

模拟与数字电路基础

上册 模拟部分

郝会新 主编 李庆禹 张玉华 编

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书由东北师范大学郝会新教授任主编,在原编讲义的基础上,不断总结教学经验,并参考了一些国外教材编写而成,在内容和体系上都做了更新和改进。本书的体系为器件—模拟电路—数字电路—模/数和数/模转换。内容的阐述突出基本概念、基本原理和基本分析方法,并突出了师范的特点。

全书共14章,1~10章为模拟部分(上册),11~14章为数字部分(下册)。

上册的内容为:半导体器件、放大电路基础、放大电路中的负反馈、功率放大电路、差动放大电路和集成运算放大电路、调谐放大电路、正弦波振荡电路、调制、解调及变频电路、直流稳压电源和脉冲电路基础知识及脉冲发生器。

本书可做为高等师范院校物理专业的教材。

责任编辑 郭玉凤

模拟与数字电路基础

上 册

模 拟 部 分

郝会新 主编

李庆禹 张玉华 编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本787×1092 1/16 印张 25 字数 574 000

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数0001—1790

ISBN 7-04-003463-8/TN·161

定价7.45元

前 言

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学。电子电路是指含有电子器件的电路。

电子电路按其分析方法,可分为两大类,一类是模拟电路,包括线性、非线性及开关电路;另一类是数字电路,包括组合逻辑与时序逻辑电路。

本书主要介绍这两类电路的基本概念、基本原理和基本分析方法,故定名为《模拟与数字电路基础》。

本书为适应电子技术的飞速发展,考虑到国内、外的先进技术与我国的客观实际、社会的需要以及学生应该具备的电子技术方面的知识,并根据我们多年教学实践的经验编写而成。

本书在内容的选取、处理和体系的安排上有以下几个特点:

1. 采取“电子器件、模拟电路、数字电路及数/模和模/数转换电路”的基本体系,同时考虑到微机在当前已经应用到各行各业的现实,做为必要的基础知识,对微机的基本原理也做了简要介绍。

2. 取材较广,具有较大的适应性。本书在内容的选取上,主要介绍基础知识、基本原理和基本分析方法,同时对一些实际电路和某些整机的设计和分析方法也做了介绍,并尽可能理论联系实际,分立元件电路和集成电路共存,并以突出集成电路为主,模拟电路与数字电路并重,内容有所更新,以期达到加强基础,增强适应能力的目的。

3. 内容的叙述由浅入深,由简及繁。书中前几章内容的叙述较详细,例题、习题也较多,在此基础上,后几章内容的叙述,力求简明扼要,以期养成读者自学、分析问题和解决问题的能力;书中选取了较多的思考题和习题,其中有些是做为正文的补充,有些难度较大,供不同读者选做。

4. 各章节之间既有联系又有一定的独立性,可供取舍。只讲前十二章约需72学时;讲前十三章约需90学时;讲完全书约需120学时。书中某些内容打有星号(*)可供选用。

全书共分十八章。一至五章由李庆禹同志编写并对全稿进行了修订;六至九章由张玉华同志编写;十至十八章由郝会新同志编写;十一至十七章由姜玉兰、卢洪波编写;最后由郝会新同志定稿。

本书由张晋梗副教授主审,张先生对本书初稿提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中定有许多错误和不妥之处,殷切希望读者给以批评指正。

编者

1988年3月于长春

目 录

前言..... I

第一章 半导体器件

1.1 半导体基本知识..... 1
1.1.1 本征半导体..... 1
1.1.2 杂质半导体..... 4
1.1.3 PN结..... 5
1.2 半导体二极管..... 8
1.2.1 二极管的构造和分类..... 8
1.2.2 二极管的伏安特性..... 9
1.2.3 二极管的非线性和等效电阻..... 11
1.2.4 二极管的电容效应及交流等效电路..... 13
1.2.5 二极管的主要参数..... 14
1.3 半导体三极管..... 15
1.3.1 三极管的基本结构..... 15
1.3.2 三极管的电流分配和放大作用..... 17
1.3.3 三极管的特性曲线..... 20
1.3.4 三极管的主要参数..... 23
1.4 场效应管..... 27
1.4.1 结型场效应管..... 28
1.4.2 绝缘栅场效应管..... 31
1.4.3 场效应管的主要参数..... 34
附录 1-1 半导体器件命名方法..... 36
思考题和习题..... 37

第二章 放大电路基础

2.1 基本放大电路的工作原理..... 41
2.1.1 基本放大电路的组成..... 41
2.1.2 静态工作点的设置..... 43
2.1.3 各极电流及电压波形——放大过程..... 44
2.1.4 放大电路的主要性能指标..... 46
2.2 偏置电路和静态工作点的稳定..... 49
2.2.1 定基流偏置电路..... 49
2.2.2 温度对静态工作点的影响..... 50

2.2.3 电流负反馈式偏置电路..... 51
2.3 放大电路的基本分析方法..... 55
2.3.1 直流通路和交流通路..... 55
2.3.2 图解法..... 56
2.3.3 微变等效电路法..... 63
2.4 共基和共集基本放大电路..... 74
2.4.1 共基极基本放大电路..... 74
2.4.2 共集电极基本放大电路..... 76
2.4.3 三种基本放大电路的比较..... 79
2.5 场效应管放大电路..... 80
2.5.1 直流偏置与静态分析..... 80
2.5.2 动态分析..... 83
2.6 多级放大电路..... 86
2.6.1 级间的耦合方式..... 86
2.6.2 电压放大倍数..... 88
2.6.3 输入电阻和输出电阻..... 90
2.7 放大电路的频率特性..... 91
2.7.1 频率特性的一般概念..... 92
2.7.2 三极管的混合参数 π 型等效电路..... 94
2.7.3 电流放大系数的频率特性..... 97
2.7.4 共射基本放大电路的频率特性..... 99
2.7.5 多级放大电路的频率特性..... 109
思考题和习题..... 111

