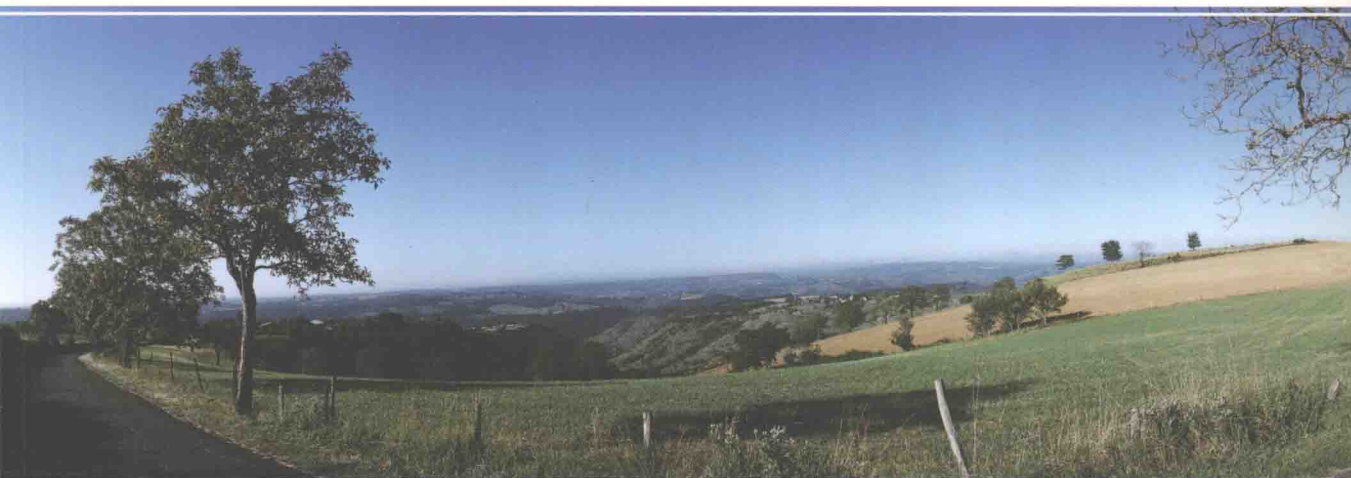


高等职业教育电子技术技能培养规划教材
Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jineng Peiyang Guihua Jiaocai

电子技术 基础

(第2版)

曾令琴 主编 李小雄 副主编



Electronic Technology Foudation
(2nd Edition)

理论联系实践

培养基本技能

提供优质素材

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等职业教育电子技术技能培养规划教材

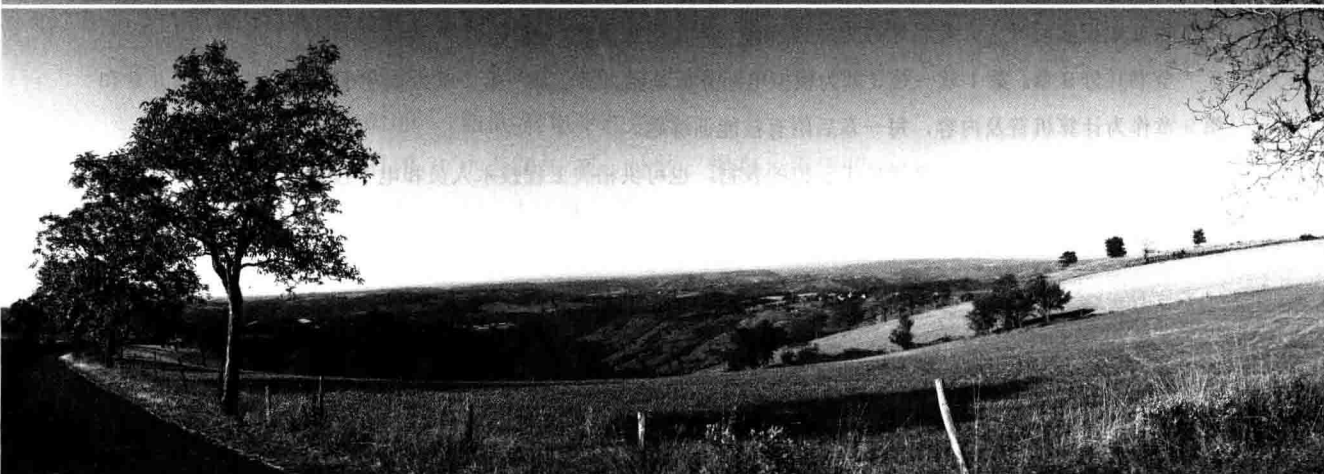
Gaodeng Zhiye Ji

Guihua Jiaocai

电子技术 基础

(第2版)

曾令琴 主编 李小雄 副主编



Electronic Technology Foudation
(2nd Edition)

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术基础 / 曾令琴主编. -- 2版. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2010.9
高等职业教育电子技术技能培养规划教材
ISBN 978-7-115-22606-8

I. ①电… II. ①曾… III. ①电子技术—高等学校:
技术学校—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第135044号

内 容 提 要

本书以培养学生分析问题、解决问题能力和实验动手能力为主导, 将模拟电子技术、数字电子技术和计算机相关知识前后呼应并有机地融为一体, 是一本实用性很强的教材。

全书共分9章。第1章~第3章为模拟电路分析基础, 第4章~第7章为数字电路分析基础, 第8章和第9章作为计算机普及内容, 每一章后附有技能训练题。

本书可作为高职高专、高级技工学校的教材, 也可供相关工程技术人员和电子技术爱好者阅读参考。

高等职业教育电子技术技能培养规划教材

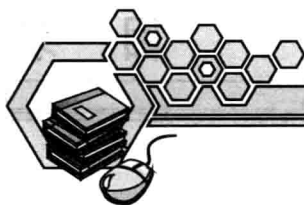
电子技术基础 (第2版)

