



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

实验名称： 实验二：高频放大器实验

实验报告

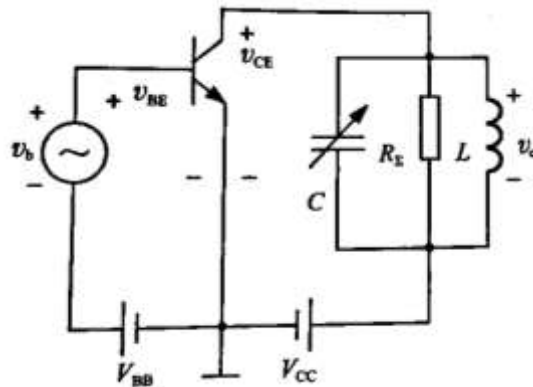
【实验目的】

- 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、实验模块 11——高频功率放大器

【实验原理】



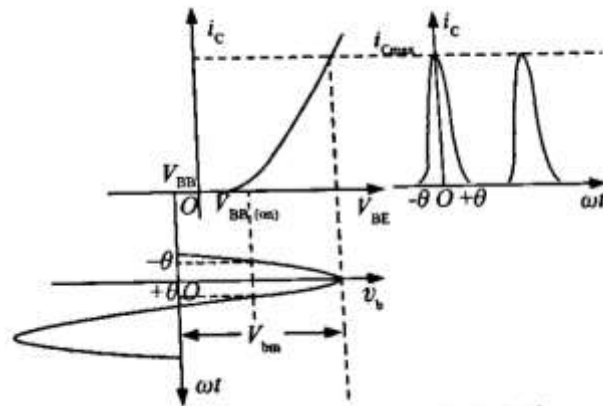
高频功率放大器是发射机的重要组成部分,通常用在发射机末级和末前级,主要作用是对高频信号的功率进行放大,以高效率输出最大的高频功率,使其达到发射功率的要求。通常高频功率放大器工作在丙类状态,负载为 LC 谐振回路,以实现选频滤波和阻抗匹配。上图为高频功率放大器的原理图。

(1) 谐振功率放大器的工作原理

放大器按照电流导通角 θ 的范围可分为甲类、乙类及丙类等不同类型。电流导通角 θ 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。为了不失真地放大信号, 它的负载必须是 LC 谐振回路。

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。



其中将 i_c 进行傅里叶展开得到傅里叶级数的展开式为

$i_c = I_{C0} + I_{C1m} \cos \omega t + I_{C2m} \cos 2\omega t + \dots$ 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。

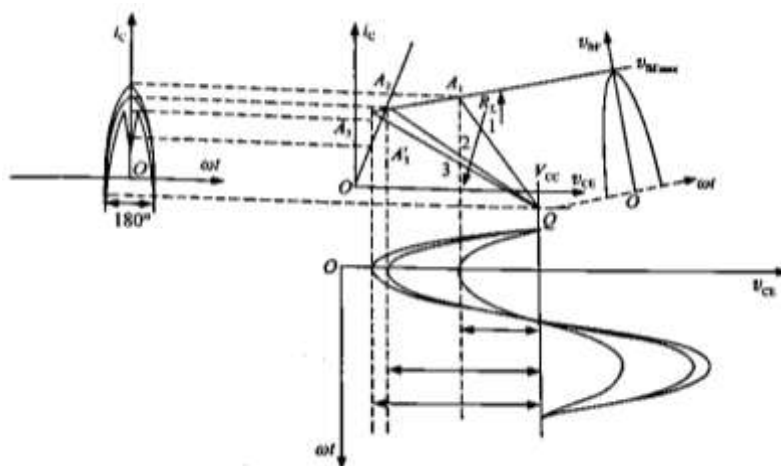
根据谐振功率放大器在工作时是否进入饱和区, 可将放大器分为欠压、过压和临界三种工作状态。若在整个周期内, 晶体管工作不进入饱和区, 即在任何时刻都工作在放大区, 则称放大器工作在欠压状态; 若刚刚进入饱和区的边缘, 则称放大器工作在临界状态; 若晶体管工作时有一部分时间进入饱和区, 则称放大器工作在过压状态。放大器的这三种工作状态取决于电源电压 V_{CC} 、偏置电压 V_{BB} 、激励电压幅值 V_{bm} 。以及集电极等效负载电阻 R_Σ 。

(2) 谐振功率放大器的外部特性

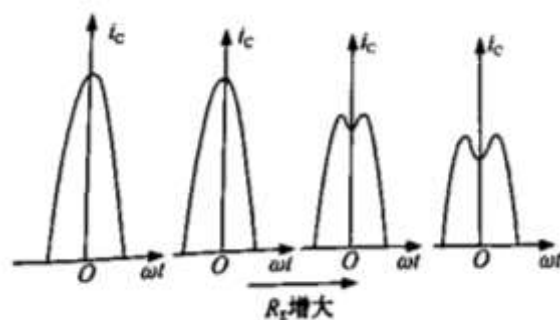
① 负载特性

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 、 η_c) 随 R_Σ 的变化。

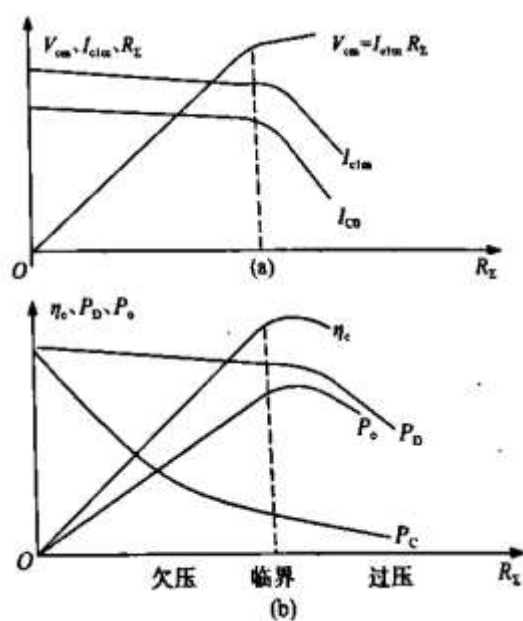
如下图所示:



当 R_L 升高时, 由 $V_{cm} = I_{c1m} R_L$ 得 V_{cm} 也升高, 电路工作状态经历了从欠压到临界又到过压状态, 即电流 I_c 输出如下所示:



