

# 模拟电子技术基础第一次仿真作业

## 实验报告

姓名：\_\_\_\_\_ 赵文亮 \_\_\_\_\_

学号：\_\_\_\_\_ 2016011452 \_\_\_\_\_

班级：\_\_\_\_\_ 自 64 \_\_\_\_\_

日期：\_\_\_\_\_ 2018 年 3 月 17 日 \_\_\_\_\_

目录

1	实验目的	1
2	仿真内容	1
	仿真题 1-1 .....	1
	仿真题 1-2 .....	6
	仿真题 1-3 .....	7
3	仿真中遇到的问题及解决方法	9
4	收获和体会	9

## 1 实验目的

- 掌握基本元件电路的分析方法。
- 熟悉仿真软件环境，掌握仿真软件的基本测量手段（用万用表的交流和直流档测量电压电流量、用示波器测量和观察信号、用 IV 分析仪测量半导体器件的特性曲线）。
- 熟悉仿真软件的基本分析方法（直流扫描分析方法）。

## 2 仿真内容

**仿真题 1-1:** 用 IV 分析仪 (IV Analyzer) 测量二极管的伏安特性和晶体管的输出特性。

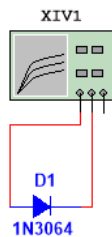


图 1: 测量二极管伏安特性电路

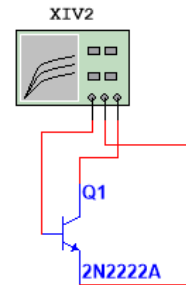


图 2: 测量晶体管输出特性电路

(1) 用 IV 分析仪测量二极管的伏安特性。

电路图如图 1 所示，本次实验中使用了小功率二极管 1N3064。仿真结果如图 3。从图中可以看出，曲线符合二极管的性质。对二极管施加正向电压时，若电压较小，则正向电流较小，此时二极管截止。当二极管电压大于某一个值（开启电压）时，二极管的电流开始迅速增加；对二极管施加反向电压时，在一定的范围内，二极管只有很小的反向饱和电流。而当反向电压大于某一个值时，二极管被反向击穿，反向电流迅速增加。

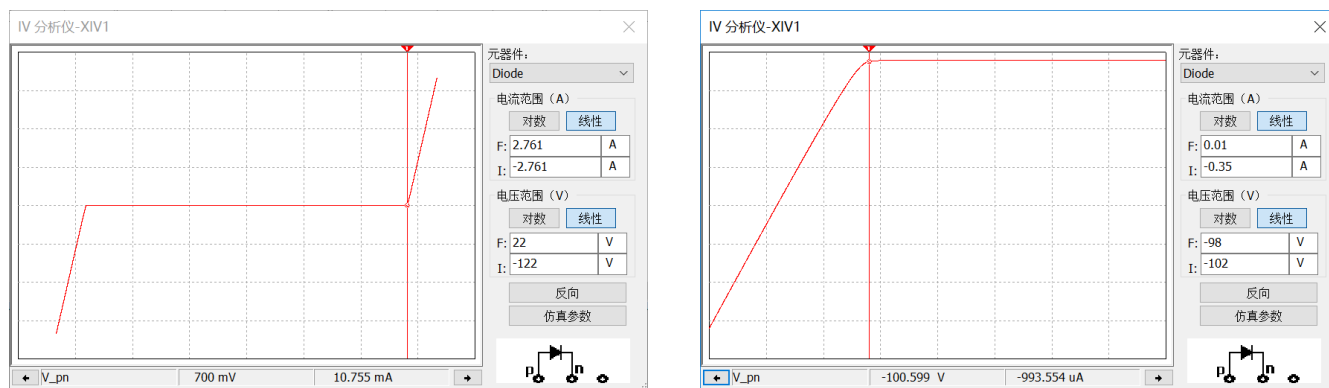
改变横纵坐标值的显示范围，即可进一步通过游标读取曲线上的关键参数。从图 4a 中可以读出当正向电压等于 0.7V 时通过二极管的电流  $I_D = 10.755\text{mA}$ 。从图 4b 中读出二极管的反向击穿电压  $U_{BR} = 100.599\text{V}$ 。

