

高等学校教材

模拟集成电路 技术教程

浙江大学电子学教研室 编

邓汉馨 郑家龙 主编

高等教育出版社



高等学校教材

模拟集成电路技术教程

浙江大学电子学教研室编

邓汉馨 郑家龙 主编

高等教育出版社

(京)112号

内 容 简 介

本书是根据《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求(修订稿)》编写而成,并经高等学校工科电工课程教学指导委员会电子技术课程教学指导小组同意,作为高等学校教材出版。

全书共分七章:常用半导体器件、基本放大电路分析、典型集成运算放大器结构与特性、负反馈应用基础、波形发生与变换电路、功率电子电路和信号检测与处理。

本书以模拟集成电路为重点,以分立元件电路为基础,内容精练,说理清楚、删节方便,适于不同学时、不同类型的学校选用。

本书与李士雄、丁康源主编的《数字集成电子技术教程》为配套教材,可作为高等学校电气类、自控类和电子类专业“模拟电子技术基础”课程教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

本书责任编辑 任庆陵

高等学校教材

模拟集成电子技术教程

浙江大学电子学教研室编

邓汉馨 郑家龙 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

中国科学院印刷厂印装

*

开本 737×1092 1/16 印张21.75 字数 490 000

1994年5月第1版 1994年5月第1次印刷

印数 0001—6 735

ISBN 7-04-004681-4/TN·196

定价 8.55 元

前 言

根据国家教育委员会高等学校工科基础课 1991~1995 年教材建设规划,本书由工科电工课程教学指导委员会电子技术课程教学指导小组推荐出版,供高等学校电气类、自控类和电子类专业用作“模拟电子技术基础”课程教材,可与东南大学李士雄、丁康源主编的《数字集成电子技术教程》配套使用。

本书的编写工作是在浙江大学电子学教研室编、邓汉馨主编《模拟电子技术基本教程》的基础上,参照电子技术课程教学指导小组于 1993 年 6 月制订的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求(修订稿)》进行的。编写的指导思想是:

1. 紧靠教学基本要求,对教学基本要求中所规定的教学内容力求讲深、讲透,并适当加以扩充,以适应不同类型的高校使用。

2. 由于模拟集成电路已经获得广泛应用,本课程的教学重点应该是,让学生正确理解通用型和专用型集成电路的原理、特性和参数,使他们能够根据实际的需要选用合适的集成器件,并组成相应的功能电路。

3. 分立元件电路分析中的基本概念、基本原理和基本分析方法是正确理解集成电路原理、特性和参数必不可少的基础,编写时力求做到删繁就简,与集成电路有机结合,让“分立电路为集成电路服务”。

本教材共分七章,各章的参考学时见下表。书中注有 * 号的内容已超出教学基本要求,在学时不足的情况下可以删去不讲,或指定自学(特别对第七章的内容,可以大量删节)。

章 号	一	二	三	四	五	六	七	总计
学 时	12	14	8	12	8	8	6~12	68~74

本书的编写工作是在邓汉馨教授的指导下进行的,具体分工如下:陈道铎编写第一章,吴国庸编写第三章和第六章的功率放大部分,姚玉明编写第四章,章安元编写第五章和第七章,郑家龙编写绪言、第二章和第六章的电源部分,并负责全书的统稿工作。本书由邓汉馨和郑家龙任主编,邓汉馨负责书稿的审定。初稿完成后,曾在浙江大学校内试用。编写过程中,浙江大学电子学教研室的方伟、于胜其、李政、王小海、吴斌和陈隆道等老师多次参加修改讨论,并提出了宝贵的意见,方伟老师还为第七章编写了大纲和部分初稿。

本书由东南大学衣承斌教授主审,参加审稿工作的有刘京南副教授和李桂安老师,他们十分认真地审阅了书稿,并提出了不少建设性的修改意见。电子技术课程教学指导小组顾问沈尚贤教授、原组长童诗白教授和组长康华光、何金茂教授以及小组全体成员对本书的编写给予热情的

