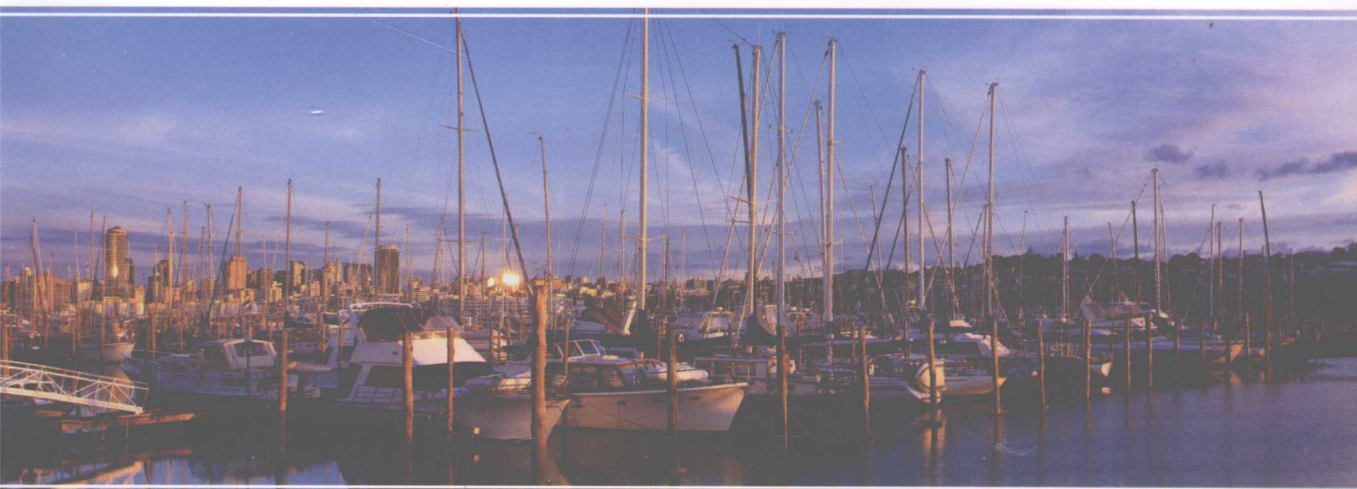


高等职业教育电子技术技能培养规划教材

Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jineng Peiyang Guihua Jiaocai

