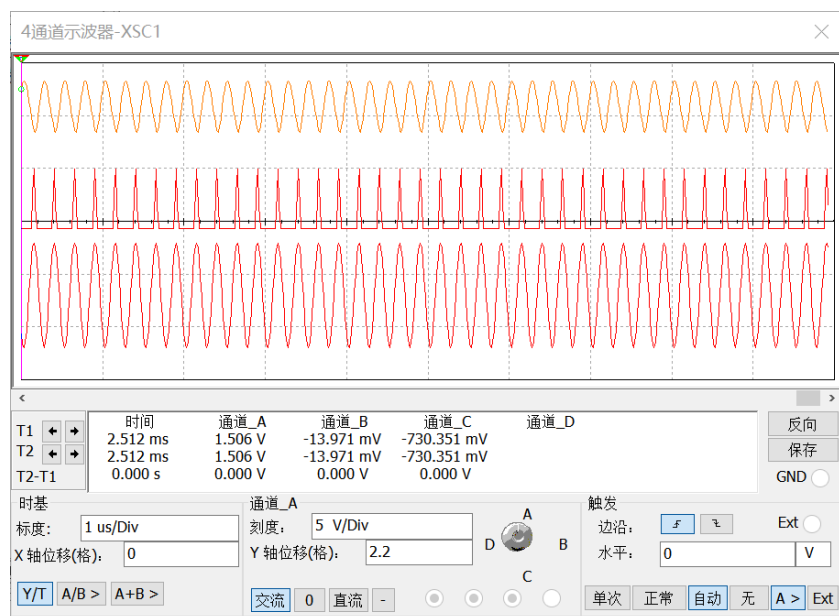
$N=80\%$

结论：对比三幅波形，随着电路逐渐由谐振到非谐振，电路输出信号幅值下降。

#### (4) 负载特性的仿真

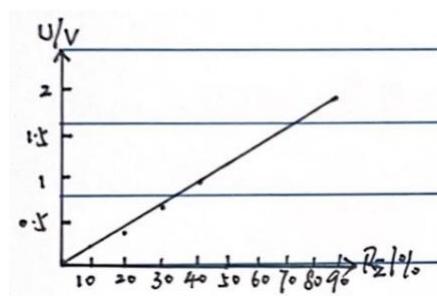


高频功率放大器负载特性的仿真电路



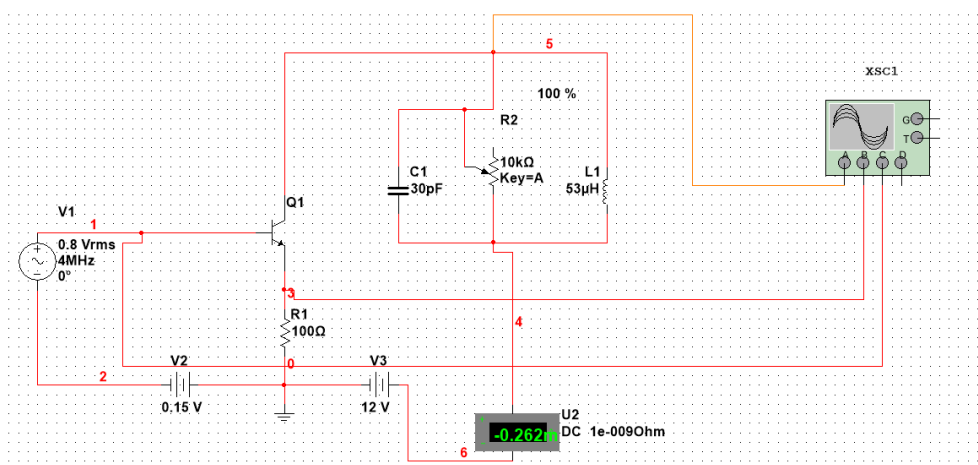
电阻百分比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
回路两端电压	0.225	0.401	0.583	0.765	0.947	1.129	1.307	1.489	1.677	1.832

