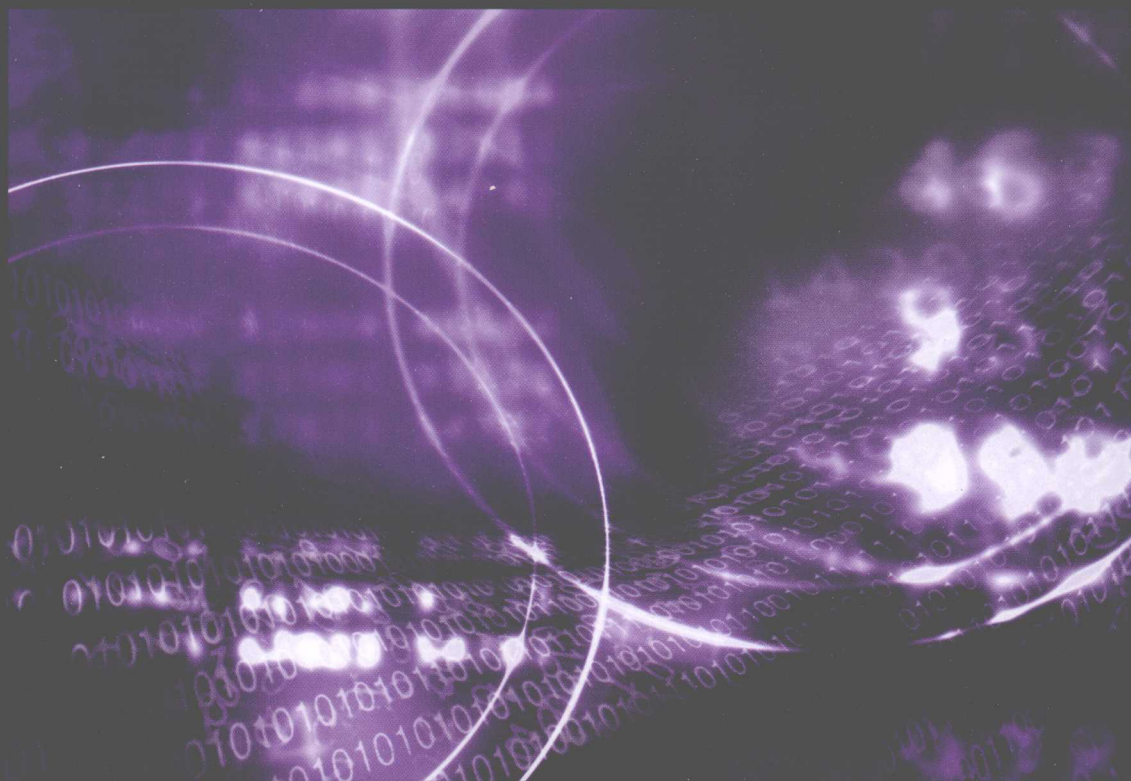


21
世纪

普通高等教育电气信息类
应用型规划教材

模拟电子技术

姚娅川 罗毅 主编



化学工业出版社

21 世纪普通高等教育电气信息类应用型规划教材

模拟电子技术

姚娅川 罗 毅 主编
刘永春 李咏红 周顺勇 庞尚珍 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要包括：半导体器件、基本放大电路、集成运算放大电路、放大电路中的反馈、集成运放的基本应用、波形发生与变换电路、功率放大电路、直流稳压电源、可编程模拟电路设计。

本书特点：(1) 基础知识全面、深入，在注重典型电路工作原理和基本分析方法的同时，站在系统的高度认识模拟电子电路，尽量阐明电路结构的组成方法，方便读者快速入门，并引导读者举一反三；(2) 根据电子技术的发展现状和加强基础、拓宽专业面的需要，将电子技术的最新成果编入书中，使读者在掌握传统基础内容外能开阔眼界；(3) 每章都有丰富的例题、习题，且包含大量的综合性设计性题目，使题目具有较强的启发性、灵活性和实践性；(4) 采用国际上通用的电路符号和逻辑符号，便于教学及使用 EDA 软件。

本书可作为高等院校电子信息工程、通信工程、电气工程及其自动化、自动化、电子科学与技术等电气信息类各专业的教材，也可供其他专业选用，还可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/姚娅川, 罗毅主编. —北京: 化学工业出版社, 2010.3
21 世纪普通高等教育电气信息类应用型规划教材
ISBN 978-7-122-07460-7

I. 模… II. ①姚…②罗… 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 (2010) 第 010593 号

责任编辑: 郝英华
责任校对: 吴 静

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张 15 1/4 字数 419 千字 2010 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

模拟电子技术是电子信息工程、电气工程及其自动化、自动化、电子科学与技术等专业的一门必修专业基础课程。电子信息产业是一项新兴的高科技产业,有着巨大的潜力和广阔的发展前景。随着我国电子信息产业的飞速发展,需要大量的电子信息类专业人才,迫切需要我国的高等院校能培养出大批符合要求的电子信息类高素质的应用型人才。为了达到新的培养目标,目前我国许多高等院校都在积极促进各种教学改革,以提高教学质量,而教材与教学质量紧密相关,选用的教材是否合适会直接影响到人才培养的质量情况。

本教材是根据面向 21 世纪课程教材建设的总体规划,结合编者多年来在教学实践中总结出的课程建设和改革经验,并结合现代科学技术发展的形势与当前的模拟电子应用情况组织编写而成的。为满足培养综合素质较强的人才的需要,在编写过程中,编者在保持本课程传统的比较成熟的理论体系的同时,引入了模拟电子技术的新发展和新应用,使本书更符合新的教学需要。

本书内容强调各种基本概念、典型电路的构成原理和分析及设计方法的学习,重点培养学生分析问题和实践综合应用的能力。主要体现在以下几个方面:(1) 根据循序渐进的学习和能力培养原则,分层次组织教学内容,每章节内容既相互独立,又相互联系,可根据不同专业的教学需要和培养目标进行取舍,构建合理的教学内容;(2) 按照基本概念、典型单元电路、集成电路、电路系统的结构体系,按照信号放大、运算、处理、变换和产生的知识系统,先基础后应用,从简单到复杂的方式组织教材内容;(3) 每章都包含大量的例题和习题,除巩固基础知识的题目外,还结合教学实践经验安排了丰富的综合性和设计性题目,使学生在掌握模拟电子电路原理外,锻炼基本的模拟电子电路的综合分析和设计的能力。