为了验证这一结果的合理性，我查阅了二极管 1N3064（National Semiconductor 生产）的数据手册，如图 5 所示。图中红色矩形框中的部分是 1N3064 的相关参数。从中可以看到  $V_{F,\max} = 0.710\text{V}$  时，电流为  $2.0\text{mA}$ ； $V_{F,\max} = 1.0\text{V}$  时，电流为  $10.0\text{mA}$ 。这和曲线中读取的结果有所差异，这一差异根本上来说是由 Multisim 中的模型参数与实际参数有差别造成的。另一方面，实验结果也在很大程度上符合实际。事实上，由于数据手册中给出的  $V_F$  是最大值，本次实验中正向电压在 0.7V 也可能包含在  $V_{F,\max} = 1.0\text{V}$  的情况中，而电流在  $10\text{mA}$  左右，比较符合实际。

从数据手册的第三列中可以读出反向击穿电压的最小值为  $75\text{V}$ 。本次仿真中读取的数据是  $100.599\text{V}$ ，符合实际值。此外，我查看了 Multisim 中改二极管的模型参数，如图 6 所示，其中指定了反向击穿拐点电压为  $100\text{V}$ ，和用光标测量的数值接近。



图 3: 二极管伏安特性曲线



(a) 正向电压为 0.7V 时电流  $I_D$

(b) 反向击穿电压  $U_{BR}$

图 4: 二极管参数测量曲线

(2) 用 IV 分析仪测量晶体管的输出特性。

电路如图 2 所示。用 IV 分析仪得到晶体管的输出特性曲线如图 7。在图中读出集电极电流  $I_C$  于表 1，利用公式

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (1)$$

可以计算得到晶体管放大倍数  $\beta$  值，如表 2。为了检查结果的合理性，我查阅了数据手册，如图 8。可见表 2 中的数据都处于数据手册中给出的范围内。为了更加深入地检验，我按照数据手册中给出的测试条件测了两组数据，如图 9 所示。

Device No.	Package No.	$V_{RRM}$ V Min	$I_R$ nA Max	@ $V_R$ V	$V_F$ V Min	@ $I_F$ mA	C pF Max	$t_{rr}$ ns Max	Test Cond.	Proc. No.	
1N625	DO-35	30	1000	20	1.5	4		1000	(Note 1)	D4	
1N914	DO-35	100	25 5000	20 75	1.0	10		4	(Note 2)	D4	
1N914A	DO-35	100	25 5000	20 75	1.0	20		4	(Note 2)	D4	
1N914B	DO-35	100	25 5000	20 75	0.72 1.0	5 100		4	(Note 2)	D4	
1N916	DO-35	100	25 5000	20 75	1.0	10		4	(Note 2)	D4	
1N916A	DO-35	100	25 5000	20 75	1.0	20		4	(Note 2)	D4	
1N916B	DO-35	100	25 5000	20 75	0.73 1.0	5 30		4	(Note 2)	D4	
1N3064	DO-35	75	100	50	0.575 0.650 0.710 1.0	0.250 1.0 2.0 10.0	2	4	(Note 3)	D4	
1N3600	DO-35	75	100	50	0.54	0.62	1.0	2.5	4	(Note 4)	D4

图 5: 1N3064 数据手册

名称	描述	值	单位
BV	反向击穿拐点电压	100	V

图 6: Multisim 中 1N3064 的反向击穿电压模型参数

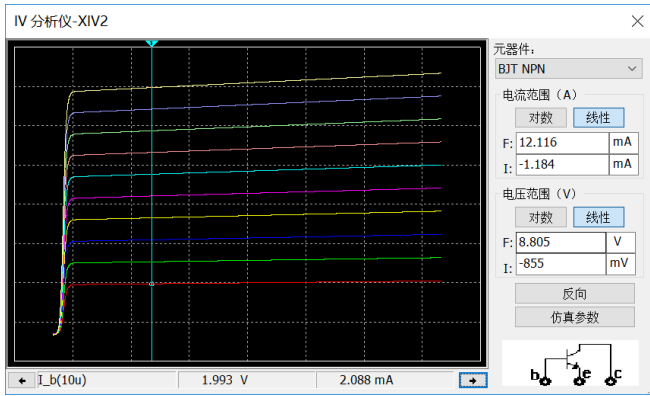
不难求得  $U_{CE}=10V$ ,  $I_C=10mA$  时,  $\beta = 224.56$ ;  $U_{CE}=10V$ ,  $I_C=150mA$  时,  $\beta = 181.61$ 。对照图 8 可见, 测量值均在数据手册中给出的范围内。

