

模拟电子技术基础

仿真报告

(2020 - 2021 学年度 春季学期)

实验名称 第一次仿真作业

姓名	刘祖炎
学号	2019010485
院系	自动化系
教师	叶朝辉
时间	2021 年 3 月 16 日

目录

1	实验目的	1
2	仿真题 1-1	1
2.1	用 IV 分析仪测量二极管的伏安特性	1
2.2	用 IV 分析仪测量晶体管的输出特性	3
2.3	用 IV 分析仪测量 MOS 管的输出特性	5
3	仿真题 1-2	7
3.1	二极管直流电压随电阻 R 的变化关系	7
3.2	二极管交流电流随电阻 R 的变化关系	8
4	仿真题 1-3	9
5	仿真中遇到的问题及解决方法	11
6	收获与体会	11

1. 实验目的

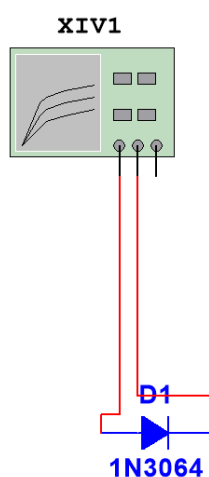
- 熟悉仿真软件环境
- 掌握仿真软件的基本测量手段 (用万用表的交流和直流档测量电压和电流、用示波器测量和观察信号、用 IV 分析仪测量半导体器件的特性曲线)
- 熟悉仿真软件的基本分析方法 (直流扫描分析方法)