为方便教学,本书配套的电子教案可免费提供给采用本书作为教材的相关院校使用。如有需要,请发电子邮件至 haoyinghua@cip.com.cn 索取。

本书由姚娅川、罗毅担任主编,姚娅川负责全书的统稿和定稿,刘永春、李咏红、周顺勇和庞尚珍担任副主编。其中第 1 章由姚娅川编写,第 2 章和第 5 章由李咏红编写,第 3 章由庞尚珍编写,第 4 章由罗毅编写,第 6 章和第 8 章由刘永春编写,第 7 章和第 9 章由周顺勇编写。陶思言、谢文玲、昌学年、闫玲、曾雪林、岳建会等参与了本书资料的收集、图形的编制、文字的输入及修改等工作。

在此向所有关心、支持和帮助过本书编写、出版工作的同志们致以诚挚的谢意。

由于编者的能力和水平有限,对于书中的不足和不完善之处,恳请读者及同行给予批评和指正。

编 者
2010 年 1 月

本书符号说明

1. 基本规则

I_B 、 U_{BE} 、 I_C 、 I_E 、 U_{CE} 大写字母、大写下标,表示直流量

I_b 、 U_{be} 、 I_c 、 U_{ce} 大写字母、小写下标,表示交流量有效值

$\dot{I}_b$ 、 $\dot{U}_{be}$ 、 $\dot{I}_c$ 、 $\dot{I}_e$ 、 $\dot{U}_o$ 电流、电压交流量的相量表示形式

i_B 、 u_{BE} 、 i_C 、 u_{CE} 小写字母、大写下标,表示直流量+交流量的总瞬间值

2. 基本符号

(1) 电流和电压

I_i 、 U_i 交流输入电流、电压的有效值

I_{id} 、 U_{id} 交流净输入电流、电压的有效值

I_o 、 U_o 交流输出电流、电压的有效值

I_f 、 U_f 交流反馈电流、反馈电压

I_Q 、 U_Q 静态电流、静态电压

I_R 晶体二极管的反向电流

U_{REF} 参考电压

U_{BR} 晶体二极管的反向击穿压

$U_{(BR)CEO}$ 晶体三极管基极开路时 CE 极之间的反向击穿电压

I_+ 、 U_+ 集成运算放大器同相输入端的电流、电压

I_- 、 U_- 集成运算放大器反相输入端的电

(2) 功率

P 功率的通用符号

p 瞬时功率

P_O 交流输出功率

(3) 频率

f 频率的通用符号

ω 角频率

$BW_{0.7}$ 3dB 处通频带

(4) 电阻、电容、电感、阻抗

R (直流或静态) 电阻

r 小写字母表示微变(交流动态)电阻

G 电导的通用符号

g 微变电导

R_i 、 R_o 电路的输入、输出电阻

R_{if} 、 R_{of} 有反馈时,电路的输入、输出电阻

R_L 负载电阻

R_s 信号源内阻

R_f 反馈电阻

r_{be} BJT 输入电阻

r_{ce} BJT 输出电阻

(5) 增益或放大倍数、反馈系数

流、电压

U_T 温度的电压当量

U_{om} 输出电压最大值

V_{CC} 集电极回路或集成运算放大器正电源电压

V_{EE} 发射极回路或集成运算放大器的负电源($-V_{EE}$)电压

V_{BB} 基极回路对地的电压

U_{DD} 场效应管漏极回路对地的电压

U_{SS} 场效应管源极回路对地的电压

U_{GG} 场效应管栅极回路对地的电压

$U_{GS(off)}$ FET 夹断电压

$U_{GS(th)}$ FET 开启电压

P_{om} 交流输出功率最大值

P_C 集电极损耗功率

P_E 电源提供的直流功率

f_0 谐振频率,中心频率

f_H 放大电路的上限($-3dB$)频率

f_L 放大电路的下限($-3dB$)频率

r_d 二极管输入电阻

r_{ds} FET 的输出电阻

C 电容的通用符号

C_B 隔直流(耦合)电容器

C_e 交流旁路电容器

$C_{b'c}$ 基极-集电极电容器

$C_{b'e}$ 基极-发射极电容器

C_j 结电容

C_L 负载电容

L 电感的通用符号

Z 复阻抗通用符号

A 增益或放大倍数的通用符号

$\dot{A}_u$ 、 $\dot{A}_i$ 、 $\dot{A}_P$ 分别为电压、电流和功率增益

$\dot{A}_{ud}$ 差模电压放大倍数

$\dot{A}_{uc}$ 共模电压放大倍数

$\dot{A}_{uo}$ 理想运算放大器开环差模电压增益

$\dot{A}_{od}$ 开环电压增益

3. 器件参数符号

g_m 跨导

α 共基极电流放大系数

β 共射极电流放大系数

h_{ie} 、 h_{fe} 、 h_{re} 、 h_{oe} BJT 共发射极接法 h 参数

Ω 、 ω 角频率

f_T 双极型三极管的特征频率

f_β 共射截止频率

f_α 共基截止频率

I_D 二极管电流

I_S 二极管反向饱和电流

I_Z 稳压管稳定电流

I_{CBO} 集电极反向饱和电流 (射极开路)

I_{CEO} 集电极-发射极间穿透电流 (基极开路)

