



21 世纪高等院校
电气工程与自动化规划教材



模拟电子技术 微课版教程

曾赞 曾令琴 / 主编

丁燕 王磊 / 副主编

可通过手机等移

观看微课视频

多个模电实例分析

程中的创新思考

知识能力结合

理论知识体现模电技术发展前沿，能力训练突出实践性和应用性



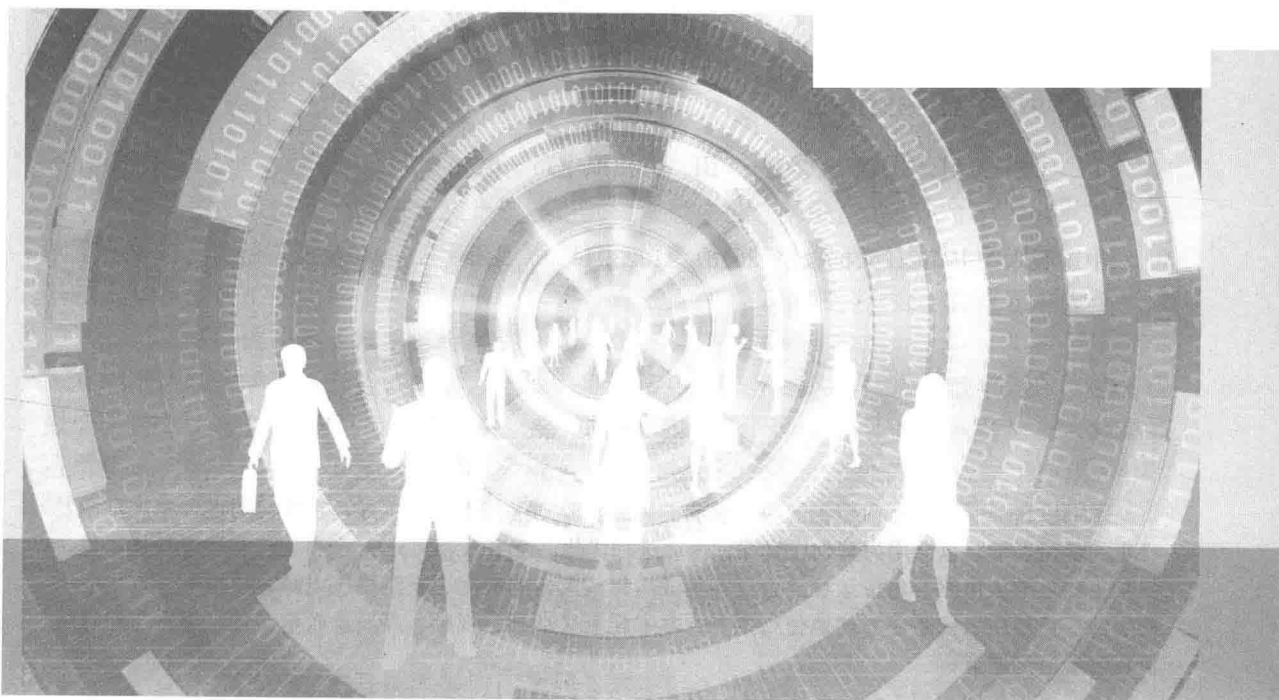
中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校
电气工程与自动化规划教材



模拟电子技术 微课版教程

曾赞 曾令琴 / 主编
丁燕 王磊 / 副主编

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术微课版教程 / 曾赞, 曾令琴主编. —
北京: 人民邮电出版社, 2016. 7
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-42410-5

I. ①模… II. ①曾… ②曾… III. ①模拟电路—电
子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第132394号

内 容 提 要

本书以培养学生分析问题、解决问题的能力和实验动手的能力为主导, 在学习的过程中注重激发学生的学习兴趣, 以够用为基础, 对课程内容进行优化。全书内容共分 6 个单元: 常用半导体器件、低频小信号放大电路、集成运算放大器、集成运算放大器的应用、直流稳压电源、模拟电子技术应用与实践。为使广大师生更方便地使用本书, 本书配套了动画、视频、高质量教学课件、思考与问题解析和章后检测题解析。

