



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪

高等院校电子信息类规划教材

Moni Dianzi
Jishu Jichu

模拟电子 技术基础

© 傅丰林 主编 王平 刘雪芳 编

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪高等院校电子信息类规划教材

模拟电子技术基础

傅丰林 主编

王 平 刘雪芳 编

人民邮电出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础 / 傅丰林主编 王平 刘雪芳编. —北京:
人民邮电出版社, 2008.10
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪高等院校电子信息类规划教材
ISBN 978-7-115-18188-6

I. 模… II. ①傅…②王…③刘… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 075261 号

内 容 简 介

本书包括晶体二极管及晶体三极管、放大器基础、场效应管放大器、负反馈放大器、低频功率放大器、模拟集成电路原理及其应用、直流稳压电源、电子线路的实际问题和电子线路仿真软件简介等 9 章内容。本书重点介绍模拟集成电路,增加了电流模集成运算放大器,删减了分立元件电路的内容,引入了计算机辅助分析进行电路模拟,加强了电路应用的介绍。书中附有大量的例题、思考题和习题。

本书可作为高等学校电子信息类及相关专业技术基础课教材或教学参考书,也可供有关专业的工程技术人员学习参考。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪高等院校电子信息类规划教材

模拟电子技术基础

-
- ◆ 主 编 傅丰林
编 王 平 刘雪芳
责任编辑 滑 玉
执行编辑 刘 博
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 18.5
字数: 449 千字
印数: 1—3 000 册
- 2008 年 10 月第 1 版
2008 年 10 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-18188-6/TN

定价: 29.80 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

本书是教育部“十一五”规划教材，是为电子信息类本科各专业编写的。

全书共分9章。第1章晶体二极管和晶体三极管，介绍半导体物理的基础知识，PN结的构成，二极管特性、参数和电路，双极晶体管的基本工作原理、特性和主要参数。第2章放大器基础，介绍了放大器的主要性能指标，放大器的基本分析方法，双极晶体管放大器，着重介绍集成电路中最常用的基本单元电路，包括电流源偏置电路、有源负载放大器等，本章还介绍了线性失真的基本概念，分析了基本单元电路的频率响应和单级放大器的频率特性工程计算方法，同时给出了多级放大器频率响应的计算方法。第3章场效应管放大器，介绍了结型和绝缘栅场效应晶体管的基本工作原理、特性和主要参数以及场效应管放大器，充实了MOS集成单元电路内容，并分析了衬调效应的影响。第4章负反馈放大器，介绍了4种类型负反馈放大器及其判别方法，提出了工程上估算的方法，用波特图对反馈放大器进行稳定性分析。第5章低频功率放大器，着重介绍互补推挽功率放大器的工作原理及其计算方法，并增加了音频丁类功率放大器的内容。第6章模拟集成电路原理及应用，介绍了组成集成运算放大器的差动放大器等单元电路、集成运算放大器的基本组态和基本应用以及可编程模拟集成电路，增加了在高速宽带中应用十分广泛的电流模集成运算放大器及其应用电路，介绍了“轨到轨”运放、低电压低功耗运算放大器，此外还介绍了模拟乘法器等内容。第7章直流稳压电源，主要介绍桥式整流滤波、三端稳压器和开关电源。第8章电子线路的接地和屏蔽，介绍了接地和屏蔽技术。第9章电子线路仿真软件介绍，着重介绍了应用较多的EWB和PSpice软件。

本书主要研究双极晶体管和场效应晶体管所构成的电子线路的原理、分析和计算，并着重讨论在集成电路中要用到的基本概念、基本原理、基本单元电路、基本分析方法以及模拟集成运算放大器和乘法器的基本应用。使用本书时可以根据教学要求进行取舍。作者充分注意到了电子线路这门课程国内外发展的状况，对本书删繁就简，更新了内容，加强了基本概念，增加了许多例题，并附有大量思考题与习题，注重工程计算，并引入了计算机辅助分析方法。

本书涉及内容丰富，概念很多，要求学生建立工程观点，学会工程建设分析的方法，实施起来一定困难不少。编者建议采用现代教学手段与传统教学方法相结合的办法，改变以往单一的教学模式。可以利用多媒体教学形象生动、图文并茂、色彩鲜艳和课堂信息量大等特点，通过视觉和听觉，全方位地帮助学生加深对问题的理解和记忆，启迪学生思维，提高教学和学习效率。同时，力求克服其局限性，实现多媒体教学与课堂板书的有机结合，留时间给学生记笔记，特别是让学生有思考的时间，避免“填鸭式”教学，保持传统教学方法中板书规范美观、语言表达优美、师生交流融洽等优点。