I_{IB} 集成运算放大器输入偏置电流

I_{IO} 集成运算放大器输入失调电流

U_Z 稳压管稳定电压

4. 其他符号

X 电抗通用符号

$\dot{X}$ 反馈电路中的信号量

$\dot{X}_s$ 源信号

$\dot{X}_i$ 输入信号

$\dot{X}_o$ 输出符号

$\dot{A}_r$ 、 $\dot{A}_g$ 分别为互阻、互导增益

$\dot{A}_{uf}$ 闭环电压放大倍数

$\dot{A}_{us}$ 考虑信号源内阻时的源电压放大倍数

F 反馈系数的通用符号

$\dot{F}_u$ 、 $\dot{F}_i$ 、 $\dot{F}_r$ 、 $\dot{F}_g$ 分别为电压、电流、互阻、互导反馈系数

$U_{GS(off)}$ 、 $U_{GS(th)}$ 场效应管的夹断电压和开启电压

$U_{(BR)DS}$ 、 $U_{(BR)GD}$ 、 $U_{(BR)GS}$ 分别为漏源、栅漏和栅源之间的击穿电压

$U_{(BR)CEO}$ 基极开路, 集电极-发射极间反向击穿电压

$U_{(BR)CBO}$ 发射极开路, 集电极-基极间反向击穿电压

$U_{(BR)EBO}$ 集电极开路, 发射极-基极间反向击穿电压

U_{CES} 集电极-发射极之间的饱和电压

U_{IO} 集成运算放大器输入失调电压

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

K_{CMRR} 共模抑制比

S_R 集成运算放大器转换速率

$\dot{X}_f$ 反馈信号

$\dot{X}_{id}$ 静输入 (差值) 信号

φ 相角

φ_A 基本放大器相角

φ_F 反馈网络相角

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN 结的形成	2
1.1.4 PN 结的单向导电性	3
1.2 半导体二极管	4
1.2.1 二极管的类型和结构	4
1.2.2 二极管的伏安特性	5
1.2.3 二极管的主要参数	6
1.2.4 特殊二极管	7
1.2.5 二极管的等效电路	10
1.2.6 二极管应用电路	12
1.3 晶体三极管	14
1.3.1 晶体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	17
1.3.5 三极管的主要参数	18
1.3.6 温度对三极管参数的影响	19
1.4 场效应管	20
1.4.1 结型场效应管的工作原理	21
1.4.2 绝缘栅场效应管	24
1.4.3 场效应管的主要参数	27
1.4.4 VMOS 场效应管	28
本章小结	28
习题 1	29
第 2 章 基本放大电路	32
2.1 放大电路的基础	32
2.1.1 放大的概念	32
2.1.2 放大电路的性能指标	32
2.2 放大电路的组成及工作原理	34
2.2.1 基本共射放大电路的组成	34
2.2.2 放大电路的工作原理	35
2.3 放大电路的基本分析方法	35
2.3.1 直流通路和交流通路	35
2.3.2 图解法	36
2.3.3 等效电路法	39
2.4 静态工作点稳定电路	44
2.5 基本放大电路的三种组态	47
2.5.1 共集放大电路	47
2.5.2 共基放大电路	48
2.5.3 三种放大电路比较	49
2.6 场效应管放大电路	49
2.6.1 场效应管放大电路的静态偏置	49
2.6.2 场效应管放大电路的微变等效 电路法	51
2.7 放大电路的频率响应	52
2.7.1 频率响应的基本概念	53
2.7.2 晶体管的混合 π 模型	53
2.7.3 单管共射放大电路的频率响应	57
本章小结	60
习题 2	61
第 3 章 集成运算放大电路	65
3.1 多级放大电路	65
3.1.1 多级放大电路的耦合方式	65
3.1.2 多级放大电路的动态分析	66
3.1.3 多级放大电路的频率响应	68
3.2 集成运算放大电路简介	68
3.2.1 集成运放的电路特点	69
3.2.2 集成运放的组成	69
3.3 差分放大电路	69
3.3.1 直接耦合放大电路的零点漂移 现象	69
3.3.2 基本差分放大电路	70
3.3.3 差分放大电路的四种接法	71
3.3.4 改进型的差分放大电路	75
3.4 电流源电路	76
3.4.1 基本电流源电路	77
3.4.2 多路电流源电路	78
3.4.3 改进型电流源电路	78
3.4.4 有源负载放大电路	78
3.5 集成运放电路分析	80
3.5.1 分析方法	80
3.5.2 原理电路分析	80
3.6 集成运放的主要技术指标和种类	83
3.6.1 集成运放的主要技术指标	83
3.6.2 集成运放的种类	84
3.6.3 集成运放的符号及其电压传输 特性	85
3.7 集成运放的使用注意事项	86
3.7.1 集成运放的选用	86
3.7.2 集成运放使用中的实际问题	86
本章小结	87

习题 3	88	5.4.3 有源高通滤波电路	135
第 4 章 放大电路中的反馈	92	5.4.4 有源带通滤波电路	136
4.1 反馈的基本概念与分类	92	5.4.5 有源带阻滤波电路	137
4.1.1 反馈的基本概念	92	5.5 电压比较器	137
4.1.2 反馈的分类与判断	92	5.5.1 电压比较器概述	137
4.2 负反馈放大电路的四种组态	96	5.5.2 单限比较器	138
4.2.1 负反馈放大电路的方框图 表示法	96	5.5.3 滞回比较器	139
4.2.2 四种组态电路的方框图	97	5.5.4 窗口比较器	140
4.2.3 负反馈放大电路的四种组态	98	本章小结	140
4.2.4 负反馈放大电路的一般表达式	99	习题 5	141
4.3 深度负反馈放大电路分析	100	第 6 章 波形发生与变换电路	146
4.3.1 深度负反馈的特点	100	6.1 正弦波振荡电路	146
4.3.2 反馈网络的分析	100	6.1.1 概述	146
4.3.3 深度负反馈条件下放大倍数的 分析	101	6.1.2 RC 正弦波振荡电路	147
4.4 负反馈对放大电路性能的影响	104	6.1.3 LC 正弦波振荡电路	150
4.4.1 稳定放大倍数	104	6.1.4 石英晶体正弦波振荡电路	156
4.4.2 对输入电阻的影响	104	6.2 非正弦波发生器	159
4.4.3 对输出电阻的影响	105	6.2.1 矩形波发生器	159
4.4.4 展宽频带	107	6.2.2 三角波发生器	162
4.4.5 减小非线性失真	108	6.2.3 锯齿波发生器	164
4.4.6 放大电路中引入负反馈的一般 原则	108	6.3 波形变换电路	165
4.5 负反馈放大电路的稳定性	109	本章小结	167
4.5.1 自激振荡产生的原因和条件	109	习题 6	168
4.5.2 负反馈放大电路稳定性判断	110	第 7 章 功率放大电路	173
4.5.3 消除自激振荡的方法	112	7.1 功率放大电路概述	173
本章小结	114	7.1.1 功率放大电路的特点	173
习题 4	115	7.1.2 功率放大电路的主要参数	173
第 5 章 集成运放的基本应用	119	7.1.3 功率放大电路的分类	174
5.1 理想的集成运放	119	7.2 甲类共射放大电路的输出功率与 效率	174
5.1.1 理想运放的参数	119	7.3 互补对称功率放大电路	175
5.1.2 运放的工作区域	119	7.3.1 乙类互补对称功率放大电路 (OCL 电路)	175
5.2 基本运算电路	120	7.3.2 甲乙类互补对称功率放大电路	178
5.2.1 比例运算电路	120	7.3.3 单电源甲乙类互补对称功率放大 电路 (OTL 电路)	179
5.2.2 加减运算电路	122	7.4 集成功率放大器及其应用	180
5.2.3 积分运算电路和微分运算电路	125	7.4.1 LM386 集成功率放大器	180
5.2.4 对数和指数运算电路	127	7.4.2 高功率集成功率放大器 TDA2006	181
5.3 模拟乘法运算电路	129	本章小结	183
5.3.1 利用对数和指数电路的乘法运算 电路	129	习题 7	183
5.3.2 变跨导乘法电路	129	第 8 章 直流稳压电源	186
5.3.3 模拟乘法器的应用	131	8.1 直流稳压电源概述	186
5.4 有源滤波器	132	8.2 整流电路	186
5.4.1 滤波器的基本概念及分类	132	8.2.1 半波、全波整流电路	187
5.4.2 有源低通滤波器	133	8.2.2 桥式整流电路	189