第三章 放大电路中的负反馈

3.1 反馈的基本概念..... 118
3.2 放大电路中负反馈的类型..... 119
3.2.1 负反馈的分类及判别..... 119
3.2.2 负反馈放大电路类型举例及分析..... 121
3.3 负反馈放大电路的放大倍数..... 125
3.3.1 基本关系式推导..... 125
3.3.2 各类反馈表达式..... 127
3.4 负反馈对放大电路性能的影响..... 128
3.4.1 提高放大倍数的稳定性..... 128

3.4.2	展宽通频带	128
3.4.3	减小非线性失真	131
3.4.4	改变输入电阻和输出电阻	132
3.5	负反馈放大电路的计算方法	134
3.5.1	深反馈放大电路的近似估算	135
3.5.2	方框图的计算方法	137
3.6	负反馈放大电路的稳定问题	143
	思考题和习题	145

第四章 功率放大电路

4.1	功率放大电路的特点和要求	150
4.2	单管功率放大电路	151
4.3	互补对称功率放大电路	153
4.3.1	功放电路三种放大状态	153
4.3.2	乙类互补对称电路	154
4.3.3	甲乙类互补对称电路	157
4.4	单电源的互补对称电路	158
4.4.1	原理电路	158
4.4.2	工作点的稳定	159
4.4.3	自举电路的作用	160
4.5	复合管互补对称电路	160
4.5.1	复合管	161
4.5.2	复合管互补对称电路	162
4.5.3	互补对称电路实例	162
4.6	变压器耦合功率放大电路	164
4.6.1	电路工作原理	165
4.6.2	输出功率、管耗和效率的计算	165
	思考题和习题	166

第五章 差动放大电路和集成运算放大器

5.1	直接耦合放大电路中的零点漂移	169
5.1.1	零点漂移现象及产生的原因	169
5.1.2	零点漂移的危害及衡量	170
5.1.3	减小零点漂移的措施	170
5.2	差动放大电路	171
5.2.1	基本差动放大电路	171
5.2.2	带射极电阻的差动放大电路	174
5.2.3	带恒流源的差动放大电路	177
5.2.4	差动放大电路的几种接法	178

5.3	集成运算放大器	179
5.3.1	概述	179
5.3.2	集成运算放大器电路分析	181
5.3.3	集成运放的主要技术指标	187
5.3.4	各类集成运放的特点与选择方法	189
5.4	集成运放的应用	192
5.4.1	概述	192
5.4.2	在信号放大方面的应用	194
5.4.3	在信号运算方面的应用	199
5.4.4	在信号处理方面的应用	205
5.4.5	集成运放应用中的保护	213
	思考题和习题	215

第六章 调谐放大电路

6.1	LC谐振回路	222
6.1.1	串联谐振回路	222
6.1.2	并联谐振回路	224
6.2	调谐放大电路分析	229
6.2.1	y 参数及其等效电路	229
6.2.2	单调谐放大电路	234
6.2.3	单调谐放大电路的稳定性	239
	思考题和习题	242

第七章 正弦波振荡电路

7.1	反馈式正弦波振荡电路基本工作原理	244
7.1.1	产生自激振荡的条件	244
7.1.2	正弦波振荡电路的组成	246
7.2	LC正弦波振荡电路	246
7.2.1	变压器耦合振荡电路	246
7.2.2	三端式振荡电路	252
7.2.3	石英晶体振荡电路	257
7.3	RC正弦波振荡电路	262
7.3.1	RC桥式振荡电路	262
7.3.2	RC相移式振荡电路	266
*7.3.3	XD-22型低频信号发生器电路分析	270
	思考题和习题	273

第八章 调制、解调及变频电路

8.1 调制	277
8.1.1 调幅	277
8.1.2 调频	285
8.2 解调	292
8.2.1 检波	292
8.2.2 鉴频	298
8.3 变频	302
8.3.1 变频原理	302
8.3.2 三极管混频电路和变频电路	303
8.4 六管(晶体管)超外差调幅式收音机	305
8.4.1 超外差收音机的主要指标	305
8.4.2 超外差调幅式收音机线路分析	307
思考题和习题	310

第九章 直流稳压电源

9.1 整流电路	312
9.1.1 半波整流电路	312
9.1.2 全波整流电路	315
9.1.3 桥式整流电路	317
9.1.4 倍压整流电路	317
9.2 滤波电路	318
9.2.1 电容滤波电路	318
9.2.2 电感滤波电路	322

9.2.3 LC 组合滤波电路	324
9.3 直流稳压电路	325
9.3.1 硅稳压管稳压电路	325
9.3.2 三极管串联型稳压电路	332
9.3.3 提高稳压电路性能的措施	336
9.3.4 集成稳压电路的应用简介	339
9.3.5 串联型三极管稳压电路设计举例	340
思考题和习题	344

第十章 脉冲电路基础知识及脉冲发生器

10.1 脉冲信号及其频谱	348
10.1.1 脉冲信号	348
10.1.2 脉冲信号的频谱	349
10.2 脉冲信号作用于线性系统	357
10.2.1 傅里叶积分在复变函数中的推广, 拉普拉斯变换	357
10.2.2 RC 电路的暂态特性	360
10.3 二极管、三极管开关特性	370
10.3.1 二极管的开关特性	371
10.3.2 三极管的开关特性	372
10.4 自激多谐振荡电路和直线电压产生电路	376
10.4.1 自激多谐振荡电路	377
10.4.2 直线电压产生电路	380
思考题和习题	390

第一章 半导体器件

半导体器件是指由半导体材料制成的电子器件,它是组成电子电路的核心元件。常用的半导体器件有: 半导体二极管、半导体三极管、场效应管以及集成电路组件等。

本章只讨论半导体二极管、半导体三极管和场效应管的结构、工作原理、特性及主要参数。而集成电路组件等有关内容,在后面有关章节将进行介绍。

半导体器件的内部结构和外部特性,是研究半导体器件的两个基本方面。然而,在电子电路的实践中主要是应用器件,因此,本章的重点是放在它们的外部特性上;当然,为了更好地应用它们,所以又对器件的内部结构和工作原理作了简单介绍。