模拟 电子技术

曾令琴 主编



Electronic Devices and Circuit Theory

降低理论难度，内容通俗易懂

引入任务教学，激发学习兴趣

提供设计项目，培养工作技能



人民邮电出版社

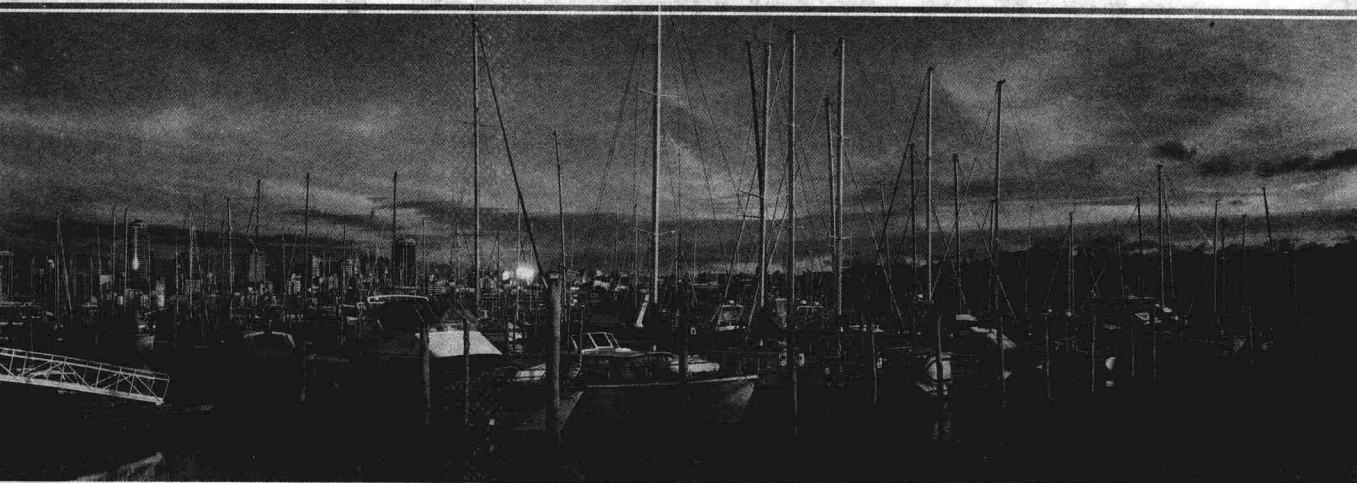
POSTS & TELECOM PRESS

高等职业教育电子技术技能培养规划教材

Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jineng Peiyang Guihua Jiaocai

模拟 电子技术

曾令琴 主编



Electronic Devices and
Circuit Theory

人民邮电出版社
北京

人民邮电出版社

样书

专用章

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 曾令琴主编. —北京: 人民邮电出版社,
2008.12
高等职业教育电子技术技能培养规划教材
ISBN 978-7-115-18602-7

I. 模… II. 曾… III. 模拟电路—电子技术—高等学校:
技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第116478号

内 容 提 要

本书结合高职高专学生的实际工作需要,对传统的模拟电子技术教材中的理论知识进行了重新整合,将全书分为5个单元,内容包括半导体器件、放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源及模拟电子技术应用与实践。

本书在介绍相关必要理论知识的同时,还介绍各种常用电子线路元器件的型号、作用、选择及检测,并在书中第5单元给出4个由浅入深的实践训练题目,着重培养学生的实际操作能力。

本书为高职高专院校电类各专业教材,也可供相关工程技术人员阅读参考。

高等职业教育电子技术技能培养规划教材

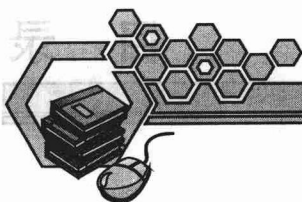
模拟电子技术

-
- ◆ 主 编 曾令琴
责任编辑 潘春燕
执行编辑 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>
北京楠萍印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 12.5
字数: 328千字
印数: 1—3 000册
 - 2008年12月第1版
2008年12月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-18602-7/TN

定价: 22.00元

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



“模拟电子技术”是高职高专电类各专业的重要专业基础课程,其显著特点是十分强调“动手能力”和“工程素质”的培养。但长期以来,由于现有的《模拟电子技术》教材理论性较强,工程实际应用内容匮乏,再加上课程内容本身比较抽象,很多学生在初学时感到不适应,戏称“模电”为“魔电”,而此部分知识及能力的缺失,使学生到企业工作后不能胜任相应工作,对“模拟电子技术”课程进行教学改革呼声也因此越来越高。

针对这种情况,编者结合目前“模拟电子技术”课程的教学实际情况以及该课程在电子工程中的作用,编写了这本任务导入式的教材。

1. 立足于开辟一个新的教学切入点,以任务驱动方式引入课程教学的知识体系和实践教学环节。

2. 降低理论深度,以通俗易懂的语言让学生了解课程中的每一部分教学内容在实际应用中的“不可替代”性,从而引起学生学习模拟电子技术的兴趣,促进模拟电子技术课程体系的建设和教学改革。

3. 将相关内容重新进行组织、归纳,减少了教材篇幅,提高了教学效率。

4. 最后一个单元模拟电子技术应用与实践,结合课程应用实际的需求,首先详细介绍了各种常用电子线路元器件的型号、作用、选择及检测。然后按照由易到难的顺序给出4个课程设计项目,这些项目涵盖了模拟电子技术综合应用的知识和能力,起到了岗前培训的作用。

本书由黄河水利职业技术学院曾令琴担任主编,黄河水利职业技术学院范文军、漯河职业技术学院郭亚红担任副主编,黄河水利职业技术学院王磊、丁燕参编。其中,曾令琴编写了第1单元,范文军编写了第3单元、第4单元,郭亚红编写了第5单元,王磊、丁燕编写了第2单元。全书由曾令琴统稿。

