

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



模拟电子技术基础

刘伟静 主编
刘增强 副主编
王春明 杨宇 于颜儒 编著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



模拟电子技术基础

刘伟静 主编

刘增强 副主编

王春明 杨宇 于颜儒 编著

常州大学图书馆
藏书章

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是一本学习模拟电子技术的基础教材。全书内容分为8章:第1章,常用半导体器件;第2章,基本放大电路;第3章,放大电路的频率响应;第4章,场效应管及其放大电路;第5章,放大电路中的反馈;第6章,集成运算放大器及其应用;第7章,功率放大电路;第8章,直流电源。本书内容简明,附有章节习题要点,并可为任课教师提供多媒体课件。

本书立足于应用型人才的培养,可作为电子信息类各专业平台课程教材,还可作为应用型本科电子类的专业教材或供有关工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/刘伟静主编. —北京:清华大学出版社,2018

(21世纪高等学校规划教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-47254-4

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第125957号

责任编辑:刘向威 李 晔

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁 毅

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:三河市君旺印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.5

字 数:426千字

版 次:2018年3月第1版

印 次:2018年3月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:069767-01

前言

“模拟电子技术”课程是电子技术类专业的专业基础课程,使学生掌握电子学方面的基础知识。该课程的特点是元器件工作原理复杂,有许多概念较难理解,因此难学、难懂。为了帮助学生很好地掌握该课程,编者编写了本书,在编写过程中,我们注意了以下几个问题。

1. 保证基础,突出集成

作为基础课程,本书在内容上保留了必要的基础知识,以免在内容叙述上出现断层,保证了学习的连贯性;又为了进一步适应电子信息类专业发展的特点,删除了大量分立元件电路,重点突出了集成运放的使用,并且针对集成运放附有大量习题,以供参阅与练习。

2. 减少理论推导,立足应用

本书在内容方面与传统教材相比做了一些调整,对于内部原理部分按照够用的原则稍作介绍,重点介绍各类器件的实际使用,立足于应用型人才的培养模式的需求,结合电子信息类本科专业的特点,既具备一定的理论深度,又具有大量的实例,在每章的最后一节都有 Multisim 10 的应用举例,借助仿真软件可以清楚地观察到电路连接或改变电路参数对电路性能的影响,有效解决了抽象理论和实践环节脱节的问题,再通过实例练习,将理论与实践连接起来,帮助学生理论的学习和掌握。

本书各章习题数目较多,习题与教材内容紧密配合,深度适当,这样可使教师在选择习题时比较灵活,同时又可满足部分同学想多做一些习题的要求。书末附有部分习题答案要点,以供校核。

本书由刘伟静担任主编,刘增强担任副主编。其中第 2 章、第 6 章和附录由刘伟静编写,第 3 章由刘增强编写,第 1 章和第 8 章由王春明编写,第 4 章和第 7 章由杨宇编写,第 5 章由于颜儒编写。刘伟静负责全书的统稿和定稿工作。

在此,向所有关心支持和帮助本书编写出版的同志致以诚挚的敬意!

由于编者的能力和水平有限,对于书中的不足和不完善之处,恳请读者及同行给予批评指正,以便今后修订提高。

编 者

2017 年 11 月

第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体材料	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	3
1.1.4 PN 结及其单向导电性	4
1.2 半导体二极管	7
1.2.1 二极管的伏安特性	7
1.2.2 二极管的主要参数	9
1.2.3 特殊二极管	9
1.2.4 二极管的应用	11
1.3 双极型三极管	13
1.3.1 三极管的结构	13
1.3.2 三极管的工作原理	14
1.3.3 三极管的特性曲线	16
1.3.4 三极管的主要参数	18
1.4 软件仿真	20
1.4.1 二极管单向导电性测试电路	20
1.4.2 二极管钳位电路	21
1.4.3 三极管放大电路	22
本章小结	23
习题 1	24
第 2 章 基本放大电路	26
2.1 放大的概念	26
2.2 放大电路的主要技术指标	27
2.3 基本共射放大电路	29
2.3.1 基本共射放大电路的组成	29
2.3.2 基本共射放大电路的分析方法	29
2.4 静态工作点稳定电路	41
2.4.1 温度对静态工作点的影响	41
2.4.2 静态工作点稳定电路	42

