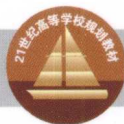


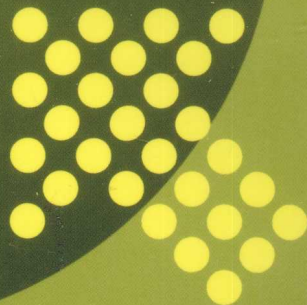
21世纪高等学校规划教材



DIANGONGXUE

电 工 学 (下册)

王智忠 主 编
赵旭峰 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

TM1/189

:2

2009

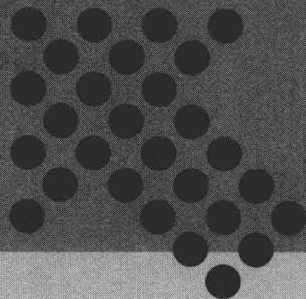
21世纪高等学校规划教材



DIANGONGXUE

电工学 (下册)

主 编	王智忠		
副主编	赵旭峰		
编 写	今朝霞	赵红梅	米启超
	郭豫荣	杨章勇	
主 审	朱承高	蒋 军	



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分为 20 章，分上、下两册。上册为电工技术，主要内容有电路模型和电路定律、线性电子电路的分析方法、正弦交流电路、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路的时域分析、磁路与铁心线圈电路、交流电动机、电气控制系统和电工测量。下册为电子技术，主要内容有半导体二极管和晶体管、基本放大电路、场效晶体管及其放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源、数字电路基础、组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、脉冲信号的产生及整形、模拟量和数字量的转换等，附录中介绍了仿真软件及其在电工学中的应用。每章后都有本章小结和习题，并提供部分习题答案。

本书可作为高等院校非电类机自、汽车、材控、高分子、金属、工业工程等各本科专业的教材，也可供有关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学. 下册/王智忠主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-9426-8

I. 电… II. 王… III. 电工学—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 165228 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 11 月第一版 2009 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 419 千字

定价 27.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着现代科学技术的迅速发展和高等教育改革的不断深入,当今信息社会对人才素质的要求不断提高,使得电工学这门重要的技术基础课日益体现出其应用和推广的价值,它是一门集电路分析、电机及控制、电工测量、模拟电子线路、数字电子线路于一体的综合性、实践性很强的课程,也是非电类专业学生认识电工技术与电子技术、获取电工与电子技术基础知识以及进行后续专业学习的关键课程。为了密切配合高等院校素质教育计划,推进机电一体化的全面实施,我们分上、下册编写了这套《电工学》教材。

本书上册主要内容有电路模型和电路定律、线性电子电路的分析方法、正弦交流电路、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路的时域分析、磁路与铁心线圈电路、交流电动机、电气控制系统和电工测量。

下册内容包括模拟电子技术和数字电子技术两大部分,还增加了有关软件仿真的内容,放在附录之中。模拟电子技术的内容包括半导体二极管和晶体管、基本放大电路、场效晶体管及其放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源;数字电子技术的内容包括数字电路基础、组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、脉冲信号的产生及整形、模拟量和数字量的转换等。

本教材的参考课时为70~90课时,也可上、下册单独使用。对于少课时采用此书,教师可根据专业特点和学时数进行适当取舍,加有*的章节少学时的可以不讲,供学生自学。

考虑到实际教学和自学的需要,每章内容结束后都编有本章小结,以帮助学生进行系统的归纳总结及扩展延伸。书的后面附有部分习题的答案或提示,以方便读者使用本书。就整体而言,全书力求突出基本的概念和原理,由浅入深,通俗易懂,以较少的学时达到适当的深度和广度。

本套教材由陕西理工学院与河南城建学院两校有关老师共同合作编写而成。全书由王智忠担任主编,负责全书的协调组织、统稿和改稿。上册副主编为令朝霞,下册副主编为赵旭峰。各章节的编写具体分工如下:王智忠(第1章、第5章、第6章、第15章、第17章),令朝霞(第8章、第12章、第18章、附录A),赵旭峰(第3章、第9章、第13章、第14章、附录B),郭豫荣(第2章、第7章),杨章勇(第4章、第10章、第16章),赵红梅(第11章),米启超(第19章、第20章)。

上海交通大学朱承高教授和陕西理工学院蒋军教授在百忙之中对全书进行了认真细致的审定,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,加之时间比较仓促,书中的疏漏和错误之处在所难免,恳请使用本书的读者和同行老师不吝指正。

编 者

2009年8月

目 录

前言

第 11 章 半导体二极管和晶体管	1
11.1 PN 结	1
11.2 半导体二极管	6
11.3 双极晶体管	12
本章小结	18
习题 11	19
第 12 章 基本放大电路	21
12.1 放大电路的基本知识	21
12.2 基本共发射极放大电路	23
12.3 放大电路静态工作点的稳定	34
12.4 射极输出器	40
12.5 多级放大电路	43
12.6 差分放大电路	50
12.7 功率放大电路	57
* 12.8 实际应用电路举例	61
本章小结	65
习题 12	66
* 第 13 章 场效晶体管及其放大电路	71
13.1 结形场效晶体管	71
13.2 绝缘栅场效晶体管	74
13.3 场效晶体管放大电路	76
本章小结	78
习题 13	78
第 14 章 集成运算放大器及其应用	80
14.1 集成运算放大电路简介	80
14.2 集成运算放大器的基本运算电路分析	83
14.3 放大电路中的负反馈	88
14.4 运算放大器在信号处理方面的应用	92
* 14.5 运算放大器在其他方面的应用	95
* 14.6 使用运算放大器应注意的几个问题	97
本章小结	98
习题 14	99

