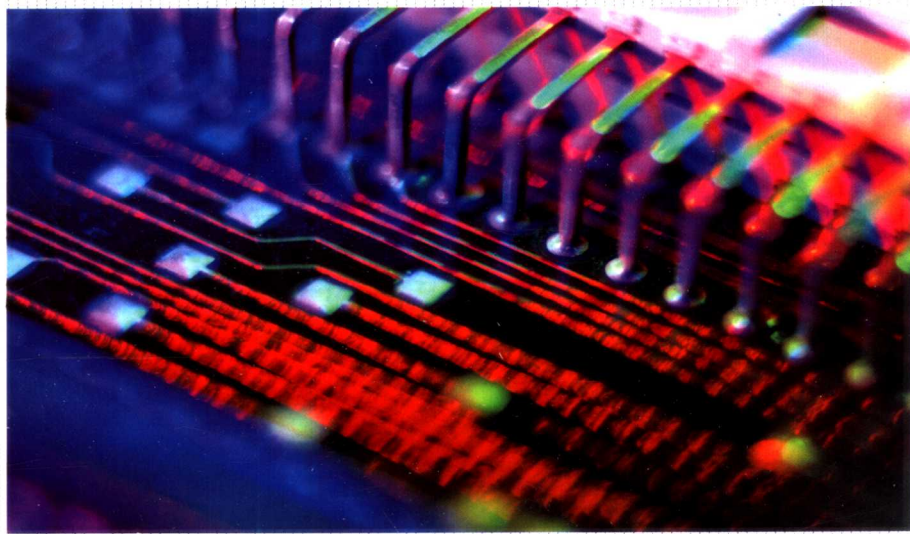


21世纪高等院校规划教材

模拟



电子技术

(第2版)

刘波粒 主编
刘彩霞 赵增荣 副主编

·MOMI DIANZI JISHU



随书附赠精美课件光盘
(板书、仿真和动画演示三位一体)



国防工业出版社

National Defense Industry Press

21 世纪高等院校规划教材

模拟电子技术

(第 2 版)

刘波粒 主 编
刘彩霞 赵增荣 副主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本教材是以作者的教改成果和教学经验为基础,参考国家教委颁发的电子技术基础课程教学基本要求编写的。本教材以“精选内容、突出三基、力图创新”为原则,从“突出设计思想、理论联系实际、典型题型举例、浓缩教学经验、附带习题详解”五个方面体现了编者多年的教学思想。本教材同时开创性地设计制作了与课本同步的教学课件,它以 Authorware、Flash、EWB、3D MAX 等软件再现了“板书演示”、“动画演示”和“仿真演示”的课堂教学新体系,较好地实现了教师教学与学生自学的互动。

本教材由半导体二极管及其基本电路、双极型三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路与放大电路的频率响应、功率放大电路、集成运算放大电路、放大电路中的反馈、信号的运算与处理电路、信号发生电路、直流稳压电源、实用电子线路及其识图方法等 11 章组成。

本教材可作为高等院校电子、通信、电气自动化、计算机等专业“模拟电子技术基础”课程教材或教学参考教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/刘波粒主编.—2版.—北京:国防工业出版社,2007.7

21世纪高等院校规划教材

ISBN 978-7-118-05154-4

I. 模... II. 刘... III. 模拟电路—电子技术 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 060575 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 420 千字

2007 年 7 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 33.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

第 2 版 前 言

第 1 版《模拟电子技术》教材,以其“突出设计思想、理论联系实际、典型题型举例、浓缩教学经验、附带习题详解”的教学内容,再加之展现课堂教学新体系的“板书演示”、“动画演示”和“仿真演示”三位一体的课件,得到了广大师生和读者的一致好评。为此我们表示衷心感谢。

通过近一年的教学实践和信息反馈,编者在第 1 版的基础上,对课本和课件进行了不同程度的修订。例如为了缓解初学者学习场效应管的难度,编者补充了 P 沟道场效应管特性曲线的 9 种形式,并通过与 N 沟道场效应管的对比,加深读者对场效应管的全面理解。在判断正、负反馈的内容上,添加了瞬时极性在电路中各点电位变化的过程,力图使初学者能够尽快突破难点。在如何求解阈值电压、如何列出有源滤波器的方程、如何求解直接耦合放大电路的静态工作点等方面,编者也提供了有益的方法。习题详解以 Word 文档的形式从课本移到课件光盘中,读取方便,以使其更加符合“教与学”。课件中的电路图改为双线绘制,提高了多媒体教学的效果。

本教材的再版由河北师范大学刘波粒任主编,负责课本第 1 章至第 8 章的编写修订工作,并负责全书的统稿工作。河北师范大学刘彩霞任副主编,负责课本第 9 章至第 11 章的编写修订工作,并负责课件的修订和排版。河北师范大学赵增荣任副主编,对再版提出了一些宝贵建议。《模拟电子技术》曾被列为河北师范大学第四批重点建设课程资助课题,期间得到了河北师范大学有关领导和部门的大力支持。此外,我们还向参与过第 1 版教材工作的教师和学生一并表示诚挚的谢意。

本教材教学课件中的 EWB 仿真实验获得了北京掌宇金仪科教仪器设备有限公司的正式授权。

作为本教材的编者,愿与广大同行共探本课程的教学改革及教材精品化和立体化建设的思路。虽然再版更贴近于教学,但与教学改革和广大师生、读者的要求尚存距离;同时限于时间和水平,本教材仍会有疏漏或不妥之处。因此,恳请使用本教材的师生和读者提出批评意见和修改建议,使其不断完善。

