

免费提供

精品教学资料包

服务热线: 400-615-1233

www.huatengzy.com

模拟电子技术基础

MONI DIANZI JISHU JICHU

模拟电子技术基础

高等职业教育电子信息系列精品教材

高等职业教育电子信息系列精品教材

“互联网+”立体化教材

模拟电子技术基础

MONI DIANZI JISHU JICHU

主编 刘国巍

主审 周莉

“互联网+”理念融入教材

二维码链接丰富的教学资源

微视频随时随地观看学习



定价: 49.80元

责任编辑: 耿筠

特约编辑: 李斐然

装帧设计: 刘文东

国防科技大学出版社

国防科技大学出版社

高等职业教育电子信息系列精品教材
“互联网+”立体化教材

模拟电子技术基础

刘国巍 主 编
郭来功 周月娥 刘林芝 副主编
周 莉 主 审

国防科技大学出版社

【内容简介】模拟电子技术是电子信息类专业的主干课程。本教材共分八章,主要内容包括常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大电路、放大电路中的负反馈、集成放大器的应用、功率放大线路、波形产生电路及直流电源等。

本教材是为了适应我国高职高专教育发展的要求而编写的,其突出特点是理论够用,应用为主,注重实践,叙述简单明了,概念清晰,便于学生自学和教师施教。

本书可作为高职高专院校电子信息类及其相关专业的模拟电子技术课程的教材,也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/刘国巍主编. —长沙:国防科技大学出版社,2008.6(2024.3重印)

ISBN 978-7-81099-507-8

I. 模… II. 刘… III. 模拟电路—电子技术 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第062457号

出版发行:国防科技大学出版社

责任编辑:耿 筠

印刷者:三河市骏杰印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:16.25

字 数:383千字

印 次:2024年3月第1版第11次印刷

定 价:49.80元

前 言

当代电子技术的发展日新月异，电子技术的教学也发生了较大变化，为了适应 21 世纪高职高专应用型人才的培养，我们参照教育部制定的《高等学校工程专科电子技术课程教学基本要求》，并针对模拟电子技术课程学习的特点，编写了这本教材。本书对模拟电子技术的基本概念和基本分析方法作了统一的阐述，争取在保证掌握必要的基本理论知识和基本技能的基础上，贯彻高职教学“以应用为目的，以必需、够用为度，掌握概念，强化应用”的原则，培养学生实际应用能力。本书在编写时注意突出了以下几点：

1. 针对初学者普遍感到模拟电子技术课程较难入门的特点，在叙述上主要利用文字、图表来说明问题，尽量避免大量的理论分析和繁琐的数学公式推导，力求浅显易懂，使学生易于理解掌握。对一些重要的性能指标和特性也侧重于其内在涵义，学会对已有结论的理解和应用。

2. 注重实用性，增加了二极管、三极管等器件的识别、测试及在实际应用中的注意事项等常识性知识，还加入了实际工程中用到的估算和检测方法、如何选用器件等经验技巧，以便于学生学习借鉴，提高操作技能。

3. 内容结构上循序渐进，注意对基本电路的分析和应用，并对相应的知识点通过大量例题或应用电路进行支撑，在有足够基本知识的铺垫下，分析介绍集成运算放大器在模拟信号的处理、转换和产生等方面的应用。最后对直流稳压电源也作了较为详细的介绍，力图使学生从整体的角度来学习模拟电子技术的知识，能够学会在实际应用中正确选择合适的电路，为今后本专业的学习和走上工作岗位奠定基础。

4. 侧重集成电路的应用，渗透新知识、新技术。对集成运算放大器、三端集成稳压器等，淡化其内部电路结构的分析，注重从功能上掌握器件的合理选择和正确使用。对开关电源等较新技术也做了适当的介绍，以拓展学生的知识面。

5. 在每章结束设有本章小结对重要的知识点进行归纳比较，并配有适量有针对性的习题便于巩固所学知识。为加强实践环节，结合各部分理论知识，编排有相应的实验放在网络上供选用，并且在内容上尽量淡化教学设备对实验的影响，注重对学生实际动手能力的培养。

本书由刘国巍任主编，郭来功、周月娥、刘林芝任副主编。第 1 章由李昕编写，第 2 章由周月娥编写，第 3 章由刘林芝编写，第 4 章由郭来功编写，第 5 章由蔡爽编写，第 6 章由赵苍荣编写，第 7 章由钟楚杨编写，第 8 章由刘国巍编写，由刘国巍对全书进行了统稿。曹成、刘玉良、李华龙、张志等人参与了电路的绘制，在此对他们的辛勤劳动表示衷心感谢！

电子技术发展迅速，限于编者的教学经验和学术水平有限，且时间比较仓促，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

本书常用符号表

A			
A_f	闭环放大倍数		
A_i	电流放大倍数		
A_u	电压放大倍数		
A_{UC}	共模电压放大倍数		
A_{UD}	差模电压放大倍数		
A_{UH}	高频电压放大倍数		
A_{UL}	低频电压放大倍数		
A_{UO}	开环放大倍数		
u_{ic}	共模输入电压	V	伏特
B			
BW	带宽	Hz	赫兹
BW_p	全功率带宽	dB	分贝
C			
C	电容	F	法拉
D			
D	二极管		
E			
F			
F	反馈系数		
f_H	放大器的上限频率	Hz	赫兹
f_L	放大器的下限频率	Hz	赫兹
f_M	最高工作频率	Hz	赫兹
G			
g_m	场效应管的低频互导	S	西门子
I			
I	电流	A	安培
I_B	基极电流	A	安培
I_{BN}	基极复合电流	A	安培
I_C	集电极电流	A	安培
I_{CBO}	基极-集电极反向饱和电流	A	安培
I_{CEO}	集电极-发射极反向饱和电流	A	安培
I_{CM}	集电极最大允许电流	A	安培
I_D	二极管的电流	A	安培

I_{DM}	场效应管最大漏极电流	A	安培
I_{DSS}	场效应管漏极饱和电流	A	安培
I_E	发射极电流	A	安培
I_{EN}	发射结扩散电流	A	安培
I_{EP}	空穴电流	A	安培
I_{FM}	最大整流电流	A	安培
I_R	反向饱和电流	A	安培
I_{RM}	反向峰值电流	A	安培
I_Z	稳压管工作在稳定电压下的稳定电流	A	安培
I_{Zmax}	最大稳定电流	A	安培
I_{Zmin}	最小稳定电流	A	安培
i_D	场效应管的漏极电流	A	安培
		K	
K_{CMR}	共模抑制比	dB	分贝
		L	
L	电感	H	亨利
		M	
M	互感	H	赫兹
		P	
P_c	静态功耗	W	瓦特
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率	W	瓦特
P_{DM}	场效应管最大耗散功率	W	瓦特
P_T	管耗	W	瓦特
P_{ZM}	最大允许耗散功率	W	瓦特
		R	
R	电阻	Ω	欧姆
R_b	晶体三极管的基极电阻	Ω	欧姆
R_c	晶体三极管的集电极电阻	Ω	欧姆
R_d	场效应管的漏极电阻	Ω	欧姆
R_e	晶体三极管的发射极电阻	Ω	欧姆
R_f	反馈电阻	Ω	欧姆
R_g	场效应管的栅极电阻	Ω	欧姆
R_i	放大电路的输入电阻	Ω	欧姆
R_{if}	负反馈放大电路的输入电阻	Ω	欧姆
R_L	负载电阻	Ω	欧姆
R_o	放大电路的输出电阻	Ω	欧姆
R_{of}	负反馈放大电路的输出电阻	Ω	欧姆
R_S	信号源内阻	Ω	欧姆
R_s	场效应管的源极电阻	Ω	欧姆
r_{be}	晶体三极管的输入电阻	Ω	欧姆

r_{ce}	晶体三极管的输出电阻	Ω	欧姆
r_{id}	差模输入电阻	Ω	欧姆
r_z	稳压管工作在稳定电压下的动态电阻	Ω	欧姆

S

S_i	负载调整特性		
S_R	纹波抑制比	dB	分贝
S_r	稳压系数		

T

Tr 变压器

U

U	电压	V	伏特
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时集电极-基极之间的击穿电压	V	伏特
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时集电极-发射极之间的击穿电压	V	伏特
$U_{(BR)DS}$	场效应管最大漏源电压	V	伏特
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时发射极-基极之间的击穿电压	V	伏特
U_{CC}	集电极回路电源	V	伏特
U_{DD}	场效应管漏极回路电源	V	伏特
U_{EE}	发射极回路电源	V	伏特
U_{ICmax}	最大共模输入电压	V	伏特
U_{IDmax}	最大差模输入电压	V	伏特
U_p	耗尽型场效应管的夹断电压	V	伏特
U_{RM}	反向工作峰值电压	V	伏特
U_T	场效应管的开启电压	V	伏特
U_{T+}	上门限电压	V	伏特
U_{T-}	下门限电压	V	伏特
U_Z	稳压管的稳定工作电压	V	伏特
u_{id}	差模输入电压	V	伏特
u_{oc}	共模输出电压	V	伏特
u_{od}	差模输出电压	V	伏特

