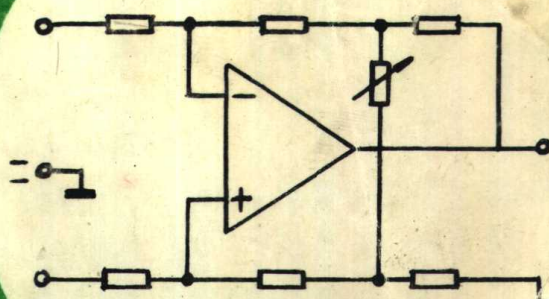


高等学校教学用书

模拟电子技术

主 编 庄玉欢

副主编 吴之裔



调整管)可采取哪

高等学校教学用书

模拟电子技术

主 编 庄玉欢
副主编 吴之裔

电子科技大学出版社

• 1992 •

内 容 提 要

本书是根据全国职业大学电类专业研究会的决定编写的电类专业技本基础课教材之一。本书系统地介绍了模拟电子技术的基本概念、基本理论及应用知识。包括半导体二极管和三极管、基本放大电路、场效应管放大电路、负反馈放大电路、正弦波振荡电路、功率放大器、直流放大器和集成运算放大器、集成运放应用和直流稳压电源等九章。本书加强了光电器件、集成运算放大器、集成稳压电源及应用知识的介绍,并通过典型电子设备的分析,介绍了整机分析方法。

本书不仅可作高等工程专科学校及成人高校电类专业《模拟电子技术》课教材,亦可供本科生及电子技术方面的教师和工程技术人员参考。

高等学校教学用书 模 拟 电 子 技 术

主 编 庄玉欢

副主编 吴之裔

*

电子科技大学出版社出版

(中国成都建设北路二段五号)

四川省平武县印刷厂胶印

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 18.75 版面字数 435千字

版次 1991年8月第一版 印次 1992年4月第二次印刷

印数5201—6700册

中国标准书号 ISBN 7-81016-319-1/TN·100

(15452·151)

定价: 6.60元

出版说明

由全国职业大学电类专业研究会组织编审的高等工程三年制专科电类专业部分技术基础课一套九门教材,陆续出版了。参与本套教材编审工作的有四十多所院校,五十多位专家、教授、学者。

1986年7月,在南京金陵职业大学召开的全国职业大学电类专业研究会成立大会期间,全体与会代表对高等工程专科没有一套适用于高等工程专科教育的教材而感到忧虑,强烈要求研究会为全国地方(职业)大学高等工程三年制电类专业教育办点实事,于是便成立教材编审委员会并组织高等工程专科电类专业教材的编审工作。全国职业大学电类专业研究会教材编审委员会根据理事会的提议,于1986年12月,在成都大学召开了“教材编审工作会议”,与会代表就高等工程专科教材编审工作的急迫性和编审高等工程专科教材的基本原则进行了磋商,并以“全国职业大学电类专业研究会教材编审委员会工作会议纪要”的形式分送各会员学校,同时报国家教委教育司、高等教育出版社、机械工业出版社、电子工业出版社、各省(市)教委和全国职业教育研究会。与会代表经反复讨论协商,同时考虑当时实际及用书量等情况,首先确定编写电类专业部分技术基础课用书,即《电路及磁路》、《模拟电子技术》、《数字电路应用基础》、《微机原理及应用》、《自动控制原理及应用》、《电工学》等六门课程教材。会上还确定了上述六门教材编写单位和各门教材的牵头单位,并以“纪要”附件形式分送给各会员学校。1987年和1988年上半年各门教材由牵头单位组织在常州、杭州、成都、大连、昆明、鹭江、岳阳、襄樊,1989年后在无锡、安阳等地召开了编写工作会议,确定了各门教材的编写大纲、编写人员,并立即投入编写工作,根据教材编审工作程序,各教材编写组召开了多次统稿、定稿会议。各教材都安排了试用于课堂教学的实践,师生反映良好。

1989年12月,国家教委下达了普通高等学校三年制工程专科教育三个文件(讨论稿),研究会根据上述三个文件(讨论稿)精神,聘请了部分专家、教授组成各门教材的审稿小组,于1989年12月,在江苏省张家港市沙州职业工学院召开了第一次审稿会,与会专家、教授认真学习了国家教委下达的三个文件(讨论稿)。对《模拟电子技术》、《数字电路应用基础》、《微机原理及应用》三门教材进行了严肃、认真的评审,各审稿小组分别对各教材试用稿提出了详细的审稿意见,并做出了中肯的审稿结论。研究会理事会要求各编写小组根据国家教委即下达的“高等学校三年制工程专科基础课和部分技术基础课教学基本要求”(讨论稿)和审稿会审稿意见进行修改。修改后交研究会教材编审委员会审定后交付出版。高等教育出版社电子室章浩平同志专程从北京到张家港参加第一次审稿会,就高等工程专科教材出版工作发表了很好的意见,审稿会结束时对审稿会所审定三门教材的质量和审稿会本身给予了充分的肯定。1990年8月,在江苏省无锡市江南大学召开了第二次审稿会,对《电路及磁路》教材进行了审定。

