



高职高专“十一五”规划教材

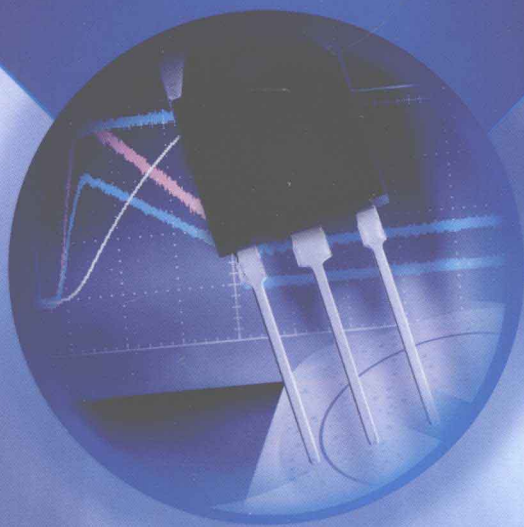
MONI DIANZI JISHU



模拟电子技术



张惠荣 编著



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

模拟电子技术

张惠荣 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书本着“理论够用、重在实用”的原则，介绍了半导体二极管及其基本应用电路、半导体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路及集成运算放大器电路基础、负反馈放大电路、信号处理电路、波形发生电路、功率放大电路、直流稳压电源等知识。本书切合高职高专电气、电子类专业教学内容，适应规定的教学时数，内容合理，便于教和学。本书中大部分内容都取自教学实践和教学研究成果，指导性强，通俗易懂，实用性较强。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校的电气、电子、自动化、机电一体化等专业的教材，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/张惠荣编著. —北京: 化学工业出版社,
2009. 2

高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-04218-7

I. 模… II. 张… III. 模拟电路-电子技术-高等学校:
技术学院-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 195943 号

责任编辑: 王听讲
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 王 洋
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 10½ 字数 256 千字 2009 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 19.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书根据教育部组织制定的《高职高专模拟电子技术基础课程教学基本要求》，在“必需、够用”的原则下编写。本书编写单位是全国 100 所国家示范性高等职业院校之一。本人在较长时间的电子工程实践和作为教师从事一线教学的实践中，对培养对象需要什么和教材应重点讲述什么有切身体会，本教材中的大量教学实例来自于教学实践和教学研究成果，既有较强的理论性，又具有鲜明的实用性。由于“模拟电子技术”是一门电子技术方面入门性质的技术基础课，本书力求使读者通过学习，获得从事与电子技术相关工作的中、高等专门人才必须具有的基本理论、基本知识、基本技能，并为学习相关后续课程打下一定基础。本教材的主要特点如下。

1. 实用性 本书在阐明电路的工作原理时，着重讲清楚物理概念，省略了烦琐的数学计算和理论推导，介绍较实用的工程计算和近似估算方法。对于各种模拟集成电路，着重介绍集成电路的性能特点和典型使用方法。结合各章内容，介绍已成熟的实际应用电路。

2. 先进性 电子技术飞速发展，新技术、新器件不断出现，各种新的集成电路更是层出不穷。本书在保证高职高专模拟电子技术课程教学基本要求的前提下，减少了分立元件电路的部分内容，加强了对新的电子元器件的介绍，加强了对模拟集成电路及其应用的介绍。

3. 便于读者阅读 本书中大部分内容都是取自教学实践中的工作总结，指导性强，通俗易懂，便于读者阅读。

本书由河北工业职业技术学院张惠荣编著。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校模拟电子技术课程的教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 11 月

目 录

第 1 章 半导体二极管及其基本应用电路	1
1.1 半导体二极管	1
1.1.1 PN 结	1
1.1.2 半导体二极管的结构和符号	6
1.1.3 半导体二极管的伏安特性	7
1.1.4 半导体二极管的使用常识	8
1.2 半导体二极管的等效电路	10
1.2.1 理想二极管伏安特性	10
1.2.2 二极管固定压降伏安特性	10
1.3 半导体二极管的基本应用	11
1.3.1 单相整流滤波电路	11
1.3.2 倍压整流电路	16
1.3.3 限幅电路	16
1.4 特种二极管	17
1.4.1 稳压二极管	17
1.4.2 发光二极管	18
1.4.3 光电二极管	18
1.4.4 变容二极管	19
1.4.5 激光二极管	19
自我检测题	20
思考题与习题	21
第 2 章 半导体三极管及其基本放大电路	24
2.1 半导体三极管	24
2.1.1 三极管的结构与符号	24
2.1.2 三极管的放大原理	25
2.1.3 三极管的特性曲线	28
2.1.4 三极管的使用常识	29
2.2 基本放大电路	30
2.2.1 基本放大电路的组成和元件作用	30
2.2.2 基本放大电路的工作情况	31
2.2.3 交流通路和直流通路	32
2.3 基本放大电路的分析方法	33
2.3.1 用图解法分析基本放大电路	33
2.3.2 用等效电路法分析共发射极基本放大电路	37