X

\dot{X}_f	反馈信号
\dot{X}_i	输入信号
\dot{X}_{id}	净输入信号
\dot{X}_o	输出信号

其他

σ	电导率	S/m	西门子/米
ρ	电阻率	$\Omega \cdot m$	欧姆·米
α	晶体管共基极电流放大系数		
β	晶体管共射交流电流放大系数		

$\bar{\beta}$	晶体管共射直流电流放大系数		
ΔT	回差电压	V	伏特
τ	时间常数	s	秒
η	效率		

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 半导体特性	1
1.1.2 本征半导体和杂质半导体	1
1.1.3 PN 结及其特性	4
1.2 半导体二极管	6
1.2.1 二极管结构及其特性	6
1.2.2 二极管的主要参数	8
1.2.3 二极管电路及其应用	9
1.2.4 特殊二极管	11
1.2.5 二极管的检测及判断	13
1.3 半导体三极管	15
1.3.1 三极管的结构及分类	15
1.3.2 三极管的放大作用	16
1.3.3 三极管特性曲线	18
1.3.4 三极管的主要参数	19
1.3.5 三极管的检测及判断	20
1.4 场效应三极管	22
1.4.1 场效应管分类和基本结构	22
1.4.2 场效应管工作原理	24
1.4.3 场效应管的主要参数及性能比较	28
本章小结	29
习题 1	30
第 2 章 基本放大电路	33
2.1 基本共射极放大电路	33
2.1.1 放大电路的概念	33
2.1.2 基本共射极放大电路	35
2.2 放大电路的基本分析方法	37
2.2.1 直流通路与交流通路	37
2.2.2 放大电路的等效电路及其分析	39
2.2.3 图解法	43

2.3	静态工作点的稳定	46
2.3.1	温度对工作点的影响	46
2.3.2	射极偏置电路	46
2.4	射极输出器	49
2.5	共基极放大电路	51
2.6	场效应管放大电路	53
2.6.1	共源极放大电路	53
2.6.2	共漏极放大电路	58
2.7	放大电路的频率特性	60
2.7.1	RC 电路的频率特性	60
2.7.2	单级放大电路的低频特性	63
2.7.3	单级放大电路的高频特性	65
2.8	各种放大器件电路性能比较	66
	本章小结	67
	习题 2	69
第 3 章	集成电路运算放大器	73
3.1	模拟集成电路概述	73
3.1.1	模拟集成电路特点	73
3.1.2	集成运放中的电流源	74
3.2	多级放大电路	75
3.2.1	级间耦合方式	76
3.2.2	多级放大电路的基本性能指标分析	78
3.3	差分放大电路	80
3.3.1	差分放大电路的基本概念	80
3.3.2	基本差分式放大电路	81
3.3.3	其他接法的差分放大电路	87
3.4	集成运算放大器及其主要参数	88
3.4.1	简单的集成电路运算放大器	88
3.4.2	CMOS 型集成运放放大器简介	89
3.4.3	集成运放的主要参数	90
3.5	专用集成运放及使用	93
3.5.1	专用集成运放简介	93
3.5.2	集成运放的选择及使用	94
	本章小结	95
	习题 3	96
第 4 章	放大电路中的负反馈	100
4.1	反馈的基本概念和负反馈的分类	100

4.1.1	反馈的基本概念	100
4.1.2	负反馈放大电路的四种组态	103
4.1.3	负反馈的一般表达式	107
4.2	负反馈对放大电路性能的影响	109
4.2.1	提高放大倍数的稳定性	110
4.2.2	减小非线性失真	110
4.2.3	展宽通频带	111
4.2.4	对输入电阻和输出电阻的影响	111
4.3	深度负反馈条件下放大倍数的计算	113
4.4	负反馈放大电路的自激振荡	116
4.4.1	产生自激振荡的原因和条件	116
4.4.2	消除自激振荡的方法	117
	本章小结	118
	习题 4	120
第 5 章	集成运算放大器的应用	123
5.1	基本运算电路	123
5.1.1	比例运算电路	124
5.1.2	加法运算	124
5.1.3	减法电路	125
5.1.4	积分和微分电路	127
5.1.5	模拟乘法器及应用	129
5.1.6	集成运放的实际应用	131
5.2	集成运放的非线性应用	133
5.2.1	比较器	133
5.2.2	非正弦波发生器	136
5.3	有源滤波器	139
5.3.1	滤波器的概念及分类	139
5.3.2	一阶有源滤波器	140
	本章小结	143
	习题 5	145
第 6 章	功率放大电路	150
6.1	功率放大电路的特点	150
6.2	互补对称功率放大电路	152
6.2.1	OCL 互补对称功率放大电路	153
6.2.2	OTL 互补对称功率放大电路	157
6.3	集成功率放大器	159
6.4	功率放大电路中的问题	161

本章小结	162
习题 6	163
第 7 章 波形产生电路	167
7.1 正弦波振荡电路的振荡条件	167
7.2 RC 正弦波振荡电路	169
7.2.1 RC 串并联的选频特性	169
7.2.2 RC 桥式振荡电路	171
7.3 LC 正弦波振荡电路	174
7.3.1 LC 并联回路的选频特性	174
7.3.2 变压器反馈式 LC 振荡电路	176
7.3.3 三点式 LC 振荡电路	177
7.4 石英晶体振荡电路	181
本章小结	184
习题 7	185
第 8 章 直流稳压电源	190
8.1 单相整流电路	190
8.1.1 单相半波整流电路	190
8.1.2 单相全波整流电路	192
8.1.3 单相桥式整流电路	194
8.2 滤波电路	196
8.2.1 电容滤波电路	196
8.2.2 电感滤波电路	199
8.2.3 其他滤波电路	199
8.3 稳压电路	201
8.3.1 稳压电路的主要技术指标	201
8.3.2 稳压管稳压电路	202
8.3.3 串联反馈式稳压电路	204
8.3.4 三端集成稳压器及其应用	207
8.4 开关稳压电源	212
8.4.1 开关稳压电源的发展及其特点	212
8.4.2 开关稳压电源的分类	213
8.4.3 开关集成稳压器及其应用	215
8.5 稳压电源的检测	216
本章小结	217
习题 8	220

部分习题答案	223
附 录	226
附录 A Multisim 简介	226
附录 B-1 国外主要公司生产的半导体集成电路型号识别	227
附录 B-2 电阻标注方法及标称阻值.....	233
附录 C 模拟电子技术基础常用专业词语中英文对照表	237
附录 D 总复习题	240
参考文献	246

第 1 章 半导体器件

虽然半导体的发现和应用的时间很短,却已经给我们的科学、文化和生活带来了深远的影响。作为模拟电子技术的核心,半导体器件的发展和模拟电子技术的发展紧密相连。电子器件从第一代真空管到第二代半导体器件的演变,使模拟电子技术经历了一个发展的里程碑,而随着半导体器件的大规模集成应用,模拟电子技术又获得了飞速发展。因此,了解半导体器件的构造,掌握它们的工作原理、特性、参数和正确的使用方法,对学习模拟电子技术尤为重要,也为后续分析讨论模拟电子线路奠定了知识基础。

1.1 半导体基础知识

自然界的各种物质,按导电能力可划分为导体、绝缘体和半导体三类。金属如银、铜、铝等都是良好的导体,由于其内部存在可自由移动的带电粒子而导电。绝缘体如塑料、橡胶、陶瓷等物体,由于其内部几乎没有带电粒子,即使外加很高的电压也无电流通过。而导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,如硅、锗、硫化镉等就称为半导体。在半导体器件中,用得最多的材料是硅(Si)和锗(Ge),它们都是四价元素。

1.1.1 半导体特性

一般来说,半导体导电能力并不强,但半导体所特有的性质使得它们在不同条件下导电能力有很大差别。

1. 热敏性

当导体的温度升高时,它的导电性能就会随着温度的升高而增强,这种特性就称为热敏性。利用半导体的热敏性可制成热敏元件,如热敏电阻。

2. 光敏性

当半导体受到光的照射时,电子和空穴就会增多,导电性能也会随光照的增强而增强,这种特性称为光敏性。利用半导体的光敏性可制成光敏元件,如光敏电阻、光敏二极管等。

3. 掺杂性

当有目的往纯净的半导体中掺入微量五价或三价元素时,其导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。例如,在纯硅中掺入百万分之一的硼后,硅的电阻率就从大约 $2000\Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $0.0004\Omega \cdot \text{m}$ 左右。这种特性称为掺杂特性,利用掺杂半导体可以制成晶体二极管、晶体三极管、场效应管等半导体器件。

1.1.2 本征半导体和杂质半导体

1. 本征半导体

将锗、硅等半导体材料提纯后形成的完全纯净、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。半导体与导体和绝缘体截然不同的导电特性正是由它的内部结构和导电机理所决定

的,下面我们来看看本征半导体的内部结构。

锗和硅都是四价元素,在其最外层原子轨道上有四个电子,称为价电子。如图 1.1(a)所示为简化原子模型,由于原子呈中性,在图 1.1(a)中原子核用带圆圈的+4 符号表示。在本征半导体的晶体结构中,每一个原子与相邻的四个原子结合,每一个原子的一个价电子与另一个原子的一个价电子组成一个电子对,这对价电子是每两个相邻原子共有的,它们把相邻的原子结合在一起,构成共价键结构,如图 1.1(b)所示。图中表示的是晶体的二维结构,实际上半导体晶体结构是三维的。