CA016/09

支持和帮助。兄弟院校的同行,如南昌大学的雷振南、山东矿业学院的汤元信等老师都十分关心本书的编写。对此,编者谨表示衷心的感谢。

限于编者的水平,本书难免会有缺点甚至错误,欢迎各兄弟院校的老师 and 广大读者批评指正。

编者

1993年7月于浙江大学

目 录

绪言.....	1	2.4 交流通路和低频小信号模型.....	85
第一章 常用半导体器件.....	4	2.4.1 场效应管的低频小信号模型.....	86
1.1 半导体器件工作机理的基础.....	4	2.4.2 双极型管的低频小信号模型.....	87
1.1.1 半导体的导电特性.....	4	2.4.3 放大电路的动态分析法.....	90
1.1.2 PN结的形成.....	7	2.4.4 放大电路动态分析举例.....	98
1.1.3 PN结的单向导电特性.....	9	2.4.5 多级放大电路的组成和计算.....	104
1.1.4 PN结的击穿特性.....	11	2.5 放大电路的频率响应.....	107
1.1.5 PN结的电容效应.....	12	2.5.1 场效应管的高频小信号模型.....	108
1.2 半导体二极管.....	13	2.5.2 双极型管的高频小信号模型.....	109
1.2.1 半导体二极管的结构和类型.....	13	2.5.3 放大电路的频率响应分析.....	110
1.2.2 二极管的特性和参数.....	14	2.5.4 对数频率特性和波特图.....	114
1.2.3 稳压二极管和光电二极管.....	16	思考题和习题.....	119
1.2.4 二极管电路分析举例.....	18	第三章 典型集成运算放大器结构与特性.....	127
1.3 场效应晶体三极管(简称场效应管).....	23	3.1 集成运放的基本结构特点.....	127
1.3.1 绝缘栅场效应管.....	24	3.1.1 集成运放结构概要.....	127
1.3.2 结型场效应管.....	29	3.1.2 集成恒流偏置电路和有源负载电路.....	128
1.3.3 场效应管的主要参数和特点.....	32	3.2 差动放大电路.....	131
1.3.4 场效应管共源极电路的图解分析.....	36	3.2.1 差动放大级的主要作用和基本电路形式.....	131
1.4 双极型晶体管.....	39	3.2.2 差动放大器在不同输入、输出方式下的动态性能指标.....	136
1.4.1 双极型晶体管的结构.....	39	3.2.3 运放输入级电路形式及其基本性能.....	139
1.4.2 晶体管中的电流分配与控制.....	40	3.3 中间放大级电路.....	142
1.4.3 晶体管的伏安特性曲线.....	43	3.4 输出级电路.....	144
1.4.4 晶体管的主要参数.....	46	3.4.1 对运放输出级的要求和输出级电路基本形式.....	144
1.4.5 晶体管共发射极电路的图解分析.....	51	3.4.2 甲乙类互补对称式共集电路.....	145
1.4.6 双极型管和场效应管的比较.....	55	3.5 集成运放电路举例.....	147
思考题和习题.....	55	3.5.1 高阻型集成运放 5G28.....	147
第二章 基本放大电路分析.....	64	3.5.2 通用型集成运放 CF741.....	150
2.1 放大电路的若干基本概念.....	64	3.6 集成运放的基本特性和参数.....	151
2.1.1 静态与动态的关系.....	64	3.6.1 集成运放的外形和符号.....	151
2.1.2 放大过程的基本原理.....	67	3.6.2 集成运放的电压传输特性和三项基本参数.....	152
2.1.3 放大电路的性能指标.....	68	3.6.3 集成运放的失调参数.....	153
2.2 基本放大电路的组成.....	72	3.6.4 集成运放的共模参数.....	155
2.2.1 场效应管基本放大电路的组成.....	72	3.6.5 集成运放的频域和时域参数.....	156
2.2.2 双极型管基本放大电路的组成.....	75	3.6.6 集成运放的选用原则和使用要点.....	159
2.3 直流通路和静态分析模型.....	78	思考题和习题.....	162
2.3.1 场效应管的折线化模型.....	78		
2.3.2 双极型管的折线化模型.....	79		
2.3.3 放大电路的静态分析法.....	80		

第四章 负反馈应用基础167	第六章 功率电子电路245
4.1 反馈的基本概念.....167	6.1 低频功率放大级.....245
4.1.1 反馈放大器方框图.....167	6.1.1 功放级的特殊问题.....245
4.1.2 反馈放大器的分类.....168	6.1.2 甲类单管功放级.....246
4.2 负反馈对放大器性能的影响.....177	6.1.3 乙类双管功放级.....248
4.2.1 提高闭环增益 A_f 的稳定性.....178	6.2 低频功率放大器的组成.....253
4.2.2 改善放大器的非线性.....178	6.2.1 集成运放的功率扩展电路.....253
4.2.3 抑制放大器内部的温漂、噪声和干扰.....180	6.2.2 集成功率放大器.....257
4.2.4 扩展通频带.....181	*6.2.3 VMOS 管功率放大器.....259
4.2.5 负反馈对输出电阻的影响.....182	6.3 整流、滤波、稳压电路概述.....261
4.2.6 负反馈对输入电阻的影响.....183	6.3.1 整流与滤波电路.....261
4.3 集成运放构成的基本负反馈电路.....184	6.3.2 稳压电路的性能指标.....265
4.3.1 比例运算电路.....184	6.4 线性串联型稳压电路.....266
4.3.2 求和运算电路.....186	6.4.1 串联型稳压电路的结构.....266
4.3.3 积分和微分运算电路.....187	6.4.2 稳压电路指标的计算和调整管的选用.....268
4.3.4 对数和指数运算电路.....189	6.4.3 稳压电路中的保护环节.....269
4.3.5 电流-电压变换器.....190	6.5 集成稳压电路.....271
4.3.6 电压-电流变换器.....190	6.5.1 三端集成稳压器及其应用.....271
4.4 负反馈放大器的计算.....191	6.5.2 三端集成稳压器 W 7800 系列的原理电路.....274
4.4.1 深度负反馈放大器的近似算法.....191	6.6 开关型稳压电路.....277
4.4.2 实际运算电路的误差.....194	思考题和习题.....279
4.5 负反馈放大器的自激问题.....197	第七章 信号检测与处理285
4.5.1 产生自激振荡的原因和条件.....197	7.1 信号与电子系统概述.....285
4.5.2 稳定判据和稳定裕度.....200	*7.2 模拟乘法器.....289
4.5.3 消除自激振荡的方法.....203	7.2.1 对数、反对数型模拟乘法器.....289
思考题和习题.....206	7.2.2 可变跨导型模拟乘法器.....290
第五章 波形发生与变换电路212	7.2.3 单片模拟乘法器.....294
5.1 产生正弦振荡的条件.....212	7.2.4 模拟乘法器的应用.....295
5.2 RC 正弦波振荡器.....214	7.3 信号的滤波.....297
5.2.1 RC 串并联电路的选频特性.....214	7.3.1 滤波器的功能与分类.....297
5.2.2 RC 桥式振荡器的工作原理.....215	7.3.2 有源低通滤波器 (LPF).....298
5.2.3 其它 RC 振荡电路.....217	*7.3.3 有源高通滤波器 (HPF).....304
5.3 LC 正弦波振荡器.....219	*7.3.4 有源带通滤波器 (BPF).....305
5.3.1 变压器反馈式振荡器.....219	*7.3.5 有源带阻滤波器 (BEF).....307
5.3.2 三点式振荡器.....221	*7.3.6 开关电容滤波器.....310
5.4 石英晶体振荡器.....223	*7.4 调制器与解调器.....313
5.4.1 石英晶体谐振器.....223	7.4.1 调制与解调的一般概念.....313
5.4.2 石英晶体振荡电路.....225	7.4.2 正弦信号的振幅调制与解调.....313
5.5 非正弦波的产生与变换.....227	7.4.3 脉冲宽度调制.....319
5.5.1 比较器.....227	7.4.4 锁相环.....320
5.5.2 方波与三角波发生器.....231	*7.5 测量放大器.....324
*5.5.3 压控振荡器.....235	7.5.1 高输入电阻、高共模抑制比测量放大器.....324
*5.6 正弦函数转换器.....236	7.5.2 斩波稳零放大器.....326
思考题和习题.....238	7.5.3 隔离放大器.....328
	思考题和习题.....332
	主要参考文献.....336
	部分习题参考答案.....337