全国职业大学电类专业研究会组织编审出版的教材有:《模拟电子技术》、《数字电路应用基础》、《电路及磁路》、《微机原理及应用》、《电工电子技术》、《电力电子技术》、《电机拖动控制》、《工厂电器控制设备》、《电子技术课程设计指导书》。将从1991年9月至1993年2月陆续出版使用。

参加这套工程专科电类专业技术基础教材编审工作的同志,都有5~190年高等工程专科教学经验,参加编审工作的专家、教授、学者都肩负繁重的教学任务和行政管理工作,为了使高等工程三年制专科教学成果进一步巩固,他们不计名利不计服酬,自筹资金,和业余时间进行编写、审定、出

版、为全书奉献了他们一颗赤诚的心。

太原大学、长治职业大学、邯郸大学、大连大学、四平职业大学、佳木斯大学、金陵职业大学、常州工业技术学院、江南大学、芜湖联合大学、苏州职业大学、常熟职业大学、沙州职业工学院、合肥联合大学、济南职业大学、杭州高等专科学校、宁波高等专科学校、温州大学、鹭江大学、三明大学、长沙大学、岳阳大学、江汉大学、少市职业大学、黄石大学、襄樊大学、宜昌大学、中州大学、广州大学、安阳大学、邕江大学、成都大学、攀枝花大学、昆明大学、西安大学、宝鸡大学、抚顺大学、营口大学、嘉兴高等专科学校、马鞍山职工大学、漳州大学、南宁职业大学、河东大学等院校的领导和教务部门，有关的系、教研室都给予了大力支持和帮助；高等教育出版社、电子科技大学出版社、浙江大学出版社，高等职业教学研究会为本套教材的出版给予了大力支持和帮助；所有参加本套教材编审工作的专家、教授、学者的辛勤劳动和负责精神，对初稿试用院校的师生提出的宝贵意见，对研究会各会员学校代表、研究会理事会各理事和研究会理事会秘书长林伦友同霁顺利编审出版本套教材所作出的努力，我们代表理事会特表致谢。

近年来，我国高等工程三年制专科教学正在日新月异迅猛发展，我国正朝着四个现代化方向阔步前进，这套教材对高等工程三年专科电类专业教学无疑是比较适用的，我们乐于向全国地方（职业）大学、职工大学电类专业广大师生推荐。

全国职业大学电类专业研究会理事会
理事长 顾胜剑 曾心洁

1991年3月于成都

序 言

本教材是根据中国职业大学电类专业研究会教材编审规划委员会制订的“模拟电子技术”教学大纲及教材编写大纲编写的。总授课时数 72 学时(不包括实验学时)。

本书既考虑电类(非无线电)各专业的基本要求,又顾及新技术的迅速发展。编写的原则是“保证基础,概念清楚、更新内容、联系实际、加强应用、便于自学”。在保证基本内容的前提下,注重实践和应用。对电子器件主要了解它们的外部性能,学会合理选择、正确使用。在保证基本概念、基本原理、基本分析方法的基础上压缩分立元件电路的内容,加强集成功放、集成运放和集成稳压器等的功能和应用。每一部分都有应用举例。

本书既可作为地方高校各电类专业“模拟电子技术”或相近电子技术课程的教材,又可作为其它大专院校、职大、成人高校、夜大、函大和自修大学等的教材,也可作为有关工程技术人员的参考书或自学用书。

本书由庄玉欢副教授主编,吴之裔任副主编,成都大学林伦友参加了本书主编工作,负责出版前的图文处理及校对工作。全书共分九章。第一章、第九章由温州大学陈秀士高级工程师编写;第二章、第五章、由常州工业技术学院吴之裔编写;第三章由常州工业技术学院华容茂副教授编写;第四章由漳州大学李植举副教授编写;第六章由常州工业技术学院庄玉欢副教授编写;第七章由成都大学熊国璋副教授编写;第八章由成都大学曾羨碧编写。

江汉大学易源陵副教授任主审;参加审稿的还有岳阳大学成贵泽;昆明大学裴文彩和嘉兴高等专科学校孙得义副教授等。

成都大学为本书的编写,审稿和出版做了大量的工作;黄石大学张劲为本书编写大纲及提供第七、第八章初稿作了有益的工作,特此表示衷心的感谢。

随着电子技术的发展,本教材内容尚需不断更新。由于我们水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正,以便今后不断改进。

编 者

1990 年 12 月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管

1.1 半导体的基本知识	(1)
1.1.1 半导体的物理特性	(1)
1.1.2 本征半导体的导电特性	(1)
1.1.3 杂质半导体中的导电特性	(2)
1.1.4 PN结的基础原理	(4)
1.2 半导体二极管	(6)
1.2.1 半导体二极管的结构	(6)
1.2.2 半导体二极管的伏安特性	(6)
1.2.3 半导体二极管的主要参数	(8)
1.2.4 半导体二极管的近似等效电路	(9)
1.2.5 硅稳压管	(9)
1.3 半导体三极管	(10)
1.3.1 半导体三极管的基本结构	(10)
1.3.2 半导体三极管的工作原理	(11)
1.3.3 半导体三极管的特性曲线	(13)
1.3.4 半导体三极管的主要参数	(16)
1.3.5 温度对三极管参数的影响	(18)
1.4 半导体光电器件	(19)
1.4.1 光敏电阻	(19)
1.4.2 光敏二极管和光敏三极管	(20)
1.4.3 发光二极管	(21)
小 结	(22)
习 题	(23)