“模拟电子技术基础”是一门实践性很强的课程，必须重视实践、重视实验，贯彻理论联系实际的原则，只有这样才能对低频电子线路的基本概念、基本工作原理和基本分析方法理解透彻。本书强调应用，特别介绍了实际应用中应注意的一些问题。

本书由傅丰林主编、统稿，王平编写了第6章的部分内容、第7章和第9章，刘雪芳编写了第4章和第5章。由于作者水平有限，加之时间仓促，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编 者
2008年2月
西 安

目 录

第 1 章 晶体二极管和晶体三极管	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 载流子的运动方式及形成的电流	4
1.2 PN 结与晶体二极管	4
1.2.1 PN 结的基本原理	4
1.2.2 晶体二极管	6
1.2.3 晶体二极管电路	11
1.3 特殊二极管	12
1.3.1 稳压管	12
1.3.2 光敏二极管	14
1.3.3 发光二极管	14
1.3.4 变容二极管	15
1.4 晶体三极管	15
1.4.1 晶体三极管的结构与符号	15
1.4.2 晶体管的放大作用	16
1.4.3 晶体三极管特性曲线	18
1.4.4 晶体管的主要参数	20
思考题与习题	21
第 2 章 放大器基础	24
2.1 放大器的基本组成和主要性能指标	24
2.1.1 放大器的含义	24
2.1.2 放大器组成原则	24
2.1.3 放大器主要性能指标	26
2.1.4 放大器的传输特性	29
2.2 放大电路的分析方法	29
2.2.1 静态分析	29
2.2.2 动态分析	31
2.3 晶体管偏置电路	37
2.3.1 固定偏流偏置电路	37
2.3.2 分压式偏置电路	38
2.3.3 电流源偏置电路	38
2.4 放大器 3 种基本组态	42

2.4.1	共射放大电路	43
2.4.2	共基放大电路	44
2.4.3	共集放大电路	45
2.4.4	3种放大电路性能比较	46
2.4.5	射极带有电阻的共射放大器	47
2.4.6	有源负载放大器	50
2.5	多级放大器	53
2.5.1	耦合方式	53
2.5.2	多级放大器性能指标的计算	54
2.6	放大器的表示法	56
2.7	放大器的频率响应	57
2.7.1	线性失真	57
2.7.2	单级放大器的频率响应	63
2.7.3	多级放大器的频率响应	70
	思考题与习题	72
第3章	场效应管放大器	77
3.1	结型场效应管	77
3.1.1	结型场效应晶体管的结构	77
3.1.2	结型场效应管的工作原理	78
3.1.3	结型场效应管的特性曲线	78
3.2	绝缘栅场效应管	81
3.2.1	半导体的表面场效应	81
3.2.2	N沟道增强型MOS管	82
3.2.3	N沟道耗尽型MOS管	84
3.2.4	P沟道绝缘栅场效应管	85
3.3	场效应管的参数及特点	86
3.3.1	主要参数	86
3.3.2	场效应管的特点	88
3.4	场效应管放大器	89
3.4.1	直流偏置电路与静态分析	89
3.4.2	动态分析	91
3.5	场效应管放大器的频率响应	97
	思考题与习题	99
第4章	负反馈放大器	101
4.1	负反馈的基本概念	101
4.1.1	什么是负反馈	101
4.1.2	负反馈放大器的基本类型	102
4.2	负反馈对放大器性能的改善	104
4.3	反馈的判别及引入	111