从表 2 中可以看出, 放大倍数  $\beta$  随  $I_B$  增大而略有减小, 但是减小的幅度不大;  $\beta$  随  $U_{CE}$  的增大而增大, 这正体现了 Early 效应。为了更加精确地描述这一现象, 我读取了  $I_B = 10\mu A$  和  $I_B = 50\mu A$  时的一系列  $I_C$  值 (见表 3), 并通过线性回归做出拟合直线。

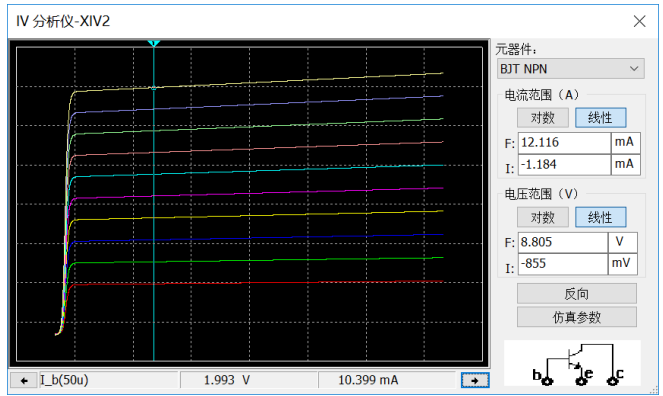
表 3: 测量 Early 电压所需数据

$U_{ce}/V$	1.993	3.000	4.006	4.998	6.005
$I_c/mA$	10.399	10.501	10.603	10.703	10.805
(a) $I_B=50\mu A$					
$U_{ce}/V$	1.993	3.000	4.006	4.998	6.005
$I_c/mA$	2.088	2.108	2.129	2.149	2.169
(b) $I_B=10\mu A$					

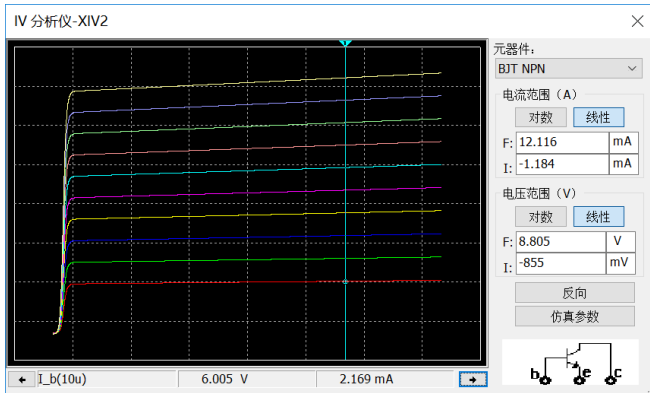
从图 10 中可以得出, 当  $I_B = 50\mu A$  时, Early 电压为 100.787V; 当  $I_B=10\mu A$  时, Early 电压为 101.080V。可见 Early 电压在 100V 左右, 且  $I_B$  变化时, Early 电压变化不大。



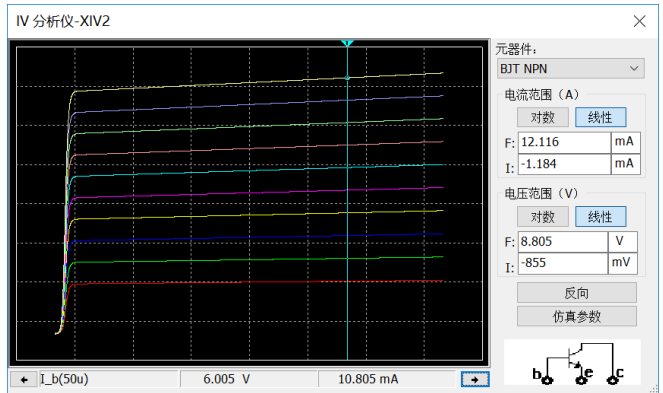
(a)  $U_{CE} = 2V, I_B = 10\mu A$



(b)  $U_{CE} = 2V, I_B = 50\mu A$



(c)  $U_{CE} = 6V, I_B = 10\mu A$



(d)  $U_{CE} = 6V, I_B = 50\mu A$

图 7: 不同情况下晶体管的输出特性曲线

表 1:  $I_C$  数据

$I_C / \text{mA}$ \ $I_B / \mu A$	10	50
$U_{CE} / V$		
2	2.088	10.399
6	2.169	10.805