8.3 滤波电路	192	9.2.3 ispPAC30	225
8.3.1 电容滤波电路	192	9.2.4 ispPAC80	227
8.3.2 电感滤波电路	194	9.2.5 ispPAC81	227
8.3.3 其他滤波电路	195	9.3 PAC 的接口电路	228
8.4 稳压电路	197	9.4 ispPAC 的增益调整方法	229
8.4.1 稳压管稳压电路	197	9.4.1 通用增益设置	230
8.4.2 串联型稳压电路	200	9.4.2 分数增益的设置法	231
8.4.3 集成稳压器及其应用电路	206	9.4.3 整数比增益设置法	232
8.4.4 开关型稳压电路	211	9.5 PAC-Designer 软件的使用与设计	
本章小结	213	实例	233
习题 8	214	9.5.1 PAC-Designer 软件的安装	233
第 9 章 可编程模拟电路设计	219	9.5.2 PAC-Designer 软件的使用	
9.1 在系统可编程模拟器件 ispPAC 的		方法	233
原理	219	9.5.3 PAC-Designer 软件的几个重要的	
9.1.1 PAC 块的传递函数	219	功能	236
9.1.2 可编程模拟器件的特点	221	9.5.4 ispPAC80 器件的软件设计	
9.1.3 开发工具与开发平台	221	方法	236
9.1.4 可编程模拟器件的设计流程	221	9.6 设计实例——滤波器设计	238
9.2 在系统可编程模拟电路的结构	222	本章小结	243
9.2.1 ispPAC10	222	习题 9	243
9.2.2 ispPAC20	224	参考文献	244

第 1 章 半导体器件

在 20 世纪 50 年代半导体器件逐步代替了电子管器件，特别是 1948 年晶体管（Transistor）的发明，对电子技术的发展起到了决定性的作用，而集成电路的产生，又使电子技术进入了一个崭新时代。从小规模集成电路（SSI）到大规模集成电路（LSI）再到超大规模集成电路（VLSI），集成电路工艺水平日新月异，成就了现代电子科学技术的发展。

本章主要介绍半导体的基础知识。重点讨论 PN 结及其导电性，半导体二极管（以下简称“二极管”）和双极型半导体晶体管（以下简称“晶体管”）、场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数，而对半导体器件内部详细的物理过程则只作一般的讨论。

1.1 半导体的基本知识

在自然界中，所有物质按导电能力的强弱可分为导体、绝缘体、半导体三大类。

容易传导电流的材料称为导体，如金属。

几乎不传导电流的材料称为绝缘体，如橡胶、陶瓷、石英、塑料等。

导电能力介于导体和绝缘体之间的称为半导体，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，最常用的半导体材料有锗（Ge）和硅（Si）。

用半导体材料制成的电子器件统称为半导体器件。半导体器件又根据参与导电的载流子种数分为双极型和单极型半导体器件两种。双极型半导体器件有自由电子、空穴两种载流子参与导电，而单极型半导体器件是只有一种载流子（自由电子或空穴）参与导电的器件。

半导体器件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辐射时，其电阻率会发生显著变化，导电能力将有明显的改善，利用这一特性可制造光敏元件和热敏元件。

（2）具有掺杂特性 即在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明显增强。

1.1.1 本征半导体

按照半导体理论，将纯净的具有完整晶体结构的半导体称为本征半导体。

本征半导体在热力学温度零度，且无外界能源施加能量（如光照等）时是不导电的。但当温度升高或接受光照时，一些共价键中的价电子由于获得一定的能量，挣脱原子核的束缚成为自由电子，这种现象称为本征激发（也称热激发）。原子核因失去电子，在共价键中出现了空位，这个呈现出正电性的空位称为空穴。空穴的出现是半导体的一个重要特点。

本征半导体的自由电子和空穴是成对出现的，称为自由电子空穴对，如图 1-1 所示。如果在半导体两端加上电源 E ，如图 1-2 所示，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递补空位而间接产生空穴的定向移动，从而形成空穴电流。电子移动时是负电荷的移动，空穴移动时是正电荷的移动，电子和空穴都能运载电荷，所以它们