2.5	基本共集放大电路和基本共基放大电路	45
2.5.1	基本共集放大电路	45
2.5.2	基本共基放大电路	48
2.5.3	三种基本放大电路的比较	49
2.6	多级放大电路	49
2.6.1	多级放大电路的耦合方式	49
2.6.2	多级放大电路的分析	50
2.7	差分放大电路	51
2.7.1	典型的实用差分放大电路分析	51
2.7.2	其他接法差分放大电路	54
2.7.3	改进型的差分放大电路	57
2.8	软件仿真	58
2.8.1	基本共射放大电路设计	58
2.8.2	仿真分析	58
2.9	本章小结	60
习题 2		61

第 3 章 放大电路的频率响应 68

3.1	放大器的频率响应	68
3.2	三极管的频率参数	71
3.2.1	共射极截止频率	72
3.2.2	特征频率	72
3.2.3	共基极截止频率	73
3.3	单级阻容耦合共射极放大电路的频率响应	74
3.3.1	单级阻容耦合共射极放大电路的低频特性	74
3.3.2	单级阻容耦合共射极放大电路的高频特性	77
3.3.3	全频段的频率响应	81
3.4	软件仿真	82
3.4.1	电路设计	82
3.4.2	仿真分析	82
3.5	本章小结	83
习题 3		83

第 4 章 场效应管及其放大电路 84

4.1	场效应三极管	84
4.1.1	结型场效应管	84
4.1.2	绝缘栅型场效应管	89
4.1.3	场效应管的主要参数	94
4.2	场效应管放大电路	96

4.2.1 共源组态基本放大电路	96
4.2.2 共漏组态基本放大电路	99
4.3 软件仿真	102
4.4 本章小结	104
习题 4	104
第 5 章 放大电路中的反馈	108
5.1 反馈的基本概念和判定方法	108
5.1.1 反馈的基本概念	108
5.1.2 反馈的判断	109
5.2 负反馈放大电路的四种基本组态	112
5.2.1 电压串联负反馈	113
5.2.2 电压并联负反馈	115
5.2.3 电流串联负反馈	116
5.2.4 电流并联负反馈	117
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	118
5.3.1 对放大倍数和稳定性的影响	118
5.3.2 对输入电阻的影响	119
5.3.3 对输出电阻的影响	121
5.3.4 对非线性失真和通频带的影响	122
5.4 深度负反馈放大电路的分析计算	124
5.4.1 深度负反馈放大器放大倍数的估算	124
5.4.2 电压串联负反馈电路	125
5.4.3 电压并联负反馈电路	126
5.4.4 电流串联负反馈电路	127
5.4.5 电流并联负反馈电路	128
5.5 负反馈放大电路的自激振荡	130
5.5.1 产生自激振荡的原因及条件	130
5.5.2 稳定工作的条件及稳定性分析	131
5.6 软件仿真	132
5.6.1 负反馈电路设计	132
5.6.2 负反馈对非线性失真的影响	133
本章小结	134
习题 5	135
第 6 章 集成运算放大器及其应用	141
6.1 集成运算放大器概述	141
6.1.1 集成运放的基本组成	141
6.1.2 集成运放的主要参数	142

6.1.3	集成运放的电压传输特性曲线	144
6.1.4	理想运算放大器及其分析依据	144
6.2	集成运算放大器在信号的运算与处理方面的应用	145
6.2.1	基本运算电路	145
6.2.2	有源滤波电路	156
6.3	集成运算放大器在波形的产生方面的应用	161
6.3.1	正弦波振荡电路	161
6.3.2	电压比较器	168
6.3.3	非正弦波发生电路	173
6.4	软件仿真	178
6.4.1	电压跟随器	178
6.4.2	过零比较器	179
6.5	本章小结	180
习题 6		181
第 7 章	功率放大电路	189
7.1	功率放大电路的特点及分析	189
7.2	甲类功率放大电路	194
7.3	乙类互补对称功率放大电路	195
7.3.1	电路组成和工作原理	195
7.3.2	分析计算	196
7.3.3	交越失真	198
7.4	甲乙类互补对称功率放大电路	199
7.5	软件仿真	203
7.6	本章小结	206
习题 7		206
第 8 章	直流电源	211
8.1	直流电源的组成	211
8.2	整流电路	212
8.2.1	半波整流	212
8.2.2	全波整流	213
8.2.3	桥式整流	215
8.3	滤波电路	217
8.3.1	电感滤波	217
8.3.2	电容滤波	219
8.4	稳压电路	220
8.4.1	稳压管稳压电路	221
8.4.2	串联型稳压电路	223

