

全国普通高等院校电子信息规划教材

模拟电子技术仿真 实验教程

李学明 主编

许燕萍 徐礼明 汪建春 李冬冬 副主编

清华大学出版社



九江学院图书馆



1565358

1623614

全国普通高等院校电子信息规划教材

模拟电子技术仿真 实验教程

李学明 主编

许燕萍 徐礼明 汪建春 李冬冬 副主编

不外借

TN710-33/7756

九江学院图书馆
藏书章

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是配合高等学校“模拟电子技术”课程而编写的仿真实验教材。书中以《模拟电子技术》的章节为顺序,介绍了各种仿真实验电路的搭建和仿真分析过程。全书有 200 多个仿真实验电路,需要者可登录清华大学出版社网站免费下载。

本书可以作为高等院校电气、电子、通信、计算机、自动化和机电等专业的教学辅导教材、实验教材及参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术仿真实验教程/李学明主编. --北京:清华大学出版社,2013.2

全国普通高等院校电子信息规划教材

ISBN 978-7-302-30538-5

I. ①模… II. ①李… III. ①模拟电路—电子技术—实验—高等学校—教材 IV. ①TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 257605 号

责任编辑:焦虹 顾冰

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:宋林



出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:18.25

字 数:419千字

版 次:2013年2月第1版

印 次:2013年2月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:32.00元

“模拟电子技术”是一门理论性和实践性都很强的课程。传统的教学是以理论教学、课程实验和课程设计等教学环节构成,但实际上往往是实验滞后于理论,甚至有的理论知识点没有配以实验。这就造成了理论与实验的脱节,影响了学生对理论知识的理解和掌握,有碍于创新思维的培养。

“实验是科学之母”,Multisim 仿真软件构建的“虚拟电子实验平台”解决了上述问题。虚拟实验的实现是在计算机上装上 Multisim 软件,形成既有普通仪器的基本功能,又有一般仪器所没有的特殊功能的实验环境。从使用上来说,虚拟实验利用计算机的强大功能,通过虚拟仪器面板,利用友好的图形界面进行实验设备的选择、控制和运行,完成对被测试量的采集、分析、判断、显示、存储和数据生成。Multisim 软件是一种界面友好、操作简便、易学易懂,容纳实验科目众多的一种新型虚拟实验软件。该软件可以完成电路分析、模拟电子技术、数字电子技术、高频电子技术和单片机等众多课程的仿真实验。该软件的操作空间是二维空间,在计算机上运行,比起 LabVIEW 等虚拟实验设备, Multisim 软件既不需要附加硬件支持,又不需要专业编辑。因此, Multisim 软件在电子技术仿真实验中更具有专业性、实用性和灵活性。

虚拟仿真实验不能完全代替实验室的硬件类实验,两者必须相辅相成,互相结合,既发挥虚拟实验高效、经济的长处,又培养学生的创新能力。

本书共分 12 章,第 1~3 章由许燕萍编写,第 4、5 章由徐礼明编写,第 6、7 章由汪建春编写,第 8~10 章由李冬冬编写,其余各章及附录由李学明编写并负责全部仿真实验的绘制和数据核对。在编写过程中作者参考了国内已经出版的有关 Multisim 仿真应用的相关书籍,借此机会向作者深表谢意。