意见和建议可联系电子信箱:liuboli@126.com。

主 编
2007 年 3 月

第 1 版 前 言

“模拟电子技术”是一门研究电子器件及其应用的科学技术,它是电类各专业的一门必修课,是基础理论课向专业工程类课程过渡的桥梁。然而,初学者却因其概念抽象、工程估算、难于记忆、内容庞杂、学时有限等缘故表现出“教与学”的不适应。为此,围绕教学改革的教科书不断涌现,本教材也就此浮出水面。

在 2000 多年前,古希腊科学家阿基米德说过“给我一个支点,我便能掀动地球”。如今的地球早已被科学的杠杆搅得日新月异。基此,在本教材的编写中,我们以“精选内容、突出三基、力图创新”为原则,在教学内容上,从“突出设计思想——电路形成,理论联系实际——故障分析,典型题型举例——深化概念,浓缩教学经验——记识技巧,附带习题详解——便于自学”5 个方面再现编者多年的教学思想。在教学方法上,设计了与课本同步的、表征本课程特点的多媒体课件,该课件将“板书演示”、“动画演示”“仿真演示”三位一体,分别从“再现教学精华、模拟微观教学、亲临实验场景”3 个视角体现产生、保持、提高和发展兴趣这一教学理念,为奠定科学基础找好支点。在教学过程中,本教材通过巧妙地运用“课本+课件”这一教学杠杆,搭起了“教与学”的绿色通道,无疑会使学生从“想说爱你不容易”转变为“让我再看你一眼”。

本教材由河北师范大学刘波粒副教授任主编,主要负责课本的编写工作;河北师范大学刘彩霞副教授任副主编,主要负责课件研发和制作,负责课本第 11 章的编写,并对书稿进行校对工作;河北师范大学赵增荣讲师任副主编,主要负责课本绘图,并对书稿进行校对工作。河北师范大学王润兰副教授和黄战平讲师分别做了相应的工作。河北师范大学职业技术学院电子系学生张砚松、袁庆霞参与了课本绘图,郭要军、郭际、杨鲁发、满小卫、胡纪刚、刘巧丽参与了课件制作。

本教材教学课件中的 EWB 仿真实验获得了北京掌宇金仪科教仪器设备有限公司的正式授权。

本书在编写过程中得到了河北师范大学有关领导的大力支持。

尽管我们在本教材的体系、内容、创意上倾尽全力,但由于编者水平有限,再加上时间仓促,难免有疏漏或不妥之处,恳请广大读者批评指正,意见和要求可联系电子信箱:liuboli@126.com。

编著者

2006 年 1 月

本书常用符号表

一、电压和电流符号的规定

$U_E, I_E, U_B, I_B, U_C, I_C, U_D, I_D$ 字母大写, 下标大写, 表示电压和电流的直流量

$U_e, I_e, U_b, I_b, U_c, I_c, U_d, I_d$ 字母大写, 下标小写, 表示电压和电流的交流分量有效值

U_{cm}, I_{cm} 字母大写, 下标小写, 表示 BJT 集电极电压和电流的交流分量最大值

$u_E, i_E, u_B, i_B, u_C, i_C, u_D, i_D, u_I, u_O$ 字母小写, 下标大写, 表示电压和电流的总瞬时值

$u_e, i_e, u_b, i_b, u_c, i_c, u_d, i_d$ 字母小写, 下标小写, 表示电压和电流的交流分量

$\dot{U}_e, \dot{I}_e, \dot{U}_b, \dot{I}_b, \dot{U}_c, \dot{I}_c, \dot{U}_d, \dot{I}_d, \dot{U}_i, \dot{U}_o$ 表示交流电压和交流电流有效值的相量

二、基本符号

| 符号 | 含义 | 符号 | 含义 |
|----------|------------------|------------|--------------------|
| A | 运放器件, 放大倍数, 电流单位 | f | 频率 |
| A_f | 反馈放大器的闭环增益 | f_H | 上限频率 |
| A_i | 放大器的电流增益 | f_L | 下限频率 |
| A_p | 放大器的功率增益 | f_o | 谐振频率, 中心或转折频率 |
| A_u | 放大器的有载电压增益 | f_T, f_n | 特征频率 |
| A_{uc} | 放大器的共模电压增益 | G | 增益, 电导 |
| A_{ud} | 放大器的差模电压增益 | g | FET 的栅极 |
| A_{uf} | 反馈放大器的电压增益 | g_m | 跨导 |
| A_{um} | 放大器的中频电压增益 | I, i | 电流 |
| A_{uo} | 放大器的开环电压增益 | I_{CBO} | e 开路, c-b 间的反向饱和电流 |
| A_{us} | 放大器的源电压增益 | I_{CEO} | b 开路, c-e 间的穿透电流 |
| A(s) | 增益函数拉普拉斯变换 | I_{CM} | BJT 最大集电极电流 |
| BJT | 双极型三极管 | I_{DSS} | FET 的饱和漏电流 |
| BW | 频带宽度、通频带 | I_F | 正向电流 |
| b | BJT 的基极 | I_R | 反向电流 |
| C | 电容 | I_S | 反向饱和电流, 信号源电流 |
| C_B | 势垒电容 | I_i | 输入电流 |
| C_D | 扩散电容 | I_o | 输出电流 |
| C_j | PN 结电容 | i_+, i_- | 运放同相、反相输入电流 |
| C_π | BJT 发射结电容 | J_e, J_c | BJT 的发射结和集电结 |
| C_μ | BJT 集电结电容 | K_{CMR} | 差放电路的共模抑制比 |
| c | BJT 的集电极 | k | 玻尔兹曼常数 |
| d | FET 的漏极 | L | 电感、电感系数 |
| e | BJT 的发射极 | M | 互感、互感系数 |
| F | 反馈系数 | N | 绕组匝数 |
| FET | 场效应三极管 | n, n_i | 电子浓度、本征半导体电子浓度 |