8.5 软件仿真	229
8.5.1 全波整流滤波电路	229
8.5.2 直流稳压电源电路	231
本章小结	232
习题 8	232
附录 Multisim 10 简介	235
习题答案	245
参考文献	270

常用半导体器件

本章学习目标

- 了解本征半导体、杂质半导体和 PN 结的形成
- 掌握二极管的工作原理、伏安特性和主要参数
- 掌握三极管的工作原理、共射输入特性和输出特性曲线、主要参数等

本章从半导体材料的基本结构及 PN 结的形成入手,重点讲述 PN 结的单向导电性、伏安特性曲线及主要参数,介绍了一些特殊的二极管以及二极管的应用。之后进一步讲述了三极管的工作原理、共射输入特性和输出特性曲线、主要参数等。

1.1 半导体的基本知识

自然界的各种物质就其导电性能来说,可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。半导体具有介于绝缘和导电之间的特性,经过现代电子工艺的特殊加工,其导电性能可控并且能适应现代电路设计的需要,在电子工业领域得到了广泛的应用。

1.1.1 半导体材料

自然界中的物质可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。如金、银、铜、铝、铁等在常温下,内部存在着大量的自由电子,在外电场的作用下能做定向运动形成较大的电流,是导电性能良好的物质,属于导体。一般来说,金属都是导体。陶瓷、玻璃、橡胶、塑料等在一般条件下内部几乎没有自由电子,即使受外电场作用也不会形成电流,不能导电,属于绝缘体。而半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,举例来说,如硅、锗、硒、砷化镓、磷化铟、氮化镓、碳化硅以及大多数金属氧化物和硫化物等都属于半导体。制作半导体器件最常用的材料是硅和锗。半导体大体上可以分为两类,即本征半导体和杂质半导体。

1.1.2 本征半导体

本征半导体是纯净的单晶体。所谓单晶体,是指原子按照一定的规律整齐排列的晶体。纯净的半导体需要经过特殊工艺制成单晶体,才能成为本征半导体。这里的纯净包括两个意思:一是指半导体材料中只含有一种元素的原子;二是指原子与原子之间的排列是有一定规律的,即具有晶体结构。

1. 本征半导体的载流子

半导体器件最常用的材料硅和锗,都是单晶体结构。如图 1.1 所示,在硅和锗的原子结构中,最外层都有 4 个电子,这 4 个电子称为价电子,所以它们都是四价元素。单晶体的原子与原子之间会形成所谓的共价键结构,如图 1.2 所示。在绝对零度时,电子被共价键束缚得很紧,不能自由移动,因此不能导电。但是,半导体中的价电子不像绝缘体中的电子那样被紧紧束缚着,当温度升高或者受到光照时,由于热能的作用使一部分共价键被破坏,其价电子脱离这种结合而能在晶体之间自由运动,成为自由电子。同时,共价键就留下了一个空位,称为空穴。这种现象称为本征激发或热激发,如图 1.3 所示。因热激发而出现的自由电子和空穴是同时成对出现的,所以称为电子空穴对。在价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,自由电子和空穴分别带负电和正电,它们都称为载流子。半导体具有两种载流子是其重要特点,并因此而有别于金属导体。

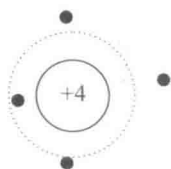


图 1.1 硅原子结构图

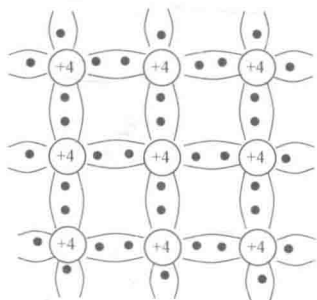


图 1.2 共价键结构图

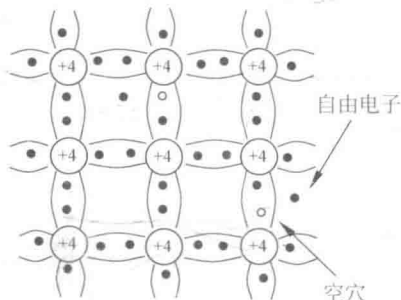


图 1.3 自由电子与空穴

价电子可以因热激发而成为自由电子,同时,游离的部分自由电子也可能回到空穴中去,称为复合,所以本征激发和复合在一定温度下会达到动态平衡。所以在一定温度下本征半导体中载流子的浓度是一定的,并且自由电子与空穴的浓度相等。

