

21世纪

高等教育规划教材

MONI DIANZI JISHU

模拟电子技术

(第2版)

主 编 / 江小安



西北大学出版社



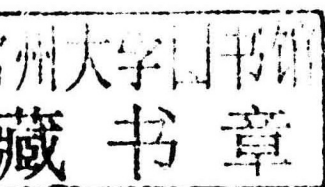
西北大学出版社

21世纪高等教育规划教材
陕西省教育厅重点教材建设项目

MONI DIANZI JISHU

模拟电子技术 (第2版)

主 编 江小安
副主编 宫 丽 侯亚玲



图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/江小安主编. —2版. —西安:西北大学出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-5604-3425-4

I. ①模… II. ①江… III. ①模拟电路-电子技术
IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 178401 号

模拟电子技术(第2版)

主 编:江小安

出版发行:西北大学出版社

社 址:西安市太白北路 229 号

电 话:029-88303042

邮政编码:710069

经 销:全国新华书店

印 刷:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张:14.5

字 数:350 千字

版 次:2006 年 10 月第 1 版 2014 年 7 月第 2 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5604-3425-4

定 价:30.00 元

第 2 版前言

本教材是在第 1 版基础上,经过总结、提高、修改、完善而成的,保留了第 1 版的特点。本次修订将第 1 版中的不妥之处进行了订正,叙述更趋完善、合理,为便于读者自学,书后增加了习题参考答案。

教师在讲授这门课程时可根据各专业教学大纲的需要,对教材中的内容进行适当取舍。通信专业和电子信息(含电子技术)专业对频率特征要求较高,故这部分可讲深一点,而其他专业着重定性讲述。第六章中正弦波发生电路部分,由于通信和电子信息专业在后续课程——高频电子技术中设置了正弦波振荡器这一章,故这部分内容可讲可不讲;非正弦波产生电路部分,作为集成运放的应用讲述。

《模拟电子技术》课程是一门专业基础主干课,本科、专科(高职)对这门课程的基本要求是一致的,只是在深度和广度上有所区别。教师在讲授这门课程时应掌握好分寸。

参加本教材第 2 版修订的老师有西安电子科技大学的江小安教授,西安欧亚学院的宫丽老师、侯亚玲老师,西安工业大学北方信息工程学院王珊珊老师,最后由江小安教授统稿。

该教材自第 1 版出版至今,得到了大家的广泛认同和欢迎,许多使用院校的老师 and 学生对教材中的内容提出了宝贵的意见,还有老师认真指出了书中的差错。在此,特向他们表示衷心的感谢。

由于编者能力有限,欢迎读者多提宝贵意见,不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2014 年 5 月

第 1 版前言

本教材是陕西省教育厅为适应高等教育发展的需要,培养本科应用型人才而组织编写的高等教育规划教材。

编写本教材的指导思想是:适当压缩理论部分,突出基本要求及与技能和实践有关的部分,减少数学公式的推导,尽可能地从物理概念去描述问题的实质。

模拟电子技术工程性质较强,在分析问题时往往为了突出主要因素而忽略一些次要因素,采用了近似分析和计算的方法。学习本课程除理论部分外,还应同步开设实验课程,有条件的学校建议同时开设“电子设计自动化”(EDA)课程。做实验时首先在计算机上虚拟、模拟来实现,然后再用硬件来实现,这样可以加深对该课程内容的理解和掌握,同时也能掌握先进的电子技术设计工具和方法。

本教材建议授课时数 74 学时。理论课 54 学时(通信、电子信息工程专业至少授课 64 学时,其他专业可以参考此学时数,对内容进行适当地调整和增减),实验课 20 学时。

西安电子科技大学江小安教授担任本书主编,同时负责全书的统筹。延安大学西安创新学院邵思飞、西北工业大学明德学院沈金根、西安工业大学高丽担任副主编。西安电子科技大学江小安、延安大学西安创新学院邵思飞、西安工业大学高丽编写第一章、第二章、第三章;李传荣编写第四章、第五章、第六章;宫丽编写第七章;侯亚玲编写第八章。

