

电 子 技 术 应 用 教 育 丛 书

模拟电子技术

福建电子学会 主编

潘平仲 编

福建科学技术出版社



电 子 技 术 应 用 教 育 丛 书

模拟电子技术

福建电子学会 主编

潘 平 仲 编

福建科学技术出版社

(闽)新登字 03 号

模拟电子技术

福建电子学会 主编

潘平仲 编

*

福建科学技术出版社出版、发行

(福州市东水路 76 号)

福建省新华书店经销

福建省科发电脑排版服务公司排版

沙县印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/32 9.375 印张 197 千字

1998 年 1 月第 1 版

1998 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—6 000

ISBN 7 - 5335 - 1233 - 2/TN·163

定价:11.20 元

书中如有印装质量问题,可直接向承印厂调换

序

随着当代高新技术迅猛发展,电子信息技术已成为世界各国综合国力的竞争焦点。哪个国家或地区在以电子信息技术为先导的高新技术领域占优势,哪个国家或地区就将在未来全球性和区域性的经济、技术的竞争中取得主动权。这是因为以电子信息技术为核心的电子工业在国民经济、科学技术,乃至整个社会的发展中有着无可置疑的强大渗透力和催化作用。据估计,到2000年电子信息产业将成为世界第一大产业。现今各先进的工业化国家和一些发展中的国家无不十分重视电子工业发展。在我国,发展电子工业也已成为众多省、市共同选择的目标。

改革开放以来,福建省电子工业快速发展,令人瞩目。工业总产值从1978年不足1亿元发展到1996年176亿元,跃居全国电子工业先进省份之列,并成为福建工业系统的最大行业之一。全行业已形成产品门类较多、品种多样,以及外向型经济发展和闽东南区域优势发展的明显特色,拥有一批相辅相济的多种经济成分的骨干企业和高新技术企业。福建省委、省政府依据本省区位、资源和实际发展需要,确立电子支柱产业作为国民经济新增长点的地位,是一明智之举,更是重要的战略决策。目前全省电子行业广大干部职工正在继续努力,通过进一步深化改革,扩大开放,调整结构和产业升级,再造新一轮创业发展的新优势和佳绩。

当今我国电子工业正在加快从传统的单一加工制造业向

设备制造、软件生产、信息服务诸业并举的现代电子信息产生发展模式的转变。高新技术的争相角逐和产品市场的激烈竞争，使我们面临严峻的挑战，而技术产品的快速更新和消费市场的广阔前景，又使我们面临不可多得的发展机遇。今后福建电子工业的发展，将继续实施“市场导向、外向为主、规模经济、超前发展”的战略，重点发展电子音像设备、计算机及其外部设备、通信终端、显示器件等四大门类产品，集中建设福州市区、马尾技术开发区、福清融侨开发区、厦门经济特区等四大电子基地，来带动全省电子工业的进一步发展，以实现2000年工业总产值500亿元，进而把福建建成全国电子强省的目标。为此，我们不仅需要一批具备生产规模和经济效益的骨干企业和拳头产品，而且要有一支素质优良的科技人员和技术工人的队伍。换言之，为满足电子工业发展需要和适应技术快速更新，我们需要更加努力地建设和培养一大批知识扎实、实践丰富、技能熟练的电子技术人才队伍。这支人才队伍是多层次的，既要依靠各类院校源源不断地输送补充电子专业毕业生，也要凭借各企事业单位通过在职员工的知识更新和教育培训来造就不同层次的技术骨干和专业能手，以保证福建省电子工业可持续发展壮大。

基于上述形势发展和行业实际的需要，在福建科学技术出版社鼎力支持和帮助下，由福建省电子学会牵头组织编写了本电子技术应用教育丛书，内容涵盖模拟电子技术、数字电子技术、电子元器件、电子应用材料、电子生产工艺……等方面。本丛书作为中等职业学校的教材，立足于实用、求新，注意理论与实践结合，力求深入浅出，以基本工作原理和物理概念为主，辅以典型应用例子和实验操作说明。从整体上讲，作者能够力图准确把握读者对象，较好地考虑到授

教对象的工作特点和接受能力，因此本丛书不失为中等职业教育和职业培训的好教材。同时，也适合于已具备中等教育水平的在职员工和进修读者自学提高。在编写本教材时虽尽力保持内容的系统完整，但教学过程中可以根据实际选用，部分内容可安排课外自学，尽可能做到结合需要、联系实践、加深理解、突出应用。我们期望，本教材能够在电子职业教育培训中得到广泛地采用。