2. 仿真题 1-1

2.1 用 IV 分析仪测量二极管的伏安特性

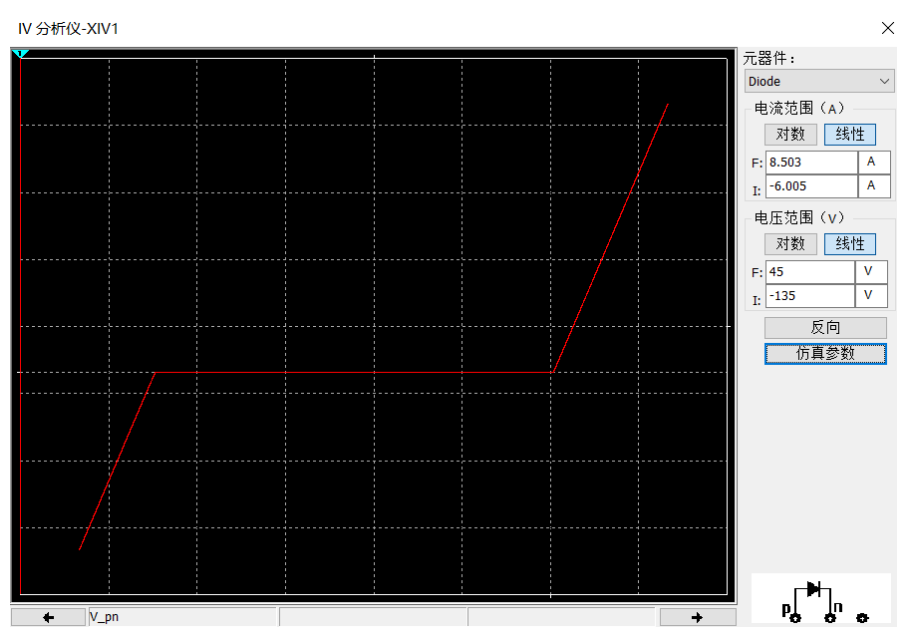
选用小功率二极管 1N3064，如图1所示搭建仿真电路。

图 1: 二极管伏安特性测试电路



利用 IV 分析仪分析电路，仿真后即可得二极管 1N3064 的伏安特性曲线，如图2所示。

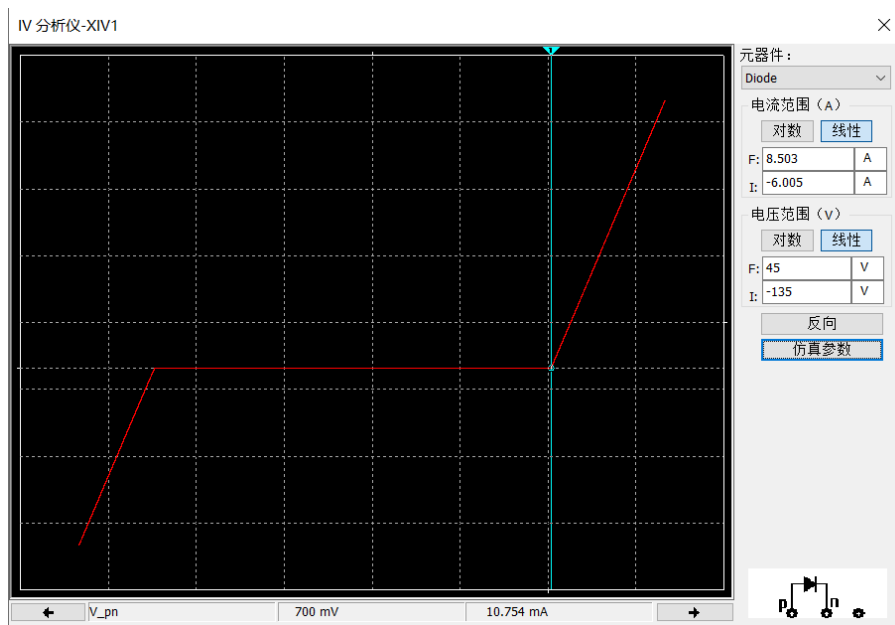
图 2: 二极管伏安特性测试电路



由图可知，当对二极管施加较小的正向电压时，二极管不导通，电流几乎为零；正向电压超过开启电压时，二极管导通。当对二极管施加反向电压时，会产生反向饱和电流；反向电压超过阈值时，二极管会发生击穿。

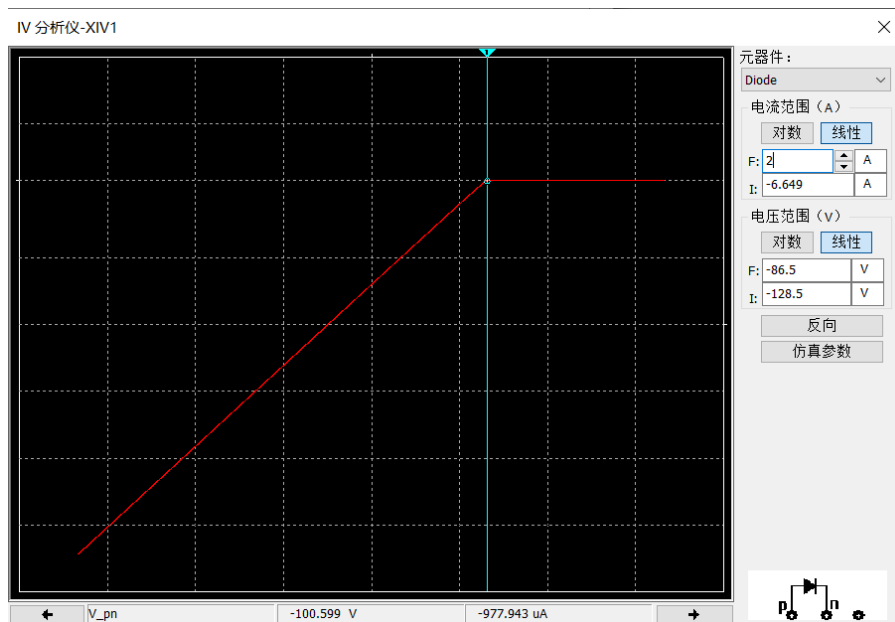
测量正向电压 $U = 0.7V$ 时，通过二极管的电流 I_D ，如图3所示，测得 $I_D = 10.754mA$ 。

图 3: 二极管正向导通电压



改变 IV 分析仪的电压范围 ($-128V \sim -86V$)，根据所示图线的拐点，测得二极管的击穿电压 $U_{BR} = -100.599A$ ，如图4所示。

图 4: 二极管反向击穿电压



查阅 1N3064 的数据手册 (图5) 以及 Multisim 中反向击穿电压的参数 (图6)，可知数据与仿真结果基本吻合。

图 5: 1N3064 数据手册

Device No.	Package No.	VRRM V Min	IR nA @ VR V	VF V @ IF mA	C pF Max	trr ns Max	Test Cond.	Proc. No.
1N3064	DO-35	75	100 50	0.575 0.250 0.650 1.0 0.710 2.0 1.0 10.0	2	4	(Note 3)	D4

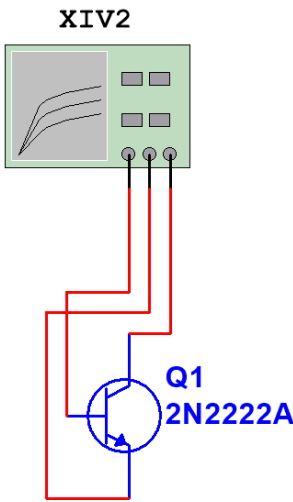
图 6: 1N3064 反向击穿电压

名称	描述	值	单位
BV	反向击穿电压	100	V

2.2 用 IV 分析仪测量晶体管的输出特性

选用小功率晶体管 2N2222A，如图7所示搭建仿真电路。

图 7: 二极管伏安特性测试电路



根据要求改变 IV 分析仪测量值，可得相应的输出特性曲线如图8($U_{CE} = 2V, i_B = 10\mu A$)、9($U_{CE} = 6V, i_B = 10\mu A$)、10($U_{CE} = 2V, i_B = 50\mu A$)、11($U_{CE} = 6V, i_B = 50\mu A$) 所示。

