

四川省示范性高职院校建设项目成果

主编◎王志军 主审◎蒋从元

模拟电子电路分析与实践

MONI DIANZI DIANLU FENXI YU SHIJIAN



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

四川省示范性高职院校建设项目成果

模拟电子电路分析与实践

主 编 王志军

副主编 吴 敏 官咏华

主 审 蒋从元

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容提要

全书共3个工作任务,包括分立元件放大电路的制作与调试、集成功率放大电路制作与调试、低频信号发生器制作与调试。各任务按学习知识递进设计,以实际电路制作为目标,任务为核心,提供资讯、任务分析、任务计划与实施等,最后对任务的完成情况进行了总结评价。为了构建知识的完整性,以及达到对所学习知识的巩固与提高,任务中增加了相关资讯及任务习题,以提高学生自主学习能力,实现开放式教学。

本书可以作为高职高专应用电子技术、电子信息工程技术、通信技术、电气自动化、电子仪器仪表与维修等专业的模拟电子技术基础课程教材,也可作为电子信息类专业的培训教材,还可供从事电子技术专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子电路分析与实践 / 王志军主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2013.3
四川省示范性高职院校建设项目成果
ISBN 978-7-5643-2215-1

I. ①模… II. ①王… III. ①模拟电路—高等职业教
育—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第035772号

模拟电子电路分析与实践

主编 王志军

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	张少华
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段111号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	13
字 数	322 千字
版 次	2013 年 3 月第 1 版
印 次	2013 年 3 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2215-1
定 价	27.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

在大力发展职业教育、创新人才培养模式的新形势下，加强高职院校教材建设，是深化教育教学改革、推进教学质量工程、全面培养高素质技能型专门人才的前提和基础。

近年来，四川职业技术学院在省级示范性高等职业院校建设过程中，立足于“以人为本，创新发展”的教育思想，组织编写了涉及汽车制造与装配技术、物流管理、应用电子技术、数控技术等四个省级示范性专业，以及体制机制改革、学生综合素质训育体系、质量监测体系、社会服务能力建设等四个综合项目相关内容的系列教材。在编撰过程中，编著者立足于“理实一体”、“校企结合”的现实要求，秉承实用性和操作性原则，注重编写模式创新、格式体例创新、手段方式创新，在重视传授知识、增长技艺的同时，更多地关注对学习者的专业素质、职业操守的培养。本套教材有别于以往重专业、轻素质，重理论、轻实践，重体例、轻实用的编写方式，更多地关注教学方式、教学手段、教学质量、教学效果，以及学校和用人单位“校企双方”的需求，具有较强的指导作用和较高的现实价值。其特点主要表现在：

一是突出了校企融合性。全套教材的编写素材大多取自行业企业，不仅引进了行业企业的生产加工工序、技术参数，还渗透了企业文化和管理模式，并结合高职院校教育教学实际，有针对性地加以调整优化，使之更适合高职学生的学习与实践，具有较强的融合性和操作性。

二是体现了目标导向性。教材以国家行业标准为指南，融入了“双证书”制和专业技术指标体系，使教学内容要求与职业标准、行业核心标准相一致，学生通过学习和实践，在一定程度上，可以通过考级达到相关行业或专业标准，使学生成为合格人才，具有明确的目标导向性。

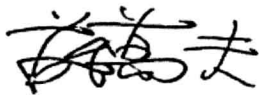
三是突显了体例示范性。教材以实用为基准，以能力培养为目标，着力在结构体例、内容形式、质量效果等方面进行了有益的探索，实现了创新突破，形成了系统体系，为同级同类教材的编写，提供了可资借鉴的范样和蓝本，具有很强的示范性。

与此同时，这是一套实用性教材，是四川职业技术学院在示范院校建设过程中的理论研究和实践探索成果。教材编写者既有高职院校长期从事课程建设和实践实训指导的一线教师 and 教学管理者，也聘请了一批企业界的行家里手、技术骨干和中高层管理人员参与到教材的编写过程中，他们既熟悉形势与政策，又了解社会和行业需求；既懂得教育教学规律，又深谙学生心理。因此，全套系列教材切合实际，对接需要，目标明确，指导性强。

尽管本套教材在探索创新中存在有待进一步锤炼提升之处，但仍不失为一套针对高职学生的好教材，值得推广使用。

此为序。

四川省高职高专院校
人才培养工作委员会主任



二〇一三年一月二十三日

前 言

本书是在多年高等职业教育教学改革与实践的基础上，为适应我国社会进步和经济发展的需要，结合高职高专办学定位、生源的具体情况，探索高职教育理念，专门为高职高专电子信息类专业编写的模拟电子技术基础教材。