而其他参数的输出变化如下所示:



即 I_{C0} 、 I_{c1m} 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。

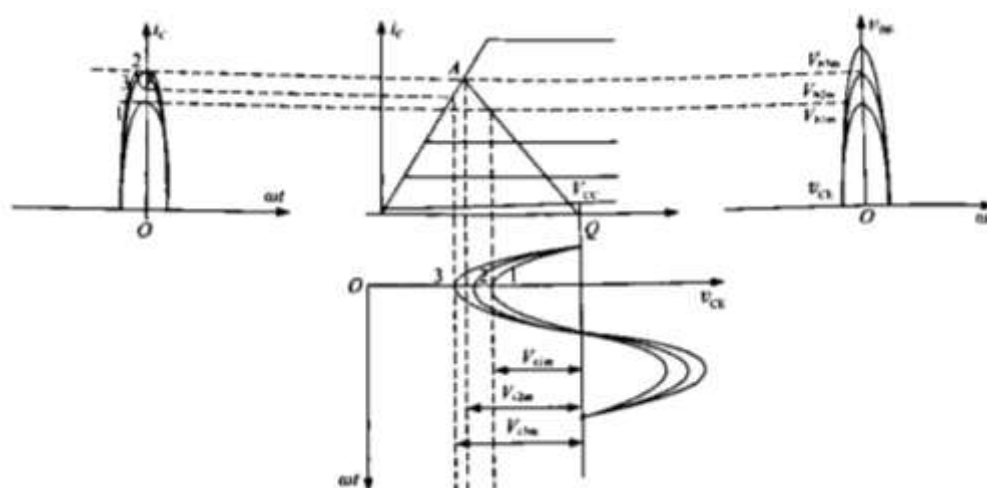
P_o 和 η_c 的变化趋势是先上升，在临界点达到最大，然后减小。

P_c 的变化趋势是一直下降。

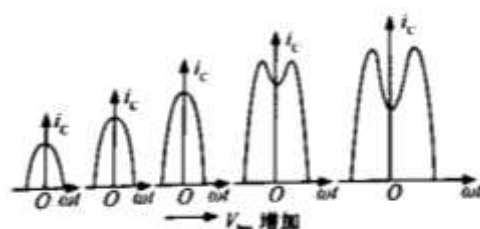
②放大特性

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_{c1m} 、 P_D 、 P_o 、 P_c 、 η_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：

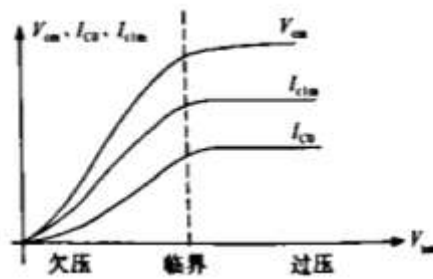


所以随着 V_{bm} 的增加，集电极电流 I_c 的变化如下所示：



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：



也就是得到 V_{cm} 、 I_{C0} 、 I_{C1m} 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

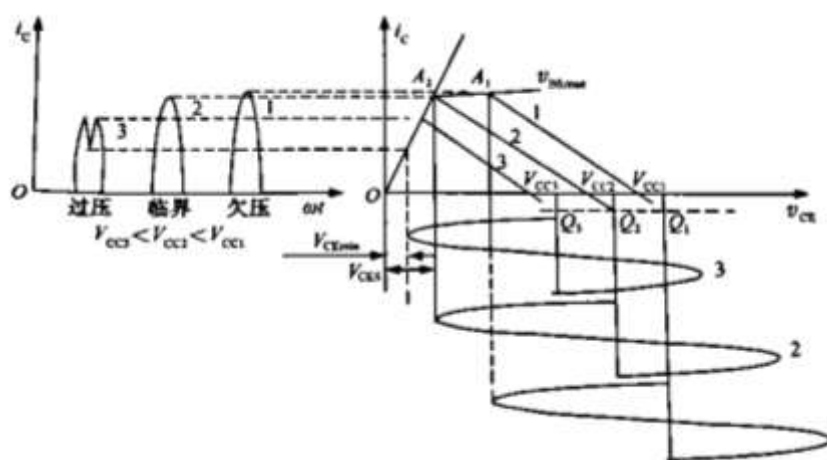
负载特性是指谐振功率放大器维持 V_{bm} 、 R_Σ 不变时放大器的工作状态、性能

(V_{cm} 、 I_{C0} 、 I_{C1m}) 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。

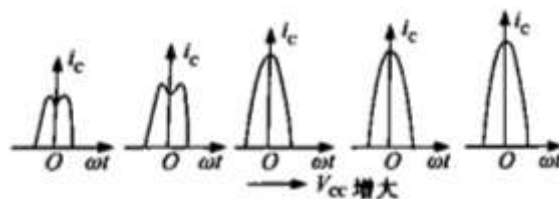
(i) 集电极调制特性

集电极调制特性指的是谐振功率放大器维持 V_{bm} 、 R_Σ 、 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：

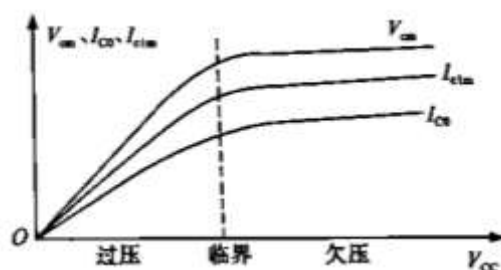


从而能够得到集电极电流 I_c 的输出变化如下所示：



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：



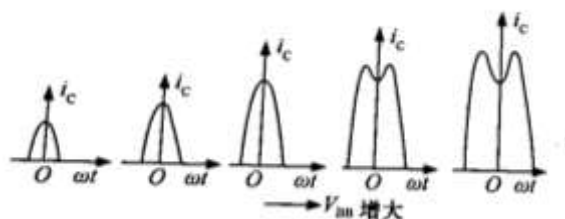
也就是随着 V_{cc} 的增大， V_{cm} 、 I_{c0} 、 I_{c1m} 都是从零开始逐渐增大，并且达到临界之后开始保持基本不变。

(ii) 基极调制特性

集电极调制特性指的是谐振功率放大器维持 V_{bm} 、 R_{Σ} 、 V_{cc} 不变时放大器的工作状态、性能 (V_{cm} 、 I_{c0} 、 I_{c1m}) 随 V_{BB} 的变化的特性。

