



高等职业教育电类基础课新形态一体化规划教材



“十二五”职业教育国家规划教材

经全国职业教育教材审定委员会审定

电子技术 (第5版)

付植桐 主编



高等教育出版社



高等职业教育电类基础课新形态一体化规划教材



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

DIANZI JISHU

电子技术 (第5版)

付植桐 主编

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是“十二五”职业教育国家规划教材,也是普通高等教育“十一五”国家级规划教材修订版。

本书在编写中注重学生应用能力和基本技能的培养,注重职业技能和工作过程创新能力的培养,更适应高等职业教育发展的需要。

全书共 15 章,分上、下两篇。上篇为模拟电子技术,内容包括半导体元件及其特性、基本放大电路、负反馈放大器与集成运算放大器、功率放大器及其应用、振荡器、直流稳压电源、电力电子技术;下篇为数字电子技术,内容包括逻辑代数基础、基本门电路、组合逻辑电路、集成触发器与时序逻辑电路、脉冲信号的产生与整形、半导体存储器与可编程逻辑器件、数/模转换与模/数转换、课程设计与制作。本书各章后配有习题、实验技能操作训练。本书还借助现代信息技术,配套了数字课程网站,在书中相应位置做了资源标记,读者可以通过网络途径观看相应的动画、微课、仿真演示、仿真实验、教学课件等资源,同时微课和仿真演示资源还进行了二维码资源标记,读者可以通过移动终端方便地扫码观看。

本书可作为高职、高专院校电气自动化类、机电类和电子类等相关专业教材,也可供自学者和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术 / 付植桐主编. — 5 版. — 北京: 高等教育出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-04-042550-5

I. ①电… II. ①付… III. ①电子技术—高等职业教育—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 079481 号

策划编辑	曹雪伟	责任编辑	曹雪伟	封面设计	赵 阳	版式设计	赵 阳
插图绘制	尹文军	责任校对	陈旭颖	责任印制	田 甜		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京宏伟双华印刷有限公司
开 本 889mm×1194mm 1/16
印 张 18.25
字 数 510千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2000年8月第1版
2016年1月第5版
印 次 2016年1月第1次印刷
定 价 39.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 42550-00

前言

本书是“十二五”职业教育国家规划教材,也是普通高等教育“十一五”国家级规划教材的修订版,遵照教育部制定的“高职高专教育模拟电子技术课程教学基本要求”和“高职高专教育数字电子技术基础课程教学基本要求”,并在第4版的基础上,经多方征求意见后修订而成的。考虑到高等职业教育的培养目标是技术应用专门人才,在重新编写中更注重技能和工作过程适应能力的培养,注重职业素质和创新能力的培养,更适应新的高等职业教育发展的需要。本书具有以下特点:

1. 本书为方便读者学习和应用,专门设立了对应的网站,教学课件、学习指导、自我检测、EDA 仿真实验等内容都放在网站上。相信这会给读者学习带来很大方便。

2. 在重点保证基础理论和基本知识够用的前提下,注重实践和应用,并突出了基本技能的培养。书中增加了许多应用实例,每章均有实验与技能操作训练,第15章为课程设计与制作。

3. 努力反映现代电子技术的新技术、新成果。书中增加了电力电子技术和可编程器件的内容,同时适当加重了集

成器件的内容,使其尽可能跟上电子技术领域的新发展。

4. 突出高等职业教育的特色,注重职业素质和创新精神的培养,把职业岗位所必需的知识、技能编入书中,便于激发学生的学习兴趣,使读者倍感亲切,有利于教与学。

5. 每章后配有练习题、课件,帮助读者复习所学内容,了解自己对本章掌握的情况。

本书是以电类各专业的需要为基础编写的,内容较全,能为教师和学生提供较大的信息量。教师在实际教学中可结合具体情况选择取舍。

本书由天津职业大学、沈阳工程学院、天津渤海职业技术学院和天津现代职业技术学院教师共同编写,其中付植桐编写第1、15章,张金环编写第2、5、6章,王英大编写第3、4、7章,韩睿群编写第8、9、10、14章,尹常永编写第11、12、13章,全书由付植桐统稿。周定文教授对全书进行了审查,对初稿提出了很多宝贵的意见和建议;高等教育出版社的同志给予了大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在一些问题,希望读者批评指正。

编者

2015年6月于天津

目录

上篇 模拟电子技术

第 1 章 半导体元件及其特性	001	2.1.3 直流通路和静态工作点	023
		2.1.4 放大器的主要性能指标	025
1.1 半导体基础知识与 PN 结	001	2.2 放大器的分析方法	027
1.1.1 半导体的特点	001	2.2.1 微变等效电路分析法	027
1.1.2 PN 结的形成与特性	002	2.2.2 放大器的偏置电路	030
1.2 二极管	003	2.3 常见的放大电路	034
1.2.1 二极管的结构和类型	004	2.3.1 共集电极放大电路	034
1.2.2 二极管的特性及参数	004	2.3.2 共基极放大电路	036
1.2.3 二极管应用电路的举例	005	2.4 放大器的频率特性	037
1.2.4 发光二极管及其应用	006	2.4.1 频率特性的基本概念	037
1.3 晶体管	008	2.4.2 放大器的低频特性	038
1.3.1 晶体管的结构和类型	008	2.4.3 放大器的高频特性	039
1.3.2 晶体管电流分配和放大作用	008	2.5 多级放大器	041
1.3.3 晶体管的特性曲线	010	2.5.1 多级放大器的耦合方式	041
1.3.4 晶体管的主要参数	011	2.5.2 多级放大器的增益	044
1.4 场效应晶体管	012	习题	046
1.4.1 N 沟道增强型 MOS 管	013	实验与技能操作训练	049
1.4.2 N 沟道耗尽型 MOS 管	014		
1.4.3 场效应晶体管的主要参数	015	第 3 章 负反馈放大器与集成运算放大器	051
1.4.4 场效应晶体管与双极晶体管的比较	016		
习题	016	3.1 反馈的基本原理	051
实验与技能操作训练	017	3.1.1 反馈的基本概念	051
		3.1.2 反馈的分类及判别	052
		3.1.3 负反馈对放大器性能的影响	054
第 2 章 基本放大电路	021	3.2 集成运算放大器	058
		3.2.1 集成运算放大器概述	058
2.1 基本放大电路的组成及工作原理	021	3.2.2 集成运放的主要技术指标	058
2.1.1 放大器的电路组成	021	3.3 集成运算放大器的应用	060
2.1.2 放大器的工作原理	022	3.3.1 理想集成运放及其分析方法	060