(续)

| 符号 | 含义 | 符号 | 含义 |
|------------|----------------|------------------|-----------------|
| P | 功率 | U_P | FET的夹断电压 |
| P_c | 损耗功率 | U_T | FET的开启电压 |
| P_{cM} | 集电极最大允许功耗 | U_{th} | 死区电压, 阈值电压 |
| P_o | 输出功率 | U, u | 电压 |
| P_{Vcc} | 电源功率 | $U_{(BR)CEO}$ | b开路时c-e间的反向击穿电压 |
| p, p_i | 空穴浓度、本征半导体空穴浓度 | u_{ic}, u_{id} | 共模、差模输入电压 |
| Q | 静态工作点, 品质因数 | u_x, u_y | 模拟乘法器X、Y端输入电压 |
| q | 电子的电荷量 | u_+, u_- | 运放同相、反相输入电压 |
| R | 电阻 | VD | 二极管 |
| R_i | 放大电路交流输入电阻 | VT | BJT或FET |
| R_o | 放大电路交流输出电阻 | V_{BB} | BJT放大器的基极电源 |
| R_P | 滑动变阻器 | V_{CC} | BJT放大器的集电极电源 |
| $r_{bb'}$ | BJT基区体电阻 | V_{EE} | BJT放大器的发射极电源 |
| r_{be} | BJT的输入电阻 | V_{DD} | FET放大器的漏极电源 |
| r_{ce} | BJT的输出电阻 | V_{GG} | FET放大器的栅极电源 |
| r_{ds} | FET的输出电阻 | V_{SS} | FET放大器的源极电源 |
| S | 输出电压的脉动系数 | X | 电抗, 反馈框图中的信号量 |
| s | FET的源极, 西门子 | Z | 阻抗 |
| T | 周期, 热力学温度 | α | 共基极电流放大倍数 |
| T_r | 变压器 | β | 共发射极电流放大倍数 |
| U_D | 二极管导通压降 | η | 效率 |
| U_i, u_i | 输入电压 | φ | 相位差 |
| U_R | 参考电压, 基准电压 | ω | 角频率 |

目 录

第 1 章 半导体二极管及其基本电路

| | | | |
|-----------------------------|---|-------------------------|----|
| 1.1 半导体的基础知识 | 1 | 1.3.1 分析方法 | 9 |
| 1.1.1 半导体的概念、类型及特性 | 1 | 1.3.2 二极管的基本应用电路 | 10 |
| 1.1.2 PN 结 | 4 | 1.4 特殊二极管 | 12 |
| 1.2 半导体二极管 | 6 | 1.4.1 稳压二极管及其稳压电路 | 12 |
| 1.2.1 二极管的组成及其结构特点 | 6 | 1.4.2 其它类型二极管简介 | 14 |
| 1.2.2 二极管的伏安特性及其主要参数 | 7 | 本章小结 | 14 |
| 1.3 半导体二极管电路的分析方法及其应用 | 9 | 自测题 | 16 |
| | | 习题与思考题 | 17 |

第 2 章 双极型三极管及其基本放大电路

| | | | |
|-----------------------------|----|----------------------------|----|
| 2.1 双极型晶体三极管(BJT) | 19 | 2.3.2 放大电路的等效电路法 | 37 |
| 2.1.1 双极型三极管的结构、类型及特点 | 19 | 2.4 三种组态的 BJT 基本放大电路 | 39 |
| 2.1.2 双极型三极管的工作原理 | 20 | 2.4.1 分压式稳定工作点共射放大电路 | 39 |
| 2.1.3 双极型共射电路的特性曲线 | 22 | 2.4.2 共集电极基本放大电路 | 43 |
| 2.1.4 PNP 型三极管 | 24 | 2.4.3 共基极基本放大电路 | 45 |
| 2.1.5 双极型三极管的小信号等效模型 | 25 | 2.5 基本放大电路的故障分析 | 46 |
| 2.2 基本共射放大电路的组成及特点 | 28 | 2.5.1 放大电路分析步骤和方法 | 46 |
| 2.2.1 电路组成及其原则 | 28 | 2.5.2 放大电路的故障特征 | 47 |
| 2.2.2 衡量放大电路的主要性能指标 | 29 | 2.5.3 电路故障分析的思路 | 47 |
| 2.2.3 放大电路的特点和分析方法 | 31 | 2.5.4 电路故障分析举例 | 48 |
| 2.3 放大电路的分析方法 | 32 | 本章小结 | 50 |
| 2.3.1 放大电路的图解分析法 | 32 | 自测题 | 51 |
| | | 思考题与习题 | 53 |

第 3 章 场效应管及其基本放大电路

| | | | |
|------------------------------|----|--------------------------|----|
| 3.1 场效应管(FET) | 57 | 3.1.3 P 沟道场效应管 | 63 |
| 3.1.1 结型场效应管(JFET) | 57 | 3.1.4 场效应管的主要参数 | 65 |
| 3.1.2 绝缘栅型场效应管(MOSFET) | 61 | 3.1.5 场效应管的小信号等效模型 | 66 |

| | | | | |
|-------|-----------|----|--------|----|
| 3.2 | 场效应管放大电路 | 67 | 本章小结 | 71 |
| 3.2.1 | 共源极基本放大电路 | 67 | 自测题 | 73 |
| 3.2.2 | 共漏极基本放大电路 | 70 | 思考题与习题 | 74 |

第 4 章 多级放大电路与频率响应

| | | | | | |
|-------|----------------|----|--------|-------------|----|
| 4.1 | 多级放大电路 | 76 | 4.2.1 | 频率响应的基本概念 | 83 |
| 4.1.1 | 多级放大电路中的级间耦合方式 | 76 | 4.2.2 | 基本分析方法 | 84 |
| 4.1.2 | 多级放大电路的分析方法 | 78 | 4.2.3 | 单级放大电路的频率响应 | 86 |
| 4.1.3 | 多级放大电路的分析举例 | 79 | 4.2.4 | 多级放大电路的频率响应 | 93 |
| 4.1.4 | 多级放大电路的故障分析 | 82 | 本章小结 | 94 | |
| 4.2 | 放大电路的频率响应 | 83 | 自测题 | 95 | |
| | | | 思考题与习题 | 96 | |

