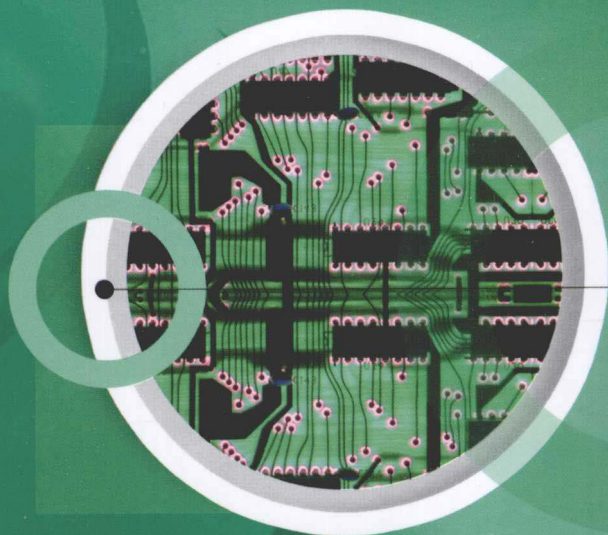




普通高等教育“十二五”规划教材

电子技术

◎ 曹洁 张爱华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书符合教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》，主要内容包括模拟电子技术、数字电子技术和 EDA 技术三部分。全书共 9 章，包括：晶体二极管及其应用，晶体管及其基本放大电路，集成运算放大电路，正弦波振荡电路，直流稳压电路，门电路和组合逻辑电路，时序逻辑电路，数/模、模/数转换器，可编程逻辑器件。除第 9 章外，其余各章都配有思考题和习题。本书可与《电工技术》配合使用，作为高等学校非电类专业“电工学”课程教材及参考书，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术/曹洁, 张爱华主编. —北京: 机械工业出版社, 2012.6
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-38589-9

I. ①电… II. ①曹…②张… III. ①电子技术—高等学校—教材
IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 114951 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王保家 责任编辑: 王保家 王小东 卢若薇

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16.5 印张·404 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-38589-9

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

电工电子技术发展非常迅速,其应用范围日益广泛。面对近年来工科院校对非电专业电类课程学时及课程门类增加的趋势,依据“基础理论实、专业口径宽、工程能力强、综合素质高”的人才培养目标和不同专业的需要,本书在作者多年来从事电工学教学和教学研究的基础上编写而成。

本书符合教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的《电子电气基础课程教学基本要求》,同时突出各项内容的基础性、综合性、应用性和相互独立性。全书共分9章,包括模拟电子技术、数字电子技术和EDA技术三部分内容。本书对电子技术的基本理论、基本方法和基本技能方面的内容进行了精选,安排合理紧凑,深入浅出,注重应用,便于自学。

第1~5章为模拟电子技术部分。第1、2章的编写按照先器件后电路的特点,做到器件与电路结合,重在应用。第3章侧重于集成运算放大电路的应用,特别是在信号运算和信号处理方面的应用,还列举了一些应用实例,以供感兴趣和学有余力的学生阅读。第4章通过分析正弦波振荡产生及稳定的原理,重点介绍几种典型的振荡电路,并通过应用实例引导学生理解振荡电路的原理。第5章按照学生对知识的认知过程由浅入深,重点介绍小功率直流稳压电源的滤波和稳压电路,并对DC/DC集成芯片及应用做了简要介绍。

第6~8章为数字电子技术部分。第6、7章在门电路、组合逻辑电路和时序逻辑电路的讨论中,加强理论联系实际,增加了一些应用举例和实际电路,在加强典型集成电路芯片的应用的同时,增加了常用TTL门电路的类型、常用TTL集成中规模逻辑电路和常用集成时序逻辑电路的引脚和功能介绍,并且增加了相应的应用举例,以方便读者在后续的学习中及时查阅和参考,从而赋予教材延展性,使它同时具有小型工具书的功能。第8章介绍D/A、A/D信号的转换过程,并对常用的集成芯片做了简要介绍。

第9章为EDA技术部分。介绍可编程逻辑器件的结构、分类和工作原理,CPLD和FPGA产品和器件选择,EDA设计方法及其优点,以及Quartus II软件使用方法。

针对众多非电类专业对电工学课程内容的要求不一的特点,本书将选学以及参考内容用“*”标出,以供教学时选用。

本书力求概念准确、讲述清楚,并有较丰富的例题、思考题和习题,适用于非电类专业本科大学生,也可供相关工程技术人员参考。

本书由曹洁、张爱华任主编。第1、2章由王强、黄玲和马永炜编写,第3、4章由黄玲编写,第6、7章由余亚冰编写,第5、8章由张冬梅编写,第9章由张爱华和杨富龙编写;全部插图由杜先君和余亚冰绘制。全书由张兆琨教授审阅。

由于水平有限,不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

于兰州理工大学

目 录

前言

第 1 章 晶体二极管及其应用 1

- 1.1 半导体基本知识 1
 - 1.1.1 半导体的导电特性 1
 - 1.1.2 本征半导体 2
 - 1.1.3 N 型半导体和 P 型半导体 3
- 1.2 PN 结及其单向导电性 4
 - 1.2.1 PN 结的形成 5
 - 1.2.2 PN 结的单向导电性 5
- 1.3 晶体二极管 6
 - 1.3.1 基本结构 6
 - 1.3.2 伏安特性 7
 - 1.3.3 主要参数 8
 - 1.3.4 基本应用 8
- 1.4 特殊二极管 10
 - 1.4.1 稳压管 10
 - 1.4.2 发光二极管 12
 - 1.4.3 光敏二极管 13
- 习题 14

第 2 章 晶体管及其基本放大电路 17

- 2.1 晶体管 17
 - 2.1.1 基本结构及其类型 17
 - 2.1.2 电流分配和放大原理 18
 - 2.1.3 特性曲线 20
 - 2.1.4 主要参数 22
- 2.2 基本放大电路 25
 - 2.2.1 共发射极基本放大电路的组成及基本原理 25
 - 2.2.2 放大电路的静态分析 27
 - 2.2.3 放大电路的动态分析 30
- 2.3 静态工作点的稳定 37
 - 2.3.1 稳定静态工作点的原理 38
 - 2.3.2 静态工作点的计算 39
 - 2.3.3 动态分析 39
- 2.4 共集电极放大电路（射极输出器） 41
 - 2.4.1 静态分析 42