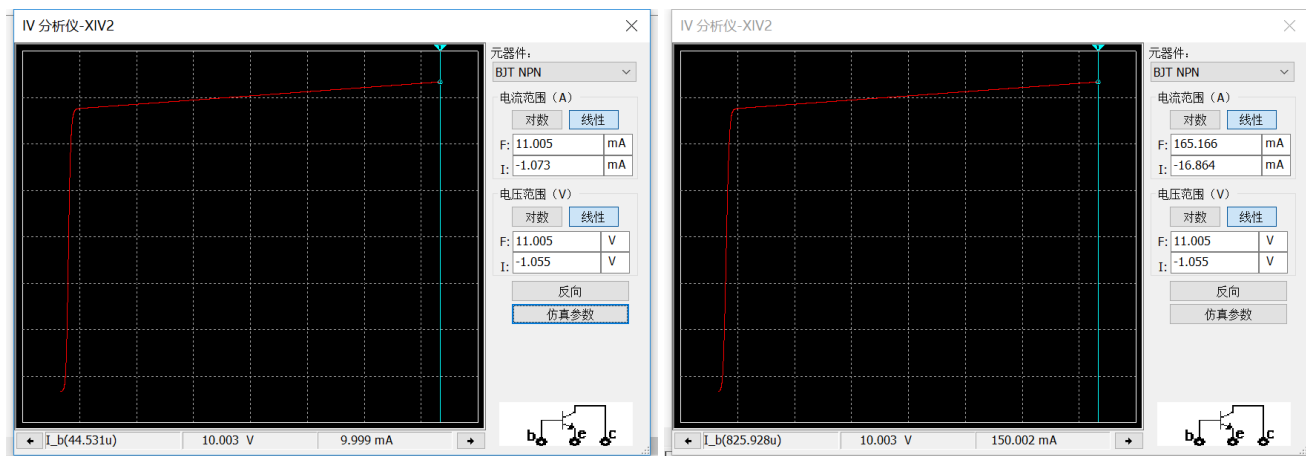
表 2:  $\beta$  数据

$I_C / \text{mA}$ \ $I_B / \mu A$	10	50
$U_{CE} / V$		
2	208.80	207.98
6	216.90	216.10

#### ON CHARACTERISTICS (Note 1)

DC Current Gain ( $I_C = 0.1 \text{ mAdc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 1.0 \text{ mAdc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 10 \text{ mAdc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 150 \text{ mAdc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 500 \text{ mAdc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$ )	$h_{FE}$	50 75 100 100 30	- 325 - 300 -	-
---	----------	------------------------------	---------------------------	---

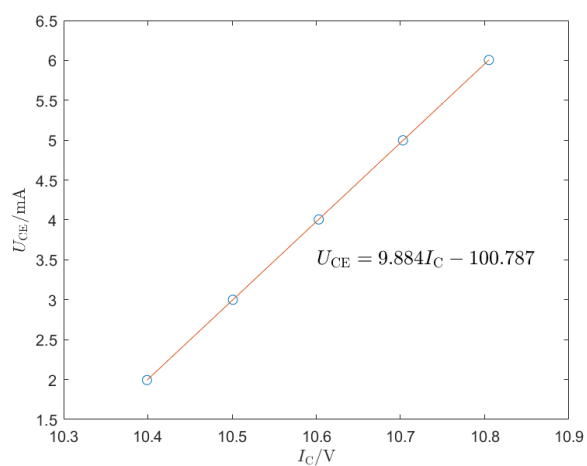
图 8: 2N2222A 数据手册 (部分)



