

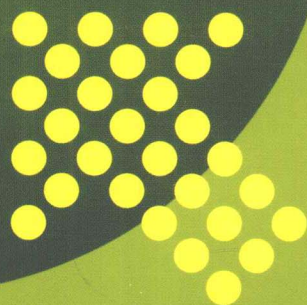
21世纪高等学校规划教材



MONI DIANZI JISHU

模拟电子技术

陶彩霞 田 莉 编



中国电力出版社

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

21世纪高等学校规划教材

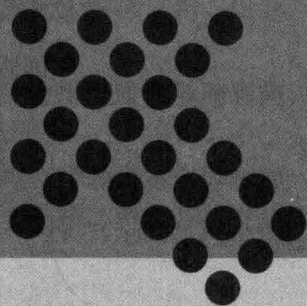


MONI DIANZI JISHU

模拟电子技术

陶彩霞 田 莉 编

罗映红 主审



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 7 章，主要内容包括半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、低频功率放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、电力电子技术基础。本书每节都配有思考与练习，每章后都有本章小结，并且配有一定量的典型例题与习题，以帮助读者巩固所学知识。

本书主要作为普通高等院校电气信息类专业教材，也可作为高职高专教材，同时还可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/陶彩霞，田莉编. —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 - 9142 - 7

I. 模… II. ①陶…②田… 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 (2009) 第 120377 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](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 9 月第一版 2009 年 9 月北京第一次印刷

87 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 254 千字

定价 17.00 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

本书以教育部2005年颁发的“高等学校电工学基础课程教学基本要求”为依据,根据国家提出的在2020年使我国进入创新型国家行列的发展目标编写,属于《电路基础》、《电工技术》、《数字集成电路》、《模拟电子技术》、《电子技术》系列教材。建议本书教学学时为32~48学时。

“模拟电子技术”是非电类专业的技术基础课程。其内容包括半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、低频功率放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、电力电子技术基础等。通过本课程的学习,学生能掌握模拟电子技术的基础理论、基本分析方法、基本测量技能,为今后的学习、创新和科学研究工作打下扎实的理论和实践基础。

为了适应高等教育教学改革的新形势,转变教育思想,更新教育观念,在保证基础内容的前提下,加强了集成运放的应用,更加突出理论联系实际的主题,教材编写时力求做到深入浅出,将培养学生能力的要求贯穿于整个教学之中。本教材通过“思考与练习”、“习题”、“本章小结”等多种途径帮助学生建立学习本课程的正确思路,引导他们深入地思考问题,注意各部分知识的综合,加强系统的概念,每章中的例题和习题都尽量贴近实际应用,以开拓视野,提高学生分析问题,解决问题的能力。

本书第1、2、4章由兰州交通大学田莉编写,第3、5、6、7章由兰州交通大学陶彩霞编写。全书由兰州交通大学罗映红教授主审。

本书在编写过程中,得到了兰州交通大学自动化与电气工程学院电工学教研室全体教师的帮助和支持,并提出了许多宝贵意见,在此表示由衷的感谢。虽然我们精心组织,认真编写,但受水平限制,疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2009年4月