本征半导体的载流子的浓度与温度相关。理论分析表明,本征半导体的载流子浓度可以表示为

$$n_i = p_i = K_1 T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_{GO}}{2kT}} \quad (1.1)$$

上式中, n_i 、 p_i 代表的是自由电子、空穴的浓度(cm^{-3}),这两者是相等的。 T 为热力学温度, k 为玻尔兹曼常数($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), E_{GO} 为热力学零度时破坏共价键所需的能量,又称禁带宽度(硅为 1.21 eV , 锗为 0.785 eV), K_1 是与半导体材料载流子有效质量、有效能级密度有关的常量(硅为 $3.87 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-\frac{3}{2}}$, 锗为 $1.76 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-\frac{3}{2}}$)。当 $T=0\text{K}$ 时,自由电子与空穴的浓度均为零,本征半导体成为绝缘体;在一定范围内,当温度升高时,本征半导体载流子的浓度近似按指数曲线升高。在常温下,即 $T=300\text{K}$ 时,硅材料的本征载流子浓度为 $n_i = 1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 锗材料的本征载流子浓度为 $p_i = 2.38 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

2. 本征半导体中的导电特性

当在本征半导体两端外加一个电场时,一方面自由电子将产生定向移动,形成电子电流;另一方面由于空穴的存在,价电子将按一定的方向依次填补空穴,也就是说,空穴也产

生定向移动,形成空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷极性不同,所以它们的运动方向相反,本征半导体中的电流是两个电流之和。

本征半导体具有两种载流子,都参与导电,因此其导电能力取决于两种载流子的数目,本征半导体在常温下产生的电子空穴对很少,所以导电性相当差。但当环境温度升高时,热激发使电子空穴对的数目显著增多,其导电性明显提高。因此本征半导体的特点是导电能力极弱,且随温度变化导电能力有显著变化。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体导电性能差,且温度稳定性也很差,并不适合制成半导体器件。一般地,在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质,可使半导体的导电特性发生显著变化。根据掺入的杂质不同,杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。掺有杂质的本征半导体才能用于半导体器件的制作。

1. N 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的 5 价元素,例如磷,则磷原子就取代了硅晶体中少量的硅原子,占据晶格上的某些位置。如图 1.4 所示,磷原子最外层有 5 个价电子,其中 4 个价电子分别与邻近 4 个硅原子形成共价键结构,剩下的 1 个价电子在共价键之外,受磷原子束缚微弱,因此在室温下,即可获得挣脱束缚所需要的能量而成为自由电子。失去电子的磷原子则成为不能移动的正离子。磷原子由于可以释放 1 个电子而被称为施主原子,又称施主杂质。

在本征半导体中每掺入 1 个磷原子就可产生 1 个自由电子,而本征激发产生的空穴的数目不变。这样,在掺入磷的半导体中,自由电子的数目就远远超过了空穴数目,成为多数载流子(简称多子),空穴则为少数载流子(简称少子),参与导电的主要是电子。这种半导体为电子型导体,通常简称为 N 型半导体。

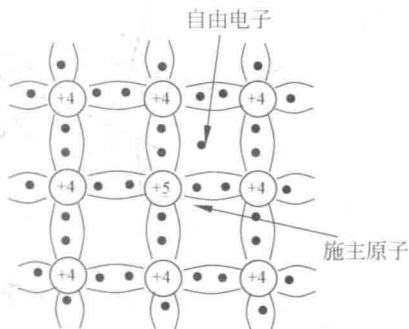


图 1.4 N 型半导体

2. P 型半导体

本征半导体硅(或锗)中掺入微量的 3 价元素,如硼,这时硼原子就取代了晶体中的少量硅原子,占据晶格上的某些位置。如图 1.5 所示,硼原子的 3 个价电子分别与其邻近的 3 个硅原子中的 3 个价电子组成完整的共价键,而与其相邻的另一个硅原子的共价键中则缺少 1 个电子,出现了 1 个空穴。这个空穴被附近硅原子中的价电子来填充后,使 3 价的硼原子获得了 1 个电子而变成负离子。同时,邻