第 15 章 直流稳压电源	102
15.1 直流稳压电源的组成	102
15.2 单相整流电路	102
15.3 滤波电路	107
15.4 稳压电路	109
15.5 串联型线性直流稳压电源	111
15.6 集成稳压电源	113
* 15.7 开关型直流稳压电源	116
本章小结	117
习题 15	118
第 16 章 数字电路基础	121
16.1 概述	121
16.2 数制	123
16.3 基本逻辑门电路	126
16.4 逻辑代数基础	131
16.5 逻辑函数的化简	134
16.6 TTL 门电路	137
* 16.7 CMOS 门电路	142
本章小结	145
习题 16	145
第 17 章 组合逻辑电路	148
17.1 组合逻辑电路的分析	148
17.2 组合逻辑电路的设计	149
17.3 编码器	153
17.4 译码器	156
17.5 数据选择器	160
17.6 数据分配器	165
17.7 数码比较器	166
17.8 加法器	167
* 17.9 组合逻辑电路中的竞争与冒险	170
* 17.10 应用电路介绍	172
本章小结	173
习题 17	174
第 18 章 触发器和时序逻辑电路	176
18.1 双稳态触发器	176
18.2 寄存器	187
18.3 计数器	193
* 18.4 时序逻辑电路及应用举例	207
本章小结	213

习题 18	214
第 19 章 脉冲信号的产生及整形	218
19.1 555 定时器	218
19.2 多谐振荡器	219
19.3 单稳态触发器	222
19.4 施密特触发器	225
本章小结	227
习题 19	228
第 20 章 模拟量和数字量的转换	230
20.1 概述	230
20.2 D/A 转换器	230
20.3 A/D 转换器	235
本章小结	239
习题 20	239
部分习题答案	241
附录 A 仿真软件 Multisim 的应用	249
附录 B 半导体器件及集成电路命名方法	265
参考文献	268

第 11 章 半导体二极管和晶体管

半导体器件是电子电路的核心元件，而 PN 结又是构成各种半导体器件的基础。本章介绍半导体的基础知识，阐述半导体二极管、晶体管的工作原理、特性曲线和主要参数。

11.1 PN 结

11.1.1 本征半导体

1. 半导体

物质按照其导电性质可以分为导体、半导体和绝缘体。物质的导电性质取决于原子结构。导体一般为低价元素构成，如铜、铁、铝等金属，其最外层电子受原子核的束缚力很小，因而容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子。在外电场力的作用下，这些电子产生定向移动形成电流，显示出较好的导电特性。高价元素（惰性气体）和高分子物质（橡胶、塑料），最外层电子受原子核束缚力很强，极难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，又不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧，因此，半导体的导电性介于导体和绝缘体之间。

半导体在光照和热辐射条件下，其导电性有明显的变化，称为光敏特性和热敏特性。利用这些特性就做成了各种光敏电阻和热敏电阻。若在半导体中人为地掺入特定的杂质元素时，其导电性能将急剧增加，称为掺杂特性。例如在纯硅中掺入百万分之一的硼后，硅的电阻率就大约从 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 。这些特殊的性质决定了半导体可以制作二极管、双极晶体管、场效晶体管及晶闸管等各种电子器件。

2. 本征半导体的晶体结构

纯净晶体结构的半导体称为本征半导体。常用的半导体材料有硅和锗，它们都是四价的元素，从图 11-1 所示的简化原子结构模型上可以看出，它们的原子结构最外层轨道上有四个价电子。

将纯净的硅或其他半导体材料经过一定的工艺过程制成单晶体结构的本征半导体时，相邻两个原子的一对最外层价电子成为共有电子，形成共价键，它们一方面受到自身原子核的作用，同时还受到相邻原子核的吸引，两个相邻的原子共有一对价电子，组成共价键结构。每个原子最外层的四个价电子都和周围的原子以共价键的形式紧密地联系起来，如图 11-2 所示。

3. 本征半导体中的载流子和电流

在本征半导体中，共价键中的价电子由于热运动（热激发）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，同时在共价键中留下空位。这种由于价电子脱离共价键束缚产生的空位称为空穴。由空穴的成因可知，空穴和自由电子是成对出现的，即在