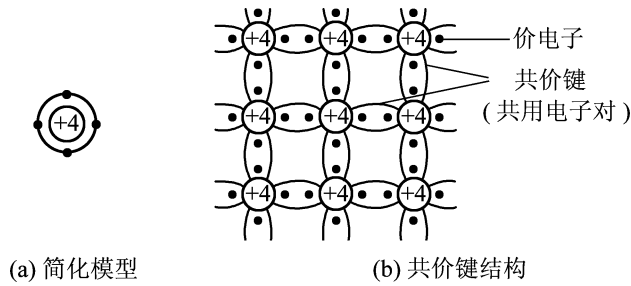


图 1.1 硅和锗的原子结构简化模型及共价键结构

本征半导体在温度为零开尔文(0K, 相当于 -273.15°C)时,每一个原子的外围电子被共价键所束缚,不能自由移动。这样,本征半导体中虽有大量的价电子,但没有自由电子,此时半导体是不导电的。

当外界条件改变时,如温度升高或受光照时,由于半导体共价键中的价电子不像绝缘体中那样被束缚得很紧,价电子从外界获得一定的能量,少数价电子受到激发会摆脱共价键的束缚,成为自由电子;同时在共价键相应的位置上留下一个空位,这个空位称为空穴,如图 1.2 所示。自由电子和空穴总成对出现,所以称它们为电子空穴对。由于热或光照的作用,本征半导体中产生电子空穴对的现象称为本征激发,又称为热激发。在本征半导体中,电子和空穴的数量总是相等的。



图文
共价键

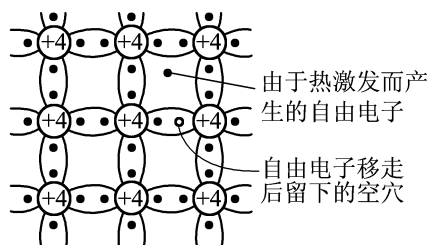


图 1.2 本征激发产生电子空穴对示意图



图文
载流子

由于共价键出现了空穴,在外加电场或其他能源的作用下,半导体中将出现两部分电流:一部分是自由电子作定向运动形成的电子电流;另一部分是仍被束缚的价电子,填补到邻近的空位上,而在原来的位置上留下新的空位,以后其他邻近的价电子又递补到这个新的空位上,形成了一部分电流。如图 1.3 所示,为了区别于自由电子的运动,我们把这种价电子的递补空穴的运动称为空穴运动。空穴运动的方向和电子移动的方向相反,所带电荷与自由电子的数量相等,符号相反。空穴可以视为一种带正电荷的载流子,空穴运动相当于正电荷运动,它形成的电流与电子电流的方向相同,如图 1.4 所示。

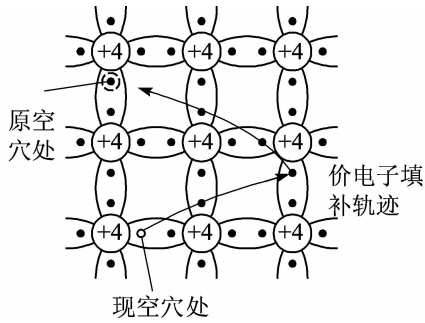


图 1.3 电子与空穴的移动

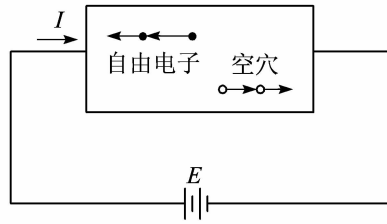


图 1.4 两种载流子在电场中的运动

因此,在半导体中存在着带负电的自由电子和带正电的空穴两种载流子,而金属导体中只有自由电子一种载流子,这是半导体和金属导体在导电机理上的本质区别。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现,同时又不不断复合,在一定温度下达到动态平衡,载流子维持一定数目。载流子的浓度影响本征半导体的导电能力。温度愈高,载流子数量越多,导电能力也就越强。所以,温度是影响半导体器件性能的一个重要的外部因素。

2. 杂质半导体

本征半导体中虽然有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力仍然很低,然而如果在其中掺入微量的杂质,所形成的杂质半导体的导电性能将大大增强。掺入的杂质主要是三价或五价元素,根据掺入的杂质不同,杂质半导体可以分为 N 型和 P 型两大类。

(1) N 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入五价的杂质元素,如磷,就可以得到 N 型半导体。

由于掺入本征半导体硅中的磷原子数比硅原子数少得多,因此整个晶体结构基本不变,仅是在某些位置上,磷原子取代原晶体结构中的硅原子,与周围四个硅原子中的价电子形成共价键。磷原子的最外层中有五个价电子,而磷原子参加共价键只需四个价电子,多余的第五个价电子,因无共价键束缚而很容易摆脱磷原子核的束缚,成为自由电子,五价杂质原子因提供自由电子而成为不可移动的正离子,如图 1.5 所示。于是 N 型半导体中的自由电子数目大量增加,自由电子成为半导体主要导电方式,故此类半导体也称为电子型半导体。

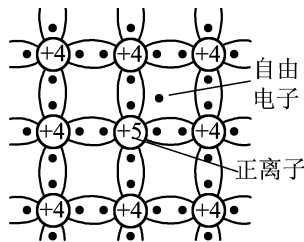


图 1.5 N 型半导体

(2) P 型半导体

在纯净的半导体硅(或锗)中掺入的三价杂质元素,如硼,就可以得到 P 型半导体。

掺入硼元素后,硼原子在取代原晶体结构中的硅原子后,与周围四个硅原子中的价电子

形成共价键,由于硼元素原子中只有三个价电子,共价键中将因缺少一个价电子而形成空穴。当相邻原子中的价电子受到热激发或其他激发获得能量时,很有可能填补上这个空穴,而在相应位置出现新的空穴。空穴很容易俘获电子,使杂质原子成为不可移动的负离子,如图 1.6 所示。每一硼原子都能提供一个空穴,于是半导体中的空穴数目将大量增加,空穴成为主要的导电方式,故此类半导体也称为空穴型半导体。

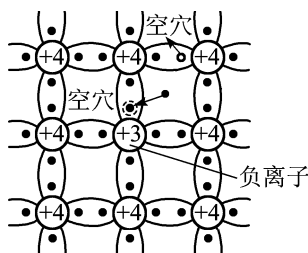


图 1.6 P 型半导体

杂质半导体中掺杂浓度远大于本征半导体中载流子浓度。在 N 型半导体中,由于掺杂自由电子浓度远大于空穴浓度,自由电子成为多数载流子,简称多子;空穴则成为少数载流子,简称少子。而在 P 型半导体中,由于掺杂空穴浓度远大于自由电子浓度,空穴成为多数载流子,自由电子成为少数载流子。在杂质半导体中,多子由于掺杂而产生,而少子由热激发而形成。

由于杂质的掺入,使得杂质半导体内部的载流子数目远远大于本征半导体,所以半导体材料的导电能力比本征半导体有了极大的增强。但是,不论是 N 型半导体还是 P 型半导体,虽然都有一种载流子占多数,导电能力增强,但整个晶体仍然是不带电的。在本征半导体中掺入杂质的目的,不是为了单纯提高半导体的导电能力,而是通过控制掺杂量,制造出合乎要求的半导体材料,用来生产半导体器件。

1.1.3 PN 结及其特性

虽然 P 型或 N 型半导体的导电能力大大增强,但是并不能直接用来制造半导体器件。通常是在一块 N 型(P 型)半导体的局部再掺入浓度较大的三价(五价)杂质,使其变为 P 型(N 型)半导体,这样就在 P 型半导体和 N 型半导体的交界形成 PN 结,PN 结才是构成二极管、三极管等各种半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

通过一定的掺杂工艺,在一块完整晶片上的两边分别形成 P 型和 N 型半导体,P 型半导体中有大量的空穴和极少的自由电子,而在 N 型半导体中有极少的空穴和大量的自由电子。由于两边载流子浓度的差别,在 P 型和 N 型半导体交界面的附近,P 区中的空穴将扩散到 N 区,P 区一侧因失去空穴,留下不能移动的带负电的三价杂质离子;同样,N 区的自由电子要向 P 区扩散,N 区一侧因失去自由电子,而留下不能移动的带正电的五价杂质离子。这样,在交界面附近形成一个带异性电荷的离子层,称为空间电荷区,也称 PN 结。扩散的结果使空间电荷区变宽。空间电荷区会产生内电场,其方向是从 N 区指向 P 区,内电场阻碍了多数载流子的扩散运动,随着内电场的加强,多子的扩散运动逐步减弱,直至停止,使交界面形成一个稳定、特殊的薄层。在空间电荷区内的多数载流子扩散到对方并被复合掉了,或者说消耗尽了,因此空间电荷区又称为耗尽层。

内电场对多数载流子的扩散运动起阻碍作用,但对少数载流子却起到推动作用,使它们越过空间电荷区,进入对方。少数载流子在内电场作用下有规则的运动称为漂移运动。内电场越强,漂移运动越强,而漂移使空间电荷区变薄。扩散和漂移这一对相反的运动最终达到动态平衡,此时空间电荷区的宽度基本上稳定下来,PN结就处于相对稳定的状态,如图1.7所示。