本书符号说明

一、基本符号

1. 电流、电压、电位

i, u 电流、电压瞬时值
 I, U 直流电流、电压值；正弦电流、电压有效值

$\dot{I}, \dot{U}$ 正弦电流、电压复数量（相量）

I_m, U_m 正弦电流、电压幅值

$I_{\max}, U_{\max}$ 电流、电压最大值

$I_{\min}, U_{\min}$ 电流、电压最小值

i_B 基极电流总瞬时值

i_b 基极电流交流分量瞬时值

I_B 基极直流电流

i_C 集电极电流总瞬时值

i_c 集电极电流交流分量瞬时值

I_C 集电极直流电流

I_E 发射极直流电流

U_{CC} 集电极直流电源电压

U_{DD} 漏极直流电源电压

I_D 漏极直流电流；二极管直流电流

I_S 源极直流电流；二极管反向饱和电流

U_{BE} 基极—发射极直流电压

U_{CE} 集电极—发射极直流电压

U_{GS} 栅极—源极直流电压

U_{DS} 漏极—源极直流电压

u_i 输入电压瞬时值

U_i 正弦输入电压有效值；直流输入电压增量值

u_o 输出电压瞬时值

U_o 正弦输出电压有效值；直流输出电压增量值；
整流电路输出平均电压

i_o 输出电流瞬时值

I_o 正弦输出电流有效值；整流电路输出平均电流

U_{DRM} 整流电路中，二极管最大反向电压

U_D 整流电路中，二极管正向电压降

I_L 负载电流

2. 功率

p 瞬时功率

P 功率

P_Z 电源消耗的功率

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

3. 频率

f 频率

ω 角频率

4. 电阻、电导、电容、电感

r 微变电阻

R 固定电阻

r_{be} 共发射极接法下基射极之间的微变电阻

r_i 输入电阻

r_o 输出电阻

$R_{B(b)}$ 接到基极的固定电阻

R_C 接到集电极的固定电阻；余类推

R_L 负载电阻

R_s 信号源内阻

R_S 接到场效应管源极的固定电阻

C 电容

L 电感

5. 增益或放大倍数

A 增益或放大倍数

A_u 电压放大倍数

A_{us} 考虑信号源内阻时的电压放大倍数

F 反馈系数

$\dot{F}$ 反馈系数的复数形式

A_d 差模电压放大倍数

A_e 共模电压放大倍数

二、器件参数符号

A	阳极
K	阴极
G	场效应管栅极；晶闸管控制极或门极
D	场效应管漏极；非线性失真系数
B	晶体管基极
C	晶体管集电极
E	晶体管发射极
J	PN 结
VD	二极管设备文字符号
S	场效应管源极；信号通用符号；变压器容量
VZ	稳压管
U_f	反馈电压
I_f	反馈电流
$U_{GS(off)}$	场效应管的夹断电压；单结晶体管峰点电压
U_T	温度的电压当量
$U_{GS(th)}$	增强型场效应管的开启电压
N	电子型半导体
P	空穴型半导体
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率

β	共发射极接法下晶体管交流电流放大系数
$\bar{\beta}$	共发射极接法下晶体管直流电流放大系数
g_m	跨导
U_Z	稳压管的稳定电压
I_{max}	稳压管的最大稳定电流
r_z	稳压管的动态电阻
VT	晶体管、晶闸管设备文字符号
I_H	晶闸管维持电流
I_G	晶闸管控制极电流

三、其他符号

K_{CMRR}	共模抑制比
T	绝对温度；周期
k	变压器变比；波尔兹曼常数
N_1	变压器一次侧绕组匝数
N_2	变压器二次侧绕组匝数
q	电子电荷量
Q	静态工作点
Q	品质因数
η	效率
τ	时间常数
φ	相角差

目 录

前言

本书符号说明

第1章 半导体器件	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.2 PN结	3
1.3 半导体二极管	5
1.4 稳压管.....	11
1.5 其他二极管.....	13
1.6 半导体三极管.....	14
1.7 场效应管.....	23
本章小结	33
习题	33
第2章 基本放大电路	37
2.1 放大的概念和放大电路的主要性能指标.....	37
2.2 共射放大电路的组成及工作原理.....	40
2.3 共射放大电路的分析.....	43
2.4 放大电路静态工作点的稳定.....	52
2.5 晶体管单管放大电路的三种基本接法.....	56
2.6 场效应管放大电路.....	60
本章小结	65
习题	65
第3章 多级放大电路	70
3.1 多级放大电路的耦合方式.....	70
3.2 多级放大电路的动态分析.....	71
3.3 直接耦合放大电路的特殊问题.....	76
3.4 差动式放大电路.....	77
本章小结	84
习题	84
第4章 低频功率放大电路	87
4.1 低频功率放大电路.....	87
4.2 互补对称功率放大电路.....	90
4.3 集成功率放大器.....	96

本章小结	98
习题	98
第 5 章 集成运算放大器	100
5.1 集成运算放大器概述	100
5.2 放大电路中的负反馈	104
5.3 运算放大器的线性应用	110
5.4 运算放大器的非线性应用	123
本章小结	129
习题	129
第 6 章 直流稳压电源	135
6.1 整流电路	135
6.2 滤波电路	139
6.3 直流稳压电源	143
本章小结	146
习题	146
第 7 章 电力电子技术	148
7.1 电力电子器件	148
7.2 可控整流电路	152
7.3 交流调压电路	155
7.4 逆变器	156
本章小结	158
习题	158
参考文献	160