- 2.4.2 动态分析 42

2.5 多级放大电路 46

- 2.5.1 多级放大电路的级间耦合方式 46
- 2.5.2 多级放大电路的基本分析方法 47
- * 2.6 放大电路的频率特性 49
- 2.7 放大电路中的负反馈 51
 - 2.7.1 反馈的基本概念 51
 - 2.7.2 反馈性质的判断 52
 - 2.7.3 反馈电路的组态与判定 54
 - 2.7.4 负反馈对放大电路工作性能的影响 57

2.8 功率放大电路 59

- 2.8.1 功率放大电路的特点和分类 59
- 2.8.2 互补对称功率放大电路 61
- 2.8.3 集成功率放大电路 63
- * 2.9 场效应晶体管及其放大电路 65
 - 2.9.1 绝缘栅场效应晶体管 65
 - 2.9.2 绝缘栅场效应晶体管放大电路 69
- 习题 70

第 3 章 集成运算放大电路 76

- 3.1 差分式放大电路 76
 - 3.1.1 直接耦合放大电路 76
 - 3.1.2 差分式放大电路的结构及工作原理 77
 - 3.1.3 典型差分式放大电路 79
 - 3.1.4 差分式放大电路的输入输出方式 81
- 3.2 集成运算放大电路简介 82
 - 3.2.1 集成运算放大电路的组成 83
 - 3.2.2 集成运算放大电路的主要参数 83
 - 3.2.3 理想运算放大电路及其分析依据 85
- 3.3 集成运算放大电路在信号运算方面的应用 87
 - 3.3.1 比例运算 87
 - 3.3.2 加法运算 89
 - 3.3.3 减法运算 90

3.3.4 积分运算	91	第5章 直流稳压电路	120
3.3.5 微分运算	92	5.1 整流电路	120
3.4 集成运算放大电路中的负反馈	93	5.1.1 单相半波整流电路	120
3.4.1 并联电压负反馈	93	5.1.2 单相桥式整流电路	121
3.4.2 串联电压负反馈	94	5.2 滤波电路	123
3.4.3 串联电流负反馈	94	5.2.1 电容滤波电路	123
3.4.4 并联电流负反馈	95	5.2.2 电感电容滤波电路	125
3.5 集成运算放大电路在信号处理方面 的应用	97	5.2.3 π 形滤波电路	126
3.5.1 有源滤波器	97	5.3 稳压电路	126
3.5.2 采样保持电路	99	5.3.1 稳压管稳压电路	126
3.5.3 电压比较器	100	5.3.2 恒压源	128
* 3.6 集成运算放大电路在波形产生方 面的应用	101	5.3.3 串联型稳压电路	128
3.6.1 矩形波发生器	101	5.3.4 三端集成稳压器及其应用	129
3.6.2 三角波发生器	102	5.3.5 DC/DC 电源变换器及应用 简介	132
3.6.3 锯齿波发生器	103	习题	135
* 3.7 集成运算放大电路应用举例	103	第6章 门电路和组合逻辑电路	137
3.7.1 监控报警电路	103	6.1 逻辑函数及其化简	137
3.7.2 定时器电路	104	6.1.1 基本逻辑关系及其门电路	137
3.7.3 温度检测控制器	104	6.1.2 逻辑函数的表示方法	140
3.8 集成运算放大电路的使用	105	6.1.3 逻辑函数的化简	143
3.8.1 合理选用器件型号	105	6.2 TTL 门电路	146
3.8.2 消振	105	6.2.1 TTL 与非门电路	147
3.8.3 调零	105	6.2.2 TTL 三态与非门电路	150
3.8.4 保护措施	106	* 6.2.3 集电极开路与非门电路	150
习题	106	* 6.3 CMOS 门电路	151
第4章 正弦波振荡电路	111	6.3.1 CMOS 非门电路	152
4.1 正弦波振荡电路的基本原 理——自激振荡	111	6.3.2 CMOS 与非门电路	152
4.1.1 自激振荡的条件	111	6.3.3 CMOS 或非门电路	152
4.1.2 振荡的建立与稳定	112	6.4 组合逻辑电路的分析与设计	153
4.1.3 正弦波振荡电路的组成	112	6.4.1 组合逻辑电路的分析	153
4.2 LC 振荡电路	113	6.4.2 组合逻辑电路的设计	155
4.2.1 变压器反馈式 LC 振荡电路	113	6.5 常用集成组合逻辑电路及其应用	157
4.2.2 电感三点式振荡电路	114	6.5.1 加法器	157
4.2.3 电容三点式振荡电路	114	6.5.2 编码器	159
* 4.2.4 应用举例——半导体接近 开关	115	6.5.3 译码器和数字显示	161
4.3 RC 振荡电路	116	* 6.6 集成组合逻辑电路应用举例	164
4.3.1 RC 网络的选频作用	116	6.6.1 数据选择器	164
4.3.2 桥式 RC 振荡电路	117	6.6.2 数据选择器的应用	166
习题	118	6.6.3 数据分配器	167
		* 6.7 其他常用集成电路简介	168
		6.7.1 TTL 门电路的主要类型	168
		6.7.2 TTL 集成中规模逻辑电路	169

习题	172	8.1.3 D/A 转换器的主要技术指标	212
第 7 章 时序逻辑电路	175	8.1.4 集成 D/A 转换器的应用	213
7.1 双稳态触发器	175	8.2 模/数转换器	214
7.1.1 RS 触发器	175	8.2.1 双积分型 A/D 转换器的原理和 特点	215
7.1.2 主从 JK 触发器	177	8.2.2 逐次逼近型 A/D 转换器的原理 和特点	216
7.1.3 D 触发器和 T 触发器	179	8.2.3 A/D 转换器的主要技术指标	218
7.1.4 触发器功能的转换	180	8.2.4 集成 A/D 转换器简介	218
7.2 寄存器	181	习题	220
7.2.1 数码寄存器	182	第 9 章 可编程逻辑器件	221
7.2.2 移位寄存器	182	9.1 可编程逻辑器件简介	221
7.3 计数器	185	9.1.1 PLD 的发展历程	221
7.3.1 二进制计数器	185	9.1.2 PLD 的结构与分类	222
7.3.2 十进制计数器	187	9.2 CPLD 和 FPGA	225
7.3.3 任意进制计数器	189	9.2.1 CPLD 的结构和工作原理	225
7.3.4 集成计数器及其应用	191	9.2.2 FPGA 的结构和工作原理	227
7.4 555 定时器及其应用	196	9.2.3 CPLD 和 FPGA 产品及器件的 选用	229
7.4.1 555 定时器的结构及工作 原理	196	9.3 EDA 技术简介	231
7.4.2 由 555 定时器构成的单稳态 触发器	197	9.3.1 EDA 技术及其发展	231
7.4.3 由 555 定时器构成的多谐振 荡器	199	9.3.2 EDA 设计方法及优点	232
* 7.5 常用集成时序逻辑电路简介	202	9.3.3 硬件描述语言 VHDL	233
7.5.1 集成电路 D 触发器	202	9.4 Quartus II 软件简介	241
7.5.2 集成电路移位寄存器	202	9.4.1 Quartus II 软件的特点和设计 流程	241
7.5.3 集成电路计数器	203	9.4.2 Quartus II 软件的使用方法	243
习题	204	附录	252
第 8 章 数/模、模/数转换器	208	附录 A 半导体分立器件型号命名方法	252
8.1 数/模转换器	208	附录 B 常用半导体分立器件的型号及 参数	253
8.1.1 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器 的原理和特点	209	参考文献	255
8.1.2 权电流型 D/A 转换器的原理 和特点	210		