本书根据高等职业教育的特点，对原有模拟电子技术教材体系进行了较大地改革，坚持“以学生为中心、能力培养为本位”的职业教育思想，利用工作任务驱动，围绕情境载体，探索“做中学、学中做”的教学模式，经过努力，编写出这本模拟电子技术课程教材。本教材有以下特点：

（1）本教材强调知识、技能、职业素养有机结合，教学中坚持理论教学、实验验证、技能训练相结合，强调应用技能、专业素养的培养。

（2）教学内容体现高职特色，理论知识深度以够用为度，注意点面结合。在知识面上注重“广度和定性”，突出高职“职”的特色；在重要知识点上追求“深度和定量”，体现高职“高”的点。

（3）以情境载体贯穿学习任务。学习任务按照“资讯、决策、计划、实施、检查、评估”的方式进行。

（4）为了完善课程知识体系和因材施教，增加了必要的知识拓展。

全书共设计了3个学习任务，任务1为分立元件放大电路的制作与调试，任务2为集成功率放大电路制作与调试，任务3为低频信号发生器制作与调试。每个学习任务以一个电子产品制作为情境载体，电路制作为目标，任务为核心，提供任务资讯、任务分析、任务实施方案等，最后对任务的完成进行检查与评估。

本书教学学时建议为120学时，各任务参考学时数如下表所列，供教师在教学过程中参考。

参考学时分配表

序 号	授课内容	学时分配		
		讲课	实验验证	技能训练
任务1	分立元件放大电路的制作与调试	30	14	16
任务2	集成功率放大电路制作与调试	16	6	8
任务3	低频信号发生器制作与调试	18	4	8
合 计		64	24	32

本书由四川职业技术学院王志军任主编，吴敏、官泳华老师任副主编。官泳华撰写了内容提要 and 前言；王志军编写学习任务一；吴敏编写学习任务二；四川职业技术学院刘力老师编写学习任务三；四川职业技术学院黄菊老师编写了全书习题及解答。

本书可以作为高职高专应用电子技术专业、电子信息工程技术专业、通信技术专业、电气自动化专业、电子仪器仪表与维修等专业的模拟电子技术基础课程教材，也可作为电子信息类专业的培训教材，还可供从事电子技术专业工程技术人员参考。

本书由四川职业技术学院蒋从元老师仔细审阅，提出了许多修改意见，在编写过程中也得到了四川省遂宁市微电子工业园区的关心和支持，在此一并致以衷心感谢。

由于水平有限，书中难免有疏漏与不妥之处，恳请读者指正。

编 者

2012 年 10 月

本书常用符号说明

一、常用下标符号意义

i 、 o	分别表示输入和输出量
s 、 f	分别表示信号源量和反馈量
L	负载

二、常用符号意义

1. 放大倍数与增益

A	放大倍数、增益通用符号
A_u	电压放大倍数、增益
A_{ud}	差模电压放大倍数、增益
A_{us}	源电压放大倍数、增益
A_{uf}	负反馈放大电路闭环电压放大倍数、增益

2. 电阻

R	直流电阻或静态电阻
r	交流电阻或动态电阻
R_p	电位器（可变电阻）
R_i	电路的输入电阻
R_o	电路的输出电阻
R_s	信号源内阻
R_L	负载电阻
R_F	反馈电阻

3. 电容、电感

C	电容通用符号
C_B 、 C_E	分别为基极、发射极旁路电容
C_j	PN 结结电容
L	电感、自感系数

4. 频率与通频带

F 、 f	频率通用符号
Ω 、 ω	角频率通用符号
f_H	电路高频截止频率（上限频率）
f_L	电路低频截止频率（下限频率）
f_T	特征频率
f_0	振荡频率、谐振频率
BW	3dB 通频带
BW_G	单位增益带宽

5. 功率与效率

P_o	交流输出功率
P_{DC}	直流电源供给功率
P_C	集电极耗散功率
P_{CM}	集电极最大允许功率
η	效率

6. 其他

F	反馈系数
F_u	电压反馈系数
H	双口网络混合参数
K	乘法器增益系数
K_{CMR}	共模抑制比
Q	静态工作点
VD	半导体二极管
VT	半导体三极管
T, t	时间、周期、温度
τ	时间常数
φ	相角