全书所有的仿真实验实例可以在清华大学出版社网站上下载。

由于编著者水平有限,书中肯定存在不足和错误之处,恳请各位专家和读者批评指正。

编者

2012 年 7 月

第 1 章 半导体器件仿真实验	1
1.1 半导体二极管	1
1.1.1 二极管单向导电性仿真实验	1
1.1.2 二极管的伏安特性仿真实验	2
1.2 二极管的应用	5
1.2.1 二极管模型	5
1.2.2 二极管整流电路	6
1.2.3 限幅电路	11
1.2.4 开关电路	11
1.3 特殊二极管的应用	13
1.3.1 稳压二极管的应用	13
1.3.2 发光二极管的应用	15
1.3.3 光电耦合器	15
1.4 半导体三极管	16
1.4.1 三极管内部电流分配关系	16
1.4.2 三极管共射极输入特性测试	18
1.4.3 三极管的输出特性曲线	18
1.5 场效应晶体管	21
1.5.1 结型场效应管基本特性的测试	21
1.5.2 MOSFET 的基本特性测试	23
练习题	27
第 2 章 基本放大电路的仿真实验	29
2.1 放大电路的直流与交流工作状态	29
2.1.1 共发射极放大电路的静态工作点	29
2.1.2 基本共发射极放大电路的波形图	31
2.2 静态工作点的设置	35
2.2.1 静态工作点的正确设置	35
2.2.2 静态工作点的稳定	39
2.3 分压式负反馈电路	41
2.3.1 分压式负反馈电路的静态工作点	41
2.3.2 分压式负反馈放大电路性能指标的测试	43

2.3.3	三极管电流放大系数 β 和电压放大倍数的关系	49
2.4	共集电极和共基极放大电路	51
2.4.1	共集电极放大电路的参数测量	51
2.4.2	共基极放大电路	53
2.5	场效应管放大电路	55
2.5.1	结型场效应管自偏压放大电路	56
2.5.2	分压式自偏压电路	57
2.5.3	耗尽型绝缘栅场效应管分压式放大电路	57
2.5.4	增强型绝缘栅场效应管放大器	58
2.5.5	共漏极场效应管放大器	58
	练习题	59
第3章	放大电路频率特性的仿真实验	61
3.1	低通电路和高通电路	61
3.1.1	一阶 RC 低通电路	61
3.1.2	一阶 RC 高通电路	62
3.2	影响放大电路频率响应的因素	63
3.2.1	影响放大电路低频特性的因素	63
3.2.2	影响放大器高频特性的因素	65
3.3	多级放大器的频率响应	66
3.3.1	多级放大器的频率特性	66
3.3.2	放大器的非线性失真和线性失真	67
3.3.3	三极管参数的修改	69
	练习题	72
第4章	功率放大电路的仿真实验	73
4.1	甲类功率放大电路	73
4.1.1	甲类功率放大电路概述	73
4.1.2	射极输出器作功率放大	75
4.2	乙类功率放大电路	75
4.2.1	乙类单管射极输出功放电路	75
4.2.2	乙类双电源互补对称功率放大电路	77
4.3	甲乙类互补对称功放电路	78
4.3.1	甲乙类 OCL 功放电路	78
4.3.2	复合管 OCL 互补对称功放电路	78
4.3.3	甲乙类单电源互补对称功放电路	79
4.3.4	集成功率放大电路 TDA2030	81
	练习题	83

第 5 章 模拟集成电路基础	85
5.1 电流源电路	85
5.1.1 镜像电流源	85
5.1.2 比例电流源	85
5.1.3 微电流源	86
5.1.4 改进型电流源	86
5.1.5 威尔逊电流源	87
5.1.6 多路电流源	87
5.2 差分式放大电路	88
5.2.1 长尾式差分放大电路的静态工作点	88
5.2.2 差分放大器输入电压为零时的情况	88
5.2.3 差分放大器的差模特性	88
5.2.4 差分放大器的共模特性	89
5.2.5 典型差动放大电路	90
5.2.6 差模放大倍数的测量	91
5.2.7 共模电压放大倍数的测量($R_L = \infty$)	92
5.2.8 单端输入差动放大器	95
5.2.9 差动放大器的输入与输出电阻	96
练习题	98
第 6 章 负反馈放大电路	100
6.1 反馈的分类及判断	100
6.1.1 串联反馈和并联反馈	100
6.1.2 电流串联负反馈	101
6.1.3 电流并联负反馈	104
6.1.4 电压串联负反馈	106
6.1.5 电压并联负反馈	108
6.2 负反馈对放大器性能的影响	109
6.2.1 提高放大器增益的稳定性	109
6.2.2 负反馈对输入电阻的影响	110
6.2.3 负反馈对输出电阻的影响	111
6.2.4 负反馈能够扩展放大器的通频带	113
6.2.5 减小非线性失真	114
6.3 深度负反馈放大器的仿真测试	115
6.3.1 电流串联负反馈电路	115
6.3.2 电压串联负反馈电路	116
6.3.3 电压并联负反馈	117
6.3.4 电流并联负反馈	118