4.3.1 反馈类型的判别	111
4.3.2 如何根据需要引入负反馈	114
4.4 负反馈放大器的分析方法	114
4.5 反馈放大器的稳定性	118
4.5.1 反馈放大器的稳定判据	118
4.5.2 反馈放大器的稳定裕度	119
4.5.3 相位补偿技术	121
思考题与习题	122
第5章 低频功率放大器	126
5.1 概述	126
5.1.1 功率放大器的主要性能指标	126
5.1.2 功率放大器的分类	127
5.2 互补推挽功率放大器	128
5.2.1 乙类推挽功率放大器的工作原理	128
5.2.2 乙类推挽功率放大器的分析计算	128
5.2.3 乙类推挽功率放大器的非线性失真	131
5.3 功率放大器的保护电路	133
5.3.1 功放管的管耗与散热	133
5.3.2 保护电路	134
5.4 其他形式的功放电路简介	135
5.4.1 单电源供电的互补推挽电路	135
5.4.2 准互补推挽功率放大器	135
5.4.3 场效应管功率放大器	136
5.5 功放实际线路举例	137
思考题与习题	138
第6章 模拟集成电路原理及其应用	140
6.1 直流信号的放大	142
6.2 差动放大器	143
6.2.1 差动放大器的基本形式	143
6.2.2 改进电路	144
6.2.3 差动放大器输入任意信号时的分析	148
6.2.4 差动放大器的几种接法	150
6.2.5 差动放大器的传输特性	153
6.2.6 差动放大器的失调和温漂	156
6.3 集成运算放大器的组成	158
6.3.1 双极集成运放的组成	158
6.3.2 MOS集成运算放大器的组成	159
6.4 集成运算放大器的性能参数和模型	160
6.4.1 性能参数	160

6.4.2 模型	164
6.5 理想运放及运放基本组态	164
6.5.1 理想集成运算放大器	164
6.5.2 理想运放的传输特性	165
6.5.3 集成运放的基本组态	166
6.6 集成运算放大器的应用	167
6.6.1 信号放大及检测电路	168
6.6.2 信号运算电路	171
6.6.3 信号处理电路	174
6.6.4 集成运放使用时的注意问题	185
6.7 实际集成运放电路的误差分析	186
6.8 在系统可编程模拟器件 ispPAC	189
6.8.1 概述	189
6.8.2 在系统可编程模拟电路器件 ispPAC10 的电路结构	190
6.8.3 在系统可编程模拟器件 ispPAC10 的设计与应用	191
6.9 电流模式运算放大器	194
6.9.1 电流模式电路的主要特点	194
6.9.2 跨导线性电路	195
6.9.3 电流反馈运算放大器	198
6.10 模拟乘法器	204
6.10.1 双平衡模拟乘法器	204
6.10.2 线性化可变跨导型模拟乘法器	205
6.10.3 单片集成通用型乘法器	208
6.10.4 乘法器的应用举例	209
6.11 低压低功耗模拟集成电路	210
6.11.1 低压低功耗模拟集成电路	210
6.11.2 集成电路的低功耗设计技术	211
6.11.3 实际低压低功耗芯片举例	212
思考题与习题	214
第7章 直流稳压电源	221
7.1 整流与滤波	221
7.1.1 半波整流电路	221
7.1.2 全波整流电路	223
7.1.3 桥式整流电路	223
7.1.4 平滑滤波器	224
7.1.5 整流电路设计举例	225
7.1.6 稳压电源的主要性能指标	226
7.2 线性集成稳压器	226
7.2.1 三端固定电压式集成稳压器	227

7.2.2 三端可调式集成稳压器	229
7.3 开关型稳压电源	231
思考题与习题	233
第8章 电子线路的实际问题	235
8.1 接地	235
8.1.1 接地的作用和类型	235
8.1.2 电路接地的方式	238
8.2 电子线路中常见的干扰及其抑制方法	239
8.2.1 干扰的来源	239
8.2.2 抑制干扰的方法	239
思考题与习题	243
第9章 电子线路仿真软件简介	244
9.1 EWB 仿真软件简介	244
9.1.1 Multisim10 操作界面介绍	245
9.1.2 利用 Multisim10 创建电路	247
9.1.3 利用 Multisim10 进行电路仿真	250
9.1.4 Multisim10 在模拟电子线路基础中的应用	258
9.2 PSpice 仿真软件简介	269
9.2.1 PSpice 的基本组成	270
9.2.2 PSpice 学生版及其可执行的仿真分析	271
9.2.3 利用 PSpice 进行模拟电子电路的仿真	272
9.3 Multisim 和 PSpice 的功能比较	283
思考题与习题	285
参考文献	286

第 1 章 晶体二极管和晶体三极管

本章首先介绍半导体的基础知识，然后介绍 PN 结的单向导电原理、结的击穿和结的电容效应，给出晶体二极管的伏安特性、主要参数和等效电路，并列举了一些晶体二极管的应用电路，着重介绍晶体三极管的工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体的基础知识