三、 $U(I)$ 不同书写体电压（电流）符号的规定

(1) 大写 $U(I)$ 大写下标, 表示直流电压（电流）值, 例如 U_{BE} 表示基极与发射极之间的直流电压。

(2) 大写 $U(I)$ 小写下标表示交流电压（电流）的有效值, 例如 U_{be} 表示基极与发射极之间的交流电压的有效值。

(3) 小写 $u(i)$ 大写下标, 表示含有直流电压（电流）的瞬时值, 例如, u_{BE} 表示基极与发射极之间含有直流电压的瞬时值。

(4) 小写 $u(i)$ 小写下标, 表示交流电压（电流）瞬时值, 例如, u_{be} 表示基极与发射极之间交流电压的瞬时值。

(5) 大写 $U(I)$ 小写 m 下标, 表示交流电压（电流）的最大值, 例如, I_{cm} 表示集电极交流电流的最大值。

(6) $\dot{U}(\dot{I})$ 为正弦交流电压（电流）的相量表示。

(7) 大写 V 大写双字母下标表示直流供电电源电压, 例如, V_{CC} 表示集电极直流供电电源电压。

目 录

任务 1 分立元件放大电路制作与调试	1
1.1 任务描述	1
1.2 任务资讯	2
1.3 任务分析	83
1.4 任务实施	86
1.5 任务评估与总结	90
习 题	95
任务 2 集成功率放大电路制作与调试	105
2.1 任务描述	105
2.2 任务资讯	106
2.3 任务分析	134
2.4 任务实施	137
2.5 任务评价与总结	142
习 题	145
任务 3 低频信号发生器制作与调试	151
3.1 任务描述	151
3.2 任务资讯	152
3.3 任务分析	178
3.4 任务实施	180
3.5 任务评估与总结	185
习 题	188
部分习题参考答案	193
参考文献	197

任务 1 分立元件放大电路制作与调试

1.1 任务描述

无论多么复杂的电子电路，都可以细化成由若干分立元件电子电路组成。放大电路是电子电路的基本单元电路，因此学习电子技术必须先学由分立元件组成的放大电路。本学习任务围绕分立元件电子电路知识展开学习，以线性串联型直流稳压电源为情境载体，完成分立元件放大电路的制作与调试任务。

1.1.1 任务目标

分立元件放大电路制作与调试任务目标如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 分立元件放大电路制作与调试任务目标

序号	类别	目标
1	知识点	1. PN 结单向导电性 2. 二极管半波整流电路 3. 二极管桥式整流电路 4. 电容滤波电路 5. 三极管的电流放大作用 6. 基本放大电路及组成 7. 放大电路直流通路及静态概念 8. 放大电路的交流通路、微变等效电路及动态参数 9. 多级放大电路的概念及组成 10. 反馈概念及组成 11. 负反馈的四种基本组态 12. 深度负反馈特点 13. 负反馈对放大电路性能的影响 14. 串联型稳压电源电路及基本组成 15. 典型三端固定集成稳压电源电路
2	技能点	1. 二极管、三极管的识别及检测 2. 基本放大电路静态工作点的设置与估算 3. 利用微变等效电路法分析基本放大电路、多级放大电路的动态参数 4. 负反馈组态判别 5. 根据需要设置合适的静态工作点 6. 串联型稳压电源电路分析及输出电压估算 7. 根据需要选择合适典型集成稳压电源电路 8. 会正确操作常用电子仪器测量电子电路 9. 会查阅半导体器件手册，记录晶体管类别、型号及参数

续表 1.1.1

序号	类别	目标
3	职业素养	1. 严谨的学习态度和工作作风 2. 养成爱护仪器设备、遵守安全操作规程的习惯 3. 良好的组织协调能力、团队协作能力 4. 负责的、积极的、自信的职业道德

1.1.2 任务学习情境

任务情境载体线性串联型直流稳压电源电路原理图如图 1.1.1 所示。电源特性指标：输入电压 $220(1\pm 10\%)$ V，输出电压 $7\sim 13$ V 可调，输出电流 1 A；电源质量指标：稳压系数， $S_r \leq 0.1$ ，电源内阻， $r \leq 0.5 \Omega$ ，纹波电压小于 5 mV。