结论：当电阻 $R_L$ 增大时，回路两端的电压增大，输出信号波形幅度增大，发射极电流幅度变小，当百分率为1时回路两端电压最大。

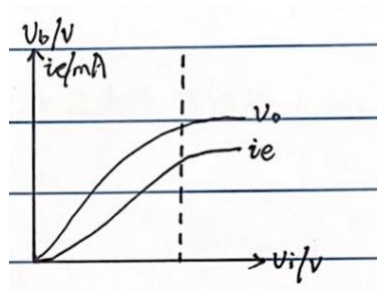


结论：随着百分比的增大输出电压也增大，但超过临界状态这种增长的趋势会逐渐平缓。

#### (5) 放大特性的仿真

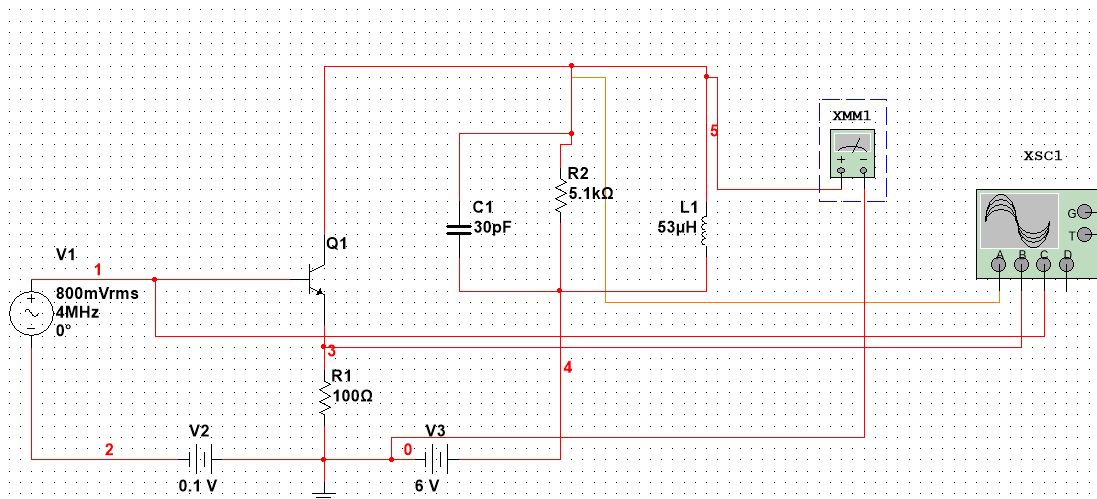


高频率功率放大器放大特性的仿真电路



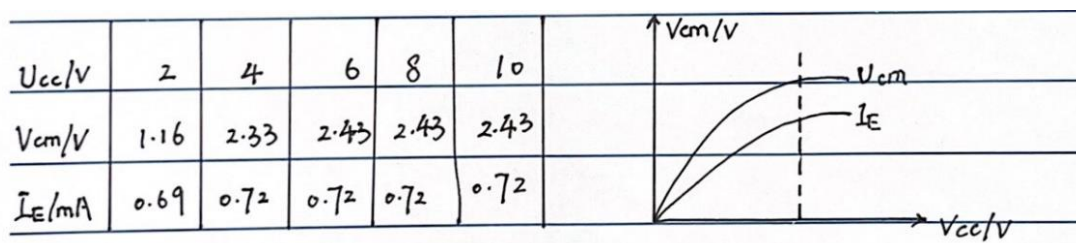
结论： $U_o$ 、 $i_c$ 在欠压状态是线性的，在过压状态几乎保持不变。

#### (6) 调制特性的仿真



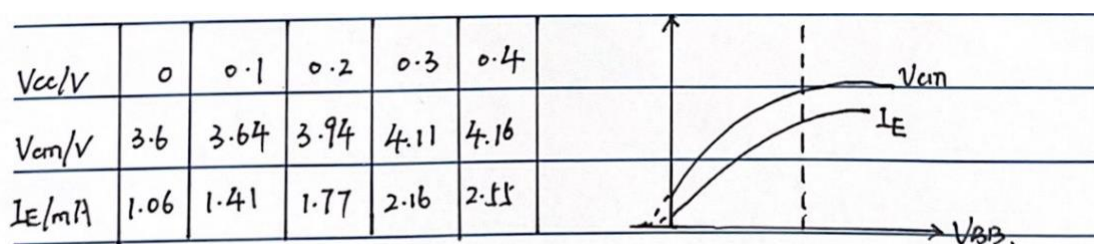
高频功率放大器集电极调制特性的仿真电路

### 1、集电极调制



在过压区 $V_{cc}$ 起主要作用，此区域内 $U_{cm}$ 和 $i_e$ 均为线性；在欠压区， $V_{cc}$ 作用减弱， $U_{cm}$ 和 $i_e$ 几乎不变。