练习题	119
第7章 模拟信号运算电路	121
7.1 运算电路的三种输入方式	121
7.1.1 反相输入放大电路	121
7.1.2 同相输入比例运算电路	123
7.1.3 减法运算电路	125
7.1.4 加法运算电路	127
7.2 积分和微分电路	128
7.2.1 积分电路	128
7.2.2 微分电路	130
7.3 对数和指数电路	132
7.3.1 对数放大器电路	132
7.3.2 指数运算电路	133
7.4 模拟乘法器典型应用电路	134
7.4.1 乘法和平方运算电路	134
7.4.2 除法运算和开平方运算电路	134
7.4.3 正弦波倍频	135
7.5 集成运算放大器交流放大电路	135
7.5.1 反相交流放大器	135
7.5.2 同相交流放大器	137
练习题	139
第8章 信号处理电路	140
8.1 有源滤波器	140
8.1.1 一阶有源低通滤波器	140
8.1.2 二阶有源低通滤波器	142
8.1.3 二阶有源高通滤波器	143
8.1.4 有源带通滤波电路	143
8.1.5 双T带阻滤波器	146
8.1.6 三阶和四阶低通滤波器	146
8.2 运算放大器的非线性应用	148
8.3 信号变换电路	157
8.3.1 电压-电流转换电路	157
8.3.2 电流-电压转换电路	158
8.3.3 电压-频率转换电路	159
8.3.4 精密整流电路	159

8.4 运算放大器与受控源	162
8.4.1 受控源	162
8.4.2 用运算放大器构成的受控电源	164
练习题	165
第 9 章 波形发生器电路	167
9.1 RC 正弦波振荡电路	167
9.1.1 RC 串并联网络的选频特性	167
9.1.2 文氏电桥振荡电路	168
9.1.3 RC 双 T 正弦波振荡电路	169
9.1.4 RC 移相式正弦波振荡器	169
9.2 LC 正弦波振荡器	170
9.2.1 变压器反馈式振荡电路	170
9.2.2 电感三点式振荡器	172
9.2.3 电容三点式振荡器	173
9.2.4 克拉泼振荡器	173
9.2.5 西勒振荡器	174
9.3 非正弦波振荡器	175
9.3.1 方波产生电路	175
9.3.2 三角波发生器	176
9.3.3 占空比可调的方波、锯齿波发生器	177
练习题	178
第 10 章 直流电源	180
10.1 单相整流滤波电路	180
10.1.1 单相整流滤波电路	180
10.1.2 变压器带中心抽头的单相全波整流滤波电路	182
10.1.3 桥式整流电路	183
10.1.4 倍压整流电路	185
10.2 并联和串联型直流稳压电源	185
10.2.1 硅稳压二极管并联稳压电源	185
10.2.2 串联型稳压电源	186
10.3 线性集成稳压器	187
10.3.1 三端固定输出集成稳压器	187
10.3.2 三端可调式集成稳压器	189
10.3.3 扩大输出电流的稳压电路	189
练习题	191