第二章 基本放大电路

2.1 概 述	(26)
2.1.1 共射极基本放大电路	(26)
2.1.2 静态工作点的设置	(29)
2.2 图解分析法	(32)
2.2.1 静态工作情况分析	(32)
2.2.2 动态工作情况分析	(33)
2.3 微变等效电路法	(38)
2.3.1 h 参数微变等效电路	(38)
2.3.2 简化的微变等效电路	(39)
2.4 放大器的工作点稳定问题	(43)
2.4.1 温度对工作点的影响	(43)

2.4.2 射极偏置电路	(44)
2.5 共集电极电路与共基极电路	(49)
2.5.1 共集电极电路的组成及工作原理	(49)
2.5.2 共基极电路的组成及工作原理	(52)
2.5.3 三种基本组态比较	(53)
2.6 多级放大器	(55)
2.6.1 多级放大器的耦合问题	(55)
2.6.2 动态参数的计算	(58)
2.7 放大器的频率特性	(59)
2.7.1 频率特性的基本概念	(59)
2.7.2 单级放大器的频率特性	(66)
2.7.3 多级放大器的频率特性	(78)
2.8 单级放大器的设计	(81)
小 结	(85)
习 题	(86)

第三章 场效应管放大电路

3.1 场效应管	(92)
3.1.1 绝缘栅型场效应管	(92)
3.1.2 结型场效应管	(97)
3.1.3 各种场效应管的比较及使用注意事项	(100)
3.1.4 场效应管与半导体三极管的比较	(102)
3.2 场效应管放大电路	(102)
3.2.1 场效应管放大电路的直流偏置电路及静态估算	(103)
3.2.2 场效应管放大电路的微变等效电路及动态估算	(104)
3.2.3 三种场效应管放大电路的比较	(107)
3.3 场效应管应用举例	(109)
小 结	(112)
习 题	(112)

第四章 负反馈放大电路

4.1 反 馈	(115)
4.1.1 反馈的基本概念	(115)
4.1.2 反馈的分类及判断	(115)
4.2 负反馈放大器的基本分析方法	(116)
4.2.1 四种组态及方框图	(116)
4.2.2 放大倍数的一般表达式	(117)
4.2.3 AF含义	(118)
4.3 负反馈对放大器性能的影响	(118)
4.3.1 提高稳定性	(118)
4.3.2 扩展频带	(119)

4.3.3	减小非线性失真	(120)
4.3.4	抑制干扰和噪声	(121)
4.3.5	对输入电阻和输出电阻的影响	(121)
4.4	反馈放大电路的计算	(124)
4.4.1	深度负反馈放大电路的近似计算	(124)
4.4.2	反馈类型的判断和近似估算举例	(125)
4.4.3	利用方框图的计算方法	(130)
4.5	负反馈放大器的稳定性问题	(133)
4.5.1	自激振荡	(133)
4.5.2	稳定工作条件	(134)
4.5.3	常用校正措施	(135)
4.6	负反馈放大器实例	(139)
小 结		(140)
习 题		(141)

第五章 正弦波振荡电路

5.1	振荡的基本概念	(145)
5.1.1	振荡的基本原理	(145)
5.1.2	振荡条件	(145)
5.1.3	振荡电路的组成	(146)
5.2	RC振荡电路	(147)
5.3	LC振荡电路	(151)
5.3.1	变压器反馈式振荡电路	(151)
5.3.2	电感反馈式振荡电路	(153)
5.3.3	电容反馈式振荡电路	(154)
5.3.4	石英晶体振荡器	(156)
5.4	实用振荡电路介绍	(160)
小 结		(161)
习 题		(161)

第六章 功率放大器

6.1	功率放大器的特点与分类	(165)
6.1.1	功率放大器的特点	(165)
6.1.2	功率放大电路的分类	(166)
6.2	变压器耦合功率放大器	(166)
6.2.1	变压器的阻抗变换作用	(166)
6.2.2	单边甲类功率放大器	(167)
6.2.3	推挽功率放大器	(169)
6.3	互补对称功率放大器	(171)
6.3.1	乙类基本互补功率放大器	(171)
6.3.2	单电源互补对称功率放大器	(173)

6.3.3 甲乙类互补功率放大器	(174)
6.3.4 复合互补对称功率放大器	(175)
6.4 集成功率放大电路	(176)
6.5 功率放大器实际电路	(178)
6.6 功率放大电路比较	(183)
6.7 功率管的散热问题	(183)
6.7.1 热阻	(184)
6.7.2 散热板	(184)
小 结	(187)
习 题	(188)

第七章 直流放大器和集成运算放大器

7.1 直流放大器和零点漂移	(191)
7.1.1 直流放大器及其特殊问题	(191)
7.1.2 零点漂移	(193)
7.2 差动放大器	(195)
7.2.1 基本差动放大器	(195)
7.2.2 长尾差动放大器	(197)
7.2.3 具有恒流源的差动放大器	(200)
7.2.4 差动放大电路的几种接法	(202)
7.3 直流放大器应用实例	(204)
7.3.1 电压电流变换器	(204)
7.3.2 SBM-10A 型示波器垂直系统中的直流放大器	(205)
7.4 集成运算放大器	(208)
7.4.1 模拟集成电路的特点	(208)
7.4.2 集成运放的典型电路	(209)
7.4.3 集成运放的基本技术指标	(214)
小 结	(215)
习 题	(216)