由于编者水平有限,书中的错误或不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2008年6月

第 1 单元 半导体器件 1

第一部分 任务导入 1

第二部分 相关知识 2

1.1 半导体基础知识 2

1.1.1 半导体的独特性能 2

1.1.2 本征半导体 3

1.1.3 半导体的导电机理 4

1.1.4 杂质半导体 5

1.1.5 PN 结及其单向导电性 6

1.1.6 PN 结的反向击穿问题 8

1.2 半导体二极管 9

1.2.1 二极管的结构类型 9

1.2.2 二极管的伏安特性 10

1.2.3 二极管的主要技术参数 11

1.2.4 二极管的应用 12

1.2.5 特殊二极管 14

1.3 双极型半导体三极管 17

1.3.1 BJT 的结构组成 17

1.3.2 BJT 的电流放大作用 18

1.3.3 BJT 的外部特性 19

1.3.4 BJT 的主要技术参数 21

1.3.5 复合晶体管 21

1.4 单极型半导体三极管 22

1.4.1 单极型半导体三极管

概述 22

1.4.2 场效应管的基本结构

组成 23

1.4.3 场效应管的工作原理 23

1.4.4 场效应管的主要技术

参数 25

1.4.5 场效应管的使用注意

事项 25

1.5 晶闸管 26

1.5.1 晶闸管的结构组成 26

1.5.2 晶闸管的工作原理 26

1.5.3 晶闸管的伏安特性 28

1.5.4 晶闸管的主要技术参数 28

1.5.5 晶闸管的使用注意事项 30

第三部分 相关技能 30

1.1 二极管、三极管及晶闸管的

检测方法 30

1.2 EWB 应用训练 32

1.3 电子线路元器件的焊接技术 36

习题 37

第 2 单元 基本放大电路 40

第一部分 任务导入 40

第二部分 相关知识 41

2.1 双极型管的单级放大电路 41

2.1.1 共发射极放大电路 41

2.1.2 共集电极放大电路 50

2.1.3 共基极放大电路 52

2.1.4 三种组态的放大电路

性能比较 54

2.2 单极型管的单级放大电路 55

2.2.1 自给偏压电路 55

2.2.2 场效应管的微变等效

电路 56

2.2.3 共源极放大电路 57

2.2.4 共漏极放大电路 57

2.3 功率放大电路 58

2.3.1 功率放大器的分类 58

2.3.2 功率放大器的特点及

主要技术要求 59

2.3.3 功率放大电路中的交越



失真.....60	3.1 集成运算放大电路.....97
2.3.4 乙类互补对称的功率 放大电路.....60	3.1.1 集成运算放大电路概述.....97
2.3.5 功放管的安全使用.....64	3.1.2 集成运算放大器的 分类.....99
2.4 多级放大电路.....67	3.1.3 集成运算放大器芯片管脚 功能及其元器件特点.....100
2.4.1 多级放大电路的组成.....67	3.1.4 集成运算放大器的选择及 主要性能指标.....101
2.4.2 多级放大电路的级间 耦合方式.....68	3.1.5 集成运算放大器的理想化 条件及其传输特性.....102
2.4.3 多级放大电路的性能 指标估算.....69	3.2 集成运算放大器的线性应用.....103
2.5 差动放大电路.....69	3.2.1 反相比例运算电路.....103
2.5.1 直接耦合的放大电路中 需要解决的问题.....70	3.2.2 同相比例运算电路.....104
2.5.2 差动放大电路的工作 原理.....70	3.2.3 求和电路.....105
2.5.3 差动放大电路的类型.....71	3.2.4 双端输入减法运算电路.....106
2.6 放大电路中的频率响应及其 波特图.....71	3.2.5 微分运算电路.....106
2.6.1 频率响应的基本概念.....72	3.2.6 积分运算电路.....107
2.6.2 放大电路的频率特性.....72	3.2.7 集成运算放大器的应用 实例.....107
2.6.3 波特图.....73	3.3 集成运算放大器在信号处理 方面的应用.....109
2.6.4 多级放大电路的频率 响应.....74	3.3.1 有源滤波器.....110
2.7 放大电路中的负反馈.....75	3.3.2 仪用放大器.....112
2.7.1 反馈的基本概念.....75	3.4 集成运算放大器的非线性 应用.....114
2.7.2 负反馈的基本类型及其 判别.....75	3.4.1 集成运算放大器应用在 非线性区的特点.....114
2.7.3 负反馈对放大电路性能的 影响.....76	3.4.2 电压比较器.....114
第三部分 相关技能.....77	3.4.3 文氏桥正弦波振荡器.....117
2.1 常用电子仪器的使用.....77	3.4.4 石英晶体振荡器.....119
2.2 分压式偏置共射放大电路静态 工作点的调试.....80	3.5 集成运算放大器的选择、使用和 保护.....122
2.3 六管超外差收音机的组装.....82	3.5.1 集成运算放大器的选择.....122
习题.....92	3.5.2 集成运算放大器的使用 要点.....123
第3单元 集成运算放大器.....96	3.5.3 集成运算放大器的保护.....124
第一部分 任务导入.....96	第三部分 相关技能.....125
第二部分 相关知识.....97	3.1 音频功率放大器 LM386 的 应用设计.....125