第 11 章 常用仿真分析法	192
11.1 仿真分析步骤	192
11.1.1 创建电路原理图,设置显示节点编号	192
11.1.2 选择分析类型	192
11.1.3 仿真分析参数设置	193
11.1.4 分析结果显示	194
11.2 直流工作点分析	195
11.3 交流分析	197
11.4 瞬态分析	199
11.5 傅里叶分析	202
11.6 传递函数分析	207
11.7 直流扫描分析	208
11.8 参数扫描分析	213
11.9 温度扫描分析	217
练习题	220
第 12 章 Multisim 10 虚拟仪器的使用	222
12.1 数字万用表	222
12.1.1 连接	222
12.1.2 面板操作	223
12.1.3 操作实例	223
12.2 函数信号发生器	224
12.2.1 连接	224
12.2.2 面板操作	225
12.3 双通道示波器	227
12.3.1 连接	227
12.3.2 面板操作	228
12.3.3 双踪示波器的使用	229
12.4 四通道示波器	230
12.4.1 连接	230
12.4.2 面板操作	231
12.5 功率表	232
12.5.1 连接	232
12.5.2 面板操作	232
12.6 IV 分析仪	233
12.6.1 连接	233
12.6.2 面板操作	233

12.7	电流探针	237
12.7.1	连接	237
12.7.2	电流探针的操作	238
12.8	测量探针	239
12.8.1	连接	239
12.8.2	测量探针的设置	240
12.9	电压表和电流表	243
12.9.1	电压表的连接	243
12.9.2	电压表面板操作	243
12.9.3	电流表的连接	243
12.9.4	电流表面板操作	243
12.10	失真分析仪	244
12.10.1	连接	244
12.10.2	面板操作	245
12.11	波特图示仪	246
12.11.1	连接	246
12.11.2	面板操作	247
12.12	频率计	249
12.12.1	连接	249
12.12.2	面板操作	249
	练习题	250
附录 A Multisim 10 的基本操作		252
A.1	NI Multisim 10 的用户界面及设置	252
A.1.1	NI Multisim 10 的启动	252
A.1.2	NI Multisim 10 基本界面简介	252
A.1.3	NI Multisim 10 基本界面的定制	254
A.2	Multisim 10 元器件库及其元器件	263
A.2.1	Multisim 10 的元器件库	263
A.2.2	元器件的查找	273
A.2.3	使用虚拟元器件	275
参考文献		278

半导体器件仿真实验

1.1 半导体二极管

二极管的类型很多,根据用途划分为整流二极管、开关二极管、稳压二极管、发光二极管、肖特基二极管、双向二极管、变容二极管、PIN 型二极管等。所有的二极管都具有单向导电性。

1.1.1 二极管单向导电性仿真实验

在图 1-1 中,整流二极管 1N4007 和额定电压为 12V 的灯泡接成串联,电流表用来观察电路中有无电流及电流的大小。当开关 J_1 和电源 V_1 接通时,二极管被加正向电压,灯泡点亮,电流表中显示电流为 0.77A。如果将开关切换到 V_2 上,二极管被加反向电压,灯泡没有点亮,电流表中电流为 0。

电路中电源电压为 12V,灯泡两端实际电压等于或低于它的额定工作电压。通过实验,我们有了一个感性认识:当二极管被加正向电压时,电流从二极管的正极流进、从负极流出;当二极管被加反向电压时,二极管中没有电流流过。这就是二极管的单向导电特性。要想进一步了解二极管的单向导电性,必须作进一步的实验。