3.3.2 基本运算电路	061	习题	106
3.3.3 信号处理电路	067	实验与技能操作训练	107
3.3.4 波形发生器	070		
3.3.5 集成运放应用的一些实际问题	073	第 6 章 直流稳压电源	109
习题	075		
实验与技能操作训练	077	6.1 整流滤波电路	109
第 4 章 功率放大器及其应用	081	6.1.1 单相半波整流电路	109
4.1 功率放大器	081	6.1.2 单相桥式整流电路	110
4.1.1 甲类功率放大器	081	6.1.3 滤波电路	111
4.1.2 推挽功率放大器	085	6.2 硅稳压二极管稳压电路	113
4.1.3 互补对称功率放大器	089	6.2.1 硅稳压二极管稳压电路的 工作原理	114
4.2 功率放大器的应用	090	6.2.2 硅稳压二极管稳压电路 参数的选择	114
4.2.1 功率放大器应用中的几个问题	090	6.3 串联型晶体管稳压电路	115
4.2.2 功率放大器实际应用电路	091	6.3.1 带有放大环节的串联型 晶体管稳压电路	115
习题	093	6.3.2 稳压电源的主要技术指标	117
实验与技能操作训练	093	6.4 集成稳压器	118
第 5 章 振荡器	097	习题	120
5.1 振荡的基本概念	097	实验与技能操作训练	121
5.1.1 基本概念	097	第 7 章 电力电子技术	123
5.1.2 振荡电路的组成	097		
5.1.3 振荡条件	098	7.1 晶闸管的结构与工作原理	123
5.2 RC 振荡器	099	7.1.1 晶闸管的基本结构	123
5.2.1 RC 移相振荡器	099	7.1.2 晶闸管的工作原理	123
5.2.2 RC 桥式振荡器	101	7.1.3 晶闸管的伏安特性	124
5.3 LC 振荡电路	102	7.1.4 晶闸管的主要参数	125
5.3.1 变压器反馈式振荡电路	102	7.2 晶闸管可控整流电路	125
5.3.2 电感反馈式振荡电路	102	7.3 晶闸管触发电路	127
5.3.3 电容反馈式振荡电路	103	习题	128
5.3.4 石英晶体振荡电路	104	实验与技能操作训练	129

下篇 数字电子技术

第 8 章 逻辑代数基础	131	10.2 常用组合逻辑电路及其芯片	176
8.1 数制与编码	131	10.2.1 加法器与比较器	176
8.1.1 数制及数制间的转换	131	10.2.2 编码器	179
8.1.2 编码	136	10.2.3 译码器	182
8.2 逻辑函数的表示和化简	137	10.2.4 多路开关	186
8.2.1 逻辑函数及其基本运算	137	10.3 组合逻辑电路应用举例	
8.2.2 逻辑函数的公式化简法	140	——数字钟显示电路	190
8.2.3 逻辑函数的卡诺图化简法	142	习题	192
习题	147	实验与技能操作训练	194
第 9 章 基本门电路	149	第 11 章 集成触发器与时序逻辑电路	199
9.1 二极管、晶体管的开关特性	149	11.1 触发器	199
9.1.1 二极管的开关特性	149	11.1.1 RS 触发器及芯片	199
9.1.2 晶体管的开关特性	150	11.1.2 D 触发器及芯片	202
9.2 基本逻辑门电路	151	11.1.3 JK 触发器及芯片	204
9.2.1 分立元件构成的门电路	152	11.1.4 T 触发器	205
9.2.2 常用基本逻辑门电路及其符号	153	11.2 寄存器	206
9.3 集成门电路及其芯片	155	11.2.1 数据寄存器	206
9.3.1 TTL 门电路	155	11.2.2 移位寄存器	207
9.3.2 MOS 门电路	159	11.2.3 集成寄存器芯片	207
9.3.3 常用集成电路芯片	160	11.3 计数器	208
9.4 集成电路使用中的实际问题	162	11.3.1 计数器概述	209
9.4.1 有关集成电路的主要参数		11.3.2 集成异步计数器及芯片	210
及其特性曲线	162	11.3.3 集成同步计数器及芯片	212
9.4.2 集成电路使用中应该注意		11.3.4 任意进制计数器	214
的问题	165	11.4 时序逻辑电路的分析方法	216
习题	168	11.4.1 时序逻辑电路的分类及	
实验与技能操作训练	169	状态描述	216
第 10 章 组合逻辑电路	173	11.4.2 时序逻辑电路的分析步骤	217
10.1 组合逻辑电路的分析与设计	173	11.4.3 时序逻辑电路的分析举例	218
10.1.1 组合逻辑电路的分析	173	11.5 同步时序逻辑电路的设计方法	221
10.1.2 组合逻辑电路的设计	174	习题	223
		实验与技能操作训练	226

