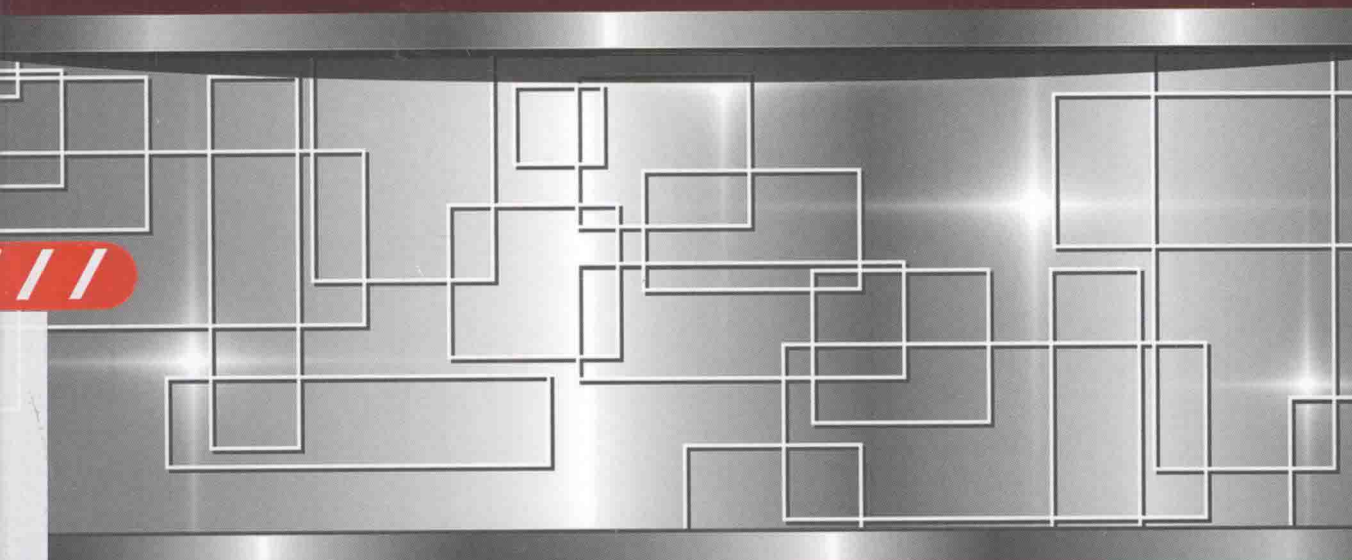




高等学校电子信息系列

电子技术

主编 李鸿林 席志红



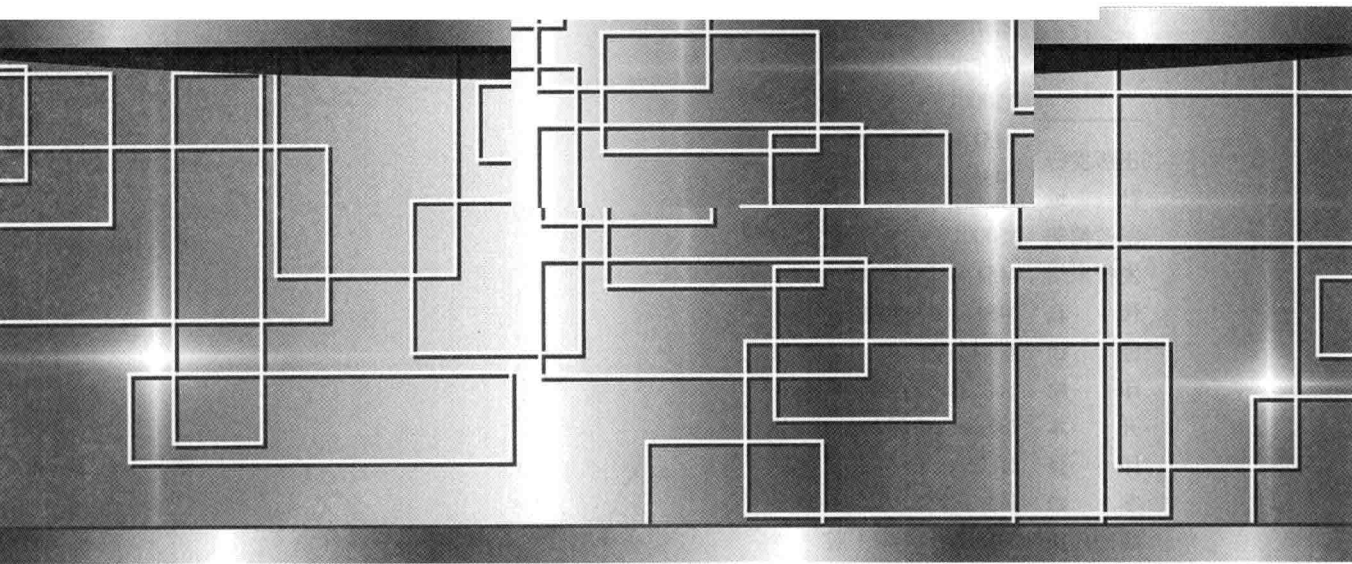
HEUP 哈尔滨工程大学出版社

高等学校电子信息系列

电子技术

主 编 李鸿林 席志红

副主编 张忠民 李志刚 靳庆贵 禹永植



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书是根据当前教学改革形势、电子技术教学现状和发展编写的,是对原2007年版教材进行的修改和补充,内容符合国家教委高等工科院校电工学课程指导小组审定的“电子技术课程教学根本要求”。全书共10章,主要内容包括半导体器件、放大电路、集成运算放大器、直流电源、数字电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、555集成定时器的原理及应用、模-数转换器和数-模转换器、半导体存储器和可编程逻辑器件。