第 5 章 功率放大电路

| | | | | | |
|-------|---------------|-----|-------|-----------------------|-----|
| 5.1 | 功率放大电路的一般问题 | 100 | 5.4.1 | 负载直接耦合功率放大器 | 109 |
| 5.1.1 | 对功率放大电路的一般要求 | 100 | 5.4.2 | 变压器耦合甲类功率放大器 | 109 |
| 5.1.2 | 功率放大电路的三种工作状态 | 101 | 5.4.3 | 变压器耦合甲乙类推挽功率放大器 | 110 |
| 5.2 | 互补对称功率放大电路 | 101 | 5.5 | 功率放大电路的故障分析 | 111 |
| 5.2.1 | 功率放大电路的设计思想 | 101 | 5.5.1 | 甲乙类互补对称功率放大电路的故障分析 | 111 |
| 5.2.2 | 功率放大电路的分析计算 | 102 | 5.5.2 | 变压器耦合甲乙类推挽功率放大电路的故障分析 | 111 |
| 5.2.3 | 甲乙类互补对称功率放大电路 | 104 | 本章小结 | 111 | |
| 5.2.4 | 复合管和准互补功率放大器 | 107 | 自测题 | 112 | |
| 5.3 | 集成功率放大电路 | 108 | 习题 | 114 | |
| 5.4 | 变压器耦合推挽功率放大器 | 109 | | | |

第 6 章 集成运算放大电路

| | | | | | |
|-------|----------------|-----|-------|-------------------|-----|
| 6.1 | 集成电路的特点及其基本组成 | 116 | 6.3.1 | 差放电路的基本形式与特点 | 120 |
| 6.1.1 | 集成电路的特点 | 116 | 6.3.2 | 长尾式差放电路的演进及其分析计算 | 122 |
| 6.1.2 | 集成运放电路的基本组成 | 117 | 6.3.3 | 恒流源式差放电路的演进及其分析计算 | 127 |
| 6.2 | 集成电路中的电流源电路 | 117 | 6.3.4 | 其它类型的差放电路 | 128 |
| 6.2.1 | 镜像电流源电路 | 117 | 6.4 | 集成运算放大器 | 129 |
| 6.2.2 | 微电流源电路 | 118 | 6.4.1 | 集成运放典型产品简介 | 129 |
| 6.2.3 | 多路电流源电路 | 119 | 6.4.2 | 集成运放的表示符号 | 130 |
| 6.2.4 | 电流源电路的应用——有源负载 | 119 | 6.4.3 | 集成运放的分类及主要技术 | |
| 6.3 | 差动放大电路 | 120 | | | |

| | | | |
|----------------------------|-----|-----------------------|-----|
| 指标 | 131 | 及其分析方法 | 133 |
| 6.5 集成运算放大器的模型及其分析方法 | 132 | 6.5.3 实际集成运放的模型 | 134 |
| 6.5.1 集成运放的电压传输特性 | 132 | 本章小结 | 135 |
| 6.5.2 理想集成运算放大器的参数特征 | | 自测题 | 136 |
| | | 思考题与习题 | 137 |

第 7 章 放大电路中的反馈

| | | | |
|---|-----|--------------------------------|-----|
| 7.1 反馈的基本概念 | 139 | 输出电阻 | 149 |
| 7.1.1 反馈概念的建立 | 139 | 7.3.5 正确引入负反馈的一般原则 | 150 |
| 7.1.2 反馈的极性 | 140 | 7.4 深度负反馈放大电路电压放大倍数的分析 | 151 |
| 7.1.3 反馈的形式 | 141 | 7.4.1 深度负反馈的特点与估算方法 | 151 |
| 7.2 交流负反馈放大电路的四种类型 | 144 | 7.4.2 实例分析 | 152 |
| 7.2.1 反馈取样及其判断 | 144 | 7.5 负反馈放大电路的稳定问题 | 153 |
| 7.2.2 反馈方式及其判断 | 145 | 7.5.1 负反馈放大器自激振荡产生的原因和条件 | 153 |
| 7.2.3 反馈形式的描述方法 | 146 | 7.5.2 负反馈放大器的稳定性和自激振荡的消除 | 154 |
| 7.2.4 反馈电路中 A 、 F 、 A_f 的量纲 | 147 | 本章小结 | 156 |
| 7.3 负反馈对放大电路性能的影响 | 147 | 自测题 | 157 |
| 7.3.1 提高放大倍数的稳定性 | 147 | 思考题与习题 | 158 |
| 7.3.2 扩展频带 | 148 | | |
| 7.3.3 减小非线性失真及抑制干扰和噪声 | 148 | | |
| 7.3.4 改变负反馈放大电路的输入、 | | | |

第 8 章 信号的运算与处理电路

| | | | |
|----------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 8.1 基本运算电路 | 162 | 8.2.1 滤波器的概念、分类及分析方法 | 174 |
| 8.1.1 比例运算电路 | 162 | 8.2.2 有源低通滤波器 | 175 |
| 8.1.2 加减运算电路 | 165 | 8.2.3 有源高通滤波器 | 178 |
| 8.1.3 积分和微分运算电路 | 167 | 8.2.4 带通滤波器和带阻滤波器 | 179 |
| 8.1.4 对数和反对数(指数)运算电路 | 170 | 本章小结 | 180 |
| 8.1.5 乘法运算及其应用 | 171 | 自测题 | 181 |
| 8.2 有源滤波器 | 174 | 思考题与习题 | 182 |