第 12 章	脉冲信号的产生与整形	227	第 14 章	数 / 模转换与模 / 数转换	249
12.1	石英晶体多谐振荡器	227	14.1	D/A 转换器	249
12.2	单稳态触发器	228	14.1.1	权电阻 D/A 转换器	249
12.2.1	集成单稳态触发器	228	14.1.2	倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	251
12.2.2	单稳态触发器的应用	228	14.1.3	D/A 转换器的主要技术指标	252
12.3	施密特触发器	229	14.1.4	集成 D/A 转换器芯片	
12.3.1	施密特触发器的功能	229		DAC0832 及其应用	254
12.3.2	集成施密特触发器	229	14.2	A/D 转换器	257
12.3.3	施密特触发器的应用	230	14.2.1	A/D 转换器的基本原理	257
12.4	555 定时器及应用	231	14.2.2	逐次比较型 A/D 转换器	260
12.4.1	555 电路组成	231	14.2.3	双积分型 A/D 转换器	261
12.4.2	工作原理	232	14.2.4	A/D 转换器的主要技术指标	262
12.4.3	555 定时器的典型应用	232	14.2.5	集成 A/D 转换芯片	
习题		234		ADC0809 及其应用	262
实验与技能操作训练		236	习题		264
第 13 章	半导体存储器与可编程逻辑器件	237	实验与技能操作训练		266
13.1	随机存储器	237	第 15 章	课程设计与制作	269
13.1.1	RAM 的基本结构	237	15.1	概述	269
13.1.2	RAM 的存储单元	238	15.2	直流稳压电源的设计	270
13.2	只读存储器	238	15.2.1	课题概述	270
13.2.1	固定 ROM	239	15.2.2	设计任务和要求	270
13.2.2	可编程 ROM	239	15.2.3	设计指导方案	271
13.3	可编程逻辑器件	241	15.2.4	调试方法与步骤	273
13.3.1	PLD 简介	241	15.3	简易数字频率计的设计	274
13.3.2	通用阵列逻辑器件	242	15.3.1	课题概述	274
13.3.3	复杂可编程逻辑器件	242	15.3.2	设计任务和要求	275
13.3.4	现场可编程门阵列	244	15.3.3	设计指导方案	275
习题		245	15.3.4	调试方法与步骤	278
实验与技能操作训练		246			
附录					279
附录 A	半导体器件型号命名方法				279
附录 B	国产半导体集成电路型号命名方法				280
参考文献					283

半导体元件是电子线路的核心元件,只有掌握半导体元器件的结构、性能、工作原理和特点,才能正确分析电子电路的工作原理,正确选择和合理使用半导体元器件。本章主要介绍半导体特点,PN 结的形成及特性,二极管、晶体管、场效应晶体管的结构、工作原理、主要参数以及它们的外部特性和简单的应用电路等。

1.1 半导体基础知识与 PN 结

1.1.1 半导体的特点

1. 半导体的特点

自然界的物质就其导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,其电阻率约为导体的 1 000 亿倍。

半导体是制造晶体管的原料,之所以能得到广泛应用,主要原因并不在于它的电阻率大小,而在于其电阻率随温度、光照以及所含杂质的种类、浓度等条件的不同而出现显著的差别。半导体的导电性能有如下一些显著特点:

- ① 半导体的电阻率随温度上升而明显下降,呈负温度系数的特性。半导体的导电能力随温度上升而显著增加。利用半导体的温度特性,可以把它作为热敏材料制成热敏元件。
- ② 半导体的电阻率随光照的不同而改变。利用半导体的这一特性,可以把它作为光敏材料制成光电器件。
- ③ 半导体的电阻率与所含微量杂质的浓度有很大关系。利用半导体的这一特性,通过工艺手段,可以生产各种性能和用途的半导体器件。

半导体一般分为本征半导体和杂质半导体两种类型。

2. 本征半导体

常用的半导体材料有硅 (Si) 和锗 (Ge)。高纯度的硅和锗都是单晶结构,它们的原子整齐地按一定的规律排列着,原子之间的距离不仅很小,而且是相等的。这种非常纯净的且原子排列整齐的半导体称为本征半导体,图 1.1.1(a)、(b) 所示分别为锗和硅的原子结构示意图。从图中看出,它们最外层电子数都是 4,故称为 4 价元素。正常情况下,它们的原子都呈中性。

在硅、锗制成单晶后,最外层的 4 个价电子不仅受自身原子核束缚,还与其相邻的 4 个原子核相吸引,2 个相邻原子之间共有 1 对价电子,这种结构称为共价键结构,如图 1.1.2 所示。

如果共价键中的价电子受热激发获得足够能量,则可摆脱共价键的束缚而成为自由电子。这个电子原来所在的共价键的位置上就留下一个缺少负电荷的空位,这个空位称为空穴。显然,空穴带正电荷。

在本征半导体中,自由电子和空穴的数量是相同的,称为电子空穴对,本征半导体靠热激发的电子空穴对很少。综上所述,本征半导体有如下特点:

教学课件:
半导体基础知识
与 PN 结



微课: 本征半导体

动画:
本征半导体中的
两种载流子

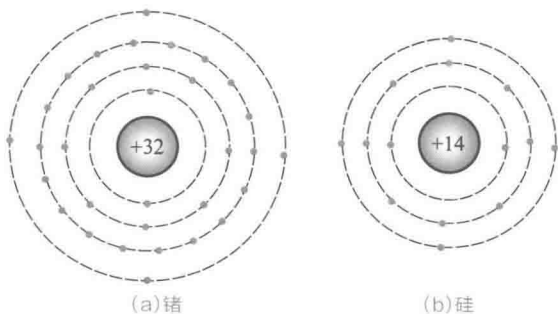


图 1.1.1
锗和硅的原子结构示意图

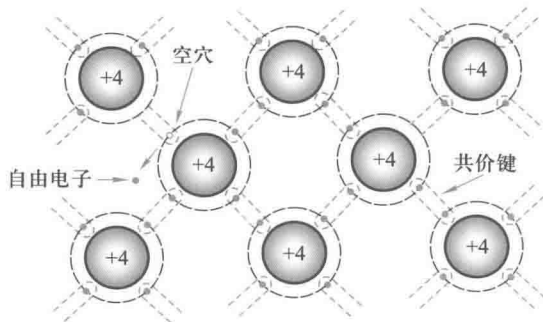


图 1.1.2
锗(硅)原子在晶体中的共价键排列

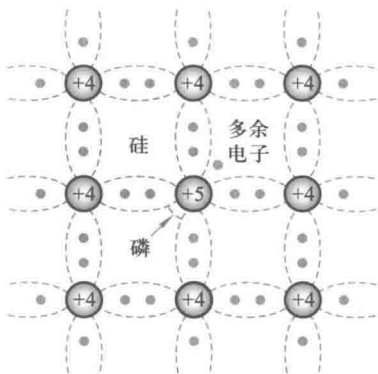


图 1.1.3
N 型半导体

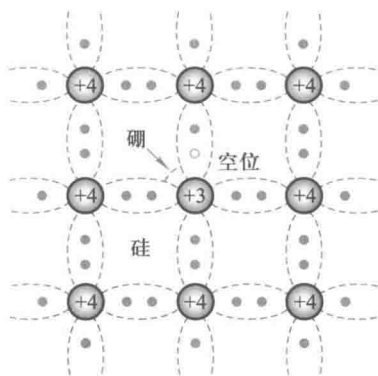


图 1.1.4
P 型半导体

- ① 温度越高，电子空穴对越多。
- ② 电子空穴对的热运动是杂乱无章的，就整体而言，对外不显电性。只有在外电场作用下，电子和空穴运动才具有方向性。

3. 杂质半导体

本征半导体实际使用价值不大，但如果在本征半导体中掺入微量的某种杂质元素，就形成 N 型和 P 型半导体。

(1) N 型半导体

在本征半导体(以硅为例)中掺入少量的 5 价元素，如磷(P)、砷(As)等。磷原子的最外层有 5 个价电子，其中 4 个价电子与相邻硅原子的最外层价电子组成共价键形成稳定结构，多余的电子很容易受激发成为自由电子。掺入磷元素越多，自由电子就越多。这种掺入 5 价元素的半导体称为 N 型半导体，如图 1.1.3 所示。N 型半导体主要靠自由电子导电，因此在这种半导体中，将自由电子称为多数载流子，而空穴数量远少于电子数量，称为少数载流子。

(2) P 型半导体

在本征半导体中掺入 3 价元素如硼(B)，硼原子最外层只有 3 个电子，3 个价电子和相邻的 3 个硅原子形成共价键后，就留下一个空穴，空穴数量增多，自由电子则相对很少，故掺入 3 价元素的半导体称为 P 型半导体，如图 1.1.4 所示。P 型半导体主要靠空穴导电，因此空穴称为多数载流子，而自由电子远少于空穴的数量，称为少数载流子。

注意：不论 N 型半导体还是 P 型半导体都是电中性，对外不显电性。

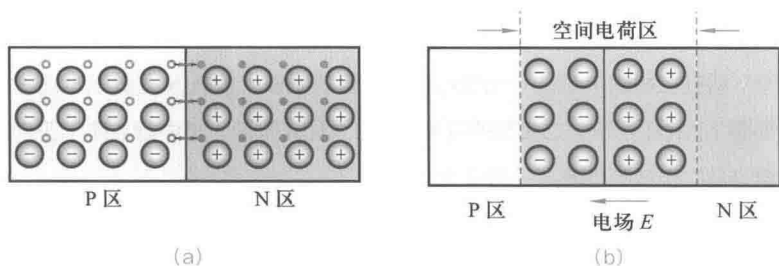
1.1.2 PN 结的形成与特性

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体接触以后，由于交界两侧半导体类型不同，存在电子和空穴的浓度差。这样，P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的电子向 P 区扩散。由于扩散运动，在 P 区和 N 区的接触面就产生正、负离子层。N 区失掉电子产生正离子，P 区得到电子产生负离子。通常称这个正、负离子层为 PN 结，如图 1.1.5(a) 所示。

在 PN 结的 P 区一侧带负电，N 区一侧带正电。PN 结便产生了内电场，内电场的方向从 N 区指向 P 区。内电场对扩散运动起到阻碍作用，电子和空穴的扩散运动随着内电场的加强而逐步减弱，直至达到平衡，在界面处形成稳定的空间电荷区，如图 1.1.5(b) 所示。

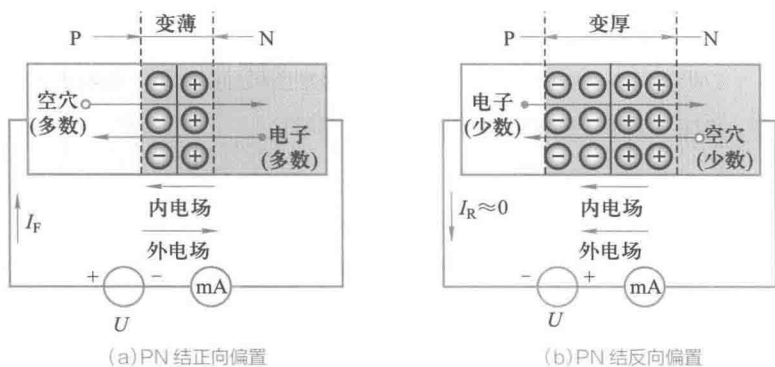
动画：
PN 结的形成

图 1.1.5
PN 结的形成

2. PN 结的特性

(1) PN 结的正向导通特性

给 PN 结加正向电压, 即 P 区接正电源, N 区接负电源, 此时称 PN 结为正向偏置, 如图 1.1.6(a) 所示。

图 1.1.6
PN 结的导电特性

动画:
PN 结的单向导电性

这时 PN 结外加电场与内电场方向相反。外加电场抵消内电场使空间电荷区变薄, 有利于多数载流子运动, 形成正向电流。外加电场越强, 正向电流越大, 这意味 PN 结的正向电阻变小。