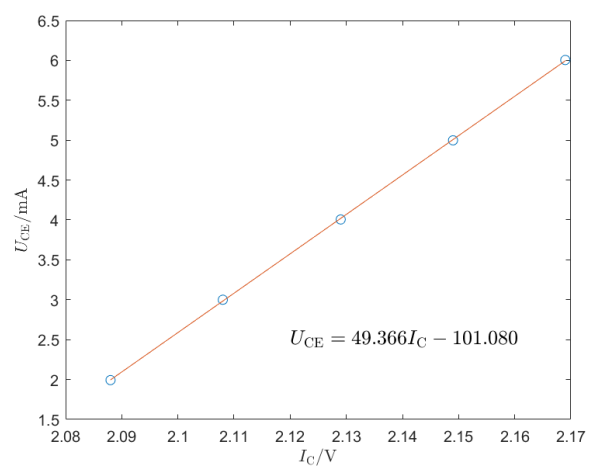
(a)  $U_{CE}=10V, I_C=10mA$

(b)  $U_{CE}=10V, I_C=150mA$

图 9: 数据手册部分测试条件下的测量结果



(a)  $I_B=50\mu A$



(b)  $I_B=10\mu A$

图 10: Early 电压拟合结果

**仿真题 1-2:** 教材习题 1.16。电容 C 可用 100uF，二极管可选用小功率二极管，如 1N3064。

仿真电路如图 11 所示。利用 Multisim 的参数扫描功能，可以得出当电阻  $R_1$  变化时，二极管的直流电压的变化。得出曲线如图 12 所示。可见，随着  $R_1$  阻值的增大，二极管的直流电压随之减小。我接着

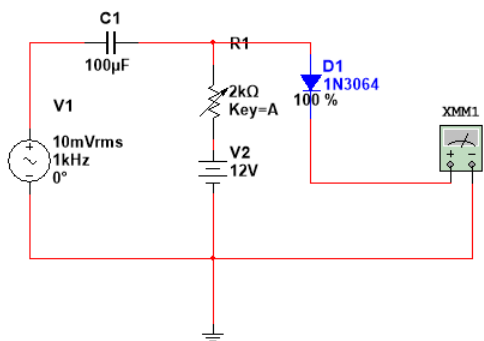


图 11: 仿真 2 电路图

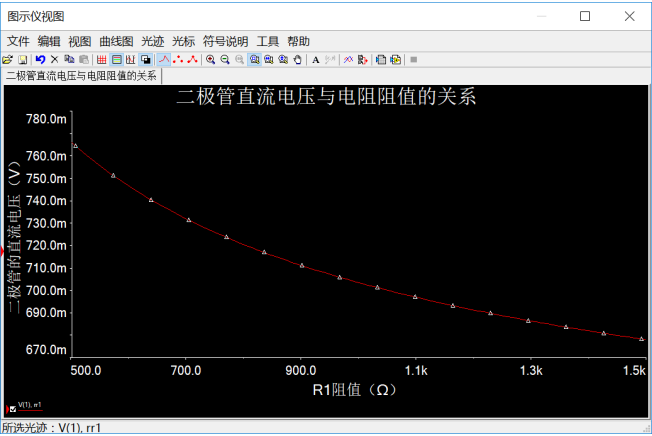


图 12: 二极管直流电压与  $R_1$  阻值的关系

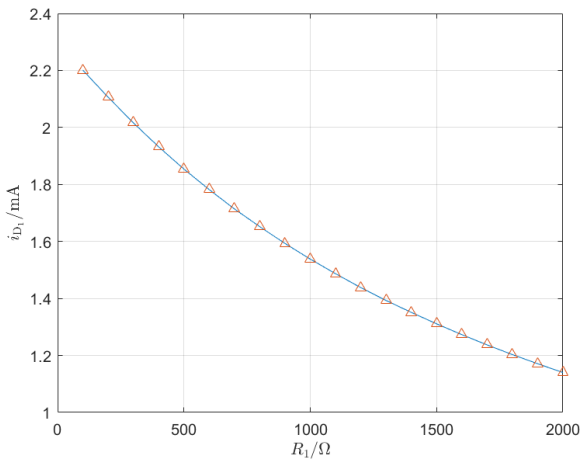


图 13: 二极管交流电流与  $R_1$  阻值的关系

使用示波器观察了通过二极管的交流电流，如图 14。可见交流波形比较完美，没有出现明显失真。进一步，我希望得到二极管交流电流与  $R_1$  阻值的关系。遗憾的是，Multisim 中无法直接通过参数扫描的方式提取信号中的交流分量有效值。所以，我将  $R_1$  设置为一个可变电阻，并使用万用表测量了其取不同值的时候对应的交流电流的大小。测量结果如表 4 所示。进而可以通过 MATLAB 作出  $R_1$  变化时二极管交流电流的变化曲线图，如图 13 所示。