第 1 章 晶体二极管及其应用

本章首先介绍半导体基本知识，包括本征半导体的原子结构、两种载流子、杂质半导体，以及 PN 结的形成及其单向导电性，而 PN 结又是构成各种半导体器件的共同基础。在此基础上讲述晶体二极管、稳压管的基本结构、工作原理、伏安特性、主要参数及基本应用。最后，对发光二极管和光敏二极管进行了简单的阐述。

1.1 半导体基本知识

1.1.1 半导体的导电特性

物质按照导电能力的差别可分为导体、半导体和绝缘体三类。自然界中很容易导电的物质称为导体，金属一般都是导体。有的物质几乎不导电，称为绝缘体，如橡胶、陶瓷、塑料和石英等。另有一类物质的导电特性处于导体和绝缘体之间，称为半导体，如硅、锗、硒、砷化镓以及大多数金属氧化物和硫化物，都是半导体。常用的半导体材料有：元素半导体，如硅（Si）和锗（Ge）等；化合物半导体，如砷化镓（GaAs）等。导体的电阻率在 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下；如铜的电阻率为 $1.67 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ；绝缘体的电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上；半导体的电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。与导体的电阻率相比较，半导体的电阻率有下面的特点。

1. 对温度反应灵敏

导体的电阻率随温度的升高略有升高，如温度从 20°C 每增加 1°C ，铜的电阻率仅增加 0.4% 左右，但半导体的电阻率则随温度的上升而急剧下降，如纯锗，温度从 20°C 上升到 30°C 时，电阻率降低 50% 左右。此特性为半导体的热敏性。

热敏性：当环境温度升高时，导电能力显著增强。利用此特性就做成了各种热敏电阻。

2. 光照可以改变电阻率

有些半导体（如硫化镉）受到光照时，其导电能力会变得很强；当无光照时，又变得像绝缘体那样不导电，而金属的电阻率则不受光照的影响。此特性为半导体的光敏性。

光敏性：当受到光照时，导电能力明显变化。利用此特性就做成了各种光敏电阻，如光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管等。

3. 杂质的影响显著

金属中含有少量杂质时，其电阻率不会发生显著变化，但是，极微量的杂质掺在半导体中，会引起电阻率的极大变化。例如在纯硅中加入百万分之一的硼，就可以使硅的电阻率从 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 急剧减少到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右。此特性为半导体的掺杂性。

掺杂性：在纯净的半导体中掺入某些杂质，导电能力明显改变。利用此特性就做成了各种不同用途的半导体器件，如晶体二极管、晶体管、晶闸管、场效应晶体管等。

温度、光照、杂质对半导体电阻率的上述控制作用是制作各种半导体器件的物理基础。

1.1.2 本征半导体

完全纯净的、具有完整晶体结构的半导体，称为本征半导体。

纯净的半导体其所有的原子基本上整齐排列，形成晶体结构，所以半导体制成的器件也称为晶体二极管、晶体三极管等。晶体中原子的排列方式如图 1.1 所示。

晶体中原子以共价键结合，共价键中的两个电子，称为价电子。应用最多的本征半导体为锗和硅。硅（Si）和锗（Ge）的原子结构如图 1.2 所示，其最外层原子轨道上有四个价电子，都是四价元素。在本征半导体的晶体结构中，相邻两个原子的价电子相互共有，即每个原子的四个价电子既受自身原子核的束缚，又为相邻的四个原子所共有；每两个相邻原子之间都共有一对价电子。这种组合方式称为共价键结构，单晶硅中共价键结构的平面示意图如图 1.3 所示。

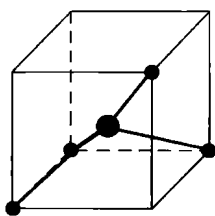


图 1.1 晶体中原子的排列方式

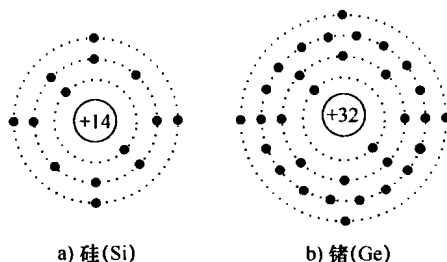


图 1.2 硅和锗的原子结构

在共价键结构中，每个原子的最外层虽然具有八个电子而处于较为稳定的状态，但是共价键中的价电子并不像绝缘体中的电子被束缚得那样紧，价电子在获得一定能量（温度升高或受光照）后，即可脱离共价键束缚成为自由电子（带负电）。

当一部分价电子挣脱共价键的束缚（电子受到激发）而成为自由电子后，共价键中就留下相应的空位，这个空位被称为空穴。原子因失去一个价电子而带正电，也可以说空穴带正电。在本征半导体中，电子与空穴总是成对出现的，它们被称为电子空穴对，如图 1.4 所示。

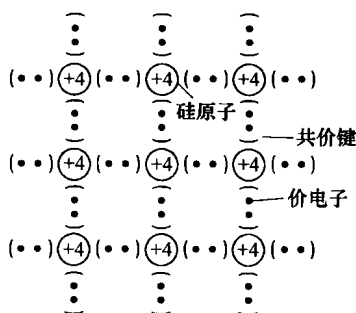


图 1.3 单晶硅中共价键结构的平面示意图

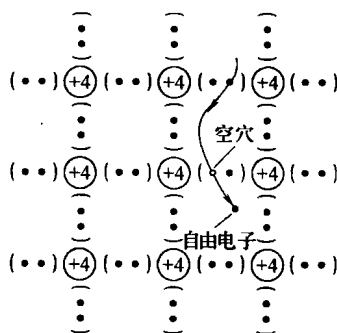


图 1.4 电子空穴对的形成

如果在本征半导体两端加上外电场，半导体中将出现两部分电流：一是自由电子产生定向移动，形成电子电流；二是由于空穴的存在，价电子将按一定的方向依次填补空穴，也即空穴产生定向移动（相当于正电荷的移动），形成空穴电流。所以说，半导体中同时存在着两种导电粒子——自由电子和空穴，这是半导体导电的特殊性质，也是半导体与金属在导电