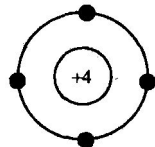


图 11-1 硅和锗简化原子结构模型

本征半导体中,自由电子数和空穴数相等。空穴由于失去一个价电子而带正电,自由电子带负电,如图 11-3 所示。

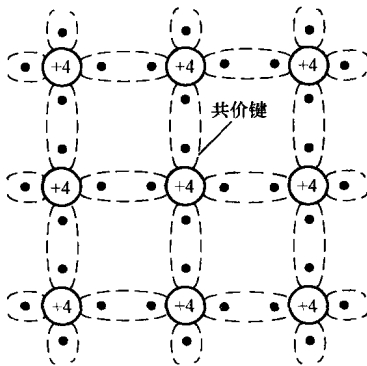


图 11-2 本征半导体晶体结构示意图

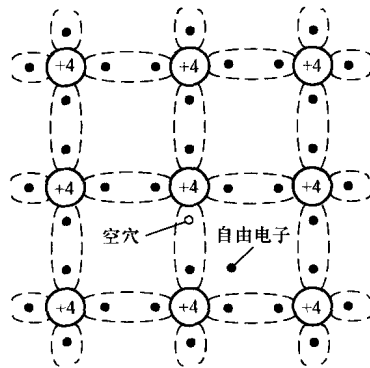


图 11-3 本征半导体中的自由电子和空穴

在外电场的作用下,本征半导体中的自由电子和空穴将会产生定向移动,一方面,带负电的自由电子逆电场方向定向运动,形成电子电流;另一方面,由空穴的成因可知,价电子按一定方向依次填补空穴,即带正电的空穴顺电场方向定向运动,形成空穴电流。电子与空穴的运动方向相反,因此,在半导体中,电流是电子电流和空穴电流之和。

在物理学中,称运载电荷的粒子为载流子。所以在本征半导体中,具有两种载流子,即自由电子和空穴,这是半导体导电方式的最大特点,也是半导体和金属在导电原理上的本质差别。

4. 本征半导体中的载流子浓度

在本征半导体中,由于自由电子和空穴是成对出现的,因此,它们的浓度是相等的。本征半导体在热激发下获得能量产生自由电子—空穴对的现象称为本征激发。同时,自由电子在运动的过程中会失去能量与空穴相遇填补空穴,使自由电子—空穴对消失,这种现象称为复合。在一定的温度下,本征激发产生的自由电子—空穴对和复合消失的自由电子—空穴对数目相同,即载流子产生和复合的过程在一定温度下是动态平衡的,因此载流子浓度在一定温度下是一定的,且自由电子和空穴浓度相同。

本征半导体中载流子的浓度主要与温度有关,温度越高,热运动加剧,产生的自由电子—空穴对越多,因而导电性也随之增强。理论分析表明,随着温度的升高,半导体中载流子的浓度基本上按指数规律增加,所以本征半导体的载流子浓度对温度十分敏感。

11.1.2 杂质半导体

本征半导体的导电性能很差,如果在本征半导体中掺入少量特定的杂质元素,其导电能力将急剧增强,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,掺入微量的 5 价元素,如磷、锑、砷等,则原晶格中的某些硅或锗原子被杂质原子代替。由于杂质原子最外层有 5 个价电子,除了 4 个价电子与周围硅或锗原子形成共价键外,还多余一个电子,这个多余的电子不受共价键束缚,只需获得很少的能量就可以成为带负电的自由电子。于是半导体中的自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,所以称为电子型半导体或 N 型半导体。例如在室温时,每立方

厘米的硅晶体中约有自由电子或空穴 1.5×10^{10} 个, 掺杂后成为 N 型半导体, 其自由电子数目可增加几十万倍。由于自由电子增多而增加了复合的机会, 空穴数目便减少到每立方厘米 2.3×10^5 个。杂质原子由于失去一个电子, 成为晶格中的不能移动的正离子, 不能参与导电, 其原子结构如图 11-4 所示。

显然在 N 型半导体中, 电子浓度要大于空穴浓度。在 N 型半导体中, 电子为多数载流子, 简称多子。空穴为少数载流子, 简称少子。由于 5 价杂质元素提供电子, 故称为施主原子。

2. P 型半导体

若在本征半导体中, 掺入微量的 3 价元素, 如硼、镓、铟等, 则原晶格中的某些硅或锗原子被 3 价杂质原子代替。由于杂质原子最外层有 3 个价电子, 当它与周围硅或锗原子形成共价键时, 因缺少一个电子而形成空位, 这个空位是电中性的, 但当其他共价键的外层电子由于热运动挣脱共价键束缚又填补这个空位时, 就会在原共价键产生一个带正电的空穴, 于是半导体中空穴的数目大量增加, 空穴导电成为这种半导体的主要导电方式, 所以称为空穴型半导体或 P 型半导体。而在晶格中的 3 价杂质原子由于得到一个电子成为负离子, 不能参与导电, 其原子结构如图 11-5 所示。

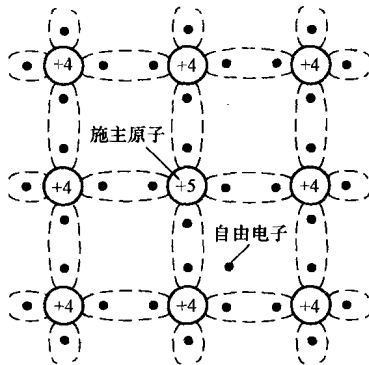


图 11-4 N 型半导体的共价键结构

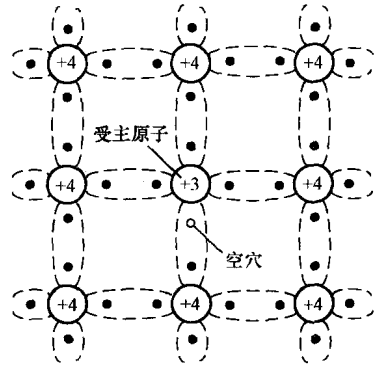


图 11-5 P 型半导体的共价键结构

在 P 型半导体中, 空穴浓度要大于电子浓度。空穴为多子, 电子为少子。由于 3 价杂质元素中的空位获得了电子, 故称为受主原子。

3. 杂质半导体的载流子浓度

在本征半导体中, 空穴和电子是受热激发成对出现的, 数量相同。而在杂质半导体中, 多子除由半导体材料本身热激发产生外, 主要由杂质原子提供; 而少子仅由热激发产生。由于掺入杂质使多子数量大大增加, 则多子与少子复合的几率大大增多, 因此, 对于杂质半导体, 多子浓度越高, 少子的浓度越低。