本书可作为应用型本科、高职高专、高级技工学校的教材, 也可供相关工程技术人员学习和电子技术爱好者学习和参考。

◆ 主 编 曾 赞 曾令琴

副 主 编 丁 燕 王 磊

责任编辑 刘盛平

执行编辑 王丽美

责任印制 焦志炜

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 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: 11.5

2016 年 7 月第 1 版

字数: 269 千字

2016 年 7 月河北第 1 次印刷

定价: 29.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

模拟电子技术发展的历史虽短，但应用的领域确是最深、最广的，它不仅是现代化社会的重要标志，而且成为人类探索宇宙宏观世界和微观世界的物质技术基础。可以说，模拟电子技术是和生产、生活密不可分的一门学科，其应用性、实践性都很强。在理工科学习专业知识的过程中，模拟电子技术课程起到了非常重要的作用。

根据目前教学改革形势，同时为了更好地适应电子技术的飞速发展，我们对以往的《模拟电子技术》教材进行了审视和研究，精心策划和编写了这本适用于高等职业技术教育 and 应用型本科的《模拟电子技术微课版教程》，并且加入了微课形式的二维码，方便师生使用。

本书编写的指导思想是：按照院校人才培养要求，坚持“适用、够用、实用”的原则；根据社会发展改进教学内容，根据教学需求改进分析方法，根据人才培养目标加入教学实践；保留模拟电子技术中经典的理论知识，将高深的文字通俗化、简单化、形象化，加强实用电路的分析力度。

我们编写的《模拟电子技术微课版教程》具有以下特色。

1. 采用了以往教材的经典体系，理论知识体现了模拟电子技术发展的前沿，能力训练突出了实践性和应用性。
2. 书中内容深入浅出，特别注重了常用器件特性分析的正确性和严谨性；基本放大电路静态、动态分析的目的和分析方法的阐述；集成电路线性和非线性应用电路的分析指导思想以及应用电路的剖析。
3. 书中提供并分析了模拟电子技术中的常用经典实例，对学生学习过程中的创新思考可起到一定的启发引导作用。
4. 对本书的节后思考与练习题进行了逐字逐句斟酌，并提供相应的正确答案；本着适用和实用的原则，对各单元后的习题难度及深度进行了详细讨论和制定，并提供习题的详细解析；对教学课件按照精品课程要求制作，从而可以更好地在教学中起到切实的指导作用。
5. 书中对重点知识配备了视频和动画，以二维码的形式插入书中，通过手机等终端设备的“扫一扫”功能，即可播放观看，实现了随时随地移动学习。

本书由黄河水利职业技术学的曾赞、郑州工商学院的曾令琴任主编，黄河水利职业技术学院的丁燕、王磊任副主编，郑州工商学院的原立格、张颖颖也参与了本书的编写。全书由曾令琴统稿。