### 2、基极调制



结论：在欠压区， $U_{bb}$ 起主要作用，此时 $U_{cm}$ 和 $i_e$ 均为线性；在过压区 $U_{cm}$ 和 $i_e$ 几乎不变。



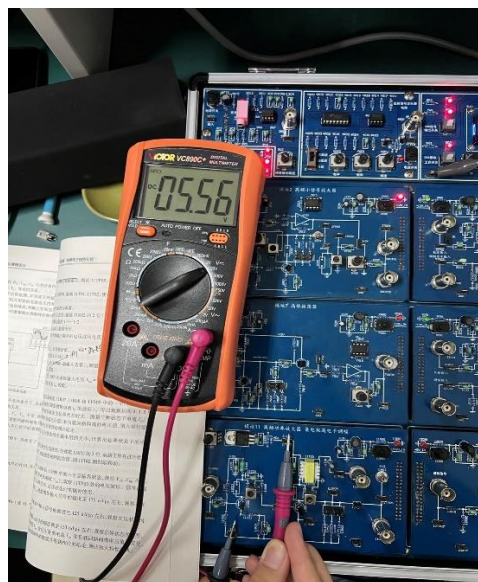
## 四、实验内容

### 一、实验准备

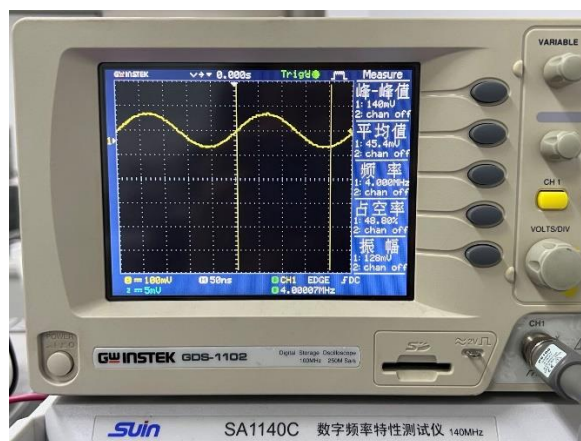
①在11T01、11T02处插入4MHz的中周

②接通电源。

③调节11W01，使11TP07处的电压调至5.5V左右。输入4MHz 140mVpp的调频信号。



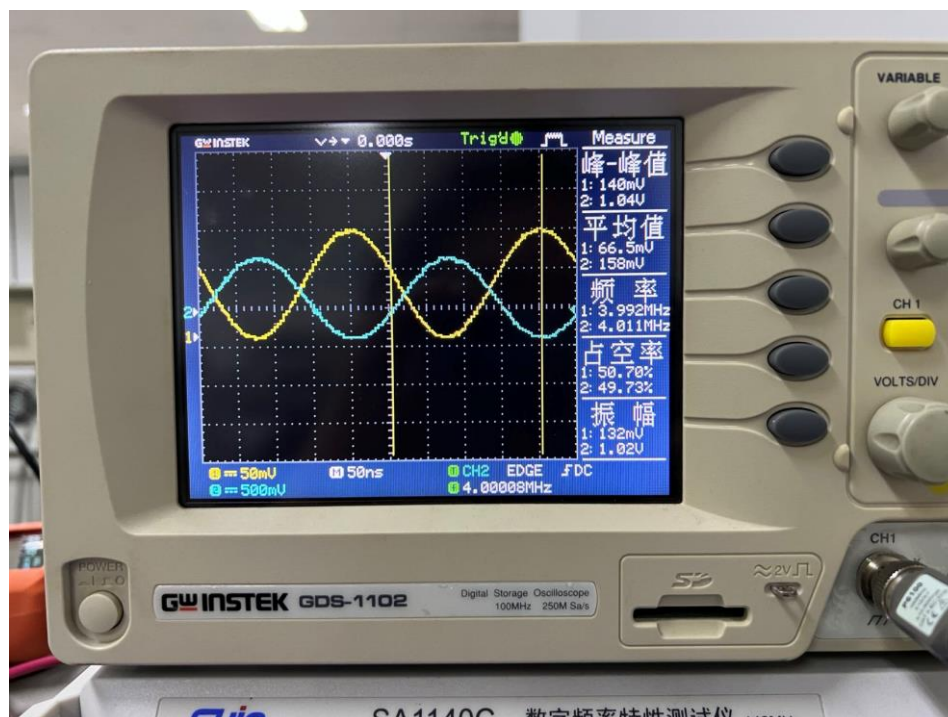
图一：成功将11TP07处电压调至5.5V



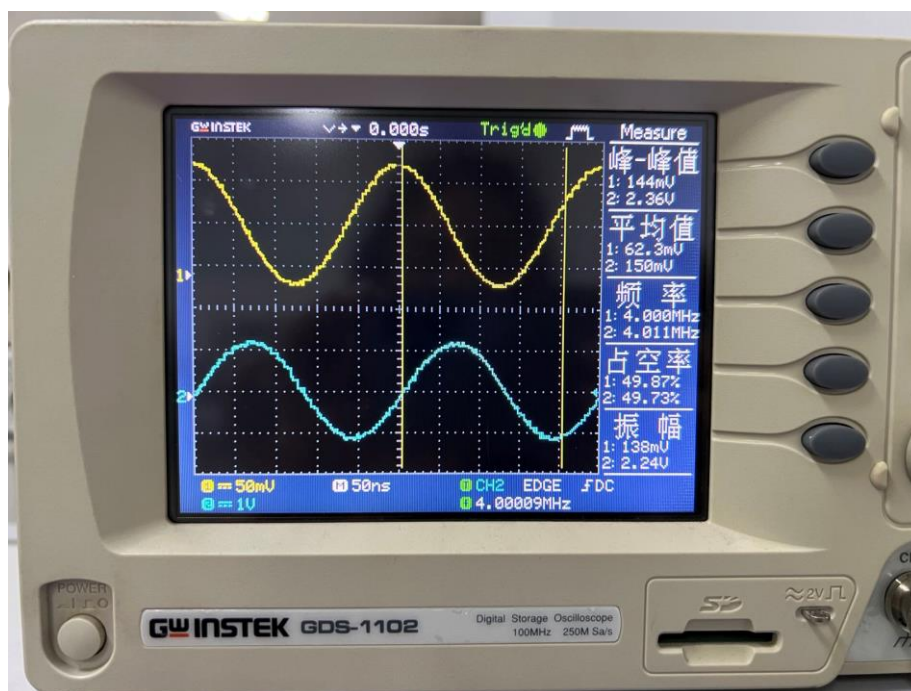
图二：产生频率为4MHz 140mVpp的信号

④测试11TP02，调节11T01中周使输出幅度最大，

测试11TP05，调节11T02使输出幅度最大，不失真。



图三：测试11TP02



图四：测试11TP05

⑤连接11K02的2位。测试11TP03，微调11T01、02中周，使弱过压状态出现。



图五：测试11TP03，使弱过压状态出现

## 二、对电路进行调谐

- (1) 应分别对推动级和功放级进行调谐。
- (2) 选择合适的负载电阻值（51  $\Omega$  左右，连接11K02的2位）。