(2) PN 结的反向截止特性

给 PN 结加反向电压, 即电源正极接 N 区, 负极接 P 区, 称 PN 结反向偏置, 如图 1.1.6(b) 所示。这时外加电场与内电场方向相同, 使内电场的作用增强, PN 结变厚, 多数载流子运动难以进行, 有助于少数载流子运动, 形成电流 I_R , 少数载流子很少, 所以电流很小, 接近于零, 即 PN 结反向电阻很大。

综上所述, PN 结具有单向导电性, 加正向电压时 PN 结电阻很小, 电流 I_F 较大, 由多数载流子的扩散运动形成; 加反向电压时 PN 结电阻很大, 电流 I_R 很小, 由少数载流子漂移运动形成。



微课: PN 结的
单向导电性

1.2 二极管

一个 PN 结加上相应的外引线, 然后用塑料、玻璃或金属等材料做外壳封装就可以构成最简单的二极管。二极管按所用材料不同分为锗管和硅管。

教学课件:
二极管



微课：二极管结构、类型和应用

1.2.1 二极管的结构和类型

接在二极管 P 区的引出线称为二极管的阳极，接在 N 区的引出线称为二极管的阴极，如图 1.2.1(a) 所示。二极管的符号如图 1.2.1(b) 所示，其中箭头表示正向电流的方向，正向电流从二极管阳极流入，阴极流出。

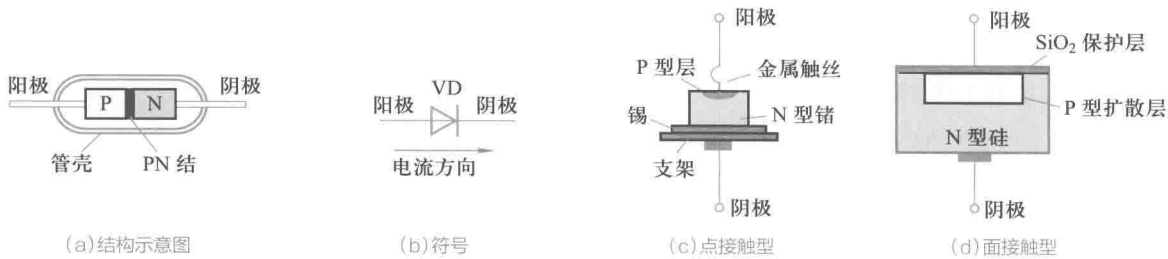


图 1.2.1 二极管的结构和符号

二极管有许多类型：从工艺上分为点接触型和面接触型；按用途分有整流管、检波二极管、稳压二极管、光电二极管和开关二极管等。

1. 点接触型二极管

如图 1.2.1(c) 所示，它是用一根含杂质元素的金属丝压在半导体晶片上，经特殊工艺、方法，使金属触丝上的杂质渗入到晶体中，从而形成导电类型与原晶体相反的区域而构成 PN 结。因为结面积小，所以允许通过的电流小，但结电容小，工作频率高，适合用作高频检波器件。

2. 面接触型二极管

如图 1.2.1(d) 所示，由于面接触型二极管的 PN 结接触面积较大，PN 结电容较大，一般适于在较低的频率下工作。由于接触面积大，允许通过较大电流和具有较大功率容量，适合用作整流器件。

1.2.2 二极管的特性及参数

1. 二极管的伏安特性

既然二极管内部是一个 PN 结，那么它一定具有 PN 结的特性。实际的二极管伏安特性曲线如图 1.2.2 所示。

(1) 正向特性

当二极管承受正向电压很低时，还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子运动的阻挡作用，在这一区段上二极管正向电流 I_F 很小，该区段称为死区。通常，硅材料二极管的死区电压约为 0.5 V，锗材料二极管的死区电压约为 0.2 V。

当正向电压超过死区电压值时，外电场抵消了内电场，正向电流 I_F 随外加电压的增加而明显增大，二极管正向电阻变得很小。当二极管完全导通后，正向压降基本维持不变，称为二极管正向导通压降 U_F ，一般硅管的 U_F 为 0.7 V，锗管的 U_F 为 0.3 V。以上是二极管的正向特性。

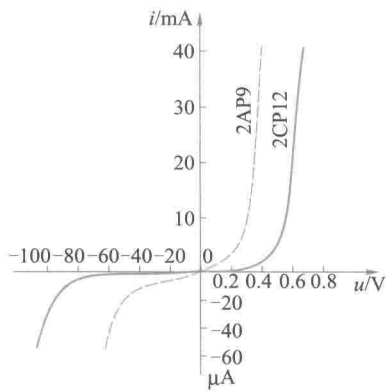


图 1.2.2 二极管伏安特性曲线

(2) 反向特性

当二极管承受反向电压时, 外电场与内电场方向一致, 只有少数载流子的漂移运动, 形成漏电流 I_R 极小, 一般硅管的 I_R 为几微安以下, 锗管 I_R 较大, 通常为几十微安到几百微安。这种特性称为反向截止特性。

当反向电压增大到某一数值时, 反向电流将随反向电压增加而急剧增大, 这种现象称为二极管反向击穿, 击穿时对应的电压称为反向击穿电压。普通二极管发生反向击穿后, 会造成二极管永久性损坏, 失去单向导电性。以上是二极管的反向特性。

二极管伏安特性可以用以下公式表示:

$$I = I_S(e^{U/U_T} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中, U_T 为二极管电压当量, 常温下 $U_T \approx 26 \text{ mV}$, $U > 0$ 为正向特性, $U < 0$ 为反向特性。