在杂质半导体中, 多子浓度取决于掺入杂质浓度。而由于少子是由半导体材料共价键本征激发提供的, 因而其浓度取决于温度。

11.1.3 PN 结

P 型或 N 型半导体的导电能力虽然比本征半导体大大增强, 但并不能直接用来制造半导体器件。通常采用掺杂工艺使同一块本征半导体的一边形成 P 型半导体, 另一边形成 N 型半导体, 则在两种半导体的交界处形成 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

(1) 扩散运动。物质总是由浓度高的地方向浓度低的地方运动，这种由于浓度差产生的运动称为扩散运动。当把 P 型半导体和 N 型半导体制作在一起时，在它们的交界处，由于电子和空穴的浓度差悬殊，因而产生扩散运动，如图 11-6 所示。

在交界面附近，N 区中的电子向 P 区扩散，与 P 区中的多子空穴复合，在 N 区留下带正电的五价杂质离子；同时 P 区中的空穴向 N 区扩散，与 N 区中的电子复合，在 P 区留下一些带负电的三价杂质离子。交界面载流子浓度下降，P 区出现负离子区，N 区出现正离子区，由于正负离子是不能移动的，称为空间电荷区，扩散运动越强，空间电荷区越宽。同时，正负离子形成一个电场方向由 N 区指向 P 区的内电场，如图 11-7 所示。

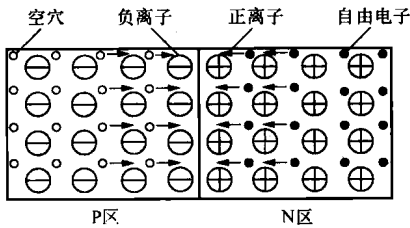


图 11-6 多数载流子的扩散运动

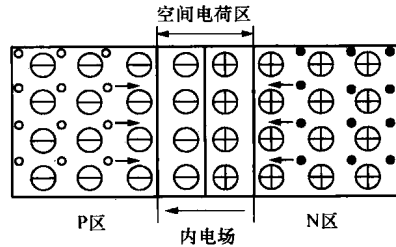


图 11-7 内电场的形成

(2) 漂移运动。在电场力的作用下，载流子的运动称为漂移运动。在空间电荷区形成的内电场作用下，少子做漂移运动，空穴由 N 区向 P 区运动，而自由电子由 P 区向 N 区运动，其运动方向正好与扩散运动的方向相反，阻碍扩散运动，产生使空间电荷区变窄的趋势。载流子扩散的越多，内电场越强；内电场越强，漂移运动越强，对载流子扩散的阻力越大。

(3) 动态平衡。扩散运动和漂移运动趋势相反，在无外电场和其他激发作用下，逐渐达到平衡，扩散运动与漂移运动作用相同，通过交界面的净电荷数为 0，即电流为 0，此时空间电荷区具有一定的宽度且不再改变。该空间电荷区称为 PN 结，如图 11-8 所示。

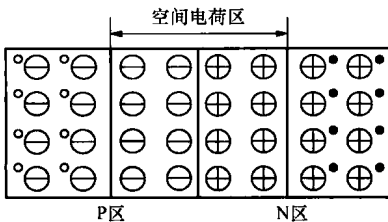


图 11-8 平衡状态下的 PN 结

形成空间电荷区的正负离子虽然带电，但是由于它们不能移动，不参与导电，而在这个区域内，载流子极少，空间电荷区的电阻率很高，因此将在 PN 区交界处形成的缺少载流子的高阻区称为阻挡层。因为大部分空间电荷区的载流子数目非常少，在分析 PN 结特性时常忽略载流子作用，只考虑离子区的电荷，这种方法称为“耗尽层近似”，故又称空间电荷区为耗尽层。

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端加上不同极性的电压，会破坏原来的动态平衡。当外加电压的极性不同时，PN 结表现出截然不同的导电性能，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 PN 结的 P 区，负极接 N 区，称 PN 结外加正向电压，也称正向接法或正向偏置。此时外加电压在阻挡层内形成的电场与内电场方向相反，削弱了内电场，使阻挡层变窄，如图 11-9 所示。

显然, 加入正偏电压后, 多数载流子向对方区域扩散, 使空前电荷区变窄, 削弱了内电场, 破坏了原来的平衡, 使扩散运动加剧而漂移运动减弱。在电源的作用下, 多数载流子的扩散运动将源源不断地进行, 从而形成正向电流, 此时 PN 结导通。