-
- ◆ 主 编 曾令琴
副 主 编 李小雄
责任编辑 赵慧君
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 15.75 2010年9月第2版
字数: 385千字 2010年9月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-22606-8

定价: 29.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154



第2版前言

本书第1版自2006年出版以来,受到了许多高职院校师生的普遍欢迎。为了更好地适应高职高专教育形势及发展的需要,编者在第1版的基础上,根据多年教学实践和经验总结,并听取了使用本书的同行提出的宝贵意见和建议,现对第1版进行修订,同时完善立体化配套。

本次修订基本上保持第1版的体系和特点,只对少部分内容做了调整和修改,使第2版内容更加符合高职高专“技能型”人才培养特点,在编排上更加适应多数学校规定的教学时数,便于教和学。具体修订包括以下几个方面。

一、第2版在原来内容的基础上,各章后加入了技能训练环节,目的是为了更好地体现理论与实践紧密结合的高职教育特点。

二、第2版增加了附录内容。附录A给出了部分TTL集成电路和CMOS集成电路型号及引脚排列图,以方便使用者及时查阅。

三、第2版重点体现的教学内容及组织体系,凝聚了作者多年来进行教学研究和教学改革的经验 and 体会,理论和实践内容各有侧重又互相联系,使能力的培养贯穿于整个教学过程,可操作性和适用性很强。

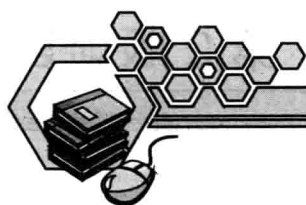
四、书中每一章都精心编排了体现教学主要知识点的问题与思考题、技能训练要求及题库式检测题,注意到了理论教学素材和实践教学素材的分工与互补,形成理论与技能训练相结合的教材模式。

本书由浙江工贸职业技术学院曾令琴任主编并负责全书统稿,黄河水利职业技术学院李小雄任副主编,黄河水利职业技术学院吴丽、郑兰霞、浙江工贸职业技术学院李小英参与了修订。具体章节分工为:曾令琴编写第1章、第2章,李小英编写第3章,李小雄编写第4章和第5章,吴丽编写第6章和第7章,郑兰霞编写第8章和第9章。

本书作为教学改革的成果,结构模式和内容的取舍具有一定的探索性,也会出现一些不妥和错漏之处,敬请同行和读者批评指正。

编者

2010年7月



第 1 章 半导体基础及常用器件.....1	第 2 章 基本放大电路..... 32
1.1 半导体的基本知识.....1	2.1 基本放大电路的概念及工作 原理..... 32
1. 导体、半导体和绝缘体.....1	1. 放大电路的组成原则..... 33
2. 半导体的独特性能.....2	2. 共射放大电路的组成及各部分 作用..... 33
3. 本征半导体.....3	3. 共射放大电路的工作原理..... 34
4. 杂质半导体.....5	2.2 基本放大电路的静态分析..... 35
5. PN 结及其形成过程.....6	1. 放大电路静态分析的估算法..... 35
6. PN 结的反向击穿问题.....8	2. 用图解法确定静态工作点..... 36
1.2 二极管.....9	3. 分压式共射放大电路静态工作点 的估算..... 38
1. 二极管的基本结构与 类型.....9	2.3 基本放大电路的动态分析..... 39
2. 二极管的伏安特性.....10	1. 共射放大电路的动态分析..... 40
3. 二极管的主要参数.....11	2. 微变等效电路法..... 40
4. 二极管的应用.....12	2.4 共集电极放大电路..... 43
1.3 特殊二极管.....14	1. 电路的组成..... 43
1. 稳压管.....14	2. 静态工作点..... 43
2. 发光二极管.....15	3. 动态分析..... 44
3. 光电二极管.....16	4. 电路特点和应用实例..... 44
1.4 双极型三极管.....17	2.5 功率放大器和差动放大电路 简介..... 46
1. 双极型三极管的基本结构和 类型.....17	1. 功率放大器的分类..... 46
2. 双极型三极管的电流放大 作用.....18	2. 功率放大器的特点及技术要求..... 47
3. 双极型三极管的特性曲线.....19	3. 功放电路中的交越失真..... 47
4. 双极型三极管的极限参数.....20	4. 差动放大电路..... 48
1.5 单极型三极管.....21	2.6 放大电路中的负反馈..... 49
1. MOS 管的基本结构.....21	1. 反馈的基本概念..... 49
2. 工作原理.....22	2. 负反馈的基本类型及其判别..... 50
3. MOS 管使用注意事项.....23	3. 负反馈对放大电路性能的影响..... 51
技能训练.....25	技能训练..... 51
第 1 章检测题.....29	