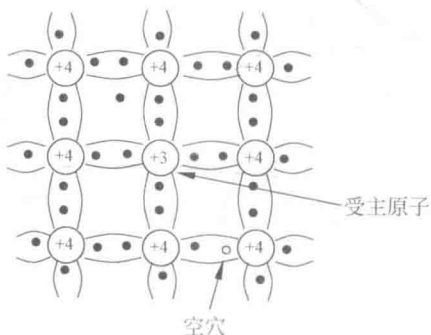


图 1.5 P 型半导体

近共价键上出现 1 个空穴。由于硼原子起着接受电子的作用,故称为受主原子,又称受主杂质。

在本征半导体中每掺入 1 个硼原子就可以提供 1 个空穴,当掺入一定数量的硼原子时,就可以使半导体中空穴的数目远大于本征激发电子的数目,成为多数载流子,而电子则成为少数载流子。空穴为多子,主导电,这种半导体称为空穴型半导体,通常简称为 P 型半导体。

杂质半导体中载流子有两种来源:一种是由本征激发产生的自由电子空穴对;另一种是用掺杂的方法,由杂质原子提供的自由电子(N 型)或空穴(P 型)。通常后者的浓度远远大于前者的浓度,由后者产生的自由电子或空穴是杂质半导体的多子。通常,多子的浓度约等于所掺杂质原子的浓度。比如,在室温下,本征硅的电子和空穴浓度为 $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,而掺杂后 N 型半导体中的自由电子浓度为 $n_i = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。多子的浓度由掺入的杂质浓度决定,因而受温度的影响小。但少子是因为本征激发产生,对温度敏感。故杂质半导体制成的器件仍然会受到温度的影响。

1.1.4 PN 结及其单向导电性

用不同的掺杂工艺将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一块硅片上,在这两个区域的交界处就形成了一个 PN 结。PN 结具有单向导电性。

1. PN 结的形成

如图 1.6 所示,P 区的多数载流子是空穴,少数载流子是电子,带负极性的原子是不能移动的正离子;N 区多数载流子是电子,少数载流子是空穴,带正极性的原子是不能移动的正离子。交界面两侧明显存在着两种载流子的浓度差。因此,N 区的电子向 P 区扩散,并与 P 区界面附近的空穴复合而消失,在 N 区的一侧留下了一层不能移动的正离子;同样,P 区的空穴也向 N 区扩散,与 N 区界面附近的电子复合而消失,在 P 区的一侧,留下一层不能移动的正离子。扩散的结果使交界面两侧出现了由不能移动的带电荷离子组成的空间电荷区,因而形成了一个由 N 区指向 P 区的电场,称为内电场。随着扩散的进行,空间电荷区加宽,内电场增强,由于内电场的作用是阻碍多子扩散,促使少子漂移。多子扩散与少子漂移的运动方向是相反的。所以,当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时,将形成稳定的空间电荷区,称为 PN 结,如图 1.7 所示。由于空间电荷区内缺少载流子,所以又称 PN 结为耗尽层或高阻区。

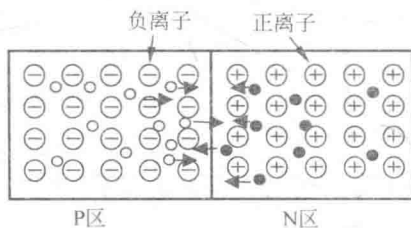


图 1.6 自由电子与空穴的扩散运动

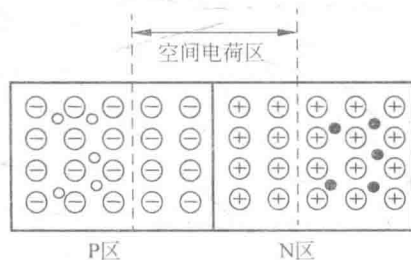


图 1.7 空间电荷区

PN 结的形成过程描述如下:

两侧多子扩散→形成空间电荷区(内电场)→两侧少子漂移,同时两侧多子扩散(受内电场阻碍),两种运动方向相反→两种运动动态平衡→形成 PN 结

2. PN 结单向导电性

稳定的空间电荷区有一个 N 区指向 P 区的内电场,该电场的电势差为 U_{ho} 。若在 PN 结两端外加电压,则内电场将发生变化。

如图 1.8(a)所示,当 P 极外加正向电压, N 极外加负向电压时,称 PN 结外加正向电压,或称为正向偏置,此时在外电场的作用下, N 区的电子要向左边扩散,并与原来空间电荷区的正离子中和,同样, P 区的空穴也要向右边扩散,并与原来空间电荷区的负离子中和,使空间电荷区变窄。同时在外电场的作用下,多数载流子(P 区的空穴以及 N 区的电子)的扩散运动增强,形成较大的正向电流。这种情况称为 PN 结导通。PN 结导通时压降很小,若直接与电源相连,则正向电流过大。因此,回路中应串联电阻,防止 PN 结因正向电流过大而烧毁。

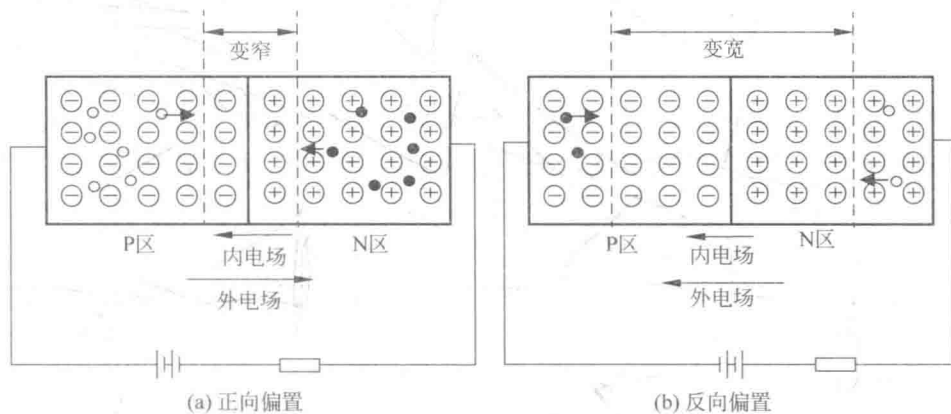


图 1.8 PN 结导电性

如图-1.8(b)所示,当 PN 结 P 极接电源负极, N 极接电源正极时,称为给 PN 结加反向电压或反向偏置。反向电压产生的外加电场的方向与内电场的方向相同,使 PN 结内电场加强,它把 P 区的多子(空穴)和 N 区的多子(自由电子)从 PN 结附近拉走,使 PN 结进一步加宽。空间电荷区加宽,打破了 PN 结原来的平衡,在电场作用下的漂移运动大于扩散运动。这时通过 PN 结的电流,主要是少子(P 区的电子和 N 区的空穴)形成的漂移电流,称为反向电流。由于在常温下,少数载流子的数量不多,故反向电流很小,而且当外加电压在一定范围内变化时,它几乎不随外加电压的变化而变化,因此反向电流又称为反向饱和电流。当反向电流可以忽略时,就可认为 PN 结处于截止状态。值得注意的是,由于本征激发随温度的升高而加剧,电子空穴对随之增加,因而反向电流将随温度的升高而成倍增长。反向电流是造成电路噪声的主要原因之一,因此,在设计电路时,必须考虑温度补偿问题。

综上所述,PN 结正偏时,正向电流较大,相当于 PN 结导通;反偏时,反向电流很小,相当于 PN 结截止。这种特性就是 PN 结的单向导电性。

3. PN 结的反向击穿

PN 结的伏安特性曲线如图 1.9 所示。伏安特性是指加在 PN 结两端的电压和流过 PN 结的电流之间的关系曲线。如图 1.9 所示,当 PN 结上加的反向电压增大到一定数值 U_{BR} 时,反向电流突然剧增,称为 PN 结的反向击穿。 U_{BR} 称为 PN 结的反向击穿电压。PN 结的反向击穿可分为雪崩击穿和齐纳击穿两类。