2.3.3	用等效电路法分析共集电极基本放大电路	41
2.3.4	用等效电路法分析共基极基本放大电路	43
2.4	稳定静态工作点的放大电路	44
2.4.1	温度对静态工作点的影响	44
2.4.2	分压式工作点稳定电路	45
2.5	特殊三极管	47
2.5.1	光电三极管	47
2.5.2	光电耦合器	47
	自我检测题	47
	思考题与习题	49
第3章	场效应管及其基本放大电路	52
3.1	结型场效应管	52
3.1.1	结型场效应管的结构、符号和工作原理	52
3.1.2	结型场效应管的特性曲线	55
3.1.3	结型场效应管的主要参数	56
3.2	绝缘栅场效应管	56
3.2.1	增强型绝缘栅场效应管	57
3.2.2	耗尽型绝缘栅场效应管	59
3.2.3	各种场效应管的特性比较及使用注意事项	60
3.3	场效应管放大电路	61
3.3.1	场效应管的偏置电路及静态分析	61
3.3.2	场效应管放大电路的微变等效电路及动态分析	62
	自我检测题	63
	思考题与习题	64
第4章	多级放大电路及集成运算放大器电路	67
4.1	多级放大电路	67
4.1.1	级间耦合方式	67
4.1.2	多级放大电路的性能指标估算	69
4.1.3	放大电路的频率特性	69
4.2	差动放大电路	71
4.2.1	基本差动放大电路	71
4.2.2	带公共射极电阻的差动放大电路	72
4.2.3	具有恒流源的差动放大电路	74
4.3	集成运算放大器	75
4.3.1	集成运算放大器的基本结构及其特点	75
4.3.2	集成运算放大器一些特殊参数含义	76
4.4	集成运算放大器的分析方法及其基本运算电路	77
4.4.1	理想集成运算放大器及其传输特性	77
4.4.2	基本运算电路	78
	自我检测题	81

思考题与习题	83
第 5 章 负反馈放大电路	86
5.1 反馈的基本概念	86
5.1.1 反馈的概念	86
5.1.2 反馈的分类	86
5.2 负反馈放大电路的方框图及增益分析方法	90
5.2.1 负反馈放大电路的方框图	90
5.2.2 负反馈放大电路增益的一般关系式	90
5.2.3 四种类型的负反馈组态	91
5.2.4 负反馈对放大电路性能的影响	92
5.3 负反馈引入法	94
5.3.1 为改善性能引入负反馈的一般原则	94
5.3.2 负反馈引入法例题分析	94
5.4 深度负反馈放大电路的分析	95
5.4.1 深度负反馈的特点	95
5.4.2 深度负反馈放大电路的参数估算	96
5.5 负反馈放大电路应用举例	97
5.5.1 反馈式音调控制器	97
5.5.2 DA-16 型晶体管毫伏表中放大器部分	98
自我检测题	99
思考题与习题	100
第 6 章 信号处理电路	103
6.1 有源滤波电路	103
6.1.1 低通滤波电路	104
6.1.2 高通滤波电路	105
6.1.3 带通滤波电路和带阻滤波电路	105
6.2 高精度整流电路	105
6.2.1 高精度半波整流电路	106
6.2.2 高精度全波整流电路	106
6.3 电压比较器	107
6.3.1 简单的电压比较器	107
6.3.2 迟滞电压比较器	108
自我检测题	109
思考题与习题	110
第 7 章 波形发生电路	112
7.1 正弦波振荡电路	112
7.1.1 正弦波振荡电路的基本概念	112
7.1.2 RC 正弦波振荡电路	114
7.1.3 LC 正弦波振荡电路	116
7.1.4 石英晶体振荡电路	120

7.2 非正弦波形发生电路	123
7.2.1 矩形波发生电路	123
7.2.2 三角波发生电路	124
7.2.3 锯齿波发生电路	125
7.2.4 集成函数发生器 8038	125
自我检测题	127
思考题与习题	128
第8章 功率放大电路	131
8.1 功率放大电路的特殊问题	131
8.2 互补对称功率放大电路	132
8.2.1 OCL 互补对称功率放大电路	132
8.2.2 OCL 甲乙类互补对称功率放大电路	134
8.2.3 OTL 互补对称功率放大电路	134
8.2.4 实用电路举例	136
8.3 集成功率放大电路	138
8.3.1 LM386 集成功率放大电路	138
8.3.2 TDA2616/Q 集成功率放大电路	139
8.3.3 “傻瓜”型集成功率放大电路	139
自我检测题	140
思考题与习题	141
第9章 直流稳压电源	143
9.1 概述	143
9.2 硅稳压管稳压电路	144
9.3 串联型稳压电路	146
9.4 稳压电路的保护措施	148
9.5 三端式集成稳压器	149
9.5.1 三端固定输出式集成稳压器	149
9.5.2 三端可调输出式集成稳压器	151
9.5.3 低压差三端式集成稳压器	152
9.5.4 三端式集成稳压器的使用注意事项	153
9.6 开关型稳压电路	153
9.6.1 开关型稳压电路的工作原理	154
9.6.2 开关型稳压电路结构框图	154
9.6.3 串联型开关稳压电路的工作原理	155
9.6.4 集成单片脉宽调制式开关稳压电路 SW3524	156
自我检测题	157
思考题与习题	158
参考文献	160