1.1 半导体基本知识

各种半导体器件都是由半导体材料制成的,因此,在研究半导体器件的特性、结构之前,我们先对半导体的物理性质、基本知识作一简单介绍。

1.1.1 本征半导体

自然界中物质的种类很多,按其导电的性能来划分,可分为导体、绝缘体和半导体三类。导电性能良好的物质,称为导体,如银、铜、铝、铁等金属材料;几乎不导电的物质,称为绝缘体,如橡胶、陶瓷、塑料和石英等;导电性能介于导体和绝缘体之间的一类物质,被称为半导体,如锗、硅、硒、砷化镓以及一些硫化物和氧化物等。

纯净的、原子排列整齐的半导体,被称为本征半导体。

物质导电性能的优劣,取决于它的原子内部结构和原子之间的结合方式。金属导体在常温情况下,其内部存在大量的自由电子——运载电荷的粒子,因而容易导电;绝缘体内部几乎不存在自由电子,故几乎不传导电流。而本征半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,这是由它的原子结构及原子之间的结合方式决定的。下面我们来分析本征半导体的导电性。

一、共价键结构

在自然界中,属于半导体的物质有很多种,但目前能用来制造半导体器件的材料主要有硅(Si)和锗(Ge)。硅原子中有14个带负电的电子,它们按着一定的规律分布在三层轨道上围绕原子核运动;原子核带有14个电子电量的正电,故通常情况下原子呈电中性。锗原子有32个带负电的电子绕原子核运动。硅和锗的原子结构平面图如图1.1.1(a)所示。它们都有四个价电子,都

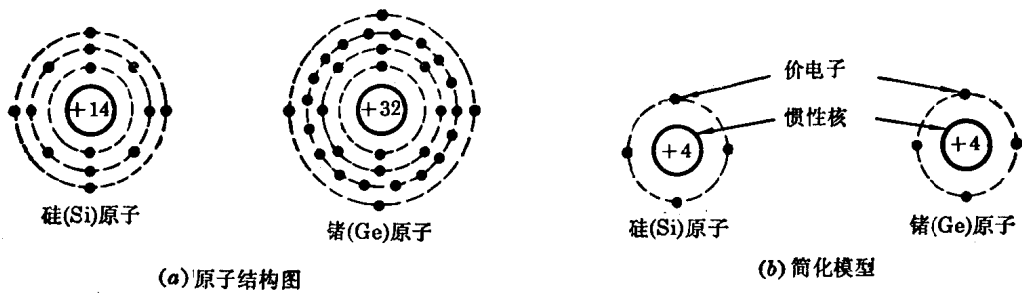


图 1.1.1 硅和锗原子结构模型

是四价元素。物质的导电性能与价电子有关，因此价电子是我们研究的对象；而原子的内层电子受原子核的吸引力较大，可以把它们和原子核看成一个整体(称为惯性核)。所以，在画图时，可用图 1.1.1 (b) 所示的简化模型。惯性核的净电量为原子核的电荷量和内层电子的总电荷量之差。显然，硅和锗惯性核的电荷量都是正的四个电子电荷量。

硅和锗本征半导体，其原子是按一定规则整齐地排列着，组成某种形式的晶体点阵(立体结构)。半导体一般都具有这种晶体结构，所以半导体二极管、半导体三极管，又称为晶体二极管、晶体三极管。

硅(或锗)原子组成晶体后，原子之间靠得很近且距离相等。每个原子最外层的四个价电子，不仅受自身原子核的吸引，而且还分别受到相邻的四个原子核的吸引，价电子轨道发生重叠。两个相邻原子间的一对电子有时围绕自身原子核运动，有时出现在相邻原子所属的轨道上，即两个价电子属于两个原子核所共有。这种现象称为共有化运动。共有化运动方式，便形成了晶体中共价键结构。硅(或锗)每个原子的四个价电子都能跟相邻的四个原子中的价电子发生共有化运动，结合成一组稳定的共价键结构，其平面示意图如图 1.1.2 所示。共价键中的电子受两个原子核引力的约束，如果没有足够的能量是不易脱离公共轨道的，因此称它们为束缚电子。

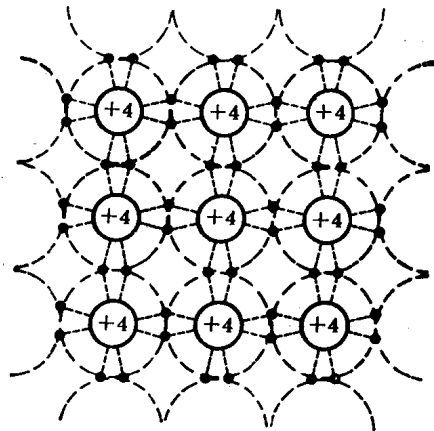


图 1.1.2 硅和锗晶体共价键结构平面示意图

二、导电性

硅和锗本征半导体，在绝对零度时，束缚电子无法挣脱共价键的约束，在本征半导体中没有自由电子，这时的半导体相当于绝缘体。在常温(一般指 25°C)条件下，由于热能转化为电子的动能，其中少数能量较大的束缚电子，就能够挣脱共价键的约束而成为自由电子。这种现象称为电子受“激发”。由于热能而产生的激发称为热激发。此外，由于光照、辐射、场强等作用都会产生电子的激发现象。