绪 言

一、本课程的性质和任务

根据《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》中的规定,本课程是电气类、自控类和电子类专业在电子技术方面入门性质的技术基础课。它的任务是使学生获得电子技术方面的基本理论、基本知识和基本技能,培养学生分析问题和解决问题的能力,为以后深入学习电子技术某些领域中的内容,以及为电子技术在专业中的应用打好基础。

二、本课程的主要教学内容与特点

按照本课程的教学基本要求,模拟电子技术课程的主要教学内容是,在学习常用半导体器件和基本放大电路的工作原理和分析方法的基础上,掌握集成运算放大器的特性、参数和使用方法,进而深入地学习模拟信号的精密放大、有源、滤波、基本运算以及信号发生与变换等方面的典型电路和功率电子电路,为今后学习电子技术在专业领域中的内容打好基础。

在学习本课程时,读者应该注意以下几方面的特点:

1. 规律性

电子电路是由电子器件和电阻、电容等电路元件按照一定的规律组合而成的,用于各种场合的复杂电子电路也都由若干种基本电子电路所组成,并在一定的组合原则下协调地工作。学习时要注意掌握它们的组合规律,并熟记一些基本电子电路的结构和特性。

2. 非线性

由于电子器件具有非线性特性,所以必须采用非线性电路的分析方法来分析电子电路。常用的有图解分析法和模型分析法,它们都是重要的分析工具。

3. 工程性

对于电子电路的分析与设计,采用精确的分析计算难度较大,往往不必要。因为电子器件的特性和参数分散性较大,同时还随温度而变化,而电路元件的参数也有一定的误差,因此,工程上通常是先用近似算法对电路进行粗略的估算,然后通过实验调试来达到预定的设计要求。

4. 实践性

电子技术是一门实践性很强的课程,这主要是因为影响电子电路工作的因素往往非常复杂,难以用简单的模型加以全面而精确的模拟。更为重要的是,学生必须通过实验调试才能理解许多基本概念,学习到许多实际知识,并且只有掌握了实验技能,才能使理论与实践紧密结合,从中培养解决实际问题的能力。这是理论学习中难以达到的目的,所以初学者必须十分重视实践教学环节。

三、本教材的结构和系统

在微电子技术高水平、高速度发展的今天,一些结构较为复杂的分立元件电路已广泛地被某些通用型或专用型集成电路所取代,这给使用者带来极大的方便。但是,要把集成电路的性能用好、用“活”,必须了解它的结构原理,从而才能正确理解它的性能参数。作为电子技术方面的入门性课程,本教材将内容安排分为三个层次:

1. 通过第一章(常用半导体器件)和第二章(基本放大电路分析)的学习,让读者掌握必要的基本概念和电子电路的基本分析方法,作为学习第三章(典型集成运算放大器结构与特性)的基础。

2. 第四章(负反馈应用基础)是“基础”与“应用”之间的桥梁。负反馈是使运算放大器实现线性应用的基本条件,利用负反馈使运算放大器的性能得以改善,因而才有可能在一定的精度要