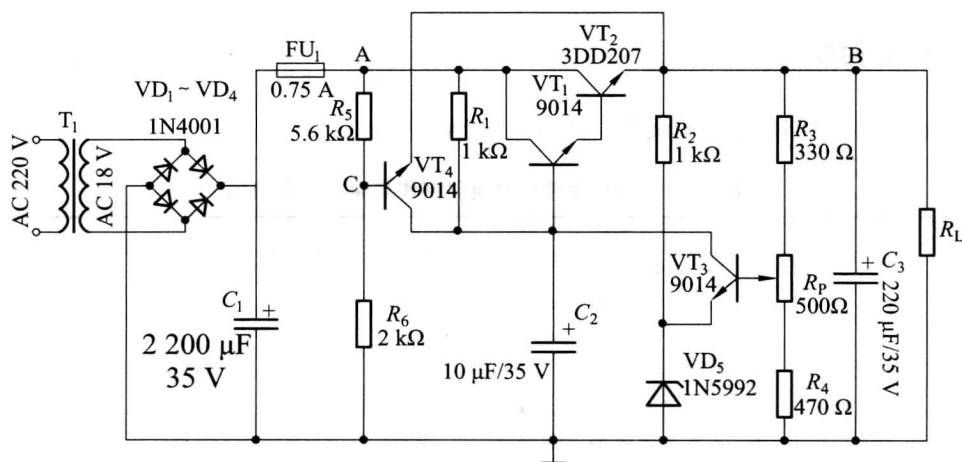


图 1.1.1 线性串联型直流稳压电源电路原理图

1.2 任务资讯

1.2.1 直流稳压电源简介

1.2.1.1 直流稳压电源简介

我国市电为 220 V/50 Hz 交流电，而电子产品（如收录机、电视机、影碟机、计算机等）的内部电路所需要的是几伏、十几伏或几十伏的稳定直流电。因此，这些电子产品就需要一类装置（或设备）将市电转换为稳定直流电。这种将交流电转变为稳定直流电的电子装置（或设备）称为直流稳压电源。

直流稳压电源类型很多，按稳压的方式不同常分为两大类：线性直流稳压电源和开关型直流稳压电源。线性直流稳压电源输出电压低于输入电压，调整管工作在线性放大状态；具有反应速

度快、输出纹波较小、产生噪声低、电源电路简单、性能优良、稳压效果好等优点；广泛应用于电子产品和电子设备中；缺点为调整管发热量大，电源效率较低。开关型直流稳压电源输出电压高低灵活，调整管工作在高频开关状态；具有稳压范围宽、发热量小、电源效率高、电源体积小、重量轻等优点；主要缺点为存在较为严重的开关干扰。

1.2.1.2 线性型直流稳压电源的基本组成

线性直流稳压电源主要由变压、整流、滤波和稳压四部分电路组成，如图 1.2.1 所示。220 V/50 Hz 的交流电首先经过电源变压器降压，然后通过整流电路将其转变为脉动直流电，再经过滤波电路将脉动的直流电转变为平滑的直流电，最后通过稳压电路，将平滑的直流电转变为稳定的直流电输出。

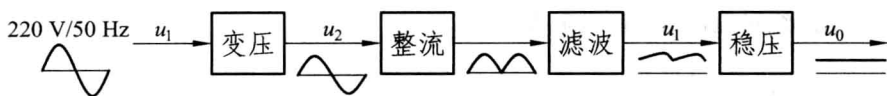


图 1.2.1 直流稳压电源组成框图

1. 变压电路

将 220 V 交流电转换为适当大小的交流电，一般采用降压变压器电路。

2. 整流电路

将交流电转变为直流电（脉动直流电），常采用二极管整流电路。

3. 滤波电路

将脉动直流电转变为平滑的直流电，常采用电容、电感及组合滤波电路。

4. 稳压电路

将平滑的直流电转变为稳定的直流电，稳压电路是电源稳压的核心电路。

1.2.1.3 直流稳压电源的主要性能指标

稳压电源的技术指标分为两种：一种是特性指标，另一种是质量指标。

1. 特性指标

- (1) 输入电压及其变化范围；
- (2) 输出电压及输出电压调节范围；
- (3) 额定输出电流。

2. 质量指标

- (1) 稳压系数 S_r 。

稳压性能的好坏，常用稳压系数 S_r 来描述，它定义为：在负载电流 I_o 和温度 T 不变时，输出电压 U_o 和输入电压 U_i 的相对变化量之比，即

$$S_r = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_i / U_i} \bigg|_{\substack{\Delta I_o = 0 \\ \Delta T = 0}} \quad (1.2.1)$$