都称为载流子。

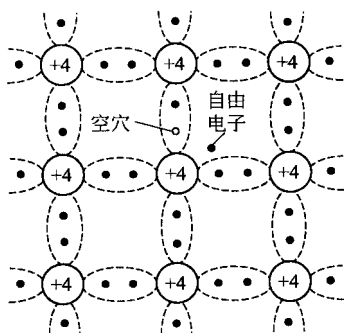


图 1-1 本征半导体的电子空穴对

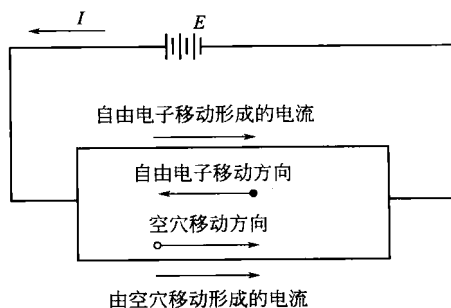


图 1-2 载流子在外电场作用下形成电流

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中掺进微量的其他元素（称为“杂质”），其导电性能将大大增强。掺有杂质的半导体称为杂质半导体，如 N 型半导体、P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素（如磷、砷等），这些微量原子的外层有 5 个价电子，其中 4 个与本征半导体的外层电子组成共价键，多余的 1 个价电子则称为自由电子，如图 1-3 所示。由于自由电子为多数载流子，故称这类半导体为 N 型半导体。其特点是电子为多数载流子，空穴为少数载流子。如果五价杂质原子失去 1 个价电子，则成为带正电的杂质离子。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入三价元素（如硼、铝等），这些微量原子的外层有 3 个电子，在组成共价键中多出 1 个空位，如图 1-4 所示。由于空穴为多数载流子，故称这类半导体为 P 型半导体。其特点是空穴为多数载流子，电子为少数载流子。如果三价杂质原子获得 1 个价电子，则成为带负电的杂质离子。

在杂质半导体中，多数载流子的数目与掺入杂质有关，掺入杂质越多，多数载流子的数目就越多；而少数载流子的数目则与温度有关，温度越高，少数载流子的数目就越多。应当注意，不论是哪一种掺杂半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但半导体中的正负电荷数是相等的，整个晶体仍然保持电中性。

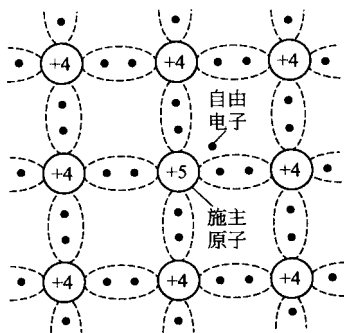


图 1-3 N 型半导体的结构示意图

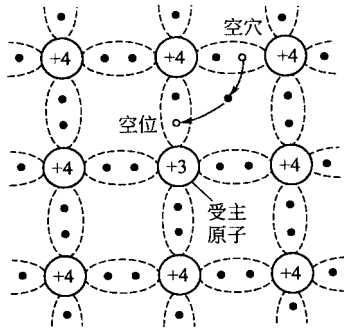


图 1-4 P 型半导体的结构示意图

1.1.3 PN 结的形成

PN 结是构成各种半导体器件的核心，许多半导体器件都是用不同数量的 PN 结构成的。

所以, PN 结的理论是半导体器件的基础。

(1) 载流子的运动

① 扩散运动 在电中性的半导体中, 当同一种载流子出现浓度差别时, 载流子将从浓度较高的区域向浓度较低的区域运动, 这种由多数载流子 (简称“多子”) 形成的运动称为载流子的“扩散运动”。扩散运动产生“扩散电流”。

② 漂移运动 在电场的作用下, 少数载流子 (简称少子) 作定向运动, 称为载流子的“漂移运动”。漂移运动产生“漂移电流”。

(2) PN 结的形成

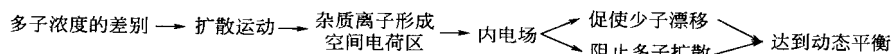
在一块半导体晶体上, 采取一定的掺杂工艺, 使两边分别形成 P 型半导体和 N 型半导体。由于 N 型半导体中多子是自由电子, 而 P 型半导体中多子是空穴, 浓度的差别使交界处产生扩散运动, 即 N 型区的电子向 P 型区扩散, P 型区的空穴向 N 型区扩散。扩散使 N 区侧因失去自由电子, 留下带正电的杂质离子 (图中用 $\oplus$ 表示); P 区侧因失去空穴, 留下带负电的杂质离子 (图中用 $\ominus$ 表示)。由于物质结构的关系, 半导体中的杂质离子虽然带电, 但不能任意移动, 不参与导电。它们集中在 N 区和 P 区的交界面两侧, 形成了一个很薄的空间电荷区, 这个空间电荷区就称为 PN 结, 如图 1-5 所示。

在空间电荷区中, 两侧不能移动的正负离子形成了一个内电场, 如图 1-6 所示。扩散运动的继续使空间电荷区加宽、内电场增强。而内电场在建立和增强的同时, 对多数载流子的扩散运动起阻碍削弱作用, 对少子 (P 区的自由电子和 N 区的空穴) 的漂移运动却起推动作用, 又使空间电荷区变窄、内电场减弱, 其作用正好与扩散运动相反。

扩散运动增强内电场, 漂移运动减弱内电场, 最后扩散运动与漂移运动达到相对的稳定, 此时内电场和空间电荷区的厚度不再改变, PN 结处于动态平衡。

在空间电荷区中, 多数载流子扩散到对方并被复合掉, 或者说是消耗尽了, 所以空间电荷区又称为耗尽层; 又由于所建立的内电场对多数载流子的扩散起阻挡作用, 所以又称为阻挡层。

