

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



MONI DIANZI
JISHU JICHU

模拟电子 技术基础

艾永乐 付子义 主 编
王玉梅 李泉溪 副主编



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



MONI DIANZI
JISHU JICHU

模拟电子 技术基础

主 编 艾永乐 付子义
副主编 王玉梅 李泉溪
编 写 李 端 王新环
唐恒娟 李 庚
苏玉娜 郭 宇
主 审 阎保定



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分9章, 主要内容包括半导体器件、放大电路基础、场效应管放大电路、放大电路中的负反馈、集成运算放大器及其应用、波形发生与变换电路、低频功率放大电路和直流电源等。本书给出了较多的典型例题和应用实例, 各章后附有习题和 Multisim 习题分析。

本书主要作为普通高等院校电气信息类相关专业的教学用书, 也可作为高职高专教材, 同时可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/艾永乐, 付子义主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7878 - 7

I. 模… II. ①艾…②付… 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 146788 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年11月第一版 2008年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14.75印张 357千字

定价 23.60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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为指导深化高等教育的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制定了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

《模拟电子技术基础》是高等学校电气信息类(包括原自动化类、电气类、电子类)专业的通用教材(参考学时为48~60学时),也可作为自动化专业、机械电子工程、电子信息与科学专业等的教学参考书。

本书总的思路是精选内容,推陈出新;讲清基本概念、基本电路的工作原理和基本分析方法;对其主要的技术指标,采用工程近似方法进行计算。本书对部分典型习题应用 Multisim 软件进行了分析,可以帮助学生更好地理解器件特性和电子电路工作原理。

本书第1章由李端编写,第2章由艾永乐编写,第3章由唐恒娟编写,第4章由艾永乐编写,第5章由王新环编写,第6章由河南理工大学王玉梅编写,第7章由李庚编写,第8章由苏玉娜编写,第9章由李泉溪编写,各章 Multisim 仿真题分析由李端、王新环和郭玉完成,附录由艾永乐编写。艾永乐和付子义共同负责全书的统一规划、审查、删改和补充。在成书过程中,自始至终得到河南理工大学电气工程与自动化学院余发山教授、王福忠教授的热情帮助和教研室同行的大力支持。他们仔细地审阅、校核了全部书稿,并提出了许多宝贵意见和建议,在本书正式出版之际,谨向他们一并表示感谢。

河南科技大学电子信息工程学院阎保定教授担任本书的主审,他在百忙中认真审阅了全部书稿,提出了中肯、详细的修改意见。谨在此对他的指导和帮助表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,本书的不当之处在所难免,恳请读者和同行专家在百忙之中提出批评和改进意见,编者将不胜感激。

编者

2008年8月

目 录

前言

第1章 半导体器件	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.2 半导体二极管	7
1.3 二极管电路的分析方法及应用	9
1.4 特殊二极管	13
1.5 半导体三极管	16
本章小结	23
思考题与习题	23
Multisim 7 例题及习题	26
第2章 放大电路基础	27
2.1 放大的概念和放大电路的技术指标	27
2.2 共射极放大电路	30
2.3 共集、共基极放大电路及三种组态比较	50
2.4 多级放大电路	54
本章小结	58
思考题与习题	58
Multisim 7 例题及习题	61
第3章 场效应管放大电路	65
3.1 结型场效应管	65
3.2 绝缘栅型场效应管	68
3.3 场效应管的特点及主要参数	70
3.4 场效应管放大电路	71
本章小结	75
思考题与习题	76
Multisim 7 例题及习题	77
第4章 放大电路中的负反馈	79
4.1 反馈的基本概念	79
4.2 负反馈放大电路的一般表达式	84
4.3 负反馈放大电路的近似计算	86
4.4 负反馈对放大电路性能的影响	88
4.5 负反馈放大电路的自激振荡及其消除方法	92
4.6 反馈放大器的计算举例	97
本章小结	99

思考题与习题	99
Multisim 7 例题及习题	103
第 5 章 集成运算放大器	106
5.1 零点漂移	106
5.2 电流源电路	107
5.3 差分放大电路	111
5.4 集成运算放大器介绍	119
本章小结	126
思考题与习题	126
Multisim 7 例题及习题	128
第 6 章 集成运算放大器的应用	131
6.1 集成运放分析准则	131
6.2 比例电路	132
6.3 加法与减法运算电路	134
6.4 积分和微分电路	136
6.5 对数和指数运算电路	138
6.6 模拟乘法器及其应用	139
6.7 信号处理电路	141
6.8 测量放大电路	151
本章小结	155
思考题和习题	156
Multisim 7 例题及习题	158
第 7 章 波形发生与转换电路	160
7.1 正弦波发生电路	160
7.2 非正弦波发生电路	169
7.3 波形转换电路	172
本章小结	173
思考题与习题	174
Multisim 7 例题及习题	176
第 8 章 低频功率放大电路	178
8.1 低频功率放大电路概述	178
8.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	179
8.3 甲乙类互补对称功率放大电路	182
8.4 集成功率放大器	184
本章小结	186
思考题与习题	186
Multisim 7 例题及习题	187
第 9 章 直流电源	190
9.1 直流电源概述	190