作者

2016年3月

第一单元 常用半导体器件1

任务导入1

理论基础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2

1.1.3 半导体的导电机理4

1.1.4 杂质半导体4

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11

1.2.5 特殊二极管14

1.3 双极型半导体三极管 (BJT)17

1.3.1 BJT 的结构组成18

1.3.2 BJT 的电流放大作用18

1.3.3 BJT 的外部特性20

1.3.4 BJT 的主要技术参数21

1.3.5 复合晶体管22

1.4 单极型半导体三极管 (FET)23

1.4.1 单极型三极管概述23

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24

1.4.4 场效应管的主要技术参数26

1.4.5 场效应管的使用注意事项26

1.5 晶闸管 (SCR)27

1.5.1 晶闸管的结构组成27

1.5.2 晶闸管的工作原理28

1.5.3 晶闸管的伏安特性29

1.5.4 晶闸管的主要技术参数30

1.5.4 晶闸管的使用注意事项32

能力训练32

二极管、三极管及晶闸管的检测

方法32

常用电子仪器的使用35

第一单元 习题36

第二单元 低频小信号放大电路40

任务导入40

理论基础41

2.1 小信号单级放大电路41

2.1.1 小信号单级放大电路的基本

组态41

2.1.2 共射组态的单级放大电路41

2.1.3 共集电极电压放大器50

2.1.4 共基组态的单级放大电路52

2.2 3 种组态放大电路的性能比较54**2.3 单极型管的单级放大电路**56

2.3.1 自给偏压电路56

2.3.2 场效应管的微变等效电路57

2.3.3 共源极放大电路57

2.3.4 共漏极放大电路58

2.4 多级放大电路60

2.4.1 多级放大电路的组成60

2.4.2 多级放大电路的级间耦合

方式60

2.4.3 多级放大电路的性能指标

估算62

2.5 放大电路的频率响应62

2.5.1 频率响应的基本概念63

2.5.2 放大电路的频率特性63



2.5.3 波特图	64
2.5.4 多级放大电路的频率响应	66
能力训练	67
分压式偏置共射放大电路静态工作点的调试	67
电子电路识图、读图训练一	68
第二单元 习题	72
第三单元 集成运算放大器	75
任务导入	75
理论基础	76
3.1 集成运算放大器概述	76
3.2 差动放大电路	77
3.2.1 直接耦合放大电路需要解决的问题	77
3.2.2 差动放大电路的组成	78
3.2.3 差动放大电路的工作原理	79
3.2.4 差动放大电路的类型	80
3.2.5 恒流源式差动放大电路	81
3.3 复合管放大电路	82
3.4 功率放大电路	83
3.4.1 功率放大器的特点及主要技术要求	83
3.4.2 功率放大电路中的交越失真	84
3.4.3 功率放大器的分类	85
3.4.4 采用复合管的互补对称功率放大电路	90
3.5 放大电路的负反馈	91
3.5.1 反馈的基本概念	91
3.5.2 负反馈的基本类型及其判别	92
3.5.3 负反馈对放大电路性能的影响	94
3.6 集成运算放大器及其理想电路模型	96
3.6.1 集成运算放大器的分类	96
3.6.2 集成运放管脚功能及元器件特点	97
3.6.3 集成运放的主要性能指标	98
3.6.4 集成运算放大器的理想化条件	

及传输特性	98
能力训练	100
电子电路识图、读图训练二	100
第三单元 习题	102

第四单元 集成运算放大器的应用

任务导入	105
理论基础	106
4.1 集成运放的运算应用电路	106
4.1.1 反相比例运算电路	106
4.1.2 同相比例运算电路	107
4.1.3 反相求和运算电路	108
4.1.4 同相求和运算电路	108
4.1.5 双端输入差分运算电路	109
4.1.6 微分运算电路	110
4.1.7 积分运算电路	111
4.1.8 有源滤波器	111
4.1.9 集成运算放大器的线性应用举例	115
4.2 集成运算放大器的非线性应用	118
4.2.1 集成运放应用在线性区的特性	118
4.2.2 电压比较器	118
4.2.3 文氏桥正弦波振荡器	122
4.2.4 石英晶体振荡器	125
4.3 集成运算放大器的选择、使用和保护	128
4.3.1 集成运算放大器的选择	128
4.3.2 集成运算放大器的使用要点	129
4.3.3 集成运算放大器的保护	131
能力训练	132
集成运算放大器的线性应用电路实验	132
集成运放应用电路的识图、读图方法	134
第四单元 习题	137