这里，我代表福建省电子学会和广大读者向本教材的各位作者和为本教材编辑、出版、印刷、发行作出贡献的各界人士表示衷心感谢和致以崇高敬意！

黄颂恩

1997.8.10 于福州

前 言

电子技术是高新技术,电子工业是国民经济的支柱产业。电子工业的发展使电子技术的应用扩展到国民经济的所有部门,并进入了每一个家庭。电子通信技术、电子计算机技术、光电子技术和半导体技术的高速发展与有机结合,诞生了对人类社会起重大影响的信息产业。它成为世界各国现代化的重要标志。因此,学习电子技术,普及电子技术知识,推广电子技术应用,成为社会的广泛要求。

本书是“电子技术应用教育丛书”中的一册,正是为适应目前社会对电子技术教育的需求而编写的。本书的内容以模拟电子技术中低频电子电路为核心,介绍了半导体器件、基本放大器、负反馈放大器、集成运算放大器,正弦振荡器等最基本的单元电子电路。理论知识深入浅出,概念清晰简要,力求理论联系实际。编者希望本书能成为青年学生或电子工业职工学习电子技术的入门向导,成为电子职业技术教育的基础教材。

本书在编写过程中得到许多同行的支持和帮助,同时参考许多资料,有些图表直接予以引用。在此特向各位同行和资料提供者表示衷心感谢。

限于水平,本书必定存在不少疏漏和错误,恳望广大读者批评指正。

编者

1997年6月

目 录

第一章 半导体器件基本知识	(1)
第一节 半导体的基本概念	(1)
一、半导体材料有哪些特性	(1)
二、本征半导体、P型半导体和N型半导体	(2)
三、PN结及其单向导电特性	(3)
第二节 半导体二极管	(6)
一、二极管的正向特性	(7)
二、二极管的反向特性	(8)
三、二极管的主要参数	(9)
四、二极管的型号命名法	(10)
第三节 半导体三极管电流放大原理	(11)
一、半导体三极管的构成	(11)
二、三极管内部电流的分配关系	(13)
三、三极管的输入、输出特性	(16)
第四节 三极管主要参数与型号命名法	(21)
一、三极管的主要参数	(21)
二、三极管型号命名法	(23)
第五节 场效应管	(24)
一、结型场效应管	(25)
二、绝缘栅场效应管	(30)
第二章 小信号电压放大器	(42)
第一节 放大器的基本概念	(42)

一、电压放大的概念	(42)
二、电压放大器的构成	(43)
三、放大器的主要性能指标	(45)
四、放大器的分类	(48)
第二节 放大器工作原理	(49)
(1) 一、最简单的放大器	(49)
(1) 二、电压放大过程分析	(51)
(1) 三、静态工作点对放大器工作的影响	(53)
(2) 第三节 放大器的微变等效电路分析	(55)
(2) 一、三极管的微变等效电路	(56)
(2) 二、放大器的微变等效电路	(57)
(2) 三、放大器的电压增益分析	(57)
(2) 四、放大器的输入、输出电阻分析	(58)
(2) 第四节 工作点稳定的放大器	(60)
(2) 一、分压式电流负反馈偏置形式	(60)
(2) 二、电压并联负反馈偏置形式	(64)
(2) 第五节 多级放大器及其特性	(65)
(2) 一、多级放大器的级间耦合方式	(65)
(2) 二、多级放大器的分析方法	(68)
(2) 三、多级放大器的通频带	70)
(2) 第六节 单级放大器的测试与调整	(72)
(2) 一、测试调整低频放大器的常用仪器	(72)
(2) 二、静态工作点的测试与调整方法	(73)
(2) 三、电压增益的测量方法	(74)
(2) 四、输出信号波形的观测	(75)
第三章 负反馈放大器	(79)
(3) 第一节 负反馈的基本概念	(79)

一、反馈概念与反馈形式	(79)
二、负反馈对放大器性能的影响	(80)
三、反馈方式的判别方法	(85)
第二节 典型单级负反馈放大器	(86)
一、电流串联负反馈放大器	(87)
二、射极输出电路	(91)
第四章 集成运算放大器	(103)
第一节 直流放大器的基本特点	(103)
一、直流放大器的耦合方式	(103)
二、采用直接耦合引起各级静态工作点互相牵连	(104)
三、采用直接耦合引起严重的零点漂移现象	(107)
第二节 差动放大器的特点与电路分析	(109)
一、差动放大器的构成与特点	(109)
二、差动放大器抑制零点漂移的原理	(110)
三、差动放大器对信号的放大能力	(111)
四、差动放大器的差值特性	(112)
五、差动放大器电路改进	(114)
六、差动放大器的联接方式	(118)
第三节 集成运算放大器	(121)
一、集成运算放大器的构成及特点	(124)
二、集成运算放大器的主要参数	(126)
第四节 集成运算放大器的典型应用	(127)
一、一般电压放大器	(127)
二、信号加法、减法运算	(131)
三、信号比较器	(133)
四、波形变换与波形发生器	(136)
第五节 集成运算放大器应用知识	(138)