西安电子科技大学孙肖子教授担任本书的主审,仔细阅读了全部书稿并提出了宝贵的修改意见,在此向她致以衷心的感谢。

由于时间和水平有限,书中难免会有一些问题和错误之处,望使用本书的老师、学生和广大读者批评指正。

编 者

2006 年 10 月



CONTENTS

第一章 半导体器件

1.1 半导体基础知识	/1
1.1.1 本征半导体	/1
1.1.2 杂质半导体	/2
1.2 PN 结	/3
1.2.1 异型半导体接触现象	/3
1.2.2 PN 结的单向导电特性	/3
1.2.3 PN 结的击穿	/5
1.2.4 PN 结的电容效应	/5
1.2.5 半导体二极管	/6
1.2.6 稳压二极管	/10
1.2.7 二极管的应用	/11
1.2.8 其他二极管	/13
1.3 半导体三极管	/14
1.3.1 三极管的结构及类型	/14
1.3.2 三极管的 3 种连接方式	/15
1.3.3 三极管的放大作用	/15
1.3.4 三极管的特性曲线	/18
1.3.5 三极管的主要参数	/20
1.3.6 温度对三极管参数的影响	/21
思考题和习题	/23

第二章 放大电路分析基础

2.1 放大电路工作原理	/26
2.1.1 放大电路的组成原理	/26
2.1.2 直流通路和交流通路	/27
2.2 放大电路的直流工作状态	/27
2.2.1 解析法确定静态工作点	/28
2.2.2 图解法确定静态工作点	/28
2.2.3 电路参数对静态工作点的影响	/30
2.3 放大电路的动态分析	/31

2.3.1	图解法分析动态特性	/31
2.3.2	放大电路的非线性失真	/32
2.3.3	微变等效电路法	/34
2.3.4	3 种基本组态放大电路的分析	/36
2.4	静态工作点的稳定及其偏置电路	/42
2.5	多级放大电路	/47
2.5.1	多级放大电路的耦合方式	/47
2.5.2	多级放大电路的指标计算	/50
2.6	放大电路的频率特性	/53
2.6.1	频率特性的一般概念	/53
2.6.2	三极管的频率参数	/55
2.6.3	共 e 极放大电路的频率特性	/58
2.6.4	多级放大电路的频率特性	/65
2.7	差动放大器	/67
2.7.1	零点漂移	/67
2.7.2	差动放大电路	/68
	思考题和习题	/80

第三章 场效应管放大电路

3.1	结型场效应管	/89
3.1.1	结构	/89
3.1.2	工作原理	/90
3.1.3	特性曲线	/91
3.2	绝缘栅场效应管	/93
3.2.1	N 沟道增强型 MOS 场效应管	/93
3.2.2	N 沟道耗尽型 MOS 场效应管	/94
3.3	场效应管的主要参数	/97
3.3.1	直流参数	/97
3.3.2	交流参数	/97
3.3.3	极限参数	/98
3.4	场效应管的特点	/98
3.5	场效应管放大电路	/99
3.5.1	静态工作点与偏置电路	/100
3.5.2	场效应管的微变等效电路	/102
3.5.3	共源极放大电路	/103
3.5.4	共漏放大器(源极输出器)	/103
	思考题和习题	/105

第四章 负反馈放大电路

4.1 负反馈的基本概念	/107
4.1.1 负反馈的基本组成	/107
4.1.2 反馈的基本关系式	/108
4.2 负反馈放大电路类型及其判别	/108
4.2.1 反馈放大电路分类	/109
4.2.2 负反馈放大电路的 4 种基本组态	/110
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	/115
4.3.1 对放大倍数和放大倍数稳定性的影响	/115
4.3.2 改善输出波形的非线性失真	/115
4.3.3 展宽放大电路的通频带	/116
4.3.4 负反馈对输入电阻的影响	/116
4.3.5 负反馈对输出电阻的影响	/117
4.4 负反馈放大电路的计算	/118
4.4.1 深度负反馈放大电路的计算	/118
4.4.2 串联电压负反馈估算	/119
4.4.3 串联电流负反馈估算	/119
4.4.4 并联电压负反馈估算	/120
4.4.5 并联电流负反馈估算	/121
思考题和习题	/122

第五章 集成运算放大器

5.1 集成运算放大器简介	/126
5.1.1 集成运算放大器的电路构成及特点	/126
5.1.2 主要技术指标	/127
5.2 理想集成运放及其分析特点	/129
5.2.1 集成运放的理想化	/129
5.2.2 集成运放的传输特性	/131
5.3 集成运算放大器的线性应用	/132
5.3.1 比例运算电路	/132
5.3.2 加法运算电路	/134
5.3.3 积分和微分运算电路	/136
5.3.4 对数和指数运算电路	/138
5.4 有源滤波电路	/139
5.4.1 低通滤波电路	/141
5.4.2 高通滤波电路	/142
5.4.3 带通滤波电路和带阻滤波电路	/144
5.5 电压比较器	/145