本书可作为高等工科院校非电专业学生电子技术课程教材,也可以供有关方面工程技术人员参考和自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/李鸿林,席志红主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2015.1
ISBN 978-7-5661-0964-4

I. ①电… II. ①李… ②席… III. ①电子技术
IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 016534 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 21.75
字 数 563 千字
版 次 2015 年 1 月第 1 版
印 次 2015 年 1 月第 1 次印刷
定 价 36.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

编审委员会成员名单

主 任:阳昌汉

副主任:刁 鸣 王淑娟 赵旦峰

编 委:(以姓氏笔画为序)

叶树江 白雪冰 付永庆

付家才 杨 方 杨春玲

张朝柱 席志红 谢 红

童子权 谭 峰

再版说明

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》明确提出“提高质量是高等教育发展的核心任务”。要认真贯彻落实教育发展规划纲要,高等学校应根据自身的定位,在培养高素质人才和提高质量上进行教学研究与改革。目前,高等学校的课程改革和建设的总体目标是以适应人才培养的需要,培养专业基础扎实、知识面宽、工程实践能力强、具有创新意识和创新能力的综合型科技人才,实现人才培养过程的总体优化。

哈尔滨工程大学电工电子教学团队紧紧围绕国家中长期教育改革和发展规划纲要以及我校办高水平研究型大学的中远期目标,依托“信息与通信工程”国家一级学科博士点、“国家电工电子教学基地”、“国家电工电子实验教学示范中心”以及“NC网络与通信实践平台”,通过国家级教学团队的建设,明确了电子电气信息类专业的基础课程的改革和建设的总体目标是培养专业基础扎实、知识面宽、工程实践能力强、具有创新意识和创新能力的综合型科技人才。在课程教学体系和内容上保持自己特色的同时,逐步强调学生的主体性地位、注重工程应用背景、面向未来,紧跟最新技术的发展。通过不断深化教学内容和教学方法的改革,充分开发教学资源,促进教学研讨和经验交流,形成了理论教学、实验教学和课外科技创新实践相融合的教学模式。同时完成了课程的配套教材和实验装置的创新研制。

本系列教材包括电工基础、模拟电子技术、数字电子技术和高频电子线路等课程的理论教材和实验教材。本系列教材的特点是:

(1)本系列教材是根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会在2010年最新制定的“电子电气基础课程教学基本要求”,并考虑到科学技术的飞速发展及新器件、新技术、新方法不断更新的实际情况,结合多年的教学实践,并参考了国内外有关教材,在原有自编教材的基础上改编而成。既注重科学性、学术性,也重视可读性,力求深入浅出,便于学生自学。

(2)实验教材的内容是经过教师多年的教学改革研究形成的,强调设计型、研究型 and 综合应用型。并增加了SPICE分析设计电子电路以及EDA工具软件使用的内容。

(3)与实验教材配套的实验装置是由教师综合十多年的实验实践的利弊,经过反复研究与实践而研制完成。实验装置既含基础内容,也含系统内容;既有基础实验,也有设计性和综合性实验;既有动手自制能力培训,也有测试方法设计与技术指标测试实践。能使学生的实践、思维与创新得到充分发挥。

(4)本系列教材体现了理论与实践相结合的教学理念,强调工程应用能力的培养,加强学生的设计能力和系统论证能力的培养。

本书自出版及修订再版以后,受到了广大读者的欢迎,许多兄弟院校选用本书作教材,有些读者和同仁来信,提出了一些宝贵的意见和建议。为了适应教学改革与发展的需要,经与作者商量,并结合近年的科研教学的经验和成果,以及电子技术的最新发展,决定第三次修订再版,以谢广大读者的信任。

哈尔滨工程大学出版社

2015年1月

前 言

本书是在哈尔滨工程大学出版社 2007 年出版的《电子技术》教材基础上,结合我们多年的教学经验,充分考虑了电子技术教学的现状及电子技术的发展重新修订编写的。新教材保留了原教材内容全面、阐述细致的特点,并对其中部分章节进行了补充和修改。

在编写过程中,我们注意到电子技术是一门理论与实际紧密结合的课程。在内容处理上体现了电子技术课程的基础性,从对电子技术基本理论、基本知识的掌握和基本技能的培养角度来组织内容,注重电子器件的外特性、基本电路分析方法、电路应用知识的介绍。教材中加强了电路应用方面的内容,加强了对集成电路的介绍,弱化了分立元件的内容。为了引领学生自主学习,扩充学生的知识面,增加了电子技术 EDA 工具的介绍,书中带有“*”号的内容在讲授时可根据专业的需要学时的多少而取舍,也可供学生自主学习参考。这次修订改动较多,不少章节是重新编写的,由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请各位读者批评指正。