第2章检测题	60	2. 组合逻辑电路的设计	110
第3章 集成运算放大器	63	5.3 常用的组合逻辑电路器件	112
3.1 集成运算放大器	63	1. 编码器	112
1. 集成运算放大器概述	63	2. 译码器	115
2. 集成运放芯片引脚功能及元器件特点	65	3. 数值比较器	119
3. 集成运算放大器的主要技术指标	66	4. 数据选择器	120
4. 理想集成运放及其传输特性	67	技能训练	121
3.2 集成运放的应用	68	第5章检测题	128
1. 集成运放的线性应用	68	第6章 触发器	131
2. 集成运放的非线性应用	72	6.1 基本 RS 触发器	131
技能训练	75	1. 基本 RS 触发器的结构组成	132
第3章检测题	78	2. 基本 RS 触发器的工作原理	132
第4章 数字逻辑基础	81	3. 基本 RS 触发器逻辑功能的描述	132
4.1 数字逻辑的基本概念及基本逻辑关系	81	6.2 钟控 RS 触发器	134
1. 数字电路的基本概念	82	1. 钟控 RS 触发器的结构组成	135
2. 基本逻辑关系	83	2. 钟控 RS 触发器的工作原理	135
4.2 数制与码制	85	3. 钟控 RS 触发器的功能描述	136
1. 计数制	85	6.3 主从型 JK 触发器	137
2. 码制	88	1. JK 触发器的结构组成	137
3. 数的原码、反码和补码	90	2. JK 触发器的工作原理	138
4.3 逻辑代数及其化简	92	3. JK 触发器的功能描述	138
1. 布尔代数的公式、定律和逻辑运算规则	92	4. 集成 JK 触发器	139
2. 逻辑函数的代数化简法	92	5. T 触发器和 T' 触发器	140
3. 逻辑函数的卡诺图化简法	93	6.4 维持阻塞 D 触发器	141
第4章检测题	96	1. D 触发器的电路结构	141
第5章 逻辑门与组合逻辑电路	99	2. D 触发器的工作原理	141
5.1 基本逻辑门电路	99	3. D 触发器的功能描述	142
1. 基本逻辑门	99	4. 集成 D 触发器的工作原理	142
2. 复合门电路	101	技能训练	143
3. 集成门电路	102	第6章检测题	146
5.2 组合逻辑电路的分析和设计	108	第7章 时序逻辑电路	149
1. 组合逻辑电路的分析	108	7.1 时序逻辑电路的分析和设计思路	149
		1. 时序逻辑电路的特点	149
		2. 时序逻辑电路的分类	150
		3. 时序逻辑电路功能的描述	150



4. 时序逻辑电路的基本分析方法	150
5. 时序逻辑电路的设计思路	153
7.2 集成计数器	155
1. 二进制计数器	155
2. 十进制计数器	158
3. 集成计数器及其应用	160
7.3 寄存器	164
1. 数码寄存器	164
2. 移位寄存器	165
3. 集成双向移位寄存器	166
4. 移位寄存器的应用	167
7.4 555 定时电路	169
1. 电路的组成	169
2. 工作原理	171
3. 555 定时器应用实例	171
技能训练	173
第7章检测题	185
第8章 存储器	189
8.1 存储器基本知识	189
1. 存储器概述	190
2. 存储器的分类	190
3. 存储器的主要技术指标	191
8.2 随机存取存储器	192
1. RAM 的结构组成	193
2. RAM 的存储单元	194
3. 集成 RAM 芯片简介	195
4. RAM 的容量扩展	196
8.3 可编程逻辑器件	197
1. ROM 的结构组成及工作原理	197

2. ROM 的分类	199
3. ROM 的存储单元	200
4. 可编程逻辑器件	201
技能训练	204
第8章检测题	211

第9章 数/模和模/数转换器

9.1 数/模转换器	214
1. 数/模转换器的基本概念及转换特性	214
2. DAC 的工作原理	216
3. 集成 DAC0832	219
9.2 模/数转换器	220
1. ADC 的基本概念和转换原理	220
2. ADC 的主要技术指标	223
3. 逐次比较型 ADC 电路组成及工作原理	223
4. 双积分型 ADC 的结构组成及工作原理	224
5. 集成 ADC0809 简介	225
技能训练	226
第9章检测题	231

附录 A

附录 B

参考文献

第1章

半导体基础及常用器件

半导体器件是在 20 世纪 50 年代初发展起来的电子器件,具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点。现代化的电子设备都是以半导体器件和集成电路为基础的,因此半导体器件是近代电子学的重要组成部分。半导体器件中,二极管、三极管(又称晶体管)、场效应管等,是构成集成电路的基本单元,被广泛应用在各种电子电路中。近年来,集成电路特别是大规模和超大规模集成电路的出现,使各种工业自动控制设备和电子设备在微型化、可靠性等方面大步前进。为了正确和有效地运用半导体器件,相关工程技术人员必须首先对半导体器件及其工作原理和性能有一个基本的认识。

学习目的和要求 了解本征半导体、P 型和 N 型半导体的特征及 PN 结的形成过程。熟悉二极管的伏安特性及其分类、用途;理解三极管的电流放大原理,掌握其输入和输出特性的分析方法;理解双极型和单极型三极管在控制原理上的区别;初步掌握工程技术人员必需具备的分析电子电路的基本理论、基本知识和基本技能。

1.1 半导体的基本知识

学习目标

了解导体、绝缘体和半导体的概念及物质结构的区别;熟悉本征半导体的光敏性、热敏性和掺杂性;了解本征激发、复合的概念;熟悉 P 型和 N 型两类半导体的形成及其特点;掌握 PN 结的单向导电特性。

1. 导体、半导体和绝缘体

自然界的一切物质都是由分子、原子组成的。原子又由一个带正电的原子核和在它



周围高速旋转着的、带有负电的电子组成。不同的原子，其原子核内部结构和它周围的电子数量也各不相同。物质原子最外层电子数量的多少，往往决定着该种物质的导电性能。按照物质导电性能的不同，自然界的物质大体可分为3大类，如图1-1所示。

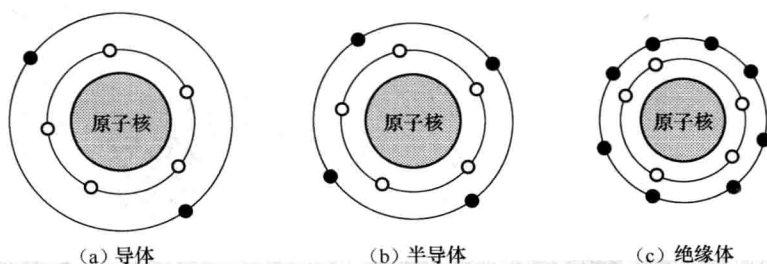


图1-1 物质根据导电性能进行的分类

（1）导体

导体的最外层电子数通常是1~3个，且距原子核较远，受原子核的束缚力较小。由于外界影响，最外层电子获得一定能量后，极易挣脱原子核的束缚而游离到空间成为自由电子。因此，导体在常温下存在大量的自由电子，具有良好的导电能力。常用的导电材料有银、铜、铝、金等。