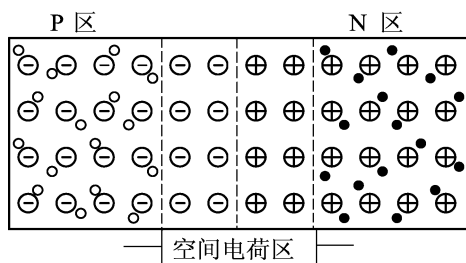


图 1.7 达到动态平衡的 PN 结

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端外加电压,如果外加电压使 PN 结中 P 区的电位高于 N 区的电位,称为加正向电压,也称 PN 结正向偏置(简称正偏);反之外加电压使 PN 结中 N 区的电位高于 P 区的电位,称为加反向电压,也称 PN 结反向偏置(简称反偏)。由于 PN 结特殊的内部结构,使得当 PN 结在外加电压时具有单向导电性,这也是 PN 结构成的半导体器件的主要工作原理。

(1) PN 结正向偏置

在 PN 结两端加正向电压,如图 1.8 所示。外加电源产生的外电场的方向与 PN 结所产生的内电场方向相反,破坏了扩散与漂移运动的平衡。在外电场作用下,使 P 区的空穴进入空间电荷区抵消一部分负离子,同时 N 区的自由电子进入空间电荷区抵消一部分正离子,于是空间电荷区变窄,内电场被削弱,多数载流子的扩散运动增强,形成较大的扩散电流,即由 P 区流向 N 区的正向电流。PN 结呈现低阻态,即 PN 结处于正向导通状态。

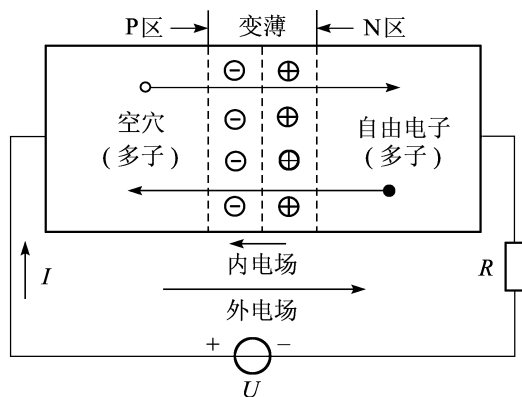


图 1.8 PN 结加正向电压时导通

(2) PN 结反向偏置

在 PN 结上加反向电压,如图 1.9 所示。此时外电场与内电场的方向一致,扩散与漂移



动画
PN 结的单向
导电性

运动的平衡同样被破坏。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,于是空间电荷区变宽,内电场增强,抑制多数载流子的扩散运动,同时加强了少数载流子的漂移运动,形成由 N 区流向 P 区的反向电流。由于少数载流子数量很少,因此反向电流不大,PN 结的反向电阻很高,即 PN 结处于截止状态。反向电流由少数载流子形成,而它又是由于热激发产生的,因而 PN 结的反向电流受温度影响很大。

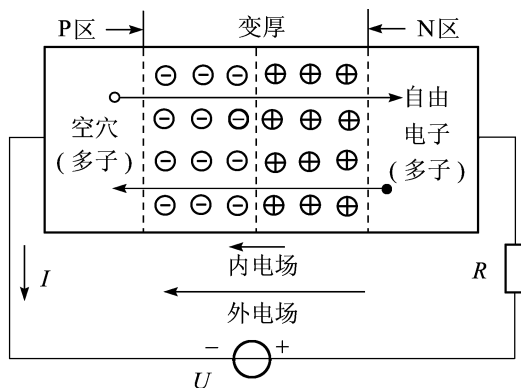


图 1.9 PN 结加反向电压时截止

根据上述分析,正向偏置时,PN 结处于正向导通状态,其正向电阻较小,正向电流较大。反向偏置时,PN 结处于反向截止状态,其反向电阻较大,反向电流很小,这就是 PN 结所具有的单向导电特性,它是 PN 结构成半导体器件的基础。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管结构及其特性

1. 二极管基本结构、符号及外形

在 PN 结的 P 型和 N 型半导体加上相应的电极引线,并用管壳封装,就成为半导体二极管,部分二极管的外形如图 1.10(a)所示。半导体二极管可以根据不同方式分类。按材料分有硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管等;按结构根据 PN 结工艺特点分为点接触型和面接触型二极管;按用途分有整流、稳压、开关、发光、光电、变容、阻尼等二极管;按封装形式分有塑封及金属封等;按功率分有大功率、中功率及小功率等二极管。

二极管基本结构和电路符号如图 1.10(b)、(c)所示,P 区对应的称为阳极(或正极),N 区对应的称为阴极(或负极)。二极管电路符号中的三角形实际上是一个箭头,箭头背向相连的电极为正极,记为“+”,箭头指向相连的电极是负极,记为“-”。二极管的文字符号通常用字母 D(或 V)表示。



视频
二极管的结构



图 1.10 半导体二极管

2. 二极管特性

二极管实际上就是一个PN结,它的特性就是PN结的特性,即具有单向导电性。常利用伏安特性曲线来形象地描述二极管的单向导电性。以电压为横坐标,电流为纵坐标,用作图法把电压、电流的对应值用平滑的曲线连接起来,就构成二极管的伏安特性曲线,如图1.11所示,图中虚线为锗管的伏安特性,实线为硅管的伏安特性。

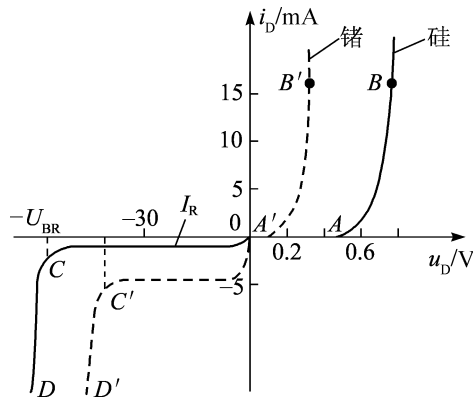


图 1.11 二极管的伏安特性

(1) 正向特性

二极管两端加正向电压时,产生正向电流。当正向电压较小时,外电场还不足以克服内电场对载流子扩散运动的阻力,正向电流极小,几乎为零,这一部分称为死区,相应的 $A(A')$ 点的电压称为死区电压或门槛电压(也称阈值电压),硅管约为 0.5V ,锗管约为 0.1V ,如图1.11中 $OA(OA')$ 段。

当外加正向电压大于死区电压,正向电流就会急剧地增大,二极管呈现很小电阻而处于导通状态。硅管的正向导通压降约为 $0.6\sim 0.7\text{V}$,锗管约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$,如图1.11中 AB



视频
二极管的伏安
特性

(A'B')段。

二极管正向导通时,要特别注意它的正向电流不能超过最大值,否则将烧坏 PN 结。

(2) 反向特性

二极管两端加上反向电压时,在开始很大范围内,二极管相当于非常大的电阻,反向电流在一定电压范围内保持常数,且不随反向电压而变化。此时的电流称为反向饱和电流 I_R ,如图 1.11 中 $OC(OC')$ 段。

二极管反向电压加到一定数值时,反向电流急剧增大,这种现象称为反向击穿。此时对应的电压称为反向击穿电压,用 U_{BR} 表示,如图 1.11 中 $CD(C'D')$ 段。

如果普通二极管被击穿后,由于反向电流很大,一般会造成“热击穿”,不能恢复原来的性能,也就失去了单向导电性。

(3) 温度对特性的影响

由于二极管的核心是一个 PN 结,它的导电性能与温度有关,温度升高时二极管正向特性曲线向左移动,正向压降减小,反向特性曲线向下移动,反向电流增大。

(4) 理想二极管

理想二极管的伏安特性曲线如图 1.12 所示,在正向偏置时,死区电压和导通压降均为 0V,反向偏置时,反向电阻为无穷大,电流为零。这是一种理想模型,在实际电路中,当电源电压远比二极管的管压降大,并且反向不击穿时,用理想模型来进行近似分析可以简化计算。

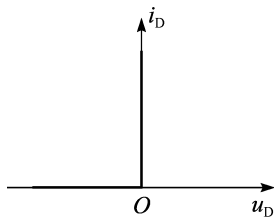


图 1.12 理想二极管的伏安特性曲线

1.2.2 二极管的主要参数

除了用伏安特性曲线表示二极管的特性外,还有一些常用参数。

1. 最大整流电流 I_{FM}

它是指二极管长期使用时,允许流过二极管的最大正向平均电流。当电流超过允许值时,PN 结将会过热而使二极管损坏。

2. 反向工作峰值电压 U_{RM}

它是指保证二极管不被击穿所能承受最高反向电压峰值,为了确保二极管工作安全,晶体管手册中给出的反向工作峰值电压 U_{RM} 一般是反向击穿电压的一半或三分之二,实际应用时要注意二极管所承受的最大反向电压不应超过 U_{RM} 。

3. 反向峰值电流 I_{RM}

它指在室温下二极管加最高反向电压时的反向电流。其值越大,说明管子的单向导电性越差。反向电流是由价电子获得热能挣脱共价键的束缚而产生,因此受温度的影响较大,温度越高反向电流越大。

4. 最高工作频率 f_M

它是指二极管正常工作时的上限频率。由于 PN 结存在着结电容,当电流(或电压)的



视频
二极管工作
原理



视频
二极管的动态
特性



视频
二极管的电流
方程

变化频率超过此值时,PN结的单向导电性将会变差。一般小电流二极管的 f_M 可高达几百兆赫。

1.2.3 二极管电路及其应用

二极管的应用范围很广,如整流电路、检波电路、限幅电路、元件保护电路以及在数字电路中用作开关元件等,主要都是利用二极管的单向导电性来实现。

1. 整流电路

利用二极管的单向导电性,可将交流电变成直流电,起到整流作用。整流又可分为半波、全波、桥式及倍压整流。下面以半波整流为例,说明二极管在整流电路中的应用,如图1.13(a)所示,其中 u_S 为正弦波。