第八章 集成运算放大器的应用

8.1 概 述	(220)
8.1.1 集成运放理想化的主要条件	(220)
8.1.2 分析应用电路的工作原理时, 应分析集成运放工作在线性区还是非线性区	(220)
8.2 基本运算放大器	(221)
8.2.1 反相放大器	(221)
8.2.2 同相放大器	(222)
8.3 集成运放在信号运算中的应用	(226)
8.3.1 加法运算和减法运算	(226)
8.3.2 积分运算和微分运算	(228)

8.3.3 对数和反对数运算	(233)
8.4 集成运放在信号处理中的应用	(235)
8.4.1 有源滤波器	(235)
8.4.2 采样-保持器	(240)
8.4.3 比较器	(241)
8.5 集成运放在波形发生器中的应用	(244)
8.5.1 正弦波发生器	(245)
8.5.2 非正弦波发生器	(245)
小 结	(250)
习 题	(250)

第九章 直流稳压电源

9.1 概 述	(255)
9.2 单相整流和滤波电路	(255)
9.2.1 单相整流电路	(255)
9.2.2 滤波电路	(258)
9.2.3 桥式整流、电容滤波电路参数的近似估算	(264)
9.3 硅稳压管稳压电路	(265)
9.3.1 硅稳压管稳压电路的工作原理	(265)
9.3.2 电路中各元件参数的选择	(266)
9.4 串联型三极管稳压电路	(267)
9.4.1 带有放大环节的串联型三极管稳压电路	(268)
9.4.2 稳压电源的主要技术指标	(270)
9.4.3 提高稳压电源性能的措施和保护电路	(271)
9.5 集成化稳压电源	(274)
9.5.1 单片集成稳压电源	(274)
9.5.2 三端集成稳压器的扩展应用	(276)
9.6 开关式稳压电路	(278)
9.6.1 开关式稳压电路工作原理	(278)
9.6.2 开关式稳压电路实例	(279)
小 结	(284)
习 题	(285)
参考文献	(288)

第一章 半导体二极管和三极管

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体的物理特性

自然界中的物质，根据它们导电能力的强弱，可分为导体、绝缘体和半导体。通常把电阻率 $\rho \leq 10^{-4}$ 欧姆·厘米的物质称为导体，象铜、银、铝等金属；把 $\rho > 10^{10}$ 欧姆·厘米的物质称为绝缘体，如橡皮、塑料、石英、玻璃等，而导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，如锗、硅、硒等称为半导体。物质所以在导电能力上有这样大的差异，其根本原因在于物质内部结构不同，内部运载电荷的粒子（叫做载流子）的多少不同。

既然半导体不象导体那样容易导电，又不象绝缘体那样不容易导电，为什么它会引起人们的极大兴趣呢？原因在于半导体具有独特的特性。和金属的导电性能比较，半导体最大的特点是，如果改变其内部结构及外部条件（例如掺杂质、温度变化、光线照射等），它的导电能力就有显著的变化，这就是半导体技术在短期内能够得到飞跃发展的根本原因。例如：

1. 杂质对半导体导电能力有显著影响

金属中含有少量杂质时，看不出导电性能有什么显著的变化。但是微量杂质在半导体里，却可以引起导电性能很大的改变。例如在纯硅中加入百万分之一的硼，硅的电阻率就从 214×10^7 欧姆·毫米²/米减小到4000欧姆·毫米²/米左右，导电能力增加了几十万倍。这是半导体最显著、最突出的性质。正因为半导体具有这种特点，人们才用掺杂质的方法制造出各种不同性质、不同用途的半导体器件。

2. 对温度的反应灵敏

当环境温度变化时，金属的电阻率变化较小，而且随着温度的升高，金属的电阻率增大。例如温度升高1℃，铜的电阻率仅增加0.4%左右，也就是说温度升高100℃，电阻率增加还不到一半。但半导体就不同了，它的电阻率随温度的变化很显著，而且随着温度的升高，半导体的电阻率是减小的，也就是导电能力增强了。例如纯锗，温度从20℃升高到30℃，电阻率就要降低一半左右，也就是导电能力增加了许多。因此，对温度反应灵敏是半导体一个很重要的特点。

3. 光照影响导电能力

金属放在阳光下或者放在暗处，它的导电能力看不出什么变化，但半导体的导电性能却和光照有很大关系。例如，硫化镉（CdS）的半导体材料，在一般灯光照射下，它的导电能力比移去灯光后要大几十倍到几百倍。自动控制中用的光电二极管、光电三极管和光敏电阻等器件，就是利用半导体的这种特性制成的。