第 1 章 半导体二极管 及其基本应用电路

本章教学基本要求

要知道：N 型和 P 型半导体的区别、PN 结的导电特性、硅和锗二极管阈值电压和正向导通电压值、温度对二极管特性和参数的影响、常用特种二极管以及倍压整流使用要点。

会计算：用等效电路法计算二极管电路参数；单相桥式整流电路、单相桥式整流电容滤波电路的输出电压、输出电流。

会画出：单相桥式整流电容滤波电路、二极管限幅电路的输出波形。

会确定：选用二极管、滤波电容、变压器所依据的主要参数。

会分析：单相桥式整流电容滤波电路中故障原因。

会判断：用万用表判断二极管管脚极性和质量好坏。

1.1 半导体二极管

1.1.1 PN 结

1. 本征半导体

几乎不含杂质的纯净半导体称为本征半导体。目前用于制造半导体器件的材料有硅 (Si)、锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs)、碳化硅 (SiC)、磷化铟 (InP) 等，其中以硅和锗最为常用。硅和锗的原子最外层有 4 个价电子。图 1-1-1 表示了硅或锗晶体的共价键结构。这样每个硅或锗原子与其相邻的 4 个原子的价电子发生联系，使每个硅或锗原子外层有 8 个电子，以求得稳定结构。

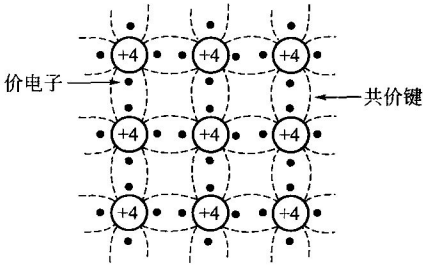


图 1-1-1 硅或锗晶体共价键结构示意图

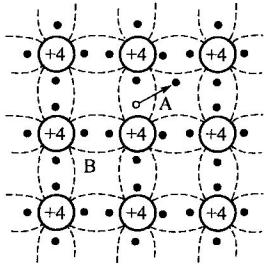


图 1-1-2 本征硅或锗中电子和空穴成对出现

● 表示自由电子 ○ 表示空穴

1) 本征半导体中的两种载流子——电子和空穴

在室温下，本征半导体中少数价电子因受热而获得能量，摆脱原子核的束缚，从共价键中挣脱出来，成为自由电子。与此同时，失去价电子的硅或锗原子在该共价键上留下了一个空位，这个空位称为空穴。由于本征硅或锗每产生一个自由电子，必然会有一个空穴出现，即电子与空穴成对出现，称为电子空穴对，如图 1-1-2 所示。在室温下，本征半导体内产生的电子空穴对数目是很少的。

本征半导体在室温下，其内部自由电子可以自由运动，空穴是怎样运动呢？当一个价电子成为自由电子后，产生了一个空穴。原子本来是电中性的，当失去一个带负电的电子后，留下的空穴相当于带正电荷的粒子，它所带电量与电子相等，符号相反。有了这样一个带正电的空穴，附近的价电子就很容易跳过来填充这个空穴，这时空穴就转移到相邻的原子上去了。如图 1-1-2 所示，A 处共价键出现空穴以后，相邻原子的价电子（如 B 处价电子）填补了 A 处空穴，结果空穴从 A 处移到了 B 处，同理，B 处空穴也很容易被相邻原子的价电子填补，因此空穴运动实质上是价电子填补空穴的运动，空穴运动方向与价电子运动方向相反。为了区别于自由电子的运动，把这种与价电子运动方向相反的运动称为空穴运动。

由此可见，在本征半导体中，有自由电子和空穴两种带电粒子，它们在半导体中均可自由运动，不过这种杂乱的自由运动不会使本征半导体呈现电性。本征半导体处在外界电场作用下，其内部自由电子逆外电场方向定向运动，形成电场作用下的漂移电子流，空穴顺外电场方向定向运动，形成电场作用下的漂移空穴流。在电场作用下，自由电子带负电荷，空穴带正电荷，它们都对形成电流做出贡献，因此称自由电子为电子载流子，空穴为空穴载流子。本征半导体在外电场作用下，其电流应为电子流与空穴流之和。

2) 本征半导体的热敏特性和光敏特性

本征半导体受热或光照后产生电子空穴对的物理现象称为本征激发。本征激发能使本征半导体内成对地产生自由电子和空穴；另一方面，自由电子在运动过程中有可能重新跳进空穴，使自由电子与空穴一起消失，这种过程称为复合。复合时，自由电子释放能量，又成为价电子。电子空穴对不断产生，又不断复合，在一定温度下，必将达到相对平衡，使电子空穴对的数目保持一定。由于常温下本征激发所产生的电子空穴对数目很少，所以本征半导体导电能力差。

温度升高或光照增强时，本征半导体内原子运动加剧，有较多的价电子获得能量成为自由电子，即电子空穴对增多，又使复合的机会相应增多，最后达到一个新的相对平衡，这时电子空穴对的数目自然比原先多，所以本征半导体中电子空穴对的数目与温度或光照有密切关系。温度越高或光照越强，本征半导体内载流子数目越多，导电性能越好，这就是本征半导体的热敏特性和光敏特性。