第五单元 直流稳压电源

任务导入	140
------------	-----

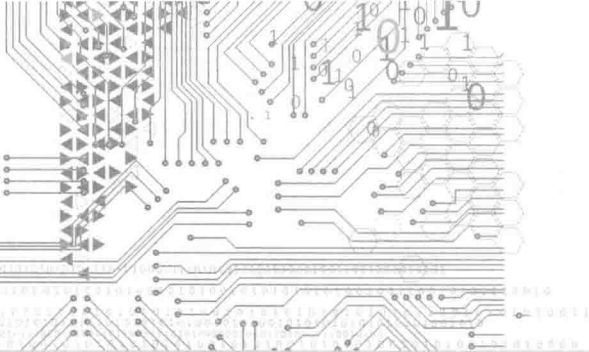
理论基础	140
5.1 小功率整流滤波电路	140
5.1.1 整流电路	141
5.1.2 滤波电路	143
5.2 稳压电路	146
5.2.1 直流稳压电源的主要性能 指标	146
5.2.2 并联型稳压电路	147
5.2.3 串联型稳压电路	148
5.2.4 开关型直流稳压电路	150
5.2.5 调整管的选择	152
5.2.6 稳压电路的过载保护	152
5.3 集成稳压器	153
5.3.1 固定输出的三端集成稳 压器	154
5.3.2 可调输出三端集成稳压器	156
5.3.3 使用三端集成稳压器时的 注意事项	158
能力训练	159
整流、滤波和稳压电路的实验	159
第五单元 习题	161

第六单元 模拟电子技术应用与实践

6.1 电子技术基本技能综合训练	163
6.1.1 光控开关的制作	163
6.1.2 音频功率放大器的制作	164
6.1.3 红外线报警器的制作	166

6.2 水温控制系统的设计	167
6.2.1 设计任务	167
6.2.2 设计要求	167
6.2.3 温度控制系统基本原理	168
6.2.4 温度控制系统设计指导	168
6.2.5 调试要点和注意事项	169
6.2.6 仪器设备及元器件	170
6.2.7 设计报告要求	170
6.3 函数信号发生器的设计	170
6.3.1 设计任务	170
6.3.2 设计要求	170
6.3.3 函数信号发生器的基本 原理	171
6.3.4 函数信号发生器的设计 指导	171
6.3.5 参数选择和注意事项	173
6.3.6 设计报告要求	173
6.3.7 思考题	173
6.4 简易电子琴的设计	173
6.4.1 设计任务	173
6.4.2 设计要求	174
6.4.3 预习要求	174
6.4.4 仪器设备及元器件	174
6.4.5 设计报告要求	175
6.4.6 注意事项	175

参考文献	176
------------	-----



第一单元

常用半导体器件

任务导人

半导体单晶材料硅和锗的发明以及二极管、晶体管等半导体器件的问世，促使了电子工业革命。目前硅单晶的年产量已达 2 万吨以上，8~12 英寸（20.32~30.48cm）的硅单晶已运用于工业生产；18 英寸（45.72cm）的硅单晶已研制成功；8 英寸（20.32cm）硅片已广泛用于大规模集成电路的生产；12 英寸 32 纳米工艺也已投入工业生产，预计 2016 年 22 纳米工艺将投产，2022 年 10 纳米工艺将投产。



电子技术发展

伴随着半导体技术的飞速发展，半导体器件不但越来越广泛地应用于通信、网络、工业制造、航空、航天和国防等各个领域，而且已经进入社会生活的方方面面，在我们的各行各业以及家庭中，发挥着难以想象的作用。毫不夸张地说，如果没有半导体器件，我们将失去信息化和电气化的绝大多数成就。

图 1.1 所示的实用电子线路上除了集成电路，还包含大量的二极管、三极管和场效应管等半导体器件。为了正确和有效地运用这些常用半导体器件，相关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初步的认识。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，才能够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。

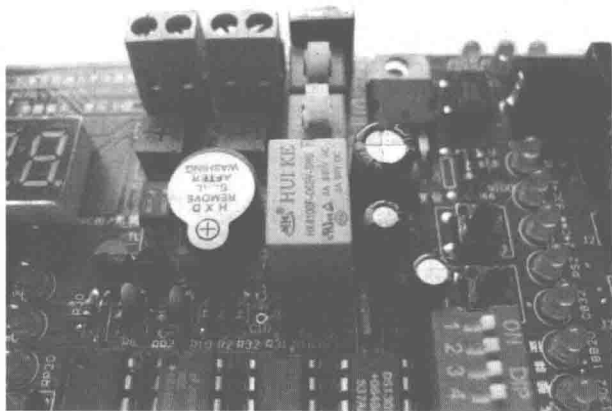


图 1.1 实用电子线路板

因此，第一单元的任务就是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。通过剖析这些半导体器件的结构、工作原理、特性曲线及特性参数等，读者在知识能力上能够深刻理解 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、工作原理和伏安特性；在技术能力上掌握正确检测半导体器件的好坏及极性的判别方法；对常用电子仪器有一定的认识和简单操作调试能力，如双踪示波器、函数信号发生器、电子毫伏表等。



