

电子电路基础

张凤言 编著

高等教育出版社

本书在编写中,认真总结了课程教学实践和教材编写的体会,学习了国内外有代表性的几本著作,研究了学科的发展趋势,吸取了近几年国内有关教学大纲及教学法讨论会的宝贵经验,在《电子器件与线路》、《集成运算放大器及其应用》、《模拟电子技术教师学习资料》三套讲义的基础上编写的。全书共八章,其内容包括:晶体管特性与模型;基本放大电路原理、特性与分析;放大电路的频率特性;反馈放大电路;线性集成电路基础;集成运算放大器应用电路的基本组态与特性;反馈放大器的频率响应及不稳定性;模拟乘法器原理与应用。

本书加强理论基础,引用网络理论成果;以集成电路分析与应用为重点;引用大信号特性分析法;借用全零器和无定器分析有关器件及电路。在内容编排上由浅入深,阐述详尽,辅以例证,系统归类,讲清难点,强调重点。每节后选编了结合基本内容的练习题,还在大多数章后给出难度稍大的综合练习题,以满足不同读者的需要。

本书可供高等学校无线电技术和电子技术类的本科生、研究生和教师参考;可供大专院校的师生参考;亦可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。如果可能也可作为教材使用。

本书采用国际单位制(SI)和国标(GB)。

本书经高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组委托合肥电子工程学院魏志源副教授审阅,同意作为教学参考书出版。

本书责任编辑 李永和

电子电路基础

张凤言 编著

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 35.5 字数 810 000

1986年1月第1版 1988年1月第8次印刷

印数 9 671—16 670

ISBN 7-04-001593-5/TN·74

定价 6.05 元

前 言

几年来,作者为北京航空学院电子工程系讲授电子线路课,编写了相应讲义《电子器件与线路》。还编写了《集成运算放大器及其应用》,作为选修课教材,经过院内外几次教学实践。82年暑假,为北京电视大学等学校模拟电子技术课程的教师开设面授课,并为此编写了《模拟电子技术教师学习材料》。本书是以上述三套讲义为基础编写的。编写中,认真总结了上述课程教学实践与教材编写积累的点滴体会,学习了国内外有代表性的几本著作,研究了学科的发展趋势,吸取了近几年国内有关教学大纲及教学法讨论会的宝贵经验。

“电子线路”是非原理性、非设备性、理论密切联系实际的技术基础课。电子技术在迅速发展,学科内容在急剧膨胀,以电子器件为标志,已从电子管、晶体管、小规模集成电路进入大规模集成电路的时代。大规模集成电路的涌现,使器件、电路与系统的界限再难以截然分开。以音频信号为主、分立元件电路为主、小信号特性分析为主的传统教材体系,很难适应时代的需要。有鉴于此,在编写本书中力图做出以下尝试:

第一,加强理论基础,引用网络理论成果。电子器件的更新换代,导致了电子技术的飞速变革。但实践证明,从网络化的观点和系统的概念出发,对各种线性放大系统采用网络分析和复频域分析,是对电子管电路、晶体管电路、集成电路均适用的重要理论基础。因此,第二章阐述了密勒定理及其近似条件;第三章综合论述了网络函数极零点数目及数值,引证了短路和开路时间常数分析法;第四章采用实际电路与A网络、B网络统一表示的方块图相结合的方法讲述;第七章利用网络函数分析负反馈对电路频域和时域响应特性的影响,进而讨论负反馈系统的稳定化概念与技术。

第二,以集成电路分析与应用为重点。模拟集成电路[如集成运算放大器(以下简称集成运放)AD508L及HA2900]国内外均已步入大规模集成化的水平。集成运放的广泛线性与非线性应用,已推动了电子技术的重大变革。模拟乘法器是模拟集成电路的重要分支,它将以十分广泛而有效的非线性应用,推动电子技术的进一步变革。因此第二章就从分立元件基本放大电路的工作原理入手,逐步转移到集成电路为重点,并在以后各章突出集成电路的分析与应用。第六章在讲述集成运放的应用时,除论述理想等效模型分析法外,还根据集成运放应用电路的重要特性,把集成运放应用电路归纳为反相输入、同相输入、差动输入和开环比较四种基本组态。

第三,引用大信号特性分析法。第一章首先以统一的观点,将晶体管的大信号模型和小信号模型有机地联系起来,并在第二、五、六、八等章中,应用大信号模型来分析各种基本电路和模拟乘法器的传输特性。大信号特性分析是图解法和等效电路法相结合、非线性和线性分析相结合的方法。放大电路的小信号特性是其大信号传输特性在静态点Q处的微变特性。应用大信号特性分析法能开阔视野,提高分析能力,有利于开拓新电路。

本书是作为教学参考书编写的。因此,在学科内容的深度与广度上都做了一些伸展。为使

本书有利教学,便于自学,除大量删节陈旧内容外,编写中做了由浅入深、阐述详尽、辅以例证、系统归类、讲清难点、强调重点等努力。除每节后编选了结合基本教学内容的练习题外,大多数章后还编集了难度稍大的综合练习题,以满足不同读者的需要。

因前几年北京航空学院教学计划中把电子器件独立设课,故本书没有纳入半导体物理、电子器件工作机理等内容。但实际上,只要对第一章就所缺内容,做几个学时的补充,就可完整地使用本书。