另一方面，在束缚电子被激发脱离共价键的约束成为自由电子后，便在其原来的共价键位置

上留下一个缺少电子的空位,我们把这种空位称为“空穴”,如图 1.1.3 所示。空穴的出现,是原子失去电子的结果,原子失去电子成为正离子,正离子带正电,它所带的正电荷,可以看成是空穴带的正电荷。空穴所带的正电荷量等于电子的电荷量。具有空穴的正离子就能够吸引相邻原子中的束缚电子来填补这个空穴,过来的束缚电子又会在其原址留下一个新的空穴,这个新的空穴又会被其附近的束缚电子所填补。这样依次填补下去,便形成了一种束缚电子的移动,同时空穴也就从一个位置移动到另一个位置上。为了使问题简化,通常我们不说多个束缚电子依次填补空穴的移动,而直接说成一个空穴的移动,即用一个空穴的运动代替多个束缚电子的移位。因此说,空穴带正电荷,并可以运动,它的运动相当于正电荷的运动。

这里需要指出,束缚电子移动跟自由电子运动的效果是不同的。自由电子移动到那里,那里就显负电性;束缚电子移动到那里,那里就不显电性(束缚电子填补了那里的空穴,使正离子成为中性原子),但却在它的原址留下一个空穴而显正电性。基于这个原因,才引进了“空穴”这一新概念。

在本征半导体中,由于热(或光)的激发,产生一个自由电子,必然同时产生一个空穴。电子和空穴总是成对出现的(称做“电子-空穴对”),这是热激发一个重要特征。另一方面,自由电子在运动中也会填补空穴,作为电子和空穴的作用而消失,这种现象称为“复合”。在一定的条件(如温度、光照、场强等)下,电子-空穴对的产生与复合数量相当,达到动态平衡,因而电子-空穴对就维持在一定的数量上。

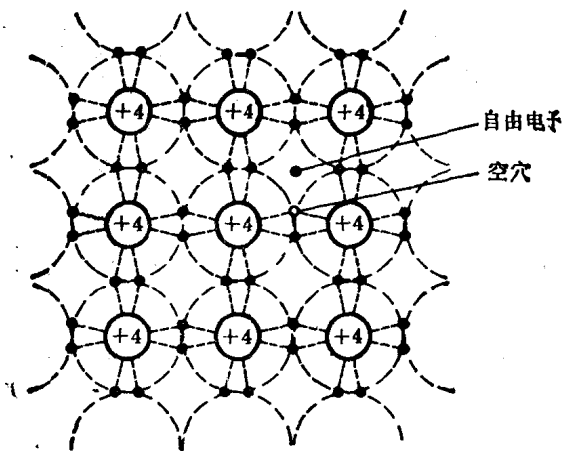


图 1.1.3 热激发产生的电子空穴对

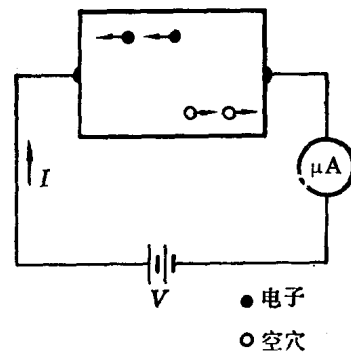


图 1.1.4 本征半导体中载流子的运动

综上所述,在常温下,本征半导体中存在着带负电荷的自由电子(以下简称为“电子”)和带正电荷的空穴。当在半导体的两端加上电压时,两种带电粒子将同时参与导电:电子向电源的正极方向移动(形成电子电流),空穴向电源的负极方向移动(形成空穴电流),如图 1.1.4 所示。空穴和电子数量相等,流过外电路的电流等于二者电流之和,这是本征半导体导电的一个重要特征。

自由电子和空穴都被称为载流子。

常温下,在本征半导体中,靠热激发产生的电子-空穴对的数量是非常少的,所以其导电性能很差。但是,它对温度(或光照)却很敏感,随着环境温度的升高,由于热激发产生的电子-空穴对的数目将按指数规律增加,这将使半导体器件性能不稳定;然而,又利用它的这一特性,制成了受热控制的热敏元件和受光控制的光敏元件。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中,可以掺入少量其它元素的原子,这些原子对本征半导体而言,称为“杂质”。掺有杂质的半导体,称为杂质半导体。杂质半导体的导电能力和导电机构发生了显著的变化。人们利用了这个特点,制成了各种性能的半导体器件。

在杂质半导体中,因掺入杂质的性质不同,可分为N型半导体和P型半导体两大类。

一、N型半导体

当在硅(或锗)本征半导体中,掺入的少量杂质是五价元素磷(或砷、锑)时,由于磷原子的数目比硅原子的数目少得多,所以整个晶体结构基本不变,只是在某些位置上的硅原子被磷原子所代替,如图1.1.5所示,但是,磷原子有五个价电子,当它以四个价电子同相邻的四个硅原子组成共价键后,还剩余一个价电子。这个价电子没有被约束在共价键内,它只受到磷原子核的吸引,因而受到的约束力较小,在常温下就能挣脱吸引而成为自由电子。这样,每个磷原子都可能给出一个自由电子,从而使半导体中的电子载流子数目大大增加,导电能力大大增强。磷原子给出一个电子后,本身成为正离子(杂质电离),它被约束在晶体结构中,不能自由行动。这类半导体主要靠电子导电,故称为电子型半导体,简称N型半导体。磷原子在晶体中给出了一个自由电子,称为施主杂质(或N型杂质)。

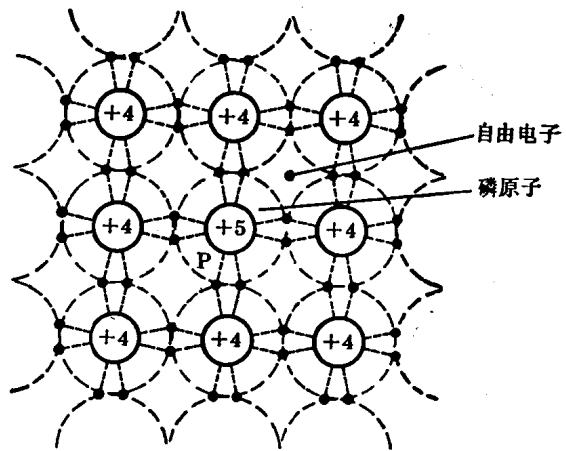


图1.1.5 硅中掺磷形成N型半导体

在N型半导体中,除了由杂质给出了大量的自由电子外,还会由于热(或光等)激发产生的少量电子-空穴对,而存在着少量的空穴。但是,空穴的数量远小于电子的数量,因此,把自由电子称为多数载流子,把空穴称为少数载流子。控制掺入杂质的多少,便可控制多数载流子的数量。