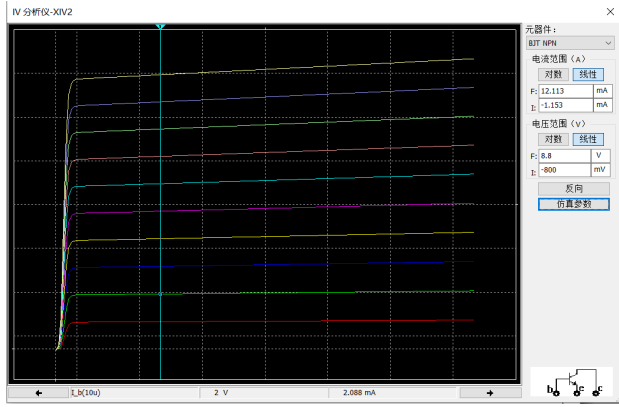


图 8: $U_{CE} = 2V, i_B = 10\mu A$

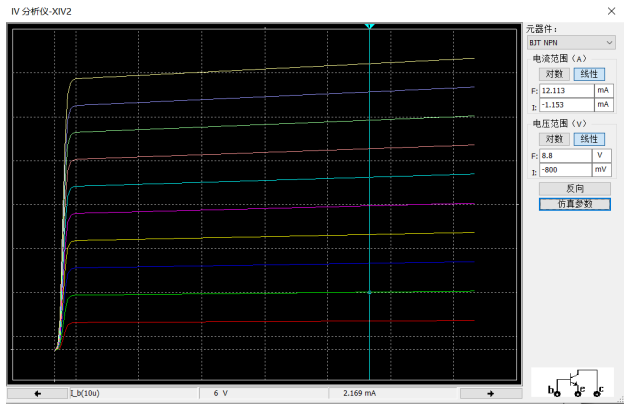


图 9: $U_{CE} = 6V, i_B = 10\mu A$

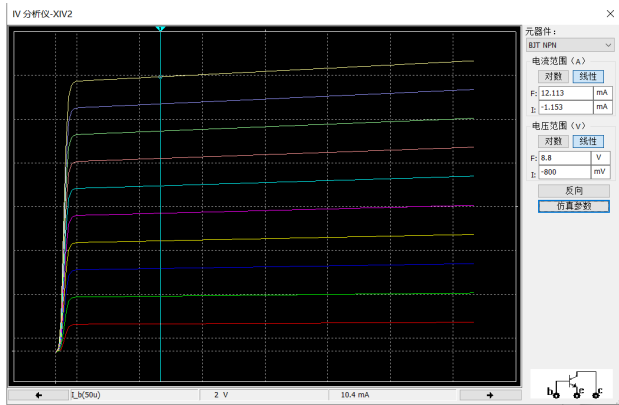


图 10: $U_{CE} = 2V, i_B = 50\mu A$

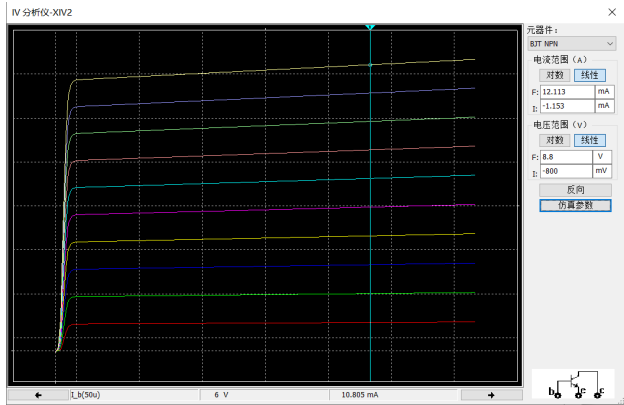


图 11: $U_{CE} = 6V, i_B = 50\mu A$

由图得出对应条件下 I_C 的值，如表1所示。
根据公式：

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

计算晶体管的放大倍数 β ，如表2所示。

表 1: 测得数据 I_C/mA

I_C/mA	$I_B/\mu A$		
		10	50
U_{CE}/V	2	2.088	10.400
	6	2.169	10.805

表 2: 计算数据 β

β \ $I_B/\mu A$	10	50
U_{CE}/V		
2	208.80	208.00
6	216.90	216.10

分析表2可知, i_B 一定时, β 随 u_{CE} 的增大而增大; u_{CE} 一定时, β 随 i_B 的增大而减小。其中, u_{CE} 的变化相比于 i_B 的变化对 β 值的影响更大。

查阅数据手册如图12所示, $i_C = 1mA$, $u_{CE} = 10V$ 时, 直流电流放大倍数 $h_{FE(min)} = 50$, 实际 β 值大于该值, 结果正确。