- (3) 调谐前电源电压  $V_{cc}$  应为额定值的  $1/2 \sim 1/3$  。
- (4) 电路一旦出现自激现象，应减小激励电压。
- (5) 调谐过程中用示波器观察输出端点的电压或用电流表观察集电极电流变化

情况。

(6) 调谐结束再将电源电压  $V_{CC}$  加到额定值。

### 三、测试电路的工作点

(1) 当不加输入激励电压 时（11IN01端输入为零），测量功放管T2的各极直流电压  $V_{C0}$ 、 $V_{B0}$ 、 $V_{E0}$ 及电流  $I_{C0}$  的值。

(2) 加上输入激励电压  $v_i$ ，使T2管的基极输入电压  $V_{bm}=1V$ 左右时，记下T2的各极直流电压  $V_{C0}$ 、 $V_{B0}$ 、 $V_{E0}$ 及电流  $I_{C0}$  的值。

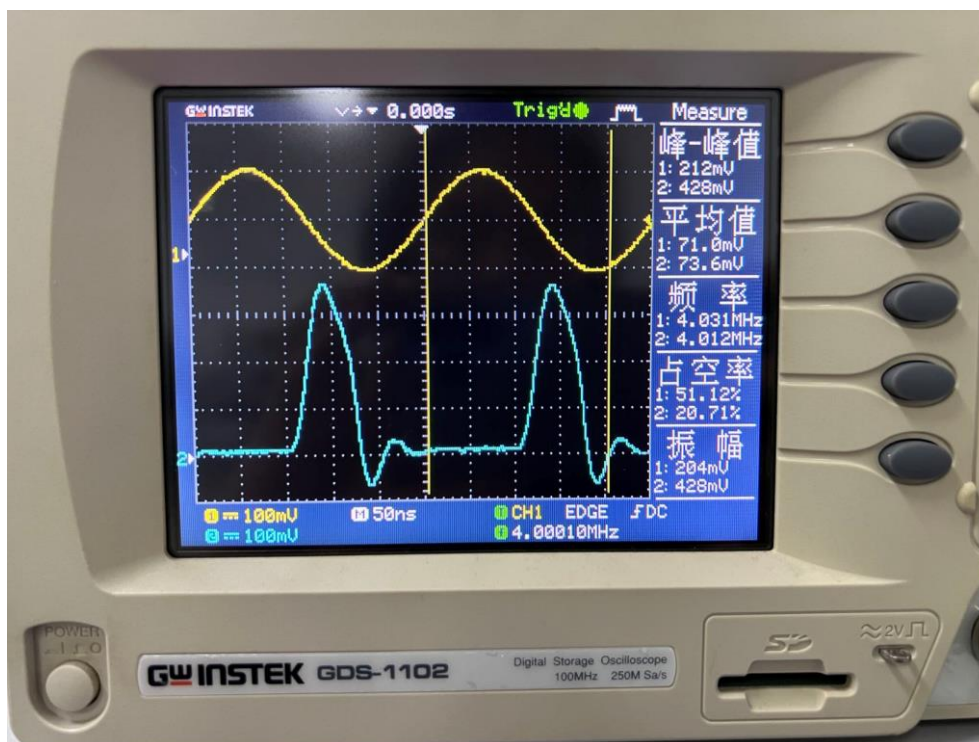
### 四、负载特性的测试

在上述实验的基础上，改变负载电阻（调整11K02电位器），观察11TP03点的电压波形（即发射极电流的波形）。可以观察如图所示的脉冲波形，但欠压时波形幅度比临界时大。并测量三种状态下电流（间接测量法：测量电阻11R06两端的直流电压值）和负载回路两端电压的值，填入自行设计的表格内。**分析表格并得到相应的结论。**根据欠压、临界、过压时负载电阻的大小，计算出临界状态下的功率  $P_o$ 、 $P_D$  和  $\eta_C$ 。