物质按其导电能力可分为导体、绝缘体和半导体三种。通常人们把容易导电的物质称为导体，如金、银、铜等；把在正常情况下很难导电的物质称为绝缘体，如陶瓷、云母、塑料、橡胶等；把导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体，如硅和锗。导体、半导体和绝缘体的划分，严格地说是以物质的电阻率 ρ 的大小来确定的。电阻率小于 $10^{-3}\Omega \cdot \text{cm}$ 的称为导体；电阻率大于 $10^8\Omega \cdot \text{cm}$ 的称为绝缘体；电阻率在导体和绝缘体之间的称为半导体。

半导体之所以受到人们的高度重视，并获得广泛的应用，不是因为它的电阻率介于导体和绝缘体之间，而是因为它具有不同于导体和绝缘体的独特性质。这些独特的性质集中体现在它的电阻率可以因某些外界因素的改变而明显地变化，具体表现在以下 3 个方面。

(1) 热敏性：一些半导体对温度的反应很灵敏，其电阻率随着温度的上升而明显地下降，利用这种特性很容易制成各种热敏元件，如热敏电阻、温度传感器等。

(2) 光敏性：有些半导体的电阻率随着光照的增强而明显地下降，利用这种特性可以做成各种光敏元件，如光敏电阻和光电管等。

(3) 掺杂性：半导体的电阻率受掺入“杂质”的影响极大，在半导体中即使掺入的杂质十分微量，也能使其电阻率大大地下降，利用这种独特的性质可以制成各种各样的半导体器件。

半导体为什么会具有上述特性呢？要回答这个问题，必须研究半导体的内部结构。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是指纯净的、不含杂质的半导体。在近代电子学中，用得最多的半导体是硅和锗，它们的原子结构示意图如图 1-1 所示。由图 1-1 可知，硅和锗的外层电子都是 4 个，外层电子受原子核的束缚力最小，称为价电子。物质的导电性与价电子数有很大关系。有九

个价电子就称为几价元素，硅和锗都是四价元素。

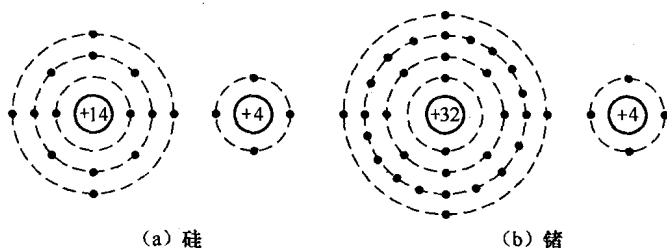


图 1-1 原子结构示意图

在导体中，由于金属物质的原子，其外层电子离原子核较远，受原子核的吸引力就很小，因此就有大量的电子能挣脱原子核的束缚而成为自由电子，这就是导体具有良好导电能力的原因。

在绝缘体中，其外层电子离原子核较近，受原子核的束缚力很大，几乎没有自由电子存在，因此它不导电，即绝缘体在正常情况下是绝缘的。在特定条件下，如在绝缘体两端加上特别高的电压，把外层电子强行“拉”出来，这时绝缘体就变成了导体，这种现象称为击穿。

在硅和锗等半导体材料中，内部原子排列是有规律的，即为晶体结构。晶体硅（或锗）的原子排列示意图如图 1-2 (a) 所示。每个硅原子受邻近 4 个原子的束缚，组成 4 个共价键。共价键像纽带一样将排列整齐的原子联结起来，如图 1-2 (b) 所示。

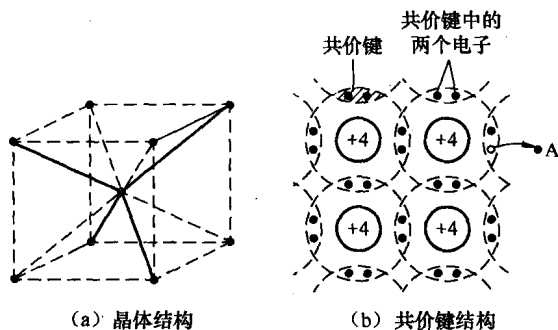


图 1-2 硅晶体结构和共价键结构示意图

在热力学温度 0 度 ($0\text{K} = -273^\circ\text{C}$) 时，价电子无法挣脱共价键的束缚，本征半导体中没有自由电子，此时半导体相当于绝缘体。但在常温下，少量价电子受热激发获得足够的能量，挣脱了共价键的束缚而成为自由电子，如图 1-2 (b) 中的价电子 A。同时，在原来共价键的位置上留下一个空位，称为空穴。在外加电场或其他能源的作用下，邻近价电子就可填补到这个空位上，而在这个电子原来的位置上又留下新的空位，随后其他电子又可转移到新空位上，因此空穴能参与导电。空穴是由于失去一个电子而形成的，空穴可以看成带正电的载流子。可见，在热激发下，本征半导体中存在两种能参与导电的载运电荷的粒子——载流子：成对的电子和空穴。因此，在常温下，本征半导体不再是绝缘体了，但常温下由热激发产生的电子-空穴对的数量是很少的，这就是本征半导体导电能力很差的原因。