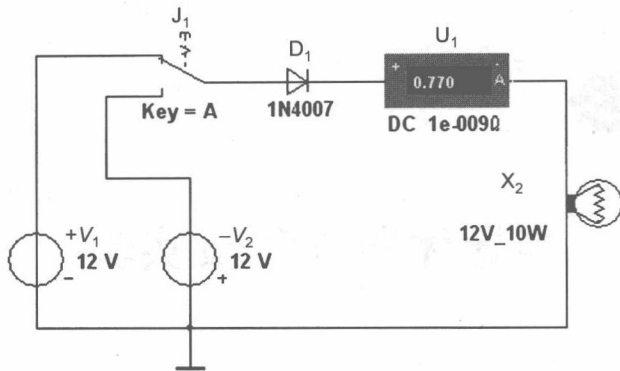


图 1-1 二极管单向导电性实验

1.1.2 二极管的伏安特性仿真实验

1. 二极管伏安特性的常规测试法

用来测量二极管 1N4001 正向伏安特性的电路如图 1-2 所示,通过改变电位器 R_{p1} 的阻值来改变二极管电路的输入电压,电压表 U_3 是用来观察输入电压变化的。 U_2 用来测量二极管两端的正向电压降, U_1 用来测量流过二极管的正向电流。仿真实验开始后,将输入电压由 0V 开始逐渐增大(为了使输入电压慢慢变化,将可变电阻阻值增量设置为 1%),当正向电压在 0~0.5V 之间时,二极管中基本上无电流流过,即处于截止状态。当二极管两端正向电压超过 0.5V 后,二极管中开始有毫安级的电流流过,当二极管两端正向电压超过 0.6V 后,二极管中的电流迅速增加。接着继续增大电路的输入电压,电流由十几毫安迅速上升到上百毫安,但是二极管两端的电压基本上维持在 0.7V 左右,变化很小。如果把二极管两端的正向电压和流过它的电流的数值一一记录下来,在平面坐标系(横坐标表示电压,纵坐标表示电流)上用描点法就会得到一条二极管的正向伏安特性曲线。

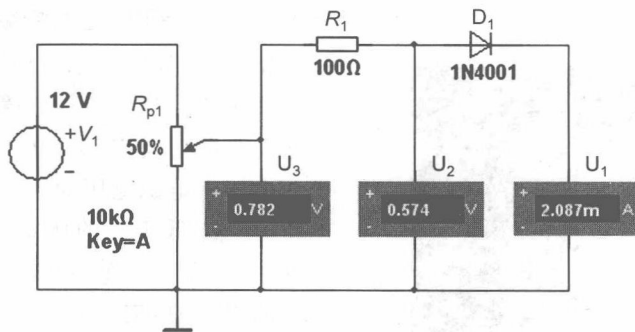


图 1-2 描点法测量二极管的正向伏安特性

用来测量二极管 1N4001 反向伏安特性的电路如图 1-3 所示。当反向电压由 0V 逐渐增大到 50V 时,二极管中一直没有电流流过,即处于反向截止状态。当反向电压增大

到 53V 时, 出现反向电流, 超过 53V 后, 反向电流迅速增加, 即发生反向击穿。从 Multisim 软件中可以查出 1N4001 的反向击穿电压是 53V。对于普通二极管, 一旦反向击穿就意味着它损坏了。用描点法同样可以画出二极管的反向伏安特性曲线, 显然描点法既费时又费力。

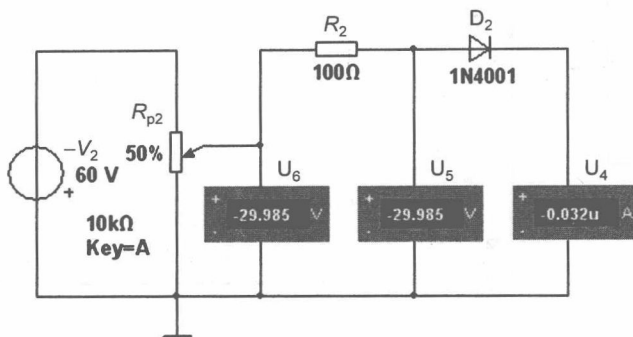
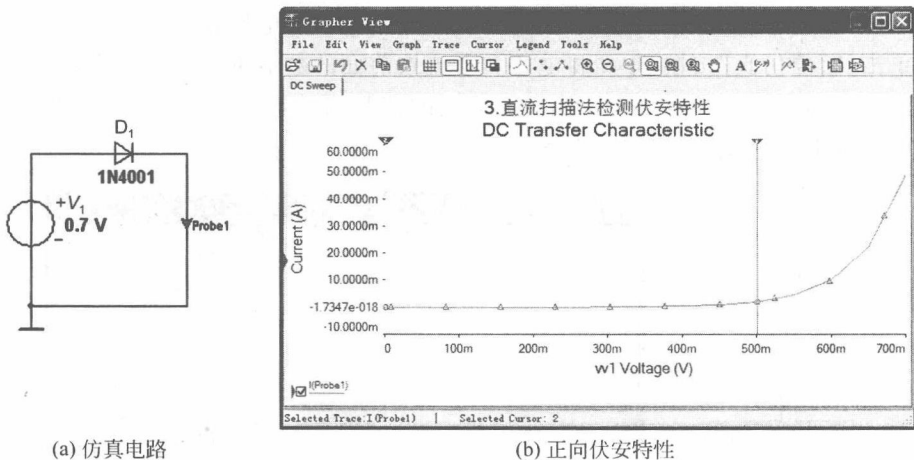