负载接11K02的1位，电路工作在欠压状态；

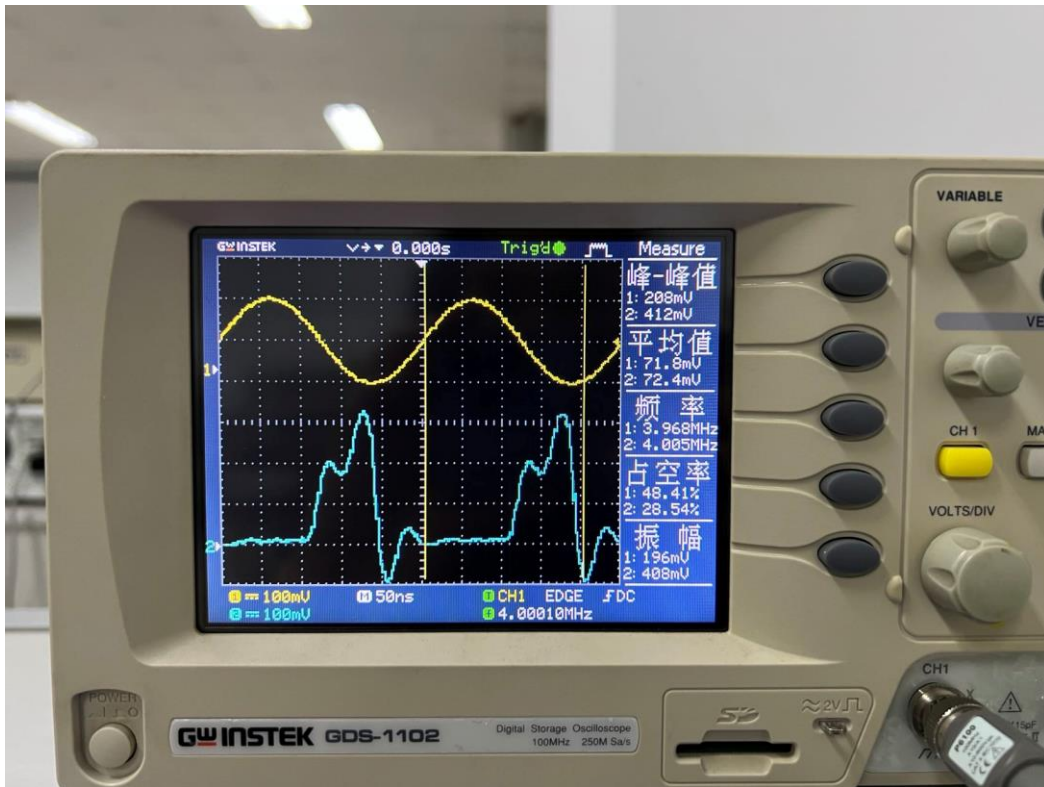
负载接11K02的3位，电路工作在过压状态；

注意：在过压区，负载增大电流波形的凹陷加深，调电感11T02则凹陷移动。



图六：负载接11K02的1位，电路工作在欠压状态



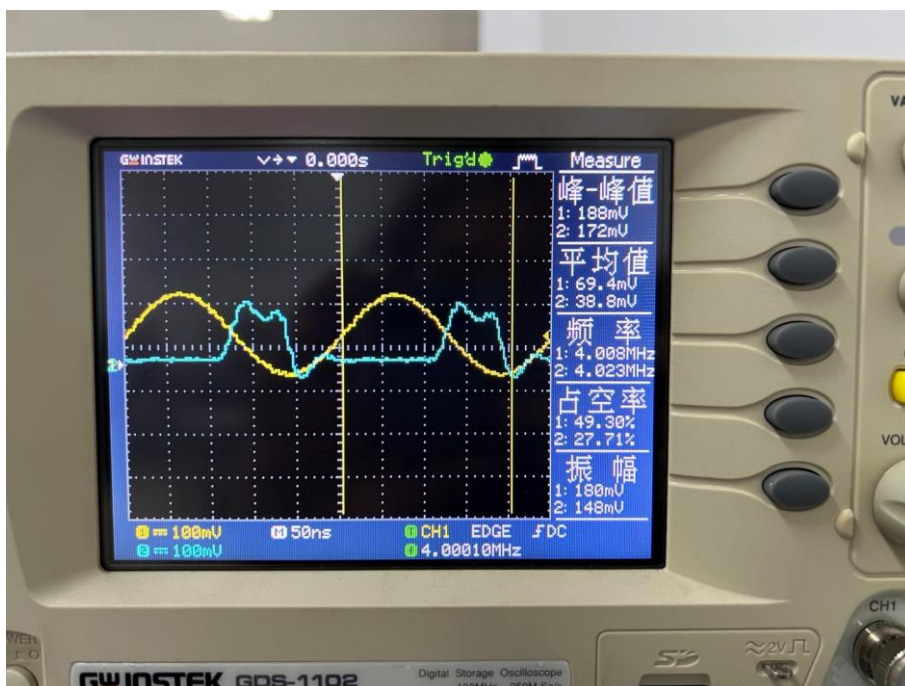


图七：负载接11K02的3位，电路工作在过压状态

### 五、放大特性的测试

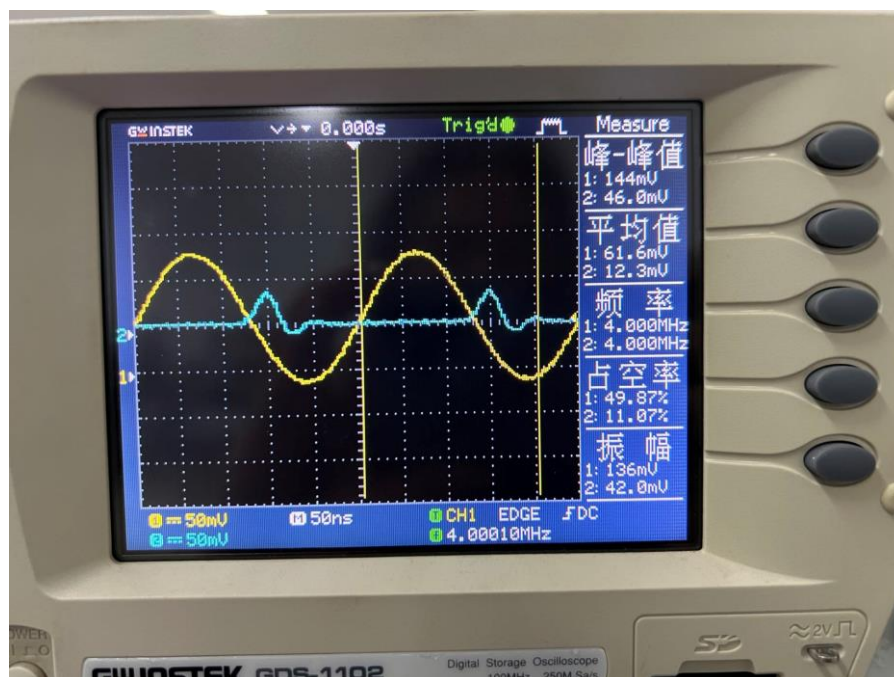
调整负载电阻使工作在临界状态，保持  $I_{CC}$ 、 $I_{BB}$  不变，改变信号源幅度，即改变激励信号电压  $U_{bm}$ ，观察11TP03电压波形。信号源幅度变化时，应观察到欠压、临界、过压脉冲波形。