表 4:  $R_1$  阻值变化时交流电流测量值

$R_1/\text{k}\Omega$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$i_D/\text{mA}$	2.201	2.106	2.016	1.932	1.854	1.782	1.714	1.652	1.593	1.538
$R_1/\text{k}\Omega$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
$i_D/\text{mA}$	1.487	1.438	1.393	1.351	1.311	1.273	1.237	1.203	1.171	1.140



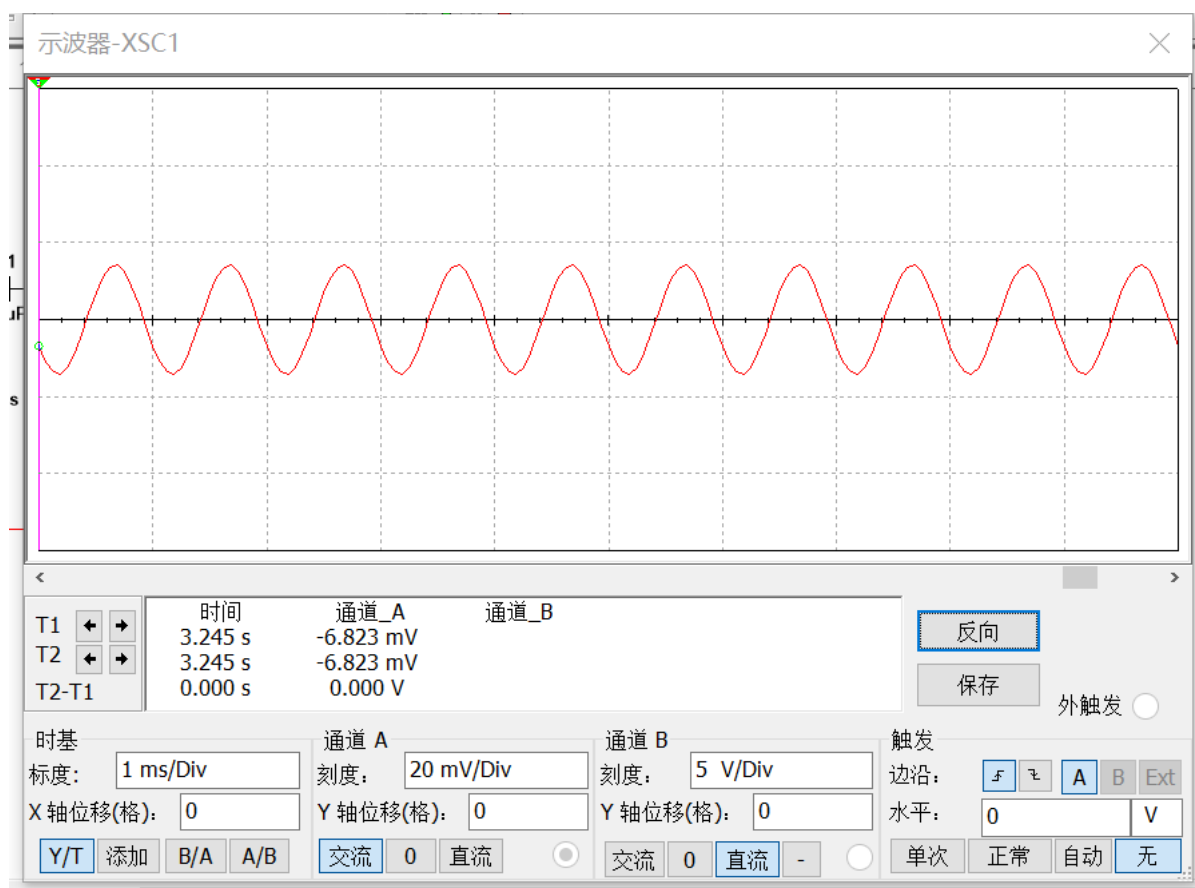


图 14: 二极管交流电流波形

**仿真题 1-3:** 教材习题 1.17（晶体管可选用小功率晶体管 2N2222A，请选择 Zetex 厂商的）。

电路如图 15 所示。使用 Multisim 的直流扫描功能，对  $u_I$  的取值进行扫描，范围为  $0 \sim 10\text{V}$ 。得到曲线如图 16。