3.2 集成电路的识图、读图方法···	127	4.3.2 三端可调输出集成 稳压器·····	150
3.3 集成运算放大器线性应用 电路实验·····	131	4.3.3 使用三端集成稳压器时 应注意的事项·····	152
实验报告·····	133	第三部分 相关技能·····	153
习题·····	133	4.1 整流、滤波和稳压电路的 实验·····	153
第4单元 直流稳压电源·····	136	4.2 实用电源电路的识图、读图 练习·····	155
第一部分 任务导入·····	136	4.3 常用集成稳压器的型号与 性能指标的速查·····	156
第二部分 相关知识·····	137	习题·····	156
4.1 小功率整流滤波电路·····	137	第5单元 模拟电子技术应用与 实践·····	160
4.1.1 整流电路·····	137	5.1 电子技术基本技能综合训练···	160
4.1.2 滤波电路·····	140	5.2 水温控制系统设计·····	186
4.2 稳压电路·····	142	5.3 函数信号发生器的设计·····	189
4.2.1 直流稳压电源的主要 性能指标·····	142	5.4 简易电子琴的设计·····	192
4.2.2 串联型稳压电路·····	143	参考文献·····	194
4.2.3 并联型稳压电路·····	144		
4.2.4 串联型开关稳压电路···	145		
4.2.5 调整管的选择·····	146		
4.2.6 稳压电路的过载保护···	146		
4.3 集成稳压器·····	147		
4.3.1 三端固定输出集成 稳压器·····	148		

第 1 单元

半导体器件

第一部分 任务导入

半导体器件是在 20 世纪 50 年代初发展起来的电子器件,由于具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等突出优点,已广泛应用于家电、汽车、计算机及工业控制技术等众多领域,被人们视为现代电子技术的基础。对从事电子技术的工程技术人员来讲,只有认识和掌握了作为电子线路核心元件的各种半导体器件的结构、性能、工作原理和应用特点,才能深入分析电子电路的工作原理,正确选择和合理使用各种半导体器件。

某实用电子线路板如图 1.1 所示,上面除了集成电路外,还包含大量的二极管、三极管和场效应管等半导体器件。为了正确和有效地使用这些常用半导体器件,工程技术人员须对这些器件的结构原理及其外引线表现出来的电压、电流关系及其性能等有一个基本的认识,因此有必要了解和掌握一定的半导体基本知识。

第 1 单元的任务是让读者在了解半导体的特殊性能、PN 结的形成及其单向导电性的基础上,进一步认识晶体二极管、晶体三极管、晶闸管这些半导体器件。通过对这些半导体器件的结构、工作原理、特性曲线及特性参数等方面的剖析,读者能够深刻理解 PN 结的形成及其单向导电性,掌握二极管、三极管、晶闸管等半导体器件的结构特点和工作原理;能够掌握正确检测半导体器件好坏的方法及极性的判别方法,看懂由这些半导体器件作为核心元件构成的简单电子线路图,掌握 EWB 电路仿真初步技能。