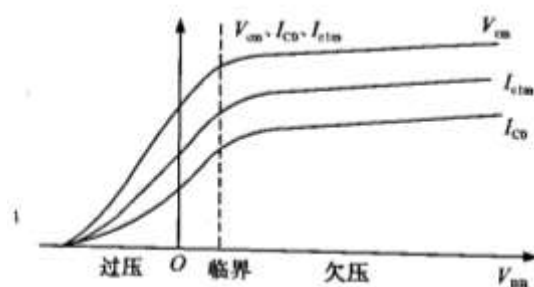
其实改变 V_{bm} 和改变 V_{BB} 的情况是相似的，所不同的是 V_{BB} 可以实现由负值变为正值，而 V_{bm} 是从零开始变化的。

所以得到的集电极电流 I_c 的变化如下图：



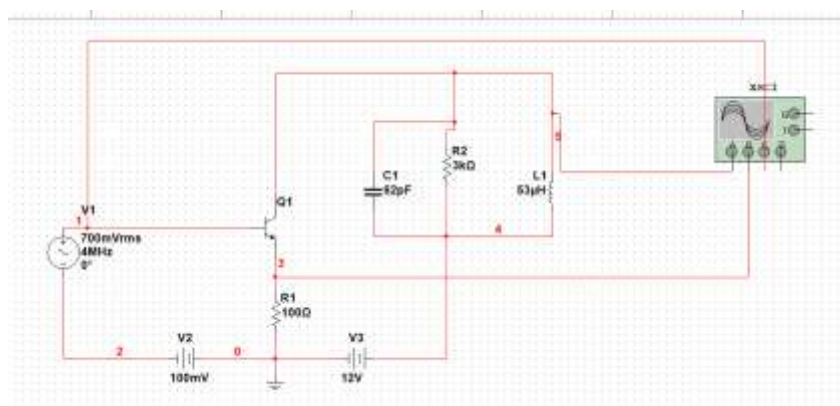
也就是随着 V_{BB} 的增大，集电极电流增大并且逐渐进入过压区，进入过压区之后形成的凹陷逐渐加深。

所得到的其他参数的变化如下所示：



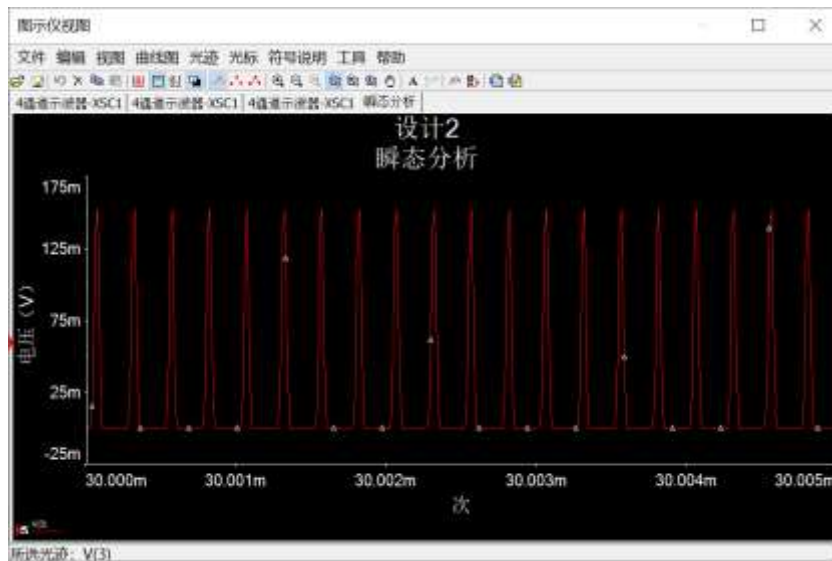
也就是随着 V_{BB} 的增大， V_{cm} 、 I_{C0} 、 I_{C1m} 都是从零开始增大，并且在经过临界状态之后变化减小，几乎不变。