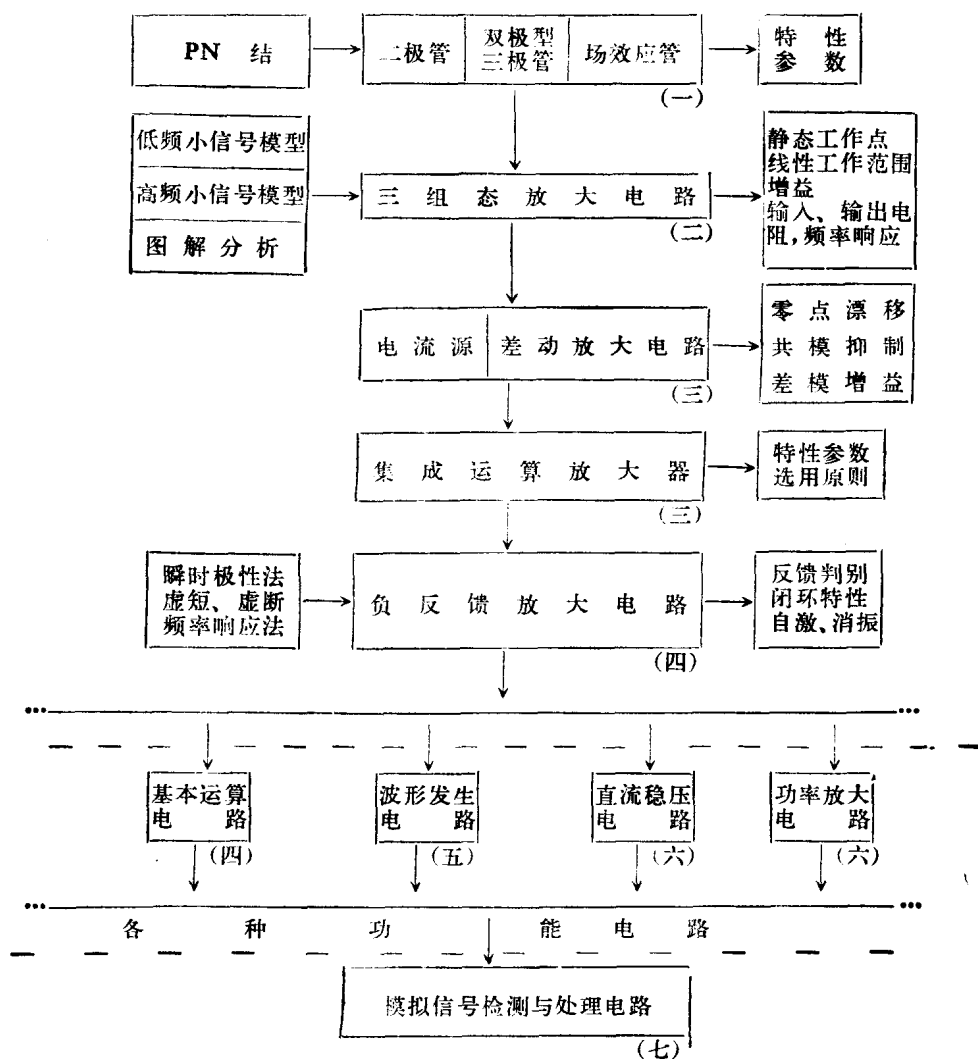


图 001

求下实现各种模拟运算(如比例、求和、积分等运算)。

3. 第五章所介绍的波形发生与变换电路是利用正反馈组成的功能电路。第六、七章中所介绍的功率电子电路、有源滤波电路、模拟乘法电路以及测量放大电路等也均属于基本功能电路,它们都是集成电路或分立元件电路的基本应用。用于不同场合的各种比较复杂的模拟电子电路通常就是由若干种基本功能电路组成的。

为了让读者进一步了解本教材的主要内容及其相互间的联系,这里画了一个方块结构图(图 001)。图中右下角标以章号的方块反映了相应章节的主要内容;左侧小方块中的内容是重要的概念和分析工具;右侧小方块表示所属章节中的重要分析对象。

“模拟电子技术”和“数字电子技术”是“电子技术基础”课程中的两个分支,一个实际的电子系统往往是二者有机的结合。教学中,可以按需要任意选择这两门课程的学习顺序,但如果先学“数字电子技术”课,则首先要安排学习本教材第一章的内容。

第一章 常用半导体器件

1.1 半导体器件工作机理的基础

电子技术发展到了今天这样的水平,首先要归功于半导体材料的发现和半导体制造工艺的日益完善。无论是制造单个半导体器件,还是制造大规模集成电路,都需要用半导体材料作为芯片。因此,在介绍半导体器件之前,应当对半导体的基本性能有一定的了解,这将有助于对半导体器件外部特性的理解。

1.1.1 半导体的导电特性

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,它的电阻率为 $10^{-3} \sim 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ 。在自然界中,属于半导体的材料很多,而用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。硅和锗都是四价元素,其中以硅用得最广泛,在以后的讨论中,常以硅作为例子。

一、本征半导体

作为半导体器件的材料,必须首先经过高纯度的提炼,这种不含杂质的半导体,称为**本征半导体**。纯净的单晶硅称为本征硅。为了了解半导体的导电性能,需要从其原子结构讲起。本征硅的原子结构如图 1.1.1(a) 所示,其最外层轨道上有 4 个电子,它受原子核的束缚力最小,称为**价电子**。元素的化学性质是由这些价电子决定的,其导电性能也与价电子有关。因此,价电子成为我们所关注的对象。为了便于讨论,我们常采用图 1.1.1(b) 所示的简化模型。图中, $\oplus$ 代表原子核和除价电子外的内层电子所组成的**惯性核**的电荷。

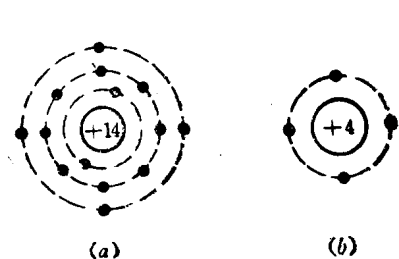


图 1.1.1 硅(Si)原子结构模型

(a) 原子结构图 (b) 简化模型

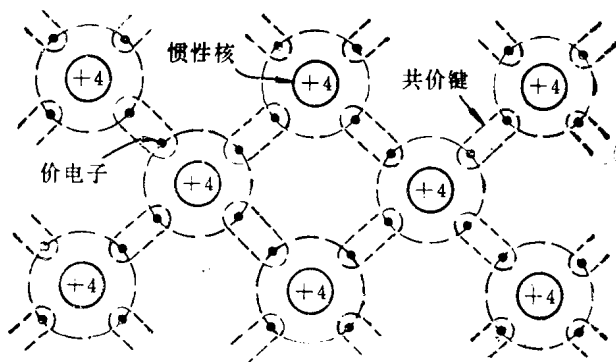


图 1.1.2 硅的共价键结构示意图

硅制成单晶后,它的原子都按一定的规律整齐地排列着,原子之间靠得很近,价电子不仅受到自身原子核的吸引,而且还受到相邻原子核的作用,使价电子为两个相邻原子所共有,形成了晶体中的**共价键**结构,其示意图如图 1.1.2 所示。每个原子都有 4 个价电子,通过共价键结构与