第1章 半导体器件

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的学科。半导体器件是构成各种分立、集成电子电路最基本的元器件。随着电子技术的飞速发展,各种新型半导体器件层出不穷。了解和掌握各种半导体器件是学习电子技术的基础。

1.1 半导体的基础知识

物质按导电性能可分为导体、半导体和绝缘体。

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。在外电场作用下,这些电子产生定向运动形成电流,呈现出较好的导电特性。高价元素(如惰性气体)和高分子物质(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,可以作为绝缘材料。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。由于绝大多数半导体的原子排列呈晶体结构,所以由半导体构成的管件也称晶体管。

半导体的导电性能具有如下两个显著的特点:①具有光敏性和热敏性,即半导体受到光照或热的辐射时,其电阻率会发生很大的变化,导电能力明显改善;②具有掺杂特性,即纯净的半导体中掺入微量的其他元素,半导体的导电能力将有明显的增加。

除上述特性外,有些半导体还具有压敏、气敏、磁敏等特性,利用这些特性可以制造非常有用的压敏、气敏、磁敏器件。

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。在它们的晶体结构中,原子与原子之间构成所谓的共价键,它使得每个原子最外层具有8个电子而处于较为稳定的状态。本征半导体在绝对温度下,又无外界能源施加能量(如光照等)时,是不导电的。但在温度增加或接受光照时,一些共价键中的价电子由于获得一定能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子,同时在共价键中产生带正电的空穴,如图1-1所示。自由电子和空穴两种载流子的同时存在是半导体区别于导体的主要特点。本征半导体中自由电子和空穴是成对出现的,因此,它们的浓度是相等的。

价电子在热运动中获得能量产生了电子—空穴对,这种现象称为**本征激发**。同时自由电子在运动过程中

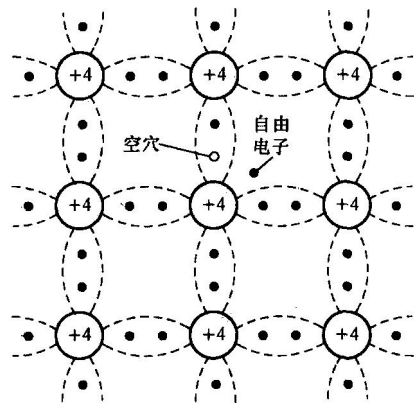


图1-1 本征半导体中的自由电子和空穴

失去能量，与空穴相遇，使电子、空穴消失，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，因此载流子的浓度是一定的。

如果在本征半导体两端加上电源，则自由电子将向电源正端定向运动形成电子电流。空穴虽不移动，但因为带正电，故能吸收相邻原子中的价电子来填补，这样共价键中受束缚的价电子在晶体内不断地填补空穴而间接产生空穴的定向移动，从而形成空穴电流。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在自由电子和空穴两种载流子，但浓度很低，所以导电能力很差。如果在其中有控制地掺入微量的特定杂质，其导电能力将大大提高。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、砷等，则在原来晶格中的某些硅（锗）原子被杂质原子代替。由于杂质原子最外层有5个价电子，因此在与周围的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，离子不能参与导电，如图1-2所示。显然，这种半导体中自由电子的浓度远远大于空穴的浓度，主要靠自由电子导电，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**，简称**多子**；空穴称为**少数载流子**，简称**少子**。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入微量3价元素，如硼、镓等，则在原来晶格中的某些硅（锗）原子被杂质原子代替。由于杂质原子最外层有3个价电子，因此在与周围的4个硅（锗）原子组成共价键时，还缺少1个价电子，所以形成一个空位。其他共价键中的电子，只需摆脱一个原子核的束缚，就转至空位上，在原来的位子上形成空穴。因此，它在较少能量下就可形成空穴，并留下带负电的杂质离子，离子不能参与导电，如图1-3所示。显然，这种半导体中空穴的浓度远远大于自由电子的浓度，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**。