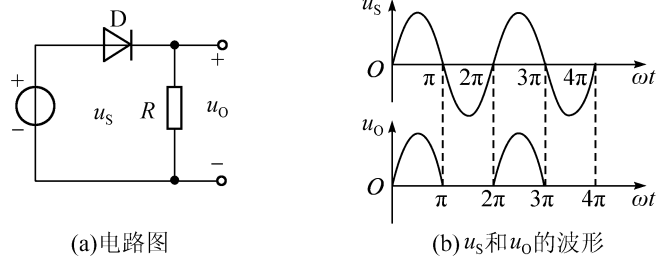


图 1.13 半波整流电路

由于 u_S 的值有正有负,当 u_S 为正半周时,二极管正向偏置,此时二极管导通,且 $u_O = u_S$;当 u_S 为负半周时,二极管反向偏置,此时二极管截止, $u_O = 0$,波形如图1.13(b)所示。

可见在交流电压 u_S 的整个周期内,负载 R 上得到一个单方向的脉动直流电压(大小变化,方向不变)。由于在负载两端电压只有半个周期的正弦波,故称半波整流。

2. 检波电路

电路中 R 和 C 构成微分电路。输入电压 u_1 的波形如图1.14所示。

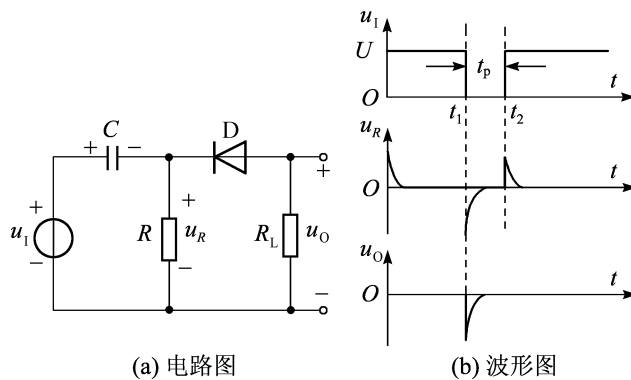


图 1.14 检波电路

在 $0 \sim t_1$ 期间,电容器很快被充电,其上电压为 U ,极性如图1.14中所示。这时 u_O 为零, u_R 为一正脉冲。

在 $t_1 \sim t_2$ 期间, u_1 在 t_1 瞬间由 U 下降到零,在 t_2 瞬间又由零上升到 U 。在 t_1 瞬间,电容器经 R 和 R_L 分两路放电,二极管 D 导通, u_R 和 u_O 均为负尖脉冲。在 t_2 瞬间, u_1 只经过 R 对电



图文
正弦波

容器充电, u_R 为一正尖脉冲;这时二极管截止, u_O 为零。输出电压波形如图 1.14 所示。

在这个电路中,二极管起检波作用,用来去除正尖脉冲。

3. 限幅电路

在电子电路中,为了降低信号的幅度以满足电路工作的需要,或为了保护某些器件不受大信号电压作用而损坏,常用限幅电路对各种信号进行处理,使信号在预置的范围内,有选择地传输一部分。

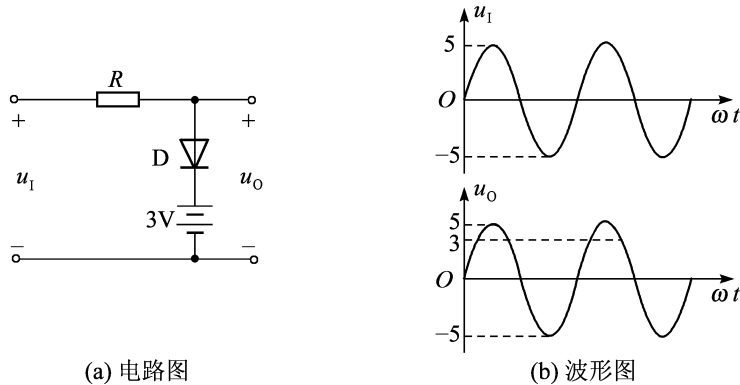


图 1.15 限幅电路

如图 1.15(a)所示,是由二极管组成的单向限幅电路,其中 u_1 为正弦交流电压,其峰值为 5V;直流电压 $U=+3V$; R 为限流电阻; u_O 为输出端电压。交流输入电压 u_1 和直流电压 U 同时作用于二极管上,当 u_1 的幅值高于 3V 时,二极管导通, $u_O=3V$;当 u_1 的幅值小于 3V 时,二极管截止, $u_O=u_1$ 。其输入、输出端电压波形如图 1.15(b)所示。

4. 开关电路

利用二极管的单向导电性,当二极管正向导通时其端电压很小,可近似地看做 0,即相当于开关闭合;反偏时,流过的电流很小,可近似地看做开路,即相当于开关断开。因此,二极管具有开关特性,在数字电路中得到广泛应用。

如图 1.16 所示开关电路,当 $u_{11}=0V$ 、 $u_{12}=5V$, D_1 为正向偏置, $u_O=0V$,此时 D_2 的阴极电位为 5V,阳极为 0V,处于反向偏置,故 D_2 截止。依此类推,可得到表 1.1。由表 1.1 可见,在输入电压 u_{11} 、 u_{12} 中,只要有一个为 0V,则输出为 0V,只有当两输入电压均为 5V 时,输出才为 5V,这种关系在数字电路中称为与逻辑。

表 1.1 二极管工作状态

u_{11}	u_{12}	二极管工作状态		u_O
		D_1	D_2	
0V	0V	导通	导通	0V
0V	5V	导通	截止	0V
5V	0V	截止	导通	0V
5V	5V	截止	截止	5V

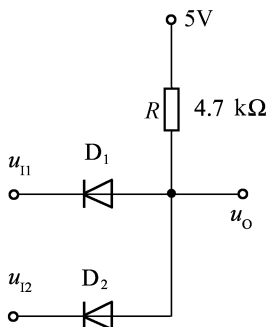


图 1.16 开关电路

1.2.4 特殊二极管

前面主要讨论了普通二极管,此外还有若干种特殊二极管,如稳压二极管、发光二极管、光电二极管和变容二极管等。

1. 稳压二极管

稳压二极管,又称齐纳二极管,它是一种特殊工艺制造的面接触型二极管,在电路中与适当数值的电阻配合后能起到稳压的作用。其电路符号和伏安特性如图 1.17 所示,稳压二极管的图形符号也与普通二极管相似,只是在表示阴极时用一个垂直的折线,体现了它被击穿后的电流急剧增大的特点。

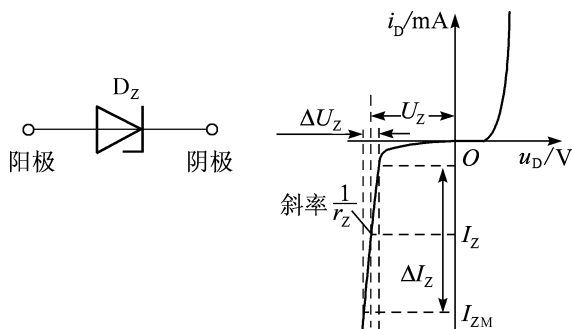


图 1.17 稳压管符号和伏安特性

从特性曲线可看出,稳压二极管和普通二极管的正向特性相同,不同是反向击穿电压较低,且击穿特性陡峭,这说明反向电流在很大的范围内变化时,稳压管两端的电压变化很小。稳压管正是利用反向击穿时的稳压特性来实现稳压的。因此,稳压管正常工作时,工作在反向击穿状态,当反向电压去掉后,稳压管恢复正常,不会损坏。而普通的二极管是不允许反向击穿的,否则会造成二极管损坏。

稳压二极管的主要参数:

(1) 稳定工作电压 U_Z

稳压管正常工作时管子两端的电压,即反向击穿电压。击穿与制造工艺、环境温度及工作电流有关,因此在手册中只能给出某一型号稳压管的稳压范围。

(2) 稳定电流 I_Z 、最小稳定电流 $I_{Z\min}$ 、最大稳定电流 $I_{Z\max}$

稳定电流 I_Z 是指稳压管工作至稳压状态时流过的电流。当稳压管工作电流小于最小稳定



图文
封装

电流 I_{Zmin} 时,没有稳压作用;当稳压管工作电流大于最大稳定电流 I_{Zmax} 时,管子因过流而损坏。

(3)动态电阻 r_z

它是指稳压管端进入稳压状态后,两端电压的变化量与相应的电流变化量的比值,即 $r_z = \Delta U_z / \Delta I_z$ 。 r_z 的大小反映了稳压管性能的优劣, r_z 愈小,曲线愈陡,稳压性能愈好。

(4)最大允许耗散功率 P_{ZM}

它是指管子不致发生热击穿的最大功率损耗, $P_{ZM} = U_z \cdot I_{Zmax}$ 。

(5)电压温度系数

这是表示稳压二极管的温度稳定性参数,它表示温度每升高 1°C 时稳定电压值的相对变化量,该系数越小,则管子温度稳定性越好。

2. 发光二极管

发光二极管与普通二极管一样,也是由 PN 结构成的,同样具有单向导电性,但正向导通时能发光,这是由于电子与空穴直接复合而放出能量的结果。发光二极管工作在正偏状态。其电路符号如图 1.18 所示。由于构成它的材料、封装形式、外形不同,它的种类很多,如普通发光二极管、红外线发光二极管、激光二极管等。