图 12: 2N2222A 数据手册

ON CHARACTERISTICS (Note 1)				
DC Current Gain	h_{FE}			
($I_C = 0.1$ mA dc, $V_{CE} = 10$ V dc)	50	-	-	-
($I_C = 1.0$ mA dc, $V_{CE} = 10$ V dc)	75	325	-	-
($I_C = 10$ mA dc, $V_{CE} = 10$ V dc)	100	-	-	-
($I_C = 150$ mA dc, $V_{CE} = 10$ V dc)	100	300	-	-
($I_C = 500$ mA dc, $V_{CE} = 10$ V dc)	30	-	-	-

在 Multisim 中, 查阅模型参数可知, 该晶体管的理想放大倍数 $\beta = 220$, 与实测结果接近。

图 13: 2N2222A 模型参数 (1)

BF	Ideal maximum forward beta	220	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
----	----------------------------	-----	--------------------------	--------------------------

β 随 U_{CE} 的增大而增大是 Early 效应的体现, 对所测数据进行处理, 可对 Early Voltage 进行估算。

对所得图像进行分析, 可知 i_C 与 u_{CE} 在放大区基本成线性关系。因而, 可对数据点 (u_{CE1}, i_{C1}) 、 (u_{CE2}, i_{C2}) 进行线性拟合, 其截止电压的计算公式为:

$$V_A = u_{CE1} - i_{C1} \frac{u_{CE1} - u_{CE2}}{i_{C1} - i_{C2}}$$

代入点 (2, 2.088)、(6, 2.169), 求得 $i_B = 10\mu A$ 时, Early Voltage 为 $-101.11V$ 。

代入点 (2, 10.400)、(6, 10.805), 求得 $i_B = 50\mu A$ 时, Early Voltage 为 $-100.72V$ 。

可近似认为上述测得的两组 Early Voltage 相交于同一点。

在 Multisim 中, 查阅模型参数可知, 该晶体管的 Early Voltage 为 104V, 与实测结果接近。

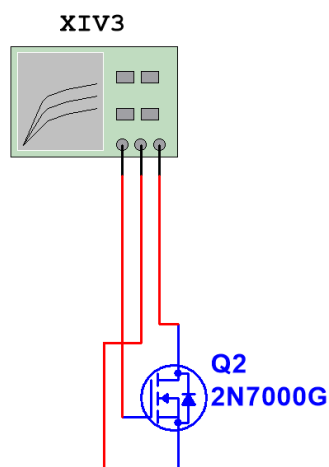
图 14: 2N2222A 模型参数 (2)

VAF	Forward Early voltage	104	<input type="checkbox"/> V	<input type="checkbox"/>
-----	-----------------------	-----	----------------------------	--------------------------

2.3 用 IV 分析仪测量 MOS 管的输出特性

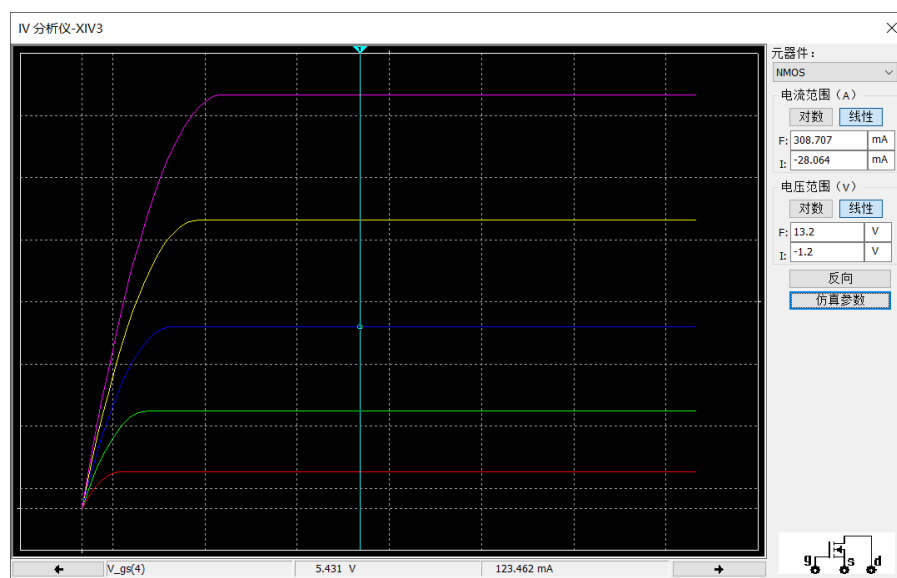
选用 MOS 管 2N7000G, 如图15所示搭建仿真电路。

图 15: MOS 管输出特性测试电路



适当调节 IV 分析仪的相关参数，可得 MOS 管的输出特性曲线如图16所示。

图 16: MOS 管输出特性曲线



根据游标所示值可知，当 $u_{GS} = 4V$ 时，恒流区 $i_D = 123.462mA$ 。

为测量 MOS 管的跨导 g_m ，需要对 $u_{GS} = 4V$ 附近的 $i_D \sim u_{GS}$ 关系进行局部线性近似。可取近似所需 $\Delta = 0.01V$ ，调节 IV 分析仪的相关参数，显示 $u_{GS} = 4.01V$ 、 $u_{GS} = 3.99V$ 两种情况下 MOS 管的输出线性曲线，如图17所示。