正由于半导体具有这些独特的性能，它已成为当前电子技术的主要电子器件。

1.1.2 本征半导体的导电特性

物质都是由原子组成的，物质的导电性能是由物质内部原子的结构和原子间的结合方式决定的。原子由带正电的原子核和若干个围绕原子核运动的带负电的电子组成，而外层

的电子叫价电子，它受原子核的束缚力最小，半导体的导电性质与价电子有关。图1.1.1是一个硅原子的结构图，它的外层有四个电子，即为四价电子。有几个价电子，就称为几价元素，硅有四个价电子，所以它是四价元素。由于原子核所带的正电荷量与围绕它的电子负电荷量相等，故整个原子呈电中性。

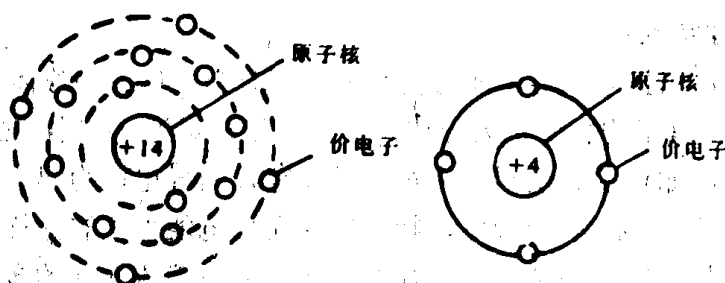


图1.1.1 硅原子结构平面图及简化图

既不含任何杂质，也没有结构缺陷的半导体，其内部原子的排列是有一定规律的，即构成晶体结构，故又称它为晶体。晶体管的名称也是这样得来的。图1.1.2为硅晶体的结构示意图。从图中可以看出，每个原子最外层的四个电子不仅受自身原子核束缚，而且还与周围四个相邻的原子发生联系，构成共价键结构。在绝对零度和无外界激发时，价电子都被束缚在共价键中，不存在自由电子。这时的半导体不能导电，相当于绝缘体。

这种半导体在常温下，只有极少数电子可能摆脱共价键的束缚而成为自由电子，同时在原来位置上就缺少了一个电子而留下一个空位，这个空位称为空穴，如图1.1.2所示。这种现象称为本征激发，故这种半导体称为本征半导体。本征半导体中自由电子和空穴，总是相伴而生，成对出现；另外，自由电子在运动过程中又会与空穴结合而消失，这种现象称为复合。

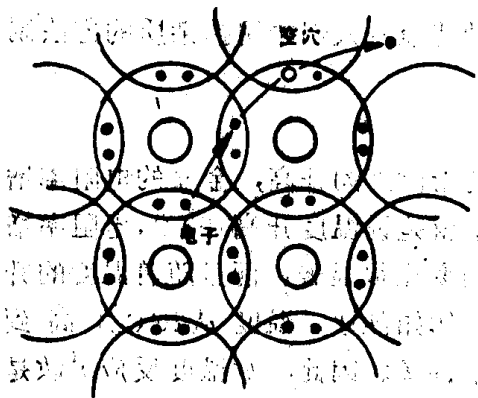


图1.1.2 硅晶体结构示意图及
电子和空穴的移动

自由电子带负电荷，而空穴是因缺少电子形成的，所以它带正电荷。在外电场的作用下，半导体中的自由电子将逆电场方向而运动。同时，空穴要捕获相邻原子的电子来填补空位，而使邻近原子又出现一新的空穴，如图1.1.2所示。如此继续下去，带正电的空穴就象接力赛跑一样运动，这种运动就好比是半导体中的空穴在运动，也就是说，半导体中的空穴也可以运动，也是一种载流子，但它的运动方向与电子相反，而空穴电流和电子电流的方向却是一致的。因此，在半导体中，同时存在电子和空穴导电，这是半导体导电机构的最大特点，也是半导体同金属导体在导电原理上的最大差别。

1.1.3 杂质半导体的导电特性

在本征半导体中掺入微量的杂质，就会使半导体的导电性能发生显著改变。因掺入杂质性质的不同，杂质半导体可分为电子半导体（N型半导体）和空穴半导体（P型半导体）两大类。

1. N型半导体

在硅（或锗）的晶体内掺入少量五价元素杂质，如磷（或锑）等，则晶体点阵中某些位置上的硅原子将被磷原子所代替，磷原子有五个价电子，它以四个价电子与相邻的硅原子组成共价键后，必定还多余一个价电子，如图1.1.3所示。这个多余的价电子虽不受共价

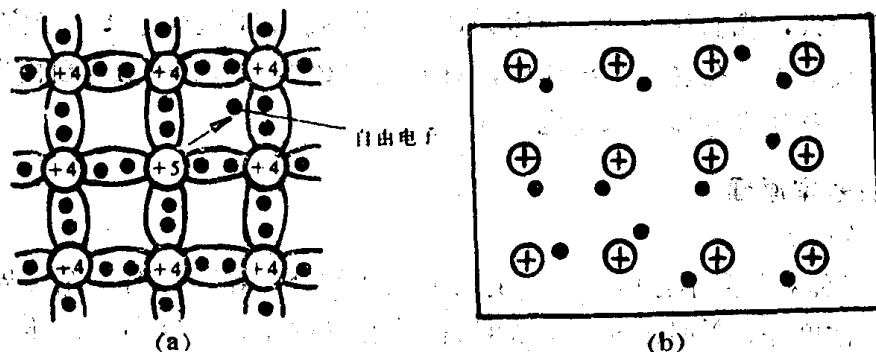


图1.1.3 N型半导体晶体结构示意图

键的束缚，但仍受磷原子核的正电荷吸引而只能在磷原子的周围活动，不过它所受磷原子的吸引力终究要比共价键的束缚作用微弱得多，只要较小的能量（在室温下）就能挣脱磷原子的吸引而成为自由电子。