9.2 整流电路	192
9.3 滤波电路	196
9.4 串联型稳压电路	200
本章小结	204
思考题与习题	204
Multisim 7 例题及习题	206
附录	209
附录一 Multisim 7 简介	209
附录二 半导体器件	221
参考文献	228

第1章 半导体器件

主要内容及学习要求

本章首先介绍半导体的特性, 半导体中载流子的运动, 阐明 PN 结的单向导电性; 其次分别介绍了半导体二极管与双极型三极管的结构、工作原理、特性、参数、分析方法及二极管典型应用电路。

学习半导体器件要求了解本征半导体、杂质半导体和 PN 结的形成。在此基础上掌握普通二极管和稳压二极管的外特性和主要参数, 并且正确理解它们的工作原理, 了解其他类型二极管的应用; 掌握双极型三极管的外特性(包括输入特性和输出特性)以及它的主要参数, 正确理解双极型三极管的工作原理。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 导体、半导体和绝缘体

物体按导电能力分为导体、半导体和绝缘体三类。导体是很容易导电的物质, 如金、银、铜、铝等金属是良好的导体, 它们的电导率为 10^5 S/cm 量级。另一类物质如橡胶、塑料、云母、陶瓷等很不容易导电, 它们的电导率为 $10^{-22} \sim 10^{-14} \text{ S/cm}$ 量级, 称为绝缘体; 导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体, 它们的电导率为 $10^{-9} \sim 10^2 \text{ S/cm}$ 量级。常用的半导体有锗、硅和砷化镓等。

半导体除了具有体积小、质量小、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点, 它还具有以下一系列特殊的性能:

(1) 掺杂性。半导体的电导率可以随加入的杂质浓度变化而有明显的改变。例如在室温 30°C 时, 纯锗中掺入一亿分之一的杂质, 其电导率将增加几百倍。利用其掺杂性可以制造出各种不同的半导体器件。

(2) 热敏性。温度可以明显改变电导率, 利用这种热敏效应可以制成热敏元件。但是由半导体器件组成电路的热稳定性差, 必须采取温度补偿及稳定参数的各种措施。

(3) 光敏性。光照不仅可以改变半导体的电导率, 还可以产生电动势, 这就是半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、光电耦合器和光电电池等器件。

1.1.2 本征半导体

完全纯净的、不含杂质的半导体称为本征半导体。纯净的硅和锗晶体都属于本征半导体。图 1-1 (a)、(b) 分别表示硅和锗的原子模型结构。它们外层都有四个价电子, 同属于四价元素。本征半导体有如下特点:

一、晶体的共价键结构

在硅和锗的晶体中, 原子之间的距离靠得很近, 它的外层四个价电子不仅受到本原子的

作用，还要受到相邻原子的作用，产生了轨道的交叠。由原子理论知道，当原子的外层电子有八个时才处于稳定状态。每两个原子公用一对价电子，这种结构称为共价键结构，如图 1-2 所示。

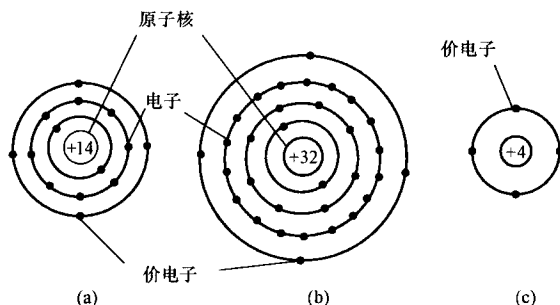


图 1-1 硅和锗的原子模型结构

(a) 硅；(b) 锗；(c) 简化模型

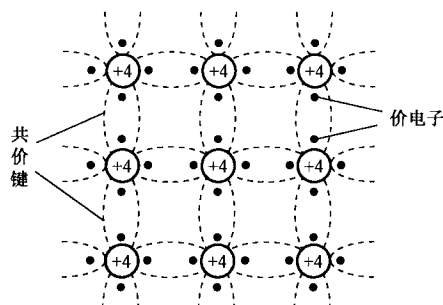


图 1-2 晶体的共价键结构

二、两种载流子——电子和空穴

本征半导体在热力学温度 $T=0\text{K}$ 和无外界其他因素激发时，它的价电子束缚在共价键中，都处于比较稳定的状态，不存在自由运动的电子。只有当共价键中的电子获得一定的能量（环境温度升高或受光照射）后，价电子方可挣脱原子核的束缚成为自由电子，同时，在共价键中留下了相同数量的空位，这种现象称为热激发或本征激发。把留下的空位称为“空穴”，如图 1-3 所示。

