



教育部高职高专规划教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

电子电路及电子器件

郭培源 主编
沈明山 陈启鼎 副主编

高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



教育部高职高专规划教材

电子电路及电子器件

郭培源 主 编
沈明山 陈启鼎 副主编

高等教育出版社

内容提要

本书是教育部高职高专规划教材,依据教育部最新制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》以及《高职高专教育数字电子技术基础课程教学基本要求》编写而成。

为了充分体现高等职业技术教育以培养应用性工程技术人才为目标的教學特点,本教材在内容编写上,强化基础知识,精选内容,理论知识以“必需、够用”为度,突出基本概念。为了体现以工程应用为目的的教学,重点介绍了最新的实用电子电路以及新型电子器件及应用,在教材内容编排上做到互相衔接以有利于教学。

全书共分13章,内容包括:半导体器件基础、放大电路基础及应用、模拟集成放大器及其应用、数字电子电路基础、组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、大规模集成数字电路、信号处理电路、振荡电路、高性能集成电路及其应用、模数和数模转换电路、直流稳压电源、电子电路仿真技术应用。

为了突出高等职业教育以应用为主的特点,本教材与廖先芸主编的《电子技术实践与训练》一书配套,以强化培养学生的技术应用能力。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校电子、信息、电气及机电一体化等专业课程的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路及电子器件/郭培源主编. —北京:高等教育出版社,2000
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-04-008733-2

I. 电… II. 郭… III. ①电子电路-高等学校;技术学校-教材②电子器件-高等学校;技术学校-教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 28993 号

电子电路及电子器件
郭培源 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 北京地质印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2000 年 8 月第 1 版

印 张 33.5

印 次 2000 年 8 月第 1 次印刷

字 数 810 000

定 价 27.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

前 言

本书是教育部高职高专规划教材,依据教育部最新制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》以及《高职高专教育数字电子技术基础课程教学基本要求》编写而成。

高等职业教育是现代高等教育体系中的一个重要组成部分,它的任务是培养具有高尚职业道德、适应生产、建设第一线需要的高等技术应用性专门人才;为了充分体现高等职业教育的特点,本书力求反映近年来电子技术的发展和符合高等职业技术教育的教学规律和学生认识规律。本书的特点是:

1. 基础理论知识的讲授以应用为目的,精选内容,以“必需、够用”为度,深入浅出,讲清原理,突出基本概念,理论证明和公式推导从简。

2. 以器件为核心,强调“管路结合、管为路用”原则。将分立元器件及集成器件和电路紧密结合起来讲授,注意介绍了最新实用电子电路以体现实用性。

3. 电子技术的核心是器件,电子技术是随着器件的发展而发展的,注意介绍了新型电子器件和高性能集成电子器件及应用电路以体现先进性。

4. 在教材结构、风格上,将学科体系分类的模拟、数字电子技术两部分合并编写,两部分的基础理论知识内容大体独立,少数内容相互交叉渗透。前7章是构成电子技术知识的基础,后6章不分模拟、数字电子技术界限,着眼于某类电子电路的功能及应用。在教材内容编排上做到相互衔接、配合、和谐、统一,以有利于教学,从而体现出适用性。

5. 例题、习题、思考题尽量结合工程实际,突出应用性,强调启发性。

6. 为了突出高等职业教育以应用为主的特点,本教材与廖先芸主编的《电子技术实践与训练》一书配套,以强化培养学生的技术应用能力。

全书共13章,完成本书教学需96学时。考虑不同专业教学要求和学时数各异,若学时数较少,可只讲授1~7章,若学时数较多或要求较高,可全部讲授。

本书承黄寒华副教授主审,他为本书的编写提出了许多宝贵意见。北京联合大学领导对本书的编写给予了鼓励、支持和指导,在此谨致衷心感谢。

参加本书编写工作的有郭培源(前言、第1章、第2章、第3章、第9章、第10章、第13章、附录),沈明山(第2章、第4章、第6章、附录),陈启鼎(第5章、第6章、第11章),李艳梅(第8章),邱中梅(第7章),杜志仁(第13章),王传新(第12章),邹尔宁(第1章~第6章思考题和习题)。郭培源任主编,负责全书的组织与定稿和审阅,沈明山、陈启鼎负责本教材的审阅工作。