二、P型半导体

当在硅(或锗)本征半导体中,掺入的少量杂质是三价元素硼(或铝、镓)时,硼原子也会与硅原子组成共价键结构,如图1.1.6所示。因为硼原子只有三个价电子,当它与相邻的四个硅原子

组成共价键时,还缺少一个价电子,所以在一个共价键上就出现了缺少一个价电子的空位。为了满足结成四对共价键形成稳定状态的需要,这个空位很容易接受一个外来电子的填补,而附近硅原子的价电子在热激发下,也很容易跃入到这个空位上来。结果,一方面使硼原子多附着一个电子而形成不能移动的负离子(杂质电离);另一方面在邻近硅原子的共价键上出现一个空穴。这样,每个硼原子都可能接受一个价电子,同时在附近产生一个空穴,从而使半导体中的空穴载流子数大大增加,导电能力大大增强。这类半导体主要靠空穴导电,故称为空穴型半导体,简称P型半导体。硼原子在硅晶体中接受电子,称为受主杂质(或P型杂质)。

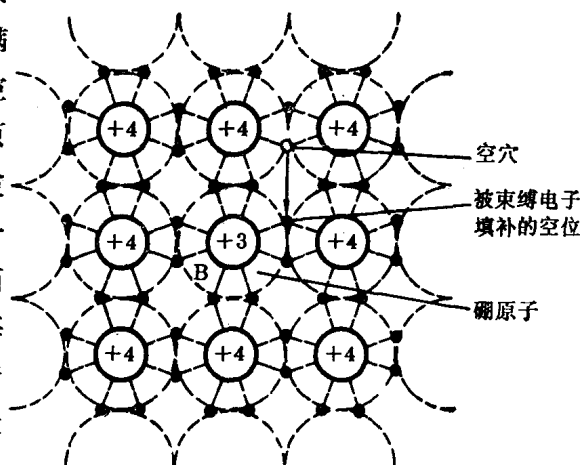


图 1.1.6 硅中掺硼形成 P 型半导体

在P型半导体中,由于热激发也会产生少量的电子-空穴对,而存在着少量的自由电子。电子是少数载流子,空穴是多数载流子。

最后还应指出,N型或P型半导体都是电中性的,对外不显电性。这是因为在本征半导体中掺入的杂质都是电中性的,只是杂质原子的价电子数目比本征半导体原子的价电子数目多一个或少一个,在半导体中出现了大量的可以运动的电子或空穴,并未破坏整个半导体内正负电荷的平衡状态。

1.1.3 PN 结

把一块P型半导体和一块N型半导体紧密“结合”起来,在交界面附近便形成了一个PN结。PN结是构成半导体二极管、三极管等半导体器件的基础。

一、PN 结的形成

上节中已指出,在P型半导体内存在着可以运动的多数载流子——空穴和少数载流子——自由电子,以及不能移动的受主(负)离子;在N型半导体内存在着可以运动的多数载流子——电子和少数载流子——空穴,以及不能移动的施主(正)离子,如图 1.1.7(a)所示。

当P型半导体和N型半导体按一定方式接触后,由于交界面两边的载流子浓度不同,将会出现多数载流子的相互扩散,即电子自N区向P区扩散;空穴自P区向N区扩散,如图 1.1.7(b)所示。扩散首先在交界面处进行。当N区靠近界面处的电子扩散到P区,并和P区空穴复合后,就使P区暴露出不能移动的受主负离子,同时又在N区界面处留下不能移动的施主正离子;同样,P区空穴扩散到N区,并和N区电子复合后,便在N区暴露出不能移动的正离子,在P区留下不能移动的负离子。扩散的结果,在交界面附近P区中显露出一批不能移动的负离子,N区中显露出一批不能移动的正离子。这些不能移动的带电粒子,通称为空间电荷。它们在交界面

两边，形成了N区带正电荷，P区带负电荷的一层很薄的“空间电荷区”，这就是所说的PN结，如图1.1.7(c)所示。

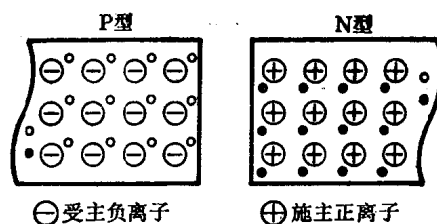
出现空间电荷区以后，便在其内部产生一个方向由正电荷指向负电荷的电场，或者说，在PN结内产生一个由N区指向P区的电场[见图1.1.7(c)]。因为这个电场是由PN结内部产生的，所以称为内电场。显然，这个内电场是阻止多数载流子继续扩散的，例如，当P区中空穴向N区扩散通过空间电荷区时，就要受到内电场的阻力，甚至被推回P区。另一方面，P区中的少数载流子——电子和N区中的少数载流子——空穴，在这个内电场的作用下，很容易被驱使到对方区域。我们把载流子在电场作用下的运动，称为漂移运动。漂移运动和扩散运动的方向正好相反。从N区漂移到P区的空穴补充了原界面处P区所失去的空穴，从P区漂移到N区的电子补充了原界面处N区所失去的电子，结果使空间电荷减少，空间电荷区变窄。