图 1-3 描点法测量二极管的反向伏安特性

2. 用直流扫描分析法测试二极管的伏安特性

1N4001 的正向伏安特性仿真电路如图 1-4(a) 所示, 在电路中放置测量探针, 探针指示电流方向, 采用“直流扫描分析”法, 取直流电源 V_1 作为 Source 1, Source 1 中的 Start value 取 0V, Stop value 取 0.7V。选择 I(probe1) 为输出变量, 分析结果如图 1-4(b) 所示, 它表明流过二极管的正向电流和二极管两端所加的正向电压是非线性关系。

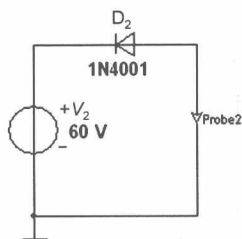


(a) 仿真电路

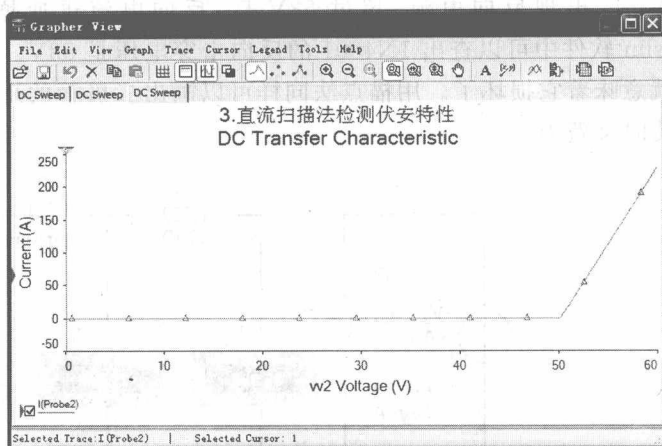
(b) 正向伏安特性

图 1-4 直流扫描法测试正向特性

测量 1N4001 反向伏安特性的仿真电路如图 1-5(a) 所示, 采用“直流扫描分析”法时, 取直流电源 V_2 作为 Source 1, Source 1 中的 Start value 取 0V, Stop Value 取 60V (应略高于 1N4001 的反向击穿电压值), 同样选择 I(probe2) 为输出, 结果得到如图 1-5(b) 所示的反向特性曲线。从图中看出, 当加在二极管两端的反向电压低于 53V 时, 1N4001 的反向电流很小, 处于截止状态; 当反向电压等于 53V 时, 反向电流急剧变大, 1N4001 反向击穿。