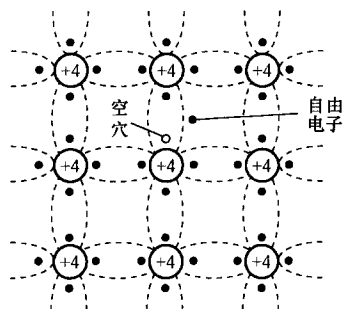


图 1-3 本征半导体中的自由电子与空穴

在本征激发后，共价键上跑掉一个带负电的电子，使原子不再保持电中性，则共价键上的空穴呈现正电，其值等于一个电子电荷，这样原来呈中性的原子成为一个带正电的正离子。

当共价键出现一个空穴后，相邻共价键中的价电子很容易跳过去填补这个空位，这样空位便转移到相邻共价键中去；而后新的空位又被其相邻的价电子填补。这种过程持续进行下去，就相当于一个带正电的空穴在移动。在无电场作用时，电子和空穴的运动是随机的、不规则的，不形成电流。在电场作用下，电子逆电场方向运动，空穴沿电场方向运动，即空穴可视为带正电的载流子。

由此可见，半导体中存在两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体与导体在导电机理上的本质区别。在电场作用下，电子形成电子电流，空穴形成空穴电流，虽然两种载流子的运动方向相反，但是所形成的电流方向相同。

三、载流子的产生和复合

由于热激发，本征半导体中不断地成对产生自由电子和空穴，这就产生了载流子。但在热运动中，电子与空穴相遇而一起消失，这就是电子和空穴的复合。这两个相反作用过程不断地进行，最后达到动态平衡。在本征半导体中，两种载流子数相等。

理论证明，本征半导体中平衡载流子的浓度 n_i 为

$$n_i = A_0 T^{3/2} e^{-E_{G0}/2KT} \quad (1-1)$$

式中, A_0 为与材料有关的常数; E_{GO} 为 0K 时破坏共价键所需的能量; K 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度。

由式 (1-1) 可见, n_i 的大小与温度 T 密切相关。在通常的温度范围内, 指数项较之 $T^{3/2}$ 项更为主要, 因此 n_i 大致为温度的指数函数。

由式 (1-1) 可得, 在室温下本征硅的 n_i 约为 $10^{10}/\text{cm}^3$, 本征锗的 n_i 约为 $10^{13}/\text{cm}^3$ 。硅和锗单晶的原子密度为 $10^{22}/\text{cm}^3$ 数量级, 因此仅 10^{12} 个硅原子或 10^9 个锗原子中产生一对电子和空穴, 可见室温下本征半导体的导电能力比较差。当外界温度升高时, 本征半导体被热激发, 产生的电子—空穴对数目基本上按指数规律增加, 其导电能力也提高。

1.1.3 杂质半导体

为了提高本征半导体在室温下的导电能力, 可在本征半导体中掺入微量某种特定的杂质, 从而使半导体导电性能发生显著变化。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的不同, 杂质半导体可分为 N 型半导体 (电子型半导体) 和 P 型半导体 (空穴型半导体)。

一、N 型半导体

在本征硅内掺入微量的五价元素砷 (或磷等), 则原来晶格中的一些硅原子将被杂质原子代替。而杂质原子的最外层有五个价电子, 它与周围四个硅原子组成共价键时将多余一个电子。这个电子不受共价键的束缚, 只受自身原子核的吸引。这种束缚力比较微弱, 在室温下即可成为自由电子, 如图 1-4 所示。每掺入一个五价元素的砷原子可施出一个多余的电子, 因此称这种杂质原子为施主原子。于是砷原子本身因失去一个电子而成为正离子。虽然在半导体中掺入杂质的数量极微, 对半导体的导电性能却有很大的影响。例如, 在 1cm^3 硅中约有 10^{22} 个硅原子, 室温下本征激发所产生的电子—空穴对约为 1.4×10^{10} 对。如果掺入百万分之一的磷, 磷原子就可提供 10^{16} 个自由电子。与本征激发所产生的载流子数相比, 这种半导体中自由电子数大大增加。因此这种半导体称为 N 型半导体或电子型半导体。N 型半导体中的自由电子称为多数载流子 (多子), 空穴称为少数载流子 (少子)。

二、P 型半导体

在本征硅内掺入微量的三价元素硼 (或铝等) 后, 只有三个价电子的硼原子在与周围的硅原子组成共价键时, 尚有一个空位未被填满, 在室温下这个空位能吸引邻近的价电子, 使三价元素原子多一个电子而成为负离子, 从而造成了一个新的空穴。在这种半导体中, 空穴数远大于电子数, 空穴为多数载流子, 电子为少数载流子, 它的导电以空穴为主, 因此这种半导体称为 P 型半导体或空穴型半导体。由于三价元素原子能吸引电子, 因此称三价元素为受主杂质。图 1-5 为 P 型半导体的晶体结构。