本书还附有实验指导教程,已经出版,相关实验内容可参阅 2014 年哈尔滨工程大学出版社出版的禹永植主编的《电子技术实验教程》。

编 者

2014 年 12 月

目 录

第1章 半导体器件	1
1.1 PN结及其单向导电性	1
1.2 半导体二极管及其应用	4
1.3 特殊二极管	9
1.4 半导体三极管	12
1.5 场效应管	19
本章总结	24
习题1	24
第2章 放大电路	29
2.1 放大电路的性能指标及三种基本放大电路性能简介	29
2.2 共发射极放大电路——基本放大电路	33
2.3 共发射极放大电路——静态工作点稳定电路	43
2.4 共集电极放大电路	49
2.5 差动放大电路	53
2.6 功率放大电路	59
2.7 场效应管放大电路	64
2.8* 电子电路的 Multisim 仿真分析	67
本章总结	70
习题2	70
第3章 集成运算放大器	77
3.1 集成运算放大器概述	77
3.2 放大电路中的负反馈	81
3.3 集成运算电路	87
3.4 信号处理电路	95
3.5 信号产生电路	102
3.6* 集成运算放大器的应用	107
本章总结	109
习题3	110
第4章 直流电源	121
4.1 整流电路	121
4.2 滤波电路	126
4.3 稳压电路	129

4.4*	开关型稳压电源	136
4.5	可控硅及可控整流电路	137
	本章总结	144
	习题4	145
第5章	数字电路基础	153
5.1	数字电路概述	153
5.2	数制与码制	155
5.3	基本逻辑关系与逻辑代数	160
5.4	逻辑函数的化简	165
	本章总结	174
	习题5	174
第6章	组合逻辑电路	178
6.1	分立逻辑门电路	178
6.2	集成逻辑门电路	181
6.3	组合逻辑电路的分析和设计方法	192
6.4	典型集成组合电路	196
6.5*	组合逻辑电路中的竞争冒险	214
	本章总结	215
	习题6	215
第7章	时序逻辑电路	222
7.1	触发器	222
7.2	时序逻辑电路的分析	233
7.3	寄存器	236
7.4	计数器	241
7.5*	时序逻辑电路的应用	254
7.6*	数字电路的EDA仿真分析	260
	本章总结	263
	习题7	264
第8章	555集成定时器的原理及应用	273
8.1	555集成定时器的工作原理	273
8.2	脉冲波形的产生与整形电路	276
	本章总结	282
	习题8	282
第9章	模-数转换器和数-模转换器	286
9.1	D/A转换器(DAC)	286
9.2	A/D转换器(ADC)	290
9.3*	计算机控制系统中的标准化D/A、A/D模板介绍	297

本章总结	299
习题 9	299
第 10 章 半导体存储器和可编程逻辑器件	303
10.1 半导体存储器.....	303
10.2 可编程逻辑器件.....	310
本章总结	316
习题 10	317
附录	319
附录 1 半导体分立器件型号命名方法	319
附录 2 常用半导体器件参数	320
附录 3 半导体集成电路(器件)型号命名方法.....	327
附录 4 国产 TTL 集成电路和国外 TTL 集成电路型号对照的说明	328
附录 5 部分常用的 TTL 数字集成电路型号及引脚图	329
参考文献	334

第 1 章

半导体器件

半导体器件是由半导体材料制成的电子器件,这类器件普遍具有质量轻、体积小、能耗低、精度高等优点,因此在现代社会的各领域得到了广泛应用。本章主要介绍 PN 结、二极管、三极管及场效应管等基本半导体器件,这些器件的结构、工作原理、特性、参数是学习电子技术和分析电子电路的基础。

1.1 PN 结及其单向导电性

1.1.1 本征半导体与杂质半导体

导电性能介于导体与绝缘体之间的材料称为半导体材料。电子器件中常用的半导体材料是硅和锗。经过去杂质提纯之后的半导体称为本征半导体。本征半导体的原子呈现晶体结构,所以这类半导体又称为晶体。硅和锗都是 +4 价元素,每个原子最外层的 4 个价电子分别与相邻的 4 个原子所共有,形成共价键结构,如图 1.1 所示。共价键是一种相对稳定的结构,在没有外界激发的情况下,价电子受自身原子核和共价键的束缚,不能自由运动。所以在无外界激发的情况下本征半导体几乎不导电。