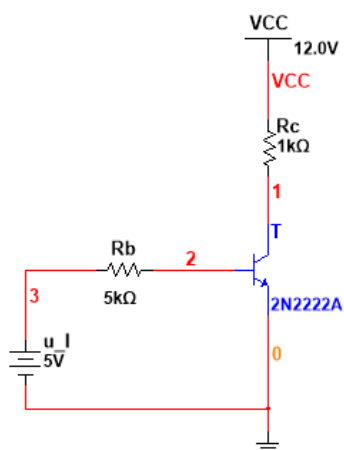


图 15: 仿真 3 电路图

从图 16 中不难看出，曲线中有两个明显的拐点，这两个拐点分别对应晶体管状态从截止到放大、从放大到饱和。利用游标可以读出这两个拐点对应的  $u_I$  值分别为  $u_1 = 0.593\text{V}$ ,  $u_2 = 1.000\text{V}$ 。下面对此结果

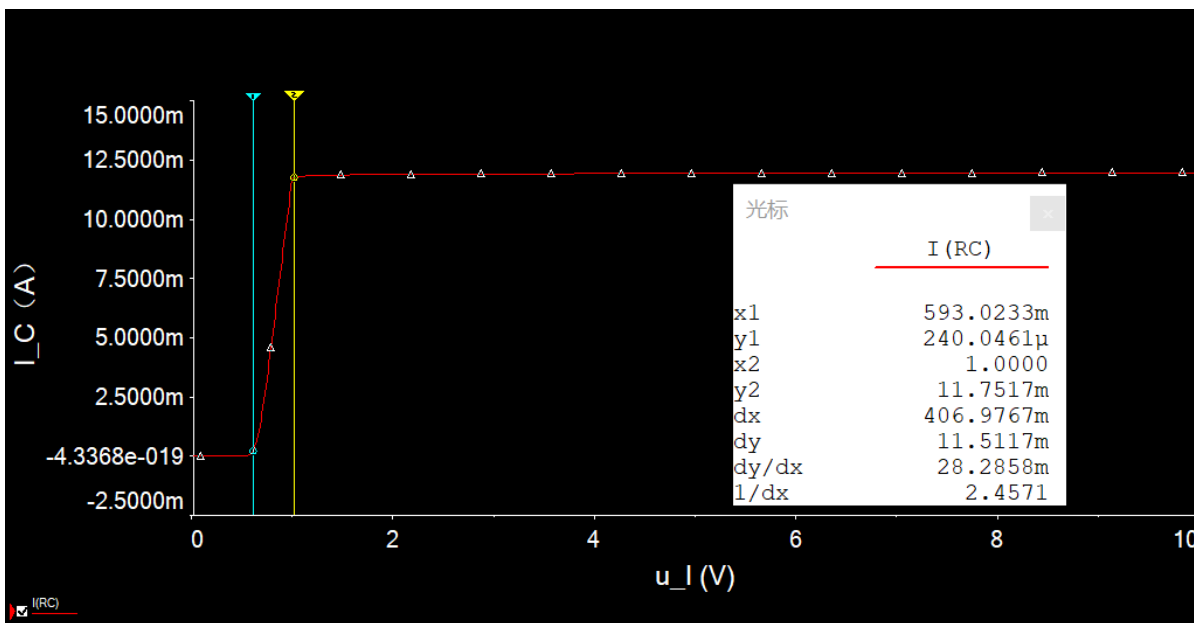


图 16:  $I_C$  随  $u_I$  变化关系

进行理论分析。

当  $u_I$  小于晶体管 BE 结的开启电压时，晶体管处于截止状态， $I_C=0$ 。当  $u_I$  达到开启电压时，晶体管进入放大状态。查阅 2N2222A 的数据手册（图 17）可知， $u_I$  的值符合实际（开启电压要比饱和电压略小）。

Collector-Emmitter Saturation Voltage ( $I_C = 150 \text{ mAdc}$ , $I_B = 15 \text{ mAdc}$ ) ( $I_C = 500 \text{ mAdc}$ , $I_B = 50 \text{ mAdc}$ )	$V_{CE(sat)}$	- -	0.3 1.0	Vdc
Base-Emmitter Saturation Voltage ( $I_C = 150 \text{ mAdc}$ , $I_B = 15 \text{ mAdc}$ ) ( $I_C = 500 \text{ mAdc}$ , $I_B = 50 \text{ mAdc}$ )	$V_{BE(sat)}$	0.6 -	1.2 2.0	Vdc