2. 杂质半导体

本征半导体虽然多了空穴载流子，但是从具有良好导电能力的要求来看，还相差很远，因此本征半导体用处不大。如果在本征半导体中掺入微量其他元素，会使其导电能力大大加强，掺入的杂质越多，本征半导体的导电能力越强，这就是半导体的掺杂特性。掺入的微量元素的原子称为杂质，掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。杂质半导体有 P 型半导体和 N 型半导体两大类。

1) P 型半导体

如果在本征半导体中掺入微量三价元素，如硼（B）、镓（In）等，在半导体内就产生

许多空穴，这样就形成了P型半导体，也叫空穴型半导体。

为什么在本征半导体中掺入微量三价元素会产生许多空穴呢？因为掺入的杂质原子数目比硅（或锗）原子要少得多，因此整个晶体结构基本不变，三价杂质原子有三个价电子，所以当三个杂质原子与相邻四个硅（或锗）原子组成共价键时，杂质原子外层有一个空位未被填满，必然形成一个空穴，如图 1-1-3 所示。每掺入一个三价杂质原子，就形成一个空穴，掺入的三价杂质越多，空穴载流子就越多，这种半导体的导电性能就越好。

在P型半导体中，有因掺入三价杂质而产生的空穴和本征激发所产生的电子空穴对，从而空穴载流子数远大于电子数，所以P型半导体中空穴是多数载流子，简称“多子”，电子是少数载流子，简称“少子”。掺入的杂质原子由于产生空穴便可以接受一个电子，三价杂质原子由于接受一个电子成为一个负离子，即每掺入一个三价杂质原子便形成一个空穴和相应形成一个负离子，但整个P型半导体呈现电中性，如图 1-1-4 所示。P型半导体中多子浓度取决于所掺杂质的多少，少子由于是本征激发形成的，它的浓度与温度有密切的关系。

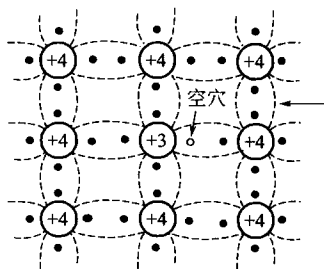


图 1-1-3 P型半导体结构示意图

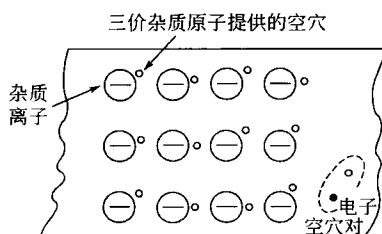


图 1-1-4 P型半导体中的载流子

P型半导体在外界电场作用时，多子空穴形成的空穴电流远大于少子电子形成的电子电流，P型半导体是一种以多子空穴导电为主的半导体，所以它又称为空穴型半导体。

2) N型半导体

如果在本征半导体中掺入微量五价元素，如磷（P）、砷（As）等，在半导体内产生许多电子，这样就形成了N型半导体，也叫电子型半导体。

为什么在本征半导体中掺入微量五价元素会产生许多电子呢？因为五价杂质原子有五个价电子，一个杂质原子与相邻四个硅（或锗）原子组成共价键时，杂质原子多出一个电子未结合，常温下这个电子就能摆脱原子核的束缚成为自由电子，如图 1-1-5 所示，每掺入一个五价杂质原子，就能形成一个自由电子，掺入的杂质越多，这种半导体的导电性能就越好。

在N型半导体中，有因掺入五价杂质而产生的电子与本征激发所产生的电子空穴对，

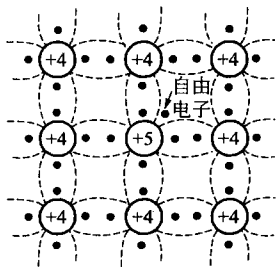


图 1-1-5 N型半导体结构示意图

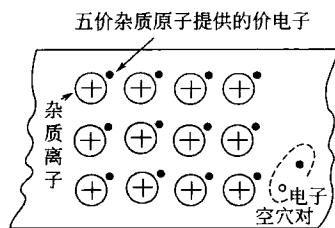


图 1-1-6 N型半导体中的载流子

从而电子载流子数远大于空穴数，所以电子是 N 型半导体中的多子，空穴是 N 型半导体中的少子。掺入的杂质原子由于给出一个电子便成为一个杂质正离子，每掺入一个五价杂质原子，便贡献一个自由电子，而且相应形成一个正离子，但整个 N 型半导体呈现电中性，如图 1-1-6 所示。N 型半导体中多子的浓度取决于掺入杂质的多少，少子由于是本征激发形成的，它的浓度与温度有密切的关系。