相邻 4 个原子结合在一起,形成排列整齐的晶体。

在热力学温度零度和无外界能量激发的条件下,由于价电子被共价键束缚着,不存在自由运动的电子,所以半导体呈现绝缘体的特性。但在常温下或受到光照时,某些共价键中的价电子从外界获得足够的能量,挣脱共价键的束缚而成自由电子。同时,在共价键中留下了空位,常称之为空穴。这种现象称为本征激发(即热激发)。自由电子和空穴总是成对地出现,常称之为电子空穴对。

当共价键中出现了空穴后,邻近共价键中的价电子就较易填补到这个空位上,而在该价电子的原来位置上出现了新的空位,继而其它价电子又可能来到这个新的空位。这种过程的持续进行,就相当于一个空穴在晶体中移动,如图 1.1.3 所示。原子本来是电中性的,自由电子携带负电荷离开后,空穴可看成是携带正电荷的载流子。因此,本征半导体中,有自由电子和空穴两种载流子参加导电。但是,在本征激发的同时,半导体中还存在着自由电子受原子核吸引而重新回到共价键中的机会,从而使部分电子空穴对消失,这种现象称为复合。在一定温度下,电子空穴对的产生和复合是同时进行的,达到动态平衡时,电子空穴对便维持一定的浓度值。如果用 p_i 表示本征硅中的空穴浓度, n_i 表示自由电子的浓度,则它们的浓度可用下式①表示:

$$n_i(T) = p_i(T) = AT^{3/2}e^{-E_G/2kT}$$

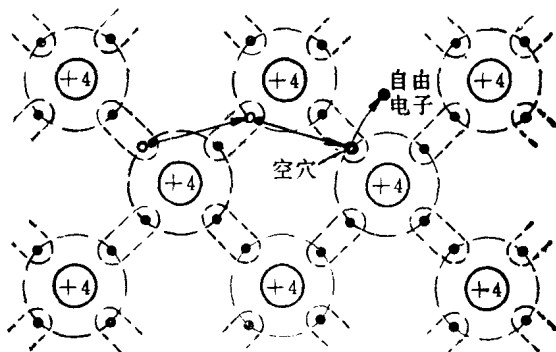


图 1.1.3 空穴在晶格中的移动

式中, A 为常数(对硅材料而言, $A=3.38 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$, 锗材料 $A=1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$), k 为玻耳兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), E_G 是 $T=0\text{K}$ 时,挣脱共价键所需要的能量,单位为 eV (电子伏) E_G 又称禁带宽度(硅为 1.21 eV ; 锗为 0.785 eV)。在室温下($T=300 \text{ K}$ 时),硅材料中的 $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; 锗材料中的 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。值得注意的是, n_i 和 p_i 的数值仅占原子密度的很小比例,如硅原子密度为 $4.96 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, 室温下, n_i 或 p_i 仅为它的三万亿分之一。可见本征硅的导电能力是很弱的,但与温度有着十分密切的关系。按计算,在常温附近,大约温度每升高 10°C , 硅材料的 n_i (或 p_i) 将增加一倍。因此,温度对本征半导体的导电性能有较大的影响。

二、杂质半导体

在本征半导体中,掺入某些微量的元素作为杂质,可使其导电性能发生显著的变化。掺入杂质的半导体,称为杂质半导体。按所掺杂质的不同,可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

如果在本征半导体中,采用扩散等工艺,掺入微量的磷、砷或锑等五价元素(例如磷),则在原

① 见[参 4]P. 26~29。

来的硅晶体结构中,磷原子就会取代某些硅原子的位置。磷原子有5个价电子,其中4个价电子与周围的4个硅原子的价电子组成共价键,而多余的1个价电子处于共价键以外,它在室温下很易激发成自由电子。失去一个价电子的磷原子就成为带一个电子电荷的正离子,如图1.1.4所示。由于杂质原子可以提供自由电子,故称**施主原子**。尽管所掺入的元素含量极微,但在室温下,每个磷原子所提供的多余价电子都可成为自由电子,且它在数量上已远远超过本征激发下所出现的电子空穴对数目^①,所以这是一种以电子导电为主的半导体,称为**N型半导体**。这里的自由电子为**多数载流子**(简称**多子**),空穴为**少数载流子**(简称**少子**)。