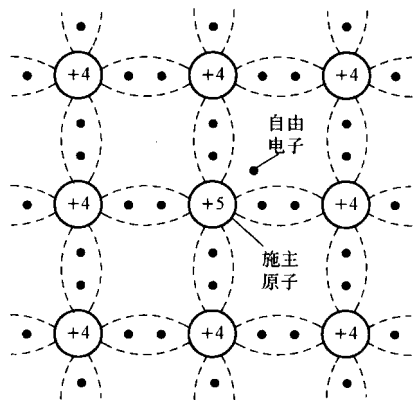


图1-2 N型半导体共价键结构

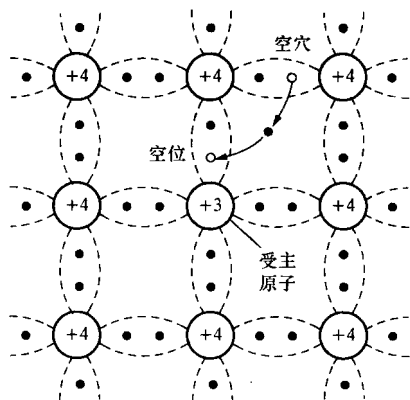


图1-3 P型半导体共价键结构

P型半导体和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。这种杂质半导体是构成各种半导体器件的基础。

【思考与练习】

1. 什么是本征半导体？什么是杂质半导体？各有什么特征？
2. 电子电流和空穴电流是怎样形成的？

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 PN 结的形成

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。在此电场的作用下，载流子将做漂移运动，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。此时在 P、N 区交界处形成一个缺少载流子的高阻区，称为耗尽层（又称阻挡层）。上述过程如图 1-4 所示。

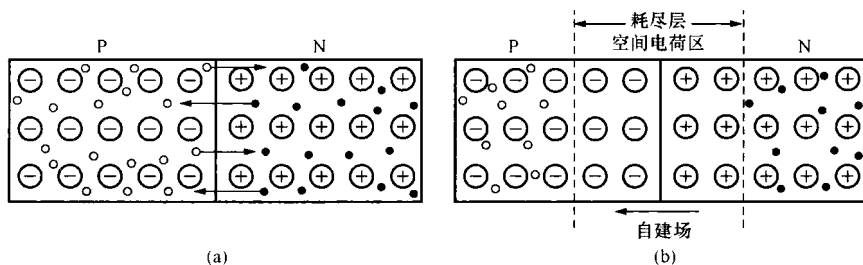


图 1-4 PN 结的形成

(a) 多数载流子的扩散运动；(b) 平衡时阻挡层形成

1.2.2 PN 结的单向导电性

PN 结在未加外电压时处于动态平衡状态，PN 结内无宏观电流。如在 PN 结上外加一定的电压，将会破坏这种动态平衡状态。

1. PN 结正向偏置

如图 1-5 所示，PN 结外加正向电压，也称正向偏置，简称正偏。此时外电场与自建场的方向相反，因此扩散与漂移运动的平衡被破坏。外电场驱使 P 区的空穴和 N 区的自由电子分别由两侧进入空间电荷区抵消一部分空间电荷。使整个空间电荷区变窄，自建场被削弱，多数载流子的扩散运动增强，形成较大的扩散电流（正向电流）。由于外电源不断向半导体提供电荷，使该电流得以维持。这时 PN 结所处的状态称为正向导通。正向导通时，PN 结的正向电流大，结电阻小。

2. 外加反向电压

如图 1-6 所示, PN 结外加反向电压, 也称**反向偏置**, 简称反偏。此时由于外电场与自建场的方向相同, 同样也破坏了原来的平衡, 使得 PN 结变厚, 扩散运动难以进行, 漂移运动却被加强。由于少数载流子浓度很小, 故由少数载流子漂移形成的反向电流很微弱。这时 PN 结所处的状态称为**反向截止**。反向截止时, PN 结的反向电流小, 结电阻大, 且温度对反向电流影响很大。