需要指出，由热激发产生的自由电子，也会释放能量返回到附近的空穴，这种现象称为复合。

除了上面讨论的热激发以外，也可利用光照进行激发。热激发和光激发统称为本征激发。

在本征半导体中，随着温度的升高或光照的增强，电子-空穴对的数量将大大增加，导电能力将大大提高，这就是半导体具有热敏性和光敏性的基本原理。

1.1.2 杂质半导体

杂质半导体是指在本征半导体中掺入了微量其他元素（称为杂质）的半导体。杂质的掺入可以使半导体的导电性能发生显著的变化。根据掺入的杂质不同，杂质半导体可分为N型（电子）半导体和P型（空穴）半导体两大类。

1. N型半导体

在本征半导体中掺入少量五价元素（磷、砷、锑等）磷，由于磷原子数目比硅原子要少得多，因此整个晶体结构基本不变，只是某些位置上的硅原子将被磷原子所代替，磷原子有五个价电子，其中四个价电子与邻近的硅原子的价电子形成共价键，剩下的一个价电子虽然还受到磷原子的束缚，但是这种束缚作用终究要比共价键的束缚作用微弱得多。只要给这个价电子较小的能量，它就能挣脱磷原子的束缚而成为自由电子，磷原子释放出多余的价电子后，因失去电子而成为正离子，如图1-3所示。把这类能释放电子的杂质称为施主杂质，这一释放过程称为施主杂质电离。可见每掺入一个施主杂质原子，电离后就产生一个电子和一个正离子，它们是成对产生的。电子是能自由运动的，而正离子是不能运动的。此外，杂质半导体中同样存在热激发，产生少量的电子-空穴对。因此自由电子数远大于空穴数，这种使电子浓度大大增加的杂质半导体称为N型半导体。我们称自由电子为多数载流子（简称多子），而称空穴为少数载流子（简称少子）。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素（硼、铝、镓等）硼，由于硼原子数量比硅原子要少得多，因此整个晶体结构基本不变，只是某些位置上的硅原子被硼原子所代替。硼原子只有三个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空位，周围共价键中的电子很容易运动到这里来，于是形成一个空穴，而硼原子由于多了一个电子而成为不能运动的负离子，如图1-4所示。把这类能接受电子的杂质称为受主杂质，这个接受过程称为受主杂质电离。可见每掺入一个受主杂质原子，电离后就产生一个空穴和一个负离子，它们是成对产生的。此外，杂质半导体中同样存在热激发，产生少量的电子-空穴对。因此空穴数远大于自由电子数，使得空穴浓度大大增加，故称之为P型半导体。显然在P型半导体中，空穴是多数载流子，而自由电子是少数载流子。

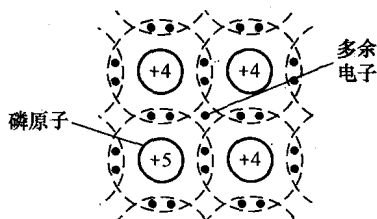


图1-3 N型半导体的共价键结构

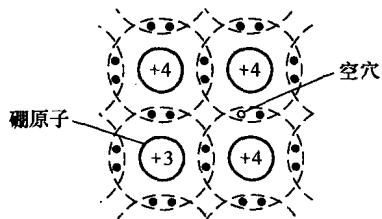


图1-4 P型半导体的共价键结构

综上所述，本征半导体中掺入微量杂质元素构成杂质半导体后，在常温下杂质原子均已电离，载流子浓度大大增加，半导体的导电能力显著提高，因此掺杂是提高半导体导电能力

的最有效方法。还需指出，无论是N型半导体还是P型半导体，其正负电荷量是相等的，呈电中性。

1.1.3 载流子的运动方式及形成的电流

通过上面分析可以知道，半导体中有两种载流子：电子和空穴。当 $T > 0K$ 时，载流子作热运动，各向机会均等，不形成电流，但在一定条件下会形成有规则的定向运动。