理论基础

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，有时像地地道道的导体，有时又像典型的绝缘体。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

例如，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非常广泛。

还有一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，人们又研制出各种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等。

半导体材料除了上述的热敏性和光敏性外，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，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 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 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、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

1. 本征半导体的概念

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最外层的电子数目决定的，半导体的导电性质当然也取决于最外层电子数目。我们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，因此被称为四价元素，图 1.2 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，晶体的平面示意图如图 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 1.3 中套住两两价电子的虚线环),单晶体中的各原子靠共价键的作用紧密联系在一起。这种经过提纯工艺后,形成具有共价键结构的单晶体称为本征半导体。

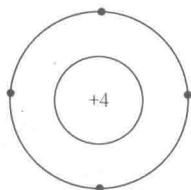


图 1.2 硅和锗原子的简化模型

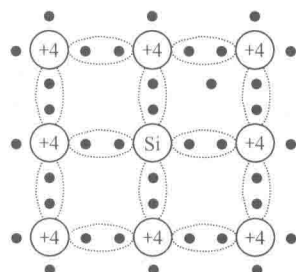


图 1.3 单晶硅共价键结构示意图

2. 本征激发和复合

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,这种由于光照、辐射、温度等热激发而使共价键中的价电子游离到空间成为自由电子载流子的现象称为本征激发,如图 1.4 所示。

本征激发的同时,游离走的价电子在共价键上留下一个空位,这个空位很快会被相邻原子中的价电子跳进填补,这些价电子填补空位的同时,它们又会留下一些新的空位,这些新的空位又会被邻近共价键中的另外一些价电子跳进填补上,这些价电子仍会留下新的空位让相邻价电子来填补……如此在本征半导体中又形成了一种新的电荷迁移现象:价电子定向连续填补空穴的复合运动,如图 1.5 所示。

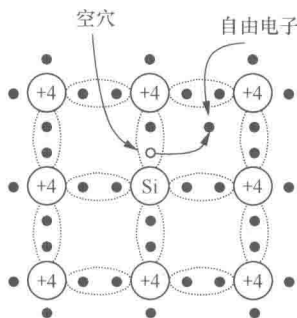


图 1.4 本征激发现象

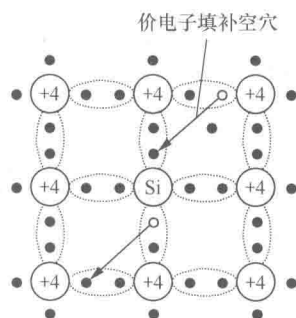


图 1.5 复合现象

复合的结果产生了另一种载流子——空穴载流子。复合不同于本征激发,本征激发产生的自由电子载流子带负电,在电场作用下,自由电子载流子将逆着电场力的方向形成定向迁移;复合产生空穴载流子,在电场作用下,空穴载流子则顺着电场方向形成定向迁移。注意:空穴(共价键中的空位)本身是不能移动的,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,所以人们虚拟出了沿电场方向定向迁移



的空穴载流子的运动。这就好比电影院的座位，当第一个座位空着时，后面的人依次向前挪动，看起来就像空位向后挪动一样。

“本征激发”和“复合”在一定温度下同时进行并维持动态平衡，因此自由电子和空穴两种载流子的浓度基本相等且不变，当温度升高时，本征激发产生的自由电子载流子增多，同时“复合”的机会也增加了，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动态平衡状态。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。即半导体中的两种载流子数量与温度的高低、辐射或光照强弱等热激发因素有关。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 $1/10^{13}$ 。这个数据说明，常温下半导体的导电能力仍然很低。

3. 温度对电子—空穴对的影响

半导体具有光敏性和热敏性。当半导体受到光照、辐射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—空穴对的浓度就会增加一倍；温度每升高 12°C ，单晶硅中的电子—空穴对的浓度约增加一倍。显然，温度是影响半导体导电性能的重要因素。