5.5.1 简单电压比较器	/146
5.5.2 滞回比较器	/147
思考题和习题	/150

第六章 波形发生与变换电路

6.1 非正弦波发生器	/153
6.1.1 矩形波发生器	/154
6.1.2 三角波发生电路	/156
6.1.3 锯齿波发生电路	/157
6.1.4 波形变换电路	/158
6.2 正弦波发生电路	/159
6.2.1 反馈式正弦振荡器的组成及原理	/159
6.2.2 桥式 RC 振荡器	/160
思考题和习题	/162
附 录	/163

第七章 低频功率放大电路

7.1 低频功率放大电路概述	/166
7.1.1 分类	/166
7.1.2 功率放大器的特点	/167
7.1.3 提高输出功率的方法	/167
7.1.4 提高效率的方法	/168
7.2 互补对称功率放大电路	/169
7.2.1 双电源互补对称电路(OCL 电路)	/170
7.2.2 单电源互补对称电路(OTL 电路)	/175
7.2.3 实际功率放大电路举例	/175
7.3 集成功率放大器	/176
7.3.1 内部电路组成简介	/176
7.3.2 DG4100 集成功放的典型接线法	/177
思考题和习题	/178

第八章 直流电源

8.1 单相整流电路	/181
8.1.1 单相半波整流电路	/181
8.1.2 单相全波整流电路	/183
8.1.3 单相桥式整流电路	/185
8.2 滤波电路	/187
8.2.1 电容滤波电路	/187

8.2.2 其他形式的滤波电路	/187
8.3 倍压整流	/190
8.3.1 二倍压整流电路	/190
8.3.2 多倍压整流电路	/191
8.4 稳压电路	/191
8.4.1 稳压电路的主要指标	/192
8.4.2 硅稳压管稳压电路	/192
8.4.3 串联型稳压电路	/194
8.5 集成稳压电路	/198
8.5.1 基本应用电路	/198
8.5.2 扩大输出电流的电路	/198
8.5.3 扩大输出电压的电路	/199
8.5.4 输出电压可调的电路	/199
8.6 开关稳压电路	/199
8.6.1 串联型开关稳压电源	/200
8.6.2 并联型开关稳压电源	/203
思考题和习题	/205
习题参考答案	/208
参考文献	/218

第一章 半导体器件

晶体管电子电路的核心器件是晶体管，而晶体管是由半导体制成的。因此，在讲具体的电子电路之前，应先讲晶体管原理。而要搞清晶体管原理，必须了解半导体的性质及其导电特性。

1.1 半导体基础知识

物质按导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。

物质的导电特性取决于原子结构。导体一般为低价元素，如铜、铁、铝等金属，其最外层电子受原子核的束缚力很小，因而极易挣脱原子核的束缚成为自由电子。因此，在外电场作用下，这些电子产生定向运动(称为漂移运动)形成电流，呈现出较好的导电特性。高价元素(如惰性气体)和分子物质(如橡胶、塑料)最外层电子受原子核的束缚力很强，极不易摆脱原子核的束缚成为自由电子，所以其导电性极差，可作为绝缘材料。而半导体材料最外层电子既不像导体那样极易摆脱原子核的束缚，成为自由电子；也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧，因此，半导体的导电特性介于二者之间。

1.1.1 本征半导体

纯净晶体结构的半导体称为本征半导体。常用的半导体材料是硅和锗，它们都是4价元素，在原子结构中最外层轨道上有4个价电子。为便于讨论，采用图1-1所示的简化原子结构模型。把硅或锗材料拉制成单晶体时，相邻两个原子的一对最外层电子(价电子)成为共有电子，它们一方面围绕自身的原子核运动，另一方面又出现在相邻原子所属的轨道上。即价电子不仅受到自身原子核的作用，同时还受到相邻原子核的吸引。于是，两个相邻的原子共有一对价电子，组成共价键结构。故晶体中，每个原子都和周围的4个原子用共价键的形式互相紧密地联系起来，如图1-2所示。

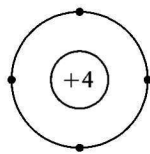


图 1-1 硅和锗简化原子结构模型

共价键中的价电子由于热运动而获得一定的能量，其中少数能够摆脱共价键的束缚而成为自由电子，同时必然在共价键中留下空位，称为空穴。空穴带正电，如图1-3所示。

在外电场作用下，一方面自由电子产生定向移动，形成电子电流；另一方面，价电子也按一定方向依次填补空穴，即空穴产生了定向移动，形成所谓空穴电流。

由此可见，半导体中存在着两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。本征半导体中，自由电子与空穴是同时成对产生的，因此，它们的浓度是相等的。我们用 n_i 和 p_i 分别