1. 扩散运动和扩散电流

当载流子浓度分布不均匀时，就会产生一种扩散力，这种扩散力将使载流子浓度分布朝着趋向均匀的方向去改变。载流子受扩散力的作用所作的运动称为扩散运动。载流子扩散运动所形成的电流称为扩散电流。显然，载流子浓度分布越不均匀，扩散力就越强，形成的扩散电流就越大，即扩散电流与载流子浓度梯度成正比。

2. 漂移运动和漂移电流

载流子在电场力作用下所作的运动称为漂移运动，载流子漂移运动所形成的电流称为漂移电流。显然，电场越强，漂移电流越大，即漂移电流与电场强度成正比。

1.2 PN结与晶体二极管

1.2.1 PN结的基本原理

1. PN结的形成

在一块本征半导体上，用工艺的方法使其一边形成P型半导体，另一边形成N型半导体，则在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差，电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散，即P区的一些空穴要向N区扩散，N区的一些电子要向P区扩散，如图1-5(a)所示。

由于载流子的扩散运动，破坏了P区和N区原有的电中性。P区一边失去空穴，留下了带负电的受主离子(图1-5(b)中用 \ominus 表示)，N区一边失去电子，留下了带正电的施主离子(图1-5(b)中用 \oplus 表示)。通常称这些不能运动的正、负离子为空间电荷，它们集中在P区和N区界面附近，形成了一个空间电荷区，叫做PN结。

由于空间电荷区中存在正、负离子，则空间电荷区中存在电场，称为内建电场。电场方

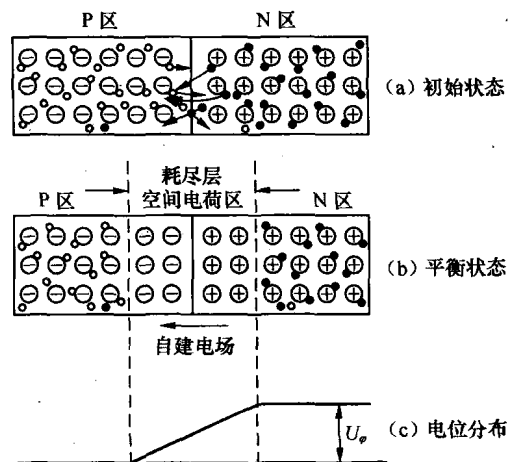


图1-5 平衡状态下的PN结

向是由 N 区指向 P 区，N 区的电位要比 P 区高，高出的数值用 U_p 表示，称为接触电位差，如图 1-5 (c) 所示。 U_p 的数值一般小于 1V。需要指出的是，内建电场将阻止 P 区的多数载流子空穴向 N 区继续扩散和 N 区的多数载流子电子向 P 区继续扩散。同时，内建电场将使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移。

可见载流子存在两种运动方式——扩散运动和漂移运动，它们是互相联系又互相矛盾的。当漂移运动和扩散运动相等时，便处于动态平衡，形成稳定的空间电荷区，即 PN 结，这时多数载流子扩散运动所形成的扩散电流和少数载流子漂移运动所形成的漂移电流，大小相等、方向相反。因此，在无外加电场或其他激发因素作用时，PN 结没有电流通过。

顺便指出，空间电荷区又称耗尽层，这是因为在空间电荷区可以运动的载流子已经耗尽。空间电荷区也称势垒区，这是因为 PN 结存在接触电位差 U_p ， U_p 又称为势垒高度。

2. PN 结的单向导电性

(1) PN 结加正向电压

P 区接外加电源的正极，N 区接电源的负极称为 PN 结加正向电压（也称正向偏置），如图 1-6 (a) 所示。由于外加电压与 PN 结的内建电场方向相反，从而使内建电场削弱，这样就打破了原有的平衡状态，使 P 区中的多数载流子空穴和 N 区中的多数载流子电子都要向空间电荷区运动。当 P 区的空穴和 N 区的电子进入空间电荷区后，就要分别中和一部分负离子和正离子，使空间电荷量减少，空间电荷区宽度变窄，势垒的高度也由原来 U_p 下降为 $U_p - U$ ，如图 1-6 (b) 所示。这就使得 P 区和 N 区能越过这个势垒的多数载流子的数量大大增加，形成较大的扩散电流。当然，这时也存在由少数载流子形成的漂移电流，但由热激发产生的少子（少数载流子）数量是十分有限的，少子漂移电流对总电流的影响可以忽略不计。当管子制成后，漂移电流大小取决于温度，而几乎与外加电压无关。所以当 PN 结加正向电压时，通过 PN 结的电流主要是扩散电流，它随着外加电压 U 的增加而迅速上升，表明 PN 结这时呈现一个很小的电阻。这种状态称为 PN 结处于导通状态。