1.1.3 半导体的导电机理

金属导体中存在着大量的自由电子载流子，载流子是形成电流的原因。在外电场作用下，金属导体中的自由电子载流子在电场力的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。

半导体由于本征激发产生了自由电子载流子，由复合产生了空穴载流子，因此，当外电场作用于半导体时，就会有两种载流子同时参与导电形成电流。这一点正是半导体区别于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。

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杂质元素后，半导体的导电能力将极大地增强。

1. N型半导体

在硅（或锗）晶体中掺入少量的五价元素磷（或砷、锑），本征硅（或锗）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）原子被磷原子取代。当这些掺杂的磷原子与相邻的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。

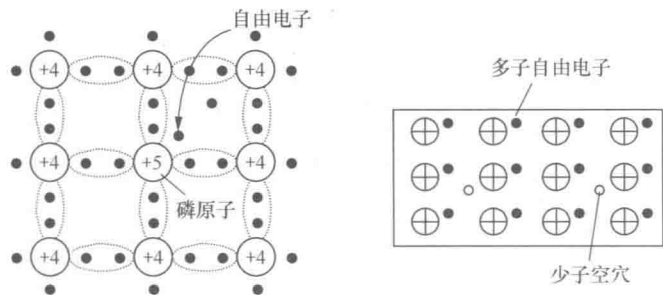


图 1.6 N 型半导体晶体结构

掺入五价元素的杂质半导体中，除了热运动使一些共价键断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。在室温情况下，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。显然，多子是由掺杂工艺生成的，其数量取决于掺杂浓度；少子是由本征激发和复合产生的，其数量取决于热激发的程度。

由于掺入五价杂质元素的半导体中，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称为**N 型半导体**。

2. P 型半导体

在单晶硅（或锗）内掺入少量三价杂质元素硼（或镓、铟），因硼原子只有三个价电子，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热激发条件下获得能量时，极易“跳入填补”这些空位，这样杂质原子就会因接收跳入空穴的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。

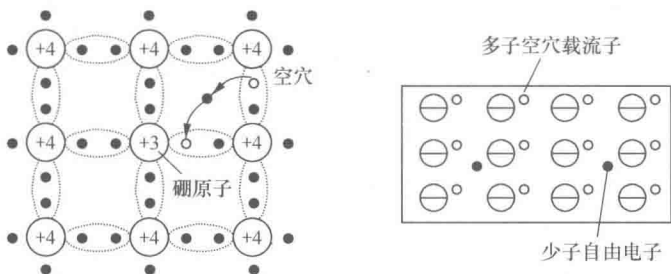


图 1.7 P 型半导体晶体结构

从结构图可看出，掺入三价杂质元素的单晶体中，空穴载流子的数量大于自由电子载流子的数量，因此空穴载流子为多子；由本征激发和复合产生的电子—空穴对数量相对较少，为少子。掺入三价杂质元素的半导体中，由于空穴载流子数量大于自由电子载流子的数量而被称为**空穴型半导体**，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。这也是半导体器件受到青睐最主要的原因之一。

需要指出的是: N 型半导体和 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, 此时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相比本征半导体有极大地增强, 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。但是, 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

由于 P 区的多数载流子是空穴, 少数载流子是自由电子; N 区的多数载流子是自由电子, 少数载流子是空穴, 因此在 P 区和 N 区的交界面两侧明显地存在两种载流子的浓度差。由于有浓度差, P 区的多子空穴载流子和 N 区的多子自由电子载流子都会从浓度高的区域向浓度低的区域扩散。扩散的结果使交界处 N 区的多子复合掉了 P 区多子, 于是在 P 区和 N 区的交界处出现了一个干净的带电杂质离子区——空间电荷区, 如图 1.8 所示。