第 9 章 信号发生电路

| | | | |
|-------------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 9.1 正弦波振荡电路的基本概念 | 185 | 9.2 RC 正弦波振荡电路 | 186 |
| 9.1.1 产生正弦波振荡的条件 | 185 | 9.2.1 RC 串并联正弦波振荡电路 | 186 |
| 9.1.2 正弦波振荡器的组成、工作过程和分类 | 186 | 9.2.2 RC 移相式正弦波振荡电路 | 188 |
| | | 9.3 LC 正弦波振荡电路 | 190 |

| | | | | | |
|-------|----------------|-----|--------|------------|-----|
| 9.3.1 | LC 并联谐振回路的频率特性 | 190 | 9.5.1 | 电压比较器 | 200 |
| 9.3.2 | 变压器耦合式 LC 振荡电路 | 191 | 9.5.2 | 方波和矩形波发生器 | 203 |
| 9.3.3 | 三点式 LC 振荡器 | 192 | 9.5.3 | 三角波和锯齿波发生器 | 205 |
| 9.4 | 石英晶体正弦波振荡电路 | 196 | 本章小结 | | 207 |
| 9.4.1 | 石英晶体的特性 | 196 | 自测题 | | 208 |
| 9.4.2 | 石英晶体振荡电路 | 198 | 思考题与习题 | | 209 |
| 9.5 | 非正弦信号发生电路 | 199 | | | |

第 10 章 直流电源

| | | | | | |
|--------|-------------|-----|--------|-----------|-----|
| 10.1 | 直流电源的组成框图 | 214 | 10.3.4 | 倍压整流电路 | 222 |
| 10.2 | 单相整流电路 | 214 | 10.4 | 稳压电路 | 223 |
| 10.2.1 | 衡量整流电路的基本参数 | 214 | 10.4.1 | 并联型稳压电路 | 223 |
| 10.2.2 | 单相半波整流电路 | 215 | 10.4.2 | 串联反馈型稳压电路 | 224 |
| 10.2.3 | 单相全波整流电路 | 216 | 10.4.3 | 集成稳压电路 | 228 |
| 10.2.4 | 单相桥式整流电路 | 217 | 10.4.4 | 开关型稳压电路 | 230 |
| 10.3 | 滤波电路 | 218 | 本章小结 | | 232 |
| 10.3.1 | 电容滤波电路 | 218 | 自测题 | | 232 |
| 10.3.2 | 电感滤波电路 | 221 | 思考题与习题 | | 233 |
| 10.3.3 | π 型滤波电路 | 222 | | | |

第 11 章 实用电子线路及其识图方法

| | | | | | |
|--------|--------------|-----|--------|------------------|-----|
| 11.1 | 电话机单元电路的工作原理 | 236 | 11.3 | 实用电话机整机电路分析和故障检修 | 246 |
| 11.1.1 | 电话机的基本知识 | 236 | 11.3.1 | 电话机整机电路分析 | 246 |
| 11.1.2 | 电话机的振铃电路 | 238 | 11.3.2 | 电话机电路故障检修 | 247 |
| 11.1.3 | 电话机的保护电路 | 239 | 参考文献 | | 250 |
| 11.1.4 | 电话机的拨号电路 | 240 | | | |
| 11.1.5 | 电话机的通话电路 | 242 | | | |
| 11.2 | 电话机整机电路的识图方法 | 245 | | | |

第 1 章 半导体二极管及其基本电路

电子技术是一门研究电子器件及其应用的科学技术，其中电子器件包括半导体二极管、半导体三极管、集成电路等。

PN 结是组成各种半导体器件的基础，由一个 PN 结组成的器件称为半导体二极管。为此，本章首先介绍半导体的基本概念、PN 结的形成及其特性等基础知识；其次讨论二极管的结构、特性及等效电路，并分析由二极管组成的限幅电路等简单电路；最后介绍特殊二极管。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 半导体的概念、类型及特性

一、半导体及其内部结构

1. 半导体是电子技术的主要角色

所有的物质按导电能力强弱可分为导体、绝缘体和半导体。顾名思义，导电能力介于导体和绝缘体之间的一类物质称为半导体(semiconductor)。硅(silicon, Si)和锗(germanium, Ge)是最常见的半导体材料。

半导体之所以得到广泛的应用，是因为它具有独特的光敏、热敏和掺杂特性。用半导体制造的器件有二极管、三极管和集成电路等。

2. 半导体的内部结构

图 1.1.1(a)示出了用得最多的半导体材料——硅和锗的原子结构，它们的最外层轨道上都有 4 个价电子。为了便于表示半导体的内部结构和突出价电子，人们常把原子核和内层电子看作一个整体，称为惯性核，如图(b)所示。图(c)示出了硅和锗的单晶体共价键结构示意图，在晶体中，原子在空间形成排列整齐的点阵，称为晶格。由于半导体材料必须制成单晶体才能用来制作半导体器件，故半导体器件又称为晶体器件，如晶体二极管、晶体三极管等。

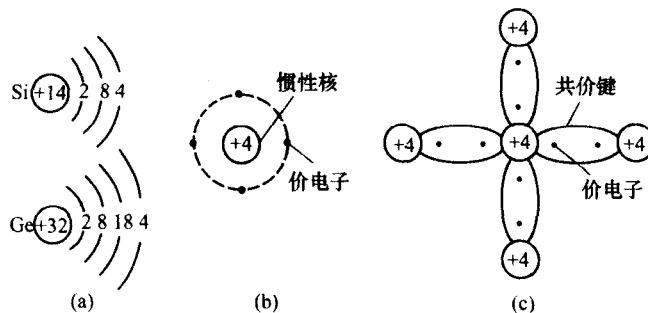


图 1.1.1 半导体内部结构示意图

(a) 原子结构；(b) 简化模型；(c) 单晶体结构。

二、本征半导体及其特性

1. 本征半导体的概念

图 1.1.1(c)所示的这种只含单一原子、不含杂质而且结构完整的单晶体，即纯净的、具有单晶体结构的半导体称为本征(intrinsic)半导体，也称 I 型半导体。