2. 二极管的主要参数

二极管的参数是反映二极管性能质量的指标, 在选用二极管时, 必须根据二极管参数合理使用二极管。

二极管的主要参数有:

(1) 最大整流电流 I_{FM}

它是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流值, 用 I_{FM} 表示。工作时, 管子通过的电流不应超过这个数值, 否则将导致管子过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM}

它是指二极管不击穿时所允许加的最高反向电压。 U_{RM} 通常为反向击穿电压的 $1/2 \sim 2/3$, 以确保二极管安全工作。

(3) 最大反向电流 I_{RM}

它是指二极管在常温下承受最高反向工作电压 U_{RM} 时的反向电流, 一般很小, 但其受温度影响较大, 当温度升高时, I_{RM} 显著增大。

(4) 最高工作频率 f_M

它是指保持二极管单向导通性能时外加电压的最高频率。二极管工作频率与 PN 结的极间电容大小有关, 容量越小, 工作频率越高。

二极管的参数很多, 除上述参数外还有结电容、正向压降等, 在实际应用时, 可查阅半导体器件手册。

1.2.3 二极管应用电路的举例

二极管是电子电路中最常用的半导体元器件之一。利用其单向导电性及导通时正向压降很小的特点, 可应用于整流、检波、钳位、限幅、开关以及元件保护等各种电路。

1. 整流

所谓整流就是将交流电变为单方向脉动的直流电。利用二极管的单向导电性可组成单相、三相等各种形式的整流电路。交流电经过整流、滤波、稳压便可获得平稳的直流电。这些内容将在第 6 章详细介绍。



笔记

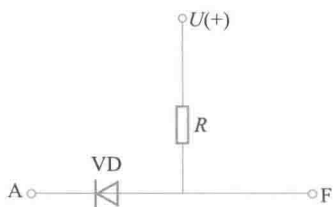
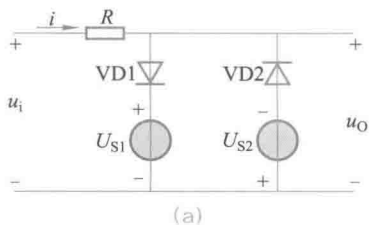
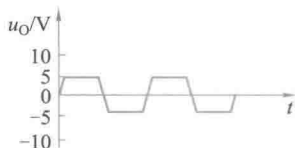
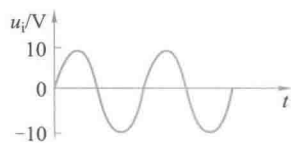


图 1.2.3
二极管钳位电路



(a)



(b)

图 1.2.4
二极管限幅电路及波形

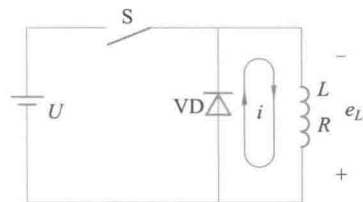
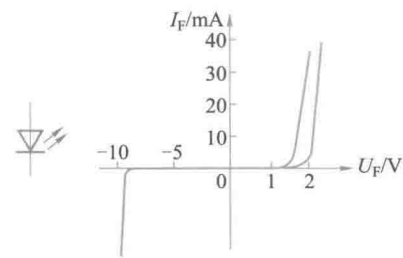


图 1.2.5
二极管保护电路



(a) 符号 (b) 伏安特性曲线

图 1.2.6
发光二极管符号和伏安特性曲线

2. 钳位

利用二极管正向导通时压降很小的特性，可组成钳位电路，如图 1.2.3 所示。

图 1.2.3 中，若 A 点 $U_A=0$ ，二极管 VD 可正向导通，其压降很小，故 F 点的电位也被钳制在 0 V 左右，即 $U_F \approx 0$ 。

3. 限幅

利用二极管正向导通后其两端电压很小且基本不变的特性，可以构成各种限幅电路，使输出电压限幅在某一电压值以内。图 1.2.4(a) 所示为一正负对称限幅电路，设 $u_i=10 \sin \omega t$ V， $U_{S1}=U_{S2}=5$ V。

当 $-U_{S2} < u_i < U_{S1}$ 时，VD1、VD2 都处于反向偏置而截止，因此 $i=0$ ， $u_o=u_i$ 。当 $u_i > U_{S1}$ 时，VD1 处于正向偏置而导通，使输出电压保持在 U_{S1} 。当 $u_i < -U_{S2}$ 时，VD2 处于正向偏置而导通，输出电压保持在 $-U_{S2}$ 。由于输出电压 u_o 被限制在 $+U_{S1}$ 与 $-U_{S2}$ 之间，即 $|u_o| \leq 5$ V，好像将输入信号的高峰和低谷部分削掉一样，因此这种电路又称为削波电路。输出波形如图 1.2.4(b) 所示。

4. 元件保护

在电子线路中，常用二极管来保护其他元器件免受过高电压的损害。如图 1.2.5 所示电路，L 和 R 是线圈的电感和电阻。

在开关 S 接通时，电源 U 给线圈供电，L 中有电流流过，储存了磁场能量。在开关 S 由接通到断开的瞬时，电流突然中断，L 中将产生一个高于电源电压很多倍的自感电动势 e_L ， e_L 与 U 叠加作用在开关 S 的端子上，在 S 的端子上产生电火花放电，这将影响设备的正常工作，开关 S 寿命缩短。接入二极管 VD 后， e_L 通过二极管 VD 产生放电电流 i，使 L 中储存的能量不经过开关 S 放掉，从而保护了开关 S。