PN 结处于导通状态所呈现出的电阻为正向电阻, 其阻值很小。正向电压越大, 正向电流越大。由于 PN 结导通时结压降很小, 图 11-9 电路中的电阻 R 是为了防止 PN 结因正向电流过大而损坏, 在回路中串联的限流电阻。

(2) PN 结外加反向电压。若将电源的正极接 PN 结的 N 区, 负极接 P 区, 称 PN 结外加反向电压, 也称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内电场方向相同, 增强了内电场, 使阻挡层变宽, 如图 11-10 所示。

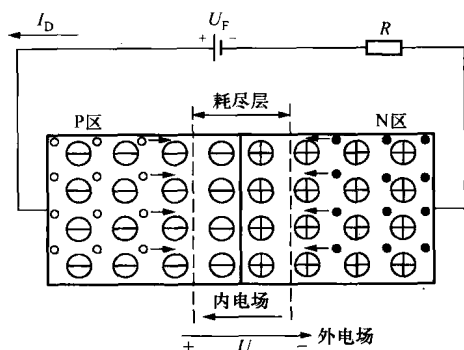


图 11-9 PN 结外加正向电压

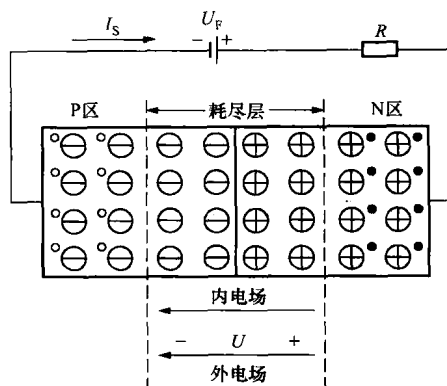


图 11-10 PN 结外加反向电压

此时漂移作用大于扩散作用, 少数载流子在电场作用下做漂移运动, 由于其电流方向与外加正向电压时的相反, 故称反向电流。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, 因此反向电流不会再增大, 故称反向饱和电流, 即 $I_D = -I_S$ 。

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

3. PN 结的伏安特性

由于 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, 如图 11-11 所示为 PN 结伏安特性曲线。

4. PN 结的击穿

由 PN 结的伏安关系曲线可知, PN 结处于反向偏置时, 在一定范围内, 流过 PN 结的电流是很小的反向饱和电流。但当反向电压超过一定数值 $U_{(BR)}$ 后, 反向电流急剧增加, 这种现象称为反向击穿。 $U_{(BR)}$ 称为击穿电压。PN 结的击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

(1) 雪崩击穿。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, 有可能将价电子撞出共价键, 形成新的电子-空穴对。这些新的载

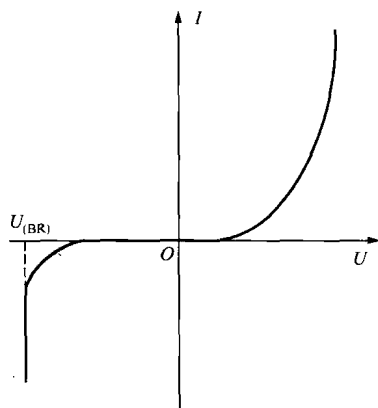


图 11-11 PN 结的伏安特性曲线

流子与原来的载流子一道, 在强电场作用下撞击其他原子, 撞击出更多的电子—空穴对, 如此雪崩式的连锁反应, 使反向电流迅速增大, 这种击穿称为雪崩击穿。雪崩击穿能使 PN 结永久性损坏。

(2) 齐纳击穿。齐纳击穿, 是指当 PN 结两边掺入高浓度杂质时, 其阻挡层宽度很小, 即使外加电压不太高, 在 PN 结内就可形成很强的电场, 将共价键的价电子拉出来, 产生电子—空穴对, 使反向电流急剧增大, 出现击穿现象。齐纳击穿是可以恢复的。

11.2 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, 简称二极管。

11.2.1 二极管的基本结构

二极管的种类有很多, 按制作材料分, 有硅二极管和锗二极管; 按管子结构分, 有点接触型和面接触型等。如图 11-12 所示为几种类型的二极管。

(1) 点接触型二极管, 其结构见图 11-12 (a)。它是由一根金属触丝经过特殊工艺与半导体表面相接。其特点是结面积小, 因而结电容较小, 适用于高频下工作, 最高工作频率可达几百兆赫兹, 但不能通过大电流, 主要应用于高频电路和小电流的整流、检波、混频等。

(2) 面接触型二极管, 其结构见图 11-12 (b)。此种类型的二极管是采用合金法工艺制成的。它的特点是结面积大, 因而能通过较大的电流, 但其结电容较大, 只能在低频率下工作, 一般用于整流电路。