（2）绝缘体

绝缘体的最外层电子数往往是6~8个，且距原子核较近，受原子核的束缚力较强，其外层电子不易挣脱原子核的束缚，因而绝缘体在常温下具有极少的自由电子，导电能力很差或几乎不导电。常用的绝缘材料有橡胶、云母、陶瓷等。

（3）半导体

半导体的最外层电子数一般为4个，在常温下存在的自由电子数介于导体和绝缘体之间，因而在常温下半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。常用的半导体材料有硅、锗、硒等。

由上述各类物质的导电性能可知，导体可使电流顺利通过，因此传输电流的导线芯都采用导电性能良好的铜、铝制成。绝缘体阻碍电流通过，所以导线外面通常包一层橡胶或塑料等绝缘材料，作为导线的保护，使用时比较安全。需要理解的是：导体和绝缘体之间实际上并没有绝对的界限，而且条件变了还可以转化。例如，导体氧化后其导电性能变差，甚至不能够导电；而绝缘体所受温度增高或湿度增大时，绝缘性能也会变差。实用中常说的电气设备漏电现象，实质上就是绝缘性能下降所造成的。当绝缘体受潮或受到高温、高压时，还有可能完全失去绝缘能力而成为导体。通常把这种现象称为绝缘击穿。

半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间，之所以能够广泛应用在电子技术中，是由于半导体自身存在的一些独特性能。

2. 半导体的独特性能

半导体的导电能力虽然介于导体和绝缘体之间，但在不同条件下半导体的导电能力有着显著的差异。例如，有些半导体对温度的反应特别灵敏，环境温度增高时，其导电能力要增强很多，利用这种特性常可做成各种热敏元件。还有些半导体，当受到光照时，其导电能力变得很强，无光照时，又变得像绝缘体那样不导电，利用这种特性又可制成各种光敏元件。除上述光敏性和热敏性外，半导体还有一个更显著的特点——掺杂性。在纯净的半导体中若掺入微量的某种杂质元



素后,如在单晶硅中掺入百万分之一的三价元素硼,单晶硅的电阻率可由 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右,即导电能力增至未掺杂之前的几十万乃至几百万倍。正是利用半导体的这些独特性能,人们制成了半导体二极管、稳压管、三极管、场效应管、晶闸管等不同的电子器件。

3. 本征半导体

半导体的上述独特性能,是由半导体内部结构及其导电机理所决定的。

(1) 本征半导体

在半导体物质中,目前用得最多的材料是硅和锗。物质的化学性质通常是由原子结构中的最外层电子数目决定的,半导体的导电性质当然也取决于最外层电子数目。通常把物质结构中的最外层电子称为价电子。在硅和锗的原子结构中,最外层电子的数目都是4个,因此被称为四价元素,如图1-2所示。

图中的“+4”表示原子核所带正电荷量与核外电子所带负电荷量相等,整个原子呈电中性。

天然的硅和锗材料是不能制成半导体器件的,必须经过拉单晶工艺提炼成纯净的单晶体。单晶体的晶格结构完全对称,其原子排列得又非常整齐,故常称为晶体,又称为本征半导体。本征半导体的平面示意图如图1-3所示。由图可看出,单晶硅中每个原子的最外层价电子,都两两成为相邻两个原子所共有的价电子,每一对价电子受到两个相邻原子核的吸引被紧紧地束缚在一起,组成共价键结构,图中套住两两价电子的虚线环表示共价键,单晶体中的各原子靠共价键的作用紧密联系在一起。

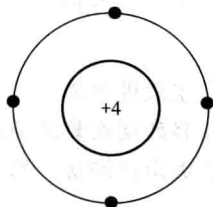


图1-2 硅和锗原子的简化模型

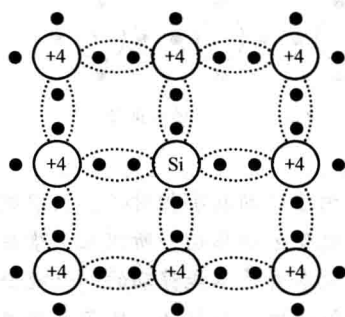


图1-3 单晶硅共价键结构示意图

常温下,本征半导体中的束缚价电子很难脱离共价键的束缚成为自由电子,因此本征半导体中的自由电子数目很少,导电能力很弱。从共价键整体结构来看,每个单晶硅原子外面都有8个价电子,很像绝缘体的“稳定”结构。也正是由于这种结构,本征半导体中的价电子没有足够的能量是不易脱离共价键的。

实际上,共价键中的8个价电子并不像绝缘体中的价电子那样束缚得很紧。当温度升高或受到光照后,共价键中一些价电子的热运动就会加剧而获得足够的能量,挣脱共价键的束缚游离到晶体中成为可移动的自由电子,价电子挣脱共价键束缚成为自由电子的同时,会在共价键上留下一个空位,这个空位称为空穴。

显然,由于共价键的破裂而形成的自由电子和空穴是成对出现的,所以叫做电子—空穴对。通常把这种由于光照、辐射、温度的影响而产生电子—空穴对的现象称为本征激发,如图1-4所示。