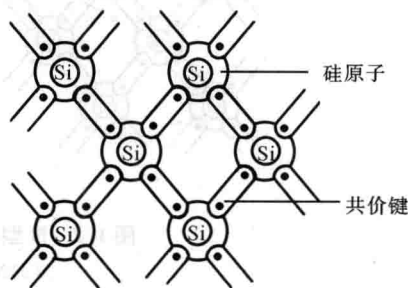


图 1.1 硅单晶中的共价键结构示意图

半导体器件所受到的外激发主要是光照和热激发,热和光都可以给价电子提供能量,促使其挣脱共价键的束缚成为自由电子,从而使本征半导体的导电性能增强。温度越高、光照越强,自由电子数越多或者越活跃,半导体导电性越好,这就是半导体固有的热敏特性和光敏特性,利用这种特性可以制成热敏器件和光敏器件。

本征半导体受外界激发产生自由电子时,在该电子原来的位置上会留下“空穴”,空穴所在的原子由于缺少一个电子而带有正电性,空穴出现在哪里,哪里就带有正电,所以我们把空穴也视为带有正电的粒子,其电荷量与电子相等。在外电场作用下,自由电子会逆电场方向运动,而空穴会顺电场方向运动。空穴运动的本质是:带有正电性的原子核吸引周

围的价电子来填补空穴,从而形成空穴的移动。自由电子和空穴是半导体中参与导电的两种载流子。本征半导体中外界激发所产生的自由电子和空穴总是成对出现,这种现象叫作本征激发,相应的自由电子和空穴又称为电子空穴对。由于物质运动,本征半导体中的电子空穴对不断更新,即总有自由电子去填补空穴,使原来的电子空穴对消失,并且释放出能量,这些能量又激发产生出新的电子空穴对。在外界激发条件不变时,电子空穴对将保持一定的浓度。

自然条件下本征激发所产生的电子空穴对数量很少,形成的电流也很小。再加上对热和光的敏感性,本征半导体不能用来制造半导体器件。

若在本征半导体中掺入一定杂质,就形成了杂质半导体,其导电性能将会发生显著变化。根据掺入元素的不同,杂质半导体又分为 N 型半导体和 P 型半导体,如图 1.2 所示。

如在本征半导体硅中掺入少量的五价元素磷(或锑、砷等),由于每个磷原子在与相邻的四个硅原子组成共价键时多出一个电子,这个电子只受原子核的吸引,不受共价键的束缚,在常温下就可以变成自由电子,而失去 1 个价电子的磷原子变成不能移动的正离子。这种杂质半导体称为 N(Negative)型半导体,如图 1.2(a)所示。在本征半导体硅中掺入少量三价元素硼(或镓、铟等),每一个硼原子在与相邻硅原子组成共价键时多出一个空位,由于共价键稳定结构的需求,周围的价电子很容易来填补该空位,并在其原来的位置形成带有正电性的空穴,而硼原子获得 1 个价电子后形成不能移动的负离子。这种杂质半导体称为 P(Positive)型半导体,如图 1.2(b)所示。

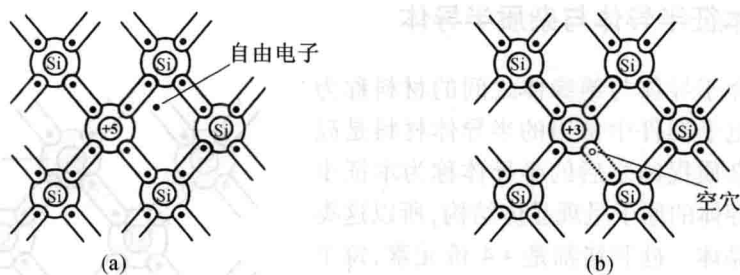


图 1.2 N 型半导体和 P 型半导体结构示意图

(a) N 型半导体; (b) P 型半导体

由于半导体材料固有的光敏和热敏特性,杂质半导体内也会有本征激发现象,产生电子空穴对。随着掺杂浓度的增加,由掺杂产生的载流子数将大大增加,其数量远多于由本征激发产生的载流子数。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。而 P 型半导体中空穴是多子,自由电子是少子。

1.1.2 PN 结形成及其单向导电性

如果在一片硅片上用不同的掺杂工艺制成 P 型半导体和 N 型半导体,由于 P 型半导体和 N 型半导体交界处载流子浓度的分布差异显著,必然发生两部分多数载流子的扩散运动,如图 1.3(a)所示。即 P 区中一部分空穴扩散到 N 区以后在 P 区一侧留下一些带负电的杂质离子;同时, N 区中一部分电子扩散到 P 区后在 N 区一侧留下一些带正电的杂质离子。于是,在交界面两侧形成了一个很薄的正负离子层,这些离子相对静止,我们把这些在

空间不能移动的带电荷子称为空间电荷,相应的区域称为空间电荷区或载流子耗尽区,如图 1.3(b) 所示。以交界面为分界的空间正、负电荷会在交界面处形成电场,这个电场称为自建电场或内电场,其方向由正离子层指向负离子层,即由 N 区指向 P 区,它对多子的扩散运动起阻挡作用,所以空间电荷区又称为阻挡层。