(3) 硅平面型二极管, 其结构见图 11-12 (c)。它是采用扩散法制成的。结面积大的用于大功率整流, 结面积小的可作为脉冲数字电路中的开关管。

图 11-12 (d) 是二极管的符号。

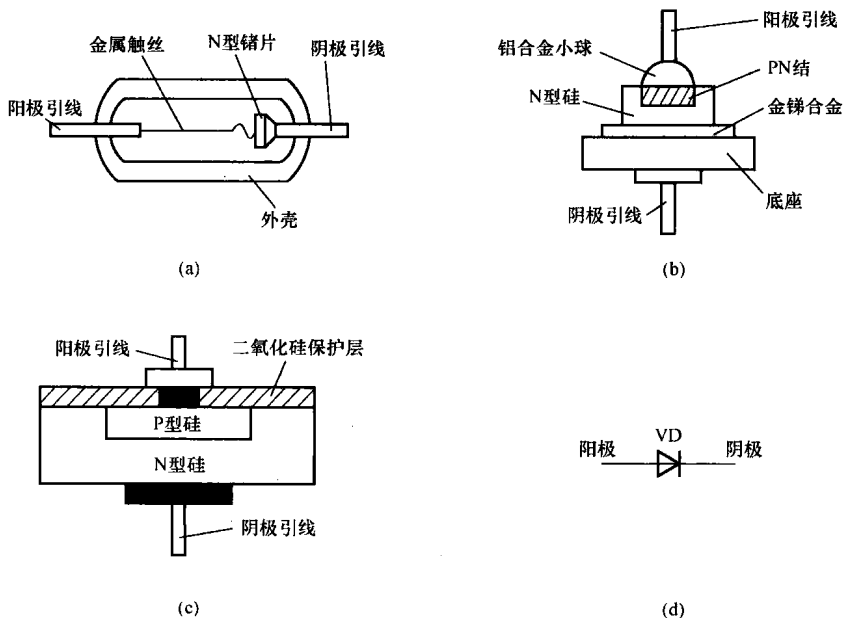


图 11-12 半导体二极管的结构和符号

(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 平面型; (d) 二极管符号

11.2.2 二极管的伏安特性与温度特性

二极管是由 PN 结加上引线 and 管壳构成的, 实质上就是一个 PN 结。但是真正的二极管要考虑到引线的电阻等因素影响, 二极管和 PN 结的特性略有差异。在近似分析时, 仍可用 PN 结伏安特性方程来描述二极管的伏安特性。二极管的伏安特性曲线如图 11-13 所示。

正向特性: 正向电压低于某一数值时, 正向电流很小, 只有当正向电压高于某一数值时, 正向电流才从零随端电压按指数规律增大。该电压称为开启电压 U_{ON} , 又称门限电压或死区电压。在室温下, 硅材料管的 U_{ON} 约为 0.6V, 锗材料管的 U_{ON} 约为 0.1V。

反向特性: 二极管外加反向电压时, 反向电流数值很小, 且基本不变, 该电流称为反向饱和电流 I_S 。当反向电压增加到一定数值, 反向电流急剧增加, 产生电击穿, 此时刻的电压值称为击穿电压, 用 $U_{(BR)}$ 表示。

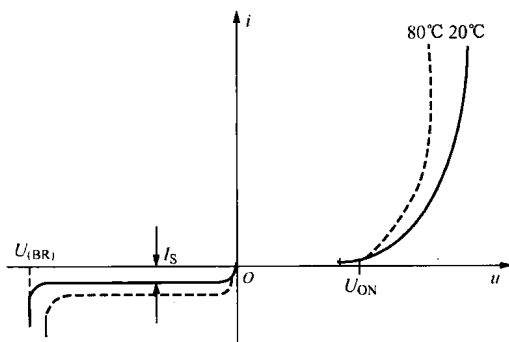


图 11-13 二极管的伏安特性曲线

温度特性: 由图 11-13 可知, 随着温度的升高, 二极管的正向特性曲线左移, 反向特性曲线下移。在室温附近, 在同一电流下, 温度每升高 1°C , 正向电压减少 $2\sim 2.5\text{mV}$; 温度每升高 10°C , 反向电流增大一倍。可见, 二极管特性对温度十分敏感。

11.2.3 二极管的主要参数

器件参数是器件特性的定量描述, 是实际工作中选择器件的依据。各种器件参数可由器件参数手册查得。二极管主要有以下参数:

(1) 最大整流电流 I_F 。 I_F 是二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流, 其值与 PN 结面积及外部散热条件有关。在规定的散热条件下, 二极管工作时平均电流应小于此值, 否则会因结温升高而烧坏。

(2) 最大反向工作电压 U_R 。 U_R 是二极管工作时允许外加的最大反向电压, 超过此值时, 二极管有可能因反向击穿而损坏。通常 U_R 取击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半。

(3) 反向电流 I_R 。 I_R 是二极管未被击穿时的反向电流。 I_R 越小, 二极管的单向导电性能越好, 由于反向电流是由少子形成的, 因此 I_R 对温度十分敏感。

(4) 最高工作频率 f_M 。 f_M 是二极管工作的上限频率, 其值取决于结电容的大小, 结电容越大, 二极管的 f_M 值越低。

11.2.4 稳压二极管

稳压二极管 (又叫齐纳二极管) 的工作原理是利用二极管击穿特性。稳压二极管在反向击穿时, 反向电流在较大范围内变化 Δi 时, 二极管的端电压变化 Δu 却很小。因为这种特性, 稳压管主要作为稳压器或电压基准元件使用。

1. 稳压管的伏安特性

稳压管的伏安特性曲线及符号见图 11-14, 其正向特性为指数曲线。当稳压管外加反向电压的数值大到一定程度时则击穿, 击穿区的曲线很陡, 几乎平行于纵轴, 表现出很好的稳压特性: 电流虽然在很大范围内变化, 但稳压管两端的电压变化很小。只要控制反向电流不超过一定值, 管子就不会因过热而损坏。稳压管与一般二极管不一样, 它的反向击穿是可逆