本征激发下产生的自由电子载流子带负电,在有外电场作用时可参与导电。自由电子载流子



逆电场方向定向移动形成电流。

在本征激发现象出现的同时，受温度的影响，共价键中的另外一些价电子，在获得足够的能量后可同样挣脱原子核的束缚，但它们不是游离到晶体的空间成为自由电子，而是“跳进”相邻原子由本征激发而产生的空穴中，当这些价电子填补空穴的同时，它们也会留下一些新的空穴，这些新的空穴又会被邻近共价键中的另外一些价电子来填补上，这些价电子仍会留下新的空位让相邻价电子来填补……如此就会形成一个价电子定向连续的填补运动，这种由价电子填补空穴的现象称为复合。复合不同于本征激发，本征激发的主要导电方式是完全脱离了共价键束缚的自由电子载流子逆着电场方向而形成的定向迁移，而复合运动则是由价电子填补空穴形成的。虽然填补空穴的价电子也是逆着电场力的方向作定向迁移，但它们填补空穴的运动始终在共价键中进行。为区别于本征激发下自由电子载流子的运动，通常可把价电子填补空穴看成是空穴顺着电场方向而形成的定向迁移，因此空穴载流子带正电，顺电场方向定向运动形成电流。

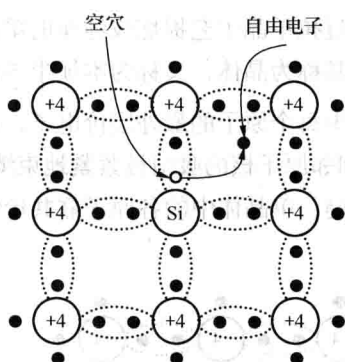


图 1-4 本征激发现象

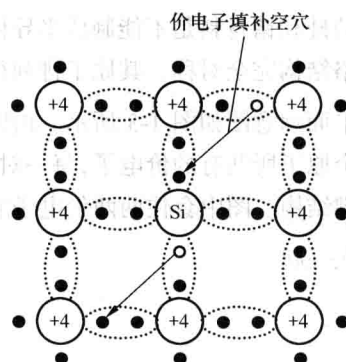


图 1-5 复合现象



注意

由于运动具有相对性，共价键中价电子依次“跳进”空穴进行填补，也可看做空穴依次反方向移动，所以人们虚拟出了顺电场方向定向迁移的空穴载流子运动，实际上空穴本身是不能移动的。这就好比电影院有位子的人依次向前挪动，但看起来就像空座位依次向后移动，实际上座位并没有挪动一样。

综上所述，“本征激发”产生自由电子载流子，“复合”产生空穴载流子，而共价键中的原子因失去价电子则成为带正电的离子。由于带电的离子是定域的，所以它们不能参与导电，半导体中导电的因素是自由电子载流子和空穴载流子。

（2）半导体的导电机理

在金属导体中存在着大量的、不受原子核束缚的带负电微粒，通常称其为自由电子，这些自由电子在外电场作用下能够定向移动形成电流。显然，自由电子是金属导体的导电因素，即金属导体内部只有自由电子一种载流子参与导电。

半导体中能够参与导电的微粒与金属导体不同。半导体中存在着本征激发下产生的自由电子和复合运动形成的空穴两种载流子，通常情况下这两种载流子是同时参与导电的。半导体中的电流是由两种载流子的定向移动形成的，这一点正是它在导电机理上区别于金属导体的本质差别，同时也是半导体导电方式的独特之处。



“本征激发”和“复合”在一定温度下同时进行并维持动态平衡,因此电子和空穴两种载流子的浓度基本不变。但是,当温度升高时,本征激发加剧,产生的电子—空穴对增多,同时“复合”的机会也增加了,温度越高,载流子的数目就会越多,半导体的导电性能也就越好。当温度不再继续升高时,最后两种载流子的运动仍会达到一个新的平衡状态。可见,半导体中载流子的数目与温度的高低、光照强弱等因素有关。

在温度接近绝对零度(即 -273°C)时,共价键中的电子被束缚很紧无法产生电子—空穴对,相当于绝缘体;在 25°C 常温下,虽然少数价电子能够挣脱共价键的束缚成为电子—空穴对,但此时电子—空穴对的数目仅为每立方米单晶硅总电子数的 $1/10^{13}$,该数目表明常温下半导体的导电能力仍然很低。半导体具有光敏性和热敏性,当半导体受到光照时或外界温度显著升高时,半导体中就会有较多的价电子挣脱共价键的束缚成为电子—空穴对,从而使半导体的导电能力较为明显的增强。

实践证明:大约温度每升高 8°C ,单晶硅中的电子浓度就会增加一倍;温度每升高 12°C ,单晶锗中的电子浓度约增加一倍。显然,温度是影响半导体性能的重要因素。

4. 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同时参与导电,但由于数量不多因而导电能力仍然不能和导体相比。但是,在本征半导体中掺入微量的某种元素后,半导体的导电能力将极大地增强。

(1) N型半导体

在硅(或锗)的晶体中掺入少量的五价元素磷(或砷、锑),本征半导体中的共价键结构基本不变,只是共价键结构中某些位置上的硅(或锗)原子被磷原子所取代。当这些掺杂磷原子与相邻的4个硅原子组成共价键时,多余的一个价电子就会被挤出共价键结构,使得磷原子核对它的吸引束缚作用变得很弱。常温下,这个多余的价电子因比其他价电子受到共价键的束缚小得多而更容易成为自由电子。值得注意的是,杂质元素中多余价电子挣脱原子核束缚成为自由电子后,在它们原来的位置上并不能形成空穴,因此掺入五价元素的杂质半导体中,自由电子载流子的数量相对空穴载流子多得多。所以,通常把这种掺入五价杂质元素的杂质半导体称为电子型半导体。在电子型半导体中,虽然还是存在两种载流子,但自由电子载流子的浓度远大于空穴载流子的浓度,故把自由电子称为多数载流子(简称多子),而把空穴载流子称为少数载流子(简称少子)。习惯上又把电子型半导体常称为N型半导体。在N型半导体中,失去电子的定域离子带正电。N型半导体的结构如图1-6所示。