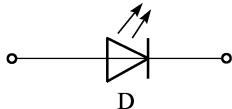


图 1.18 发光二极管电路符号

(1)普通发光二极管

普通发光二极管实物的引脚中,长引脚是正极,短引脚是负极。普通发光二极管常用来作为显示器件,除单个使用外,也常作为七段式或矩阵式器件,工作电流一般为几毫安到十几毫安。

检测普通发光二极管,一般用万用表 $R \times 10k$ 档,方法与普通二极管一样。通常发光二极管的电阻在 $15k\Omega$ 左右,反向电阻为无穷大。灵敏度高的发光二极管,在测正向电阻时,可见管芯发光。

(2)红外线发光二极管

红外线发光二极管是一种能把电能直接转换成红外光能的发光器件。和普通二极管一样也有两个引脚,长引脚为正极,短引脚为负极,常用于红外遥控发射器中。

检测红外发光二极管时,一般用万用表 $R \times 1k$ 档,若正向阻值在 $30k\Omega$ 左右,反向为无穷大,则表明正常,否则就是红外线发光二极管性能变差或损坏。

(3)激光二极管

激光二极管的物理结构是在发光二极管的结间安置一层具有光活性的半导体,其端面经过抛光后具有部分反射功能,因而形成一光谐振腔。在正向偏置的情况下,由结发射出光来并与光谐振腔相互作用,从而进一步激励从结上发射出单波长的光,同时,光在光谐振腔中产生振荡并被放大形成激光。半导体激光二极管发射的主要是红外线,这与材料的物理性质有关,主要应用于小功率光电设备中,如光盘驱动器和激光打印机的打印头等。

根据内部构造和原理,判断激光二极管好坏的方法是通过测试激光二极管的正、反向电阻来确定好坏。若正向电阻为 $20k\Omega \sim 30k\Omega$,反向电阻为无穷大,说明正常,否则,要么激光二极管老化,要么损坏。



图文封装



图文光盘驱动器

3. 光电二极管

光电二极管是一种很常用的光电子器件,电路符号如图 1.19 所示。其结构与 PN 结二极管类似,管壳上的一个玻璃窗口能接收外部的光照。这种器件的 PN 结在反向偏置状态下运行,它的反向电流随光照强度的增加而上升,反向电流与照度成正比。光电二极管广泛应用于遥控接收器、激光头中。当制成大面积光电二极管时,能将光能直接转换成电能从而作为一种能源器件,即光电池。

光电二极管的检测方法和普通二极管的一样,通常正向电阻为几千欧,反向电阻为无穷大,否则光电二极管质量变差或损坏。当受到光线照射时,反向电阻显著变化,正向电阻不变。

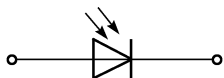


图 1.19 光电二极管电路符号

4. 变容二极管

利用 PN 结的电容效应制成的半导体器件,即 PN 结电容会随反向电压的增加而减小,利用这种特性在电路中可把变容二极管当做可变电容使用。由于它无机械磨损且体积小,因而在高频技术中应用较多。变容二极管的电路符号如图 1.20 所示。

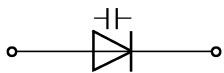


图 1.20 变容二极管电路符号

1.2.5 二极管的检测及判断

1. 二极管的型号

不同的二极管可以从它的形状和外观区别,某些二极管的材料和极性可以从它的型号和外观上直接进行辨别。二极管的种类繁多,国产半导体器件通常有五个部分组成,其型号组成及其意义如图 1.21 所示。如 2AP9:“2”代表电极数为 2,“A”表示 N 型锗材料,“P”表示普通管,“9”表示序号。

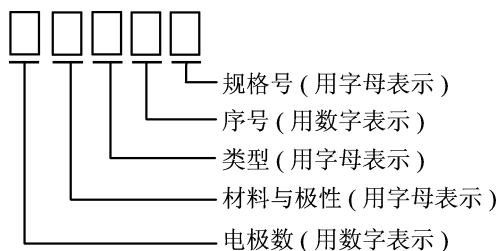


图 1.21 二极管型号组成及其意义

国产半导体器件型号组成部分的符号及意义如表 1.2 所示。

表 1.2 国产半导体器件型号组成部分的符号及意义

第一部分		第二部分		第三部分				第四部分	第五部分
用数字表示器件电极数目		用汉语拼音字母表示器件材料和极性		用汉语拼音字母表示器件类型				用数字表示器件序号	用汉语拼音字母表示规格号
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义		
2	二极管	A	N型, 锗材料	P	普通管	D	低频大功率管 $f_a < 3\text{MHz}$ $P_c \geq 1\text{W}$		
		B	P型, 锗材料	V	微波管				
		C	N型, 硅材料	W	稳压管				
		D	P型, 硅材料	C	参量管				
3	三极管	A	PNP型, 锗材料	Z	整流管	A	高频大功率管 $f_a \geq 3\text{MHz}$ $P_c \geq 1\text{W}$		
		B	NPN型, 锗材料	L	整流堆				
		C	PNP型, 硅材料	S	隧道管	T	半导体闸流管 (可控整流器)		
		D	NPN型, 硅材料	N	阻尼管				
		E	化合物材料	U	光电器件	Y	体效应管		
				K	开关管	B	雪崩管		
				X	低频小功率管 $f_a < 3\text{MHz}$ $P_c < 1\text{W}$	J	阶跃恢复管		
						CS	场效应器件		
				G	高频小功率管 $f_a \geq 3\text{MHz}$ $P_c < 1\text{W}$	BT	半导体特殊器件		
						FH	复合管		
				PIN	PIN型管				
				JG	激光器件				

生产厂家通常都会在二极管外壳上用特定标记来表示正负极。最明确的方法是在外壳上画二极管符号, 箭头指向一端为负极; 螺栓式二极管带螺纹的一端是负极, 这是一种工作电流很大的二极管; 有的二极管上画有色环, 带色环的一端为负极。

2. 二极管的检测

二极管具有单向导电性, 即性能良好的二极管, 其正向电阻小, 反向电阻大。利用这一特性采用万用表测量二极管的正向电阻和反向电阻就可以判断其好坏与极性。测试过程中, 要注意弄清所用万用表的两个表笔所对应电池的电压极性。

若使用的是指针式万用表, 则黑表笔接的是表内电池的正极(插入“—”孔中), 红表笔接的是负极(插入“+”孔中), 如图 1.22 所示。测量时, 把指针式万用表置于欧姆挡的 $R \times 10$ 、 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$, 测量二极管的正、反向电阻。小电阻阻值为正向电阻。此时, 黑表笔连接的是二极管的正极, 性能良好的二极管一般在几十到几百欧姆。大电阻阻值为反向电阻, 一般在几百千欧以上, 此时, 黑表笔连接的是二极管的负极。

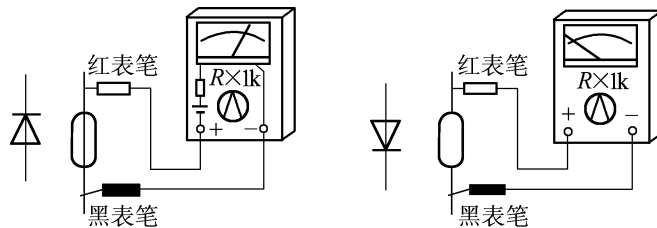


图 1.22 指针式万用表来测试二极管示意图

二极管的材料和质量好坏也可由从正、反向阻值进行判断,若测得二极管的正、反向电阻值均接近 0 或阻值较小,则说明二极管内部已击穿短路或漏电损坏;若测得二极管的正、反向电阻值均为无穷大,则说明该二极管已开路损坏;如果测得正反向电阻阻值一样小,说明该二极管内部短路损坏。通常希望正向电阻越小越好,反向电阻越大越好,正、反向电阻值相差越悬殊,说明二极管的单向导电特性越好。

若使用的是数字万用表,则相反,红表笔(插入 V/ Ω 孔)是正极,黑表笔(插入 COM 孔)是负极。数字万用表不能用电阻挡来测量二极管,而要用二极管挡测量。

由于二极管的伏安特性是非线性的,用万用表的不同电阻挡测量二极管的电阻时,会得出不同的电阻值,在实际使用时,流过二极管的电流会较大,因而二极管呈现的电阻值会更小一些。

1.3 半导体三极管

三极管的几种常见外形如图 1.23 所示,其共同特征就是具有三个电极,这就是“三极管”简称的来历。

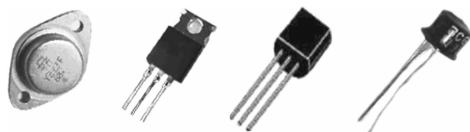


图 1.23 三极管的外形结构

三极管也是最重要的一种半导体器件,是放大电路的核心元件,它的放大作用和开关作用促进电子技术取得了高速发展。它的特性通过特性曲线和工作参数来分析研究,为了更好地理解和熟悉管子的外部特性,需要对三极管的内部结构和载流子的运动规律有一定的认识。