当 N 型半导体处在外界电场作用时，由多子电子形成的电子电流远大于少子空穴形成的空穴电流。N 型半导体是一种以电子导电为主的半导体，所以它又称为电子型半导体。

3. PN 结

单纯的一块 P 型半导体或 N 型半导体只能作为一个电阻元件，而不能做成所需要的晶体管器件。但是，把 P 型半导体和 N 型半导体通过一定方法结合起来形成的 PN 结就具有这种功能。PN 结是构成半导体二极管、半导体三极管、晶闸管、集成电路等许多半导体器件的基础。

1) PN 结的形成

在一块完整的本征硅（或锗）片上，用不同的掺杂工艺使其一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，在这两种杂质半导体的交界面附近就会形成一个具有特殊性质的薄层，这个特殊的薄层就是 PN 结。

图 1-1-7 展示了 PN 结的形成过程。如图 1-1-7(a) 所示，由于 P 区与 N 区之间存在着载流子浓度的显著差异：P 区空穴多、电子少；N 区电子多、空穴少。于是在 P 区与 N 区的交界面处发生载流子的扩散运动。所谓扩散运动，就是因浓度差而引起载流子从浓度高的区域向浓度低的区域运动。P 区空穴向 N 区扩散，N 区电子向 P 区扩散。扩散的结果：交界面附近 P 区空穴减少，留下不能够移动的杂质负离子，N 区电子减少，留下了不能移动的杂质正离子。这样，在交界面上出现了由正负离子构成的空间电荷区，这就是 PN 结，如图 1-1-7(b) 所示。空间电荷区一侧为负离子区，另一侧为正离子区，于是就产生了由 N 区指向 P 区的电场，叫内电场。显然，内电场对多子的扩散运动起阻挡作用，但对 P 区和 N 区中的少子有吸引作用，于是产生了少数载流子在内电场作用下的漂移运动（在电场作用下载流子的运动称为漂移运动）。

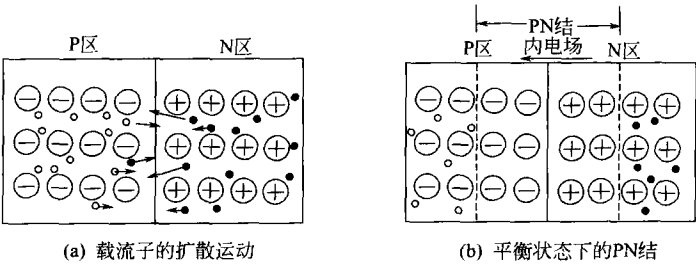


图 1-1-7 PN 结的形成过程

开始时，由于载流子浓度差别大，多子的扩散运动占优势，但随着扩散运动的进行，空间电荷区变厚，内电场不断增加，扩散运动逐渐削弱，漂移运动不断增强，最后扩散运动与漂移运动达到动态平衡，即有多少个多子扩散到对方，便有多少个少子从对方漂移过来。此时，PN 结的厚度不再变化。在动态平衡状态下流过 PN 结的扩散电流与漂移电流大小相等，方向相反，流过 PN 结的总电流为零。

由于PN结一侧带正电荷,另一侧带负电荷,因此在两种半导体之间产生电势差(或电位差),称为势垒或位垒。由于PN结内电场对多子扩散起阻挡作用,因而把空间电荷区又称为阻挡层。又因为空间电荷区内几乎没有载流子,即载流子耗尽了,只剩下不能导电的正负离子,所以空间电荷区又称为耗尽层(或耗尽区)。

2) PN结的导电特性

在不同极性外加电压作用下,流过PN结电流大小是不同的。

(1) PN结正向偏置 如图1-1-8(a)所示,P区接电源正极,N区接电源负极,这种接法叫正向偏置。这种偏置由于外电场与内电场方向相反,从而使内电场削弱,耗尽层变薄(空间电荷区变窄),如图1-1-8(b)所示。这样,导致了扩散运动增强,漂移运动减弱,打破了原来的动态平衡,大大有利于多子扩散,有大量的多子越过PN结,形成正向电流 I_F ,而且外加正偏电压稍微增加,则正向电流便迅速上升,PN结表现为正向导通状态,正向导通时PN结呈现的电阻很小。

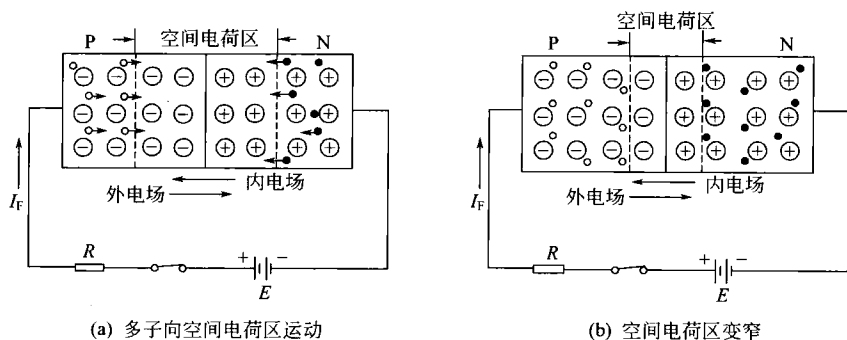


图 1-1-8 PN 结外加正向电压时的情况

(2) PN结反向偏置 如图1-1-9所示,P区接电源的负极,N区接电源的正极,这种接法叫反向偏置。这种反向偏置使外电场与内电场方向相同,增强了内电场,导致耗尽层变厚,结果多子的扩散难以进行,而少子则在外电场作用下漂移过PN结,形成反向电流 I_S ,但因为少子数目很少,因此 I_S 很小。由于少子是由热激发产生的,当温度一定时,少子浓度一定,反向电流 I_S 几乎不随外加反向偏置电压而变化,所以 I_S 又称为反向饱和电流。但 I_S 受温度影响很大。由于反向电流 I_S 很小,与正向电流 I_F 相比,一般可以忽略,所以PN结反向偏置时,处于截止状态,呈现的电阻很大。