表示电子和空穴的浓度, 即 $n_i = p_i$, 下标 i 表示为本征半导体。

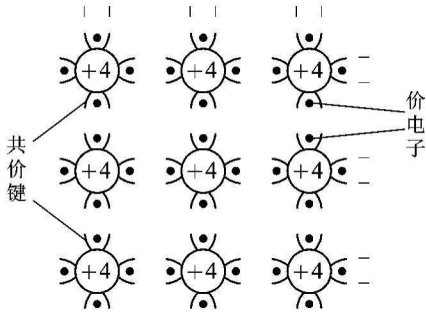


图 1-2 本征半导体共价键晶体结构示意图

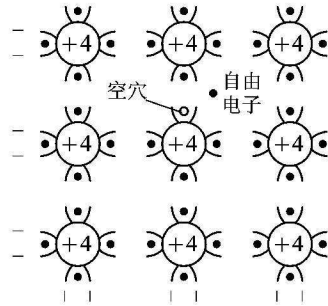


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

价电子在热运动中获得能量产生了电子—空穴对。同时自由电子在运动过程中失去能量, 与空穴相遇, 使电子、空穴对消失, 这种现象称为复合。在一定温度下, 载流子的产生过程和复合过程是相对平衡的, 载流子的浓度是一定的。本征半导体中载流子的浓度, 除了与半导体材料本身的性质有关以外, 还与温度有关, 而且随着温度的升高, 基本上按指数规律增加。因此, 半导体载流子浓度对温度十分敏感。对于硅材料, 大约温度每升高 8°C , 本征载流子浓度 n_i 增加 1 倍; 对于锗材料, 大约温度每升高 12°C , n_i 增加 1 倍。除此之外, 半导体载流子浓度还与光照有关, 人们正是利用这一特性, 制成光敏器件。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在两种载流子, 但因本征载流子的浓度很低, 所以, 它们的导电能力很差。当我们人为地、有控制地掺入少量的特定杂质时, 其导电特性将产生质的变化。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中, 掺入微量 5 价元素, 如磷、锑、砷等, 则原来晶格中的某些硅(锗)原子被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层有 5 个价电子, 因此, 它与周围 4 个硅(锗)原子组成共价键时, 还多余 1 个价电子。它不受共价键的束缚, 而只受自身原子核的束缚, 因此, 它只要得到较少的能量就能成为自由电子, 并留下带正电的杂质离子, 它不能参与导电, 如图 1-4 所示。显然, 这种杂质半导体中电子浓度远远大于空穴的浓度, 即 $n_n \gg p_n$ (下标 n 表示是 N 型半导体), 主要靠电子导电, 所以称为 N 型半导体。由于 5 价杂质原子可提供自由电子, 故称为施主杂质。N 型半导体中, 自由电子称为多数载流子, 空穴称为少数载流子。

杂质半导体中多数载流子浓度主要取决于掺入的杂质浓度。由于少数载流子是半导体材料共价键提供的, 因而其浓度主要取决于温度。此时电子浓度与空穴浓度之间, 可以证明有如下关系:

$$n_n \cdot p_n = n_i p_i = n_i^2 = p_i^2$$

即在一定温度下, 电子浓度与空穴浓度的乘积是一个常数, 与掺杂浓度无关。

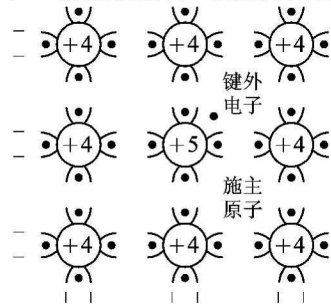


图 1-4 N 型半导体共价键结构

2. P 型半导体

在本征半导体中,掺入微量 3 价元素,如硼、镓、铟等,则原来晶格中的某些硅(锗)原子被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层只有 3 个价电子,当它和周围的硅(锗)原子组成共价键时,因为缺少一个电子,所以形成一个空位。其他共价键的电子,只需摆脱一个原子核的束缚,就转至空位上,形成空穴。因此,在较少能量下就可形成空穴,并留下带负电的杂质离子,它不能参与导电,如图 1-5 所示。显然,这种杂质半导体中空穴浓度远远大于电子浓度,即 $p_p \gg n_p$ (下标 p 表示是 P 型半导体),主要靠空穴导电,所以称为 P 型半导体。由于 3 价杂质原子可接受电子,相应地在邻近原子中形成空穴,故称为受主杂质。P 型半导体中,自由电子称为少数载流子,空穴称为多数载流子。