机理上的本质区别。

自由电子和空穴都称为载流子。

因此，当半导体两端加上外电压时，载流子定向运动（漂移运动），在半导体中将出现两部分电流，即自由电子作定向运动形成的电子电流和价电子递补空穴运动形成的空穴电流。

温度越高，晶体中产生的自由电子便越多，载流子的数目越多，半导体的导电性能也就越好。所以，温度对半导体器件性能影响很大。

受热或光照产生自由电子和空穴的现象称为热激发，自由电子在运动中遇到空穴后，两者同时消失，称为复合。自由电子和空穴成对地产生的同时，又不断复合。在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，半导体中载流子便维持在一定的数目上。

1.1.3 N型半导体和P型半导体

在本征半导体中，如果掺入微量的杂质（某些特殊元素），将使掺杂后的半导体（杂质半导体）的导电能力显著改变。根据掺入杂质性质的不同，杂质半导体分为电子型半导体（N型半导体）和空穴型半导体（P型半导体）两大类。

1. N型半导体

若在纯净的硅（或锗）晶体中掺入微量的五价元素（如磷），这样，硅原子占有的某些位置会被掺入的微量元素（如磷）原子所取代，而整个晶体结构基本不变。磷原子与硅原子组成共价键结构只需四个价电子，而磷原子的最外层有五个价电子，多余的那个价电子不受共价键束缚，只需获得很少的能量就能成为自由电子。由此可见，掺入一个五价元素的原子，就能提供一个自由电子。必须注意的是，产生自由电子的同时并没有产生空穴，但由于热运动原有的晶体仍会产生少量的电子空穴对。

在本征半导体中掺入微量的五价元素，可以得到大量的自由电子，且自由电子数目远比掺杂前的电子空穴对数目多得多，使得这种杂质半导体的导电方式是以自由电子为主。以自由电子导电为主要导电方式的杂质半导体称为电子型半导体，简称N型半导体。N型半导体中存在着大量的自由电子，这就提高了电子与空穴的复合机会，相同温度下空穴的数目比掺杂前要少。所以，在N型半导体中，电子是多数载流子（简称多子），空穴是少数载流子（简称少子），如图1.5a所示。N型半导体主要靠自由电子导电，掺入的杂质浓度越高，自由电子数目越大，导电能力也就越强。

在N型半导体中，一个杂质原子提供一个自由电子（称为施主杂质），当杂质原子失去一个电子后，就变为固定在晶格中不能移动的正离子，但它不是载流子。因此，N型半导体就可用正离子和与之数量相等的自由电子去表示，如图1.5b所示。其中，有少量由热激发产生的电子空穴对。

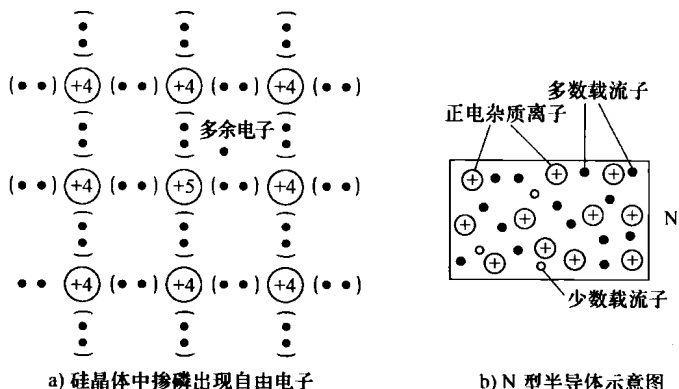


图1.5 单晶硅中掺五价元素形成N型半导体

2. P 型半导体

在纯净的硅（或锗）晶体内掺入微量的三价元素硼（或铟），因硼原子的最外层有三个价电子，当它与周围的硅原子组成共价键结构时，会因缺少一个电子而在晶体中产生一个空穴，掺入多少三价元素的杂质原子，就会产生多少空穴。因此，这种半导体将以空穴导电为其主要导电方式，称为空穴型半导体，简称 P 型半导体。所以，P 型半导体是空穴为多子、电子为少子的杂质半导体，如图 1.6a 所示。必须注意的是，产生空穴的同时并没有产生新的自由电子，但原有的晶体仍会产生少量的电子空穴对。

在 P 型半导体中，一个三价元素的杂质原子产生一个空穴，杂质原子产生的空穴很容易被相邻共价键中的电子来填补，这样，杂质原子就会因获得一个电子而带负电荷（称为受主杂质），成为带有负电荷的杂质离子。因此，P 型半导体可以用带有负电荷而不能运动的杂质离子和与之数量相等的空穴去表示，如图 1.6b 所示。其中，也有少量由热激发产生的电子空穴对。P 型半导体主要靠空穴导电，掺入的杂质浓度越高，空穴数目越大，导电能力也就越强。

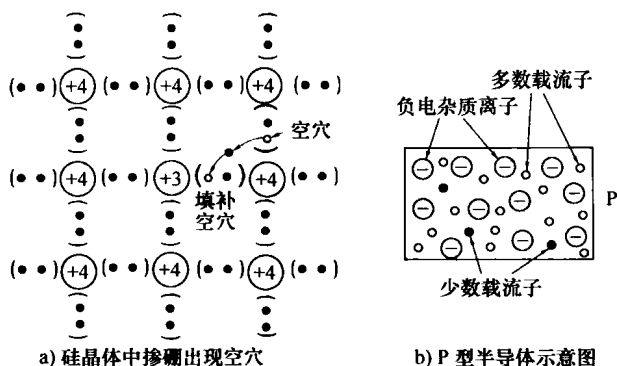


图 1.6 单晶硅中掺三价元素形成 P 型半导体

无论 N 型半导体还是 P 型半导体，它们都是中性的，虽然它们都有一种载流子占多数，但是整个晶体对外并不显电性。

从以上分析可知，不论是 N 型半导体还是 P 型半导体，它们的导电能力是由多子的浓度决定的。可以认为，多子的浓度约等于掺杂原子的浓度，它受温度的影响很小。

思考与练习

1. 半导体导电的主要特征是什么？它与金属导体导电机理有何区别？
2. 电子导电和空穴导电有何区别？空穴电流是不是由自由电子递补空穴所形成的？
3. N 型半导体和 P 型半导体各有什么特点？
4. N 型半导体和 P 型半导体中的多数载流子和少数载流子是怎样产生的？它们的数量各由什么因素控制？为什么杂质半导体中少数载流子的浓度比本征载流子的浓度小？
5. N 型半导体中的自由电子多于空穴，而 P 型半导体中的空穴多于自由电子，是否 N 型半导体带负电，而 P 型半导体带正电？