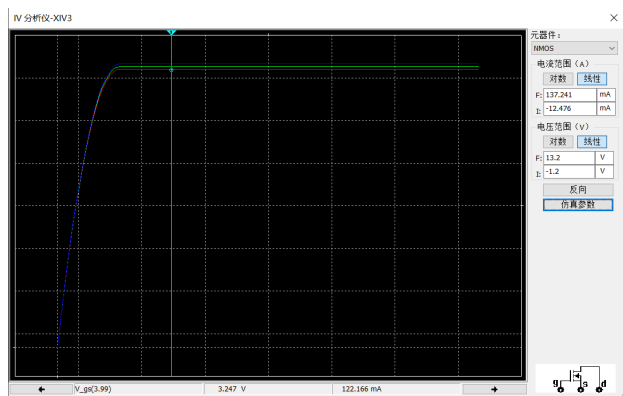


图 17: $u_{GS} = 3.99V$

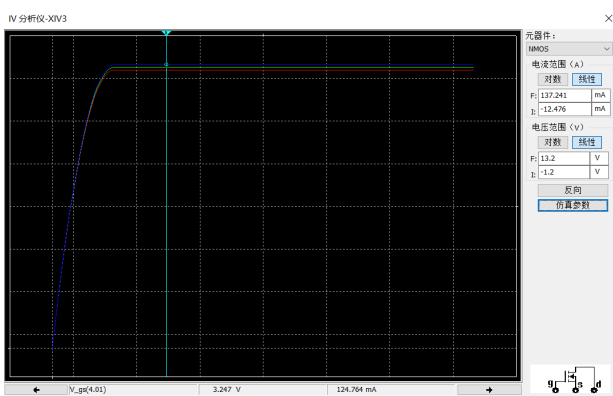


图 18: $u_{GS} = 4.01V$

根据游标所示值可知，当 $u_{GS} = 3.99V$ 时，恒流区 $i_D = 122.166mA$ ；当 $u_{GS} = 4.01V$ 时，恒流区 $i_D = 124.764mA$ 。据此，计算得：

$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \approx 129.9mS$$

查阅数据手册可知，当 $V_{DS} = 10V$, $t = 25^\circ$ 时， $V_{GS} = 4V$ 时约有 $I_D = 0.2A$ ，此时，有 $g_{m(min)} = 100mS$ ， $g_{m(type)} = 320mS$ ，与仿真结果相符合。

图 19: 2N7000G 数据手册

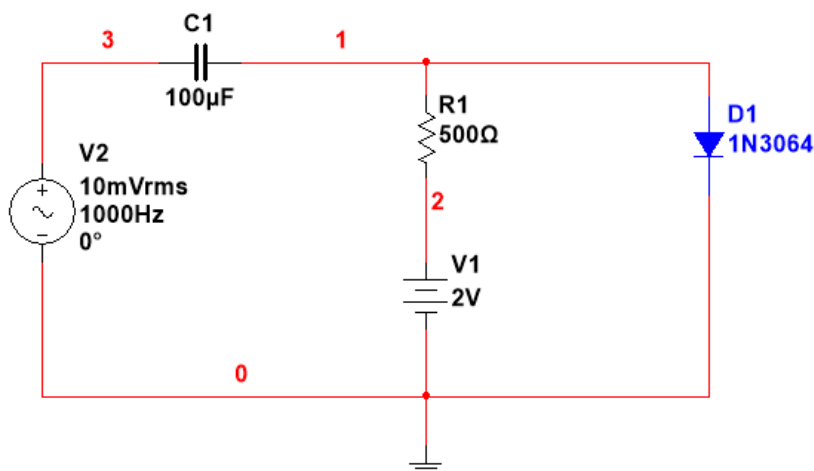
gFs	Forward Transconductance	$V_{DS} = 10V$, $I_D = 200mA$	2N7000	100	320	mS
-----	--------------------------	-----------------------------------	--------	-----	-----	----