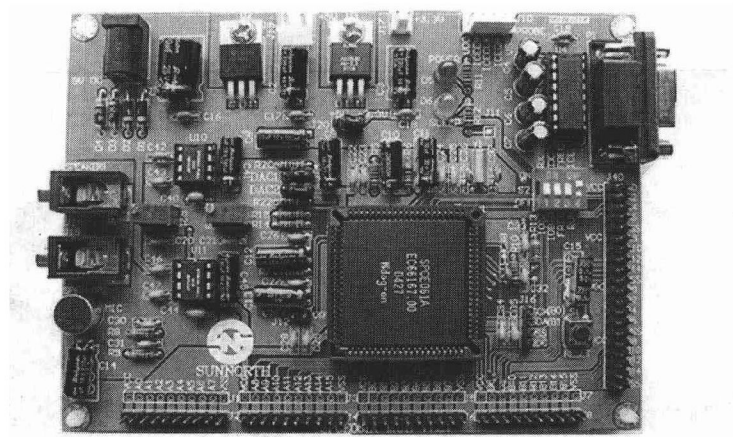


图 1.1 实用电子线路板

第二部分 相关知识

1.1 半导体基础知识

半导体的导电性能虽然介于导体和绝缘体之间，但是却能够引起人们的极大兴趣，这与半导体材料自身存在的一些独特性能是分不开的。同一块半导体，在不同外界情况下其导电能力会有非常大的差别，有时表现出导体的特性，有时又像绝缘体。利用半导体的这种独特性能，人们研制出各种类型的电子器件。

1.1.1 半导体的独特性能

有些半导体对温度的反应特别灵敏。当周围环境温度增高时，其导电能力显著增加；温度下降时，其导电能力随之明显下降。利用半导体的这种热敏性，人们可以把它制成自动控制用的热敏元件，如市场上销售的双金属片、铜热电阻、铂热电阻、热电偶及半导体热敏电阻等。其中以半导体热敏电阻为探测元件的温度传感器应用最为广泛。

有些半导体对光照敏感。当有光线照射在这些半导体上时，它们表现出像导体一样很强的导电能力；当无光照时，它们变得又像绝缘体那样不导电。利用半导体的这种光敏性，人们研制出自动控制用的光电元器件，如基于半导体光电效应的光电转换传感器，广泛应用于精密测量、光通信、计算技术、摄像、夜视、遥感、制导、机器人、质量检查、安全报警以及其他测量和控制装置中的半导体光敏元件等。

半导体材料除了具有上述的热敏性和光敏性等特点外，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，其导电能力会大大增强。例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大约 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 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。人们正是利用半导体的这些独特性能，制成了半导体二极管、稳压管、晶体三极管、场效应管及晶闸管等不同的电子器件。

1.1.2 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。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。

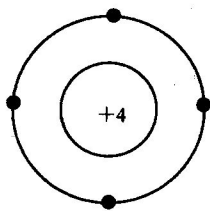


图1.2 硅和锗原子的简化模型

天然的硅和锗材料是不能制成半导体器件的，必须经过高度提纯工艺将它们提炼成纯净的单晶体。单晶体的晶格结构完全对称，原子排列得非常整齐，故常称为晶体，也称为本征半导体，其平面示意图如图1.3所示。图示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，每一对价电子同时受到两个相邻原子核的吸引而被紧紧地束缚在一起，组成了共价键结构。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。

常温下单晶体中的束缚价电子很难脱离共价键成为自由电子，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。因此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被原子核束缚得很紧。当温度升高或受到光照后，共价键中的一些价电子就会由于热运动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。把由于共价键的破裂而形成的自由电子和空穴称为电子—空穴对，并且把这种由于光照、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。

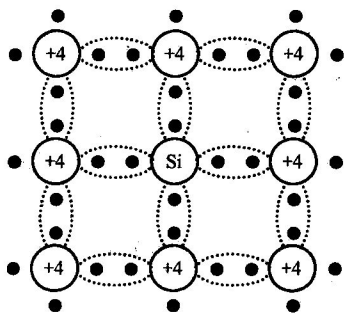


图1.3 单晶硅共价键结构示意图

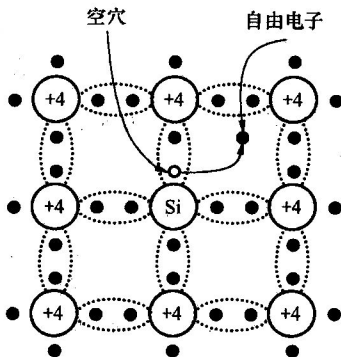


图1.4 本征激发现象

运载电荷的粒子称为载流子。本征激发下产生的是自由电子载流子，如果有外电场作用，自



由电子载流子就会成为导电的因素。自由电子载流子带负电，逆电场方向定向移动形成电流。

本征激发下，失去价电子的定域原子则由于少电子而带正电，这些带正电的离子是定域的，不能参与导电。

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能量后也会挣脱原子核的束缚，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，如图 1.5 所示。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的自由电子载流子逆着电场方向移动而形成的定向迁移，而复合运动的导电方式是空穴载流子的定向迁移，空穴载流子