由于编者水平有限且成书仓促,定有疏漏、欠妥和错误之处,恳请读者指正。

编者

2000年3月

目 录

第 1 章 半导体器件基础	1	2.3.1 多级放大电路的耦合方式	54
1.1 PN 结	1	2.3.2 多级放大电路的动态分析	55
1.1.1 本征半导体的导电特性	1	2.3.3 阻容耦合放大电路的频率特性	56
1.1.2 杂质半导体的导电特性	2	2.4 差分放大电路	58
1.1.3 PN 结及其单向导电性	3	2.4.1 直接耦合方式及其存在的问题	58
1.2 半导体二极管	4	2.4.2 差分放大电路	59
1.2.1 半导体二极管的结构和特性	4	2.5 互补对称功率放大电路	73
1.2.2 半导体二极管的主要参数	5	2.5.1 功率放大的概念	73
1.2.3 半导体二极管的应用	6	2.5.2 互补对称功率放大电路	75
1.2.4 特殊二极管	10	2.5.3 集成功率放大器	84
1.3 半导体三极管	15	2.6 放大电路的应用	86
1.3.1 半导体三极管的结构和分类	15	2.6.1 低频集成功率放大器的应用	86
1.3.2 半导体三极管电流放大原理	16	2.6.2 放大电路在伺服控制中的应用	92
1.3.3 半导体三极管的共射特性曲线	17	本章小结	94
1.3.4 半导体三极管的主要参数	19	思考题和习题	95
1.3.5 温度对三极管参数的影响	21	第 3 章 模拟集成放大器及其应用	105
1.4 场效应管	21	3.1 集成放大器基础	105
1.4.1 结型场效应管	21	3.1.1 集成放大器概述	105
1.4.2 绝缘栅场效应管	25	3.1.2 集成放大器的结构、电路、分类及 主要参数	106
1.4.3 场效应管的主要参数	29	3.1.3 理想集成放大器及其分析重点	108
1.4.4 场效应管与半导体三极管特点比较及 使用注意事项	30	3.2 负反馈放大器	110
本章小结	30	3.2.1 反馈的基本概念	110
思考题和习题	31	3.2.2 负反馈的分析方法	113
第 2 章 放大电路基础及应用	38	3.2.3 负反馈放大器的四种组态	114
2.1 放大电路的基本概念	38	3.2.4 负反馈对放大器性能的影响	117
2.1.1 放大的概念	38	3.2.5 集成放大器组成的三种基本实用 放大器	121
2.1.2 放大电路的主要性能指标	39	3.3 集成放大器的线性应用	124
2.2 基本放大电路的工作原理	40	3.3.1 集成放大器在模拟运算中的应用	124
2.2.1 基本共射放大电路的组成及各元件 的作用	40	3.3.2 集成放大器在信号测量方面的应用	129
2.2.2 放大电路的基本分析方法	41	3.4 集成放大器的应用技术	135
2.2.3 工作点稳定的放大电路分析	48	本章小结	136
2.2.4 基本共集放大电路	50	思考题和习题	136
2.2.5 场效应管放大电路	52	第 4 章 数字电子电路基础	144
2.3 多级放大电路	54		

4.1 数字电路的特点	144	6.1.7 触发器的合理选用	286
4.1.1 模拟信号与数字信号	144	6.2 时序逻辑电路	287
4.1.2 数字电路的特点	146	6.2.1 概述	287
4.2 数制和码制	146	6.2.2 同步时序逻辑电路的分析	288
4.2.1 常用计数制及其相互转换	147	6.2.3 计数器	293
4.2.2 二—十进制编码	150	6.2.4 集成计数器及应用	295
4.3 逻辑代数基础	151	6.2.5 寄存器及其应用	310
4.3.1 逻辑代数中的三种基本逻辑运算及 常见的复合逻辑运算	152	6.2.6 同步时序逻辑电路的设计	319
4.3.2 逻辑代数中的基本公式和定理	157	本章小结	324
4.3.3 逻辑函数及其表示方法	159	思考题和习题	325
4.3.4 逻辑函数的化简方法	163	第7章 大规模集成数字电路	332
4.4 逻辑门电路	176	7.1 半导体存储器	332
4.4.1 分立元件门电路	176	7.1.1 概述	332
4.4.2 TTL集成门电路	181	7.1.2 ROM的结构及工作原理	333
4.4.3 CMOS集成门电路	197	7.1.3 ROM的应用	337
本章小结	213	7.1.4 RAM的结构及工作原理	340
思考题和习题	213	7.1.5 RAM的应用	342
第5章 组合逻辑电路	222	7.2 可编程逻辑器件 PLD	345
5.1 组合逻辑电路的分析	222	7.2.1 概述	345
5.1.1 组合逻辑电路的特点	222	7.2.2 PLD的基本结构及逻辑表示方法	346
5.1.2 组合逻辑电路的分析	223	7.2.3 PAL的结构、工作原理与应用	347
5.2 组合逻辑电路的设计	225	7.2.4 其他 PLD 器件简介	354
5.3 常用集成组合逻辑器件及应用	228	7.2.5 PLD的设计及应用举例	355
5.3.1 编码器	228	本章小结	360
5.3.2 译码器	235	思考题和习题	361
5.3.3 数据选择器	246	第8章 信号处理电路	362
5.3.4 数据分配器	252	8.1 有源滤波电路	362
5.3.5 加法器	254	8.1.1 无源滤波电路和有源滤波电路 的比较	362
5.3.6 数值比较器	259	8.1.2 低通有源滤波电路	363
5.3.7 组合逻辑电路中的竞争冒险	262	8.1.3 高通有源滤波电路	367
本章小结	263	8.1.4 带通有源滤波电路	368
思考题和习题	263	8.1.5 带阻有源滤波电路	370
第6章 触发器和时序逻辑电路	266	8.1.6 开关电容滤波电路	372
6.1 触发器	266	8.2 电压比较器	377
6.1.1 概述	266	8.2.1 简单电压比较器	377
6.1.2 基本 RS 触发器	267	8.2.2 滞回电压比较器	379
6.1.3 钟控 RS 触发器	271	8.2.3 窗口电压比较器	382
6.1.4 主从触发器	275	8.2.4 集成电压比较器	383
6.1.5 边沿触发器	279	本章小结	389
6.1.6 触发器的逻辑功能分类及功能转换			