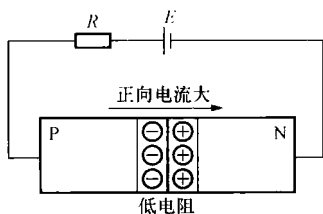


图 1-5 PN 结正向偏置

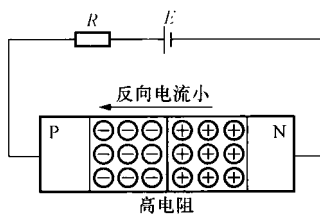


图 1-6 PN 结反向偏置

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。

PN 结的电流与端电压的关系可写成如下通式

$$i = I_s(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

式中: I_s 为反向饱和电流; U_T 为温度电压当量, $U_T = \frac{1}{(q/kT)}$, 在绝对温度 300K (27°C) 时, $U_T \approx 26\text{mV}$; q 为电子的电荷量, $q = 1.60 \times 10^{-19}\text{C}$; T 为绝对温度, 单位为 K (开尔文); k 为波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ 。

此方程为伏安特性方程, 图 1-7 所示为 PN 结伏安特性曲线。

1.2.3 PN 结的击穿

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。但是当反向饱和电压超过某一数值 (U_B) 后, 反向电流急剧增加, 这种现象称为**反向击穿**, 如图 1-7 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 结内也可形成很强的电场 (可达 $2 \times 10^6\text{V/cm}$), 将共价键的电子直接拉出来, 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, 击穿电压大于 7V 时通常是雪崩击穿, 小于 4V 时通常是齐纳击穿, 在 4V 和 7V 之间时两种击

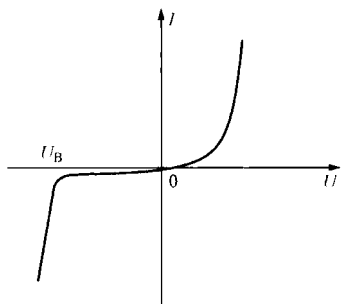


图 1-7 PN 结的伏安特性曲线

穿均有。由于击穿破坏了PN结的单向导电性,因而一般使用时应避免出现击穿现象。需要指出的是,发生击穿并不意味着PN结被损坏。当PN结反向击穿时,只要注意反向电流的数值(一般通过串接电阻 R 实现),不使其过大,以免因过热而烧毁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。

1.2.4 PN结的电容效应

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结具有两种结电容:势垒电容和扩散电容。

1. 势垒电容 C_T

势垒电容 C_T 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结内储存了一定的电荷。当外加电压使阻挡层变宽时,电荷量增加;反之,外加电压使阻挡层变窄时,电荷量减少。也就是说,阻挡层中的电荷量随外加电压的变化而改变,形成了电容效应,称为**势垒电容**,用 C_T 表示。

2. 扩散电容 C_D

扩散电容 C_D 是PN结在正向偏置时,多数载流子在扩散过程中引起电荷积累而产生的,用 C_D 表示。当PN结加正向电压时,N区的电子扩散到P区,同时P区的空穴向N区扩散。显然,在PN区交界处,载流子浓度最高;离交界愈远,载流子浓度愈低。若PN结正向电压加大,则多数载流子扩散加强,积累的电荷增加;反之,若PN结正向电压减少,则多数载流子扩散减弱,积累的电荷减少。

所以,PN结电容 $C_j = C_T + C_D$ 。一般说来,当PN结正向偏置时,扩散电容起主要作用;当PN结反偏时,势垒电容起主要作用。

【思考与练习】

1. P型半导体中空穴是多数载流子,因而P型半导体带正电;N型半导体中电子是多数载流子,因而N型半导体带负电。这种说法是否正确?
2. 什么叫载流子的扩散运动、漂移运动?它们的大小主要与什么有关系?
3. PN结是如何形成的?在热平衡下,PN结中有无净电流流过?
4. PN结为什么具有单向导电性?
5. 什么是PN结的击穿现象?击穿有哪两种?击穿是否意味着PN结坏了?为什么?
6. 什么是PN结的电容效应?何为势垒电容、扩散电容?PN结正向运用时,主要考虑什么电容?反向运用时,主要考虑什么电容?