本征硅中的杂质数量等于硅原子数量的 10^{-6} 时,杂质半导体中的自由电子载流子数目将增加几十万倍,使半导体的导电性能显著提高。

(2) P型半导体

在硅(或锗)的晶体内掺入少量三价杂质元素硼(或镧、镓),因硼原子只有3个价电子,它与周围4个硅(或锗)原子组成共价键时,因少一个电子而在共价键中形成一个空位。常温下,相邻硅(或锗)原子共价键中的价电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时,极易“跳入填补”这些空位,这样就在硅(或锗)原子的共价键中失去一个电子而产生一个空穴,硼原子则因接收这些价电子而成为不能移动的带负电离子。这种杂质半导体的结构如图1-7所示。

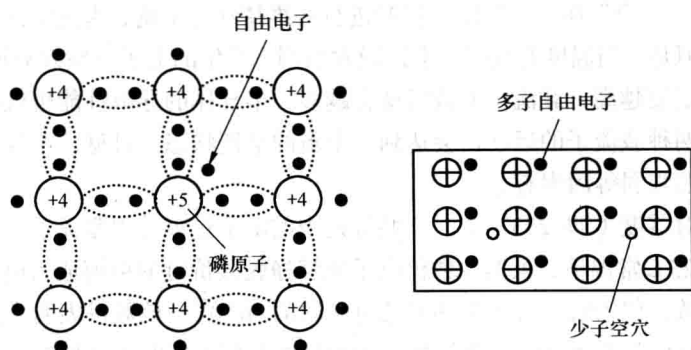


图 1-6 N 型半导体晶体结构

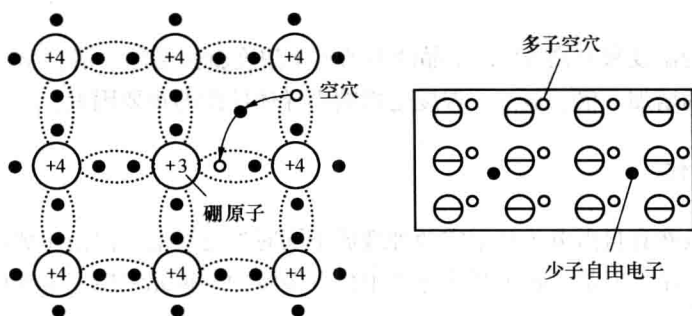


图 1-7 P 型半导体晶体结构

从上述结构图可看出，掺入三价元素硼的杂质半导体中，空穴载流子的数量远大于自由电子载流子，因此空穴载流子称为多数载流子，由本征激发而产生的自由电子载流子数量相对极少称为少数载流子。这种杂质半导体由于空穴数量远大于自由电子数量而被人们称为空穴型半导体，在电子技术中习惯称为P型半导体。一般情况下，杂质半导体中的多数载流子的数量可达到少数载流子数量的 10^{10} 倍或更多，因此，杂质半导体比本征半导体的导电能力将强上几十万倍。

需要指出的是：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，但多出的载流子数目与杂质离子所带电荷数目始终相平衡，即整块杂质半导体上既没有失电子，也没有得电子，整个掺杂晶体仍然呈电中性。

5. PN结及其形成过程

杂质半导体的导电能力虽然比本征半导体极大地增强，但它们仍然不能称为半导体器件，因为单一的N型半导体和P型半导体只能起电阻的作用。在电子技术中，PN结是一切半导体器件的“元概念”和技术起始点。

（1）PN结的形成

通常采用不同的掺杂工艺，在一块完整的半导体硅片的两侧分别注入三价元素和五价元素，使其一边形成N型半导体，另一边形成P型半导体，那么在两种半导体的交界面上就会形成一个PN结。在P区一端，多数载流子是空穴，少数载流子是电子，而N区一端，多数载流子是电子，少数载流子是空穴。因此，两区交界面两侧明显地存在着两种载流子的浓度差。这样，P区的多子空穴载流子和N区的多子自由电子载流子都要从浓度高的区域向浓度低的区域扩散。扩散的结



果使 N 区的多子复合掉了 P 区多子, 在 P 区和 N 区的交界处就会留下了一个干净的带电杂质离子区, 这些带电离子不能任意移动, 形成了空间电荷区。

空间电荷区中的载流子均被扩散的多子“复合”掉了, 或者在扩散过程中被消耗尽了, 因此有时又把空间电荷区称为耗尽层。

出现了空间电荷区以后, 由于正负电荷之间的相互作用, 在空间电荷区内形成了一个内电场, 内电场的方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。显而易见, 内电场的方向与多数载流子扩散运动的方向相反, 对扩散运动起阻碍作用, 由此还把空间电荷区称为阻挡层。

在 PN 结形成的过程中, 扩散运动越强, 复合掉的多子数量越多, 空间电荷区也就越宽。另一方面, 空间电荷区的内电场又对扩散运动起阻挡作用, 而对 N 区和 P 区中的少子漂移起推动作用, 少子的漂移运动方向正好与扩散运动的方向相反。从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区所失去的空穴, 从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子, 即漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。PN 结的形成过程如图 1-8 所示。