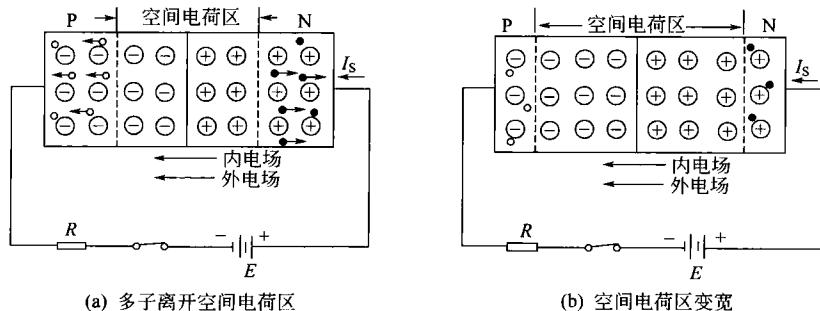


图 1-1-9 PN 结外加反向电压时的情况

综上所述，半导体中的载流子有两种运动方式：扩散运动和漂移运动。PN 结无外加电压时，扩散运动和漂移运动相对平衡。PN 结正偏时，扩散加强，空间电荷区变窄，有利于多子越过 PN 结，形成大的正向电流，PN 结呈导通状态，结电阻很小，相当于开关接通。PN 结反偏时，空间电荷区加宽，加强了内电场，结果阻止了多子的扩散，仅有少子形成很小的反向电流，PN 结呈截止状态，结电阻很大，相当于开关断开。所以 PN 结具有单向导电性。

1.1.2 半导体二极管的结构和符号

半导体二极管又称晶体二极管，简称二极管。二极管内部由一个 PN 结构成，对于分立二极管来说，还应在 PN 结的两端引出金属电极、外加管壳或用塑料封装。由于功能和用途的不同，二极管的外形各异，四种常见的二极管外形如图 1-1-10 所示。

二极管的结构按 PN 结形成的方式可分为点接触型、面接触型和平面型三种。点接触型二极管 PN 结接触面积小，不能通过很大的正向电流和承受较高的反向电压，但它的高频性能好，适宜于高频检波电路和开关电路；面接触型二极管 PN 结接触面积大，可以通过较大电流，也能承受较高的反向电压，适宜于整流电路。平面型二极管常用的是硅平面开关管。平面型二极管 PN 结面积较大时，可以通过较大电流，适用于大功率整流；其 PN 结面积较小时，适宜在脉冲数字电路中作开关管使用。图 1-1-11 是二极管的结构示意图。

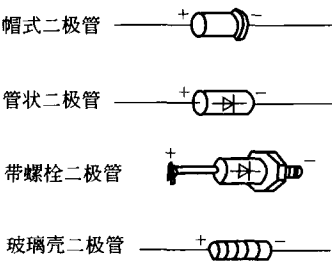


图 1-1-10 二极管外形

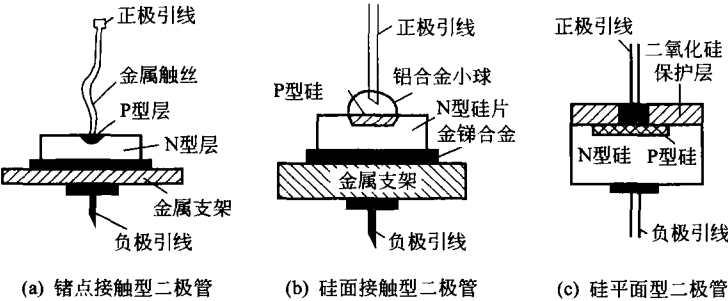


图 1-1-11 二极管的结构示意图

按 PN 结材料不同，二极管分为硅管和锗管两类。锗管的工作温度较低，一般制成中、小功率二极管。硅管工作温度较高，可制成中、大功率二极管。

按用途不同，二极管可分为检波二极管、整流二极管、稳压二极管、变容二极管和开关二极管等。

如图 1-1-12 所示是二极管的符号。二极管有两个电极，由 P 区引出的电极是正极，又叫阳极；由 N 区引出的电极是负极，又叫阴极。三角顶角方向表示正向电流的方向，