【MULTISIM 仿真】

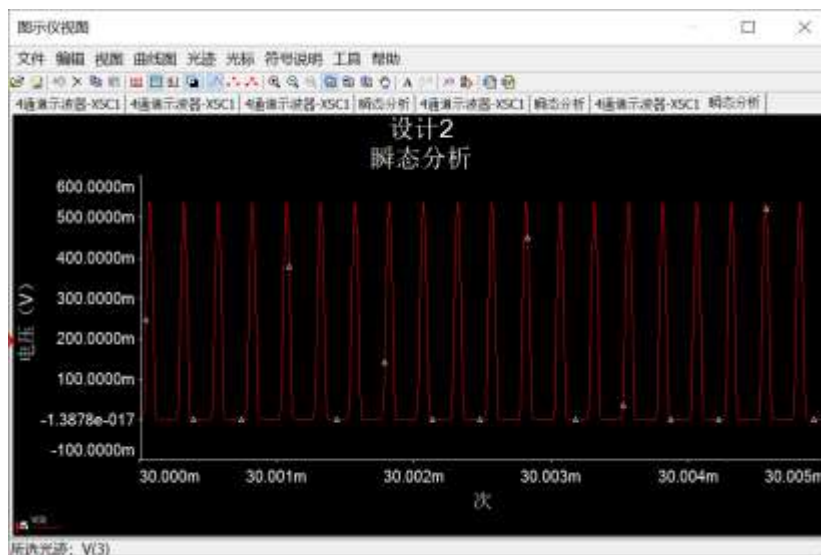


(1) 集电极电流与输入信号之间的非线性关系测量

当输入信号幅度为 0.7V 时，瞬态分析如下



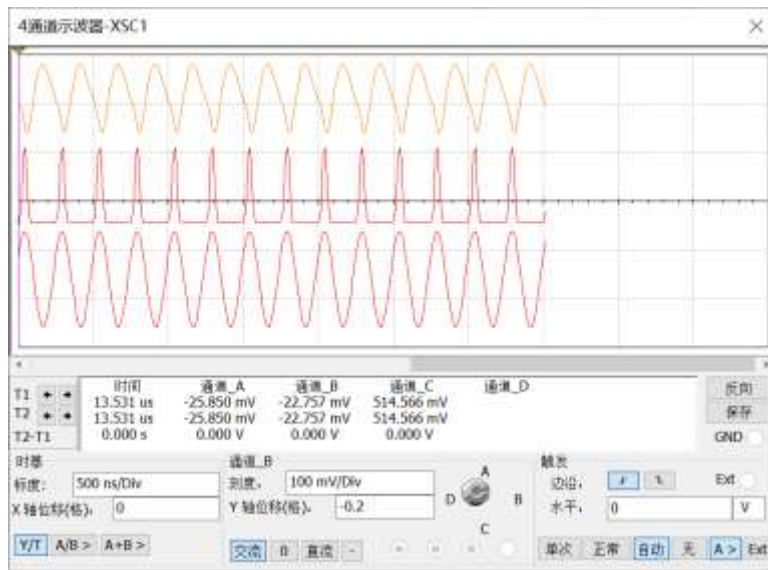
当输入幅度信号为 1V 时，瞬态分析如下



经观察，集电极电流与输入信号呈非线性关系。

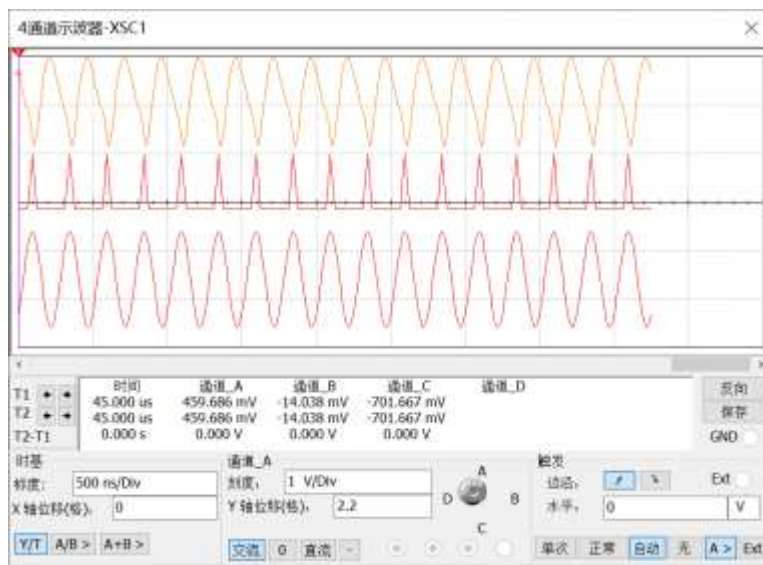
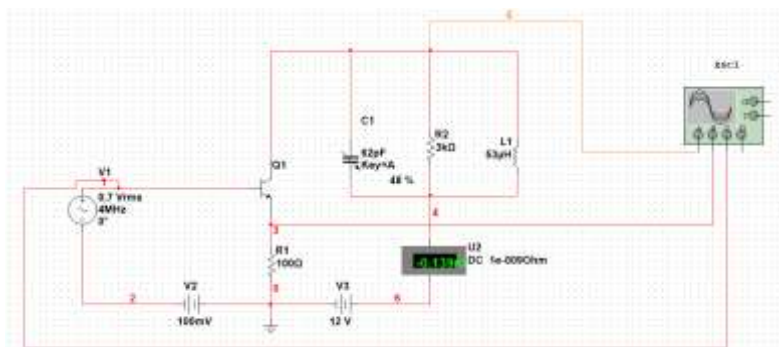
（2）输入与输出信号之间的线性关系

通过示波器观察波形得到如图下所示，从上到下依次是输出、发射级、输入信号的波形



观察如图所示可知输入与输出信号成线性关系

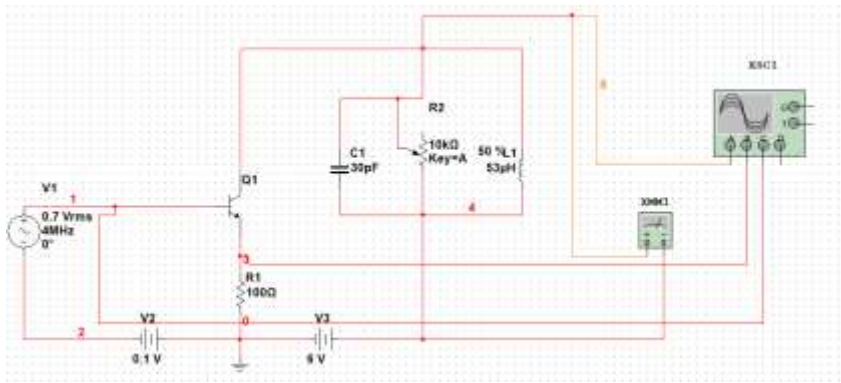
(3) 调谐特性的仿真



电 容 百 分 比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
输 入 /mV	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
输 出 /V	失真	失真	失真	0.82	0.73	0.58	0.45	0.36	0.29	0.25

故我们判断电容百分比大概在 40%时达到谐振，此时电流表显示为-0.137m，随着电容百分比增大，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

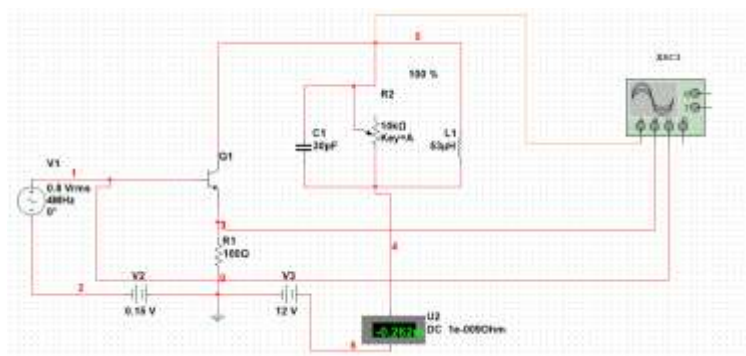


记录数据如表所示

电 阻 百 分 比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
回 路 两 端 电 压 /mV	225	400	583	764	957	1124	1300	1480	1676	1840

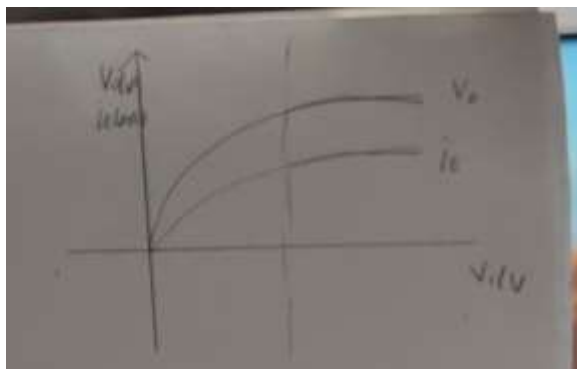
观察表中数据可知，电阻百分率为 1 时回路两端电压最大。回路两端电压随电阻增大而增大。