综上所述，扩散使空间电荷区加宽，内电场增强，其结果又使多数载流子扩散减弱，少数载流子漂移增强；漂移使空间电荷区变窄，内电场减弱，又使扩散容易进行。可见，扩散和漂移既矛盾又统一。开始时，扩散运动占优势，但随着电子和空穴的扩散，空间电荷区不断加宽，内电场不断增强，反过来又促使扩散运动不断减弱，漂移运动不断加强。最后，当扩散运动和漂移运动作用相等时，便处于动态平衡状态。此时，两边的载流子尽管还会有来有往，但扩散过去多少，就会有相同数量的载流子漂移过来，空间电荷不再增加，形成了稳定的空间电荷区。如果环境条件不改变，这个平衡状态就不会被破坏。空间电荷区很薄，一般从几个微米到几十微米。

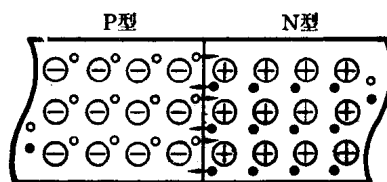
空间电荷区又称为耗尽层，这是因为空间电荷区内的载流子都“跑掉”了——消耗尽了而得名。空间电荷区还称做阻挡层，这是由于空间电荷区的内电场能阻止多数载流子扩散运动的缘故。PN结对两边的P型和N型半导体本身的体电阻来说，它是一个高电阻区。

二、PN结的单向导电性

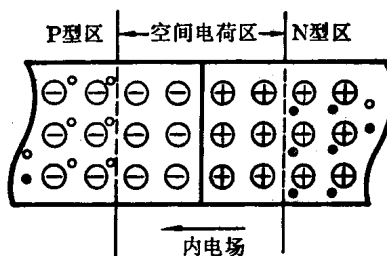
PN结有一个重要的外部特性——单向导电（电流只能从一个方向上流通）。这是在外加电压时才显示出来的特性。下面，我们从PN结内部载流子的运动规律，来说明这种单向导电现象。



(a) 半导体中载流子及离子



(b) 载流子的扩散



(c) 空间电荷区及内电场

图 1.1.7 PN 结的形成

1. 外加正向电压, PN 结导通

在图 1.1.8 中,外加电压 V_F 的正端接 P 区,负端接 N 区,外加电场与 PN 结内电场方向相反。这个方向的外加电压称为正向电压或正向偏置电压。由于 PN 结是一个高阻区,所以外加电压几乎全部降落在 PN 结上。在外加电场作用下, P 区中的空穴和 N 区中的电子被推向 PN 结,并把空间电荷区两边的正负离子中和了一部分,使得空间电荷量减少,空间电荷区变窄(从原来未加电压时的 11' 线变到 22' 线),内电场减弱,从而破坏了 PN 结原有的平衡状态。于是扩散运动超过漂移运动,使扩散运动连续不断地进行下去,形成较大的扩散电流。而外加电源又不断地向半导体补充空穴和电子,使扩散电流得以维持,在外电路上便形成了一个流入 P 区的电流 I_F 。这种现象称为 PN 结导通。 I_F 是在正向电压作用下产生的,称为正向电流。

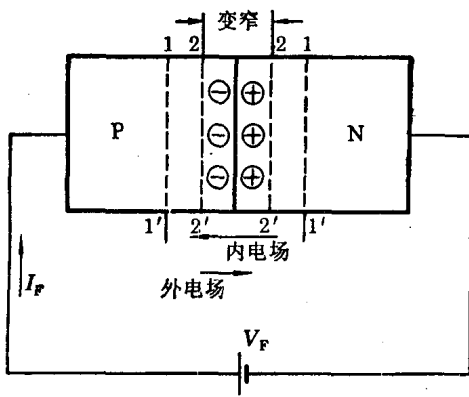


图 1.1.8 外加正向电压

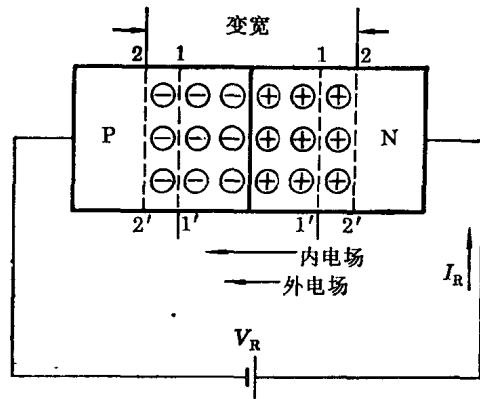


图 1.1.9 外加反向电压

2. 外加反向电压, PN 结截止

在图 1.1.9 中,外加电压 V_R 的正端接 N 区,负端接 P 区,外加电场方向与 PN 结内电场方向相同。这个方向的外加电压称为反向电压或反向偏置电压。此时,外电场驱使 N 区中的电子和 P 区中的空穴离开 PN 结,从而在结附近留下更多的正、负离子,使得空间电荷区加宽(从 11' 线变为 22' 线),内电场增强,扩散运动被削弱,漂移运动超过扩散运动,于是形成了通过 PN 结的漂移电流。外电源不断地向半导体补充空穴和电子,使得电流得以维持,在外电路便形成了一个流入 N 区的电流 I_R 。 I_R 是在反向电压作用下产生的,称为反向电流。反向电流是由少数载流子的漂移运动形成的,在温度不变时,少数载流子的浓度不变,反向电流在一定的范围内将不随外加电压 V_R 的大小而变化,电流处于恒定,所以又称它为反向饱和电流,用 $I_{R(sat)}$ 表示。由于少数载流子的浓度很低,所以 $I_{R(sat)}$ 很小,近似为零,可认为 PN 结是不导电的——截止,或者说,它表现为一个很大的电阻。

综上所述,PN 结加正向电压时,呈现较小的正向电阻,形成较大的正向电流,PN 结处于导通状态;PN 结加反向电压时,呈现很大的反向电阻,流过很小的反向电流,PN 结处于(近似)截止状态。这种只能允许一个方向电流顺利通过的,就称为单向导电性。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的构造和分类

半导体二极管是由一个PN结加上接触电极、引线 and 管壳而构成的,它的构造原理和代表符号如图 1.2.1(a)、(b)所示。P区引出的电极称为正极, N区引出的电极称为负极。符号中的三角形箭头所指的方向为正向电流方向。