1.2 PN 结及其单向导电性

在一块硅片上采用不同的掺杂工艺，一边形成 N 型半导体，一边形成 P 型半导体，则在 P 型半导体和 N 型半导体交界面就形成一个特殊的薄层，称做 PN 结；PN 结是构成各种半导体器件的基础。

1.2.1 PN 结的形成

在一块硅或锗的晶片上,采取不同的掺杂工艺,分别形成N型半导体区(N区)和P型半导体区(P区)。N区的多子为电子(即电子浓度高),少子为空穴(即空穴浓度低),而P区正相反,多子为空穴(即空穴浓度高),少子为电子(即电子浓度低);在P区与N区的交界面两侧,由于浓度的差别,P区的空穴要向N区扩散,N区的自由电子要向P区扩散。这种由于浓度的差别而引起的运动称为扩散运动。由于扩散运动,在P区留下了一些带负电荷的杂质离子,在N区留下了一些带正电荷的杂质离子,从而形成一个很薄的空间电荷区。这个空间电荷区就是所谓的PN结。在空间电荷区内,多子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗尽了,因此空间电荷区有时又称为耗尽区。在这个区域内,只有不能移动的杂质离子而没有载流子,所以空间电荷区具有很高的电阻率,对载流子的通过有较强的阻碍作用,又称为阻挡层。PN结的形成如图1.7所示。

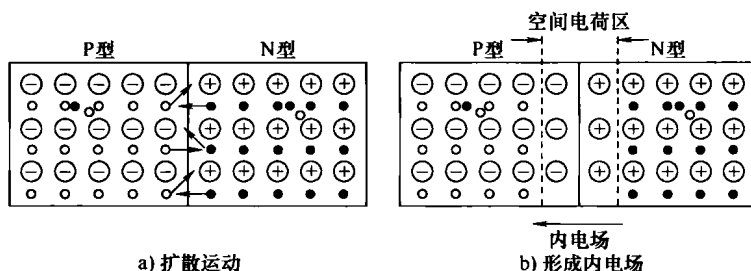


图 1.7 PN 结的形成

空间电荷区形成了一个从带正电荷的N区指向带负电荷的P区的电场,称为内电场。一方面,由于内电场的作用,不论是P区的多子空穴,还是N区的多子电子,在扩散过程中通过空间电荷区时,都要受到阻力,内电场阻止多子的继续扩散,而且随着扩散运动的进行,空间电荷区将不断变宽,内电场将不断加强,扩散运动将不断减弱。另一方面,由于内电场的存在,使少子产生漂移运动,P区少子电子向N区漂移,N区的少子空穴向P区漂移。这种少子在内电场作用下产生的定向运动称为漂移运动。不论是P区的少子电子,还是N区的少子空穴,在内电场作用下向对方漂移的结果,都会导致空间电荷区变窄,内电场削弱。

由此可见,在P区与N区的交界面进行着两种相反的运动,即扩散运动和漂移运动。开始时,多子的扩散运动占优势;随着扩散运动的进行,内电场不断加强,迫使扩散运动逐渐减弱;随后,内电场的加强更有利于少子的漂移运动;而在一定温度下,少子的数目是有限的,在交界面进行的两种相反的运动——扩散与漂移,最终会达到动态平衡;这时,空间电荷区的宽度将不再变化,内电场将维持在某一稳定的状态。

1.2.2 PN 结的单向导电性

1. PN 结加正向电压 (正向偏置)

若在PN结两端外加电压,将会破坏PN结原有的平衡。如图1.8a所示,P区接电源正极,N区接电源负极,由于外电场的方向与内电场的方向相反,在外电场的作用下,P区的空穴要向N区移动,与一部分杂质负离子中和,同样,N区的电子也要向P区移动,与一

部分杂质正离子中和。结果使空间电荷区变窄，内电场被削弱，有利于多子的扩散运动，形成较大的正向电流。在一定范围内，外加电压越高，外电场越强，空间电荷区就越窄，扩散运动所形成的正向电流也越大。因此，加正向电压时，PN 结呈低电阻而处于导通状态。空穴与电子虽然带有不同极性的电荷，但由于它们运动的方向相反，形成的电流方向是一致的，PN 结的正向电流为空穴电流和电子电流两部分之和。电流方向由 P 区指向 N 区。

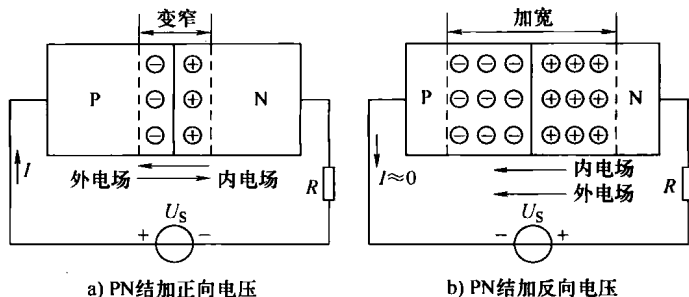


图 1.8 PN 结加正向电压与加反向电压

2. PN 结加反向电压（反向偏置）

若外接电压方向相反，即如图 1.8b 所示，N 区接电源正极，P 区接电源负极，则外电场方向与内电场方向一致。外电场加强了内电场，结果阻止多子的扩散，有利于少子的漂移运动，使空间电荷增加，空间电荷区变宽。P 区的少数电子和 N 区的少数空穴都会向对方漂移而形成反向电流（由 N 区指向 P 区）。因少子的数量很少，所以反向电流一般很小。因此，在 PN 结外加反向电压时，PN 结呈高阻状态而处于反向截止。但是由于少子的数目受温度的影响很大，温度越高，少子的数目就越多，反向电流就会相应增大。

由此看来，PN 结正向电阻较小，反向电阻很大，具有单向导电性，但反向电流受温度的影响很大。

思考与练习

1. 既然空间电荷区是由带正负电荷的离子形成的，为什么它的电阻率却很高？
2. PN 结的正向电流与反向电流是如何形成的？为什么反向电流很小但受温度的影响却很大？