PN 结的形成过程可简述如下。



(3) PN 结的接触电位

内电场的建立, 使 PN 结中产生电位差, 从而形成接触电位 V_f , 接触电位 V_f 大小取决于材料及掺杂浓度。

锗: $V_f = 0.2 \sim 0.3V$

硅: $V_f = 0.6 \sim 0.7V$

1.1.4 PN 结的单向导电性

PN 结通常处于动态平衡状态, 当外加一定的电压时会破坏这种动态平衡状态, 并显示出 PN 结的单向导电性。

(1) PN 结的正向偏置

如图 1-7 所示, 在 PN 结上加正向电压 (也称正向偏置, 简称正偏), 则外加电场与内

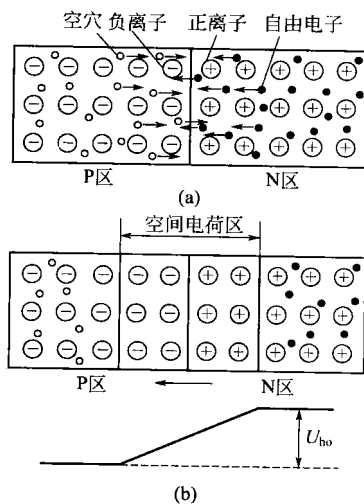


图 1-5 PN 结的形成

电场方向相反,“动态平衡”被破坏。这使得空间电荷区变窄、内电场减弱,多子的扩散运动增强、扩散电流加大。在一定范围内,外电场越强,扩散电流(又称为正向电流)越大,这时 PN 结呈低阻状态。

(2) PN 结的反向偏置

如图 1-6 所示,在 PN 结上加反向电压(也称反向偏置,简称反偏),外电场和内电场方向一致,使空间电荷区加宽、内电场增强、多子的扩散运动几乎不能进行,只有少数子在电场作用下产生漂移运动,形成微弱的反向电流,这时 PN 结呈高阻状态。

在一定的温度条件下,由本征激发所产生的少数子浓度是一定的,故少数子形成的漂移电流几乎是恒定的,基本上与所加反向电压的大小无关,这个电流称为反向饱和电流 I_s 。

综上所述,PN 结加正偏时,呈现低阻状态,正向电流很大,称 PN 结处于导通状态;PN 结加反偏时,呈现高阻状态,反向电流很小,称 PN 结处于截止状态。这种在外加电压时显示出的 PN 结特性称为 PN 结的单向导电性。

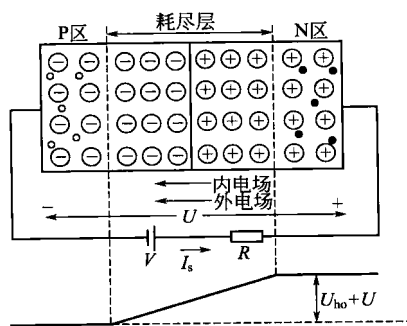


图 1-6 PN 结加反向电压截止

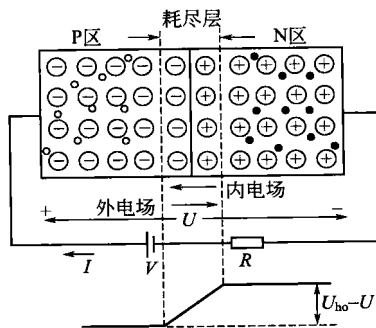


图 1-7 PN 结加正向电压导通

(3) PN 结的伏安 (V-I) 特性

PN 结外加正向电压时导通、反向电压时截止的单向导电性,可用 V-I 特性表示为

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

式中, I_s 为反向饱和电流; U 为 PN 结两端的电压降; $U_T = KT/q$ 称温度的电压当量, K 为玻尔兹曼常数, q 为电子电荷量, T 为热力学温度,对于室温(相当于 $T = 30^\circ\text{C}$)则有 $U_T = 26\text{mV}$ 。

① 设 PN 结外加正向电压,即 $U > 0$,当 U 比 U_T 大几倍时, $i = I_s e^{\frac{U}{U_T}}$,即 PN 结中的电流 i 与电压 U 成指数关系。

② 设 PN 结外加反向电压,即 $U < 0$,当 $|U|$ 比 U_T 大几倍时, $I_s e^{\frac{U}{U_T}} \approx 0$, $i \approx -I_s$,即 PN 结中的电流 i 基本不随外加反向电压的大小而变化。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的类型和结构

在 PN 结的两端接上电极引线并用管壳密封就构成半导体二极管。从 P 型半导体引出的电极称为阳极,从 N 型半导体引出的电极称为阴极,其符号如图 1-8(d) 所示。二极管具有单向导电性,其符号中箭头所指的方向就是正向电流的方向。

根据内部结构的不同,二极管可分为以下 3 种类型。

① 点接触型二极管:如图 1-8(a) 所示,由于 PN 结面积很小,只能通过较小的电流

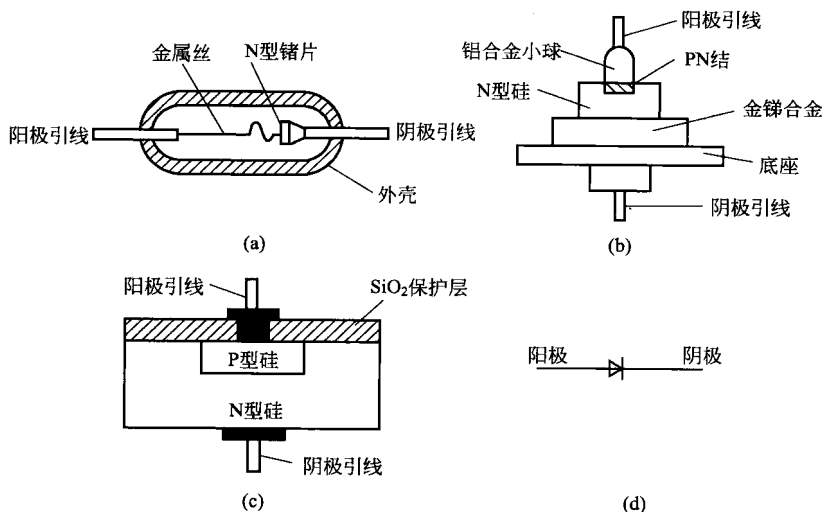


图 1-8 半导体二极管的符号和结构

(几十毫安以下)。但它的结电容小,适用于高频(几百兆赫兹)电路。故多用于高频信号检波、混频以及小电流整流电路中。

② 面接触型二极管:如图 1-8(b)所示,由于 PN 结面积大,所以允许通过较大的电流(几百毫安甚至几安)。但由于结电容大,只能用于低频整流电路中。

③ 平面型二极管:如图 1-8(c)所示,PN 结面积小的平面二极管常用于脉冲电路中作为开关管用。结面积较大的平面管常用于大功率整流电路之中。

1.2.2 二极管的伏安特性

伏安特性是指二极管阳极与阴极之间的电压 U 与流过二极管电流 I 的关系曲线。实测的二极管伏安特性与 PN 结方程曲线有一定差别。图 1-9 是硅二极管和锗二极管的实测伏安特性曲线,其特点如下。