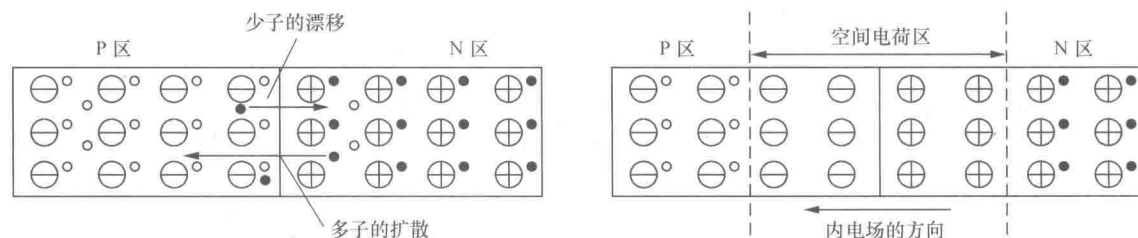


图 1.8 PN 结的形成过程

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殆尽, 因此有时又把空间电荷区称为耗尽层。

空间电荷区内定域的带电离子是形成场的原因, 于是空间电荷区内出现一个内电场, 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, 内电场对扩散运动起阻挡作用, 因此又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, 空间电荷区就越宽。另一方面, 空间电荷区的内电场对扩散运动起阻挡作用, 而对 N 区和 P 区中少子载流子的漂移起推动作用, 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 区失去的电子, 即漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。多子的扩散和少子的漂移既相互联系, 又相互矛盾。

在初始阶段,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,这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,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作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,相当于介质。在PN结两侧的P区和N区则导电率相对较高,类似于导体。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,PN结的宽度固定不变。如果在PN结两端加上电压,扩散与漂移运动的动态平衡就会被破坏。

(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,PN结为正向偏置,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,与PN结内电场的方向相反,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(扩散电流即通常所说的导通电流,主要由多子的定向移动形成)。在一定范围内,外电场越强,正向电流越大,PN结对正向电流呈现的电阻越小,PN结的这种低阻状态在电子技术中称为PN结正向导通,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、负极位置换一下,即P区接电源负极,N区接电源正极,即构成PN结反向偏置。PN结反偏时,外加电场与空间电荷区的内电场方向一致,这同样会破坏扩散与漂移运动平衡状态。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。但是,常温下少数载流子恒定且数量不多,故反向电流极小,极小的电流说明PN结的反向电阻极高,通常可以认为PN结不导电,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。

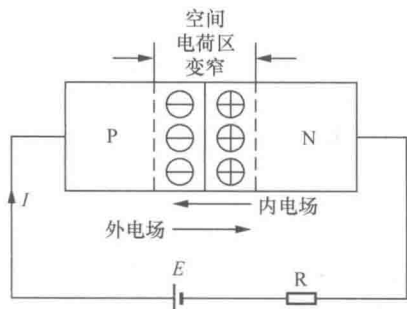


图 1.9 PN结正向偏置

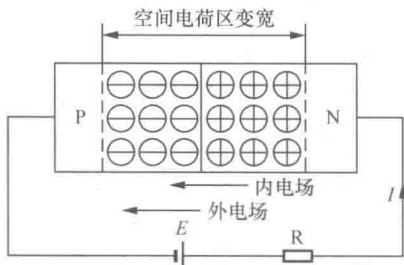


图 1.10 PN结反向阻断



当外加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,在设计电子电路时,通常要考虑温度补偿问题。

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 结的单向导电性是半导体器件的主要工作机理。

1.1.6 PN 结的反向击穿问题

PN 结反向偏置时,在一定的电压范围内,流过 PN 结的电流很小,通常可忽略不计。但是,当反偏电压超过某一数值时,反向电流将骤然增大,这种现象称为 PN 结反向击穿。PN 结的反向击穿包括雪崩击穿和齐纳击穿。

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,致使它们在快速漂移运动过程中与中性原子相碰撞,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的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至少要在 7V 以上。

2. 齐纳击穿

当 PN 结两边的掺杂浓度很高,且 PN 结制作很薄时,PN 结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 PN 结很薄,即使所加反向电压不大,对很薄的 PN 结来说也相当于处于强大电场中,这个强电场足以把空间电荷区内的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。这种场效应的击穿叫齐纳击穿。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。电击穿过程通常是可逆的,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。