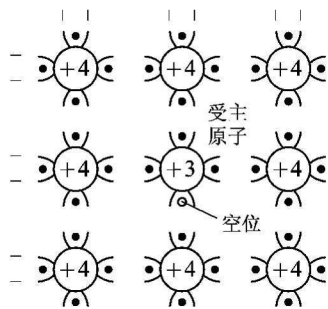


图 1-5 P 型半导体的共价键结构

P 型半导体与 N 型半导体虽然各自都有一种多数载流子,但对外仍呈现电中性。它们的导电特性主要由掺杂浓度决定。这两种掺杂半导体是构成各种半导体器件的基础。

1.2 PN 结

在一块本征半导体上,用工艺的办法使其一边形成 N 型半导体,另一边形成 P 型半导体,则在两种半导体的交界处形成了 PN 结。PN 结是构成其他半导体器件的基础。

1.2.1 异型半导体接触现象

在 P 型和 N 型半导体的交界面两侧,由于电子和空穴的浓度相差悬殊,因而将产生扩散运动。电子由 N 区向 P 区扩散;空穴由 P 区向 N 区扩散。由于它们均是带电粒子(离子),因而电子由 N 区向 P 区扩散的同时,在交界面 N 区剩下不能移动(不参与导电)的带正电的杂质离子;空穴由 P 区向 N 区扩散的同时,在交界面 P 区剩下不能移动(不参与导电)的带负电的杂质离子,于是形成了空间电荷区。在 P 区和 N 区的交界处形成了电场(称为自建场)。在此电场作用下,载流子将作漂移运动,其运动方向正好与扩散运动方向相反,阻止扩散运动。电荷扩散得越多,电场越强,因而漂移运动越强,对扩散的阻力越大。

当达到平衡时,扩散运动的作用与漂移运动的作用相等,通过界面的载流子总数为 0,即 PN 结的电流为 0。此时,在 PN 区交界处形成一个缺少载流子的高阻区,我们称为阻挡层(又称为耗尽层)。上述过程如图 1-6 所示。

1.2.2 PN 结的单向导电特性

在 PN 结两端外加不同方向的电压,就可以破坏原来的平衡,从而呈现出单向导电特性。

1. PN 结外加正向电压

若将电源的正极接 P 区,负极接 N 区,则称此为正向接法或正向偏置。此时外加电压在

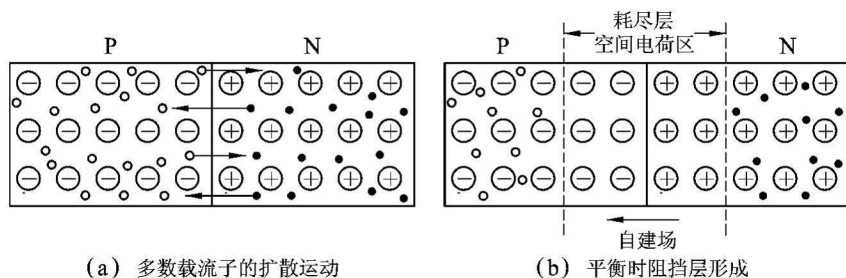


图 1-6 PN 结的形成

阻挡层内形成的电场与自建场方向相反,削弱了自建场:使阻挡层变窄,如图 1-7a 所示。显然,扩散作用大于漂移作用,在电源作用下,多数载流子向对方区域扩散形成正向电流,其方向由电源正极通过 P 区、N 区到达电源负极。

此时,PN 结处于导通状态,它所呈现出的电阻为正向电阻,其阻值很小。正向电压愈大,正向电流愈大。其关系是指数关系

$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

式中, I_D 为流过 PN 结的电流; U_D 为 PN 结两端电压; $U_T = \frac{kT}{q}$ 称为温度电压当量,其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, q 为电子的电量,在室温下即 $T = 300 \text{ K}$ 时, $U_T = 26 \text{ mV}$; I_S 为反向饱和电流。电路中的电阻 R 是为了限制正向电流的大小而接入的限流电阻。