（5）放大特性的仿真



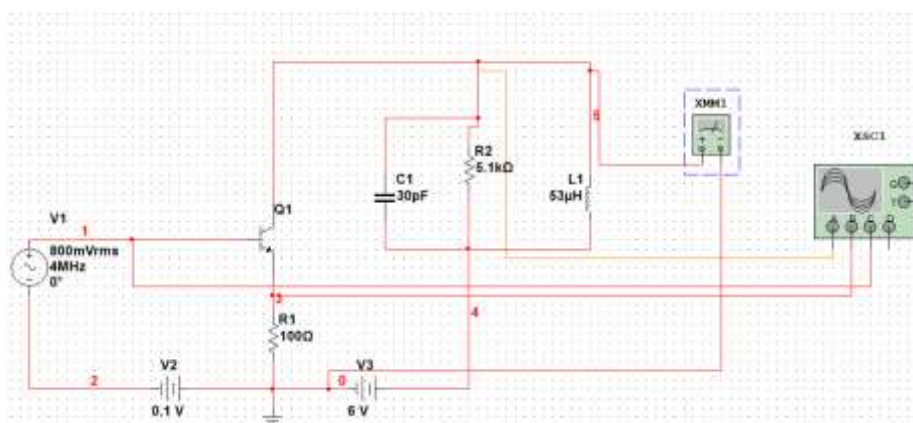
V1 (V)	0	0.8	1.0	1.2	1.4
Vo (V)	0	4.50	10.40	11.30	11.62
Ie (mA)	0	0.23	0.61	0.74	0.78

画出近似图线如下图所示



输出电压电流随着输入电压增大而增大，由欠压状态进入临界状态后，在过压状态下几乎保持不变。

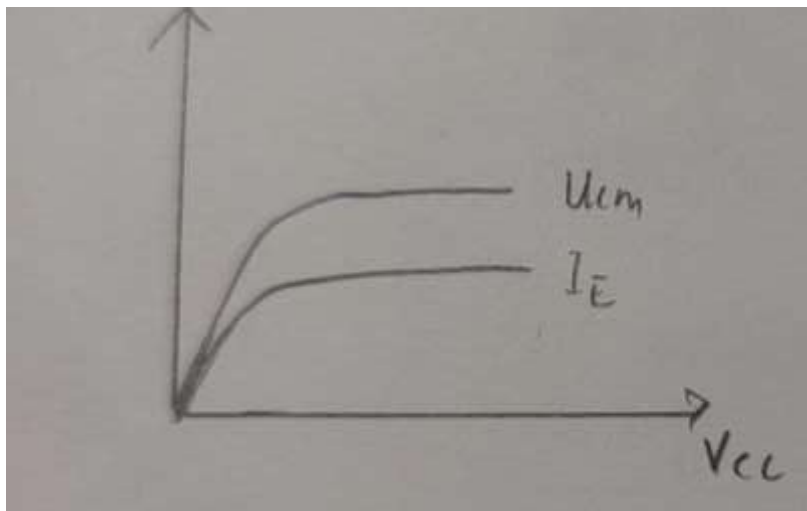
(6) 调制特性的仿真



仿真得到数据如下

VCC (V)	2	4	6	8	10	12
VCm (V)	1.2	2.32	2.43	2.43	2.43	2.43
I (mA)	0.69	0.70	0.76	0.76	0.76	0.76

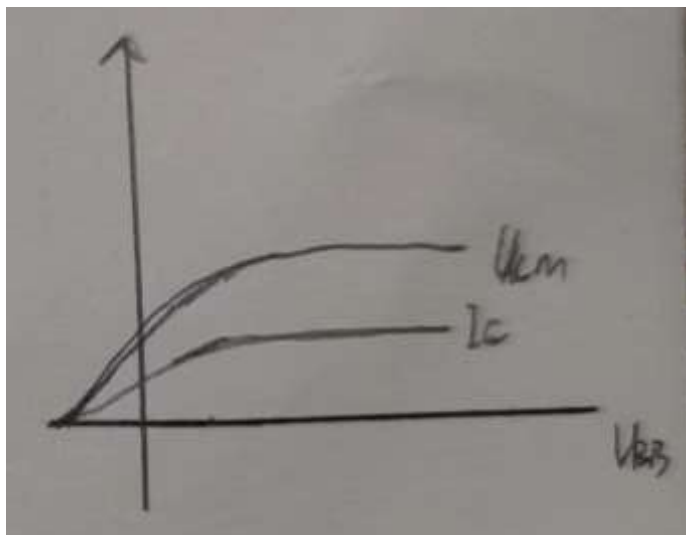
观察表中数据我们得知在过压状态下 U_{cm} 和 I_e 随着 V_{CC} 变化近似线性；在欠压状态下 V_{CC} 作用减弱， U_{cm} 和 i_e 几乎不变。



仿真得到数据如下

VCC (V)	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4
VCM (V)	2.4	3.56	3.64	3.90	4.1	4.1
IE (mA)	0.73	1.00	1.43	1.77	2.19	2.47

观察表中数据我们得知在欠压状态下 U_{cm} 和 I_e 随着 V_{BB} 变化近似线性；在过压状态下 V_{BB} 作用减弱， U_{cm} 和 i_e 几乎不变。



【实验内容】

1. 熟悉实验电路
2. 实验准备及对电路进行调谐

3. 测试电路的静态工作点。

(1) 当不加输入激励 v_i 时，测量晶体管的各极的直流输出电压 V_{C0} 、 V_{B0} 、 V_{E0} 以及直流电流 I_{C0} 的值。

$$V_{C0} = 5.3V \quad V_{B0} = 0V \quad V_{E0} = 0V$$

这时耦合电压小于导通电压，晶体管不导通，基极和集电极电压为 0

(2) 加上输入激励 v_i ，使基极的输入电压 $V_{bm}=1V$ 左右时，测量晶体管的各极的直流输出电压 V_{C0} 、 V_{B0} 、 V_{E0} 以及直流电流 I_{C0} 的值。

$$\text{测量得 } V_{C0} = 5.27V \quad V_{B0} = 0V \quad V_{E0} = 20mV$$

输入交流信号加载在直流信号后使其超过导通电压，晶体管导通，发射极有电压，此时小信号三极管工作在甲类放大状态，功率放大器工作在丙类放大状态。

4. 负载特性的测试

在上述实验的基础上，改变负载电阻 11R07、11R08、11R09 中的一个（调整电位器 11K02）观察 11TP03 处的电压波形（即发射极电流 i_e 的波形）可以观察到如书上 p123 的脉冲波形，但欠压状态时的波形幅度比临界状态时大。测量三种状态下电流 I_{C0} 和负载回路两端的电压值，填入自行设计的表格内。分析表格中的数据并写出得到的相应结论。