(2) PN 结加反向电压

P 区接外加电源的负极，N 区接电源的正极称为 PN 结加反向电压（也称反向偏置），如图 1-7 (a) 所示。外加电压所产生的电场与 PN 结的内建电场方向相同，加强了内建电场，使 PN 结靠近 P 区的空穴向左运动，靠近 PN 结 N 区的电子向右运动，从而使空间电荷区加

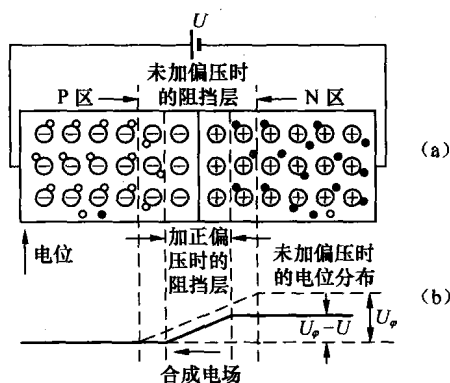


图 1-6 PN 正向运用

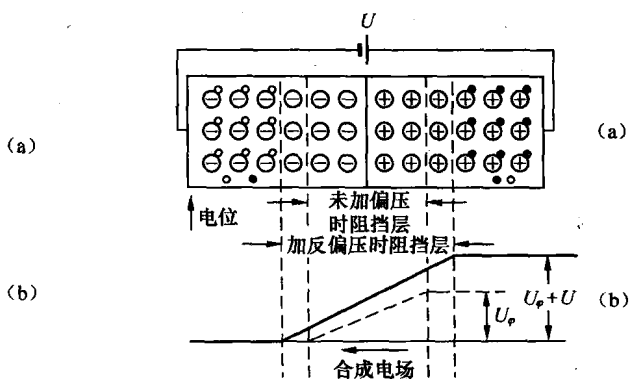


图 1-7 PN 反向运用

宽，势垒的高度也由原来的 U_{ϕ} 上升到 $U_{\phi} + U$ ，如图 1-7 (b) 所示。于是多数载流子的扩散运动就很难进行，扩散电流趋于 0。但是由于内建电场的增强，使 P 区和 N 区中的少数载流子更容易产生漂移运动，这时通过 PN 结的电流就是漂移电流，称为反向电流。它基本上不随外加电压变化，故又称为反向饱和电流，用 I_s 表示。其数值是很小的，表明 PN 结呈现一个很大的电阻，或者说 PN 结加反向电压时，可以认为基本上是不导电的，这种状态称为 PN 结处于截止状态。

由上述分析可知，当 PN 结加正向电压时，势垒高度降低，扩散电流远大于漂移电流，正向电流较大；当 PN 结加反向电压时，势垒高度增加，仅有很小的反向饱和电流，这种正向导通、反向截止（忽略 I_s ）的现象即为 PN 结的单向导电特性。

1.2.2 晶体二极管

1. 晶体二极管的结构

晶体二极管（下称二极管）是由 PN 结、电极引线和管壳构成的。按其结构特点可分为点接触型、面结合型和平面型三大类，如图 1-8 所示。

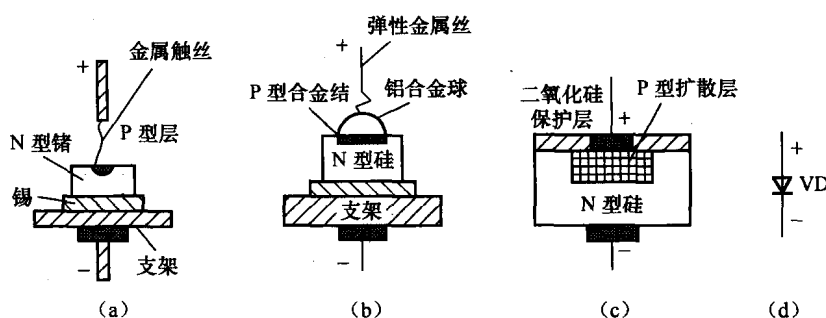


图 1-8 晶体二极管结构与符号

(1) 点接触型二极管，如图 1-8 (a) 所示。它利用一根很细的金属触须压在一块锗或硅晶片上，利用电形成工艺来获得 PN 结。结面积很小，所以结电容小，但不允许通过大电流，它适用于高频检波、小电流整流及小功率开关电路。