3. 仿真题 1-2

3.1 二极管直流电压随电阻 R 的变化关系

如图20所示，连接电路，正确设置相关元件的值。

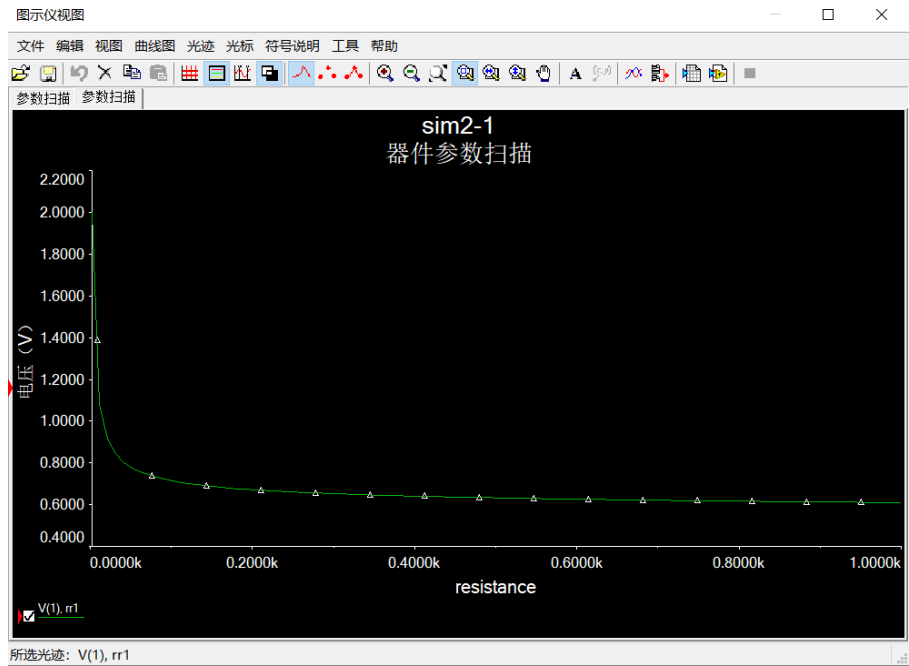
图 20: 测量二极管直流电压与 R_1 关系电路图



使用 Multisim 中的参数扫描功能，设置扫描变量为电阻 R_1 的阻值，范围为 $0 \sim 1k\Omega$ ，步长为 10Ω ，设置输出变量为二极管两端电压 V_D ，扫描模式选择直流扫描（此时，电路中的交流电源 u_1 对扫描结果无

影响), 由此可得 D_1 两端电压值 V_D 随 R_2 的变化情况, 如图21所示。

图 21: 二极管直流电压与 R_1 阻值关系曲线

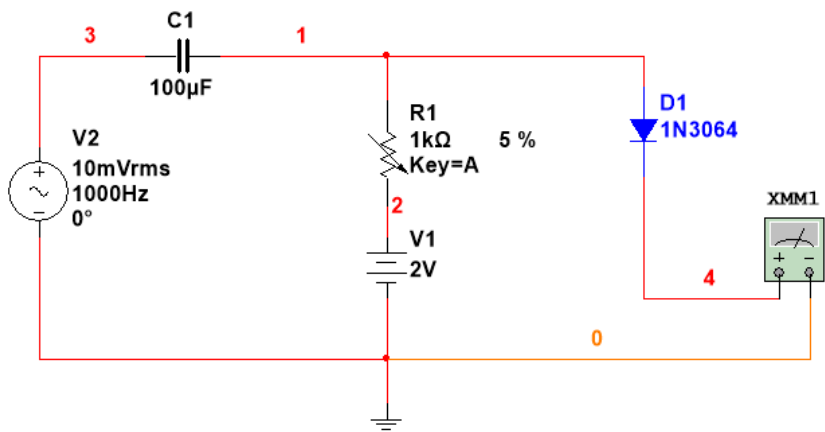


由曲线可知, 当 $R_1 = 0\Omega$ 时, V_D 与直流电压相等, 此后, 随着 R_1 逐渐增大, V_D 随之下降, 下降速度先快后慢, 最终 V_D 趋近于 $0.6V$, 这表示二极管的开启电压大约为 $0.6V$ 。