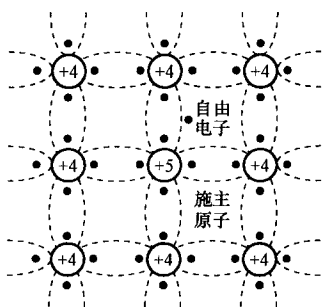


图 1-4 N 型半导体的晶体结构

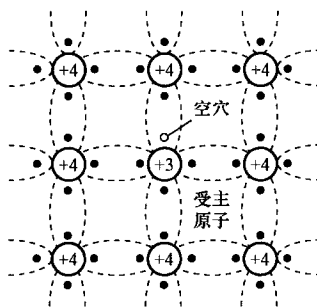


图 1-5 P 型半导体的晶体结构

必须指出,中性的本征半导体中掺入中性的杂质,所得的N型和P型半导体仍然是呈电中性的。

1.1.4 PN结

一、PN结的形成

在同一块半导体基片的两边掺入不同的杂质分别形成N型半导体和P型半导体。在两种半导体交界面的两侧,由于多数载流子空穴和电子浓度的差别,将分别向对侧扩散,这种由多数载流子扩散运动的结果,使P区和N区原来呈电中性条件被破坏。如图1-6所示,N型半导体中的自由电子向P型半导体一侧扩散,扩散过程中与P型半导体中的空穴复合;P型半导体中的空穴向N型半导体一侧扩散,并与N型半导体中的自由电子复合,从而在交界面处形成由不可移动的正负离子组成的很薄的空间电荷区。这一并不参与导电的空间电荷区就是PN结。在这个区域内,多数载流子已扩散到对侧被复合而耗尽掉,所以空间电荷区又称耗尽区。

空间电荷区的正负离子相互作用形成一个方向从N区指向P区的内电场。显然,这个内电场的方向是阻止多数载流子的扩散运动,从这个意义来看,空间电荷区又可看作一个阻挡层。其次,这个内电场将使N区的少数载流子空穴向P区漂移,使P区的少数载流子电子向N区漂移。少数载流子的运动使空间电荷区变窄,而与之相反的多数载流子的扩散运动将使空间电荷区变宽。当漂移运动达到和扩散运动相等时,两者便处于动态平衡状态。由扩散运动产生的电流称为扩散电流,漂移运动产生的电流称为漂移电流,达到动态平衡时这两种电流大小相等、方向相反。因此在无外加电场或其他激发因素时,PN结中没有电流流动,空间电荷区的宽度和电位差为恒定值。空间电荷区通常较薄,宽度在几微米到几十微米之间。PN结的形成过程如图1-6所示。

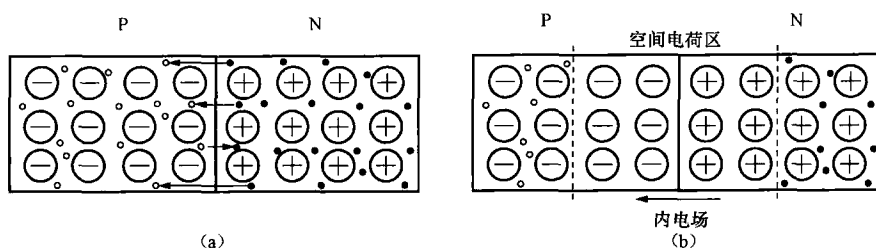


图 1-6 PN 结的形成

(a) 多数载流子的扩散; (b) 空间电荷区

二、PN 结的单向导电性

上面所讨论的PN结处于动态平衡状态,称为平衡PN结。PN结的单向导电性是它的基本特征,这只有在外加电压时才显示出来。

(1) PN 结加正向电压。

PN结外加正向电压,即外电源的正端接P区,负端接N区,如图1-7所示,使PN结处于正向偏置状态。外电场的方向是由P区指向N区,与内电场的方向刚好相反。外电场的加入将促使P区多数载流子空穴向N区扩散,与空间电荷区的负离子中和,N区的多数载流子电子向P区扩散,与空间电荷区的正离子中和,使空间电荷区变薄,内电场被削弱,

从而打破了原来的动态平衡,使多数载流子的扩散运动增强,少数载流子的漂移运动减弱。多数载流子的扩散电流通过外电路形成正向电流,耗尽层两端的电位差变成 $V_0 - V$ 。一般 V_0 只有零点几伏,所以不大的正向电压就可以产生相当大的正向电流,通常在外电路中串入一个限流电阻。由此可见,PN 结在正向偏置下所呈现的正向电阻很小,并有较大的电流产生,因此认为 PN 结处于正向导通状态。

(2) PN 结加反向电压。

在 PN 结加反向电压,即 N 区接电源正极, P 区接电源负极,使 PN 结处于反向偏置状态,如图 1-8 所示。此时外加电场与内电场方向一致,外电场将进一步阻碍多数载流子的扩散,促使少数载流子的漂移,由漂移运动产生的漂移电流成为电路中的主导电流。由于少数载流子的浓度很低,而且外加电压超过零点几伏后,加上少数载流子供应有限,漂移电流基本上不随外加电压增大而增加,因此被称为反向饱和电流,用 I_S 表示。由此可见,PN 结在反向偏置下所呈现的反向电阻很大,可认为 PN 结反向截止。