思考题和习题	390	11.2.3 集成 D/A 转换器	452
第 9 章 振荡电路	393	11.2.4 D/A 转换器应用举例	457
9.1 振荡电路的作用及分类	393	11.3 A/D 转换器	458
9.2 正弦波振荡电路基本原理	395	11.3.1 A/D 转换器的组成及基本原理	458
9.2.1 RC 型正弦波振荡器	397	11.3.2 逐次比较型 A/D 转换器	460
9.2.2 LC 型正弦波振荡器	400	11.3.3 双积分型 A/D 转换器	463
9.2.3 石英晶体振荡器	402	11.3.4 A/D 转换器的主要技术指标	467
9.2.4 负阻型 LC 正弦波振荡器	404	11.3.5 A/D 转换器应用举例	468
9.3 非正弦波振荡电路基本原理	405	本章小结	470
9.3.1 矩形波发生器	405	思考题和习题	470
9.3.2 三角波和锯齿波发生器	408	第 12 章 直流稳压电源	472
9.3.3 阶梯波发生器	410	12.1 整流和滤波电路	472
9.4 集成波形发生器	411	12.1.1 单相整流电路	472
9.4.1 集成函数发生器 5G8038 及其应用	411	12.1.2 滤波电路	474
9.4.2 集成压控振荡器	413	12.2 稳压管稳压电路	476
9.4.3 555 集成定时电路组成的波形 发生器	414	12.2.1 稳压电路的指标	476
本章小结	419	12.2.2 稳压管稳压电路	476
思考题和习题	419	12.3 线性稳压电路	478
第 10 章 高性能集成电路及其应用	423	12.3.1 线性稳压电路概述	478
10.1 集成模拟乘法器	423	12.3.2 串联型线性稳压电路的组成及 工作原理	479
10.1.1 模拟乘法器的基本概念	423	12.3.3 集成线性稳压器	480
10.1.2 模拟乘法器的应用	425	12.4 开关稳压电路	483
10.1.3 集成模拟乘法器 BG314 简介	434	12.4.1 开关稳压电路概述	483
10.2 集成锁相环路	435	12.4.2 开关稳压电路的工作原理	484
10.2.1 基本锁相环工作原理	435	12.4.3 集成开关稳压器	486
10.2.2 锁相环的特点及应用范围	436	本章小结	488
10.2.3 锁相环的应用	437	思考题和习题	489
10.2.4 集成锁相环 CD4046 简介	438	第 13 章 电子电路仿真技术应用	492
10.3 集成模拟开关	439	13.1 电子电路仿真技术概述	492
10.3.1 常用四种集成模拟开关及其应用	440	13.2 电子电路仿真实例分析	492
10.3.2 集成多路模拟开关及其应用	441	本章小结	503
10.4 集成定时电路及其应用	445	附 录	504
本章小结	446	附录 1 半导体器件型号命名方法	504
思考题和习题	447	附录 2 常用半导体器件的参数	505
第 11 章 数模和模数转换电路	449	附录 3 集成运放命名法及主要参数	510
11.1 概述	449	附录 4 部分集成器件性能参数	513
11.2 D/A 转换器	450	附录 5 新旧图形符号对照表	519
11.2.1 D/A 转换器的基本原理	450	附录 6 常用逻辑符号对照表	521
11.2.2 D/A 转换器的主要技术指标	451	参考文献	523

第 1 章

半导体器件基础

内容提要:本章首先介绍半导体的导电特性、PN 结的形成及其单向导电特性,然后介绍在电子技术领域中广泛应用的半导体二极管、三极管和场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 PN 结

1.1.1 本征半导体的导电特性

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫做半导体。自然界中物质如硅(Si)、锗(Ge)都是半导体,硅和锗都是四价元素,原子核最外层有 4 个价电子。

纯净不掺杂质的半导体称为本征半导体。以硅晶体为例,它们的原子排列很有规律,并且每两个相邻原子共有一对价电子,这样的组合叫做共价键结构,如图 1-1 所示。

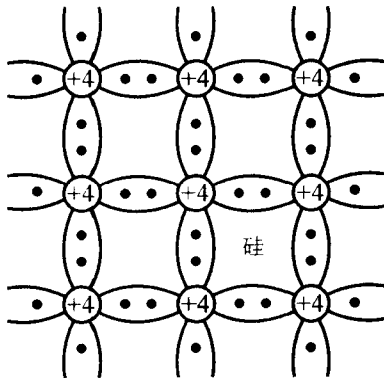


图 1-1 硅晶体的共价键结构

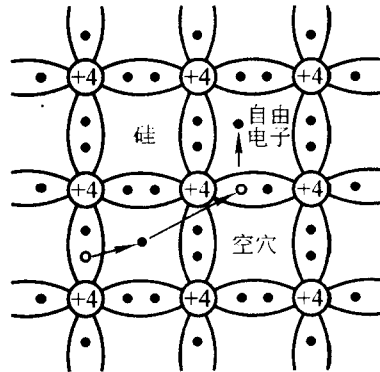


图 1-2 本征半导体中电子空穴对

共价键中的价电子受相邻两个原子核的制约,如果没有足够的能量就无法挣脱共价键的束缚。因此,在热力学零度($-273.16\text{ }^{\circ}\text{C}$),本征半导体无自由电子,与绝缘体一样不导电。在光照或其他能量激发下,将有少数价电子获得足够的能量,挣脱共价键束缚,跳到键外,成为自由电子。这里应该注意,当价电子挣脱共价键成为自由电子后,在共价键中就留下一个空位,此空位