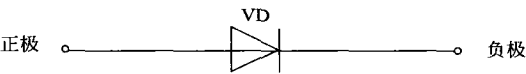


图 1-1-12 二极管的符号

正向电流只能从二极管的阳极流入，阴极流出。二极管的文字符号用 D、VD 或 V 表示，本书用 VD 表示。

1.1.3 半导体二极管的伏安特性

二极管的主要特性是单向导电。二极管的特性可用伏安特性曲线来描述。

1. 二极管的伏安特性曲线

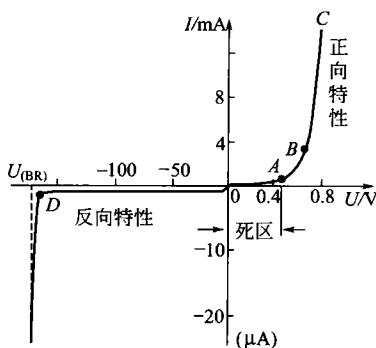
二极管的种类虽然很多,但它们都具有相似的伏安特性。所谓二极管伏安特性曲线就是流过二极管的电流 I 与加在二极管两端的电压 U 之间的关系曲线。如图 1-1-13 所示为硅和锗二极管伏安特性曲线,现以图 1-1-13(a) 所示的硅二极管伏安特性为例进行分段讨论。

1) 正向特性

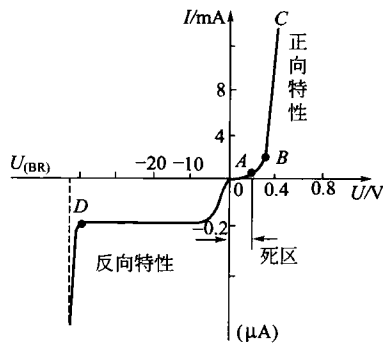
OA 段: 当外加正向电压较小时,外电场远不足以克服内电场对多数载流子扩散运动造成的阻力,致使多数载流子不能顺利通过空间电荷区,故正向电流非常小,近似为零。这个区域内二极管实际上还没有很好导通,二极管呈现的电阻很大,该区域常称为“死区”。硅二极管的死区电压(又称为导通电压 U_{on})约为 0.5V ,锗管的死区电压约为 0.1V 。

A 点以后: 即外加正向电压超过死区电压,外电场开始削弱内电场对多数载流子的阻碍作用,使正向电流增加。

BC 段: 当正向电压大于 0.6V (对硅二极管)以后,外电场大大削弱了内电场对多数载流子的阻碍作用。多数载流子在电场作用下大量通过 PN 结,所以正向电流随正向电压的增加而急速增大。在这个区域内,正向电压稍有增加,电流就会增大很多,这时二极管呈现的电阻很小,二极管表现出充分导通状态,并可视作具有恒压特性。该区域内,硅二极管正向压降为 $0.6\sim 0.7\text{V}$,锗管为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。但是流过二极管的正向电流不能过大,否则会使 PN 结过热而烧坏二极管。



(a) 硅二极管2CP6伏安特性曲线



(b) 锗二极管2AP15伏安特性曲线

图 1-1-13 二极管的伏安特性曲线

2) 反向特性

OD 段: 所加反向电压加强了内电场对多数载流子(多子)扩散的阻挡,多子几乎不能形成电流,但少数载流子(少子)在外电场作用下漂移,形成很小的反向电流,反向电压升高,反向电流几乎不再增大。因为在一定温度下,由本征激发产生的少子总数一定,外加反向电压稍大一点,即可使全部少子参与导电,再加大反向电压,反向电流也不再增加,故把该反向电流称为二极管的反向饱和电流 I_S 。此时二极管呈现很高的反向电阻,近似处于截止状态。反向电流越大,表明二极管的反向特性越差。硅管反向电流较小,约在 $1\mu\text{A}$ 以下,锗管反向电流达几微安到几十微安以上。

D 点以后：反向电压稍有增大，反向电流急剧增大，这种现象称为反向击穿。二极管发生反向击穿时所加的电压叫反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 。如果对反向击穿电流加以限制，PN 结就不会损坏，若不采取限制措施，PN 结将因过热而烧坏。

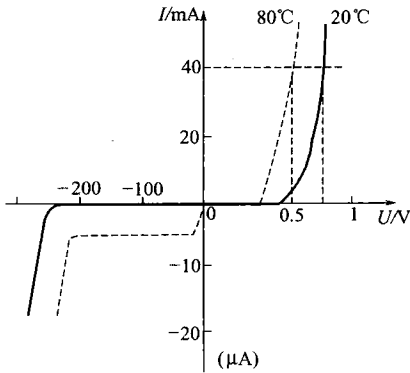
二极管未击穿之前的伏安特性还可以用二极管方程来表示：

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

式中， I_S 为反向饱和电流； U 为加在二极管两端电压； I 为流过二极管的电流； e 为自然对数的底； U_T 为温度电压当量，当 $T=300\text{K}$ 时， $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

2. 温度对二极管特性的影响

二极管的伏安特性对温度很敏感，随着温度升高，二极管正向特性曲线向左移动，反向



特性曲线向下移动，如图 1-1-14 所示。因为温度升高，扩散运动加强，同一正向电流所需的正向压降下降，所以正向特性向左移动，又因为温度升高，本征激发加强，少数载流子数目增加，在同一反向电压作用下，反向饱和电流增大。由此可知，反向特性向下移动。