1.3.1 三极管的结构及分类

三极管由两个 PN 结、三个杂质半导体区域组成,根据区域排列次序可分为 NPN 型和 PNP 型两大类,其内部结构和符号如图 1.24 所示。

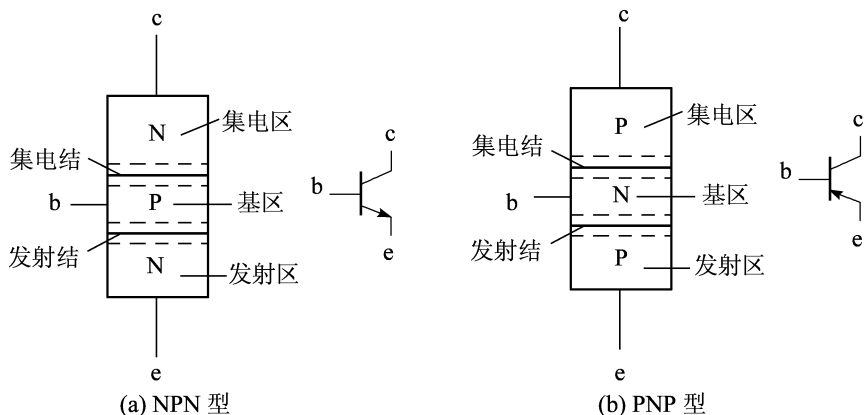


图 1.24 三极管的结构及电路符号

无论是 NPN 型还是 PNP 型三极管,都有三个区:基区、发射区和集电区,以及分别从这三个区引出的电极:基极 b、发射极 e 和集电极 c。同时在三个区的两个交界面处分别形成两个 PN 结,分别为发射区与基区之间的发射结和集电区与基区之间的集电结。三极管三个区域,其作用不同,因而在制作时每个区的掺杂及面积均不相同。基区很薄,掺杂浓度低,一般仅有 1 微米至几十微米厚;发射区掺杂浓度高,因而多数载流子浓度也很高;集电结截面积要大于发射结截面积。三极管的这种内部结构特点,是三极管能够起电流放大作用的内部条件。

从三极管的电路符号可以看出是 PNP 型还是 NPN 型的管子,它们发射极的箭头方向不同,这个箭头方向表示发射结加正向偏置时的电流方向。



图文
高频三极管

三极管种类很多,根据基片材料不同,可分为锗管和硅管两大类。目前国内生产的硅管多为 NPN 型,锗管多为 PNP 型;根据其工作频率特性分,可分为高频管 and 低频管;从功率大小分,可分为大功率管、中功率管和小功率管;根据其工作状态又可分为放大管和开关管等。实际应用中采用 NPN 型三极管较多,下面以 NPN 型三极管为例加以讨论,所得结论对于 PNP 三极管同样适用,只是在使用时电源连接不同。

1.3.2 三极管的放大作用

1. 三极管放大的外部条件

三极管要实现放大作用的外部条件是发射结正偏,集电结反偏。对于 NPN 型管,从电位的角度来看,三个电极间的电位关系为 $U_C > U_B > U_E$;而 PNP 型管,极性正好相反,即 $U_E > U_B > U_C$ 。

2. 三极管的内部载流子的作用及放大原理

NPN 型三极管内部载流子运动规律如图 1.25 所示,主要有以下几个过程。

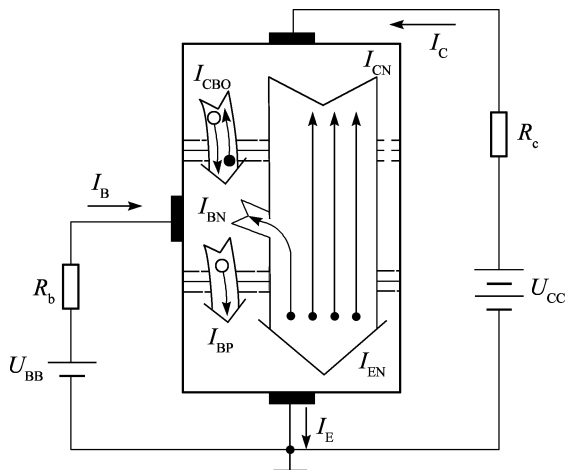


图 1.25 三极管内部载流子运动及外部电流分配

(1) 发射区向基区扩散载流子

由于发射结处于正偏,发射区的多子(自由电子)不断扩散到基区,形成发射结扩散电流 I_{EN} ,其电流方向与扩散方向相反;基区中的多子空穴也要扩散到发射区,形成空穴电流 I_{EP} ,电流方向与 I_{EN} 相同,由于基区浓度远小于发射区, I_{EP} 很小。同时扩散出去电子又不断从电

源补充,形成发射极电流 I_E 。可得

$$I_E = I_{EN} + I_{EP}$$

(2) 载流子在基区扩散和复合

由于基区很薄,其多数载流子(空穴)浓度很低,所以从发射极扩散过来的电子只有很少部分可以和基区的空穴复合,形成较小的基极复合电流 I_{BN} ,而剩下的绝大部分电子都能扩散到集电结边缘。基区被复合掉的空穴由电源 U_{BB} 从基区拉走电子来补充,形成基极电流 I_B 。

(3) 集电区收集从发射区扩散过来的电子

由于集电结反偏,强大的内电场可将从发射区扩散到基区并到达集电区边缘的电子拉入集电区,从而形成集电极电流中受发射结控制的电流 I_{CN} 。显然

$$I_{CN} = I_{EN} - I_{BN}$$

同时基区自身的少子和集电区的少子也会在反偏电压作用下产生漂移运动,形成集电结反向饱和电流 I_{CBO} 。它的大小取决于基区和集电区少子的浓度,受温度影响较大,数值很小。 I_{CN} 和 I_{CBO} 一起构成集电极电流 I_C ,即

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

由图 1.25 可见

$$\begin{aligned} I_B &= I_{EP} + I_{BN} - I_{CBO} \\ &= I_{EP} + I_{EN} - I_{CN} - I_{CBO} \\ &= I_E - I_C \end{aligned}$$

这说明在三极管中发射极电流 I_E 等于集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 之和。对于 PNP 管,三个电极产生的电流方向正好和 NPN 管相反。其内部载流子的运动情况与之类似。

由上述分析可知,构成发射极电流 I_E 的两部分中, I_{BE} 很小,而 I_{CE} 所占的百分比很大。将 I_{CE} 与 I_{BE} 之比用 $\bar{\beta}$ 表示,称为共发射极直流电流放大系数。将集电极电流的变化量 ΔI_C 与基极电流的变化量 ΔI_B 之比称为三极管的共发射极交流电流放大系数 β 。即

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B}; \quad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

一般 β 值较大,当基极电流 I_B 有一微小变化时,就能引起集电极电流 I_C 产生较大的变化,这就是三极管放大作用的实质——通过改变电流 I_B 的大小,达到控制 I_C 的目的,即 $I_C = \beta I_B$ 。因此,三极管是一种电流控制电流型器件。

由于三极管有三个电极,在放大电路中可有三种连接方式——共基极、共发射极(简称共射极)和共集电极,即分别把基极、发射极和集电极作为输入和输出的公共端,如图 1.26 所示。但无论哪种接法,都要保证三极管能够满足放大的外部条件,即发射结正偏,集电结反偏。

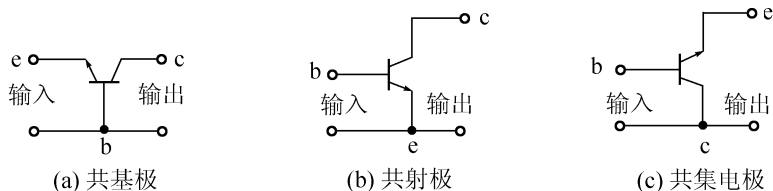


图 1.26 三极管的三种连接方式

1.3.3 三极管特性曲线

三极管的特性曲线是指各电极间电压和电流之间的关系曲线,也称为伏安特性曲线,它能直观全面地反映晶体管的性能,是分析放大电路的依据。由于三极管在不同连接方式时具有不同的端电压和电流,它们的特性曲线各不相同。共集与共射的特性曲线相似,下面以NPN型管为例,讨论常用的共射极接法时的特性曲线。

1. 三极管的输入特性曲线

三极管的输入特性是指当集-射极电压 u_{CE} 为常数时,基极电流 i_B 与基-射极电压 u_{BE} 之间的关系曲线,即 $i_B = f(u_{BE})|_{u_{CE}=\text{常数}}$ 。

如图 1.27 所示,图中示出 u_{CE} 分别为 0V, 0.5V 和大于等于 1V 三种情况下的输入特性曲线。从图中可以看出,三极管的输入特性和二极管的伏安特性相似,也有一段死区,只有当 u_{BE} 大于死区电压时,三极管才会出现基极电流 i_B 。通常硅管的死区电压约为 0.5V,锗管约为 0.1V。当发射结完全导通时三极管也具有恒压特性。在正常工作情况下,NPN 型硅管的发射结电压为 0.6~0.7V,PNP 型锗管的发射结电压为 0.2~0.3V。