图 17: 2N2222A 数据手册（部分）

进一步可以通过三极管的性质推算出  $u_2$  的理论值。从图 17 中看到， $V_{CE(sat)}$  很小，不妨取 0.3V；根据仿真 1-1 中得到的  $\beta$  数据（表 2），不妨取  $\beta = 200$ 。则有

$$\begin{cases} I_B = \frac{u_2 - U_{BE}}{R_b} \\ I_C = \beta I_B \\ U_{CE} = V_{CC} - I_C R_c \end{cases} \quad (2)$$

解得

$$u_2 = U_{BE} + \frac{R_b(V_{CC} - U_{CE})}{\beta R_c} \quad (3)$$

将由于此时 BE 结接近饱和，故取典型值  $U_{BE}=0.7\text{V}$ 。将所有参数代入可得：

$$u_2 = 0.7 + \frac{5\text{k}(12 - 0.3)}{200 \cdot 1\text{k}} \text{V} = 0.9925\text{V} \quad (4)$$

可知与仿真结果十分接近。

### 3 仿真中遇到的问题及解决方法

- 仿真题 1-1 中要求测量正向电压为 0.7V 左右的电流  $I_D$ 。由于第一次使用 IV 分析仪，对其参数的设置不是十分熟练，我总是不能将光标对准 0.7V，而是会有较大的偏差。起初我以为是仿真步长的问题，但是当我改变仿真步长后，仍然没有得到满意的结果。后来我发现，当我调整电压和电流的坐标显示范围到合适的区域时，就可以移动光标到一个很接近 0.7V 的值，但仍然不是准确的 0.7V。后来我在网络学堂的讨论区中，发现了有同学问了同样的问题，解决方案是在光标上右键，既可以手动设定 X 值。这样，便可以准确地将光标移动到想要的位置。
- 仿真题 1-2 中需要测量二极管两端的直流电压和交流电流。直流电压比较简单，只需要使用 Multisim 的参数扫描功能。而要获取交流电流的变化趋势，需要获得电流中交流分量的有效值。我尝试在参数扫描功能中设置，但是每次得到的结果都与直接用万用表测量的结果又出入。后来我咨询了叶老师，她说 Multisim 中可能没有这个功能。于是我就放弃了使用参数扫描获得曲线的方法，而是直接通过万用表测量一系列电阻值下对应的交流电流有效值，再通过 MATLAB 作出曲线，完成了仿真任务。由于我取点取得很多，得到的曲线可以很好地反映变化趋势。
- 查阅数据手册的过程中我也遇到了一些困难。在数电课中，我一直使用 ALLDATASHEET 来查阅数据手册。但是这次要求查阅固定厂商的元器件，其中有的在 ALLDATASHEET 上很难直接搜到。后来我借助各种搜索引擎，成功地找到了数据手册。

### 4 收获和体会

通过本次仿真实验，我有以下几点收获和体会。

- 熟悉了 Multisim 软件的使用。由于之前在电路原理课上使用过 Multisim 进行仿真，我对 Multisim 比较熟悉，但有些细节性的操作仍有些许遗忘。例如参数扫描、直流扫描，以及快捷键等等。通过本次实验，我加强了基本测量方法的练习，并学习了以前未接触过的仪器——IV 分析仪。
- 对二极管、晶体管的特性有了更深的理解。通过仿真，我亲眼看到了二极管、晶体管的特性曲线，这也让我更好地理解教材中的相关内容。例如二极管的几种等效模型、晶体管的 Early 电压。
- 练习了软件作图的能力。仿真中有些图不能用 Multisim 直接生成，这些图是我通过测量多组数据，并使用 MATLAB 绘制而成的。我更加熟悉了使用 MATLAB 进行拟合、作图、标注的操作。
- 练习了  $\text{\LaTeX}$  的写作能力。通过撰写本次报告，我更加熟悉了  $\text{\LaTeX}$  中定义命令、计数器的使用、图表的交叉引用、浮动体的处理、参考文献的使用等技术。

### 参考文献

- [1] alldatasheet.com, “1N3064 datasheets.” <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/78475/NSC/1N3064.html>.

- [2] “2n2222a - small signal switching transistor.” <http://web.mit.edu/6.101/www/reference/2N2222A.pdf>, 2015.