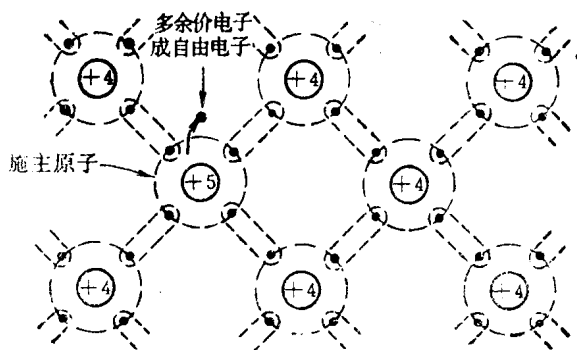


图 1.1.4 N型半导体结构示意图

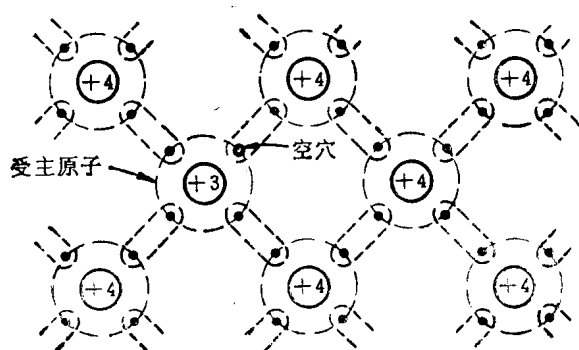


图 1.1.5 P型半导体结构示意图

2. P型半导体

如果在本征硅中,掺入微量的硼、镓或铟等三价元素(例如硼),硼原子的3个价电子与周围的4个硅原子组成共价键时,还缺少1个价电子,出现了1个空穴,如图1.1.5所示。鉴于同N型半导体相类似的原因,这种掺杂半导体是一种以空穴导电为主的半导体,称为**P型半导体**。这里,空穴为多子,电子为少子。在室温下,这些空穴很易接收邻近共价键中的价电子,而使杂质原子成为带1个电子电荷的负离子,故硼原子称为**受主原子**。

由以上分析可知,掺质半导体中的多子浓度主要取决于杂质的含量;而少子的浓度则与本征激发和复合机会有关,它的大小与温度有十分密切的关系。在以后的讨论中读者将会了解到,这给半导体器件的温度特性带来了很大的影响。

在掺杂半导体中,由于少子与多子的复合机会增多,而使少子的浓度大大减少。理论上可以证明,在半导体中,两种载流子的浓度乘积为恒定值,与掺杂程度无关,即

$$p \cdot n = p_i \cdot n_i = p_i^2 = n_i^2$$

三、半导体中载流子的运动

大家知道,电流是载流子定向运动的结果。半导体中的载流子有两种运动形式:

^① 如在原子密度为 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ 的本征硅中,掺入百万分之一的磷原子后,将在每立方厘米的硅中,产生 $5 \times 10^{17} \times 10^{-6} = 5 \times 10^{11}$ 个自由电子。这个数目比室温下,由本征激发所产生的电子空穴对的数量 1.4×10^{10} 约大一百万倍。

1. 漂移运动

漂移运动是载流子在电场 E 作用下的定向运动, 如图 1.1.6 所示, 空穴顺电场方向运动, 而电子逆电场方向运动。由于它们所带的电荷极性相反, 所以两种载流子运动所产生的电流方向一致。

设在电场 E 的作用下, 载流子的平均漂移速度为 v , 则载流子的迁移率 μ 可表示为

$$\mu = \frac{v}{E}$$

漂移电流的大小, 显然与迁移率成正比, 虽然自由电子和空穴同为半导体中的载流子, 但由于所处能级不同, 电子的迁移率约比空穴的迁移率高 2~3 倍。

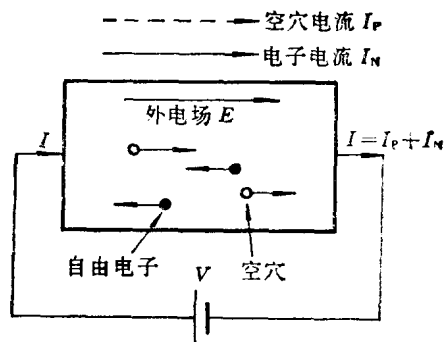


图 1.1.6 电场作用下载流子的漂移运动

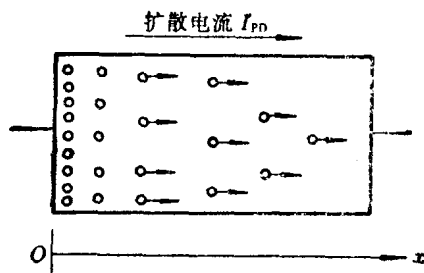


图 1.1.7 非平衡载流子(空穴)的扩散运动

2. 扩散运动

当半导体的一个端面受到光照或者有载流子从外界注入时, 半导体中载流子浓度的热平衡状态就受到破坏, 出现非平衡的自由电子或空穴, 并在半导体内部形成浓度差, 如图 1.1.7 所示。

载流子由浓度高的区域向浓度低的区域扩散形成扩散电流。扩散电流的大小与浓度分布曲线的斜率[即浓度梯度: dp/dx (对应于空穴)或 dn/dx (对应于电子)]成正比。

1.1.2 PN 结的形成

如果在 N 型(或 P 型)半导体的基片上, 采用平面扩散法等工艺^①, 掺入三价(或五价)元素作为补偿杂质, 使之形成 P 型(或 N 型)区, 则在 P 区和 N 区之间的交界面附近, 将形成一个很薄的空间电荷层(其厚度典型值为 $0.5 \mu\text{m}$), 称为 PN 结, 如图 1.1.8(a)所示。为说明方便起见, 将 PN 结附近的区域扩展为图 1.1.8(b)的形式。

PN 结的形成过程可以这样解释。首先是由于 P 型和 N 型半导体之间存在着多子浓度的显著差异: 如空穴在 P 区内是多子, 在 N 区内则是少子; 自由电子在 N 区内是多子, 在 P 区内则