(1) 在弱过压状态基础上，逐渐增加输入信号的幅度至175mVpp左右，观察过压状态，并绘图。



图八：增加输入信号的幅度至175mVpp左右，观察过压状态

(2) 恢复弱过压状态，逐渐减小输入信号的幅度至125mVpp左右，观察欠压状态，并绘图。



图九：减小输入信号的幅度至125mVpp左右，观察欠压状态

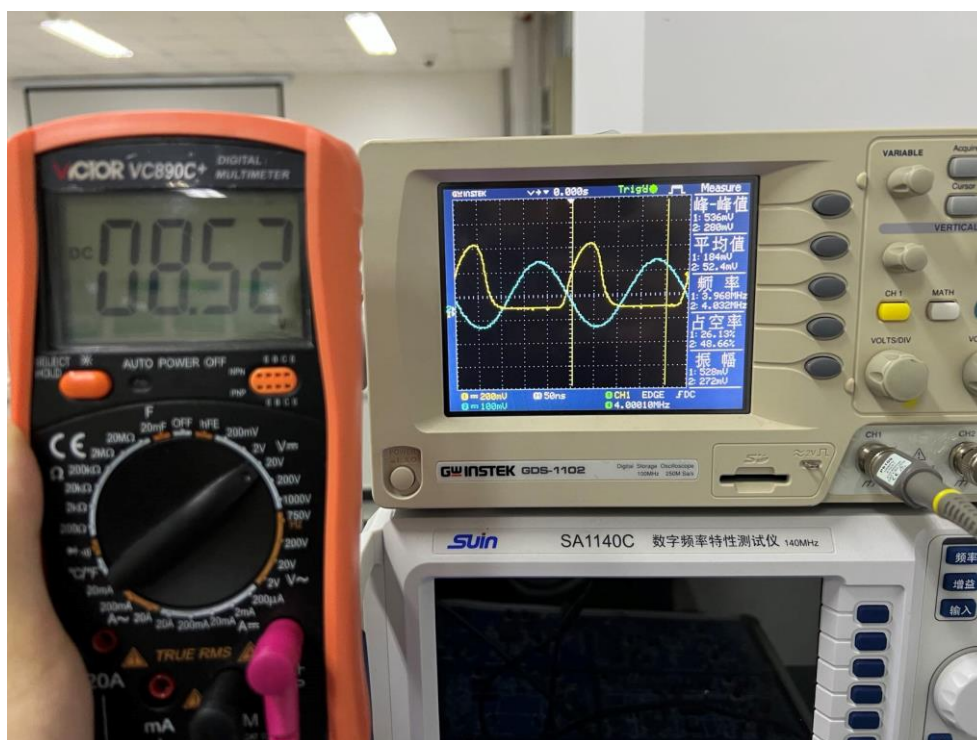
(3) 恢复弱过压状态，信号调至133mVpp左右，观察临界状态，并绘图。测量激励信号电压  $V_{bm}$  变化引起的电流和负载回路两端电压值的变化，填入自行设计的表格内。分析表格并得到相应的结论，画出放大特性曲线。