根据欠压状态、临界状态、过压状态时的负载电阻大小，计算出临界状态下的功率和效率。

维持 V_{CC} 、 V_{BB} 、 V_{bm} 不变，改变负载电阻 11R07，观察 11TP03 处电压波形，记录如图 1-1 所示，此时电压峰峰值为 560mV，处于欠压状态。



图 1- 1

改变负载电阻 11R08，观察 11TP03 处电压波形，可以看到波形处于临界状态。

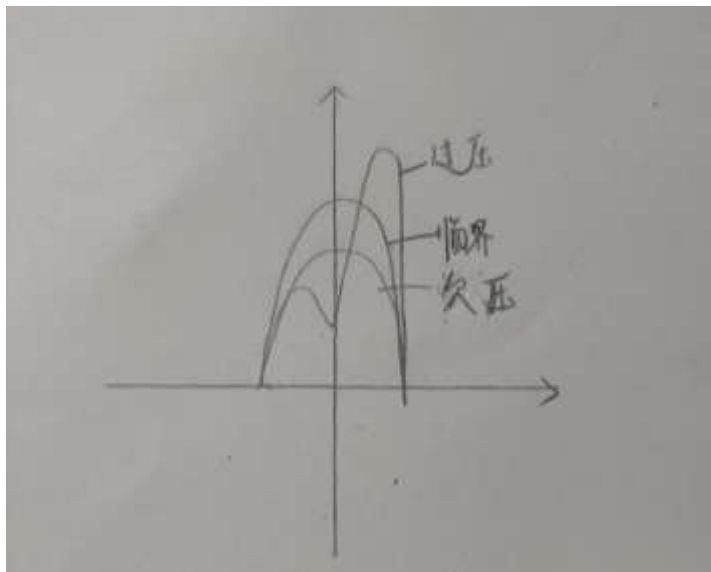


图 1- 2

再改变电阻 11R09，调整 11TP03 波形，电路处于过压状态，波形中间出现凹陷。



根据实验图像画出波形如图所示。



5. 放大特性的测试

调整负载电阻至临界状态，保持 VCC VBB 不变，改变信号源幅度，观察 11TP03 波形。

首先将电路调至临界状态如图 2-1 所示。

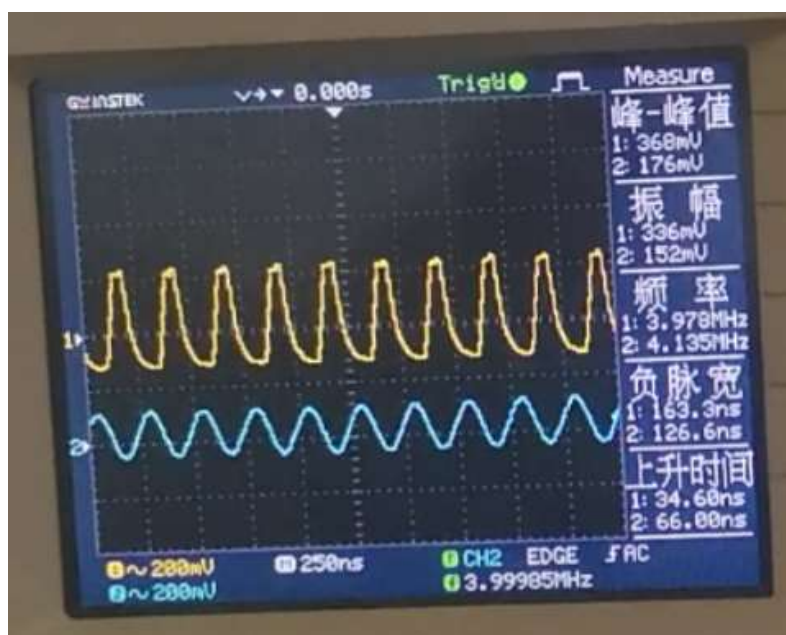