3.2 二极管交流电流随电阻 R 的变化关系

如图22所示, 连接电路, 正确设置相关元件的值。

图 22: 测量二极管交流电流与 R_1 关系电路图



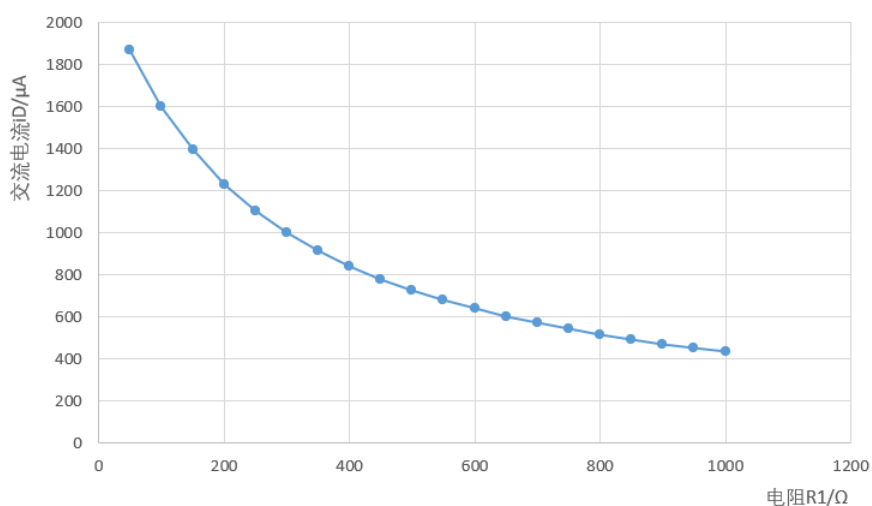
由于 Multisim 的参数扫描功能不能得到交流电流的信息, 无法直接得到 R_1 与二极管交流电流的关系, 故考虑在二极管所在支路串联交流电流表用于测量相应值, 并将电阻 R 用电位器代替, 通过改变 R 的阻值读取多个 $R \sim i_D$ 数据点, 利用曲线进行拟合得出二极管交流电流随电阻 R 的近似变化关系曲线, 所得数据如表3所示。

表 3: 交流电流随电阻 R_1 的变化情况

序号	R_1/Ω	$i_D/\mu A$	序号	R_1/Ω	$i_D/\mu A$
1	50	1868	11	550	681
2	100	1599	12	600	640
3	150	1394	13	650	604
4	200	1233	14	700	572
5	250	1106	15	750	543
6	300	1002	16	800	516
7	350	916	17	850	493
8	400	843	18	900	471
9	450	781	19	950	451
10	500	728	20	1000	433

在 Excel 软件中作出上述曲线，如图23所示。

图 23: 交流电流随电阻 R_1 的变化情况

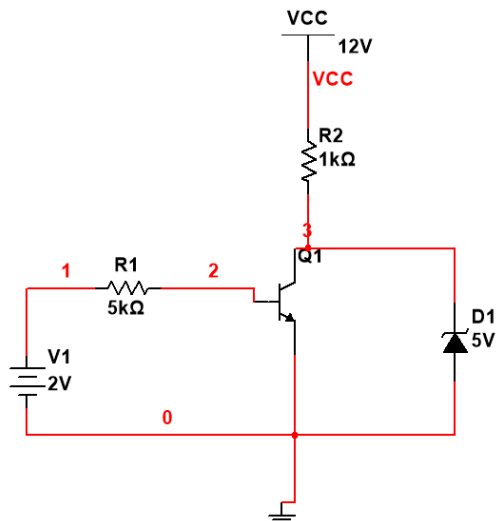


由图像可知，当 R_1 增大时， i_D 减小，这是由于二极管动态电阻 r_d 增大导致。

4. 仿真题 1-3

根据题目要求，设计电路如图24所示。

图 24: 仿真题 1-3 电路图



其中，为保证满足题目要求 (输入电压 u_I 为 0 到 1V 时，输出电压约为高电平 +5V，当 u_I 大于 2V 时输出电压约为低电平 0V)，相关元件的参数值需要进行估算。

该电路满足如下方程：

$$\begin{cases} I_B = \frac{U_I - U_{be}}{R_1} \\ I_C = \beta I_B \\ U_O = V_{CC} - R_2 I_C \end{cases} \quad (1)$$

根据限制条件：

- $U_I = 1V$ 时， $U_O > 5V$
- $U_I = 2V$ 时， $U_O < 0V$

可得：

$$\frac{7}{60} < \frac{R_2}{R_1} < \frac{6}{13}$$

取 $R_1 = 5k\Omega$ ， $R_2 = 1k\Omega$ ，利用参数扫描进行仿真，仿真结果如图25、26所示。由图可知， $u_I \leq 1V$ 时， $u_O \geq 4.9635V$ ， $u_I \geq 2V$ 时， $u_O \leq 0.1218V$ ，符合题目要求，设计合理。

图 25: 仿真结果 (1)