1.3 半 导 体 二 极 管

半导体二极管是由PN结加上引线 and 管壳构成的。

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

(1) 点接触型二极管。其结构如图1-8(a)所示。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。其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。其结构如图 1-8 (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，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。其结构如图 1-8 (c) 所示。其结面积大的，可通过较大的电流，适用于大功率整流；其结面积小的，结电容小，适用于在脉冲数字电路中作开关管。

二极管的图形符号如图 1-8 (d) 所示。

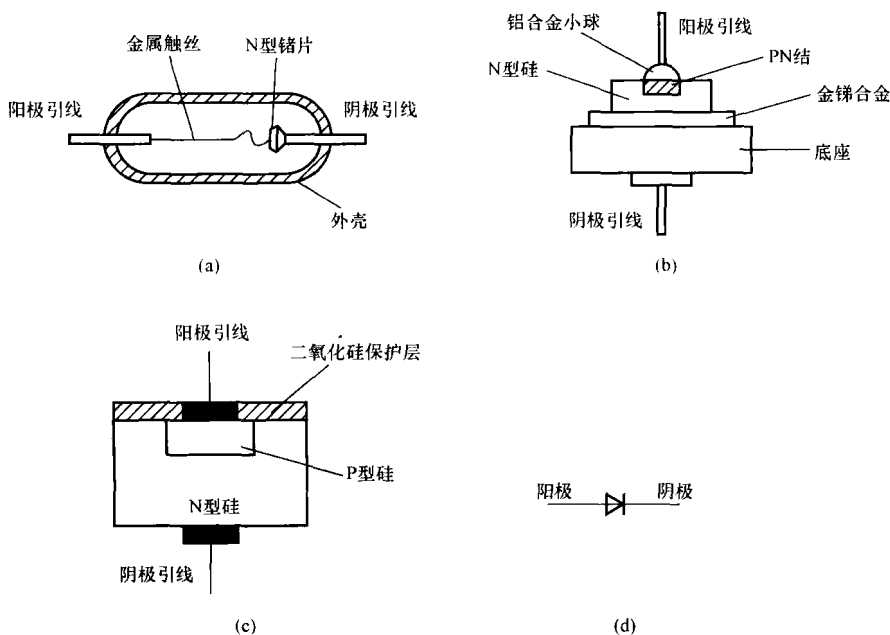


图 1-8 半导体二极管的结构和符号

(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 图形符号

1.3.1 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 1-9 所示。其特点如下：

(1) 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值后，才有明显的正向电流。该电压称为导通电压，又称为门限电压或死区电压，用 U_{on} 表示。在室温下，硅管的 U_{on} 约为 $0.6 \sim 0.8V$ ，锗管的 U_{on} 约为 $0.1 \sim 0.3V$ ，通常认为，当正向电压 $U < U_{on}$ 时，二极管截止； $U > U_{on}$ 时，二极管导通。

(2) 反向特性。二极管承受反向电压时，由于少数载流子的漂移运动，形成反向电流。反向电流数值很小，且基本不变，称为反向饱和电流。硅管的反向饱和电流为纳安 (nA) 数量级，锗管的为微安 (μA) 数量级。当反向电压加到一定值时，反向电流急剧增加，产生击穿。普通二极管反向击穿电压一般在几十伏以上 (高反压管可达几千伏)。

(3) 二极管的温度特性。二极管对温度很敏感，温度升高，正向特性曲线向左移，反向特性曲线向下移。其规律是：在室温附近，在同一电流下，温度每升高 $1^\circ C$ ，正向压降减小 $2 \sim 2.5mV$ ；温度每升高 $10^\circ C$ ，反向电流约增大 1 倍。