被称为“空穴”，有了这样一个空位，在外电场或其他能量激发下，邻近的价电子就会填补到这个空位上，这个电子原来的位置又留下新的空位，然后，其他价电子又会移至这个新的空位上，其效果如同带正电荷的空位(空穴)在移动，这种运动称做空穴运动，如图 1-2 所示。

当半导体加上电压时，其电流由两部分组成，一是自由电子定向运动形成的电流；二是价电子递补空位形成的电流，其方向与自由电子电流相反，它们总是同时出现的，这是半导体的重要特征。

由于热运动，使本征半导体不断产生自由电子，同时也出现相同数量的空穴，另一方面，自由电子在运动中又会与空穴重新结合(称为复合)，这是一种相反过程，在一定温度下，电子-空穴既产生又复合，达到相对的动态平衡。

1.1.2 杂质半导体的导电特性

本征半导体的导电能力仍然很低，如果掺入微量的杂质(某种元素)，导电性能就会发生明显变化。根据掺入杂质的不同，杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的五价元素磷 P，硅晶体中某些位置的原子被磷原子代替，由于多余的一个价电子不受共价键束缚，只要获得很少能量，这个多余电子就能挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子。通常，几乎所有多余电子都能成为自由电子，如图 1-3 所示。

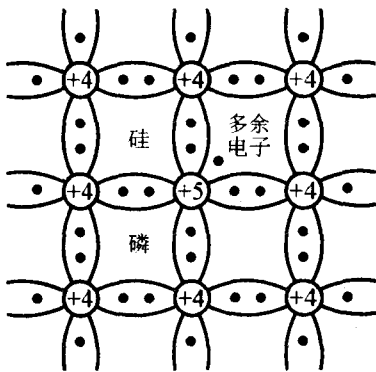


图 1-3 N 型半导体

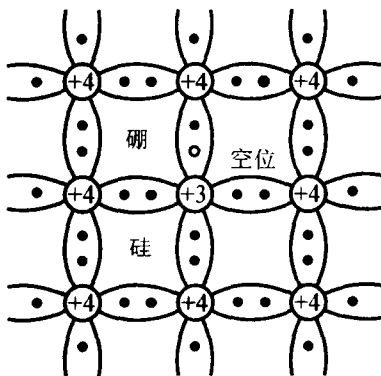


图 1-4 P 型半导体

上述杂质半导体，除了杂质给出的多余自由电子外，原晶体本身也产生少量的电子-空穴对。这种杂质半导体中，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”。这种杂质半导体叫做 N 型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的三价元素硼 B，硅晶体中某些位置的原子被硼原子代替，但缺少了一个价电子而产生一个空穴，这样每个杂质原子都会提供一个空穴，从而使空穴载流子的数目显著增加成为多子，自由电子因浓度降低而成为少子。这种杂质半导体叫做 P 型半导体，如图 1-4 所示。

所以，杂质半导体中，多子与掺杂量有关，与温度无关，而少子是由于热运动所产生的，与温

度有着密切关系。

1.1.3 PN 结及其单向导电性

如果在一块本征半导体上,通过掺杂使一侧形成 N 型半导体,另一侧形成 P 型半导体,则在两种半导体交界面上形成一个薄层(空间电荷区),叫做 PN 结,如图 1-5 所示。PN 结是构成各种半导体器件的基础,二极管、三极管分别由一个、两个 PN 结组成,了解 PN 结的性质对掌握半导体器件的原理是非常重要的。

1. PN 结的形成

P 型半导体和 N 型半导体结合在一起,在交界处,由于电子与空穴数量不同而产生浓度差。这样,引起载流子从浓度高的区域向浓度低的区域扩散现象。扩散到 P 区的电子与空穴复合,扩散到 N 区的空穴与电子复合,随着扩散的进行,在交界面附近的 P 型区中空穴大量减少,出现了带负电的离子区;而在 N 型区一侧因缺少电子,显露出带正电的离子区。这些离子虽然带电,但不能移动,它们形成了一个由 N 区指向 P 区的电场(内电场),这个电场空间区称为 PN 结,由于在空间电荷区载流子消耗尽了,又叫做耗尽层。

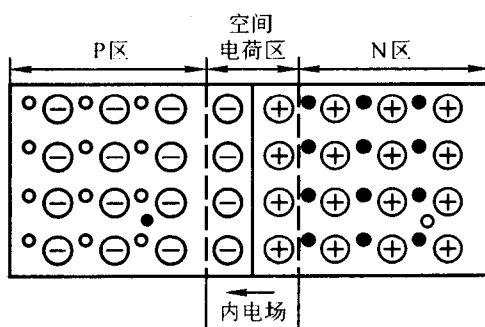


图 1-5 PN 结的形成

内电场对多子的扩散不利,却有利于少子向对方区域运动。载流子在电场作用下的定向运动叫做漂移运动。在内电场作用下,从 N 区漂移到 P 区的空穴,填补了 P 区失去的空穴,从 P 区漂移到 N 区的电子,填补了 N 区失去的电子,从而使空间电荷减少,内电场削弱,这又有利于多子的扩散而不利于少子的漂移。