① 制造 PN 结的工艺还有合金法和电形成法等。

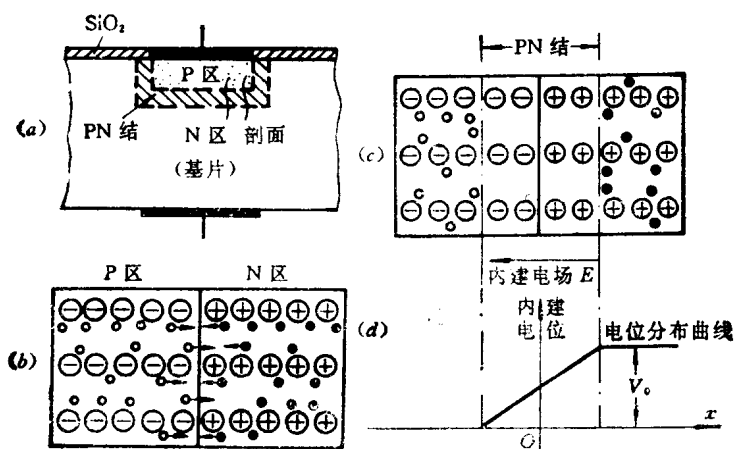


图 1.1.8 PN 结的形成

- (a) 用平面扩散法掺杂 (b) 扩展后的 P 区和 N 区界面
(c) PN 结的形成 (d) 结区电位分布曲线

是少数。因此, P 区内的空穴就要向 N 区扩散, 结果, 交界面附近的 P 区一侧因失去空穴而留下不能移动的负离子; 同样, N 区内的电子将向 P 区扩散, N 区一侧因失去电子而留下不能移动的正离子, 扩散到对方的载流子便成为异型半导体中的少数而与该区内的多子相复合。这样, 在两种半导体的交界面两边就形成了电荷量相等的, 由正、负离子电荷所组成的空间电荷区, 如图 1.1.8 (c) 所示。由于在交界面的 P 区一侧呈现出负电荷, N 区一侧呈现出正电荷, 所以出现了方向由 N 区指向 P 区的内建电场 E (以下简称内电场), 从而形成了如图 1.1.8 (d) 所示的电位分布曲线。 V_0 是 PN 结上的内建电位差。

内电场是由多子的扩散运动引起的, 伴随着它的建立将带来两种影响: 一是内电场将阻碍多子的扩散; 二是 P 区和 N 区的少数一旦靠近 PN 结, 便将在内电场的作用下漂移到对方。N 区的少数(空穴)到达 P 区后将使 P 区的空间电荷区缩小, P 区的少数(电子)到达 N 区后, 也将使 N 区的空间电荷区缩小, 其作用恰好与多子的扩散运动相反。

由此可见, 只有当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时, 空间电荷区的宽度和内建电位的高度才能相对稳定下来。此时, 有多少个多子扩散到对方, 便必定有多少个少数从对方漂移回来。由于二者所产生的电流方向相反 (如图 1.1.9 所示), 因而在动态平衡时, 流过 PN 结的净电流为零。如无外加电场的作用或其它因素的激发, 即使把 PN 结短路, 也仍然没有电流流向外电路。

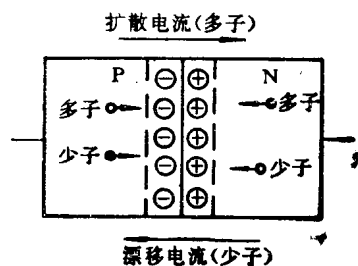


图 1.1.9 扩散电流和漂移电流的方向

为强调 PN 结的某种特性, 有时称它为“空间电荷层”或“势垒区”有时称它为“阻挡层”(以强调对多子扩散运动的阻挡作用); 也有称之为“耗尽层”(以强调该区内的载流子浓度减到很小以至耗尽的特点)。如果从“电阻”的概念讨论, 则由于 PN 结以外的 P 区和 N 区内仍然保持着原有

的平衡载流子浓度,PN 结内的载流子已被耗尽,而常把 PN 结看作高阻区,PN 结以外的部分看作低阻区。

由于在制造半导体器件时,P 区和 N 区常具有不同的掺杂浓度,从而出现了不对称的 PN 结。如 P 区掺杂浓度大于 N 区,称为 P^+N 结;N 区掺杂浓度大于 P 区,称为 PN^+ 结。图 1.1.10 所示为不对称 P^+N 结。

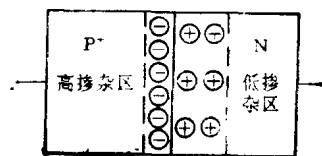


图 1.1.10 不对称 P^+N 结

1.1.3 PN 结的单向导电特性

以上讨论了 PN 结无外加电压时的情况,着重说明了 PN 结的形成过程和动态平衡的概念。现在,让我们考察 PN 结在外加电压作用下的特性。

一、外加正向电压 (亦称正向偏置,简称正偏)

如果外加电压的极性使 P 区一侧接电源的正极,N 区一侧接电源的负极,如图 1.1.11(a) 所示,即外加电场与 PN 结的内电场方向相反。在此情况下,N 区中的多数载流子(电子)和 P 区中的多数载流子(空穴)将向 PN 结移动,如图 1.1.11(b) 所示。当 N 区内的电子进入正空间电荷层后,就要和部分正离子中和,使区内的正空间电荷层的厚度和空间电荷量减小。同样,P 型半导体的多数载流子空穴进入负空间电荷层后,中和了部分负离子,使 P 区内的负空间电荷层的厚度和空间电荷量减小。结果是,PN 结总的宽度变窄,其上的内建电位差降低,如图 1.1.11(d) 中实线所示,这有利于多子的扩散。于是,在外加电压增加到一定值以后,扩散电流大大的增加了。此时,外加正向电压只要有微小的变化,便能使扩散电流发生显著的变化。

至于漂移电流,由于少子的数量只与温度有关,而与外加电压无关,因此在正向电压作用下,漂移电流的数值远小于扩散电流。可见,越过 PN 结的电流近似为扩散电流,称为正向电流,其大小受外电路限流电阻 R 的限制。