## 六、调制特性的仿真

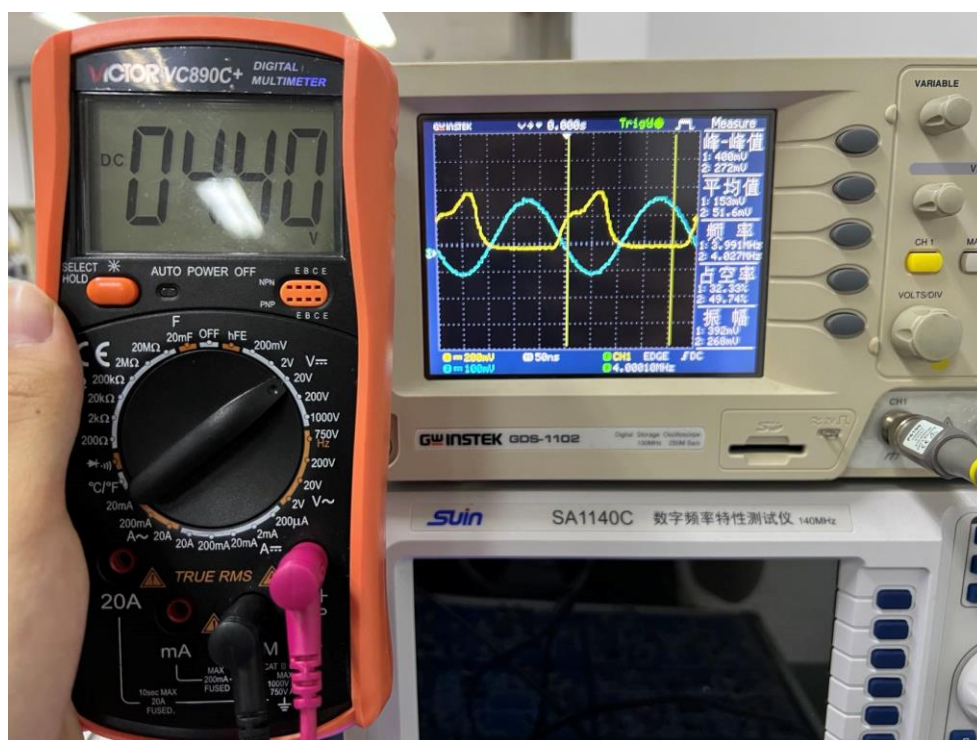
(1) 恢复140mVpp左右的弱过压状态，改变电源电压  $V_{CC}$ ，观察对放大器工作状态的影响；