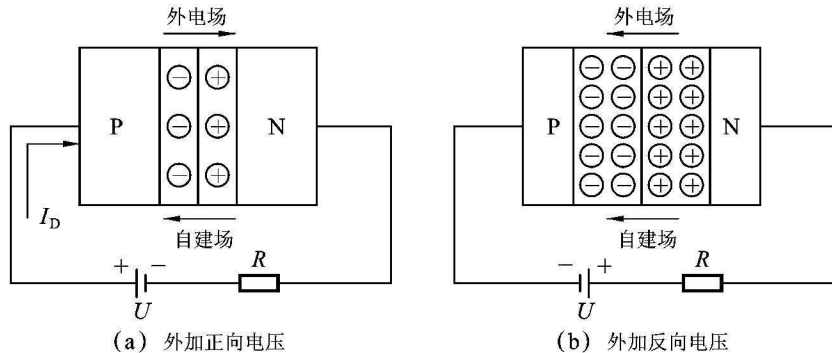


图 1-7 PN 结单向导电特性

2. PN 结外加反向电压

若将电源的正极接 N 区,负极接 P 区,则称此为反向接法或反向偏置。此时外加电压在阻挡层内形成的电场与自建场方向相同,增强了自建场,使阻挡层变宽,如图 1-7b 所示。此时漂移作用大于扩散作用,少数载流子在电场作用下作漂移运动,由于其电流方向与正向电压时相反,故称为反向电流。由于反向电流是由少数载流子所形成的,故反向电流很小,而且当外加反向电压超过零点几伏时,少数载流子基本全被电场拉过去形成漂移电流,此时反向电压再增加,载流子数也不会增加,因此反向电流也不会增加,故称为反向饱和电流,即 $I_D = -I_S$ 。

此时,PN 结处于截止状态,呈现的电阻称为反向电阻,其阻值很大,高达几百千欧以上。

综上所述,PN 结加正向电压,处于导通状态;加反向电压,处于截止状态,即 PN 结具有单向导电特性。

将上述电流与电压的关系写成如下通式

$$I_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

此方程称为伏安特性方程,如图 1-8 所示,该曲线称为伏安特性曲线。

$$U_D > 0, I_D \approx I_S e^{\frac{U_D}{U_T}} \quad (1-1a)$$

$$U_D < 0, I_D \approx -I_S \quad (1-1b)$$

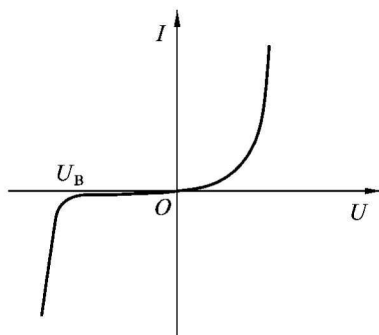


图 1-8 PN 结伏安特性

1.2.3 PN 结的击穿

PN 结处于反向偏置时,在一定电压范围内,流过 PN 结的电流是很小的反向饱和电流。但是当反向电压超过某一数值(U_B)后,反向电流急剧增加,这种现象称为反向击穿,如图 1-8 所示, U_B 称为击穿电压。

PN 结的击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

当反向电压足够高时,阻挡层内电场很强,少数载流子在结区内受强烈电场的加速作用,获得很大的能量,在运动中与其他原子发生碰撞时,有可能将价电子“打”出共价键,形成新的电子、空穴对。这些新的载流子与原先的载流子一道,在强电场作用下碰撞其他原子打出更多的电子、空穴对,如此连锁反应,使反向电流迅速增大。这种击穿称为雪崩击穿。

所谓齐纳击穿,是指当 PN 结两边掺入高浓度的杂质时,其阻挡层宽度很小,即使外加反向电压不太高(一般为几伏),在 PN 结内就可形成很强的电场(可达 2×10^6 V/cm),将共价键的价电子直接拉出来,产生电子—空穴对,使反向电流急剧增加,出现击穿现象。

对硅材料的 PN 结,击穿电压 U_B 大于 7 V 时通常是雪崩击穿,小于 4 V 时通常是齐纳击穿; U_B 在 4 ~ 7V 之间时两种击穿均有。由于击穿破坏了 PN 结的单向导电特性,因而一般使用时应避免出现击穿现象。

需要指出的是,发生击穿并不一定意味着 PN 结被损坏。当 PN 结反向击穿时,只要注意控制反向电流的数值(一般通过串接电阻 R 实现),不使其过大,以免因过热而烧坏 PN 结,当反向电压(绝对值)降低时,PN 结的性能就可以恢复正常。稳压二极管正是利用了 PN 结的反向击穿特性来实现稳压的,当流过 PN 结的电流变化时,结电压保持 U_B 基本不变。