虽然电击穿过程可逆,但是当反向击穿电压持续增加,反向电流持续增大时,PN 结的结温也会持续升高,升高至一定程度时,电击穿将转变性质变为热击穿,热击穿过程不可逆,会造成 PN 结的永久损坏,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. 何谓本征半导体？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. 何谓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就是由一个PN结外引两个电极构成的。半导体二极管按材料的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、面接触型和平面型三类。

1. 点接触型二极管

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

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（几安至几十安），适宜用作大功率低频整流器件，主要用在把交流电变换成直流电的“整流”电路中。

3. 平面型二极管

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，由于半导体表面制作得很平整，故而得名平面型二极管。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表示用N型硅材料制成的管子型号；锗管一般用A表示，如2AP1表示用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）。

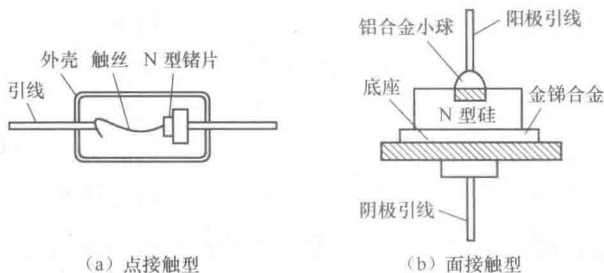


图 1.11 半导体二极管的结构类型及电路图符号

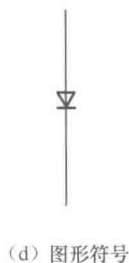
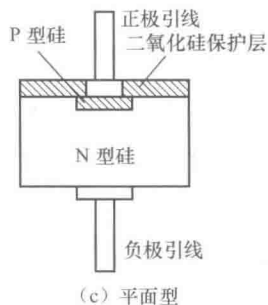


图 1.11 半导体二极管的结构类型及电路图符号(续)

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性曲线如图 1.12 所示。

观察二极管的伏安特性曲线,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,我们把这段区域称为死区。通常硅管的死区电压约为 0.5V,锗管的死区电压约为 0.1V。

继续观察二极管的特性曲线。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,硅管为 0.6~0.8V,其典型值通常取 0.7V;锗管为 0.2~0.3V,其典型值常取 0.3V,这些数值表明二极管的正向电流

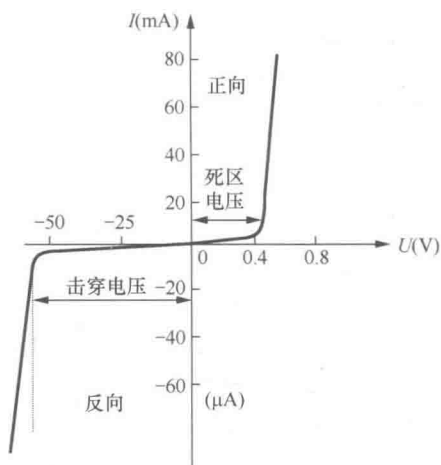


图 1.12 二极管的伏安特性曲线



大小通常取决于半导体材料的电阻。在二极管的正向导通区(死区电压至导通压降的一段电压范围),二极管中通过的正向电流与二极管两端所加正向电压具有一一对应关系,正向导通区内二极管两端所加电压过高时,必然造成正向电流过大使二极管过热而损坏,所以二极管正偏工作时,通常需加分压限流电阻。

观察二极管的反向伏安特性。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少数载流子的漂移运动形成的,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,因此少子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值。但是,半导体少子构成的反向电流对温度十分敏感,当由于光照、辐射等原因使二极管所处环境温度上升时,反向电流将随温度的增加而大大增加。

反向电压继续增大至超过反向击穿电压 U_{BR} 时,反向电流会突然骤然剧增,特性曲线向下骤降,二极管失去其单向导电性,进入反向击穿区。二极管进入反向击穿区将发生电击穿现象,由于电击穿的过程通常可逆,只要设置某种保护措施限制二极管中通过的反向电流或降低加在二极管两端的反向电压,二极管一般不会造成永久损坏。但是在不采取任何措施的