(2) 电流调整率 S_I 。

当输入电压 U_i 及温度 T 不变时, 输出电流 I_o 从零变到最大时, 输出电压的相对变化量 $\Delta U_o / U_o$, 称为电流调整率 S_I , 即

$$S_I = \frac{\Delta U_o}{U_o} \times 100\% \bigg|_{\Delta T = 0, \Delta U_i = 0} \quad (1.2.2)$$

(3) 输出电阻 R_o 。

当输入电压和温度不变时, 因 R_L 变化, 导致负载电流变化了 ΔI_o , 相应的输出电压变化了 ΔU_o , 两者比值的绝对值称为输出电阻 R_o , 即

$$R_o = -\frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} \bigg|_{\substack{\Delta U_i = 0 \\ \Delta T = 0}} \quad (1.2.3)$$

其单位 Ω 。 R_o 的大小反映了电源带负载能力, 其值越小, 负载能力越强。一般 $R_o < 1 \Omega$ 。

(4) 温度系数 S_T 。

输入电压 U_i 和负载电流 I_o 不变时, 温度变化所引起的输出电压相对变化量 $\Delta U_o / U_o$ 与温度变化量 ΔT 之比, 称为温度系数 S_T , 即

$$S_T = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta T} \times 100\% \bigg|_{\substack{\Delta U_i = 0 \\ \Delta I_o = 0}} \quad (1.2.4)$$

其单位为 $\%/^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 纹波电压及纹波抑制比 S_R 。

纹波电压是指叠加在直流输出电压 U_o 上的交流电压, 通常用有效值 U'_o 或峰值 U_{op} 表示。在电容滤波电路中, 负载电流越大, 纹波电压也越大, 因此, 纹波电压应在额定输出电流情况下测出。

纹波抑制比 S_R 定义为稳压电路输入纹波电压峰峰值 U_{ipp} 与输出纹波电压峰峰值 U_{opp} 之比, 并用对数表示, 即

$$S_R = 20 \lg \frac{U_{ipp}}{U_{opp}} \quad (\text{dB}) \quad (1.2.5)$$

S_R 表示稳压器对其输入端引入的交流纹波电压的抑制能力。

1.2.2 整流滤波电路

1.2.2.1 半导体基础知识

导电性能介于导体和绝缘体之间的物质成为半导体。在自然界中属于半导体的物质很多, 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, 其中硅使用最广泛。

1. 本征半导体

纯净的单晶半导体称为本征半导体。用以制造半导体器件的纯硅和锗都是晶体，其原子结构示意图如图 1.2.2 所示。

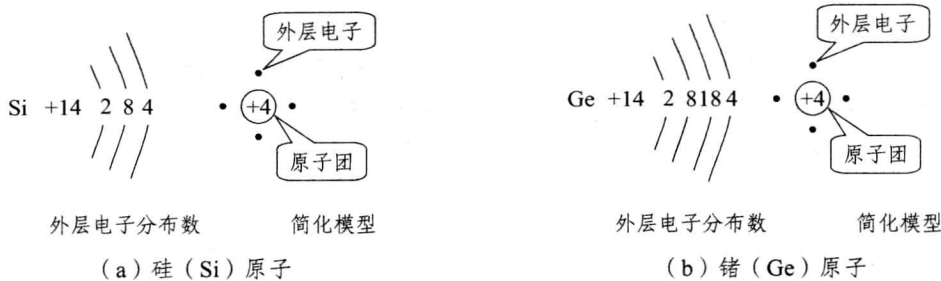


图 1.2.2 硅 (Si) 和锗 (Ge) 的原子结构图

由图 1.2.2 可知，硅和锗的最外层电子数均为 4 个，为 8 个电子稳定结构的一半，其简化模型均等效为带 4 个正电荷、状态稳定的原子团和 4 个受原子核束缚力较小的外层电子。锗原子的原子半径比硅原子大，外层电子受原子核的束缚力更小。

纯净的半导体原子为达到外层 8 电子稳定状态，原子与原子间采用外层电子共享的方式，构成共价键，形成规则整齐排列的半导体晶状结构，其结构如图 1.2.3 所示。

在常温下，本征半导体内可自由移动的电子数目很少，导电能力很差，当温度升高或受日光照射，部分半导体原子外层部分电子在获得足够能量后，将挣脱共价键的束缚，形成自由电子（简称电子）和共价键空穴（简称空穴），如图 1.2.4 所示，这一过程称为本征激发。