(1) 正向特性

当二极管外加的正向电压很低时,由于外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻碍作用,因而正向电流仍约为零,这一区域称为死区。当正向电压增加到某一数值时,内电场被削弱,正向电流增长很快,二极管进入导通状态,该电压值称为死区电压,也

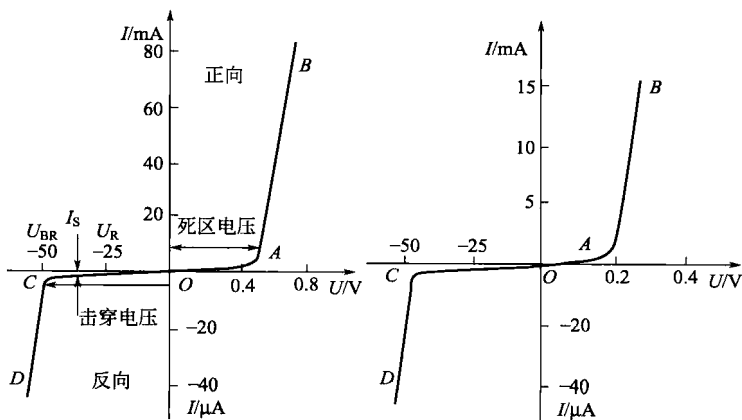


图 1-9 二极管伏安特性

叫做门槛电压, 用 U_{on} 表示。硅二极管的导通电压约为 $0.5V$, 锗二极管的导通电压约为 $0.1V$ 。

二极管导通后, 阳极与阴极间的电压硅管一般为 $0.6\sim 0.7V$, 锗管为 $0.2\sim 0.3V$ 。通常认为当二极管正向电压小于 U_{on} 时, 二极管截止; 当二极管正向电压大于 U_{on} 时, 二极管导通。

(2) 反向特性

当二极管外加反向电压时, PN 结承受反向偏置, 电流很小, 且反向电压在较大范围内变化时反向电流值基本不变, 称为反向饱和电流。此时, 二极管处于截止状态。小功率硅管的反向饱和电流约在 $0.1\mu A$ 以下, 锗管通常在几十微安。当反向电压增加到某一数值时 (一般为几十伏, 高的可达数千伏), 二极管被击穿, 此时, 二极管处于击穿状态。普通二极管往往因击穿过热而烧毁。

由二极管的伏安特性可知, 普通二极管一般工作在导通状态或截止状态。

PN 结的单向导电性可以用 PN 结伏安特性理论方程来描述, 即

$$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-2)$$

式中, I_s 为反向饱和电流的大小; $U_T = KT/q$ 称为温度电压当量, 其中 K 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电量, 当温度为 $300K$ (室温) 时, $U_T \approx 26mV$; i 和 u 是 PN 结的电流和电压, 方向为正向电流和电压的方向。

当二极管的 PN 结两端加正向电压, u 比 U_T 大几倍时, 式(1-2) 中的 u/U_T 远大于 1。这样, PN 结的电流 i 与电压 u 成指数关系, 即

$$i \approx I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-3)$$

当二极管加反向电压时, u 为负值。若 $|u|$ 比 U_T 大几倍时, 指数项趋近于零, 因此 $i \approx -I_s$, 可见反向饱和电流是个常数 I_s , 不随外加反向电压的大小而变动。

(3) 温度特性

二极管的特性对温度十分敏感, 温度升高时, 正向特性曲线向左移, 反向特性曲线向下移。一般规律是: 在同一电流下, 温度每升高 $1^\circ C$, 正向压降减少 $2\sim 2.5mV$; 温度每升高 $10^\circ C$, 反向饱和电流约增加一倍。

1.2.3 二极管的主要参数

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外。还用一些参数表示, 其主要参数如下。

① 最大整流电流 I_F : 指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。它主要取决于 PN 结的结面积大小, 当流过二极管的正向平均电流超过此值时, 会使 PN 结烧坏。

② 反向击穿电压 U_{BR} : 指管子反向击穿时的电压值。击穿时, 反向电流剧增, 二极管的单向导电性被破坏, 甚至因过热而烧坏。

③ 最高反向工作电压 U_R : 指保证二极管不被反向击穿所给出的最高反向工作电压。通常约为反向击穿电压的一半。使用时, 加在二极管上的实际反向电压不能超过此值。

④ 最大反向工作电流 I_R : 指在二极管上加最高反向工作电压时的反向电流。此值愈小, 单向导电性能愈好。当温度升高时, 反向电流增加, 单向导电性能变坏。故二极管在高温条件使用时要特别注意。

⑤ 最高工作频率 f_M : 指保证二极管具有良好单向导电性能的最高频率。它主要由 PN 结的结电容大小决定。结面积小的二极管最高工作频率较高。

值得注意的是, 由于制造工艺的限制, 各类半导体器件参数的分散性较大, 手册上给出的参数往往是一个范围。而且, 半导体器件对温度反应敏感, 因此, 具体使用时要注意温度改变时对相应参数产生的影响。

⑥ 二极管的直流电阻 R_D ：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 ，如图 1-10(a) 所示。即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-4)$$

⑦ 二极管的交流（动态）电阻 r_D ：当二极管端电压在某一确定值（工作点 Q ）附近的微小变化与流过二极管电流产生的微小变化之比称为二极管的交流（动态）电阻 r_D ，如图 1-10(b) 所示。即

$$r_D = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} \quad (1-5)$$

二极管直流电阻 R_D 和交流电阻 r_D 的大小与二极管的工作点有关。对同一工作点而言，直流电阻 R_D 大于动态电阻 r_D ；对不同工作点而言，工作点愈高， R_D 和 r_D 愈低。