一方面,空间电荷区的内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用。另一方面,它却有助于空间电荷区两边的少子通过这一区域。少子在自建电场作用下的定向运动称为漂移运动,其方向恰好和多子的扩散运动方向相反。可见在交界面发生着两种相反的运动。开始时扩散运动占优势,随着多子的扩散,空间电荷区逐渐增厚,自建电场也逐渐增强,多子扩散的阻力增大,扩散运动逐渐得到抑制,但少子的漂移运动增强。不断受到削弱的扩散运动和不断得到增强的漂移运动最终必然达到动态平衡,即由 P 区向 N 区扩散的多子(空穴)数量与反向漂移过来的 N 区少子(也是空穴)数量相等;同样,电子扩散的数量也必然为反方向电子漂移的数量所抵消。这样,交界面两侧的正、负离子数量不再变化,空间电荷区成为一种相对稳定的状态,其宽度也就不变了。这个区域就称为 PN 结。

PN 结是自然形成的,自建电场也是自然产生的而非外加电场的产物。如果在形成 PN 结的硅片两端再外加一个电场,随外加电场方向的不同,半导体的导电性能将会有很大差别。

如图 1.4(a) 所示,将外加电压源的“+”极接 P 区,“-”极接 N 区。这时外加电场的方向与 PN 结自建电场的方向相反,在外电场作用下 P 区的多子空穴向 N 区运动, N 区的多子电子也向 P 区运动,使空间电荷区的正负离子数目减少,PN 结变薄,自建电场变弱。外加电压越大 PN 结越薄,自建电场也越弱。当外加电压达到一定值时 P 区的空穴将穿过 PN 结进入 N 区,与 N 区的少子空穴汇合在电源的作用下顺畅地流向电源的“-”极;同样, N 区的多子与 P 区的少子电子也会穿过 PN 结流向电源的“+”极,从而形成电流。这时整个硅片以及 PN 结呈现低阻导通状态,电流 I 随电源电压增加而增加。将这种状态称为 PN 结正向导通状态,施加电压的方式称为加正向电压或正向偏置。

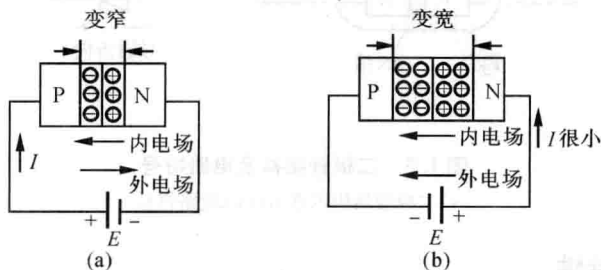


图 1.4 PN 结的单向导通特性

(a) PN 结加正向电压; (b) PN 结加反向电压

如果按图 1.4(b) 所示,将外加电压源的“-”极接 P 区,“+”极接 N 区,这时外加电场

的方向与 PN 结自建电场的方向相同,将使内电场加强,空间电荷区加宽,PN 结变厚,更不利于 P 区和 N 区的多子通过,只有少数载流子可以穿过 PN 结,形成由 N 区流向 P 区的电流。将这种状态称为 PN 结加反向电压或反偏置。由于少子浓度很低,所以反偏置时电流很小,远远小于正向导通时的电流,PN 结呈现高阻近似于不导电的状态。另外,由于少子浓度基本不受外加电压的影响,只与温度有关,所以反向电流不仅随反向电压的增大而增加,同时随温度升高而增大。

可见,PN 结对外加电压的方向有选择性,加正向电压导通电流较大,加反向电压电流很小。如果忽略少子的效应,那么 PN 结具有单向导电性,即加正向电压导通,加反向电压截止,导通方向由 P 区指向 N 区。

思考题

1.1.1 N 型半导体中自由电子是多数载流子,因而 N 型半导体带负电;P 型半导体空穴是多数载流子,因而 P 型半导体带正电,这种说法是否正确?

1.1.2 (填空题)在杂质半导体中,多数载流子的浓度取决于(),而少数载流子的浓度则与()有很大关系。

1.1.3 (填空题)PN 结的基本特性是()。当 PN 结加正向电压时,PN 结处于()状态,空间电荷区将();当 PN 结加反向电压时,PN 结处于()状态,空间电荷区将()。

1.2 半导体二极管及其应用

在一个 PN 结的两端加上电极引线并用外壳封装起来,就构成了半导体二极管。由 P 型半导体引出的电极叫作阳极(或正极),由 N 型半导体引出的电极叫作阴极(或负极),如图 1.5(a)所示,图 1.5(b)为二极管的电路符号。图 1.6 所示为常见的两种二极管结构图。其中,点接触型二极管的 PN 结结面积小,工作频率高,适用于高频电路和开关电路;面接触型二极管的 PN 结结面积大,工作频率较低,适用于大功率整流等低频电路。

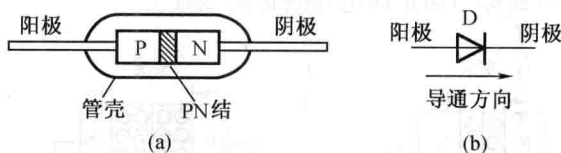


图 1.5 二极管结构及电路符号

(a) 二极管结构示意图; (b) 电路符号

1.2.1 伏安特性

二极管的伏安特性是指其两端电压与通过的电流之间的关系。二极管的伏安特性曲线可以通过实验测得,也可以用晶体管特性测试仪测出。图 1.7(a)和(b)分别为硅、锗两种不同材料、不同型号(2CP11, 2AP15)二极管的伏安特性曲线。