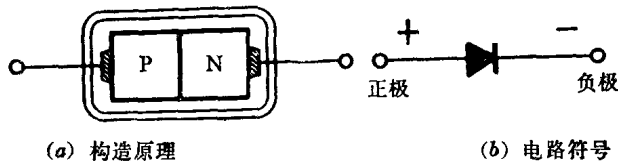


图 1.2.1 二极管构造原理及电路符号

二极管的构造,通常有以下几种类型:

1. 点接触型二极管。构造如图 1.2.2(a)所示。管芯是用一根细金属丝(金质或钨质)触压在硅或锗晶片上,经过电处理,使部分金属原子掺入晶体中,形成反型区,构成PN结。它的特点是结面积小,允许通过的电流小,但结电容小^①,适用于高频(几百兆赫)工作。

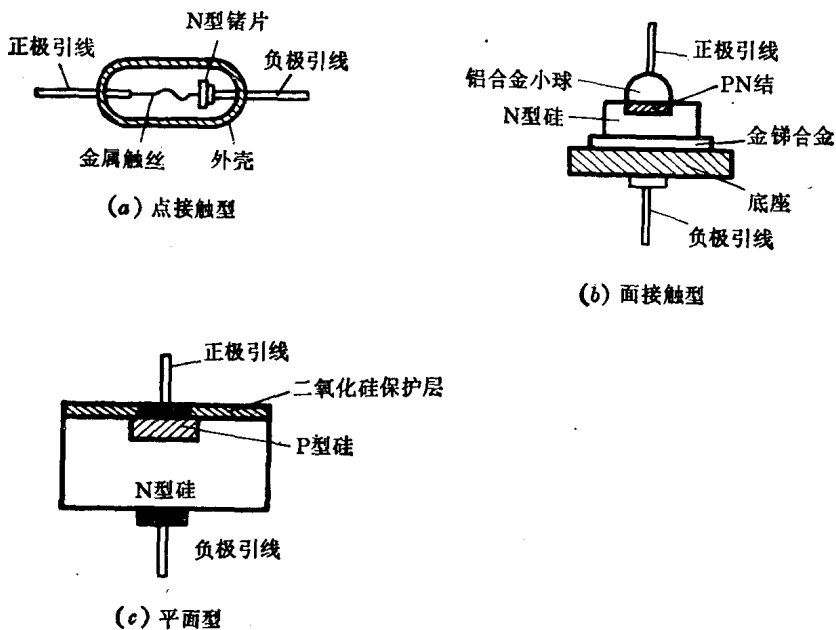


图 1.2.2 半导体二极管的结构

2. 面接触型二极管。管芯构造如图 1.2.2(b)所示。将小铝球置于N型硅片上,加热使之

^① 结电容概念见1.2.4节。

熔化，与铝球接触的固体硅片有一部分熔入到液体的铝球中去，成为铝合金溶液。当温度降低时，铝球和硅片冷却，这时溶解在铝球里的硅原子沿着N型硅的边缘重新结晶出来。重新结晶出来的固体硅里含有大量的铝原子，相当于在硅中掺入大量的三价杂质。这一部分硅薄层变成了P型，它与下面的N型硅形成了一个PN结。它的特点是结面积大，因而允许通过的电流大，但结电容较大，工作频率较低。

3. 硅平面二极管。管芯结构如图 1.2.2(c)所示。首先把N型硅片置于高温氧气中氧化，使表面形成二氧化硅保护层；再用照相、腐蚀等一套光刻技术“刻”出一个窗口；然后进行高浓度硼扩散，获得P型硅。这样，在P型硅和N型硅之间便形成了PN结。最后，在P区和N区表面蒸发一层金属，作为接触电极，做出引线，并把管芯封置于管壳之中，便制成了平面型二极管。表面一层二氧化硅薄膜，起着保护层的作用，它把PN结与外界隔离，使漏电流减小，性能稳定。根据需要，它的结面积可大可小。

二极管按用途分，有整流二极管、稳压二极管、检波二极管、开关二极管、变容二极管等；按半导体材料分，有锗二极管、硅二极管等。无论哪一类半导体二极管都是由一个PN结组成，它们的基本特性是一致的。

在图 1.2.3 上，画出了几种常用二极管的外形图。

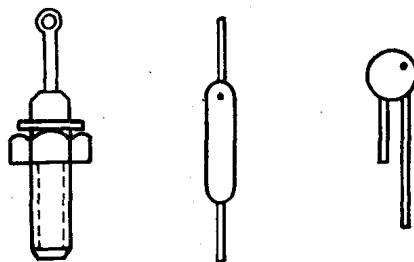


图 1.2.3 几种半导体二极管的外形图

1.2.2 二极管的伏安特性

加到二极管两端的电压和流过二极管电流之间的关系，称为二极管的伏安特性或伏安关系。伏安特性可用公式表示，也可用图解来描述。

一、伏安特性表达式

根据理论分析，二极管的伏安特性可由下式表示^①：

$$I = I_{R(sat)}(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) = I_{R(sat)}(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中 V 为外加(PN结两端)电压， I 为流过二极管的电流， $I_{R(sat)}$ 为反向饱和电流， $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C(电子电荷量)， $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K(波尔兹曼常数)， T 为绝对温度， e 为自然对数的底。 $V_T = kT/q = T/11600$ 为温度的电压当量，在常温(300K)下，有

$$V_T = \frac{300}{11600} \approx 26\text{mV} \quad (1.2.2)$$

式(1.2.1)是理想二极管的伏安特性表达式，称为半导体二极管基本公式。实际上，由于二极管的引出线及半导体内部存在电阻，表面还有漏电流等因素的影响，实测的二极管伏安特性(电压