因为多数载流子扩散与少数载流子漂移在动态平衡时,大小相等、方向相反,相互抵消,外部宏观不显示电流现象。即没有外加电场或其他能量激发作用下,PN 结没有电流通过。

2. PN 结的单向导电性

PN 结在外加电压作用下,呈现什么特性呢?通过实验不难回答这个问题。

外加正向电压 外加正向电压是将 P 型区与电源正极相连,N 型区经电阻与电源负极相连,这种接法也称正向偏置(简称正偏),如图 1-6 所示。此时,内电场因与外电场方向相反而受到削弱,这有利于多子的扩散而不利于少子的漂移。多子的扩散通过外电路形成正向电流 I_F 。因此,加上不大的正向电压,就会产生相当大的电流。为避免烧坏,在电路中串入电阻 R 限流。

外加反向电压 外加反向电压是将 P 型区与电源负极相连,N 型区经电阻 R 与电源正极相连,这种接法也称反向偏置(简称反偏),如图 1-7 所示。此时,内电场因与外电场方向相同而得到加强,这有利于少子的漂移而不利于多子的扩散。少子的漂移形成反向电流 I_R 。由于少数载流子数量有限,因此,反向电流不仅很小,而且基本上不随外加电压变化,故反向电流又叫做反向饱和电流。

由此可知,PN 结正向偏置时,正向电阻很小,形成较大的正向电流;PN 结反向偏置时,呈现较大的反向电阻,反向电流很小,这就是 PN 结的单向导电性。

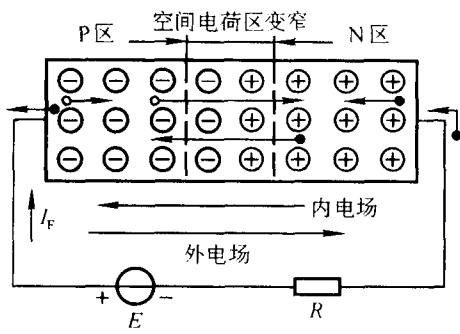


图 1-6 外加正向电压 PN 结导通

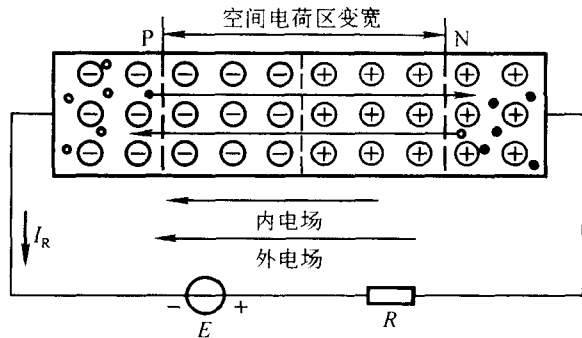


图 1-7 外加反向电压 PN 结截止

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管的结构和特性

1. 二极管的结构

把一个 PN 结的两端接上电极引线,外面用金属(或玻璃、塑料)管壳封闭起来,便构成二极管。其结构示意图和图形符号如图 1-8 所示。

二极管按制造材料可分为硅二极管、锗二极管;按用途可分为整流二极管、稳压二极管、开关二极管和检波二极管等;按结构又可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管是用一根很细的金属触丝和一块 N 型半导体接触在一起,然后在金属丝与半导体之间通过瞬时的大电流,使接触处产生大量的热量,把金属丝中微量金属原子扩散到 N 型半导体中形成一个 PN 结,其结构示意图如图 1-9 所示。

点接触型二极管 PN 结结面积小,不允许通过较大的电流,高频特性好。因此,适用于小电流整流、高频检波、混频电路中。

面接触型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法制成的,PN 结面积较大,故允许通过较大的电流,适用于低频整流等电路中。

2. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性如图 1-10 所示。它是二极管两端电压 U 和通过管子的电流 I 之间的关系曲线。

(1) 正向特性

当正向电压小于某一数值 U_{th} ,由于外电场还不足以克服内电场,扩散运动难以进行,正向电流很小,几乎为零,二极管呈现较大电阻,这段区域称“死区”。 U_{th} 叫做门槛电压或死区电压。

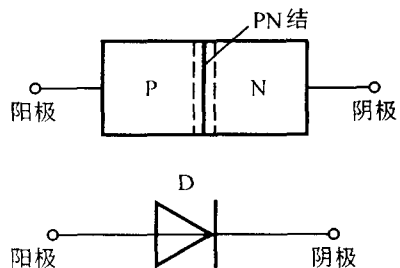
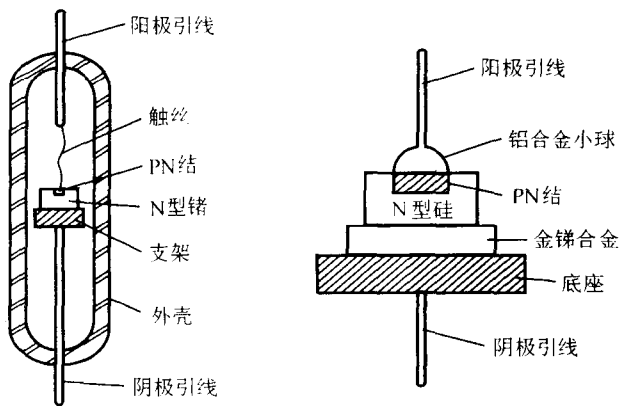