除以上用途外，还有许多特殊结构的二极管，例如发光二极管、热敏二极管等。随着半导体技术发展，二极管应用范围越来越广，其中发光二极管是应用较多的一种二极管。

1.2.4 发光二极管及其应用

1. 发光二极管的符号及特性

发光二极管的符号如图 1.2.6(a) 所示。它是一种将电能直接转换成光能的固体器件，简称 LED(Light Emitting Diode)。发光二极管和普通二极管相似，也是由一个 PN 结组成，发光二极管在正向导通时，由于空穴和电子的复合而放出能量，发出一定波长的可见光，光的波长不同，颜色也不同，常见的有红、绿、黄等颜色。发光二极管的驱动电压低、工作电流小，具有很强的抗振动和抗冲击能力、体积小、可靠性高、耗电省和寿命长等优点，广泛用于信号指示等电路中。

发光二极管的伏安特性如图 1.2.6(b) 所示。它和普通二极管的伏安特性相似。只是在开启电压和正向特性的上升速率上略有差异。当所施加正向电压 U_F 未达到开启电压时，正向电流几乎为零，但电压一旦超过开启电压时，电流急剧上升。发光二极管的开启电压通常称为正向电压，它取决于制作材料的禁带宽度。例如 GaAsP 红色的 LED 约为 1.7 V，而 GaP

绿色的 LED 则约为 2.3 V。几种常见的发光材料的主要参数如表 1.2.1 所示。LED 的反向击穿电压一般大于 5 V, 但为使器件长时间稳定而又可靠地工作, 安全使用电压选择在 5 V 以下。

表 1.2.1 发光二极管的主要参数

颜色	波长/nm	基本材料	正向电压/V(10 mA)	光强/mcd (10 mA时, 张角±45°)	光功率/μW
红外	900	GaAs	1.3~1.5		100~500
红	655	GaAsP	1.6~1.8	0.4~1	1~2
鲜红	635	GaAsP	2.0~2.2	2~4	5~10
黄	583	GaAsP	2.0~1.2	1~3	3~8
绿	565	GaP	2.2~2.4	0.5~3	1.5~8

2. 发光二极管的应用

(1) 电源通断指示电路

电源通断指示电路如图 1.2.7 所示。在指示电路中发光二极管通常称为指示灯, 在实际应用中给人们提供了很大的方便。发光二极管的供电电源既可以是直流, 也可以是交流, 但必须注意的是, 发光二极管是一种电流控制器件, 应用中只要保证发光二极管的正向工作电流在所规定的范围之内就可以正常发光。具体的工作电流可查阅有关资料。

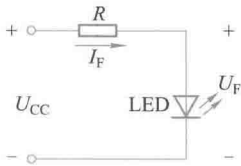
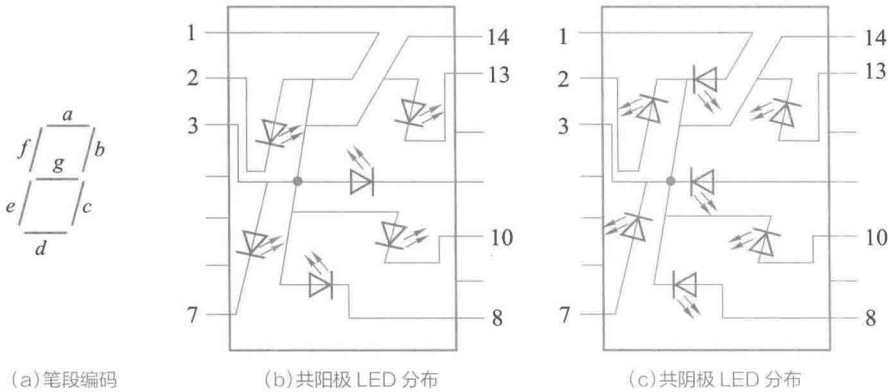


图 1.2.7 电源通断指示电路

(2) 数码管

数码管是电子技术应用的主要显示器件, 数码管就是用发光二极管经过一定的排列组成的, 如图 1.2.8(a) 所示。这是最常用的七段数码显示。要使它显示 0~9 的一系列数字只要点亮其内部相应的显示段即可。七段数码显示有如图 1.2.8(b) 所示的共阳极和如图 1.2.8(c) 所示的共阴极之分。数码管的驱动方式有直流驱动和脉冲驱动两种, 应用中可任意选择。数码管应用十分广泛, 凡是需要指示或读数的场合都可采用数码管显示。

其他的光电器件还有光电二极管、激光二极管等, 读者可以参阅有关资料。



(a) 笔段编码

(b) 共阳极 LED 分布

(c) 共阴极 LED 分布

图 1.2.8 七段数码管

笔记

1.3 晶体管

晶体管是由两个 PN 结、三个电极组成。这两个结靠得很近，工作时相互联系、相互影响，表现出两个单独的 PN 结完全不同的特性，与二极管相比，其功能不同，在电子线路中得到广泛的应用。

1.3.1 晶体管的结构和类型

晶体管是由形成两个 PN 结的三块杂质半导体组成，因杂质半导体仅有 P、N 型两种，所以晶体管的组成形式只有 NPN 型和 PNP 型两种。其结构示意图和符号如图 1.3.1 所示。

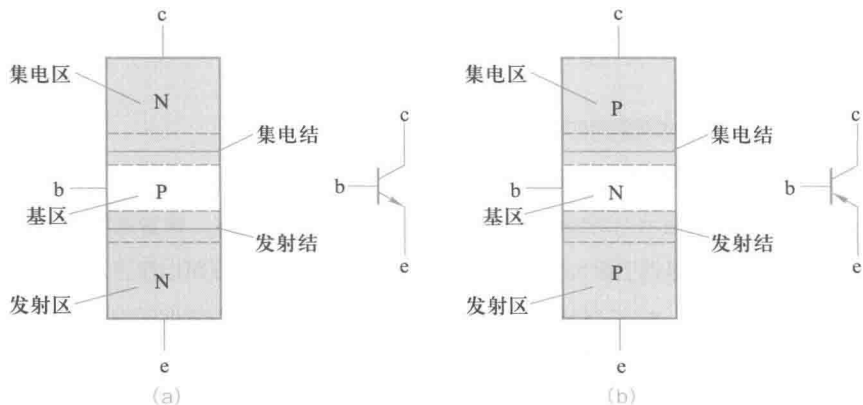


图 1.3.1
晶体管结构示意图和表示符号

无论是 NPN 型还是 PNP 型晶体管，都有三个区，即发射区、基区和集电区。分别从这三个区可以引出发射极 e、基极 b 和集电极 c 三个电极，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。