由于磷原子在硅晶体中给出一个多余的电子，故称磷为施主杂质。当磷原子给出多余的价电子后，磷原子本身因失去电子而成为正离子。正离子是不能参加导电的。另外，磷原子在产生自由电子的同时并不产生新的空穴，这是不同于本征半导体的。除了杂质给出的自由电子外，晶体本身也会受热激发产生少量的电子空穴对。但由于增加了许多额外的自由电子，因此在这种半导体中，自由电子数远大于空穴数，导电主要靠电子，我们称这种半导体为N型半导体。在N型半导体中自由电子是多数载流子（简称多子），空穴是少数载流子（简称少子）。在这种半导体中，总的自由电子数等于正离子数与空穴数之和，因此从总体来看，它仍保持电中性。

2. P型半导体

在硅（或锗）的晶体内掺入少量三价元素杂质，如硼（或镓）等，因硼原子只有三个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空位，如图1.1.4(a)。这个空位与空穴不同，它不带电。当相邻共价键上的电子受到热激发或在其他激发条件下获得能量时，就有可能填补这个空位，使硼原子成为不能移动的负离子，而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子，形成了空穴，如图1.1.4(b)所示。

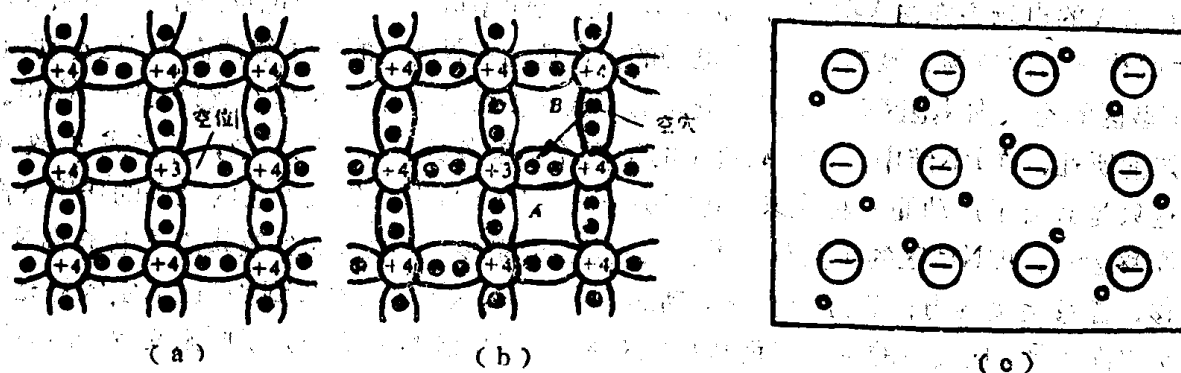


图1.1.4 P型半导体晶体结构示意图

由于硼原子在硅晶体中能接受电子，故称硼为受主杂质。当硼原子在晶体中接受了一个电子后，硼原子多了一个电子而成为负离子，同时在晶体中产生了一个空穴。但在产生空穴的同时并不产生新的自由电子，而硅晶体本身仍会因热激发而产生少量的电子空穴对。由于增加了许多受主杂质产生的空穴，所以在这种半导体中，空穴数量远大于电子数量，导电主要靠空穴，我们称这种半导体为P型半导体。在P型半导体中空穴是多数载流子，电子是少数载流子。在这种半导体中，总的空穴数等于负离子数与自由电子数之和，因此从总体来看，整块半导体仍保持电中性。

1.1.4 PN结的基本原理

1. PN结的形成

当将P型半导体和N型半导体通过一定的方式“结合”在一起时，在交界面处就出现了电子和空穴的浓度差，N型区内电子浓度高，P型区内空穴浓度高。这样，电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。因此一些电子要从N型区向P型区扩散，也有一些空穴要从P型区向N型区扩散，如图1.1.5(a)所示。由于电子和空穴都是带电的，它们扩散的结果，在交界处N型区附近的薄层A中（如图1.1.5(b)所示）留下正离子，在