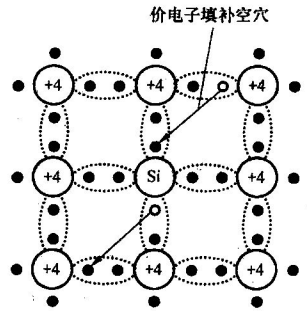


图 1.5 复合现象

带正电，顺电场方向定向运动形成电流。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，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。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，也可看作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。

1.1.3 半导体的导电机理

在金属导体中存在大量的自由电子，这些自由电子是一种带电的微粒子，在外电场作用下定向移动形成电流。即金属导体内部只有自由电子一种载流子参与导电。

本征半导体由于本征激发而产生自由电子载流子，由于复合运动产生空穴载流子，因此，半导体中通常有两种载流子同时参与导电，这一点正是半导体与金属导体在导电机理上的本质差别，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。当温度升高时，本征激发产生的电子—空穴对增多，同时“复合”的机会也增加；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。温度越高，两种载流子的数目就会越多，半导体的导电性能也就越好。即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，共价键中的电子被紧紧束缚而无法产生自由电子载流子和空穴载流子，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而产生自由电子载流子和空穴载流子，但此时这两种载流子的数目仅为每立方米单晶硅总电子数的 $1/10^{13}$ ，显然，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，当受到光照或外界温度显著升高的影响时，半导体中会有较多的价电子挣脱共价键的束缚，成为自由电子载流子和空穴载流子，从而使半导体的导电能力较为明显地增强，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。

1.1.4 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大大增强。

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(或锗)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,常温下这个多余的电子比其他共价键上的电子更容易挣脱共价键的束缚而成为自由电子,而失去一个电子的杂质原子则成为不能移动的带正电离子,因为这个杂质正电离子是定域的,因此不能参与导电。这种杂质半导体的结构如图1.6所示。

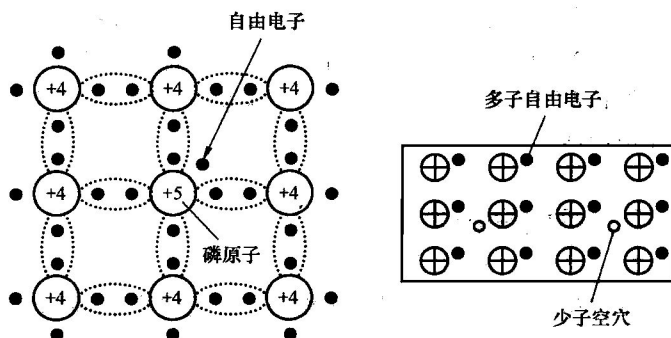


图 1.6 N型半导体晶体结构

掺入五价元素的杂质半导体中,除了热运动使一些共价键破裂而产生自由电子载流子和空穴载流子外,一个杂质原子本身又多出一个自由电子,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。室温情况下,当本征硅中的杂质数量等于硅原子数量的 10^{-6} 时,自由电子载流子的数目将增加几十万倍,使半导体的导电性能显著提高。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,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。由于这种杂质半导体中的导电主流是带负电的自由电子载流子,因此把这种多电子的杂质半导体称为电子型半导体,习惯上又把电子型半导体常称为N型半导体。

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(或镓、铟),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。