1) 雪崩击穿

当反向电压较高时,内电场很强,使得做漂移运动的少数载流子获得很大的动能。当它与 PN 结内的原子发生直接碰撞时,将原子电离,产生新的“电子空穴对”。这些新的“电子空穴对”又被强电场加速再去碰撞其他原子,产生更多的“电子空穴对”。如此连锁反应,使 PN 结内载流子数目剧增,并在反向电压作用下做漂移运动,形成很大的反向电流。这种击穿称为雪崩击穿。雪崩击穿的物理本质是碰撞电离。

2) 齐纳击穿

齐纳击穿通常发生在掺杂浓度很高的 PN 结内。由于掺杂浓度很高,PN 结很窄,这样即使施加较小的反向电压,内电场也很强。在强电场作用下,会强行促使 PN 结内原子的价电子被从共价键中拉出来,形成“电子空穴对”,从而产生大量的载流子。它们在反向电压的作用下,形成很大的反向电流,出现了击穿。齐纳击穿的物理本质是场致电离。

采取适当的掺杂工艺,可将硅 PN 结的雪崩击穿电压控制在 $8 \sim 1000\text{V}$,而齐纳击穿电压低于 5V 。在 $5 \sim 8\text{V}$ 之间两种击穿可能同时发生。两种击穿都可能导致 PN 结的永久性损毁,因此为保护 PN 结,电路中应有限制电流的设计。

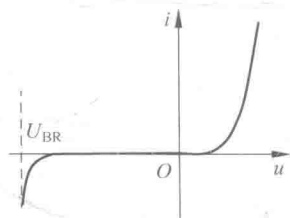


图 1.9 PN 结的伏安特性曲线

4. PN 结的电容效应

当 PN 结上的电压发生变化时,PN 结中存储的电荷量将随之发生变化,这使 PN 结具有电容效应。PN 结的电容可分为势垒电容和扩散电容两类。

当外加电压使 PN 结上压降发生变化时,空间电荷区的电荷量也随之变化,犹如电容的充放电,这种效应称为势垒电容。

当 PN 结正向偏置时,由 N 区扩散到 P 区的电子与外电源提供的空穴相复合,形成正向电流。刚扩散过来的电子就堆积在 P 区内紧靠 PN 结的附近,形成一定的多子浓度梯度分布。外加正向电压不同时,扩散电流即外电路电流的大小也就不同。所以 PN 结两侧堆积的多子的浓度梯度分布也不同,这就相当于电容的充放电过程,这种效应称为扩散电容。扩散电容反映了在外加电压作用下载流子在扩散过程中积累的情况。

势垒电容和扩散电容均是非线性电容。PN 结在反向偏置时主要考虑势垒电容。PN 结在正向偏置时主要考虑扩散电容。在信号频率较高时,须考虑 PN 结电容的作用。

1.2 半导体二极管

将 PN 结用外壳封装起来,并加上电极引线就构成了半导体二极管,也被称为晶体二极管。由 P 区引出的电极称为阳极或正极,由 N 区引出的电极称为阴极或负极。

二极管按结构分有点接触型、面接触型和平面型。点接触型二极管 PN 结面积小,结电容小,用于工作电流小、工作频率高的场合,如检波和变频等高频电路。面接触型二极管 PN 结面积大,用于工作电流较大、工作频率较低的场合,如整流电路。平面型二极管的 PN 结面积可大可小,多用于工作电流大、功率大、工作频率低的场合,如在高频整流和开关电路中使用广泛。按使用的半导体材料分,有硅二极管和锗二极管。按用途分,有普通二极管、稳压二极管、整流二极管、开关二极管、变容二极管、光电二极管等。



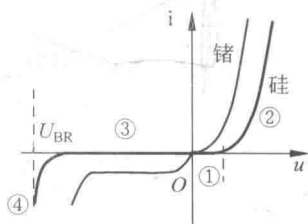
图 1.10 二极管电路符号

半导体二极管电路符号如图 1.10 所示。

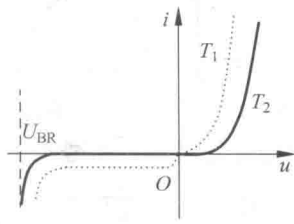
1.2.1 二极管的伏安特性

1. 二极管的伏安特性分析

二极管的伏安特性是指流过二极管的电流与加于二极管两端的电压之间的关系或曲线。二极管的伏安特性曲线如图 1.11(a)所示。



(a) 二极管的伏安特性



(b) 温度对二极管特性的影响

图 1.11 二极管的伏安特性曲线

1) 正向特性

在曲线段①中,正向电压比较小时,外电场还不足以克服内电场对多数载流子所造成的阻力,所以此时的正向电流几乎为零,二极管呈现很大的电阻。这个范围称为死区,相应的电压称为死区电压。在实际应用中,常把正向特性较直部分延长交于横轴的一点,定为死区电压的值。通常锗管的死区电压约为 0.1V,硅管的死区电压约为 0.5V。