图 2- 1

减小信号源电压，可以观察到输出电压在欠压状态，输出波形为正弦波。

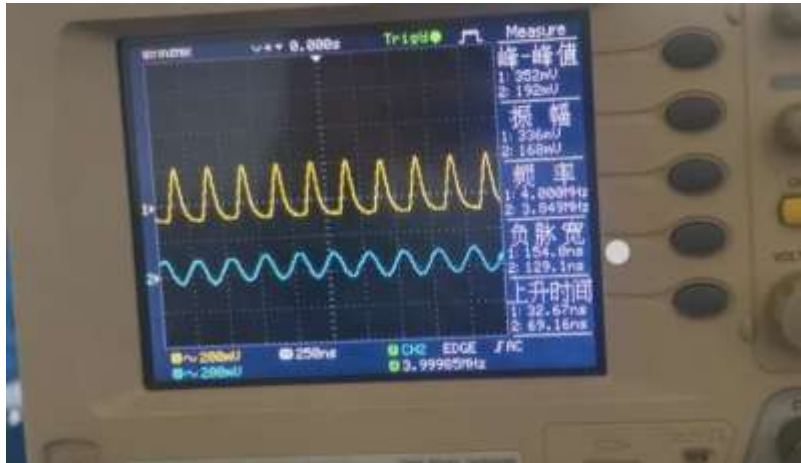


图 2- 2

继续减小输入电压，输出电压仍在欠压状态，输出电压幅度值变小。

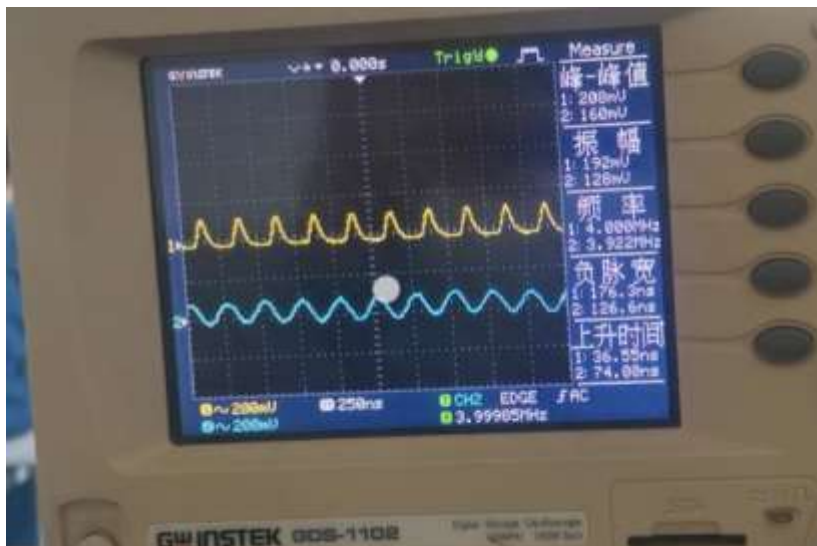


图 2- 3

逐渐增大信号源电压，，可看到输出信号呈现过压状态，如图 2-4 所示

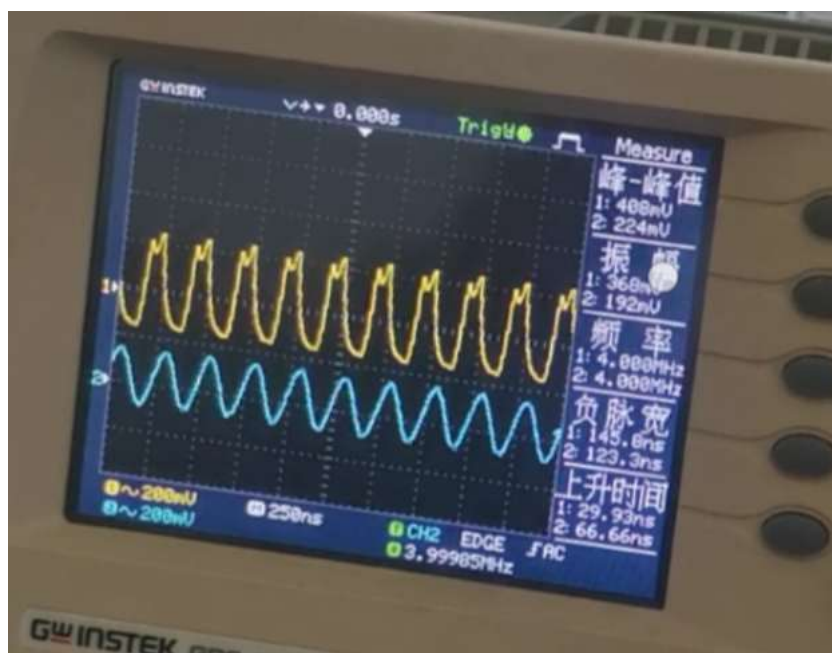


图 2- 4

继续增大输入信号源电压，可以看到输出信号在过压状态，且凹陷更加明显，如图 2-5 所示

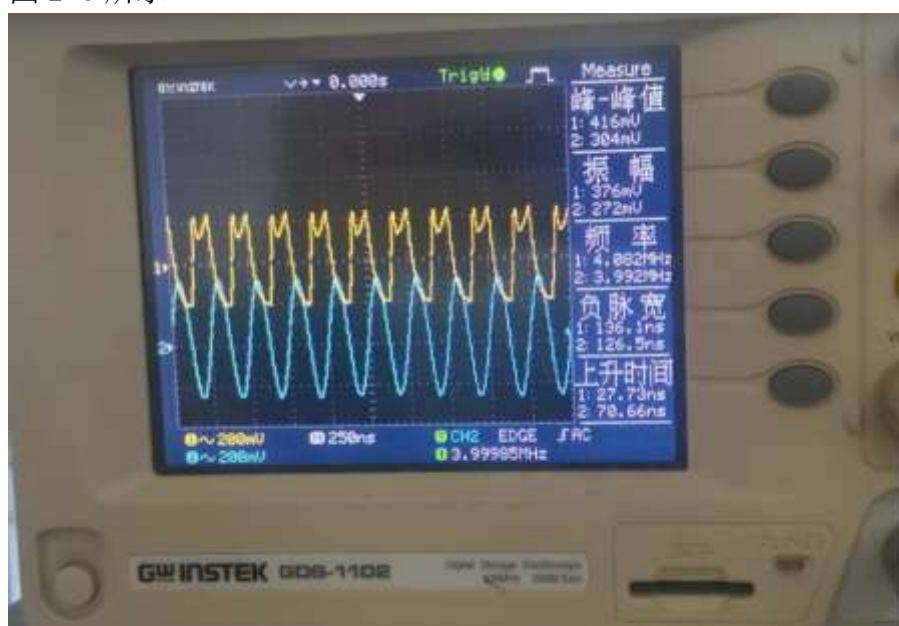


图 2- 5

继续增大输入信号电源电压，可以看到输出信号在过压状态，且凹陷更加明显，但是从图 2-1 到 2-6 振幅变化观察得到输出电压在过压状态下，输出信号幅度变化率较小。