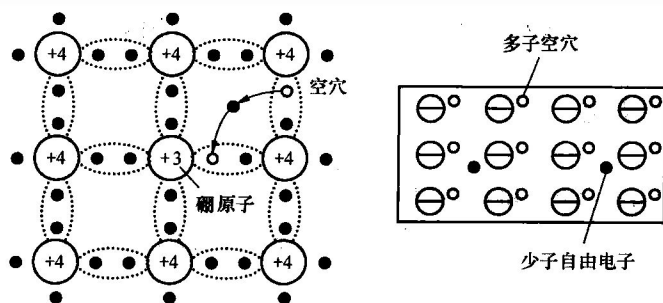


图 1.7 P 型半导体晶体结构

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而称为**少数载流子**。这种杂质半导体由于空穴数量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是少数载流子数量的 10^{10} 倍甚至更多,因此,杂质半导体的导电能力是本征率导体的几十万倍。

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,整个晶体仍然呈电中性。

1.1.5 PN 结及其单向导电性

杂质半导体的导电能力虽然比本征半导体大大增强,但它们并不能称为半导体器件。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。

单一的 N 型半导体和 P 型半导体只能起电阻的作用。当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,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。

1. PN 结的形成

物质总是从浓度高的地方向浓度低的地方运动,这种由于浓度差而产生的运动称为**扩散运动**。在电场力作用下,载流子的运动称为**漂移运动**。由于 P 区的多数载流子是空穴,少数载流子是电子;N 区的多数载流子是电子,少数载流子是空穴,因此在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。扩散的结果是使 N 区的多子复合掉了 P 区多子,在 P 区和 N 区的交界处只留下了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**,如图 1.8 所示。

空间电荷区中的载流子均被扩散的多子“复合”掉了,或者说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,由此又把空间电荷区称为**阻挡层**。

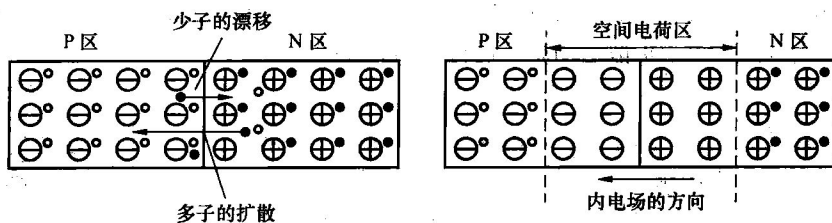


图 1.8 PN 结的形成过程

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。

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绝缘体。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 结引出端相连时, 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 (扩散电流由多子的定向移动形成, 通常简称为电流)。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。

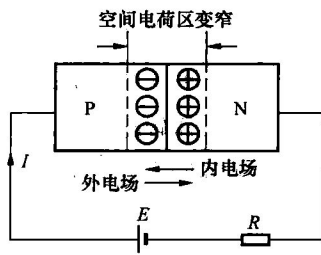


图 1.9 PN 结正向偏置

(2) PN 结反向偏置

交换电源的正、负极位置, 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。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。

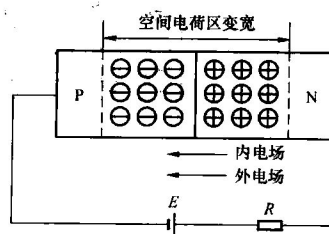


图1.10 PN结反向偏置

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,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**。

1.1.6 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,当反向电压超过某一数值时,反向电流急剧增加,这种现象称为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4V与7V之间,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之增强。在强电场作用下,少子漂移速度加快,动能增大,当它们在快速漂移运动过程中与中性原子相碰撞时,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,少子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,一般雪崩击穿的电压大约在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 4 V。

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。利用电击穿时电流变化很大，但 PN 结两端电压变化却很小的特点，人们研制出工作在反向击穿区的稳压管。

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，结温将持续升高，PN 结就会发生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。

思考与练习

1. 半导体具有哪些独特性能？在导电机理上，半导体与金属导体有何区别？
2. 什么是本征半导体？什么是“本征激发”？什么是“复合”？
3. N 型半导体和 P 型半导体有何不同？各有何特点？它们是半导体器件吗？
4. 什么是 PN 结？PN 结具有什么特性？
5. 电击穿和热击穿有何不同？试述雪崩击穿和齐纳击穿的特点。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构类型

半导体二极管实际上是由一个 PN 结外引两个电极构成的。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、面结合型和平面型三类，如图 1.11 所示。