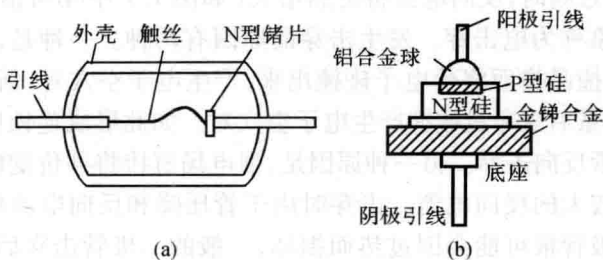


图 1.6 两种常见的二极管结构示意图

(a) 点接触型二极管; (b) 面接触型二极管

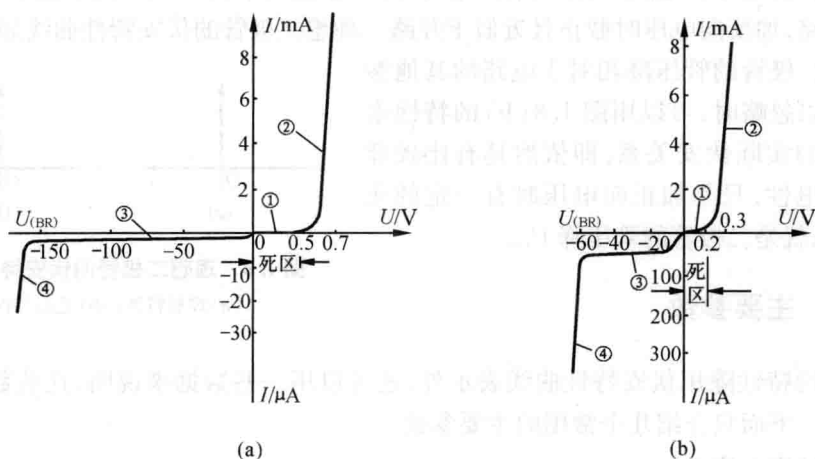


图 1.7 二极管的伏安特性曲线

(a) 硅二极管(2CP11); (b) 锗二极管(2AP15)

根据二极管所加实际电压与参考电压方向的不同,曲线分为正向特性和反向特性两部分。

1. 正向特性

当二极管加上很小的电压时,如图 1.7 中①的部分,外电场还不能克服 PN 结内电场对多子运动造成的阻力,故电流几乎为零,二极管呈现很大的电阻。当正向电压超过一定数值后,如图 1.7 中②指的部分,内电场被大大削弱,电流增长很快,二极管电阻变得很小。这一数值称为死区电压(又称门槛电压或阈值电压),死区电压的大小与原材料及温度有关,一般硅管约为 0.5 V,锗管约为 0.1 V。相应的伏安特性曲线中的①段称为死区,②段称为正向导通区间,二极管正向导通时,硅管的压降一般为 0.5 ~ 0.7 V,锗管一般为 0.1 ~ 0.3 V。

2. 反向特性

二极管施加反向电压时,少子的漂移运动形成很小的电流。反向电压增加但不超过一定数值时,反向电流很小且基本不变,因此又称为反向饱和电流,如图 1.7 中③段所指的部分,此段区域又称为反向截止区。反向电流会随着温度升高而增加,实际使用时此值越小越好。

当外加反向电压过高时,反向电流将突然增大(如图 1.7 中④所指部分),二极管失去单向导电性,这种现象称为电击穿。发生击穿的原因有两种。一种是,处于电场的载流子获得足够大的能量碰撞晶格而将价电子碰撞出来,产生电子空穴对,新产生的载流子在电场作用下获得足够能量后又通过碰撞产生电子空穴对。如此形成连锁反应,反向电流越来越大,最后使得二极管反向击穿。另一种原因是,强电场直接将共价键的价电子拉出来,产生电子空穴对,形成较大的反向电流。击穿时由于管压降和反向电流均很大,所以管子上的功率损耗很大,二极管很可能会因过热而损坏,一般的二极管击穿后就失效了。产生击穿时加在二极管上的电压称为反向击穿电压 U_{BE} 。

二极管属于非线性电阻器件,在对电路进行分析计算时比较麻烦,工程上常用理想化的模型来代替以简化计算。在电路中,如果电源电压远远大于二极管的管压降,且电路电阻远大于二极管的导通电阻时,经常把二极管视为理想的单向开关,即加正向电压时导通且近似于短路,加反向电压时截止且近似于开路。理想二极管的伏安特性曲线如图 1.8(a) 所示。如果二极管的管压降相对于电路的其他参数而言不可以忽略时,可以用图 1.8(b) 的特性来代替二极管的实际伏安关系,即依然具有比较理想的单向导电性,只是加正向电压时有一定的死区,死区电压就是二极管的管压降 U_D 。