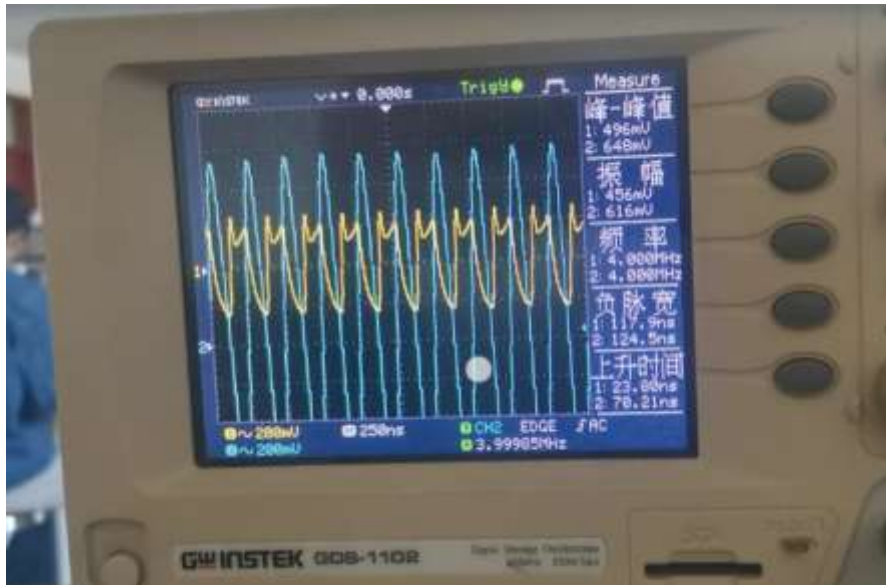
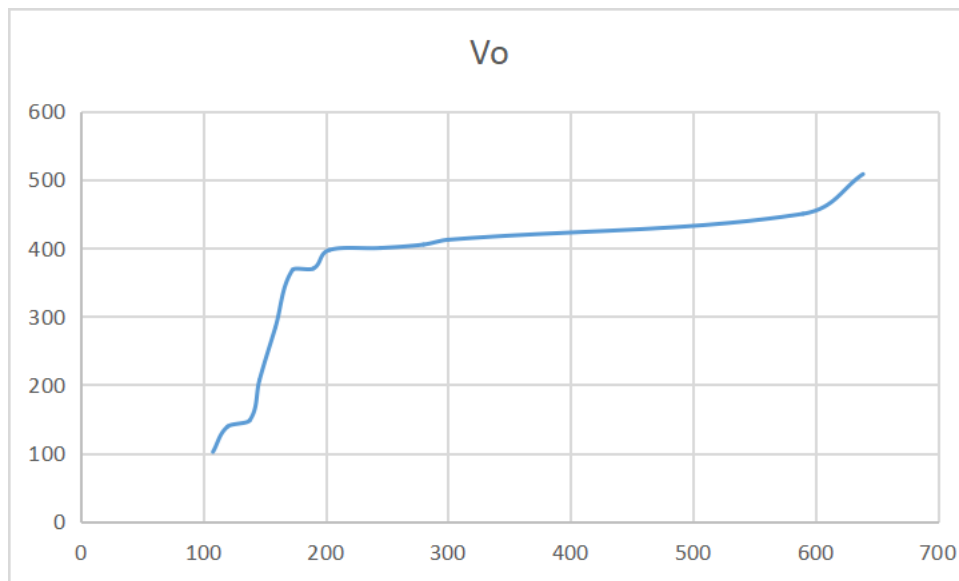


图 2- 6

画出放大特性如下所示，与书中近似重合。

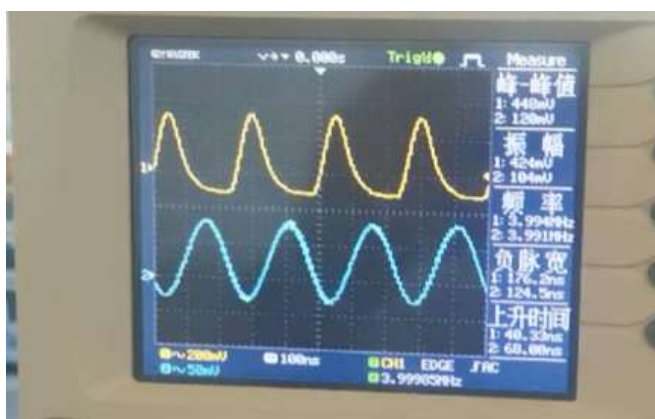
V _{bm}	112	120	125	160	178	193	209	255	282
V _o	103	143	156	209	360	368	388	400	409



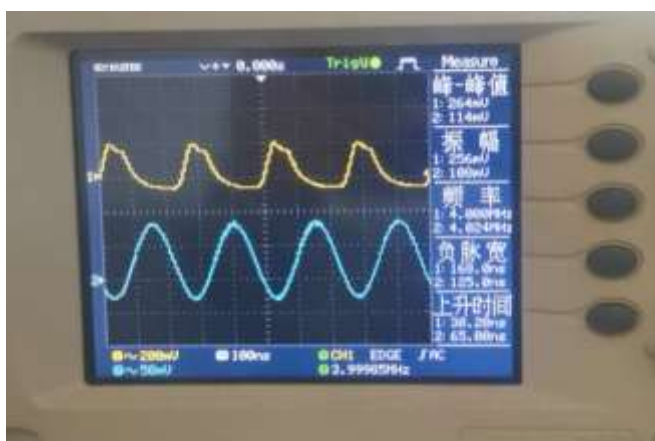
6. 测试电路的调制特性。

维持 V_{bm} 、 R_{Σ} 、 V_{BB} 不变时放大器的工作状态、性能 (V_{cm} 、 I_{C0} 、 I_{clm}) 随 V_{CC} 的变化特性。

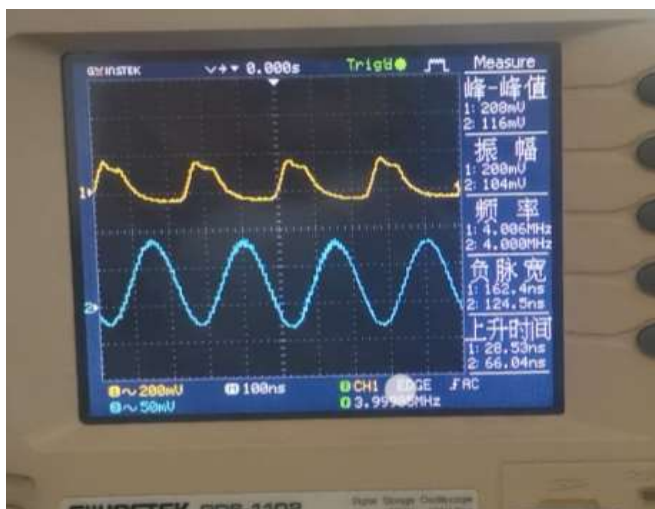
将 VCC 调整为 10V 观察输出的波形如下



调整 VCC，观察到输出为弱过压，波形中间出现凹陷。



调整 Vcc，观察到过压状态，凹陷加深。



绘制表格如下

VCC/V	3.00	4.08	5.07	6.00	7.05	8.2	9.01	10
Vo/mV	212	263	319	370	404	420	439	454

绘制图表如下，为集电极调制特性