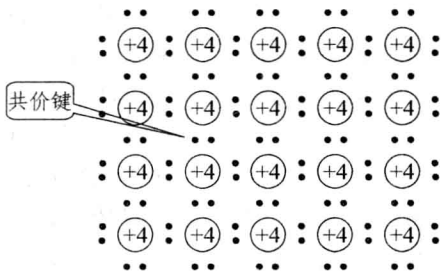


图 1.2.3 半导体晶体结构示意图

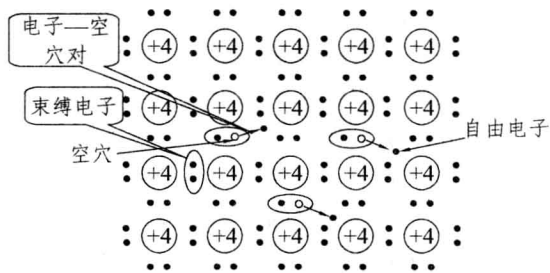


图 1.2.4 本征半导体激发示意图

本征激发产生的电子和空穴总是成对出现的，形成电子-空穴对。电子和空穴都可看作带电粒子，1 个电子带 1 个单位负电荷，1 个空穴带 1 个单位正电荷，它们统称为载流子。

在本征半导体中，电子-空穴对的数目主要取决于环境温度，因此半导体器件的导电能力对温度很敏感。利用这一特性可将半导体器件制作成温敏器件、光敏器件，也正是这个原因，导致半导体器件的温度稳定性变差。

2. 杂质半导体

在本征半导体中掺入某种微量元素（杂质），使其导电性能发生显著变化后形成的半导体称为杂质半导体。杂质半导体的导电能力要比本征半导体强几十万倍甚至几百万倍。根据掺入杂质

不同，杂质半导体又可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

(1) N 型半导体：在本征半导体中，掺入微量的五价元素（如磷、砷或锑）就形成了 N 型半导体。

由于五价元素原子最外层有 5 个价电子，当它们取代晶格中四价元素原子的位置而与周围的四价元素原子形成共价键时，还会多出 1 个不受共价键束缚的自由电子，如图 1.2.5 (a) 所示。五价元素原子由于处在晶格位置上，且释放了 1 个电子而成为不能移动的正离子，其等效结构如图 1.2.5 (b) 所示。在 N 型半导体中，每掺入一个五价元素原子，就会形成 1 个不能移动的正离子和 1 个自由移动的电子。因此，其内部结构如图 1.2.5 (c) 所示。

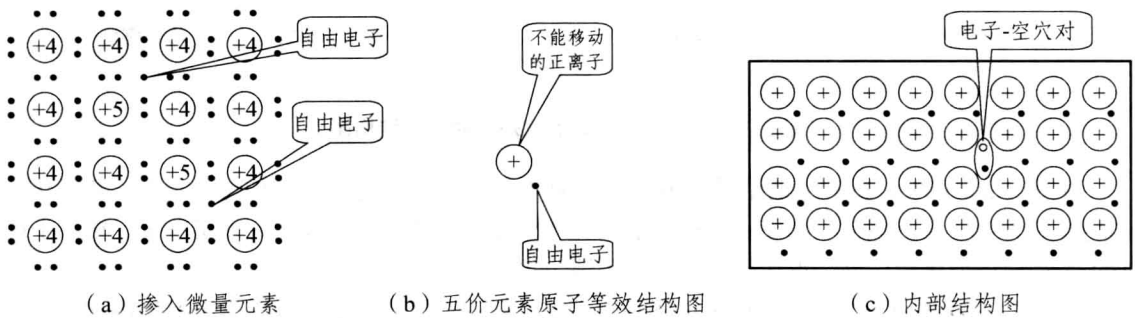


图 1.2.5 N 型半导体内部结构示意图

在 N 型半导体中，自由电子除了掺杂的五价原子提供外，还有极少一部分来自热激发产生的电子-空穴对。由于自由电子的数目远远大于空穴的数目，因此自由电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称为少子）。