① 详见北方交通大学电信系编《低频电子线路》上册25~32页。

是加在二极管两端)与理论计算值有一定偏差。

二、伏安特性曲线

用图解(在 V I 直角坐标平面上)表示二极管电压和电流关系的曲线,称为二极管的伏安特性曲线(简称二极管伏安特性)。二极管的伏安特性曲线可从“晶体管图示仪”的荧光屏上观测出来,也可以用逐点测量的方法描绘出来。

实际的二极管伏安特性如图 1.2.4 所示。图中实线表示硅二极管的伏安特性,虚线表示锗二极管的伏安特性。下面对二极管的伏安特性分三部分加以说明:

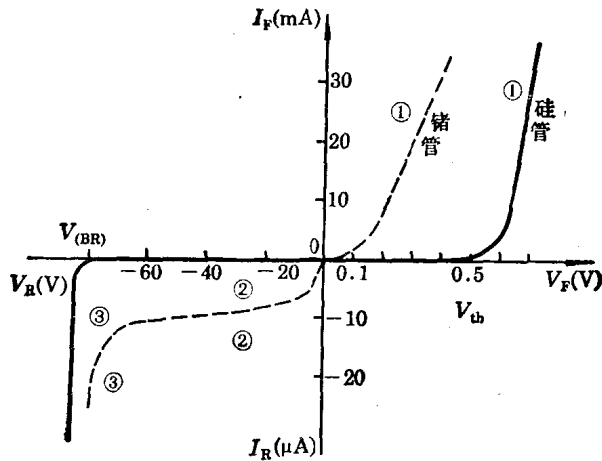


图 1.2.4 二极管的伏安特性

1. 正向特性

二极管加正向电压时的伏安特性,称正向特性,如图 1.2.4 中 ① 段所示。它有以下几个特点:

(1) 正向电压较小(曲线开始的一段)时,正向电流非常小,近似为零。这是因为外电压在 PN 结上形成的外电场还不足以克服内电场对载流子扩散运动的阻力,所以正向电流非常微小,二极管呈现较大的电阻。

(2) 正向电压超过一定数值以后,正向电流才随着正向电压的增加而显著地增加。这是因为结内电场被大大削弱,二极管的电阻变得很小的缘故。这个特定数值电压,称为阈电压或门限电压,记作 V_{th} 。对于硅管 V_{th} 约为 0.5V,对于锗管约为 0.1V。

(3) 在正向电流较小的范围内,伏安特性呈指数关系,而当电流较大时,其特性近似于直线性关系。这是因为正向电压较大时,内电场被大部分抵消,结电阻很小,而 PN 结两侧半导体材料的体电阻压降增大,电流和电压关系主要由体电阻特性决定,故电流随电压近似成线性关系。

(4) 正向导通后,电流在较大范围内变化时,而加在二极管两端的正向电压 V_F 变化不大。一般情况,硅管约 0.6~0.8V,锗管约 0.1~0.3V。

2. 反向特性

二极管加反向电压时的伏安特性，称反向特性，如图 1.2.4 中 ② 段所示。它有以下两个特点：

(1) 反向电压大于某一值(例如 $|V_R| > 0.1V$)以后，反向电流基本不变，这就是反向饱和电流 $I_{R(sat)}$ 。它的数值很小，在常温下，锗管约为几十微安，硅管则小于一微安。锗二极管的反向特性不完全呈水平，略有倾斜，这是因为半导体表面结构不完善等因素造成漏电流较大，这种漏电流随电压增大而加大，所以使反向电流的饱和特性稍有偏离。

(2) 反向饱和电流随温度的升高而增长的很快(图中未画出)，这是因为少数载流子的数量随温度按指数规律增加的缘故。

3. 反向击穿特性

反向电压增大到某一定值时，反向电流突然急剧增大，二极管两端电压有少许的变化，则电流变化很大，如图 1.2.4 中 ③ 段所示。这种现象称为“反向击穿”。出现击穿时的电压称为反向击穿电压，记作 $V_{(BR)}$ 。

击穿的物理过程，一般可分为三类：

① 雪崩击穿。当反向电压增大时，结内电场很强，结内的少数载流子在强电场的作用下，漂移速度加快，获得很大的动能，当它碰撞到其它原子时，就能把其中的价电子碰撞出来，产生新的电子空穴对(碰撞电离)。这些新的载流子在强电场的作用下，又会被加速去碰撞其它原子，产生更多的载流子，从而使反向电流急剧增大。因为这个过程进行极快，象雪崩一样，所以称这种击穿为雪崩击穿。雪崩击穿的物理本质是碰撞电离，它是发生在掺杂浓度比较低、外加电压比较大的情况中。

② 齐纳击穿。当 PN 结两边掺杂浓度很高时，因而形成的 PN 结阻挡层很薄，少数载流子在其中作漂移运动时，与中性原子碰撞的机会很少，不易发生碰撞电离。但是，由于 PN 结薄，外加反向电压不需要很大，结内电场就非常强，它可以把空间电荷区内的中性原子的价电子从共价键中拉出来，产生电子空穴对(场致激发)。从而使载流子突然增多，引起反向电流剧增。这种击穿称为齐纳击穿。齐纳击穿的物理本质是场致激发，它是发生在掺杂浓度高、外加电压较低(一般小于 5V)的 PN 结情况中。

③ 热击穿。当外加反向电压较大，而 PN 结中又有一定的电流通过时，PN 结中功率消耗较大，使结的温度升高。结温升高又加剧了热激发，产生更多的电子空穴对，反向电流更大，结温继续上升，……。在散热不良的情况下，这种循环过程会使反向电流剧增，导致 PN 结击穿。这种击穿称为热击穿。

二极管在短时间内，发生前两种击穿时，管子不一定损坏。但如果再出现热击时，将很容易造成管子永久性损坏。因此，在使用二极管时，应避免出现击穿。

1.2.3 二极管的非线性和等效电阻

我们知道，线性电阻元件上电压和电流的关系服从于欧姆定律，即电压和电流的比值是一常数($V/I=R$)。在以电压为横轴，电流为纵轴的直角平面中，线性电阻元件的伏安关系是过原点