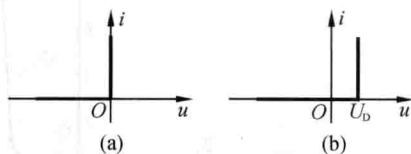


图 1.8 理想二极管的伏安特性曲线

(a) 理想特性; (b) 近似特性

1.2.2 主要参数

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外,还可以用一些数据来说明,这些数据就是二极管的参数。下面只介绍几个常用的主要参数。

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长时间使用时,允许流过二极管的最大正向平均电流。当电流超过这个允许值时,二极管会因过热而烧坏,使用时务必注意。

2. 反向工作峰值电压 U_{RWM}

它是保证二极管不被击穿而规定的反向峰值电压,一般是反向击穿电压的一半或三分之二。

3. 反向峰值电流 I_{RM}

它是指二极管加上反向峰值电压时的反向电流值。反向电流大,说明二极管的单向导电性能差,并且受温度的影响大。

此外,二极管还有最高工作频率、结电容值、工作温度等参数。

二极管的主要参数可以从半导体器件手册中查到。不过由于制造工艺的原因,参数分散性较大,手册一般给出的是参数值的范围。

1.2.3 二极管的应用

二极管的应用范围很广,都是利用它的单向导电性。它可用于整流、检波、元件保护以及在脉冲与数字电路中作为开关元件等。下面以具体电路举例说明二极管的几种典型的应用,在后续章节中还会介绍许多应用。

1. 限幅作用

利用二极管的单向导电性可以构成限幅电路来限制输出电压的幅度。

【例 1.1】 图 1.9(a) 与图 1.9(b) 是两个利用二极管实现的限幅电路, 已知 $E_1 = 2\text{ V}$, $E_2 = 3\text{ V}$, 输入电压 $u_i(t) = 5\sin\omega t\text{ V}$, 其波形如图 1.9(c) 所示, 设 D 为理想二极管, 忽略管压降, 画出输出电压 u_o 的波形。

【解】 由于二极管的单向导电性, 电路可能有两种工作状态: 一种状态是 D 导通, 电流 $i > 0$; 另一种状态是 D 截止, 电流 $i = 0$ 。

图 1.9(a) 中 D 导通时有 $iR + u_i = E_1$, 即 $iR = E_1 - u_i$, 要使 $i \geq 0$, 必须有 $u_i \leq E_1$ 。换言之, 当 $u_i \leq E_1$ 时, D 导通, a 和 b 之间近似于短路, $u_o \approx u_i$; 当 $u_i > E_1$ 时, D 截止, a 和 b 两点之间近似于开路, $u_o = E_1$ 。绘出 u_o 波形如图 1.9(d) 所示。

在图 1.9(b) 电路中, 当 D 导通时, 有 $u_i + E_2 - E_1 = iR$, 要使 $i \geq 0$, 必有 $u_i \geq E_1 - E_2$, 即当 $u_i \geq E_1 - E_2$ 时, D 导通, a 和 b 两点间近似于短路, $u_o = u_i + E_2$; 当 $u_i < E_1 - E_2$ 时, D 截止, a 和 b 之间近似于开路, $u_o = E_1$ 。绘出波形如图 1.9(e) 所示。

二极管限幅电路有正限幅、负限幅、正负双向限幅(需要两个二极管)、带偏移电压的限幅电路等多种形式。图 1.9(a) 就是一个正限幅电路, 图 1.9(b) 为带偏移电压的负限幅电路。

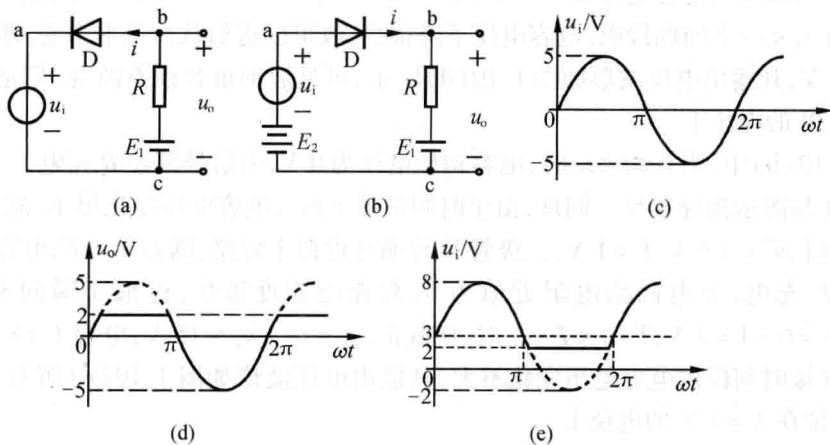


图 1.9 例 1.1 图

2. 钳位作用

钳位是指将信号钳制在某一固定电位。一般电路中应包括电容 C 、二极管 D 、电阻 R 。 R 和 C 的选择应使时间常数 $\tau = RC$ 足够大, 这样在二极管截止时, 电容 C 不会很快放电。