(2) P 型半导体：在本征半导体中，掺入微量的三价元素（如硼、镓或铟）就构成了 P 型半导体。

由于三价元素原子最外层有 3 个价电子，它们会取代晶格中的四价元素原子（如硅）的位置而与周围的四价元素原子形成共价键结构，每 1 个三价元素原子夺取邻近硅原子 1 个价电子，使硅原子出现 1 个空穴，如图 1.2.6 (a) 所示。三价元素原子由于处于晶格的位置上，形成不能移动的带 1 个单位电荷的负离子，空穴因电子的填充而不断移动，成为可以自由移动的带 1 个单位正电荷的自由电荷，其等效结构如图 1.2.6 (b) 所示。在 P 型半导体中，每掺入 1 个三价元素原子，就会形成 1 个不能移动的负离子和 1 个自由移动的空穴。因此，其内部结构如图 1.2.6 (c) 所示。

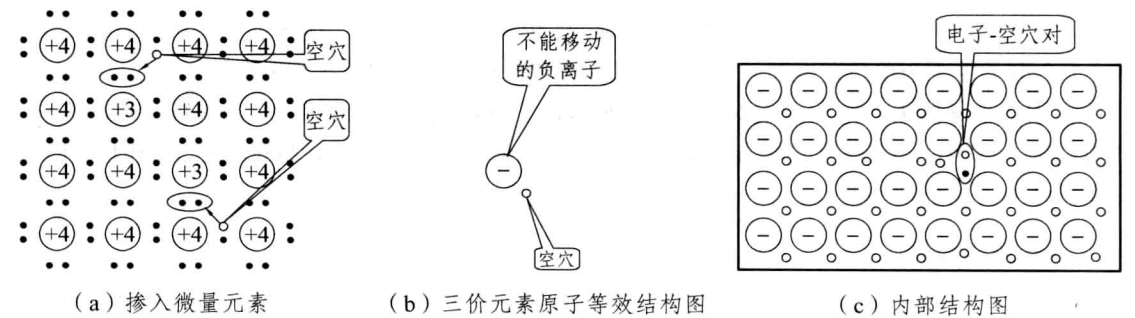


图 1.2.6 P 型半导体内部结构示意图

在 P 型半导体中，自由移动的空穴除了掺杂的三价元素原子产生外，还有极少数部分来自热激发产生的电子空穴对。由于空穴的数目远远大于电子数目，因此空穴为多数载流子（简称多子），电子为少数载流子（简称少子）。

3. PN 结

通过一定的生产工艺把 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起，则会在它们的交界面形成一层特殊的薄层，这层薄层就称为 PN 结。PN 结具有单向导电性。

(1) PN 结的形成。

多子扩散：在 P 型和 N 型半导体的交界面两侧，由于自由电子和空穴的浓度相差悬殊，所以 N 区中的多数载流子自由电子要向 P 区扩散，同时 P 区中的多数载流子空穴要向 N 区扩散，并且电子和空穴相遇时，将复合而消失，如图 1.2.7 所示。

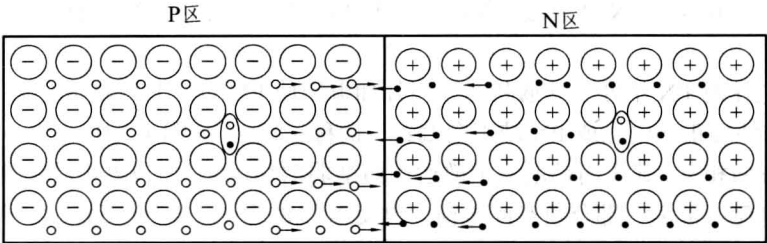


图 1.2.7 PN 结形成——多子扩散示意图

形成多子扩散阻挡层，促使少子漂移：多子扩散的结果，必然在交界面两侧分别形成不能移动的正、负离子区（又称为空间电荷区、势垒区、耗尽层），如图 1.2.8 所示。空间电荷区一侧带负电，另一侧带正电，形成内电场 $E_{内}$ ，其方向由 N 区指向 P 区。内电场将阻止多子向对方扩散，而促使 P 区和 N 区中的少子向对方漂移。

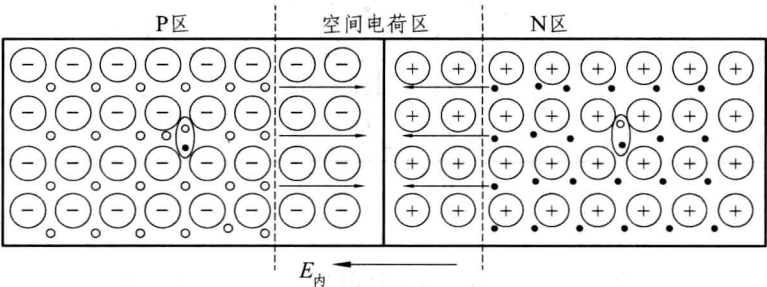


图 1.2.8 PN 结形成——阻挡层示意图

多子扩散与少子漂移达到动态平衡，形成 PN 结：随着多子扩散运动的进行，多子阻挡层不断增厚，扩散运动不断减弱，漂移运动不断加强。当扩散运动的多子数量和漂移运动的少子数量相等时，两种运动达到动态平衡，空间电荷区的宽度保持一定，PN 结就形成了，如图 1.2.9 所示。