由图 1-1-14 可知，温度升高，在同一正向电流下，二极管正向压降减小，即二极管正向压降有负温度系数，负温度系数为 $-2.4\text{mV}/^\circ\text{C}$ 左右。温度升高，二极管反向饱和电流 I_S 增大，反向击

图 1-1-14 温度对硅二极管伏安特性的影响

穿电压降低。一般温度每升高 10°C ，二极管反向饱和电流 I_S 约增加一倍。半导体器件手册上给出的参数指室温下的值，使用温度不同时应根据上述的分析作必要的修正。

1.1.4 半导体二极管的使用常识

1. 二极管的型号

国家标准 (GB 249—74) 规定，国产半导体器件的型号由五部分组成。符号及其意义见表 1-1-1。

2. 二极管的主要参数

二极管参数是定量描述二极管性能的质量指标。只有正确理解这些参数的意义，才能合理选用二极管。二极管主要有以下参数。

① 最大整流电流 I_{FM} 。最大整流电流 I_{FM} 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。 I_{FM} 是二极管的极限参数，在实际使用时，流过二极管的最大正向平均电流不能超过 I_{FM} ，否则二极管会因过热而损坏。

② 最大反向工作电压 U_{RM} 。最大反向工作电压 U_{RM} 是指二极管在使用时所允许加的最大反向电压。通常以二极管反向击穿电压的一半左右作为二极管最大反向工作电压。 U_{RM} 也是二极管的极限参数，在实际使用时所承受的最大反向电压不应超过此值，否则，二极管就有发生反向击穿的危险。

③ 反向电流 I_{RM} 。反向电流 I_{RM} 是指在室温下，二极管未击穿时的反向电流值，其值越小越好。

表 1-1-1 半导体器件型号组成部分的符号及其意义

第一部分		第二部分		第三部分				第四部分	第五部分
(用数字表示器件的电极数目)		(用汉语拼音字母表示器件的材料和极性)		(用汉语拼音字母表示器件的类型)					
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义		
2	二极管	A	N 型, 锗材料	P	普通管	D	低频大功率管 ($f_a < 3\text{MHz}$, $P_C \geq 1\text{W}$)	(用数字表示器件序号)	(用汉语拼音字母表示规格号)
		B	P 型, 锗材料	V	微波管				
		C	N 型, 硅材料	W	稳压管				
		D	P 型, 硅材料	C	参量管	A	高频大功率管 ($f_a \geq 3\text{MHz}$, $P_C \geq 1\text{W}$)		
3	三极管	A	PNP 型, 锗材料	Z	整流管				
		B	NPN 型, 锗材料	L	整流堆	T	半导体闸流管 (可控整流器)		
		C	PNP 型, 硅材料	S	隧道管				
		D	NNP 型, 硅材料	N	阻尼管				
		E	化合物材料	U	光电器件	Y	体效应器件		
				K	开关管	B	雪崩管		
				X	低频小功率管 ($f_a < 3\text{MHz}$, $P_C < 1\text{W}$)	J	阶跃恢复管		
				G	高频小功率管 ($f_a \geq 3\text{MHz}$, $P_C < 1\text{W}$)	CS	场效应器件		
						BT	半导体特殊器件		
						FH	复合管		
						PIN	PIN 型管		
						JG	激光器件		

④ 最高工作频率 f_M 。最高工作频率 f_M 是指保证二极管具有良好单向导电性能的最高工作频率。结电容越大, 则 f_M 越低, 当工作频率过高时, 二极管就会失去单向导电性能。此外, 二极管还有正向压降、结电容和最高结温等参数。

3. 二极管的直流电阻和交流电阻

由于二极管的伏安特性是非线性的, 所以二极管在电路中所呈现的电阻有直流电阻与交流电阻两种不同性质的电阻。

① 二极管的直流电阻 R_D (亦称静态电阻)。直流电阻 R_D 是指加在二极管上的直流电压 U 与流过管子的直流电流 I 之比, 即

$$R_D = \frac{U}{I} \tag{1-1-2}$$

二极管的正向直流电阻通常为几欧到几千欧, 当二极管加反向电压时, 由于反向电流极小, 所以反向直流电阻很大, 一般可达几百千欧, 甚至更大。用万用表 (欧姆挡) 测得的二极管电阻就是它的直流电阻。当用万用表电阻挡的不同量程去测同一只二极管的正向电阻时, 由于工作点的不同, 所得到的直流电阻会有很大差别。

② 二极管交流电阻 r_d (也叫动态电阻)。动态电阻 r_d 是指在工作点 Q 附近, 二极管上的电压变化量 ΔU 和对应的电流变化量 ΔI 之比, 即

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \tag{1-1-3}$$

通过 PN 结的方程也可求 r_d 。

$$r_d = \frac{26}{I_D} \tag{1-1-4}$$

式中, I_D 为二极管工作点 Q 处的直流电流, 单位为 mA, Q 点越高, 即 I_D 越大, r_d 越