一、集成运算放大器的外形特点	(138)
二、集成运算放大器选用原则	(140)
三、集成运算放大器使用注意事项	(141)
第五章 低频功率放大器	(149)
第一节 对功率放大器的特殊要求	(149)
一、必须对晶体管的极限参数提出要求	(150)
二、必须注意与负载实现阻抗匹配	(151)
三、必须讲究电路的工作效率	(151)
四、必须重视非线性失真问题	(152)
五、必须对功率放大管采取散热措施	(152)
第二节 单管甲类功率放大器	(153)
一、电路形式	(153)
二、工作原理分析	(154)
三、理想效率分析	(157)
四、功率管的选用	(158)
第三节 乙类推挽功率放大电路	(159)
一、电路构成	(160)
二、工作原理	(161)
三、最大输出功率与效率分析	(162)
四、功率管的选用	(164)
五、交越失真及其克服方法	(165)
第四节 互补类推挽功率放大电路	(167)
一、电路工作原理	(167)
二、改进型电路	(168)
三、输出功率的分析	(169)
四、对互补管的指标要求	(171)
五、OTL 电路应用实例	(171)

第五节 OCL 电路与 BTL 电路	(173)
一、OCL 电路介绍	(173)
二、BTL 电路介绍	(176)
第六章 直流稳压电源	(182)
第一节 整流电路	(182)
一、半波整流电路	(183)
二、全波整流电路	(184)
三、桥式整流电路	(186)
第二节 滤波电路	(188)
一、电容滤波电路	(188)
二、电感滤波电路	(192)
三、复式滤波电路	(193)
第三节 整流滤波电路设计举例	(194)
第四节 稳压管与并联稳压电路	(196)
一、稳压二极管的特性	(196)
二、稳压管的主要参数	(198)
三、并联稳压电路分析	(198)
第五节 典型串联稳压电路	(201)
一、串联稳压电路工作原理	(202)
二、输出电压不稳定原因与稳压过程	(203)
三、电路参数选择与输出的稳定电压	(204)
第六节 提高稳压电源性能的几种办法	(205)
一、使输出电压在一定范围内可调	(206)
二、扩大带动负载的能力	(207)
三、进一步提高稳压性能	(208)
四、削弱纹波电压	(211)
五、限流保护	(212)

第七节 直流稳压电源设计举例	(214)
一、整流滤波部分计算	(216)
二、基准电压部分计算	(216)
三、取样电路的计算	(217)
四、比较放大部分的计算	(217)
第七章 自激正弦振荡器	(222)
第一节 自激振荡的基本概念	(223)
一、产生自激振荡的条件	(224)
二、自激振荡的建立与稳定	(226)
三、自激正弦振荡器的构成和分类	(227)
第二节 LC 正弦振荡器	(227)
一、LC 回路的频率特性	(229)
二、变压器耦合式 LC 振荡器	(231)
三、电感三点式 LC 振荡器	(233)
四、电容三点式 LC 振荡器	(235)
第三节 RC 正弦振荡器	(235)
一、RC 电路移相特性	(235)
二、RC 移相式正弦振荡电路	(236)
三、RC 桥式正弦振荡电路	(237)
第四节 LC 型振荡器的设计与调试原则	(240)
一、确定合适的电路	(240)
二、选择符合要求的晶体管	(241)
三、设置正确的静态工作点	(241)
四、提示 LC 回路的品质因素	(242)
五、排除故障, 进行调试	(242)
第五节 石英晶体振荡器	(244)
一、石英晶体的压电效应	(245)

二、石英谐振器的特性	(246)
三、石英晶体振荡器电路	(248)
第八章 无线电通信的基本知识	(253)
第一节 通信系统的基本构成	(253)
一、发送部分构成	(253)
二、接收部分的构成	(256)
第二节 调幅波与调频波的特点	(257)
一、调幅波的特点	(257)
二、调频波的特点	(262)
三、调幅与调频的比较	(265)
第三节 无线电接收机的基本构成	(266)
一、直接放大与外差式放大	(266)
二、外差式接收电路的工作过程	(268)
第四节 无线电波波段的划分和使用	(269)
附录 部分常用三极管参数表	(274)
表 1 低频小功率管 3AX1~5	(274)
表 2 3AX21~24 低频小功率管	(275)
表 3 低频大功率管 3AD1~5	(277)
表 4 低频大功率管 3AD6	(278)
表 5 低频大功率管 3AD30	(279)
第 6 高频小功率管 3AG11~14	(280)
表 7 高频小功率管 3DG6	(281)