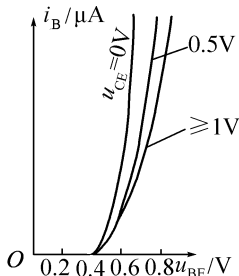


图 1.27 三极管的输入特性曲线

2. 三极管的输出特性曲线

输出特性曲线是指当 i_B 一定时,输出回路中的 i_C 与 u_{CE} 之间的关系曲线,即

$$i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$$

i_B 不同时,对应的曲线也不同,所以三极管的输出特性曲线是一簇曲线,如图 1.28 所示。当 i_B 增大时, i_C 相应地也增大,而且 i_C 比 i_B 增加快得多,曲线上移。



动画
三极管驱动继电器电路

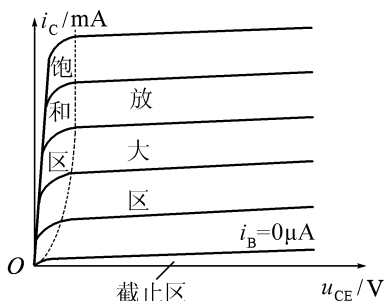


图 1.28 三极管的输出特性曲线

根据输出特性曲线的特点可以将其划分为三个区,也就是分别代表三极管的三种工作状态:

(1) 放大区

输出特性曲线中近于水平部分的是放大区。三极管要工作在放大区,发射结必须处于

正向偏置,集电结处于反向偏置。在放大区, i_c 受控于 i_B ,且 $i_c = \beta \cdot i_B$,当 i_B 恒定时, i_c 恒定。由于在不同 i_B 下电流放大系数近似相等,所以放大区也称为线性区。

(2) 截止区

$i_B = 0$ 曲线以下的区域称为截止区。此时发射结和集电结均处于反向偏置,三极管失去电流放大作用,集电极 c 和发射极 e 之间相当于开路状态,类似于开关断开。

(3) 饱和区

输出特性曲线的陡直部分是饱和区,此时发射结和集电结均处于正向偏置, i_c 由外电路决定,而与 i_B 无关。三极管的集电极 c 和发射极 e 之间相当于短路,类似于开关闭合。

由以上分析可知,三极管在电路中既可以作为放大元件,又可以作为开关元件使用。

1.3.4 三极管的主要参数

三极管参数可用来表示其特性和适用范围,是评价三极管质量及正确选择使用的依据。三极管的参数很多,这里介绍几个主要的参数。

1. 电流放大系数

电流放大系数是表征三极管电流放大能力的参数,当三极管为共发射极接法时,常用 $\bar{\beta}$ 和 β 来表示。

当三极管工作在静态,即无输入信号时,由基极直流电流引起的集电极直流电流 I_C 与基极直流电流 I_B 之比,称为共发射极静态(直流)电流放大系数 β ,即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CE0}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

当晶体管工作在动态,即有信号输入时,基极电流的变化量 ΔI_B ,由它引起的集电极电流变化量为 ΔI_C , ΔI_C 与 ΔI_B 之比称为动态(交流)电流放大系数 β ,即

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

在常用的工作范围内 $\beta \approx \bar{\beta}$,且基本不变,因此使用中一般不再严格区分两者,统称为共发射极电流放大系数,用 β 表示。 β 值一般较大,所以共射极接法下三极管具有较强的电流放大作用。

2. 极间反向电流

(1) 集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO}

它是指当发射极开路,集电结在反向电压作用下,形成的反向饱和电流。它受温度影响较大。 I_{CBO} 的大小反映了三极管的热稳定性, I_{CBO} 越小,其稳定性越好。硅管的热稳定性比锗管好,在温度变化范围较大的工作环境中,尽可能地选择硅管。

(2) 集电极-发射极反向饱和电流 I_{CEO}

它是指当三极管基极开路,而集电结反偏和发射结正偏时的集电极电流,也叫穿透电流。它与 I_{CBO} 的关系为: $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$, I_{CEO} 受温度影响也很大,温度上升, I_{CEO} 增大。穿透电流 I_{CEO} 也是衡量三极管质量的重要参数,硅管的 I_{CEO} 比锗管的小。

选用三极管时,一般希望反向饱和电流尽量小些,以减小温度对其性能的影响。小功率硅管的 I_{CEO} 在几微安以下,锗管的 I_{CEO} 在几十微安以下。

3. 极限参数

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM}

当 i_c 超过一定数值时,三极管电流放大系数 β 值下降, β 下降到正常值的 $2/3$ 时所对应

的集电极电流称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。实际使用时为保证三极管正常工作,流过集电极的电流要小于 I_{CM} 。当 $i_C > I_{CM}$ 时,并不一定会使晶体管损坏,但会以降低 β 值为代价。

(2) 反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)CBO}$ 、 $U_{(BR)EBO}$

$U_{(BR)CEO}$ 是指基极开路时集电结不致击穿,施加在集电极-发射极之间允许的最高反向电压。 $U_{(BR)CBO}$ 是指发射极开路时集电结不致击穿,施加在集电极-基极之间允许的最高反向电压。 $U_{(BR)EBO}$ 是指集电极开路时发射结不致击穿,施加在发射极-基极之间允许的最高反向电压。

(3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

集电极最大允许耗散功率是指三极管正常工作时集电结上最大允许损耗的功率。三极管损耗的功率会转化为热量,使集电结温度升高,引起晶体管参数的变化,使管子性能变差甚至会烧坏管子。

1.3.5 三极管的检测及判断

要准确了解三极管的类型、极性和性能参数,可用专门的设备进行测试。但一般要粗略地辨别三极管的类型和管脚时,可直接从管壳上标注的型号来简单判断,也可利用万用表测量方法判断。

1. 通过管子型号来判别

国产的三极管的型号一般由五部分组成,如图 1.29 所示。

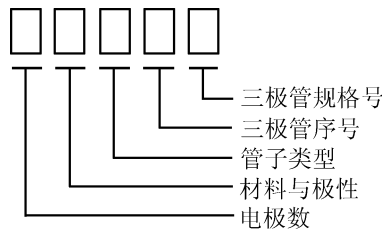


图 1.29 三极管型号组成

具体的型号组成部分的符号及意义如表 1.2 所示。

例如根据表中含义可知:

3AX 为 PNP 型低频小功率管;3BX 为 NPN 型低频小功率管。

3CG 为 PNP 型高频小功率管;3DG 为 NPN 型高频小功率管。

3AD 为 PNP 型低频大功率管;3DD 为 NPN 型低频大功率管。

3CA 为 PNP 型高频大功率管;3DA 为 NPN 型高频大功率管。

此外有国际流行的 9011~9018 系列高频小功率管,除 9012 和 9015 为 PNP 管外,其余均为 NPN 型管。

管子的类型可以通过三极管的型号来判别,管子的极性也可以通过三极管的外形和封装简单判别。常用中小功率三极管有金属圆壳和塑料封装(半柱型)等外型,图 1.30 介绍了三种典型的三极管外形和管极排列方式。

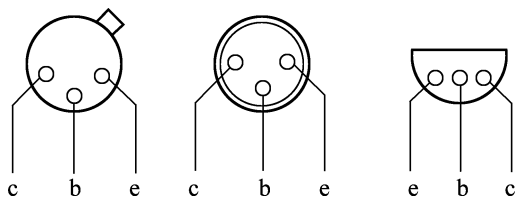


图 1.30 三极管典型外形及管极排列方式

2. 通过万用表检测三极管的管脚和管型

三极管可以看成是两个背靠背的 PN 结结构,如图 1.31 所示。对 NPN 型三极管,基极是两个结的公共阳极;而对于 PNP 型三极管来说,基极是两个结的公共阴极。因此,判断公共极是阴极还是阳极,即可知道管子是 NPN 型还是 PNP 型。

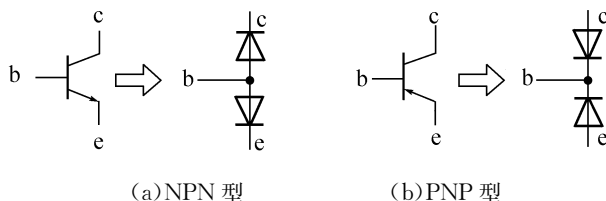


图 1.31 三极管示意图

测试步骤如下:

(1)将指针式万用表切换至“ $R \times 1k$ ”档,用黑表笔接假定的基极,用红表笔分别接触另外两个极,假设测得的电阻都小,约为几百欧到几千欧。

(2)将黑、红两表笔对调,假设测得电阻均较大,在几百千欧以上,则此时黑表笔接的就是基极。该管为 NPN 管,若测量时红表笔接基极,则为 PNP 型。如图 1.32(a)、(b)、(c)所示,两次测试中的阻值都很小,且黑表笔接在中间引脚不动,所以中间引脚为基极,且为 NPN 型。在三极管的类型和基极确定以后,即可测出三极管的另外两个电极。

(3)假定基极外的两个管脚中的其中一个为集电极,在假定的集电极与基极之间接一电阻。图 1.32(d)、(e)中是用左手大拇指做电阻,此时,集电极与基极不能碰在一起。对于 NPN 型管,用黑表笔接假定的集电极,红表笔接发射极,红黑表笔均不要碰基极,记录电阻值。

(4)将刚才假定的集电极作为发射极,另一端作为集电极,再次重复上述步骤。如图 1.32(f)、(g)所示。

(5)比较两次测试的电阻值,阻值较小的那次假定是正确的。测试得出各电极名称如图 1.32(h)所示。

对于 PNP 管,对集电极和发射极的判断方法与 NPN 型类似,但需要对调红黑表笔进行测试。