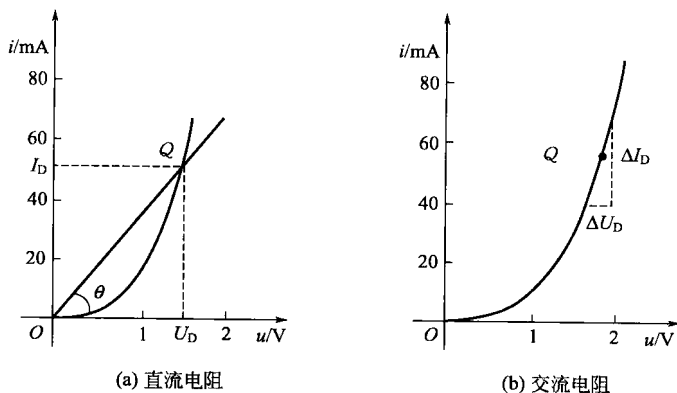


图 1-10 二极管的直流电阻和交流电阻

表 1-1 列出了几种二极管的主要参数。

表 1-1 半导体二极管的主要参数

(a) 2AP1~7 检波二极管（点接触型锗管，在电子设备中作检波和小电流整流作用）

参数 型号	最大整流 电流/mA	最高方向工作 电压(峰值)/V	反向击穿电 压(反向电流 为 $400\mu\text{A}$)	正向电流 (正向电压 为 1V)/mA	反向电流(反 向电压分别为 10V, 100V)/ μA	最高工作 频率/MHz	极间电容 /pF
2AP1	16	20	≥ 40	≥ 2.5	≤ 250	150	≤ 1
2AP7	12	100	≥ 150	≥ 5.0	≤ 250	150	≤ 1

(b) 2CZ52~57 系列整流二极管，用于电子设备的整流电路中

参数 型号	最大整流 电流/A	最高方向工作 电压(峰值)/V	最高反向工作电压下的 反向电流(125℃)/mA	正向压降(平均 值)(25℃)/V	最高工作频率 /kHz
2CZ52	0.1	25, 50, 100, 200, 300, 400, 500,	1000	≤ 0.8	3
2CZ54	0.5	600, 700, 800, 900, 1000, 1200,	1000	≤ 0.8	3
2CZ57	5	1400, 1600, 1800, 2000, 2200,	1000	≤ 0.8	3
		2400, 2600, 2800, 3000			

1.2.4 特殊二极管

除前面讨论的普通二极管外，还有许多种特殊二极管，如稳压二极管、光敏二极管、发光二极管和激光二极管等，现分别介绍如下。

(1) 稳压二极管

① 稳压二极管及其稳压作用。稳压二极管也称为齐纳二极管，是一种用特殊工艺制造的面结型硅半导体二极管。因为它具有稳定电压的功能，故称稳压管。稳压管的电路符号及伏安特性曲线如图 1-11 所示。

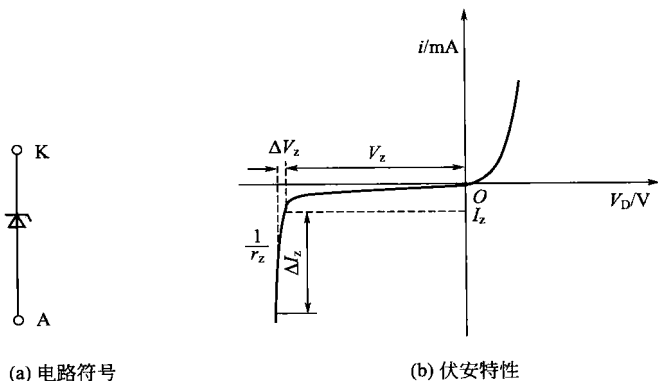


图 1-11 稳压管电路符号与伏安特性

由图 1-11(b) 可见，稳压管的正向特性曲线与普通二极管相似，而反向击穿特性曲线比较陡。稳压管正是工作于特性曲线的反向击穿区域。当反向电压加大到某一数值时，反向电流急剧增大，只引起很小的电压变化，因而可以使稳压管两端的电压保持基本稳定。用 V_Z 表示反向击穿电压，即稳压管的稳定电压。稳压管工作在电击穿状态下，只要电路中的电流不超过规定的数值，就能保证稳压管不因过热而烧坏。所以，经常在稳压电路中串接一个限流电阻。

② 稳压管的主要参数如下。

a. 稳定电压 V_Z ：指在规定电流下稳压管的反向击穿电压。由于半导体器件参数的分散性，即使同一型号的稳压管， V_Z 值也有差别。例如，当 2CW11 型稳压管的电流为 10mA 时， V_Z 在 3.2~4.5V 之间。

b. 稳定电流 I_Z ：稳压管正常工作时的参考电流值。实际电流低于此值时，稳压效果差。高于此值时，只要不超过额定功耗都可以正常工作，而且电流越大，稳压效果越好，只是稳压的功耗将增加。

c. 动态电阻 r_Z ：稳压管工作在稳压区时，稳压管上电压变化量与电流变化量之比，即

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$

r_Z 越小，反向击穿特性曲线越陡，稳压效果越好。 r_Z 的数值通常在几欧至几十欧之间。不同型号的稳压管， r_Z 值也不同。对于同一只稳压管，电流越大， r_Z 越小。如 2CW17 型稳压管的工作电流为 5mA 时， r_Z 为 18Ω；工作电流为 20mA 时， r_Z 为 2Ω。

d. 额定功耗 P_Z ： P_Z 为稳压管的稳定电压 V_Z 和允许的最大工作电流 I_{Zm} 的乘积，即 $P_Z = V_Z I_{Zm}$ 。当稳压管实际工作时的功耗超过此值时，有可能因温度升高而损坏。

e. 稳定电压的温度系数 K ： K 表示温度每变化 1℃，稳压值的变化量。一般稳定电压 V_Z 低于 4V 的稳压管具有负温度系数（即温度升高， V_Z 下降）。 V_Z 高于 7V 的稳压管具有正温度系数（温度升高， V_Z 上升），而在 4~7V 之间时，温度系数很小。

稳压管用 2CW、2DW 命名，表 1-2 列出了几种典型的稳压管主要参数。