图 1-8 二极管的结构示意图和图形符号

硅管 $U_{th} = 0.5 \text{ V}$, 锗管 $U_{th} = 0.1 \text{ V}$ 。当正向电压超过 U_{th} 后, 内电场大大削弱, 有利于多子扩散, 正向电阻较小, 正向电流按指数曲线规律增长, 二极管处于导通状态。硅管的导通压降为 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$, 锗管的导通压降为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。



(a) 点接触型 (b) 面接触型
图 1-9 半导体二极管结构

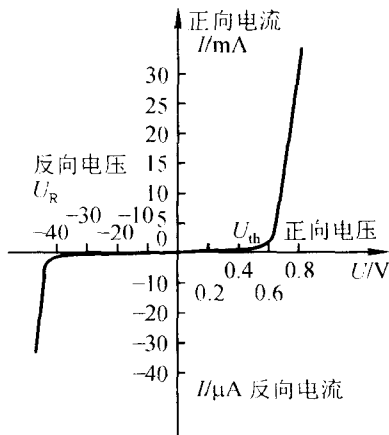


图 1-10 二极管伏安特性

(2) 反向特性

当二极管两端加反向电压时, 内电场加强, 阻碍扩散而有利于漂移, 由于漂移过程少数子数量有限, 形成很小的反向饱和电流 I_S , 硅管 I_S 为 nA 数量级, 锗管为 μA 数量级。

(3) 反向击穿特性

当反向电压的数值增加到 U_R 时, 反向电流将急剧增大, 这种现象叫反向击穿。 U_R 叫反向击穿电压。使用二极管时, 应避免反向电压超过击穿电压, 以防损坏二极管。

(4) 二极管伏安方程

二极管的端电压与其电流用方程表示的关系称伏安方程, 可表示为

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

式中 I_S 为反向饱和电流, $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量, 其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电量。在常温 (300 K) 时, $U_T = 26 \text{ mV}$ 。

由伏安方程可知, 正向偏置时, 只要 $U \gg U_T$, 则

$$I \approx I_S e^{U/U_T} \quad (1-2)$$

即二极管电流随正向电压按指数上升规律变化。反向偏置时, 只要 $|U| \gg U_T$, 有 $e^{U/U_T} \approx 0$, 则

$$I \approx -I_S \quad (1-3)$$

即二极管反向电流为一常数, 不随电压而变, 此即反向饱和电流。

1.2.2 半导体二极管的主要参数

除伏安特性外, 二极管的性能还可用一些数据来表示, 主要参数有:

1. 最大整流电流 I_F

它是指二极管长期运行时,允许通过的最大正向平均电流。实际使用时的的工作电流应小于 I_F ,如果超过此值,将引起 PN 结过热而烧坏。

2. 反向电流 I_R

它是指二极管承受反向工作电压而未被反向击穿时反向电流值。它的值愈小,表明管子的单向导电特性愈好。

3. 最高反向工作电压 U_{RM}

它是指二极管工作时两端所允许加的最大反向电压。通常 U_{RM} 约为反向击穿电压 U_R 的一半,以保证管子安全工作,防止击穿。

4. 最高工作频率 f_M

PN 结具有电容效应,它的存在限制了二极管工作频率。如果通过管子的信号频率超过管子的 f_M ,则结电容的容抗变小,高频电流将直接从结电容通过,管子的单向导电性变差。

1.2.3 半导体二极管的应用

利用二极管的单向导电性,可以组成整流、限幅、钳位,检波及续流等应用电路。

1. 单相半波整流电路

将交流电变成脉动直流电的过程叫做整流。图 1-11 所示为单相半波整流电路,Tr 为电源变压器,二极管 D 与负载电阻 R_L 串联后接变压器副边绕组。

在交流电压 u_2 的正半周,二极管 D 上作用着正向电压,二极管导通,忽略二极管电压降,则负载 R_L 上的电压 u_0 与交流电压 u_2 的正半周相等。

在交流电压 u_2 的负半周,二极管 D 上作用着反向电压,二极管不导通,电路中没有电流,负载 R_L 上没有电压,交流电压 u_2 的负半周全部作用在二极管上。

电路中电压和电流的波形如图 1-12 所示。

可见,变压器副边的正弦交流电压就变换成了负载两端的单向脉动直流电压,达到了整流的目。由于这种电路在交流电的半周内才有电流流过负载,所以叫做单相半波整流电路。

单相半波整流电路特点是电路结构简单,缺点是输出电压的脉动大,变压器的利用率低。

2. 单相全波整流电路

为了克服单相半波整流的不足,出现了单相全波整流电路,如图 1-13 所示。

在 u_2 的正半周, D_1 导通, D_2 承受反向电压而截止;在 u_2 的负半周, D_2 导通, D_1 承受反向电压而截止。即一个周期内两个二极管轮流导通,从而正、负半周具有同一方向的电流流过负载 R_L ,故叫全波整流电路,其电流、电压波形如图 1-14 所示。

单相全波整流输出电压平均值大,脉动较小。但是变压器结构较复杂,利用率不高,进一步改进电路见第 12 章。

3. 半导体二极管限幅电路

限制输出信号幅度的电路叫限幅电路。当输入信号幅度变化较大时,为了使信号幅度能够限制在一定范围内,可将输入信号接入限幅电路。图 1-15 所示为限幅电路。为分析方便起见,