第一章 半导体器件基本知识

通过本章的学习,要求了解半导体的特性、P型N型半导体的构成和特点、PN结的形成及单向导电原理;掌握二极管的分类、外部特性、主要参数;掌握三极管的构造特点、内部电流分配关系、输入输出特性以及主要参数;掌握场效应管构造特点及电流控制原理。

在学习中必须准确地理解概念,着重掌握二极管、三极管的外部特性以及各项参数的意义。

第一节 半导体的基本概念

所有的半导体器件都是用半导体材料制成的。半导体材料有着十分特殊的导电性能,科学家和工程师们正是利用并控制了这些特性,制造出了具有不同功能的半导体器件,如二极管、三极管和各种各样集成电路。有了这些器件,才有当代电子技术的飞跃发展。

一、半导体材料有哪些特性

自然界存在着各种各样的材料,有些材料导电能力很强,像铜、铝、铁等金属就是这样的材料。我们把这一类材料统称为导体或导电材料。在物理学上把电阻率小于 $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$ 的材料都列为导电材料。还有一些材料导电能力极差,几乎不导电,像木材、玻璃、塑料等。我们把这一类材料统称为

绝缘体或绝缘材料。物理学上把电阻率大于 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料都列入绝缘材料。显然还有一部分材料，它的导电能力介于导体和绝缘体之间，这一类材料我们便称为半导体，或叫半导体材料。目前用于制造器件的半导体材料最主要的是硅 (Si) 和锗 (Ge)。

导电材料常被用于制造电线、插头插座、各种开关等，因为它电阻率低，电力损耗很小；绝缘材料常被用于制造电线的外皮、开关盒和电子设备的机座机壳、按键旋钮等，因为它的电阻率极大，不导电，可以确保人身安全。半导体不是好的导体，也不是好的绝缘体，为什么它的应用那样广泛呢？原来我们利用的是它的一些特殊的性能。

半导体有哪些特殊性能呢？主要有三点。

第一，半导体的导电能力很容易受到温度的影响，环境温度稍稍升高，半导体的导电能力就会加强，这一特性叫做半导体的“热敏性”。

第二，半导体受到光的照射时，导电能力也会大大加强，这一特性叫做半导体的“光敏性”。

第三，在纯净的半导体材料中加入微量的有用的杂质，它的导电能力就会提高几十万倍甚至几百万倍，这一特性叫做半导体的“掺杂性”。这是半导体最重要的特性，半导体器件就是以这一特性为基础制作成功的。

二、本征半导体、P 型半导体和 N 型半导体

本征半导体是指那些纯净的不含任何杂质的，而且晶格结构非常完整的半导体，它是制造半导体器件的最基本的材料。譬如我们常听说的单晶硅，就是本征半导体，它的纯度应达到 99.999……99% 以上，小数点后面有十二个“9”。本

征半导体在常温下，其内部有两种带电的微粒参与导电，一种是带负电的自由电子，一种是带正电的空穴，我们把这两种参与导电的带电粒子都叫做“载流子”。由于本征半导体内部载流子的数目是相当有限的，所以它的导电能力很差。但是，如果我们有选择地往本征半导体中加入微量的其它元素。它内部的载流子数目就会大大增加，导电能力将变得很强。加入的其它元素的量越多，导电能力越强。

往本征半导体中加入微量的 3 价元素，如硼 (B)、铝 (Al) 等，会使半导体内部的空穴数量大大增加，它的导电能力将大大增强，而且主要是由空穴的运动形成电流，所以空穴是多数载流子。当然还有少量自由电子参加导电，所以自由电子是少数载流子。因为空穴是带正电荷的，所以我们将这一类的掺杂半导体称为正极性半导体，简称 P 型 (Positiver) 半导体。

往本征半导体中加入微量的 5 价元素，如磷 (P) 元素等，会使半导体内部的自由电子数量大大增加，它的导电能力也将大大增强，而且主要是由自由电子的运动形成电流，所以自由电子是多数载流子。当然还有少量的空穴参加导电，所以空穴是少数载流子。由于电子是带负电荷的，所以我们将这一类的掺杂半导体称为负极性半导体，简称 N 型 (Negativer) 半导体。

三、PN 结及其单向导电特性

如果在一块本征半导体的两边分别掺入 3 价元素和 5 价元素，形成 P 型和 N 型半导体，我们发现这整块半导体的性质发生了深刻的变化，在 P 型区和 N 型区的界面处出现了一个特殊的空间电荷区，它有明显的单向导电特性。我们把这