【例 1.2】 图 1.10(a) 与 (b) 为两个二极管钳位电路, (c) 图为输入信号电压 u_i 的波形, 其周期 $T = 1\text{ ms}$, 电路中 $C = 10\text{ }\mu\text{F}$, $R = 10\text{ k}\Omega$, $E = 1\text{ V}$, D 为理想器件, 电容的初始电压为 0 V , 画出输出电压 u_o 的波形。

【解】 在图 1.10(a) 电路中, 当 $0 \leq t \leq t_1$ 时, 因为 $u_i > E$, 且电容初始电压为 0 V , D 导通, 电容经二极管 D 充电, 充电电压极性如图所示。由于理想二极管通态电阻近似为零, 所以 C 充电速度极快, 近似于瞬间充满 7 V 电压, 此时由于 D 近似于短路, 故 $u_o \approx E = 1\text{ V}$ 。

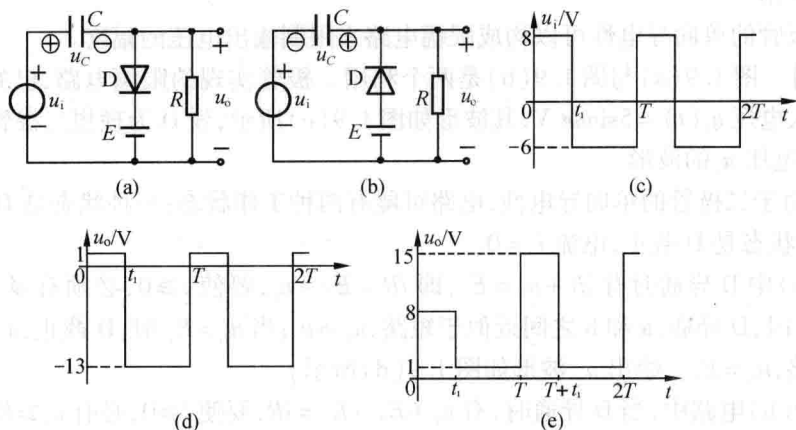


图 1.10 例 1.2 图

当 $t_1 < t \leq T$ 时, $u_i = -6 \text{ V}$, $E = 1 \text{ V}$, 二极管承受反向电压, 故 D 截止, 近似于开路, 输出电压 $u_o = u_i - u_C = -6 - u_C$, 电容开始经信号源 u_i 、电阻 R 放电, 之后将可能反向充电。时间常数 $\tau = RC = 100 \text{ ms}$, 电容电压 $u_C = -7 + [7 - (-7)]e^{-\frac{t}{\tau}} = -7 + 14e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ V}$, 输入信号周期 $T = 1 \text{ ms}$ 。在 $t_1 < t < T$ 时间段内, 电容电压下降很少, 故可以近似认为基本不变, 即 $u_C = 7 \text{ V}$, 则 $u_o = -13 \text{ V}$, 其输出电压波形如图 1.10(d) 所示, 可见波形形状没有改变, 只是其顶部被钳位在 $E = 1 \text{ V}$ 的电位上。

在图 1.10(b) 中, 当 $0 \leq t \leq t_1$ 时, 电容初始电压为 0 V , 由信号源经 R 充电, 二极管 D 截止, 电容电压与图示极性相反。同理, 由于时间常数 $\tau \gg t_1$, 电容电压变化很小, 故有 $u_o \approx u_i$ 。当 $t_1 \leq t \leq T$ 时, $u_i = -6 \text{ V}$, $E = 1 \text{ V}$, 二极管 D 导通且近似于短路, 则有 $u_o = E$, 电容 C 经二极管 D、电池 E 充电, 充电回路电阻近似为 0 , 故充电速度极快, 近似于瞬间充满, 达到 $u_C = -u_i + E = 6 + 1 = 7 \text{ V}$; $T < t < T + t_1$ 时, D 截止, $u_o = u_i + u_C \approx 15 \text{ V}$, 电容 C 经 R 放电, 但放电极慢, 在该时间段内电容电压变化不大, 其输出电压波形如图 1.10(e) 所示, 可见波形的底部被钳位在 $E = 1 \text{ V}$ 的电位上。

图 1.10(a) 为正向钳位电路, 图 1.10(b) 为负向钳位电路。在分析负向钳位电路时如果从信号的负半周开始分析, 就会得到没有误差的波形。本例中我们从正半周开始, 信号的第一个周期与我们预期的钳位输出波形有误差, 不过随着时间的推移, 以后的波形都与预期的相同, 在实际应用时, 应当给电路一定的预处理时间, 待输出波形稳定后再转入正常工作。

3. 保护作用

利用二极管的单向导电性对电路或核心元件进行保护的电路有许多, 图 1.11 给出了两种比较简单的实例。

实际电路中有很多含电感的电路元件, 如继电器、电磁铁、电机、变压器等, 其电感对电流的变化很敏感, 当电路开路时, 电流突然消失, 会产生很大的感生电压, 容易造成设备损坏。在电感元件两端反并联一个二极管是直流电路常用的保护措施。如图 1.11(a), 该二极管称为续流二极管, 所谓反并联是指二极管导通的方向与所加的直流电压方向相反。