2. 本征半导体的特性

1) 两种载流子

在图 1.1.2(a)中，由于晶体中的共价键具有很强的结合力，因此，在常温下仅有极少数的价电子获得能量(如热或光激发)而挣脱共价键束缚，成为带负电的自由电子；同时失去电子的原子，便在原共价键处留下一个带单位正电荷的空位，叫空穴(hole)，从而形成了电子—空穴对，这一过程称为本征激发(intrinsic excitation)。当相邻共价键上的价电子填补该空穴时(即电子和空穴成对消失——“复合”)，又在邻近原子处留下新的空穴，相当于带正电的空穴在定向移动。带有正、负电荷的可移动的空穴和电子统称为载流子(carrier)。

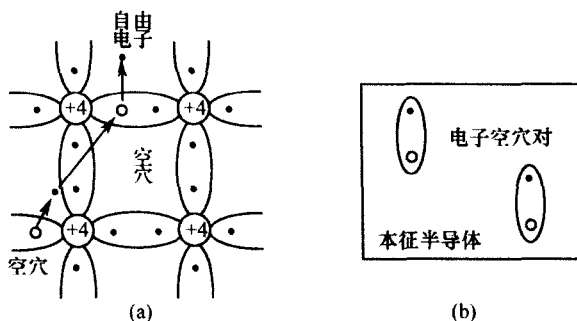


图 1.1.2 本征半导体中的自由电子和空穴

(a) 电子和空穴的移动；(b) 本征激发产生的电子空穴对。

打个通俗的比喻，大家坐在剧场里正在看演出，如果坐在前排的人因事离开便出现了空位，那么坐在后排的人可能依次递补前面的空位，这就出现了空位子向后运动的现象。显然这种运动和没有座位的人到处走动是不一样的，前者类似于空穴运动，后者好像自由电子在运动。

2) 载流子浓度

在一定温度下，上述载流子产生和复合两种运动达到动态平衡时，使电子空穴对浓度达到一定，如图 1.1.2(b)所示，其中电子用“点”表示，空穴用“小圆圈”表示。若用数学表达式表示本征浓度，则

$$n_i = p_i = AT^{3/2} e^{-E_g/2kT}$$

式中， n_i 、 p_i 分别为本征半导体的自由电子(带负电：negative)和空穴(带正电：positive)浓度， A 是比例系数， T 为热力学温度， k 为玻耳兹曼常数， E_g 为电离能。

显然，本征载流子的浓度对温度十分敏感。这正是半导体的热(或光)敏特性。

对于上式，当 $T=0K$ 时，半导体中无载流子，如同绝缘体；当 $T>0K$ 时，开始导电，温度升高，导电能力增强；但在室温时，本征半导体导电能力很差，无法用于制造电子器件，即无实用价值。

三、杂质半导体及其特性

1. 杂质半导体的概念

在本征半导体中掺入微量杂质，使其产生载流子，以增大半导体的导电能力，这样的半导

体称为杂质半导体。它体现了半导体的掺杂特性。

2. 杂质半导体的类型

按所掺的杂质性质不同, 杂质半导体可分为 P 型和 N 型两种。

1) P 型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素, 构成 P 型半导体。

在图 1.1.3(a)中, 由于掺入的微量三价原子只有 3 个价电子, 当每个三价杂质原子与周围的四价本征原子组成共价键时, 因缺少一个价电子而形成空位(空位为电中性)。在常温下, 临近的价电子很容易填补此空位, 这样一方面使晶格上的三价原子获得了电子变为不能移动的带负电的受主离子; 另一方面, 在原来价电子处自然形成一个带正电的空穴, 即掺入的每个三价原子都能引发一个空穴的产生。这样, 杂质引发的空穴和本征激发产生的空穴成为参与导电的多数载流子(简称多子), 故称为 P(Positive)型半导体; 而少数载流子(简称少子)只是本征激发产生的电子, 如图 1.1.3(b)所示。

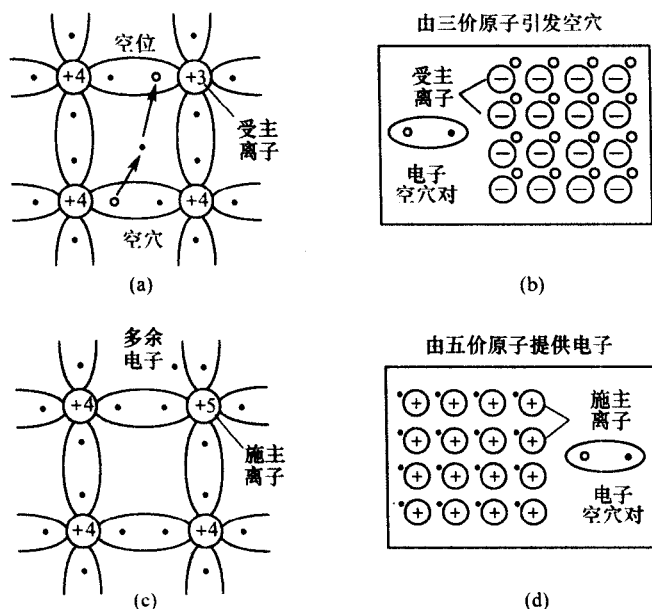


图 1.1.3 杂质半导体的原子结构及其示意图

(a) P 型半导体原子结构; (b) P 型半导体示意图; (c) N 型半导体原子结构; (d) N 型半导体示意图。

2) N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素, 构成 N 型半导体。

在图 1.1.3(c)中, 由于掺入的五价原子有 5 个价电子, 当每个五价杂质原子和周围的四价本征原子组成共价键时便出现了一个多余的不受共价键束缚的电子, 只要有很小的能量就能挣脱五价原子的吸引成为自由电子, 此时晶格上的五价原子会因失去一个价电子而变成不能移动的带正电的施主离子, 而且半导体因掺入杂质原子而增加了额外的自由电子。这样, 杂质和本征激发产生的自由电子成为参与导电的多数载流子, 故称 N(Negative)型半导体。而少数载流子只是本征激发产生的空穴, 如图 1.1.3(d)所示。