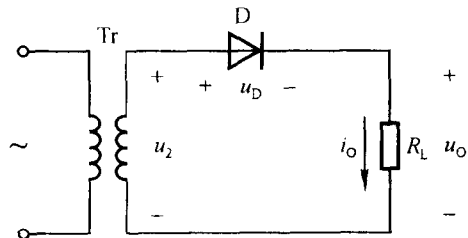


图 1-11 单相半波整流电路

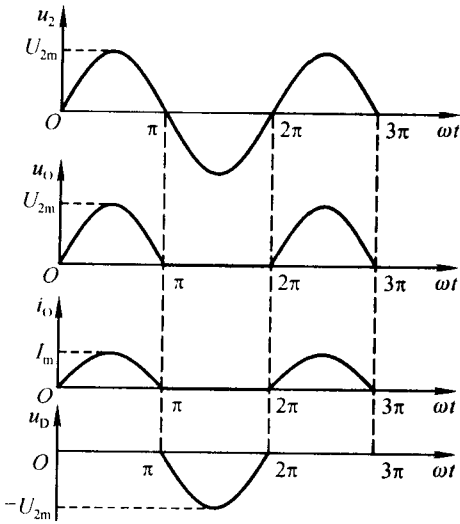


图 1-12 单相半波整流波形

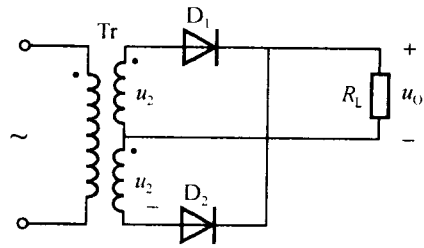


图 1-13 单相全波整流电路

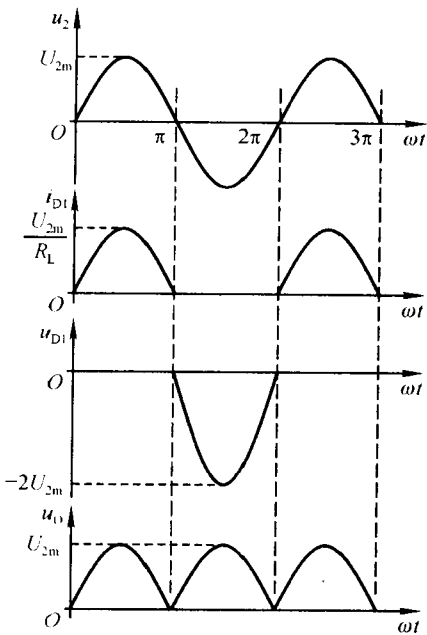


图 1-14 单相全波整流波形

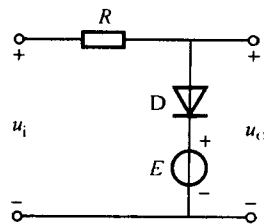
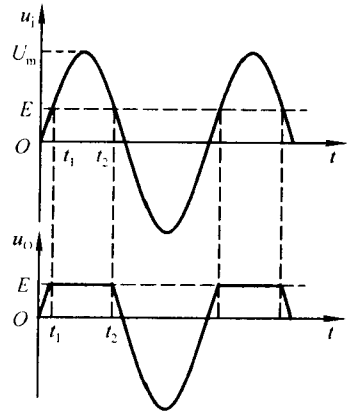


图 1-15 半导体二极管限幅电路



设 D 为理想二极管, 即忽略二极管正向压降和反向电流。当 $u_i > E$, 二极管导通, 其正向压降为零, 所以 $u_o = E$, 即输出电压正半周幅度被限为 E 值, 输入电压超出 E 部分 ($u_i - E$) 降在电阻 R 上; 当 $u_i < E$ 时, 二极管截止, 电路中电流为零, $u_R = 0$, 所以 $u_o = u_i$ 。

4. 钳位电路

将电路中某点电位值钳制在选定的数值上而不受负荷变动影响的电路叫钳位电路。图 1-16 所示为钳位电路。

只要二极管 D 处于导通状态,不论负载 R_L 改变多少,电路的输出端电压 u_o 始终等于 $U_G + U_D$,其中 U_D 为二极管的导通电压。

[例 1-1] 判断图 1-17 所示电路中二极管是导通状态,还是截止状态。

解:本例题练习二极管单向导电的重要概念。在解题时,首先要确定二极管两端的电位或电位差,从而确定二极管两端加的是正向电压还是反向电压。如加的是正向电压,则二极管导通,否则截止。