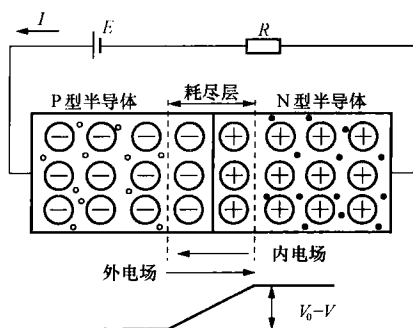


图 1-7 正向偏置时的 PN 结

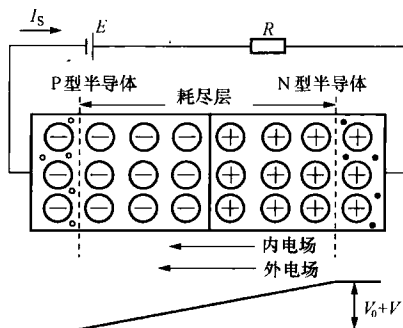


图 1-8 反向偏置时的 PN 结

由于少数载流子是价电子获得能量挣脱共价键的束缚而产生的,其数量与温度密切相关。当环境温度一定时,少数载流子的数量一定,即使外加反向电压增大,反向饱和电流的数值也不会变化,将趋于恒定,温度上升时,反向饱和电流 I_S 将急剧增大。

综上所述,PN 结正向偏置时,正向电流很大,PN 结处于导通状态;PN 结反向偏置时,反向电流很小,PN 结处于截止状态。PN 结的这种特性称为单向导电性。

三、PN 结伏安特性的表达式

根据理论分析,PN 结两端的电压 u_D 和流过 PN 结的电流 i_D 之间的关系式为

$$i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1-2)$$

式中, I_S 为反向饱和电流; $U_T = KT/q$ 称为温度的电压当量; K 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度; q 为电子常量,在 300K 时, $U_T = 26\text{mV}$ 。

由式 (1-2) 可知,正向偏置时,只要 u_D 大于 U_T 几倍以上, $i_D \approx I_S e^{u_D/U_T}$, 即 i_D 随 u_D 按指数规律变化;反向偏置时,只要 $|u_D|$ 大于 U_T 几倍以上, $i_D \approx -I_S$, 其中负号表示反向电流。由式 (1-2) 可画出 PN 结的伏安特性曲线,如图 1-9 所示。图中 $u_D > 0$ 的部分称为正向特性, $u_D < 0$ 的部分称为反向特性,它定量反应了 PN 结的

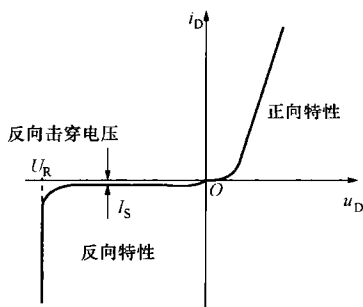


图 1-9 PN 结的伏安特性曲线

单向导电性。

四、PN 结的反向击穿特性

在一定范围的反向电压作用下, 流过 PN 结的电流是很小的反向饱和电流 I_s 。但是反向电压超过某一数值 (用 U_R 表示) 后, 反向电流会急剧增加, 此种现象称反向击穿 (电击穿)。PN 结击穿后电流很大, 电压又很高, 因而消耗在 PN 结上的功率很大, 容易使 PN 结发热超过它的耗散功率而过渡到热击穿。这时 PN 结的电流和温升之间出现恶性循环, 结温升高使反向电流更加增大, 而电流增大又使结温进一步升高, 从而很快烧毁 PN 结。热击穿将 PN 结烧坏, 不能再恢复工作, 而电击穿过程是可逆的。

PN 结电击穿的原因是, 在强电场作用下, 大大地增加了自由电子和空穴的数目, 引起反向电流的急剧增加, 这种现象可分为齐纳击穿和雪崩击穿两种。

齐纳击穿是在 PN 结高浓度掺杂的情况下, 耗尽层的宽度很窄, 不大的反向电压 (一般为几伏) 就可以在耗尽层中形成很强的电场, 它能够直接破坏其共价键, 把价电子从共价键中拉出来, 产生电子—空穴对, 形成较大的反向电流。

雪崩击穿的物理过程是: 当 PN 结所加反向电压较大时, 通过耗尽层的电子和空穴受到很大的加速, 与共价键中的价电子相碰撞时把价电子“撞”出共价键, 产生电子—空穴对, 这种碰撞称为碰撞电离。新产生的电子和空穴被电场加速后又可能“撞”出其他价电子, 这就是载流子的倍增效应。当反向电压达到一定程度后, 载流子增加很快, 就像在陡峭的积雪山坡上发生雪崩一样, 使反向电流急剧增大, 所以将这种碰撞电离称为雪崩击穿。