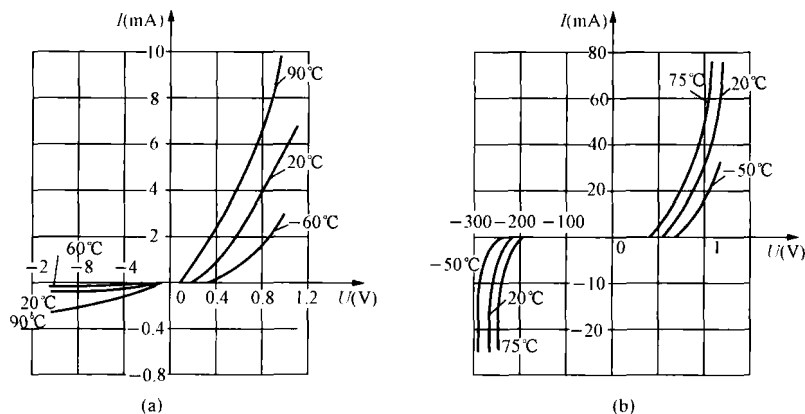


图 1-9 二极管的伏安特性曲线

(a) 2AP22 (锗管) 的伏安特性曲线; (b) 2CP10~20 (硅管) 的伏安特性曲线

1.3.2 二极管模型

二极管是一非线性器件, 一般采用非线性电路的分析方法, 但在近似计算时可用以下两种常用模型将其简化。

(1) 理想模型。所谓理想模型, 是指在正向偏置时, 其管压降为零, 相当于开关闭合; 当反向偏置时, 其电流为零, 阻抗为无穷大, 相当于开关断开。具有这种理想特性的二极管也叫作理想二极管。在实际电路中, 当外加电源电压远大于二极管的管压降时, 可利用此模型分析。

(2) 恒压降模型。所谓恒压降模型, 是指二极管在正向导通时, 其管压降为恒定值, 硅管的管压降约为 0.7V, 锗管的管压降约为 0.3V; 当反向偏置时, 和理想二极管相同。在实际电路中, 此模型应用非常广泛。

1.3.3 主要参数

描述器件特性的物理量称为器件的参数。它是器件特性的定量描述, 也是选择器件的依据。各器件的参数可由手册查得。

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流是指二极管长期使用时, 允许流过二极管的最大正向平均电流。实际工作时, 管子通过的电流不应超过这个值, 否则将因 PN 结过热而损坏。此值取决于 PN 结结面积、材料和散热情况。

2. 最大反向工作电压 U_R

它是保证二极管允许的最高反向电压。当反向电压超过此值时, 二极管可能被击穿。为安全起见, 一般最大反向工作电压取反向击穿电压的一半或三分之二。

3. 最大反向电流 I_R

最大反向电流是指二极管加反向工作电压未被击穿时的反向电流值。此值越小, 则二极管的单向导电性越好。反向电流是由少数载流子的漂移运动形成的, 所以受温度影响很大。

4. 最高工作频率 f_M

最高工作频率 f_M 的值主要取决于 PN 结结电容的大小, 结电容越大, 则二极管允许的

最高工作频率越低。

5. 二极管的直流电阻 R_D

加到二极管两端的直流电压与流过二极管的电流之比, 称为二极管的直流电阻 R_D , 即

$$R_D = \frac{U_F}{I_F} \quad (1-2)$$

此值可由二极管特性曲线求出。如图 1-10 所示, 工作点 Q 电压为 $U_F = 1.5\text{V}$, 电流 $I_F = 50\text{mA}$, 则

$$R_D = \frac{U_F}{I_F} = \frac{1.5}{50 \times 10^{-3}} = 30\Omega$$

且由图可看出, R_D 随工作电流加大而减小, 故 R_D 呈现非线性。用万用表测量出的电阻值为 R_D , 用不同档测量出的 R_D 值显然是不同的。二极管加正、反向电压所呈现的电阻也不同。加正向电压时, R_D 为几十欧至几百欧, 加反向电压时 R_D 为几百千欧至几兆欧。一般正、反向电阻值相差越大, 二极管的性能越好。

6. 二极管的交流电阻 r_d

在二极管工作点附近, 电压的微变值 ΔU 与相应的微变电流值 ΔI 之比, 称为该点的交流电阻 r_d , 即

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1-3)$$

从其几何意义上讲, 当 $\Delta U \rightarrow 0$ 时有

$$r_d = \frac{dU}{dI} \quad (1-4)$$

r_d 就是工作点 Q 处的切线斜率的倒数。显然, r_d 也是非线性的, 即工作电流越大, r_d 越小。交流电阻 r_d 也可从特性曲线上求出, 如图 1-11 所示。过 Q 点作切线, 在切线上任取两点 A、B, 查出这两点间的 ΔU 和 ΔI , 代入式 (1-3) 可得 r_d 。