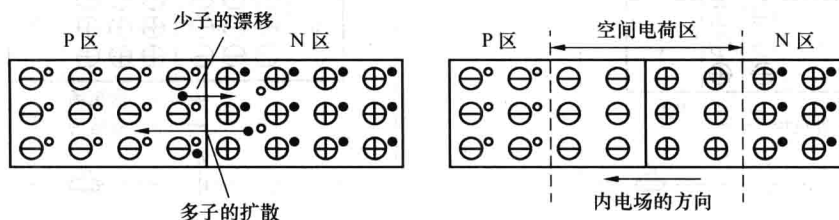


图 1-8 PN 结的形成过程

在 PN 结形成的过程中, 多子的扩散和少子的漂移既相互联系、又相互矛盾。初始阶段, 扩散运动占优势, 随着扩散运动的进行, 空间电荷区不断加宽, 内电场逐步加强; 内电场的加强又阻碍了扩散运动, 使得多子的扩散逐步减弱。扩散运动的减弱显然伴随着漂移运动的不断加强。最后, 当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时, 将形成一个稳定的空间电荷区, 这个相对稳定的空间电荷区就叫做 PN 结。

空间电荷区内基本不存在导电的载流子, 因此导电率很低而相当于介质。在 PN 结两侧的 P 区和 N 区则导电率相对较高, 所以相当于导体。可见, PN 结具有电容效应, 这种效应称为 PN 结的结电容。

(2) PN 结的单向导电性

PN 结在无外加电压的情况下, 扩散运动和漂移运动处于动态平衡状态, 动态平衡状态下通过 PN 结的电流为零。这时, 如果在 PN 结两端加上电压, 扩散与漂移运动的平衡就会被破坏, PN 结将显示出其单向导电的性能, PN 结的单向导电性, 是构成半导体器件的主要工作机理。

① PN 结正向偏置。把电源电压的正极与 P 区引出端相连, 负极与 N 区引出端相连时, 称 PN 结正向偏置, 简称 PN 结正偏。PN 结正偏时, 外部电场的方向是从 P 区指向 N 区, 显然与内电场的方向相反, 这时外电场驱使 P 区的空穴进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷, 同时 N 区的自由电子进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷, 结果使空间电荷区变窄, 内电场被削弱。内电场的削弱使多数载流子的扩散运动得以增强, 形成较大的扩散电流 (扩散电流就是通常称谓的电流, 是由多子的定向移动形成的)。在一定范围内, 外电场愈强, 正向电流愈大, PN 结对正向



电流呈低电阻状态，这种情况在电子技术中称为 PN 结正向导通。PN 结的正向导通作用原理如图 1-9 所示。

② PN 结反向偏置。把电源的正极、负极位置换一下，即 P 区接电源负极，N 区接电源正极，就构成了 PN 结的反向偏置。PN 结反向偏置时，外加电场与空间电荷区的内电场方向一致，同样会导致扩散与漂移运动平衡状态的破坏。外加电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走，使空间电荷区变宽，内电场继续增强，造成多数载流子扩散运动难于进行，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。但由于常温下少数载流子恒定且数量不多，故反向电流极小，而电流小说明 PN 结的反向电阻很高，通常可以认为反向偏置的 PN 结不导电，基本上处于截止状态，这种情况在电子技术中称为 PN 结的反向阻断。PN 结的反向阻断作用原理如图 1-10 所示。

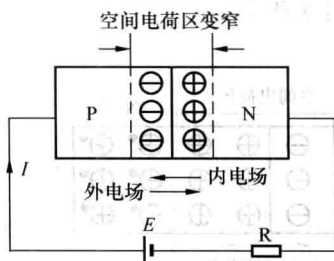


图 1-9 PN 结正向偏置

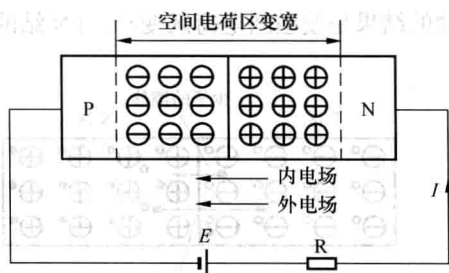


图 1-10 PN 结反向偏置

当外加的反向电压在一定范围内变化时，反向电流几乎不随外加电压的变化而变化。这是因为反向电流是由少子漂移形成的，在热激发下，少子数量增多，PN 结反向电流增大。换句话说，只要温度不发生变化，少数载流子的浓度就不变，即使反向电压在允许的范围内增加再多，也无法使少子的数量增加，这里反向电流趋于恒定，因此反向电流又称为反向饱和电流。值得注意的是，反向电流是造成电路噪声的主要原因之一，因此，在设计电路时，必须考虑温度补偿问题。

PN 结的上述“正向导通，反向阻断”作用，说明 PN 结具有单向导电性。PN 结能够使半导体的导电性能受到控制，是构成各种半导体器件的技术基础。

6. PN 结的反向击穿问题

PN 结处于反向偏置时，在一定的电压范围内，流过 PN 结的电流很小，但电压超过某一数值时，反向电流急剧增加，这种现象通常称为 PN 结反向击穿。

反向击穿分为热击穿和电击穿，热击穿由于电压很高、电流很大，消耗在 PN 结上的功率相应很大，极易使 PN 结过热而烧毁，即热击穿过程不可逆。电击穿包括雪崩击穿和齐纳击穿，对于硅材料的 PN 结来说，击穿电压大于 7V 时为雪崩击穿，小于 4V 时为齐纳击穿。在 4~7V，两种击穿都有。

(1) 雪崩击穿

当 PN 结反向电压增加时，空间电荷区中的内电场随着增强。在强电场作用下，少子漂移速度加快，动能增大，致使当它们在快速漂移运动过程中与中性原子相碰撞，使更多的价电子脱离共价