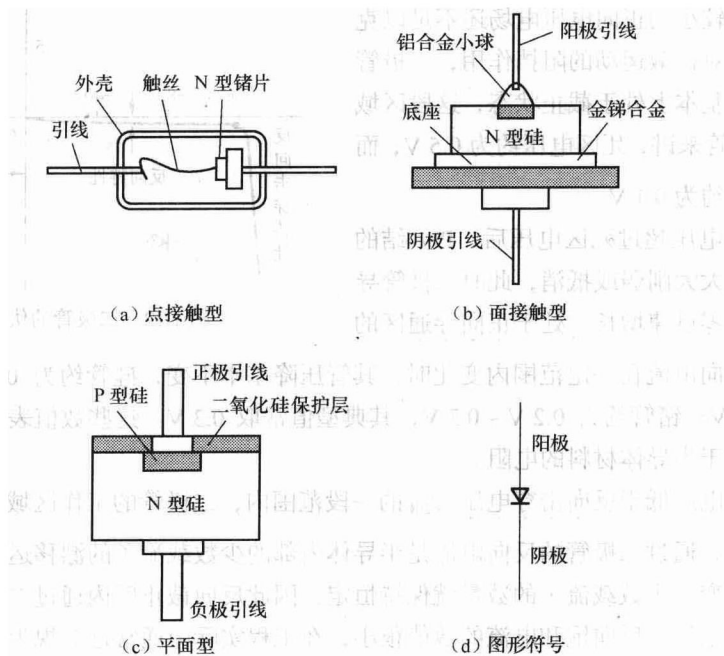


图 1.11 半导体二极管的结构类型及电路图符号



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, 结电容也很小, 不能通过较大电流; 但点接触型二极管管的高频性能好, 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, 适宜用作大功率低频整流器件。

3. 平面型二极管

如图 1.11 (c) 所示。这类二极管采用二氧化硅作保护层, 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作高频管或高速开关管, 结面积较大的用作大功率调整管。

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。

普通二极管的电路符号如图 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)。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指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, 如图 1.12 所示。

观察二极管的伏安特性曲线可知, 当二极管两端的正向电压较小时, 通过二极管的电流基本为零。这说明, 较小的正向电压电场还不足以克服 PN 结内电场对扩散运动的阻挡作用, 二极管仍呈现高阻态, 基本上处于截止状态, 这段区域称为死区。对硅管来讲, 死区电压约为 0.5 V, 而锗管的死区电压约为 0.1 V。

当外加正向电压超过死区电压后, PN 结的内电场作用将被大大削弱或抵消, 此时二极管导通, 正向电流由零迅速增长。处于正向导通区的

普通二极管, 正向电流在一定范围内变化时, 其管压降基本不变, 硅管约为 0.6 V ~ 0.8 V, 其典型值通常取 0.7 V; 锗管约为 0.2 V ~ 0.3 V, 其典型值常取 0.3 V。这些数值表明二极管的正向电流大小通常取决于半导体材料的电阻。

在外加反向电压低于反向击穿电压 U_{BR} 的一段范围内, 二极管的工作区域称为反向截止区。在反向截止区内, 通过二极管的反向电流是半导体内部的少数载流子的漂移运动, 只要二极管工作环境的温度不变, 少数载流子的数量就保持恒定, 因此反向截止区内通过二极管的反向电流又被称为反向饱和电流。反向饱和电流的数值很小, 在工程实际中通常近似视为零。

(注: 半导体少子构成的反向电流对温度十分敏感, 温度上升时, 反向电流会大大增加。)

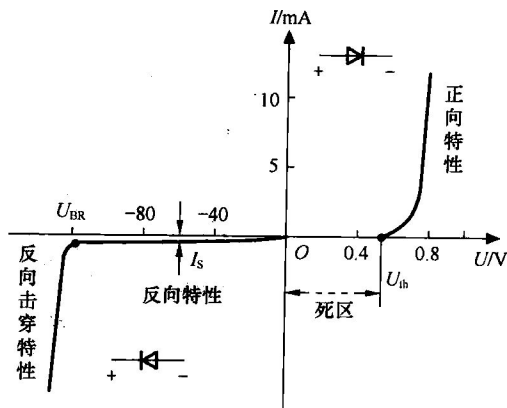


图 1.12 二极管的伏安特性曲线