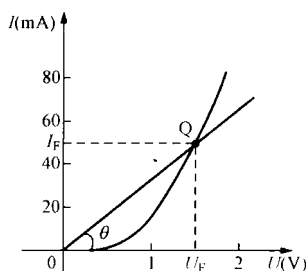


图 1-10 求直流电阻

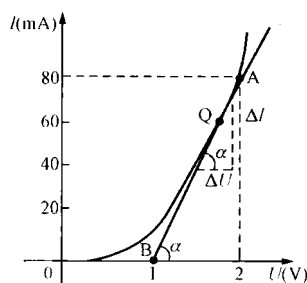


图 1-11 求交流电阻

交流电阻 r_d 也可利用 PN 结的电流方程式 (1-1) 求出, 对 I 求微分可得

$$dI = d[I_S(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)] = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{U}{U_T}} dU = \frac{I_D}{U_T} dU$$

即

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{26}{I_D} \quad (1-5)$$

式中, I_D 为二极管工作点的电流, mA; 26 的单位为 mV。

式(1-5)的近似等式在室温条件下($T=300\text{K}$)成立。

对同一工作点而言,直流电阻 R_D 大于交流电阻 r_d ;对不同工作点而言,其工作点愈高, R_D 和 r_d 愈低。

表1-1列出了几种二极管的典型参数。

表 1-1 半导体二极管的典型参数

参 数 型 号	最大整流电流 I_F/mA	最高反向电压 U_R/V	反向电流 $I_R/\mu\text{A}$	最高工作频率 f_M	结电容 C_j/pF	备 注
2AP1	16	20	≤ 250	150MHz	≤ 1	点接触型锗管
2AP2	16	30	≤ 250	150MHz	≤ 1	
2AP11	< 25	< 10	≤ 250	40MHz	≤ 1	
2AP12	< 40	< 10	≤ 250	40MHz	≤ 1	
2CP1	400	100	250	3kHz		面接触型硅管
2CP2	400	200	250	3kHz		
2CP6A	100	100	≤ 20	50kHz		
2CP6B	100	200	≤ 20	50kHz		
2CZ11A	1A	100	≤ 600	$\leq 3\text{kHz}$		加 60mm×60mm×1.5mm 铝散热板
2CZ12A	3A	50	≤ 1000	$\leq 3\text{kHz}$		加 80mm×80mm×1.5mm 铝散热板

1.3.4 二极管的应用

二极管的运用基础就是利用它的单向导电性。因此,在应用电路中,关键是判断二极管的导通或截止。然后根据情况利用恒压降模型或理想模型来分析。它可用于整流、检波、整形、限幅以及在数字电路中作为开关元件等。其典型的应用如图1-12所示。

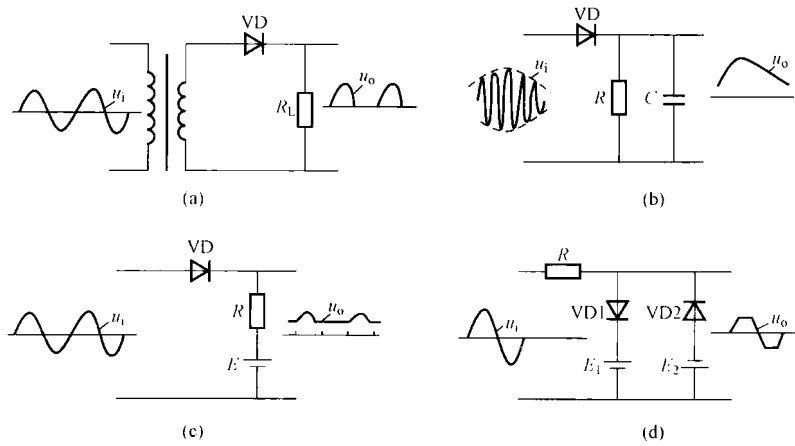


图 1-12 半导体二极管典型应用
(a) 整流路; (b) 检波器; (c) 整形器; (d) 限幅器

二极管的整流电路放在直流电源中讨论。