(2) 调节11W01，使11TP07处电压为8.5V，观察欠压状态波形并绘图。

调节11W01，使11TP07处电压为4.5V，观察过压状态并绘图；



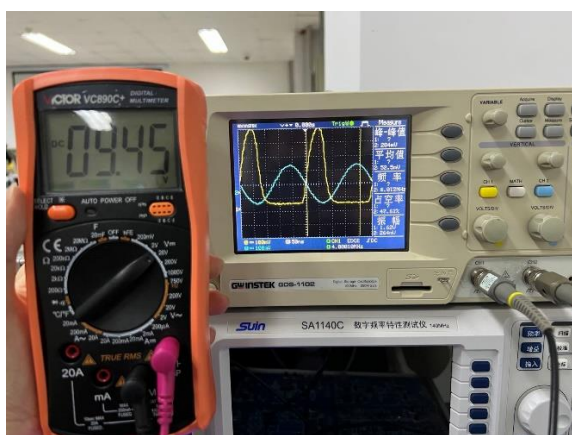
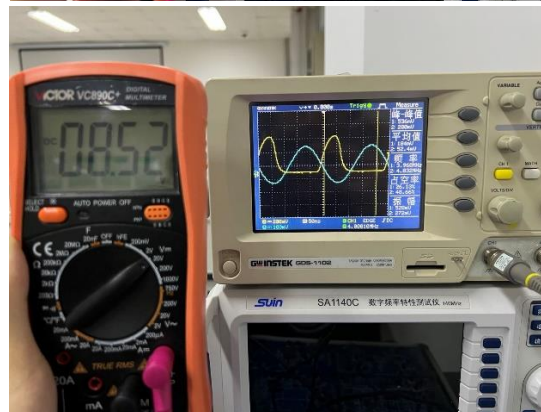
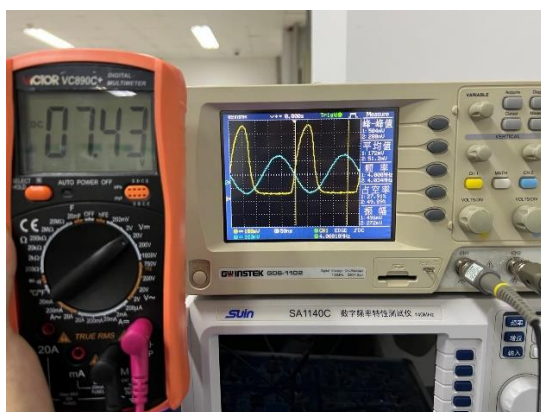
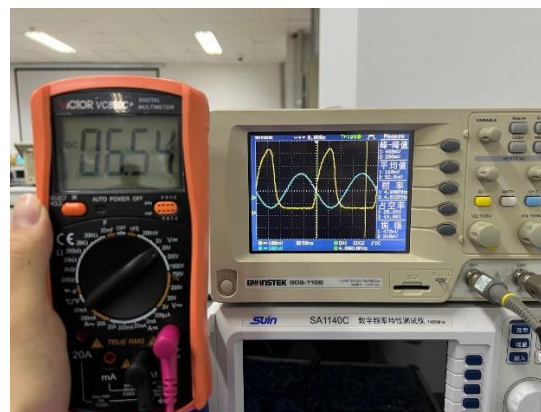
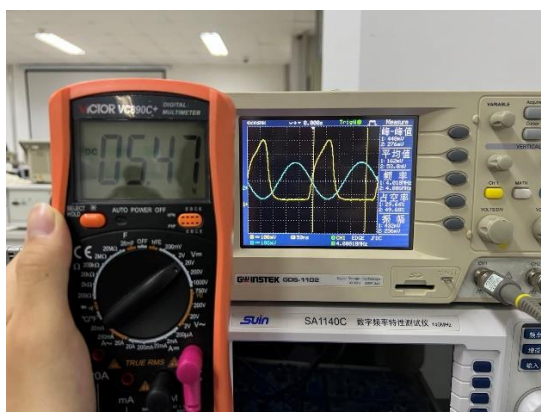
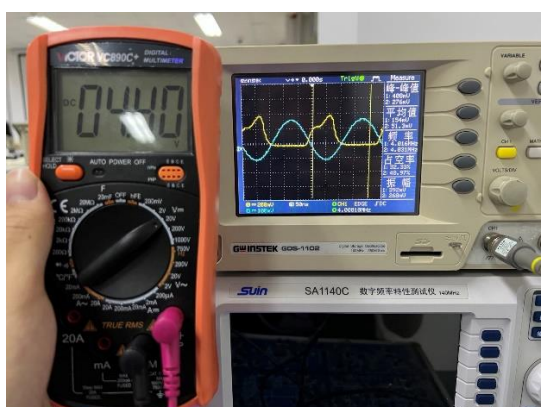
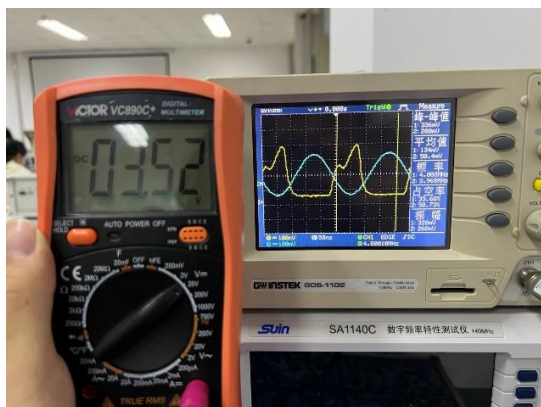
图十：调节11W01，使11TP07处电压为8.5V，观察欠压状态



图十一：调节11W01，使11TP07处电压为4.5V，观察过压状态

(3) 调节11W01测量电源电压  $V_{CC}$  变化引起的电流和负载回路两端电压值的变化，填入自行设计的表格内。  
分析表格并得到相应的结论，画出集电极调制特性曲线。  
注意： $V_{CC}$ 变化间隔为1V。





(为了压缩文件大小所以把图片弄小了，如果需要的话可以单独提供图片)



## 五、实验思考题与总结

### 思考题

(1) 答: 输出端的波形最大 或者 电流表读数最大 时就意味着谐振

↓  
谐振时又为max

(2) 答: 将电源电压  $V_{CC}$  设为额定值的  $\frac{1}{2}$  是因为让电路工作在临界状态, 便于后续负载特性与集电极调制特性的测试

(3) 答: 电路出现自激现象时, 用示波器观察会发现波形不断增大, 然后直至失真

(4) 答: 可以通过测量基极与发射极两段电压, 然后除以对应的电阻, 从而得到电流  $I_{CQ}$

(5) 答: 当加入激励电压时  $V_{E0}, I_{E0}$  增大

$V_{CC}, V_{B0}$  基本不变

放大器工作在丙类工作状态

(6) 答: ①. 用电流表直接测量  $I_E$  (前提是不封装实验箱)

②. 用电压表测量  $U_E$  再用  $\frac{U_E}{R_E}$  得  $I_E$