对硅材料的 PN 结, 反向击穿电压在 7V 以上为雪崩击穿; 反向击穿电压在 4V 以下为齐纳击穿; 反向击穿电压在 4~7V 之间则两种情况都有。

五、PN 结的电容特性

PN 结除了具有伏安特性所表示的非线性电阻特性外, 还具有非线性电容特性。非线性电容特性是由势垒电容 C_b 和扩散电容 C_a 两部分组成的。

(1) 势垒电容 C_b 。

势垒电容是由耗尽层引起的, 耗尽层中有不能移动的正、负离子, 各具有一定的电量。当外加电压使耗尽层变宽时, 电荷量增加; 当外加电压使耗尽层变窄时, 电荷量减少。这样耗尽层中的电荷量随外加电压变化而改变时, 就形成了电容效应, 称为势垒电容, 用 C_b 表示。

经分析表明, 势垒电容 C_b 的大小与 PN 结的面积 S 成正比, 与耗尽层厚度成反比。当 PN 结反向偏置使耗尽层增加时, 会使耗尽层厚度增大、 C_b 减小; 当 PN 结正向偏置使耗尽层减小时, 耗尽层厚度减小、 C_b 增大。势垒电容是一个非线性电容, 从电路理论上讲, 势垒电容是和结电阻并联的。因此, PN 结反向偏置时, 势垒电容的作用不能忽视, 特别在高频时影响更大; 而 PN 结正向偏置时, 势垒电容的作用相对来说比较小。

(2) 扩散电容 C_a 。

PN 结正向偏置时, 由 P 区及 N 区的多数载流子扩散到对方后分别聚积在结交界处的两侧, 可是该处的少数载流子浓度高于结远处的浓度。当正向电压加大时, 这种浓度差就很大; 当正向电压减少时, 浓度差就减少。因此, 积累在 P 区的电子和 N 区的空穴随外加电压的变化就构成了 PN 结的电容效应, 这种电容效应是由载流子的扩散引起的, 所以称为扩散电容, 用 C_a 表示。在 PN 结反向偏置时, 几乎没有载流子的扩散, 所以, C_a 趋近于零。

理论证明, PN 结的扩散电容不是常值, 与偏置电压有关。

PN 结的电容为势垒电容与扩散电容之和。PN 结正偏时，扩散电容的数值远大于势垒电容，因而结电容以扩散电容为主；PN 结反偏时，扩散电容可忽略不计，结电容以势垒电容为主。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构

半导体二极管（简称二极管）是由 PN 结加上引出线和管壳构成的，按其结构的不同，通常分为以下几种类型。

点接触型二极管是由一根很细的金属触丝（如三价元素铝）和一块半导体（如锗）的表面接触，然后在正方向通过很大的瞬时电流，使触丝和半导体熔接在一起，三价金属与锗结合构成 PN 结，结构如图 1-10 (a) 所示。点接触型二极管的特点是结面积小，因而极间电容小，同时，也不能承受高的反向电压和大的电流。它适合用作高频（几百兆频）检波和脉冲数字电路里的开关元件，也可用来作小电流整流。

面接触型二极管又称面结型二极管，它的 PN 结是用合金法或扩散法做成的，结构如图 1-10 (b) 所示。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，这类器件适用于整流，而不宜用于高频电路中。

平面型二极管的结构如图 1-10 (c) 所示，它是集成电路中常见的一种形式。结面积较大，可通过较大的电流，适用于大功率整流；结面积小的电容小，适用于在脉冲数字电路中作开关管。二极管的图形符号如图 1-10 (d) 所示。

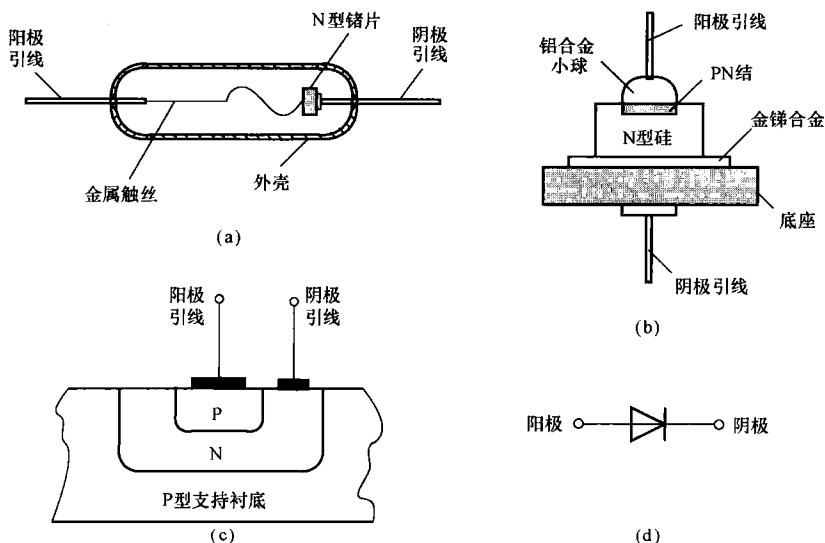


图 1-10 半导体二极管的结构及图形符号表示
(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 图形符号