在曲线段②中,当正向电压大于死区电压以后,正向电流随正向电压的增长几乎呈线性增长。正向电流开始随正向电压线性增长时所对应的正向电压称为二极管的导通电压,硅管的导通电压约为 0.6~0.8V (一般取为 0.7V),锗管的导通电压约为 0.1~0.3V (一般取为 0.3V)。

2) 反向特性

曲线段③为反向截止区。在该区域,二极管两端外加反向电压,PN 结内电场进一步增

强,使扩散更难进行。这时只有少数载流子在反向电压作用下的漂移运动形成微弱的反向电流。在反向电压不超过某一范围时,反向电流的大小基本恒定,这时的电流通常称为反向饱和电流。但反向电流是温度的函数,将随温度的变化而变化。常温下,小功率硅管的反向电流在 nA 数量级,锗管的反向电流在 μA 数量级。

3) 反向击穿特性

在曲线段④中,当反向电压增大到一定数值 U_{BR} 时,反向电流剧增,这种现象称为二极管的击穿, U_{BR} 称为击穿电压。二极管不同, U_{BR} 一般不同,普通二极管的 U_{BR} 一般在几十伏以上且硅管较锗管为高。

击穿特性的特点是:虽然反向电流剧增,但二极管的端电压却变化很小,这一特点成为制作稳压二极管的依据。

由于 PN 结击穿时电流很大,消耗在 PN 结上的功率很大,因此,若不采取适当的限流措施,将会使管子过热而造成永久性的损坏,这称为热击穿。

4) 温度对二极管特性的影响

如图 1.11(b) 所示:图中 $T_1 > T_2$,随着温度的升高,其正向特性曲线左移,即正向压降减小;反向特性曲线下移,即反向电流增大。二极管是温度敏感的器件。

2. 二极管的等效电路

二极管是一个非线性器件,对于非线性电路的分析与计算是比较复杂的。为了使电路的分析简化,可以用线性元件组成的电路来模拟二极管。使线性电路的电压、电路关系和二极管外特性近似一致,那么这个线性电路就称为二极管的等效电路。显然等效电路是在一定条件下的近似。

(1) 二极管应用于直流电路时,常用一个理想二极管模型来等效,可把它看成一个理想开关。正向偏置时,相当于“开关”闭合,电阻为零,压降为零;反向偏置时,相当于“开关”断开,电阻为无限大,电流为零。如图 1.12(a) 所示。

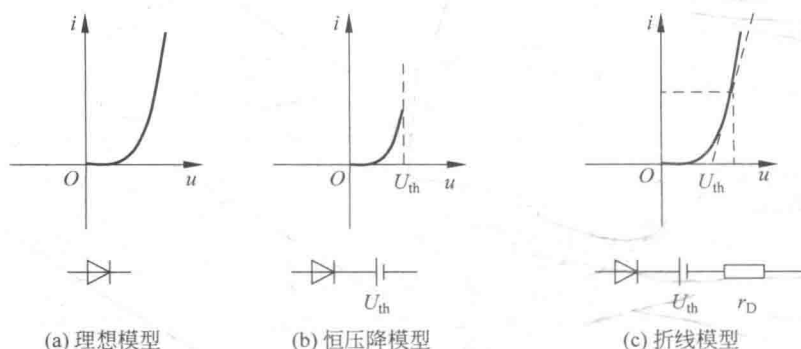


图 1.12 二极管的 3 种等效电路模型

(2) 在直流电路中如果考虑到二极管的电阻和门限电压的影响,二极管导通时正向压降为 U_{th} ,反向截止时电流为 0。如图 1.12(b) 表示。

(3) 在二极管两端加直流偏置电压和工作在交流小信号的条件下,导通时要考虑正向压降 U_{th} 以及二极管 P 区和 N 区之间的电阻 r_D ,反向截止时电流为 0。如图 1.12(c) 表示。