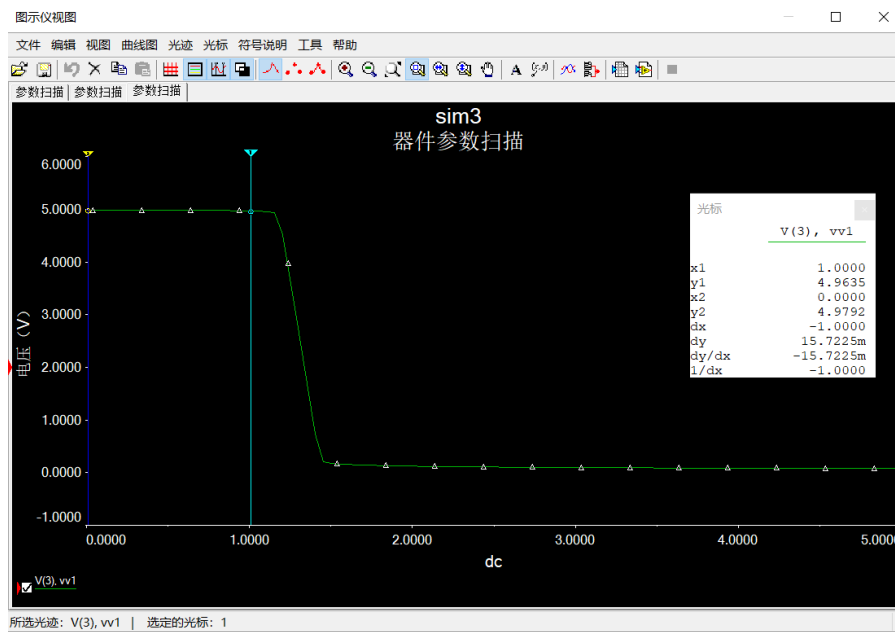
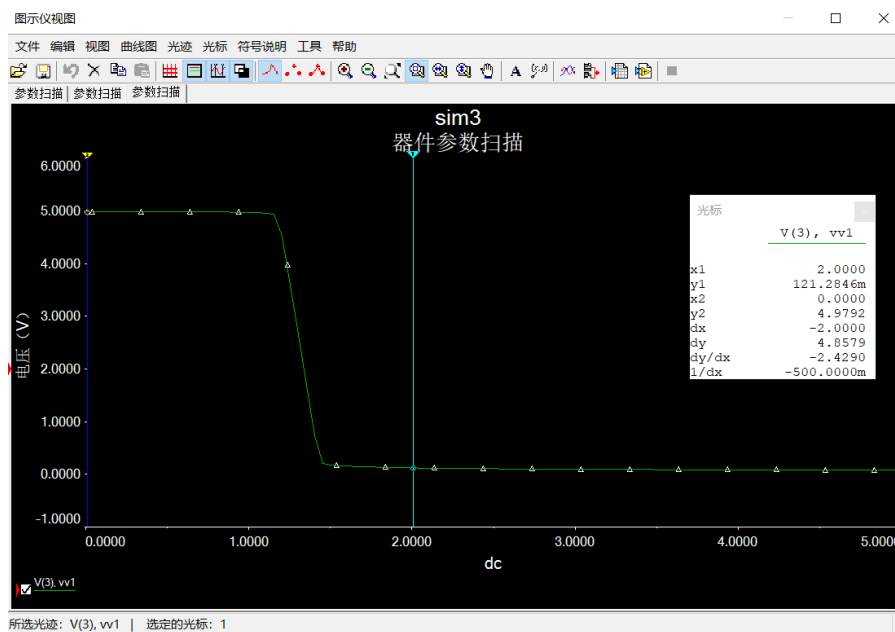


图 26: 仿真结果 (2)



5. 仿真中遇到的问题及解决方法

• Multisim 软件的使用

此次仿真原理相对较为简单，其主要目标在于了解电路的基本结构、掌握通过 Multisim 软件进行仿真的方法。因此，仿真过程中遇到的主要问题均有关于 Multisim 软件的使用，其他部分基本没有遇到问题。在仿真前，需要选取正确的元件，并对元件参数、仿真参数进行正确的设置。若元件参数设置不正确，可能使仿真结果不正确；若仿真参数设置不正确，可能造成仿真无法进行、仿真产生错误的结果甚至使软件直接退出。对参数扫描等功能，需要正确认识其原理，设置有关直流/交流、输入/输出变量的相关参数，才能产生正确的参数扫描结果。

• 实用电路的设计

设计电路与做题本身有较大的区别。在设计实际电路时，不仅要考虑电路结构，更要考虑电路元件之间的对应关系，此外，即便理论上电路元件参数无误，仍然需要通过仿真进行验证，以此检验电路的实际功能。在设计该电路时，我在理论计算的基础上选取了不同参数进行仿真，最终得到了正确的结果。

6. 收获与体会

- 通过实际仿真，我对二极管、晶体管、MOS 管的输入、输出特性曲线有了更深刻的认识。实践了反向击穿电压 U_{BR} 、晶体管 β 、二极管动态电阻 r_d 等重要参数，对跨导、Early Voltage 等平时涉及较少的概念有了更进一步的了解。
- 熟悉了 Multisim 软件的使用方法，掌握了包括 IV 分析仪、参数扫描等 Multisim 中的电路分析功能，对实际仿真在电路分析中的作用有了更多认识。
- 对实际电路设计方式与流程有了更新的认识。