(a) 仿真电路

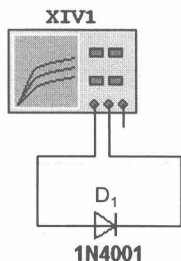


(b) 反向伏安特性

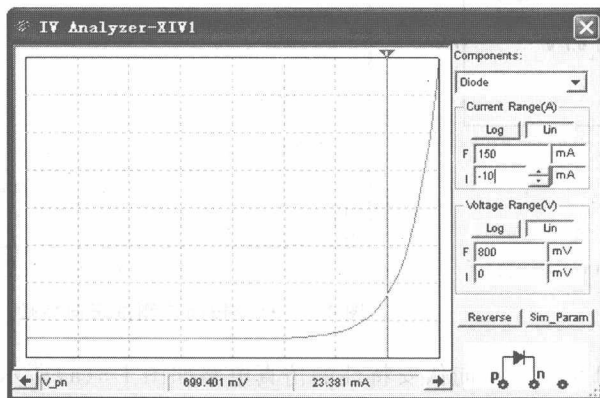
图 1-5 直流扫描法测试反向特性

3. 用伏安特性分析仪测二极管的伏安特性

图 1-6(a)中把 1N4001 和伏安特性分析仪图标上的接线柱相连,双击图标打开仪器面板,在面板右上部 Components(元件)下拉列表中,选择 DIODE 为测试对象。接着设置电流的显示模式为 Lin(线性)和显示范围,设置电流的初始值为 -10mA,终止值为 200mA。接着设置电压的显示模式和显示范围,模式为 Lin(线性),电压的初始值为 0mV,终止值为 900mV。注意不要使用 Sim_Param 按钮。打开仿真开关,这时分析仪的屏幕上立即出现正向伏安特性曲线。与之同时,刚刚设置的电压和电流的数值也会变化。这时请单击“暂停仿真”按钮,重新将电压和电流按前面的数值重新输入一遍,与此同时分析仪屏幕上的曲线随之稳定下来。拖动屏幕上的读数指针,二极管的死区电压值和导通电压值在屏幕下方都显示出来了,如图 1-6(b)所示。



(a) 测试电路



(b) 测试结果

图 1-6 用伏安特性分析仪测试正向特性

因为虚拟的伏安特性分析仪不能提供高电压,需要把稳压二极管 1N4735A 和伏安特

性分析仪反向连接,相关设置如图 1-7(a)所示。仿真分析后得到 1N4735A 的反向特性曲线。从中可以看出当反向电压增加到 6.2V 时,稳压二极管反向击穿,如图 1-7(b)所示。不过对于稳压二极管而言,只要反向电流不超过规定的最大值,就能保证稳压管不因过热而烧坏。同样,从 Multisim 10 软件的稳压二极管库中可以查出 1N4735A 的稳压值为 6.2V。

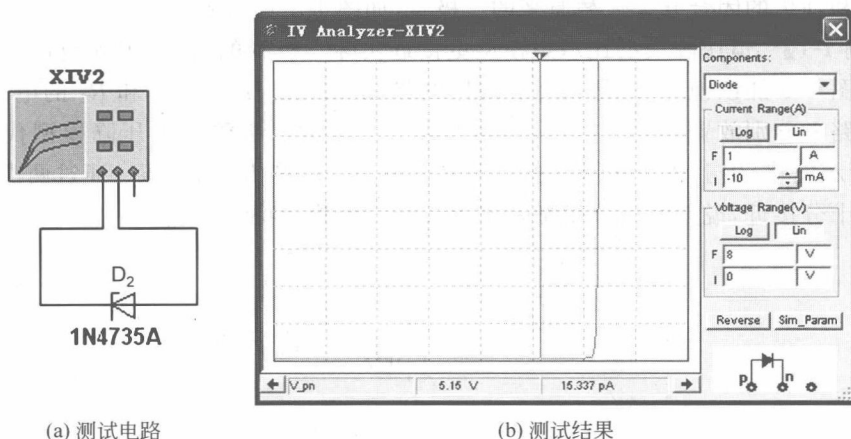


图 1-7 用伏安特性分析仪测试反向特性

1.2 二极管的应用

1.2.1 二极管模型

二极管是非线性器件,这给二极管应用电路的分析和设计带来困难。为了方便分析和计算,在一定条件下,可用线性元件(如电阻、电压源)所构成的电路来模拟二极管的特性,并用它来代替电路中的二极管。这种能够模拟二极管特性的电路称为二极管模型。

(1) 理想模型:当电源电压远大于二极管的管压降时,二极管在电路中的作用相当于理想开关:二极管正向导通时,管压降为 0,开关两个触点之间电阻为 0;二极管反向截止时,流过它的电流为 0,开关两个触点之间电阻为无穷大,如图 1-8(b)所示。