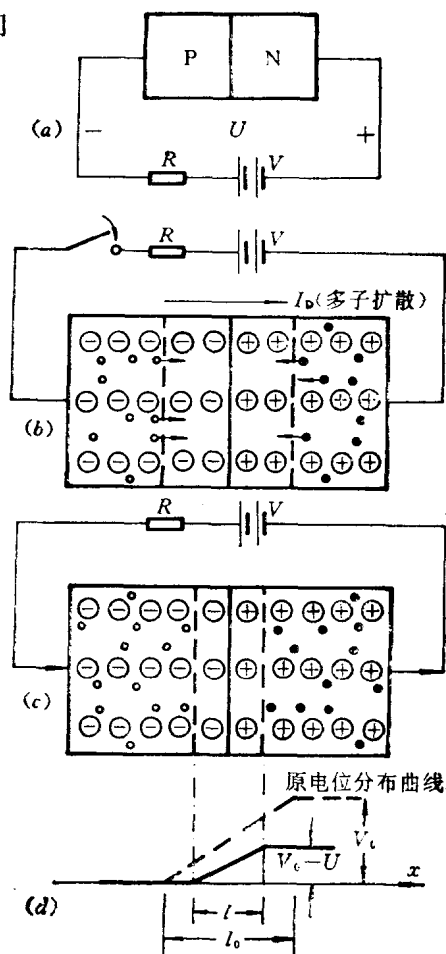


图 1.1.11 PN 结外加正向电压时的情况

- (a) PN 结外加正向偏置
- (b) 多子向结区运动
- (c) 结区减薄
- (d) 结区电位分布曲线的变化

二、外加反向电压(亦称反向偏置,简称反偏)

当外加电压的极性反向,使 P 区一侧为负, N 区一侧为正时[如图 1.1.12(a) 所示],外加电场与内电场方向一致。此时,多数载流子将离开 PN 结而使空间电荷区变宽,其上的电位差增高,如图 1.1.12(b)、(c)、(d) 所示,因此,扩散电流大大减弱,少子的漂移电流占优势,通过 PN 结的电流主要由漂移电流决定,外电路电流方向将与正向电流相反,称为反向电流。我们知道,少子是由热激发引起,其浓度很小,因此,反向电流远小于正向电流。当温度一定时,少子浓度一定,因此反向电流几乎不随外加电压而变化,故亦称**反向饱和电流**。

由此可见,PN 结具有**单向导电特性**,外加正向偏置时所产生的正向电流可远大于外加反向偏置时的反向饱和电流。这一特性正是整流二极管工作机理的基础。

三、PN 结的伏安特性

根据理论分析,PN 结的理想伏安特性,可用下式表示:

$$I = I_S(e^{U/U_T} - 1) \quad (1.1.1)$$

式中, I_S 为反向饱和电流, U 为 PN 结外加电压。

$U_T = kT/q$ 称为温度的电压当量,其中 $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (k 为玻耳兹曼常数), $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (q 为电子电荷),所以 $U_T = T/11600$ 。可见对于室温

$T = 300 \text{ K}$ 来说, $U_T = 300/11600 \approx 26 \text{ mV}$, 这是一个十分有用的数字。

1. 在正向偏置时,若 $U > U_T$, 例如当 $U = 100 \text{ mV}$ 时, $e^{U/U_T} \approx e^4 \approx 55 \gg 1$, 式(1.1.1)可简化为

$$I = I_S e^{U/U_T} \quad (1.1.2)$$

或

$$U = U_T \ln \frac{I}{I_S} = 26 \ln \frac{I}{I_S} \approx 60 \lg \frac{I}{I_S} (\text{mV}) \quad (1.1.3)$$

由式(1.1.3)可知,电流每增大 10 倍,PN 结电压约增加 60 mV,这说明 PN 结的正向特性上升很陡,如图 1.1.3 所示。

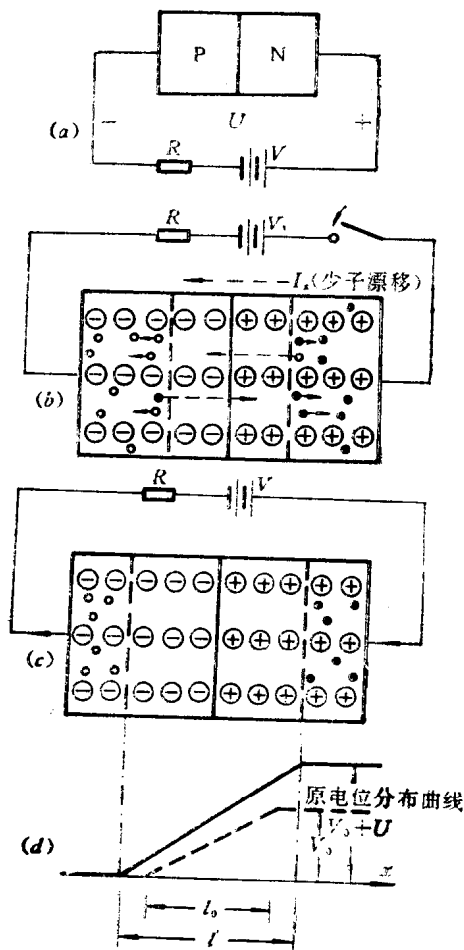


图 1.1.12 PN 结外加反向电压时的情况

(a) PN 结外加反向偏置

(b) 多子离开结区

(c) 结区增厚

(d) 结区电位分布曲线的变化