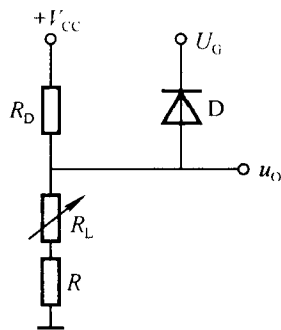


图 1-16 钳位电路

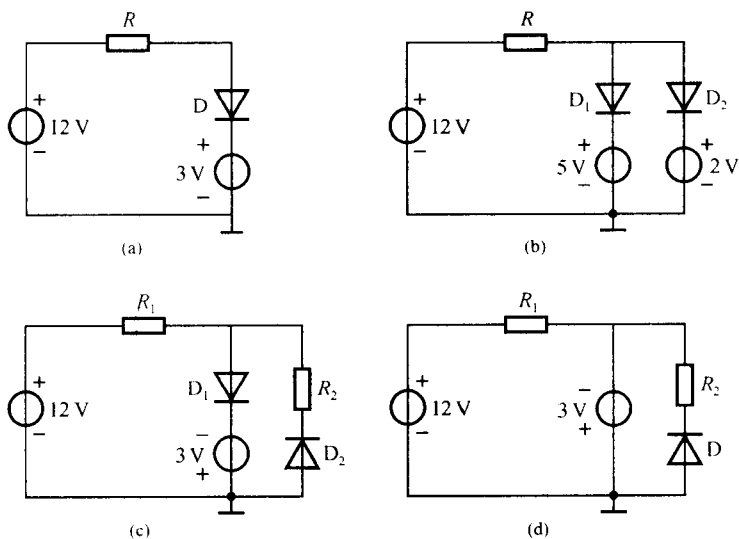


图 1-17 二极管工作状态分析

(a) 二极管 D 阳极所处电位高于阴极所处电位,处于正向偏置,所以二极管 D 工作在导通状态。

(b) 二极管 D_2 因受正向电压而导通,设其导通时管压降为 0.7 V ,则二极管 D_2 的阳极对地电位为 2.7 V ,此电位低于 D_1 的阴极电位 5 V , D_1 处于反向偏置,所以 D_1 工作在截止状态。

(c) 考虑 12 V 电源和 D_1 支路, D_1 正偏,则 D_1 工作在导通状态, D_1 阳极对地电位为 $U_{D1} + (-3\text{ V}) = -2.3\text{ V}$,此电位加于 R_2 、 D_2 支路, D_2 正偏,所以 D_2 工作在导通状态。

(d) -3 V 恒压源加在 D 、 R_2 支路中,由于 D 阳极接正,所以二极管 D 工作在导通状态。

5. 二极管检波电路

检波就是将低频信号从已调制信号(高频信号)中取出的电路。图 1-18 所示为检波电路。

在电视、广播及通讯中,为了使图像、声音能远距离传送,需要将这一低频电信号装载到高频信号(叫载波信号)上,以便从天线上发射出去。其中高频信号的振幅、频率或相位随低频信号变

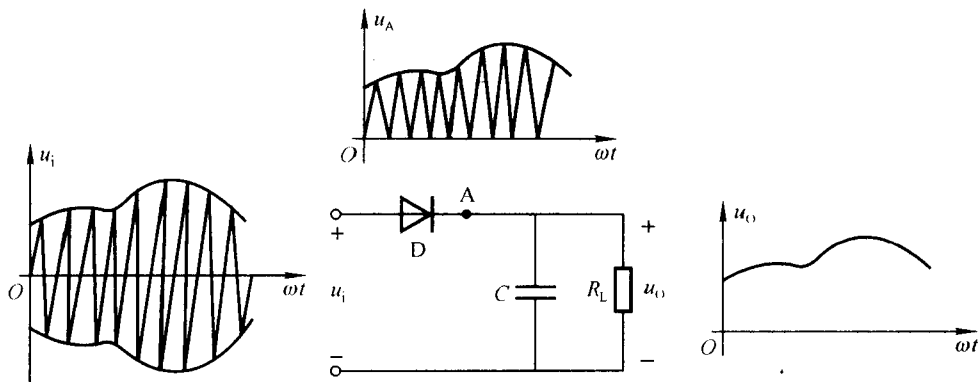


图 1-18 二极管检波电路

化,这个过程叫做调制。

检波就是将低频信号从已调制信号(高频信号)中取出。在图 1-18 中,输入信号为已调信号,由电视机、收音机接收后,首先由检波二极管 D 将已调幅信号的负半周去掉,然后利用电容器将高频信号滤去,留下低频信号,可以再放大这一低频信号,送给负载扬声器或显像管,还原成声音或图像。

6. 续流二极管电路

为防止电感元件换路出现过电压而并联一个二极管的电路称之为续流二极管电路。图 1-19 所示为续流二极管电路。

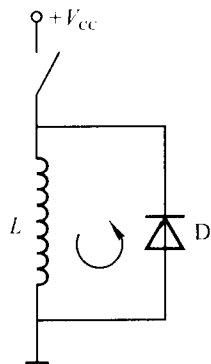


图 1-19 续流二极管电路

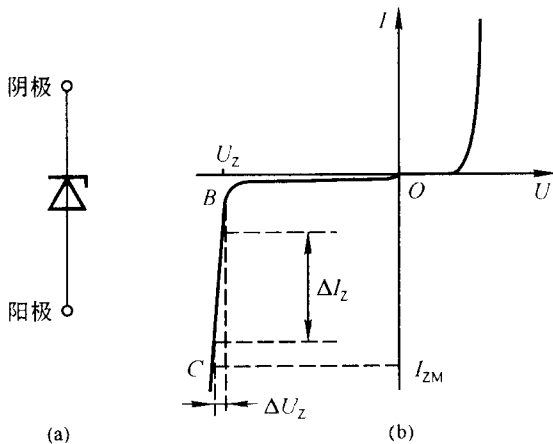


图 1-20 稳压管符号和伏安特性

为防止含电感元件电路在换路时出现高电压,以免损坏元器件,可以采用二极管续流电路来实现。正常工作时,续流二极管不导通,当电感与电压断开瞬时,电感电流仍维持原大小并按原方向继续流动,此时续流二极管为电感提供了放电通路。放电时电感两端电压始终等于续流二极管的正向电压,避免了电感上出现高电压。