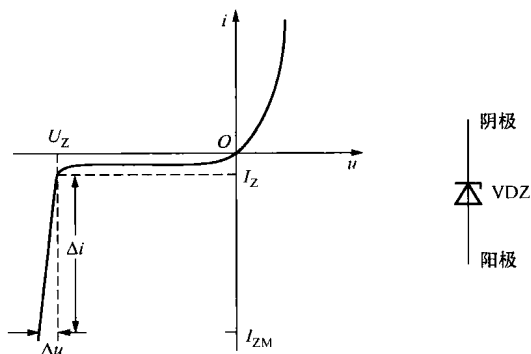


图 11-14 稳压管的伏安特性曲线及符号

的,当去掉反向电压之后,稳压管又恢复正常。但是,如果反向电流超过允许范围,稳压管将会发生热击穿而损坏。

2. 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z 。稳定电压 U_Z 是稳压管工作在规定的电流下时的反向击穿电压。稳定电压 U_Z 是根据要求挑选稳压管的主要依据之一。不同型号的稳压管,其稳定电压值不同。同一型号的管子,由于制造工艺的分散性,各个管子的 U_Z 值也有差别。例如,稳压管 2DW7C,其 U_Z 值为 6.1~6.5V,其稳定

值有的可能是 6.1V,有的可能是 6.5V 等,但就某一只管子而言, U_Z 应为确定值。

(2) 稳定电流 I_Z 。稳定电流 I_Z 是使稳压管正常工作时的最小电流,低于此值时稳压效果较差。工作时应使流过稳压管的电流大于此值。但此电流要受管子功耗的限制,只要不超过稳压管的额定功率,电流愈大,稳压效果愈好。对于每一种型号的稳压管,都规定有一个最大稳定电流 I_{ZM} 。

(3) 额定功耗 P_{ZM} 。额定功耗 P_{ZM} 等于稳压管的稳定电压 U_Z 与最大稳定电流 I_{ZM} 的乘积。稳压管的功耗超过此值时,会因结温升高而损坏。

(4) 动态电阻 r_z 。动态电阻 r_z 是稳压管工作在稳压区时,端电压变化量与其电流变化量之比,即 $\frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ 。 r_z 愈小,电流变化时 U_Z 的变化愈小,即稳压管的稳压特性愈好。对于不同型号的管子, r_z 的值也不同,一般从几欧到几十欧。同一稳压管,一般工作电流越大时, r_z 值越小。通常相关手册上给出的 r_z 值是在规定的稳定电流之下测得的。

(5) 温度系数 α 。温度系数 α 表示温度每变化 1℃ 所引起的稳定电压变化的百分比,即 $\alpha = \frac{\Delta U_Z}{\Delta T} \times 100\%$ 。一般情况下,稳定电压大于 7V 的稳压管, α 为正值,即当温度升高时,稳定电压值增大。而稳定电压小于 4V 的稳压管, α 为负值,即当温度升高时,稳定电压值减小。稳定电压在 4~7V 间的稳压管,其 α 值较小,稳定电压值受温度影响较小,近似为零,性能比较稳定。

由于稳压管的反向电流小于 I_Z 时不稳压,大于 I_{ZM} 时会因超过额定功耗而损坏,所以在稳压管电路中必须串联一个电阻 R 来限制电流,从而保证稳压管正常工作,称这个电阻为限流电阻。只有在 R 取值合适时,稳压管才能安全地工作在稳压状态。

11.2.5 其他二极管

1. 发光二极管

发光二极管是一种将电能直接转换成光能的固体器件,简称 LED。图 11-15 所示为发光二极管的符号。发光二极管包括可见光、不可见光、激光等不同类型。

发光二极管具有驱动电压低、工作电流小、抗振动和抗冲击能力强、体积小、可靠性高、耗电省和寿命长等优点,广泛用于信号指示和传递中。

2. 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管,其符号如图 11-16 所示。它的管壳上有透明聚光窗,由

于 PN 结的光敏特性, 当有光线照射时, 光敏二极管在一定的反向偏压范围内, 其反向电流将随光射强度的增加而线性地增加, 这时光敏二极管等效于一个恒流源。当无光照时, 光敏二极管的伏安特性与普通二极管一样。光电二极管用来作为光的测量, 是将光信号转换为电信号的常用器件。



图 11-15 发光二极管符号



图 11-16 光电二极管符号

11.2.6 半导体二极管应用电路分析

二极管应用范围很广泛, 利用二极管的正向特性, 可组成整流、检波、钳位、限幅、开关等电路。利用其反向特性, 可实现稳压。二极管的其他特性可用于变容、温度补偿等方面。