1.2.4 PN 结的电容效应

按电容的定义

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{或} \quad C = \frac{dQ}{dU}$$

即电压变化将引起电荷变化,从而反映出电容效应。而 PN 结两端加上电压,PN 结内就有电荷的变化,说明 PN 结具有电容效应。PN 结具有两种电容:势垒电容和扩散电容。

1. 势垒电容 C_T

势垒电容是由阻挡层内空间电荷引起的。空间电荷区是由不能移动的正负杂质离子所形

成的,均具有一定的电荷量,所以在PN结储存了一定的电荷,当外加电压使阻挡层变宽时,电荷量增加,如图1-9所示;反之,外加电压使阻挡层变窄时,电荷量减少。即阻挡层中的电荷量随外加电压变化而改变,形成了电容效应,称为势垒电容,用 C_T 表示。理论推导为

$$C_T = \frac{dQ}{dU} = \epsilon \frac{S}{W}$$

式中, ϵ 为半导体材料的介电系数; S 为结面积; W 为阻挡层宽度。

对于同一PN结,由于其 W 随电压而变化,不是一个常数,因而势垒电容 C_T 不是一个常数。 C_T 与外加电压的关系如图1-10所示。一般 C_T 为几皮法(pF)~200 pF。我们可以利用此电容效应组成变容二极管,作为压控可变电容器。

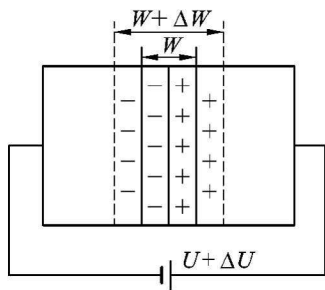


图 1-9 阻挡层内电荷量随外加电压变化

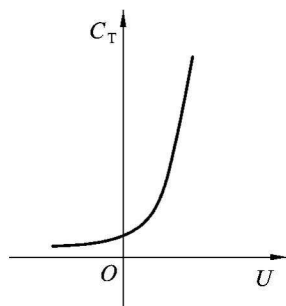


图 1-10 势垒电容和外加电压的关系

2. 扩散电容 C_D

扩散电容是PN结在正向电压时,多数载流子在扩散过程中引起电荷积累而产生的。当PN结加正向电压时,N区的电子扩散到P区,同时P区的空穴也向N区扩散。显然,在PN区交界处($x=0$),载流子的浓度最高。由于扩散运动,离交界处愈远,载流子浓度愈低,这些扩散的载流子,在扩散区积累了电荷,总的电荷量相当于图1-11中曲线1以下的部分(图1-11表示了P区电子 n_p 的分布)。若PN结正向电压加大,则多数载流子扩散加强,电荷积累由曲线1变为曲线2,电荷增加量为 ΔQ ;反之,若正向电压减少,则积累的电荷将减少,这就是扩散电容效应 C_D ,扩散电容正比于正向电流,即 $C_D \propto I$ 。所以,PN结的结电容 C_j 包括两部分,即 $C_j = C_T + C_D$ 。一般说来,PN结正偏时,扩散电容起主要作用, $C_j \approx C_D$;当PN结反偏时,势垒电容起主要作用,即 $C_j \approx C_T$ 。

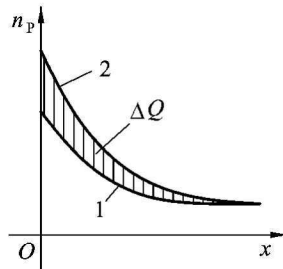


图 1-11 P区中电子浓度的分布曲线及电荷的积累

表示了P区电子 n_p 的分布)。若PN结正向电压加大,则多数载流子扩散加强,电荷积累由曲线1变为曲线2,电荷增加量为 ΔQ ;反之,若正向电压减少,则积累的电荷将减少,这就是扩散电容效应 C_D ,扩散电容正比于正向电流,即 $C_D \propto I$ 。所以,PN结的结电容 C_j 包括两部分,即 $C_j = C_T + C_D$ 。一般说来,PN结正偏时,扩散电容起主要作用, $C_j \approx C_D$;当PN结反偏时,势垒电容起主要作用,即 $C_j \approx C_T$ 。