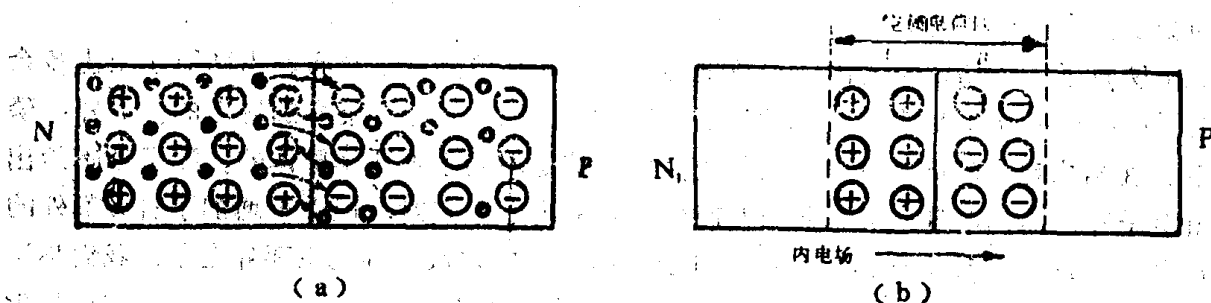


图1.1.5 PN结的形成

交界处P型区附近的薄层B中留下负离子。因电子和空穴的扩散是同时进行的，所以薄层A和B也是同时形成的。正、负离子虽然也带电，但由于物质结构的关系，它们不能移动，不参与导电。这些不能移动的带电粒子通常称为空间电荷，它们集中在P型区和N型区的交界面的两侧，形成了一个很薄的空间电荷区，这就是我们所说的PN结。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，因此空间电荷区又称为耗尽区。

空间电荷区的N型侧带正电，P型侧带负电，这和一对带有不同电荷的平行平板很相似，它形成的电场方向由A指向B，即由N型区指向P型区。由于这个电场产生于PN结的内部，因此称它为内电场。显然，这个内电场的方向既阻挡N型区的电子继续向P型区运动，也阻挡P型区的空穴向N型区运动，因此空间电荷区对多数载流子的继续扩散起着阻挡作用。

如前所述，在PN结中，由于载流子的浓度差引起多数载流子的扩散，并形成扩散电流。这只是载流子运动的一种现象。还有另一种现象就是少数载流子在内电场的作用下产生的漂移运动，即N型区的少数载流子空穴向P型区漂移，P型区的少数载流子电子向N型区漂移，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。从N型区漂移到P型区的空穴补充了原来交界面上P型区失去的空穴，而从P型区漂移到N型区的电子补充了原来交界面上N型区所失去的电子，这就使空间电荷减少。因此漂移运动的结果是使空间电荷区变窄，其作

用正好与扩散运动相反。

由此可见，扩散运动和漂移运动是互相联系又互相矛盾的，扩散使空间电荷区加宽，内电场增强，对多数载流子继续扩散的阻力增大；由于内电场增强，使少数载流子漂移运动加剧，而漂移的结果使空间电荷区变窄、内电场减弱，这又有助于继续扩散的进行。开始时，扩散运动占优势，但随着电子和空穴的扩散，空间电荷区加宽，内电场不断增强，于是漂移运动也不断加强。当扩散运动和漂移运动达到动态平衡，即当扩散电流和漂移电流大小相等而互相抵消时，空间电荷区的宽度将保持相对稳定。也就是说，载流子的运动过程虽然仍在不断进行，但是数量关系基本上稳定不变。因此，在无外加电场或其它激发因素作用时，PN结没有电流通过。

2. PN结的单向导电性

如果在PN结上加正向电压，就是外电源的正极接P区，负极接N区，如图1.1.6(a)所示（图中 R 是限流电阻）。由图可看出，外电源在PN结中所建立的外电场方向（由电源正极指向负极）正好和内电场的方向相反，因而削弱了内电场的作用，使空间电荷区变窄。这样一来，多数载流子在外电场帮助下的扩散运动就超过了内电场的阻挡和漂移运动，从总的结果来看，使得多数载流子——空穴和电子能够源源不断地通过PN结，形成较大的正向电流。也就是说，PN结正向导电时电阻很小。这时电路中的正向电流应包括两部分：一部分是由带正电的空穴作定向运动（从P区向N区运动）形成的空穴电流，另一部分是由带负电的自由电子作定向运动（由N区向P区运动）所形成的电子电流，由于电流方向规定为正电荷移动的方向，所以这两部分电流的方向是一致的。