3) 杂质半导体的电中性

从图 1.1.3(b)和(d)中看出, 对于 P 型半导体, 空穴数(本征激发产生的+杂质引发的)=自由

电子数 + 负离子数; 对于 N 型半导体, 自由电子数(本征激发产生的+杂质引发的)=空穴数 + 正离子数。可见杂质半导体呈现电中性。

3. 杂质半导体的特性

1) 载流子的浓度

杂质半导体中, 多子浓度决定于杂质浓度, 多子浓度越大, 导电能力越强; 少子由本征激发产生, 其浓度与温度有关。在一定温度下, 多子和少子都要保持它的平衡浓度。其浓度可表示为: $pn = p_i n_i = p_i^2 = n_i^2$ 。

2) 体电阻

通常把杂质半导体的电阻称为体电阻。如集成电路中的电阻是硅片的体电阻。

3) 转型

若在 N 型半导体中掺入比原有的五价杂质更多的三价杂质元素, 可转型为 P 型; P 型半导体中掺入足够的五价杂质元素也可转型为 N 型。

1.1.2 PN 结

通过一定的工艺, 将 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时, 在它们的交界面附近形成 PN 结(junction)。它是构成半导体器件的基础。

一、PN 结的形成

1. 形成过程

为了便于说明 PN 结的形成过程, 不妨将图 1.1.3(b)和(d)直接对接在一起, 如图 1.1.4 所示。

由于 P、N 两区存在明显的载流子浓度差, 这样势必引起 P 区的多子空穴和 N 区的多子电子向对方扩散, 扩散(diffusion)运动的结果使交界面附近的空穴与电子很快复合掉。随着扩散运动的进行, 便在两区的交界面附近逐渐裸露出位于晶格上的不能移动的正离子和负离子, 从而形成了空间电荷区(space charge region), 构成了内电场。在此区内, 多子已扩散到对方区域并复合掉了, 好像消耗尽了一样, 故又称此区为耗尽层; 由于内电场的方向由 N 区指向 P 区, 其作用将阻止多子的扩散, 故有时也将空间电荷区称为阻挡层, 如图 1.1.4 所示。

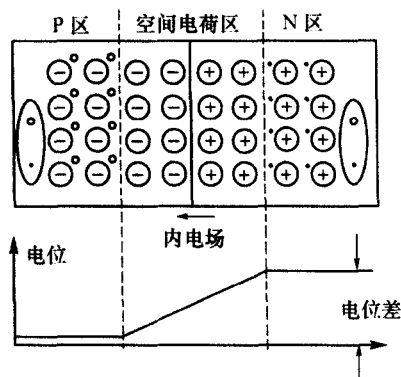


图 1.1.4 平衡 PN 结

随着阻挡层的变宽, 多子扩散的势头也逐渐减弱。同时, 两区的少子(指 P 区的电子和 N 区的空穴)在内电场的作用下也将向对方运动, 人们常将载流子在内电场作用下的定向运动称为漂移(drift)运动。在内电场作用下, N 区的少子空穴将漂移到 P 区并补充了交界面附近原来失去的空穴, 与此同时 P 区的少子电子漂移到 N 区并补充了交界面附近原来失去的电子。显然, 漂移运动将使空间电荷区变窄, 其作用正好与扩散运动相反。

由于空间电荷区的宽、窄分别取决于扩散运动和漂移运动, 因此当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时, 便形成了稳定的空间电荷区, 即平衡 PN 结。此时, 流过 PN 结的总电流为零。

2. PN 结的接触电位差

一般空间电荷区很薄, 如图 1.1.4 所示。PN 结的接触电位差的大小与材料有关, 硅材料

约为0.6V~0.8V, 锗材料约为0.2V~0.3V。

3. PN结的两种类型

根据电荷相等的原则, 若P、N两区掺杂浓度相同, 称为对称结, 可表示为PN, 如图1.1.4所示。

若P、N两区掺杂浓度不同, 称为非对称结。当P区为重掺杂区域, 可表示为P⁺N; 当N区为重掺杂区域, 可表示为PN⁺。

二、PN结的单向导电性

外加电压后的PN结称为非平衡结。

1. 外加正向电压(也称正向偏置, 简称正偏)

如图1.1.5(a)所示。当外加正向电压(P、N两区分别接电源的正、负极)时, 此时外电场与内电场方向相反。在外电场的作用下, P区的多子空穴和N区的多子电子都向空间电荷区移动, 分别与空间电荷区中的一部分负、正离子中和, 使空间电荷量减少, 空间电荷区变窄, PN结呈现一个很小的电阻, 此时多子扩散形成的正向(forward)电流 I_F 较大。

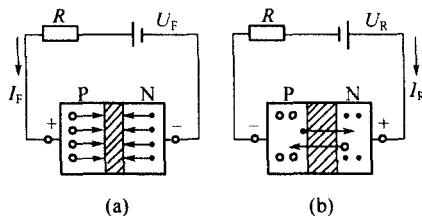


图 1.1.5 非平衡 PN 结

(a) 外加正向电压; (b) 外加反向电压。

2. 外加反向电压(也称反向偏置, 简称反偏)