1. 二极管的等效电路

二极管应用的基础, 是二极管的伏安特性。根据二极管的伏安特性曲线, 在利用二极管的正向导通、反向截止特性时, 二极管伏安特性等效曲线如图 11-17 所示。

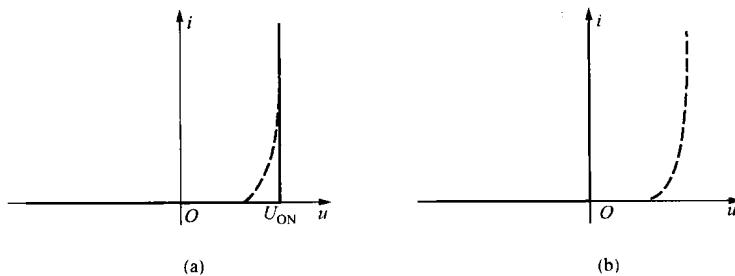


图 11-17 二极管伏安特性等效曲线

(a) 考虑正向导通压降; (b) 忽略正向导通压降

由图 11-17 可见, 若考虑到二极管的导通压降, 当二极管两端电压值大于 U_{ON} 时, 二极管导通; 小于 U_{ON} 时, 二极管截止。理想状态下, 若忽略 U_{ON} , 当二极管端电压大于 0 时, 二极管导通; 小于 0 时, 二极管截止。在本章二极管的应用中, 我们认为二极管的导通压降 $U_{ON}=0$ 。

稳压管理想伏安特性曲线如图 11-18 所示。当稳压管端电流在 $0 \sim I_{ZM}$ 之间变化时, 端电压不变, 等于 U_Z 。当稳压管两端所加的反向电压小于 U_Z 时, 通过它的电流为零。

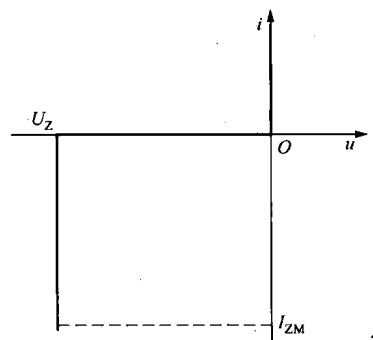


图 11-18 稳压管理想伏安特性曲线

2. 二极管限幅电路

当输入信号电压在一定范围内变化时,输出电压随输入电压相应变化;而当输入电压超出该范围时,输出电压保持不变,这就是限幅电路,也叫削波器。在限幅电路应用时,常忽略二极管的导通压降 U_{ON} , 如图 11-17 (b) 所示。

通常将输出电压开始不变的电压值称为限幅电平,当输入电压高于限幅电平时,输出电压保持不变的限幅称为上限幅;当输入电压低于限幅电平时,输出电压保持不变的限幅称为下限幅。

【例 11-1】 单限幅电路如图 11-19 (a) 所示,已知输入电压 $u_i = 5\sin\omega t$, $E = 3V$, 试画出输出电压 u_o 的波形。

解 当 $0 \leq u_i < 3V$ 时,二极管外加电压 $u_D = u_i - 3V < 0$, 二极管截止,相当于开路,输出电压 u_o 等于输入电压 u_i 。

当 $3V < u_i \leq 5V$ 时,二极管端电压 $u_D = u_i - 3V > 0$, 二极管导通,相当于短路,输出电压 $u_o = E = 3V$ 。

当 $u_i \leq 0$ 时,二极管端电压 $u_D = u_i - 3V < 0$, 二极管截止,相当于开路,输出电压 u_o 等于输入电压 u_i 。

可得出输出电压 u_o 波形如图 11-19 (b) 所示。

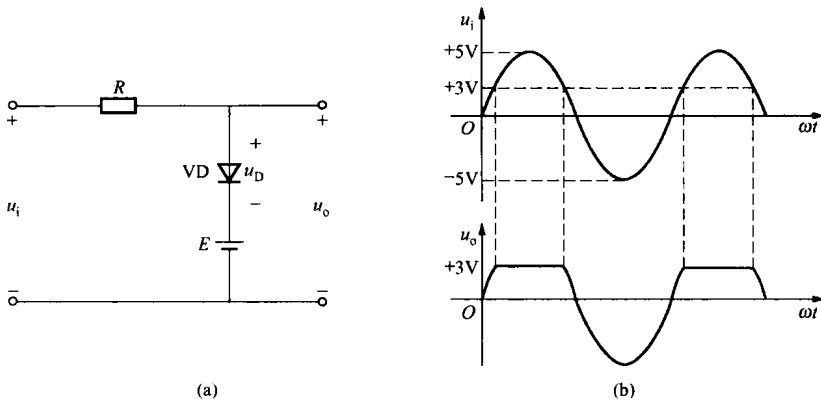


图 11-19 [例 11-1] 的图

(a) 电路图; (b) 波形图

改变电源 E 的值可改变限幅电平;改变二极管的极性可组成下限幅电路;也可将上、下限幅电路组合起来构成双向限幅电路。其原理请读者自己分析。

3. 二极管整流电路

整流电路是利用二极管的单向导电性,将正负交替的正弦交流电压变换为单方向的脉动电压。

【例 11-2】 单向半波整流电路如图 11-20 (a) 所示,试画出输出电压 u_o 的波形。

解 当 $u_i \geq 0$ 时,即在正半周,二极管导通,则负载上的电压 $u_o = u_i/R$ 。

当 $u_i \leq 0$ 时,即在负半周,二极管截止,则负载上的电压 $u_o = 0$ 。

可画出输出波形如图 11-20 (b) 所示。

若改变二极管的方向,则可改变输出电压的极性。