如果给PN结加反向电压，也就是外电源正极接N区，负极接P区，如图1.1.6(b)所

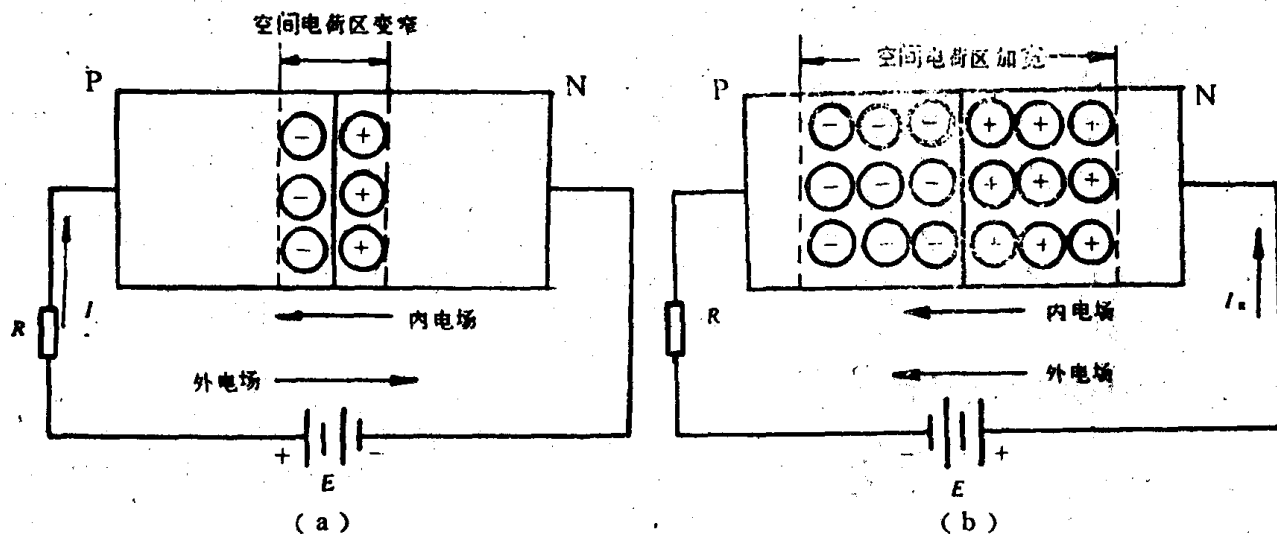


图1.1.6 PN结的单向导电性

示。这时外电场和内电场的方向一致，增强了内电场的作用，使空间电荷区变宽，从而对多数载流子扩散运动的阻挡作用增大，使扩散运动更难进行。但是却加强了少数载流子的漂移运动，使得N区中的空穴不断越过PN结进入P区，P区中的电子不断越过PN结进入N区，在电路中形成了反向电流 I_R 。由于少数载流子数量很少，因此反向电流很小。温度一定时，少数载流子的数量一定，所以反向电流与反向电压的大小基本无关。

可见，PN结具有单向导电性，即加正向电压时，结电阻很小，电流畅通；加反向电压

时，结电阻很大，反向电流很小。

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构

半导体二极管实际上就是一个PN结，加上相应的电极引线 and 管壳做成。按其材料不同，可分为硅二极管和锗二极管；按其结构不同，可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管是由一根很细的金属丝和一块半导体（如N型锗）的表面接触，然后在正方向通过很大的瞬时电流，使触丝和半导体牢固地熔接在一起，构成PN结，如图1.2.1(a)所示。由于点接触型二极管金属丝很细，形成的PN结面积很小，所以极间电容很

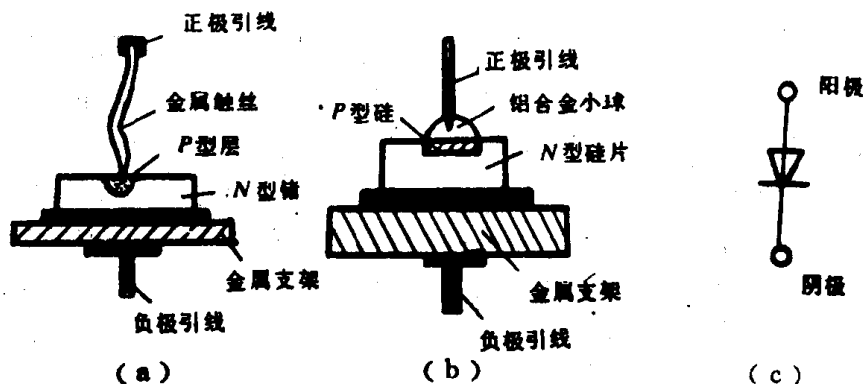


图1.2.1 二极管的结构与符号

小（约1pF左右），同时，也不能承受高的反向电压和大的电流。这种类型的管子适于做高频检波和脉冲数字电路里的开关元件，也可用来作小电流整流。如2AP1是点接触型锗二极管，最大整流电流是16mA，最高工作频率是150MHz。

面接触型二极管的PN结是用合金法或扩散法做成的，其结构如图1.2.1(b)所示。由于面接触型二极管的PN结面积大，可承受较大的电流，但极间电容也大（约有5pF~20pF）。这种类型的管子适用于整流，而不宜用于高频电路中。如2CP1是面接触型硅二极管，最大整流电流为400mA，最高工作频率只有3kHz。

二极管的符号如图1.2.1(c)所示。图中箭头方向表示正向电流流通的方向。

1.2.2 半导体二极管的伏安特性

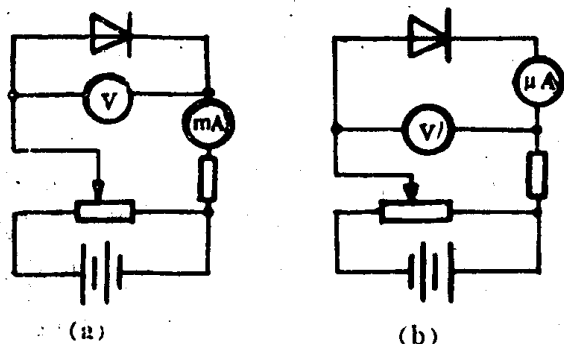


图1.2.2 二极管伏安特性的测量

二极管的伏安特性可以用图1.2.2的电路逐点测出，也可以从晶体管特性图示仪上直接描绘出来。

1. 伏安特性的表达式

根据理论分析，PN结电流与端电压的关系可由下式表示

$$I = I_s [\exp(V/V_T) - 1] \quad (1.2.1)$$

式中 I 为PN结的电流， I_s 为反向饱和电流， V 为外加电压， $V_T = kT/q$ 为温度的电压当量，其中波尔兹曼常数 $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ，电子电