晶体管的基区很薄，一般仅有 $1\ \mu\text{m}$ 至几十微米厚，发射区浓度很高，集电结截面积大于发射结截面积。

注意：PNP 型和 NPN 型晶体管表示符号的区别是发射结的箭头方向不同，它表示发射结加正向偏置时的电流方向。使用中注意电源的极性，确保发射结加正向偏置电压，晶体管才能正常工作。

晶体管根据基片材料的不同，可以分为锗管和硅管两大类，目前国内生产的硅管多为 NPN 型 (3D 系列)，锗管多为 PNP 型 (3A 系列)；根据频率特性，可以分为高频管和低频管；根据功率大小，可以分为大功率管、中功率管和小功率管。实际应用中采用 NPN 型晶体管较多，所以下面以 NPN 型晶体管为例讨论，所得结论对于 PNP 型晶体管同样适用。

1.3.2 晶体管电流分配和放大作用

为了定量地分析晶体管的电流分配关系和放大原理，下面先介绍一个实验，实验电路如图 1.3.2 所示。

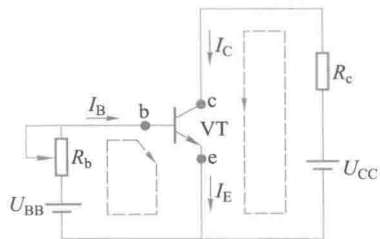


图 1.3.2
晶体管实验电路

加电源电压 U_{BB} 时发射结承受正向偏置电压，而电源 $U_{CC} > U_{BB}$ ，使集电结承受反向偏置

电压, 这样可以使晶体管具有正常的电流放大作用。

改变电阻 R_b , 基极电流 I_b 、集电极电流 I_c 和发射极电流 I_e 都会发生变化, 表 1.3.1 为实验所得的一组数据。

表 1.3.1 晶体管各极电流实验数据

$I_b/\mu\text{A}$	0	20	30	40	50	60
I_c/mA	≈ 0	1.4	2.3	3.2	4	4.7
I_e/mA	≈ 0	1.42	2.33	3.24	4.05	4.76
I_c/I_b	0	70	76	80	80	78

将表中数据进行比较分析, 可得出如下结论:

- ① $I_e = I_c + I_b$, 三个电流之间的关系符合基尔霍夫电流定律。
- ② $I_c \approx I_e$, I_b 虽然很小, 但对 I_c 有控制作用, I_c 随 I_b 改变而改变。例如, 当 I_b 由 $40 \mu\text{A}$ 增加到 $50 \mu\text{A}$ 时, I_c 从 3.2 mA 增加到 4 mA , 即

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{(4 - 3.2) \times 10^{-3} \text{ A}}{(50 - 40) \times 10^{-6} \text{ A}} = 80$$

β 称为晶体管电流放大系数, 它反映晶体管电流放大能力, 也可以说电流 I_b 对 I_c 的控制能力。

晶体管电流之间为什么具有这样的关系呢? 可以通过晶体管内部载流子的运动规律来解释。

1. 发射区向基区发射电子

由图 1.3.3 可知, 电源 U_{BB} 经过电阻 R_b 加在发射结上, 发射结正偏, 发射区的多数载流子——自由电子不断地越过发射结而进入基区, 形成发射极电流 I_e 。同时基区多数载流子也向发射区扩散, 但由于基区多数载流子浓度远远低于发射区载流子浓度, 可以不考虑这个电流。因此, 可以认为晶体管发射结电流主要是电子流。

2. 基区中电子的扩散与复合

电子进入基区后, 先在靠近发射结的附近密集, 渐渐形成电子浓度差, 在浓度差的作用下, 促使电子流在基区中向集电结扩散, 被集电结电场拉入集电区, 形成集电极电流 I_c 。也有很小一部分电子 (因基区很薄) 与基区的空穴复合。扩散的电子流与复合电子流之比例决定了晶体管的放大能力。

3. 集电区收集电子

由于集电结外加反向电压很大, 这个反向电压产生的电场力将阻止集电区电子向基区扩散, 同时将扩散到集电结附近的电子拉入集电区而形成集电极主电流 I_{cN} 。另外集电区的少数载流子——空穴也会产生漂移运动, 流向基区形成反向饱和电流, 用 I_{cBO} 来表示, 其数值很小, 但对温度却非常敏感。

以上分析的是 NPN 型晶体管的电流放大原理, 对于 PNP 型晶体管, 其工作原理相同,

笔记

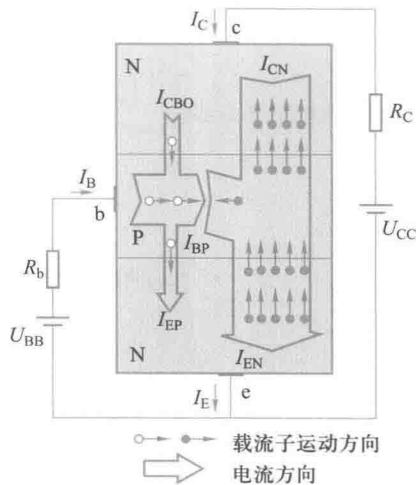


图 1.3.3 晶体管内部载流子运动规律

动画:
晶体管内部
载流子运动