1.2.5 半导体二极管

半导体二极管是由PN结加上引线和管壳构成的。

二极管的类型很多,按制造二极管的材料来分,有硅二极管和锗二极管。从管子的结构来分,有以下几种类型。

(1) 点接触型二极管。其结构见图1-12a,它的特点是结面积小,因而结电容小,适用于高频下工作,最高工作频率可达几百兆赫,但不能通过很大的电流。主要应用于小电流的

整流和检波、混频等。

(2) 面接触型二极管。其结构见图 1-12b，它的特点是结面积大，因而能通过较大的电流，但其结电容也大，只能工作在较低的频率下，可用于整流电路。

(3) 硅平面型二极管。其结构见图 1-12c。它的特点是结面积大的，可通过较大的电流，适用于大功率整流；结面积小的，结电容小，适用于在脉冲数字电路中作开关管。

二极管的符号如图 1-12d 所示。

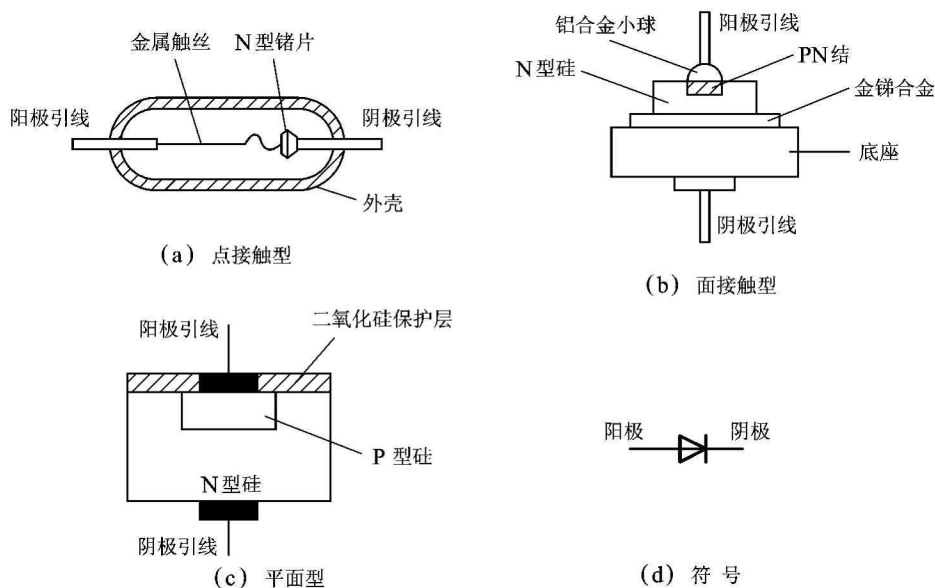


图 1-12 半导体二极管的结构和符号

1. 二极管的特性

二极管本质上就是一个 PN 结，但是对于真实的二极管器件，考虑到引线电阻和半导体的体电阻以及表面漏电流等因素的影响，二极管的特性与 PN 结理论特性略有差别。实测特性曲线如图 1-13 所示，其特点如下。

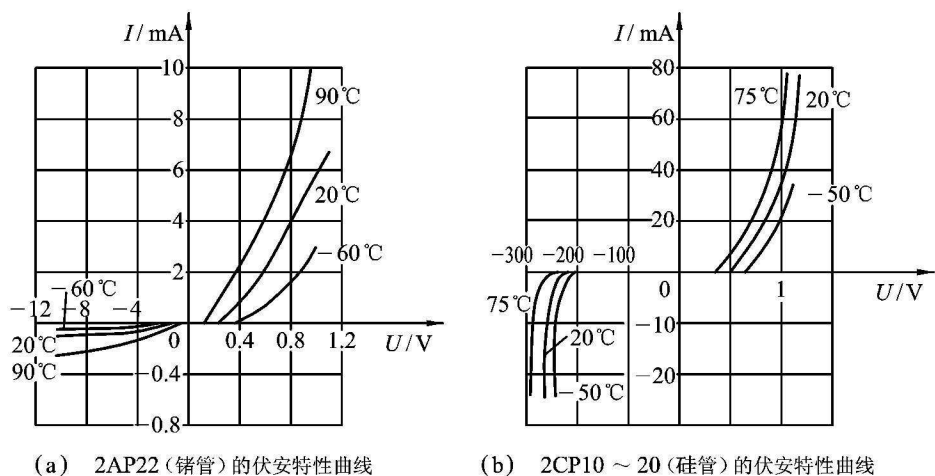


图 1-13 二极管的伏安特性曲线