如图1.1.5(b)所示。当外加反向电压(P、N两区分别接电源的负、正极)时, 外电场与内电场方向一致。在外电场的作用下, P区的多子空穴和N区的多子电子远离空间电荷区, 使空间电荷量增多, 空间电荷区变宽, 这一结果有利于少子的漂移, 此时流过PN结的电流主要由少子的漂移运动形成, 其方向由N区流向P区, 称为反向(reverse)电流 I_R 。当温度不变时, 少子的浓度不变, 因此反向电流 I_R 几乎与反偏无关, 故又称为反向饱和(saturation)电流 I_s 。由于常温下, I_s 很小, 故PN结呈高阻截止状态。

可见, PN结在正偏(forward bias)时呈低阻性, 处于导通状态; 反偏(reverse bias)时虽存在反向电流, 但很小, 呈高阻性, 处于截止状态。这就是PN结的单向导电性。

三、PN结的伏安特性

1. 正、反向特性

据理论分析, PN结的伏安特性方程为: $i = I_s(e^{u/U_T} - 1)$ 。式中 i 为通过PN结的电流, I_s 为PN结的反向饱和电流, u 为PN结两端的外加电压; $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量, 其中 k 为波耳兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$), T 为热力学温度(K), q 为电子的电量($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$), 在常温($T = 300 \text{K}$)时, $U_T \approx 26 \text{mV}$ 。

讨论:

(1) 零偏($u=0$)时, $e^{u/U_T} = 1$, $i=0$, 表明该曲线过图1.1.6中的坐标原点。

(2) 正偏($u > 0$)时, 很容易满足 $u \gg U_T$, 则 $i \approx I_s e^{u/U_T}$ 。说明正向电流随正向电压按指数规律变化(对应于图1.1.6中的a-O曲线段)。

(3) 反偏($u < 0$)时, 同样很容易满足 $|u| \gg U_T$, 则 $e^{u/U_T} \ll 1$, 有 $i \approx -I_s$ 。说明反向电流不随外加电压而变(对应于图1.1.6

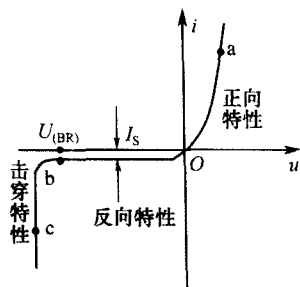


图 1.1.6 PN 结的伏安特性

中的 $O-b$ 曲线段)。

2. 反向击穿特性

当加于 PN 结的反向电压增大到一定数值 U_{BR} 时, 反向电流突然急剧增加, 这种现象称为 PN 结的反向击穿(reverse breakdown)(对应于图 1.1.6 中的 $b-c$ 曲线段)。

击穿按机理可分为两种情况。一是在高掺杂时, 因耗尽层宽度很窄, 不大的反向电压就可在耗尽层形成很强的电场, 以致把结内共价键上的价电子强行拉出来, 产生大量的电子—空穴对, 这种击穿称为齐纳击穿; 二是在低掺杂时, 耗尽层宽度较宽, 因此只有当反向电压较大时, 才会使耗尽层的电场对少子漂移加速, 动能增大以致把共价键内的价电子撞击出来, 并引起连锁反应而产生大量的电子—空穴对, 这种击穿称为雪崩击穿。

可见, 齐纳击穿电压比雪崩击穿电压要低。当然, 无论是哪种击穿, 只要击穿电流不超过额定范围, 就称为电击穿(被人们所利用, 如稳压管), 反之, 称为热击穿(过热而损坏 PN 结, 应避免)。

四、PN 结的温度特性

1. 温度对正向特性的影响

实验证明, 当温度升高时, PN 结正向压降减小, 表现为正向特性曲线向左移动。用数学式表示的电压温度系数为: $\partial U / \partial T = -(2 \sim 2.5) \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ (负温度系数)。

2. 温度对反向特性的影响

实验证明, 在室温下, 温度每升高 10°C , 反向饱和电流约增大一倍, 表现为反向特性曲线向下移动。用数学式可表示为: $I_s(T) = I_s(T_0) \times 2^{(T-T_0)/10^\circ\text{C}}$ 。

因 $T_0=300\text{K}$ 时, 锗管 $I_s(T_0)$ 要比硅管 $I_s(T_0)$ 大 3~6 个数量级, 故集成电路多用硅管。

五、PN 结的电容效应

1. 势垒电容 C_B (barrier capacitance)

由耗尽层引起, 主要在 PN 结反偏时考虑。因 $C_B = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$, d 是 PN 结的宽度, 随电压而变,

所以 C_B 不是常数。这就是变容二极管的基本原理。

2. 扩散电容 C_D (diffusion capacitance)

扩散时由积累电荷引起, 主要在 PN 结正偏时考虑。正偏越大, C_D 越大。

3. PN 结的高频等效电路

PN 结的高频等效电路如图 1.1.7 所示。PN 结总的结电容 $C_j = C_B + C_D$ 。正偏时, r_d 为很小的正偏电阻, 且 $C_D \gg C_B$, 所以 $C_j \approx C_D$ 。反偏时, r_d 为很大的反偏电阻, 且 $C_D \ll C_B$, 所以 $C_j \approx C_B$; 当频率 f 很高时, $X_C \ll r_d$, 此时 PN 结将失去单向导电性。

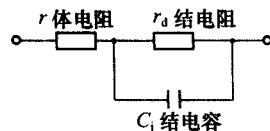


图 1.1.7 PN 结的高频等效电路

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的组成及其结构特点

一、组成

将一个 PN 结加上电极引出线和管壳, 就构成了二极管(diode), 如图 1.2.1 所示。