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的压降 U 与其电流 I 的关系曲线称为伏安特性曲线，它由正向特性曲线和反向特性曲线组成。下面对二极管的伏安特性进行具体的讨论。

一、正向特性

二极管两端加正向电压时,产生正向电流,其测试电路如图 1-11 (a) 所示。从图 1-12 实测的伏安特性曲线上看到,当正向电压较小时,由于外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动所产生的阻力,因此,这时的正向电流为零,二极管呈现的电阻较大,这个区域通常称为死区。当二极管的正向电压超过某一数值 U_{th} (U_{th} 称为门坎电压或阈值电压,锗管为 0.1V,硅管约为 0.5V) 以后,内电场被削弱,二极管电阻变小,才有明显的正向电流。正向电压增大,电流迅速增加。正向导通时,二极管的两端电压称为导通电压,用 U_{on} 表示。正向导通时,硅管的导通压降约为 0.7V,锗管的导通压降为 0.2~0.3V。

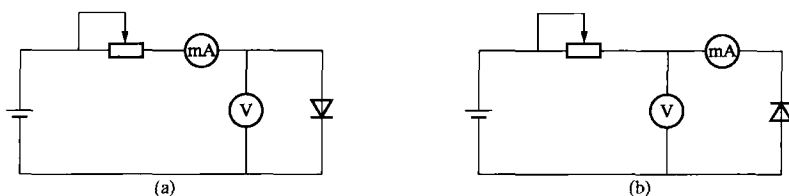


图 1-11 二极管的伏安特性测试电路

(a) 正向特性测试; (b) 反向特性测试

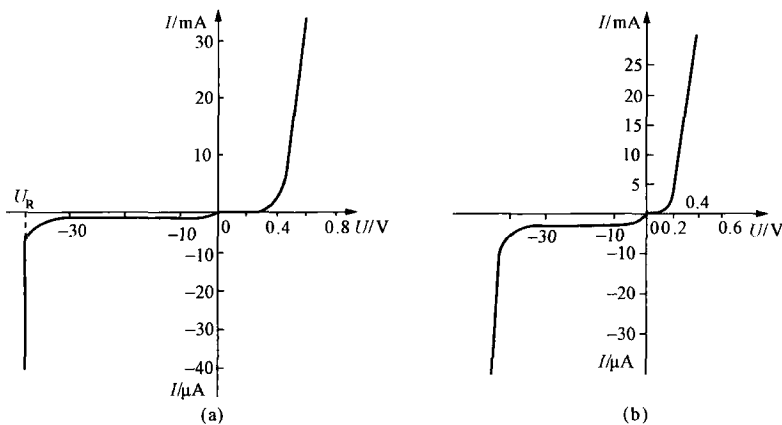


图 1-12 半导体二极管的伏安特性曲线

(a) 硅二极管 2CP10; (b) 锗二极管 2AP15

二、反向特性

如图 1-11 (b) 所示,二极管两端加反向电压,此时 P 型半导体的少数载流子——电子和 N 型半导体中的少数载流子——空穴,在反向电压的作用下产生漂移运动,形成很小的反向漂移电流。在常温下,硅管的反向饱和电流比锗管的小得多,小功率硅管的反向电流一般为纳安数量级,小功率锗管的反向饱和电流为微安数量级。

在一定的反向电压范围内,反向电流很小,而且基本不随反向电压变化而变化,当反向电压达到一定数值 U_R 时,反向电流会突然增加,即二极管反向击穿。 U_R 称为二极管的反向击穿电压。反向击穿后,反向电流可以变化很大,而二极管两端的电压基本保持不变。反向击穿分为电击穿和热击穿两种形式。发生电击穿时,反向电压撤销后,二极管仍能正常工作。热击穿则为破坏性击穿,将导致二极管过热而烧毁。

另外,二极管的特性对温度很敏感,随温度升高正向特性曲线向左移,反向特性曲线向下移。变化的规律是:在室温附近,温度每升高 1°C ,正向压降减小 $2\sim 2.5\text{mV}$;温度每升高 10°C ,反向电流约增大一倍。

1.2.3 二极管的主要参数

器件的参数是其特性的定量描述,是正确使用和合理选择器件的依据。二极管的主要参数有以下几个:

(1) 最大整流电流 I_F 。

I_F 指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流,它是由 PN 结的结面积和外界散热条件决定的。例如,2AP1 型二极管的最大整流电流为 16mA 。实际应用时,二极管的平均电流不能超过此值,并要满足散热条件,否则会烧坏二极管。