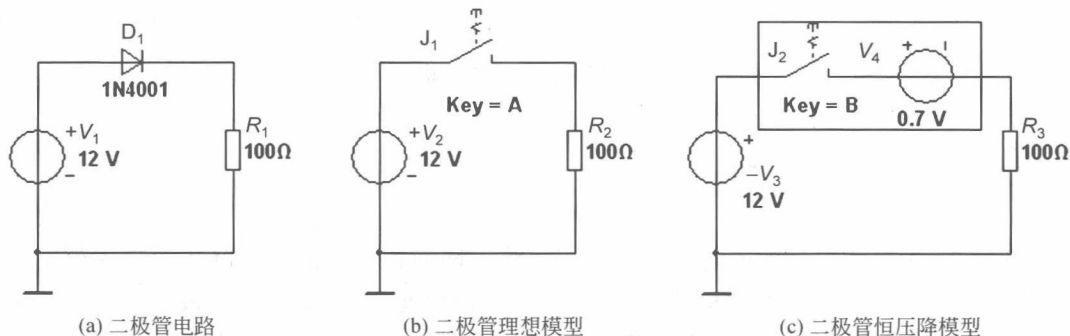


图 1-8 二极管的模型

从图中可知,只有当电源电压远大于二极管的管压降条件下,可采用理想二极管模型,略去管压降后进行直流电路的计算,所得到的结果与实际值误差不大。

(2) 恒压降模型:当电源电压与二极管管压降相比,相差不是很大时,不能采用理想模型。当二极管处于完全导通时,它的管压降可以近似看作恒定不变,基本不随正向电流的变化而变化(通常硅管的管压降取 0.7V,锗管取 0.3V)。这时硅管可以用一个 0.7V 的恒压源和理想的闭合开关代替原来的二极管,如图 1-8(c)所示。

【案例 1-1】 恒压降模型比理想模型更接近实际二极管的特性,因此应用比较广泛。下面通过图 1-9 加以说明,这是一个非线性电路,试求电流 I_1 、 I_2 、 I_3 和 R_2 的电压。首先在 3 条支路上分别放置“测量探针”,接着把图 1-9 中的二极管用恒压降模型代替,得到图 1-10 所示电路,用上述同样的分析方法求出 I_1 、 I_2 、 I_3 和 R_2 的电压。通过两次仿真,得出的结果十分接近,说明恒压降模型更接近实际二极管的特性。

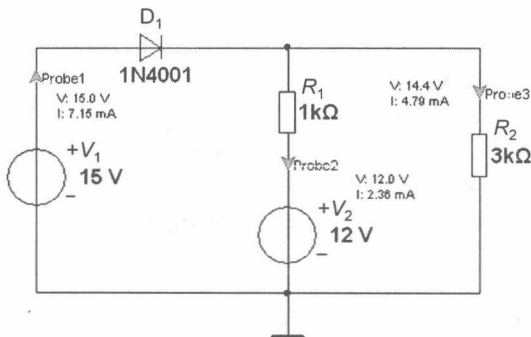


图 1-9 二极管电路

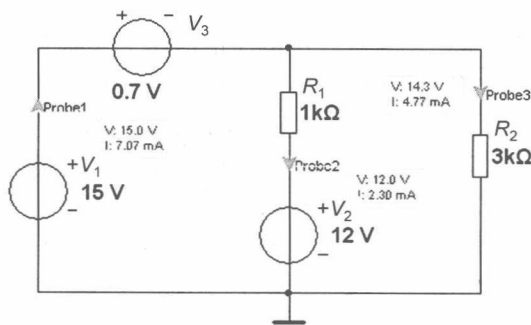


图 1-10 代换后的电路

1.2.2 二极管整流电路

1. 半波整流电路

图 1-11 为单相半波整流电路,变压器 T_1 将电网的正弦交流电压降压后输入到整流电路。在交流电的正半周,二极管 D_1 因正向偏置而导通,有电流流过二极管和负载。由于实际二极管的电压降为 0.7V,所以从示波器的读数中可以看出,输出电压的最大值和