键的束缚形成新的电子—空穴对,这种现象称为碰撞电离。新产生的电子—空穴对在强电场作用下,再去碰撞其他中性原子,又产生新的电子—空穴对。如此连锁反应使得PN结中载流子的数量剧增,因而流过PN结的反向电流也就急剧增大。这种击穿称为雪崩击穿。雪崩击穿发生在掺杂浓度较低、外加反向电压较高的情况下。掺杂浓度低使PN结阻挡层比较宽,少数在阻挡层内漂移过程中与中性原子碰撞的机会比较多,发生碰撞电离的次数也比较多。同时因掺杂浓度较低,阻挡层较宽,产生雪崩击穿的电场相对较强,即外加反向电压较高,一般出现雪崩击穿的电压在7V以上。

(2) 齐纳击穿

当PN结两边的掺杂浓度很高时,阻挡层很薄。在很薄的阻挡层内载流子与中性原子碰撞的机会大为减少,因而不会发生雪崩击穿。但正因为阻挡层很薄,即使所加反向电压不大,也会产生强大的电场,这个电场足以把阻挡层内中性原子的价电子从共价键中拉出来,产生出大量的电子—空穴对,使PN结反向电流剧增,出现反向击穿现象。这种击穿称为齐纳击穿。齐纳击穿发生在高掺杂的PN结中,相应的击穿电压较低,一般小于5V。

综上所述,雪崩击穿是一种碰撞的击穿,齐纳击穿是一种场效应击穿,二者均属于电击穿。电击穿过程通常过程可逆,当加在PN结两端的反向电压降低后,PN结仍可恢复到原来的状态而不会造成永久损坏。

当反向电压过高,反向电流过大时,PN结结温不断升高,如果反向电流一直增大下去,结温一再持续升高循环,PN结就会由电击穿转化为热击穿而造成永久损坏。热击穿能够损坏PN结,应尽量避免发生。



检验学习结果

1. 什么是本征激发?什么是复合?少数载流子和多数载流子是如何产生的?
2. 半导体的导电机理和金属导体的导电机理有何区别?
3. 什么是本征半导体?什么是N型半导体?什么是P型半导体?
4. 由于N型半导体中多数载流子是电子,因此说这种半导体是带负电的。这种说法正确吗?为什么?
5. 试述雪崩击穿和齐纳击穿的特点。这两种击穿能否造成PN结的永久损坏?
6. 什么是扩散电流?什么是漂移电流?什么是PN结的正向偏置和反向偏置?说说PN结有什么特性。

1.2

二极管

学习目标

了解二极管的结构类型与适用场合;熟悉二极管的伏安特性及其主要参数;学会使用晶体管手册选用二极管的方法,掌握二极管极性和好坏的简单检测方法。

1. 二极管的基本结构与类型

将PN结两端各加上一根相应的电极引线,再用外壳进行封装,就构成一个二极管。二极管的结构类型及图形符号如图1-11所示。

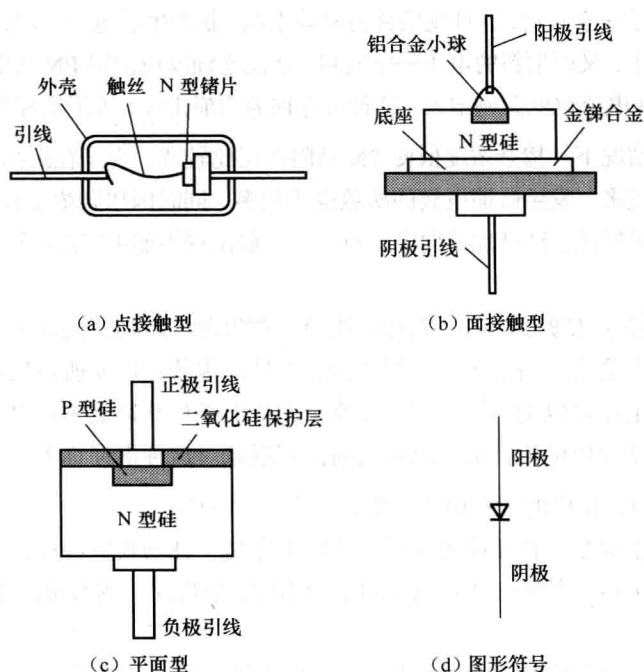


图 1-11 二极管的结构类型及图形符号

二极管按材料不同可分为硅二极管和锗二极管；按结构不同又可分为点接触型、面结合型和平面型 3 类。

(1) 点接触型二极管

如图 1-11 (a) 所示，点接触型是用一根细金属丝和一块半导体熔焊在一起构成 PN 结的，因此 PN 结的结面积很小，结电容量也很小，不能通过较大电流；但点接触型二极管的高频性能好，常常用于高频小功率场合，如高频检波、脉冲电路及计算机里的高速开关元件。

(2) 面接触型二极管

如图 1-11 (b) 所示，面接触型二极管一般用合金方法制成较大的 PN 结，由于其结面积较大，因此结电容量也大，允许通过较大的电流，适宜用做大功率低频整流器件。

(3) 平面型二极管

如图 1-11 (c) 所示，平面型二极管采用二氧化硅做保护层，可使 PN 结不受污染，而且大大减少了 PN 结两端的漏电流。平面型二极管的质量较好，批量生产中产品性能比较一致。平面型二极管结面积较小的用做高频管或高速开关管，结面积较大的用做大功率调整管。

目前，大容量的整流元件一般都采用硅管。二极管的型号中，通常硅管用 C 表示，如 2CZ31 表示为 N 型硅材料制成的管子型号；锗管一般用 A 表示，如 2AP1 为 N 型锗材料制成的管子型号。

二极管的图形符号如图 1-11 (d) 所示，P 区引出的电极为正极（阳极），N 区引出的电极为负极（阴极）。

2. 二极管的伏安特性

加到二极管两端的电压 U 与流过二极管的电流 I 之间的关系，称为二极管的伏安特性。二极管的伏安特性直观地表现了二极管的单向导电性，特性曲线如图 1-12 所示。