1.3 晶体二极管

1.3.1 基本结构

将 PN 结的两端加上电极引线并用外壳封装，就组成了一只晶体二极管。由 P 区引出的电极为正极（又称阳极），由 N 区引出的电极为负极（又称阴极）。常见的二极管结构及图形符号如图 1.9 所示。

二极管可分为点接触型、面接触型和硅平面型等类型。按所用半导体材料，有硅二极管和锗二极管等。点接触型二极管（一般为锗管）的特点如下：PN 结面积小，结电容小，因此只能通过较小的电流；适

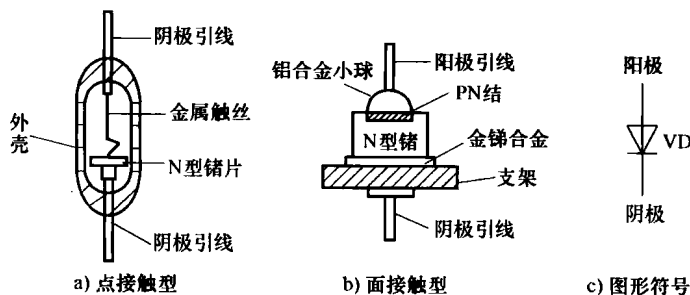


图 1.9 二极管的图形符号及结构

用于高频（几百兆赫）和小功率工作，也用作数字电路中的开关器件。面接触型二极管（一般为硅管）的特点如下：PN 结面积较大，能通过较大的电流，但结电容也大；常用于频率较低、功率较大的电路中。

1.3.2 伏安特性

所谓伏安特性，是指加在二极管两端的电压 U 与流过二极管的电流 I 之间的关系，即 $I=f(U)$ 。根据半导体的物理原理，可从理论上分析得到 PN 结的伏安特性的表达式，此式通常称为二极管的电流方程，即

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1) \quad (1.1)$$

式中， I 是通过 PN 结的电流； U 为 PN 结两端的外加电压； U_T 为温度的电压当量， $U_T = kT/q = 0.026\text{V} = 26\text{mV}$ ，其中 k 为玻耳兹曼常数（ $k = 1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ）， T 是热力学温度（ $T = 300\text{K}$ ），即绝对温度为室温（ 300K ）， q 为电子电荷（ $q = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ）； e 为自然对数的底； I_s 为反向饱和电流，对于分立器件，其典型值在 $10^{-8} \sim 10^{-14}\text{A}$ 的范围内，集成电路中的二极管 PN 结，其 I_s 值则更小。

二极管就是一个 PN 结，当然就具有单向导电性。2CP12（普通型硅二极管）和 2AP9（普通型锗二极管）的伏安特性曲线如图 1.10 所示。

1. 正向特性

在正向特性的起始部分，由于外加电压很小，外电场还不足以削弱内电场，因此多子的扩散运动还不能得到加强，正向电流几乎为零。当正向电压超过某一数值时，内电场就被大为削弱，正向电流迅速增大。这个数值的电压称为二极管的门槛电压（又称为死区电压），一般硅管的门槛电压约为 0.5V ，锗管的门槛电压约为 0.1V 。

二极管一旦正向导通后，只要正向电压稍有变化，就会使正向电流变化较大，二极管的正向特性曲线很陡。二极管正向导通时，管子上的正向压降不大，正向压降的变化很小，一般硅管为 $0.6 \sim 0.8\text{V}$ ，锗管为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。因此，在使用二极管时，如果外加电压较大，一般要在电路中串联限流电阻，以免产生过大电流烧坏二极管。

2. 反向特性

从特性曲线可以看出，在一定的反向电压范围内，反向电流变化不大，这是因为反向电流是少子的漂移运动形成的；一定温度下，少子的数目是基本不变的，所以反向电流基本恒定，与反向电压的大小无关，故通常称其为反向饱和电流 I_s 。通常硅管的 I_s 可达 10^{-9}A 数量级，锗管的 I_s 可达 10^{-6}A 数量级。反向饱和电流越小，管子的单向导电性越好。但是由于半导体器件的温敏性，温度升高，反向饱和电流会相应增大。

由式 (1.1) 可知：

1) 当二极管的 PN 结两端加正向电压时，电压 U 为正值。当 U 比 U_T 大几倍时， e^{U/U_T} 远大于 1，式 (1.1) 中的 1 可以忽略。这样，二极管的电流 I 与电压 U 基本成指数关系，如图 1.10 中的正向特性部分所示。

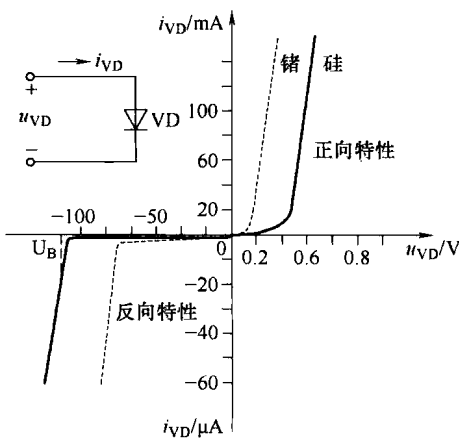


图 1.10 二极管的伏安特性曲线

2) 当二极管的 PN 结两端加反向电压时, 电压 U 为负值。当 $|U|$ 比 U_T 大几倍时, e^{U/U_T} 趋近于零, 因此 $I = -I_S$, 如图 1.10 中的反向特性部分所示。可见反向饱和电流 I_S 是个常数, 不随外加反向电压的大小而变动。

3. 反向击穿特性

反向电压增大到一定数值, 反向电流剧增, 这是由于外加电压在 PN 结中形成很强的电场, 产生大量的电子、空穴, 引起反向电流急剧增加, 这种现象叫反向击穿。外加电压大于反向击穿电压时二极管将被击穿, 失去单向导电性。产生击穿时加在二极管上的反向电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。

4. 非线性

二极管是一个非线性器件, 它的电流和电压之间不存在比例关系, 其电阻不是一个常数。

1.3.3 主要参数

半导体器件的质量指标和安全使用范围常用它的参数来表示。所以, 参数是选择和使用器件的标准。二极管的主要参数有以下几个。

1. 最大整流电流 I_{OM}

I_{OM} 是二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。因为电流通过 PN 结会引起二极管发热, 所以当电流超过最大整流电流时, 将由于 PN 结过热而烧坏二极管。点接触型二极管的最大整流电流在几十毫安以下, 面接触型的最大整流电流较大。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 是为了防止二极管反向击穿而规定的最高反向工作电压。最高反向工作电压一般为反向击穿电压的 $1/2$ 或 $2/3$, 低于最高反向工作电压时二极管才能够安全使用。二极管击穿后单向导电性被破坏, 甚至会过热而烧坏。