(2) 面结合型二极管，如图 1-8 (b) 所示。它的 PN 结是用合金法做成的。由于结面积大，可以承受较大的电流，但结电容也大，适用于低频整流和低速开关电路。

(3) 平面型二极管，如图 1-8 (c) 所示。二氧化硅是保护层，保护 PN 结不受污染，使二极管漏电流小，工作稳定。结面积大的适用于大功率整流，结面积小的适用于高频及高速开关电路。

二极管的符号如图 1-8 (d) 所示。

2. 晶体二极管的伏安特性

二极管的伏安特性可通过二极管的电流与外加电压的关系曲线表示，图 1-9 所示为实测的二极管伏安特性。可把伏安特性分为 3 部分来分析。

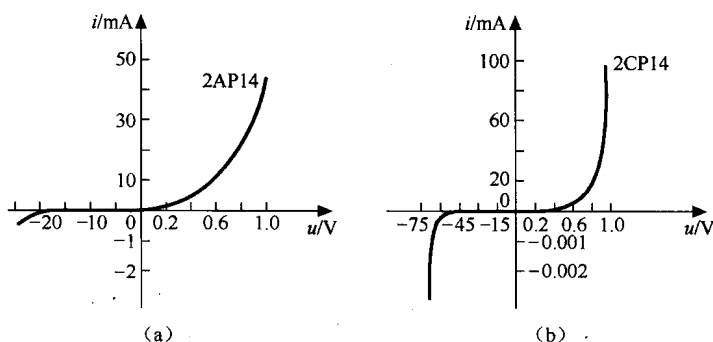


图 1-9 二极管伏安特性

(1) 正向特性。正向运用时，仅当外加电压超过某一数值时，电流才有明显增长，这个电压值叫门限电压或开启电压，用 U_r 表示。通常可根据实际特性，曲线上部（很接近直线的部分）作延长线，将延长线与横轴交点的电压值定为 U_r 。锗管的 U_r 约为 0.2V，硅管的 U_r 约为 0.6V。

正向特性只在小电流范围才比较符合指数规律。电流较大时，曲线几乎接近直线，这是因为电流大时，PN 结耗尽层的电阻比结外半导体的体电阻以及电极接触电阻都小，而后者均为线性电阻，因此伏安特性接近线性关系。

(2) 反向特性。反向运用时，反向特性并不完全呈水平线，它有一定斜度，这是因为 PN 结有漏电阻存在。

(3) 击穿特性。当反向电压超过一定限度时，反向电流将急剧增加，这种现象叫做 PN 结的击穿，分雪崩击穿和齐纳击穿两种。

① 雪崩击穿。当反向电压足够高时，空间电荷区的电场较强，通过空间电荷区的电子和空穴在强电场的作用下加速获得很大的动能，于是有可能和晶体结构中的外层电子碰撞而使其脱离原子的束缚。被撞出来的载流子在获得一部分能量之后，又可以去碰撞其他外层电子，这种连锁反应就造成了载流子突然剧增的现象，犹如雪山发生雪崩一样，所以这种击穿称为雪崩击穿或碰撞击穿。

② 齐纳击穿（隧道击穿）。当反向电压足够高，空间电荷区中的电场强度达到 $10^5V/cm$ 以上时，可把共价键中的电子拉出来，产生电子-空穴对，使载流子突然增多，产生击穿现象，称为齐纳击穿。

一般在掺入杂质浓度小的 PN 结中，空间电荷区比较宽，击穿主要为雪崩击穿，击穿时所加的外电压（也叫击穿电压，用 U_z 表示）一般在 6V 上。在掺杂浓度大的 PN 结中，空间电荷区较窄，击穿主要为齐纳击穿，其击穿电压一般在 6V 以下。击穿电压在 6V 左右的 PN 结常兼有两种击穿现象。

需要指出的是，击穿并不意味着 PN 结的损坏，只要击穿后流过 PN 结的电流不超过某一限度（可以在 PN 结外电路上加接限流电阻来达到限制电流的目的），PN 结可保持完整无损且击穿现象可以重复发生。PN 结击穿后结电流急剧变化而 PN 结两端的电压却基本保持不变。利用这一特性可以做成稳压管， U_z 就是稳压管的稳定电压，即稳压值。

(4) 伏安特性与温度的关系。环境温度对二极管的正向特性、反向特性、击穿特性都有影响，如图 1-10 所示。