一般，空间电荷区的宽度很薄，为几微米至几十微米；空间电荷区内几乎没有载流子，其电阻率很高。

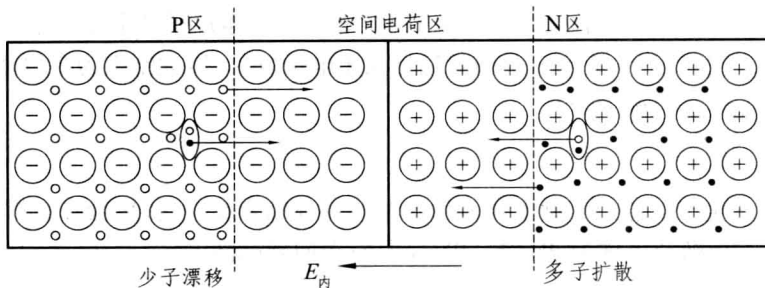


图 1.2.9 PN 结形成——多子扩散与少子漂移动态平衡示意图

(2) PN 结单向导电性。

在 PN 结的两端引出电极，在 PN 结的两端外加不同极性的电压时，PN 结出现截然不同的导电性能；外加正向电压时 PN 结导通，外加反向电压时 PN 结截止，这一特性就是 PN 结的单向导电性。

外加正向电压时 PN 结处于导通状态，当外加电压使 PN 结的 P 区电极电位高于 N 区电极电位时，称 PN 结外加正向电压或 PN 结正向偏置（简称正偏），如图 1.2.10 所示。此时，外加电场 $E_{外}$ 与 $E_{内}$ 的方向相反，其作用是增强扩散运动而削弱漂移运动。所以外电场将驱使 P 区多子（空穴）进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷，也使 N 区的多子（电子）进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷，其结果是使空间电荷区变窄，PN 结呈现低电阻（一般为几百欧）；同时由于扩散运动占主导，形成较大的正向电流（mA 级），此时 PN 结导通，相当于开关的闭合状态。PN 结导通时，其电位差只有零点几伏，且呈现低电阻，应该在其所在回路中串联一个限流电阻，以防止 PN 结过流而损坏。

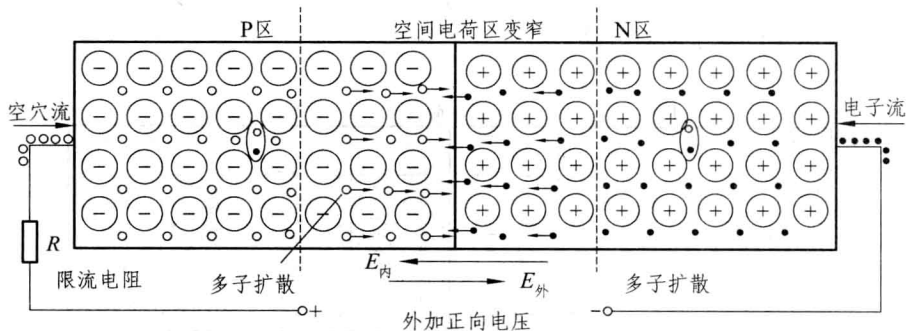


图 1.2.10 外加正向电压时 PN 结处于导通状态

在外加反向电压时 PN 结处于截止状态，当外加电压使 PN 结的 P 区电极电位低于 N 区电极电位时，称为 PN 结外加反向电压或 PN 结反向偏置（简称反偏，见图 1.2.11）。此时外加电场 $E_{外}$ 与内电场 $E_{内}$ 的方向一致，并与内电场一起阻止扩散运动而促进漂移运动。其结果是使空间电荷区变宽，PN 结呈现高电阻（一般为几千欧姆至几百千欧姆）。同时由于漂移运动占主导，而少子数量极少，因而形成的反向电流极小（ μA 级），近似分析可以忽略不计。此时 PN 结截止，相当于开关的断开状态。