3. 最大反向电流 I_{RM}

I_{RM} 是指当二极管加上最高反向工作电压时的反向电流值。其值越小, 说明二极管的单向导电性越好。 I_{RM} 受温度的影响, 温度越高反向电流越大。硅管的反向电流较小, 一般在几微安以下; 锗管的反向电流较大, 是硅管的几十至几百倍。

1.3.4 基本应用

二极管在电子技术中广泛地应用于整流、限幅、钳位、开关、稳压、检波、元器件保护、温度补偿等方面, 大多是利用其正偏导通、反偏截止的特点。

判断二极管的工作状态——导通与截止。若二极管是理想的, 则正向导通时正向管压降为零, 反向截止时二极管相当于断开。否则, 正向管压降, 硅管为 $0.6 \sim 0.8V$, 锗管为 $0.2 \sim 0.3V$ 。分析方法: 将二极管从电路中断开, 分析二极管两端电位 $V_{阳}$ 、 $V_{阴}$ 的高低或所加电压 U_{VD} 的正负。若 $V_{阳} > V_{阴}$ 或 U_{VD} 为正 (正向偏置), 则二极管导通; 若 $V_{阳} < V_{阴}$ 或 U_{VD} 为负 (反向偏置), 则二极管截止。

【例 1.1】 电路如图 1.11 所示, 试判断二极管 VD 是否导通, 并求 AB 两端电压 U_{AB} 。

解: 取 B 点作参考点, 断开二极管, 分析二极管阳极和阴极的电位。 $V_{阳} = -6V$, $V_{阴} = -12V$ 。 $V_{阳} > V_{阴}$, 二极管导通。若忽略管压降, 二极管可看做短路, $U_{AB} = -6V$; 否

则, U_{AB} 低于 $-6V$ 一个管压降, 如果是硅二极管, 管压降为 $0.7V$, 则 $U_{AB} = -6.7V$, 如果是锗二极管, 管压降为 $0.3V$, 则 $U_{AB} = -6.3V$ 。在这里, 二极管 VD 起钳位作用。

【例 1.2】 电路如图 1.12 所示, 试判断二极管 VD_1 、 VD_2 的导通状况, 并求 AB 两端电压 U_{AB} 。

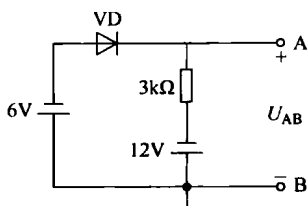


图 1.11 例 1.1 的电路

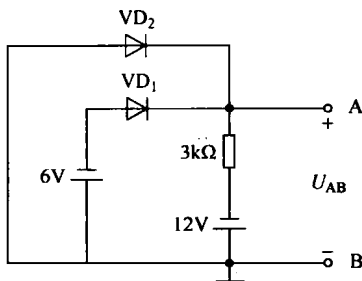
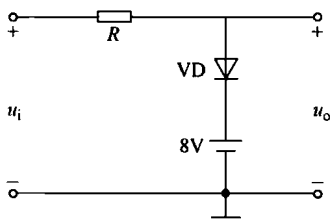


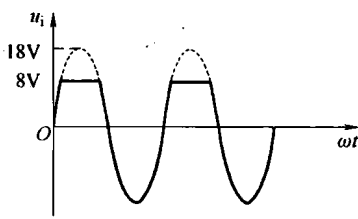
图 1.12 例 1.2 的电路

解: 两个二极管的阴极接在一起, 取 B 点作为参考点, 断开二极管, 分析二极管阳极和阴极的电位。 $V_{1阳} = -6V$, $V_{2阳} = 0V$, $V_{1阴} = V_{2阴} = -12V$ 。 $U_{VD1} = 6V$, $U_{VD2} = 12V$ 。因为 $U_{VD2} > U_{VD1}$, 所以 VD_2 优先导通, VD_1 截止。若忽略管压降, 二极管可看做短路, $U_{AB} = 0V$, 流过 VD_2 的电流为 $I_{VD2} = \frac{12}{3}mA = 4mA$, 在这里, 二极管 VD_2 起钳位作用, 二极管 VD_1 起隔离作用。 VD_1 承受的反向电压为 $-6V$ 。

【例 1.3】 电路如图 1.13a 所示, 假设二极管是理想的, $u_i = 18\sin\omega t V$, 试画出 u_o 波形。



a) 电路



b) 波形图

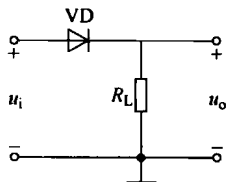
图 1.13 例 1.3 的电路及波形图

解: 二极管阴极电位为 $8V$, 当 $u_i > 8V$ 时, 二极管导通, 可看做短路, $u_o = 8V$; 当 $u_i < 8V$ 时, 二极管截止, 可看做开路, $u_o = u_i$ 。在这里, 二极管 VD 起限幅作用。

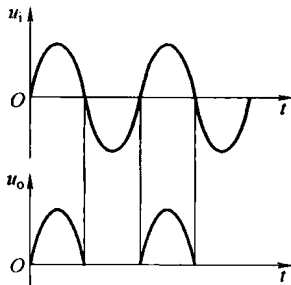
其波形如图 1.13b 所示。

【例 1.4】 电路如图 1.14a 所示, 假设二极管是理想的, 输入 u_i 为正弦波, 试画出 u_o 波形。

解: 当 $u_i > 0V$ 时, 二极管导通, 可看做短路, $u_o = u_i$; 当 $u_i < 0V$ 时, 二极管截止, 可看做开路, $u_o = 0$ 。其波形如图 1.14b 所示。



a) 电路



b) 波形图

图 1.14 例 1.4 的电路及波形图

利用二极管的单向导电性可以把大小和方向都变化的正弦交流电变为单向脉动的直流电, 在这里, 二极管 VD 起整流作用, 如图 1.14 所示。这种方法简单、经济, 在日常生活及电子电路中经常采用。根据这个原理, 还可以构成整流效果更好的单相全波、单相桥式等整流电路。