(2) 最大反向工作电压 U_R 。

U_R 指二极管在使用时所允许加的最大反向电压,超过此值二极管就有可能发生反向击穿的危险。通常取反向击穿电压的一半作为 U_R 。

(3) 反向电流 I_R 。

I_R 指二极管未被击穿时的反向电流。此值越小,二极管的单向导电性越好。此值与温度有关,在高温运行时要特别注意。

(4) 最高工作频率 f_M 。

f_M 主要由 PN 结的结电容大小决定,信号频率超过此值,二极管的单向导电性将不能很好的体现。值得注意的是:由于制造工艺的限制,即使是同一型号的二极管,参数的分散性也很大,手册上往往直接给出参数的范围。另外手册上的参数是在一定的测试条件下测得的,应用时要注意这些条件,若条件变化,相应的参数值也会发生变化,例如 I_R 就是指在一定的温度下外加某电压值时的反向电流,若温度升高则 I_R 会增大。

1.3 二极管电路的分析方法及应用

在电子技术中,二极管电路得到了广泛的应用,例如限幅电路、检波电路、开关电路以及低电压稳压电路等。二极管是一种非线性器件,要全面、精确地描述一个实际的非线性器件的特性是很复杂的。在实际工作中,往往根据不同的工作条件和要求,在分析精度允许的条件下,采用不同的模型来描述非线性器件的电特性。下面介绍几种常用的二极管模型。

一、理想模型

理想二极管模型是最简单的一种二极管模型。它用图 1-13 (a) 中虚线所示的伏安特性曲线代替实际二极管的伏安特性曲线 [如图 1-12 (a) 中实线所示],把二极管视为理想化。正向偏置时,二极管导通,且其管压降为 0;反向偏置时,二极管截止,电流为 0,反向电阻视为无穷大。图 1-13 (b) 为理想二极管模型的图形符号。在实际的电路中,当电源电压远比二极管的管压降大时,利用此模型来分析是可行的。

二、恒压降模型

为了反映二极管正向压降对电路的影响,用图 1-14 所示的二极管恒压降模型来近似表示实际二极管。图 1-14 (a) 中的实线是恒压降模型的伏安特性曲线,它与理想模型的伏安特性曲线区别在于:理想模型正向导通压降视为 0,而恒压降模型视为恒定的值,且不随电

流的变化而变化（通常硅二极管取 0.7V，锗二极管取 0.3V）。把这个恒定的电压用一个电池表示，因此可得到二极管恒压降模型的图形符号，如图 1-14 (b) 所示。

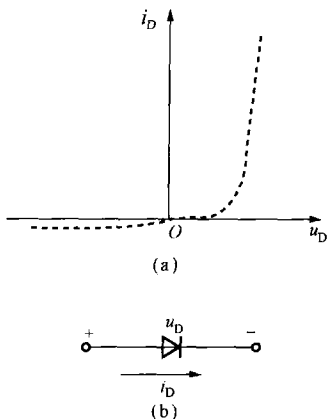


图 1-13 理想二极管模型
(a) 伏安特性曲线；(b) 图形符号

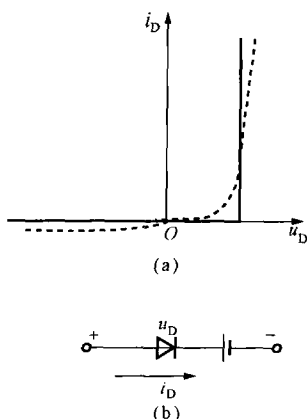


图 1-14 二极管恒压降模型
(a) 伏安特性曲线；(b) 图形符号

三、折线模型

为了更真实地描述二极管的伏安特性，在恒压降模型的基础上，作进一步修正，因为实际的二极管的正向管压降不是恒定不变的，它随二极管电流的增加而增大。图 1-15 所示是二极管的折线模型，即用图 1-15 (a) 中的 AB 和 BC 两段折线近似模拟二极管的伏安特性曲线，两折线交点的电压近似等于二极管的门坎电压 U_{th} 。线段 BC 的斜率为 $\Delta i_D / \Delta u_D$ ，斜率的倒数为电阻 r_D 。当硅二极管的导通电流为 1mA，管压降为 0.7V 时， r_D 的值可计算为

$$r_D = \frac{0.7 - 0.5}{1} = 200(\Omega)$$

所以二极管的折线模型可用理想二极管与一电池和一电阻串联来等效，电路如图 1-15 (b) 所示。由于二极管特性的分散性， U_{th} 和 r_D 不是固定不变的。

四、小信号模型

如果只需分析二极管特性曲线上某一固定点（如 Q 点）附近小范围内的电压、电流间的变化关系时，可以用曲线在该固定点的切线来替代这一小段特性曲线（即把这一小段曲线线性化），在这种情况下，二极管可用一个微变电阻 r_d 表示，如图 1-16 (b)，这就是二极管的小信号模型。

参考图 1-16 (a)，可得出 $r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$ ，即 r_d 为切线斜率的倒数。

微变电阻 r_d 的数值还可直接从二极管的伏安特性表达式 (1-2) 导出，取 i_D 对 u_D 的微分，即

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_d} &= \frac{di_D}{du_D} = \frac{d}{du_D} [I_S (e^{u_D/U_T} - 1)] \\ &= \frac{I_S}{U_T} e^{u_D/U_T} \approx \frac{i_D}{U_T} \end{aligned} \quad (1-3)$$