续流二极管都是并联在线圈的两端的。当线圈在通过电流时, 会在其两端产生感应电动势, 而当电流消失时, 其感应电动势会对电路中的元器件产生反向电压。当反向电压高于元器件的反向击穿电压时, 会对晶体管等其他元器件造成损坏。续流二极管并联在线圈两端, 当流过线圈中的电流消失时, 线圈产生的感应电动势通过二极管和线圈构成的回路做功而消耗掉, 从而保护了电路中的元器件的安全。

因为继电器的线圈是一个很大的电感, 它能以磁场的形式储存电能, 所以当继电器吸合的时候线圈存储了大量的磁场能量。当控制继电器的晶体管由导通变为截止时线圈断电, 这时将产生高达 1000V 以上的反向电动势, 很容易击穿驱动晶体管或其他电路元器件。由于续流二极管接入的方向正好和反向电动势方向一致, 因此, 可以把反向电动势通过续流二极管以电流的形式释放掉, 从而保护了其他电路元器件。同理, 如果控制的是大电感负载, 也会产生反向电动势, 和继电器线圈是一样的。续流二极管在显示器上也会用到, 一般是用在消磁继电器的线圈上。续流二极管一般是开关速度比较快的二极管。

二极管经常和储能元件一起使用, 防止电压电流突变, 提供放电通路。电感可以经过二极管给负载提供持续的电流, 以免负载电流突变, 起到平滑电流的作用。在开关电源中, 就可见到一个由二极管和电阻串联起来构成的续流电路。这个电路与变压器一次绕组并联, 当开关管关断时, 续流电路可以释放掉绕组中储存的能量, 防止因感应电动势过高而击穿开关管。

思考与练习

1. 什么是死区电压? 为什么会出现死区电压? 硅管和锗管的死区电压一般为多少?
2. 为什么二极管的反向饱和电流与所加反向电压基本无关, 而当环境温度升高时, 又会明显增大?
3. 怎样用万用表判断二极管的正极、负极, 以及二极管的好坏?
4. 直接将一个二极管用正向接法接到一个 1.5V 的干电池上, 你认为会产生什么问题?
5. 用万用表测量二极管的正向电阻时, 用 $R \times 100\Omega$ 挡测出的电阻值小, 而用 $R \times 1k\Omega$ 挡测出的电阻值大, 这是为什么?

1.4 特殊二极管

1.4.1 稳压管

稳压管是一种特殊的面接触型硅二极管, 它的图形符号和伏安特性曲线如图 1.15 所示, 稳压管又称为齐纳二极管。稳压管的伏安特性曲线和普通二极管类似, 只是反向特性曲线比较陡。

反向击穿是稳压管的正常工作状态, 稳压管就工作在反向击穿区 (实际是电击穿状态), 又称为齐纳击穿。从反向特性曲线可以看到, 当所加反向电压小于击穿电压时, 和普通二极

管一样,其反向电流很小。一旦所加反向电压达到击穿电压时,反向电流会突然急剧上升,稳压管被反向击穿。其击穿后的特性曲线很陡,这就说明流过稳压管的反向电流在很大范围内(从几毫安到几十甚至上百毫安)变化时,管子两端的电压基本不变,稳压管在电路中能起稳压作用,正是利用了这一特性。

稳压管的反向击穿是可逆的(电击穿),这一点与一般二极管不一样。只要去掉反向电压,稳压管就会恢复正常。但是,如果反向击穿后的电流太大,超过其允许范围,就会使稳压管的PN结发生热击穿而损坏(热击穿不可逆)。

由于硅管的热稳定性比锗管好,所以稳压管一般都是硅管,故称硅稳压管。

1.4.1.1 主要参数

稳压管的主要参数有如下几个。

1. 稳定电压 U_Z 和稳定电流 I_Z

稳定电压就是稳压管在正常工作下管子两端的电压。同一型号的稳压管,由于制造方面的原因,其稳压值也有一定的分散性。如2CW18,其稳定电压 $U_Z = 10 \sim 12\text{V}$ 。

稳定电流常作为稳压管的最小稳定电流 $I_{Z, \min}$ 来看待。一般小功率稳压管可取 $I_Z = 5\text{mA}$ 。如果反向工作电流太小,会使稳压管工作在反向特性曲线的弯曲部分而使稳压特性变坏。稳压管的稳定电流只是一个参考电流值,电流低于此值,稳压效果差,高于此值,只要不超过最大功耗,都可以正常工作,且电流越大,稳压效果越好。

2. 最大稳定电流 $I_{Z, \max}$ 和最大允许耗散功率 P_{ZM}

这两个参数都是为了保证管子安全工作而规定的。最大允许耗散功率 $P_{ZM} = U_Z I_{Z, \max}$,如果管子的电流超过最大稳定电流 $I_{Z, \max}$,将会使管子的实际功率超过最大允许耗散功率,管子将会发生热击穿而损坏。

3. 电压温度系数 α_U

电压温度系数是说明稳定电压 U_Z 受温度变化影响的参数。例如2CW18稳压管的电压温度系数为 $0.095\%/^{\circ}\text{C}$,就是说温度每增加 1°C ,其稳压值将升高 0.095% 。一般稳压值低于 6V 的稳压管具有负的温度系数;高于 6V 的稳压管具有正的温度系数。稳压值为 6V 左右的稳压管其稳压值基本上不受温度的影响,因此,选用 6V 左右的稳压管,可以得到较好的温度稳定性。

例如,2CW18稳压管的电压温度系数为 $0.095\%/^{\circ}\text{C}$,假如在 20°C 时的稳压值为 11V ,当温度升高到 50°C 时的稳压值将为

$$11 + \frac{0.095}{100}(50 - 20) \times 11 \approx 11.3\text{V}$$

特别说明:稳压管的电压温度系数有正负之别。即

$$\begin{cases} U_Z < 6\text{V} & \rightarrow \alpha_U < 0 \\ U_Z \approx 6\text{V} & \rightarrow \alpha_U \text{ 很小} \\ U_Z > 6\text{V} & \rightarrow \alpha_U > 0 \end{cases}$$

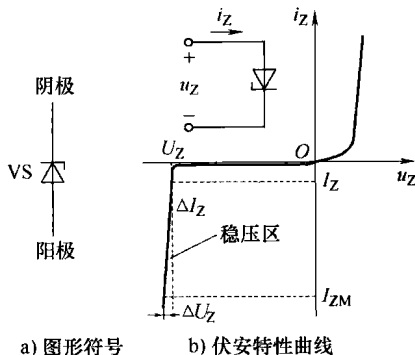


图 1.15 稳压管图形符号和伏安特性曲线