魏志源副教授 1982 年 12 月受北京航空学院聘请,对本书初稿第一到第四章进行了审阅;1983 年 10 月又受高等工科大学电子线路教材编审小组及高等教育出版社委托,对本书稿全面审阅,提出了许多批评与修改意见,书中许多问题都揉合着他的学术见解,例如,关于差放的共模抑制特性,就采用了他的论证。武汉大学张肃文教授评阅过本书的第一、二、三、四章。成都电讯工程学院黄香馥教授审阅了第三章。南开大学秦世才副教授审阅了第六章。北京航空学院潘维瀚副教授指导了本书的侧重与删节。在编写本书的过程中,还得到了北方交通大学贺允东副教授的帮助。他们都提出了很多宝贵的修改意见。在此一并谨致衷心感谢。

限于作者水平,书中仍会有谬误及不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

一九八四年八月

于北京航空学院

本书常用符号说明

一、基本符号

1. A 增益或放大倍数的通用符号。 A 的不同符号的下标代表不同物理意义的增益, 例如:

A_i, A_v, A_r, A_g 分别指电流、电压、互阻、互导增益;

$A_{is}, A_{vs}, A_{rs}, A_{gs}$ 分别指计及源内阻 R_s 的上述增益;

$A_{rso}, A_{vso}, A_{rso}, A_{gso}$ 分别指负载开路与短路时的上述增益;

$A_{vf}, A_{if}, A_{rf}, A_{gf}$ 分别指负反馈放大电路的上述增益;

$A_{vfs}, A_{ifs}, A_{rfs}, A_{gfs}$ 分别指负反馈电路计及 R_s 时的上述增益;

A_h 高频增益; A_d 差模增益;

A_l 低频增益; A_c 共模增益;

A 反馈放大电路中的基本放大电路。

2. B 反馈系数的通用符号

B_v, B_i, B_r, B_g 分别指电压、电流、互阻、互导反馈系数;

B 基极、反馈网络。

3. C 电容的通用符号, 不同的下标含意不同, 例如:

C_i, C_o, C_L 分别指输入、输出、负载电容;

C_π, C_μ, C_{CS} 分别指 BJT 的分布电容;

C_{DG}, C_{GS}, C_{DS} 分别指 FET 的分布电容;

C_m 密勒电容;

C_b, C_e 分别指基极、射极旁路电容;

C 集电极。

4. E 发射极

E 直流电源电压通用符号, 不同下标代表不同的电压, 例如:

E_C, E_B, E_E, E_D, E_S 分别指各电极供电电源电压。

5. F 反馈深度的通用符号

$$F = 1 + AB;$$

$$F_s = 1 + A_s B;$$

$$F_{so} = 1 + A_{so} B;$$

$$F_{ss} = 1 + A_{ss} B。$$

6. $f, \omega = 2\pi f$ 频率、角频率的通用符号, 例如:

f_l 低频截止(-3dB)频率, $\omega_l = 2\pi f_l$;

f_h 高频截止(-3dB)频率, $\omega_h = 2\pi f_h$;

- f_{BW} 通频带宽度;
- f_{α} 共基 BJT 的截止频率;
- f_{β} 共射 BJT 的截止频率;
- f_T 特征频率;
7. g 动态电导, 例如:
- g_{ce}, g_{μ}, g_{π} ;
- g_m 低频跨导;
- g_{mf} 具有反馈时的等效跨导。
8. I, i 电流的通用符号, 不同的下标系指不同的电流, 例如:
- I_C, I_B, I_E, I_D, I_S 分别指静态集、基、射、漏、源极电流;
- I_c, I_b, I_e, I_d 分别指相应电极的电流有效值;
- I_s, I_i, I_o 分别指信号源、输入、输出电流有效值;
- I_m 指电流峰值(振幅);
- i_c, i_b, i_e, i_d 分别指相应电极的总瞬时值电流;
- i_c, i_b, i_e, i_d 分别指相应电极的动态电流分量。
9. P 功率通用符号
- P_i, P_o, P_E 分别指输入、输出、电源消耗功率。
10. R 直流或动态电阻的通用符号, 例如:
- $R_b, R_c, R_e, R_G, R_S, R_D$ 分别指基、射、集、栅、源、漏极直流偏置电阻;
- R_s 信号源内阻;
- R_L 负载电阻;
- R_L' 等效负载电阻;
- R_{cm} 共模负反馈电阻。
11. Tr 变压器
12. r 动态电阻的通用符号, 例如:
- $r_{bb'}, r_{\pi}, r_{\beta}, r_{ce}, r_{ee}, r_{ec}$ BJT 的体电阻和结电阻;
- r_{GS}, r_D FET 的动态电阻;
- r_i, r_o 输入、输出电阻;
- r_{if}, r_{of} 负反馈放大电路的输入、输出电阻。
13. V, v 电位、电压的通用符号, 例如:
- $V_B, V_C, V_E, V_D, V_S, V_G$ 分别指相应电极直流电位;
- $V_{BE}, V_{CE}, V_{DS}, V_{GS}$ 分别指相应电极间直流电压;
- $V_{be}, V_{ce}, V_{ds}, V_{gs}$ 分别指相应电极间动态电压有效值;
- V_i, V_o, V_{id}, V_{od} 分别指输入、输出电压有效值及差模输入、输出电压有效值;
- V_s 信号源电压的有效值;

$v_{BE}, v_{CE}, v_{DS}, v_{GS}$ 分别指相应电极间总瞬时值电压;

$v_i, v_o, v_{be}, v_{ce}, v_d, v_{gs}$ 分别指输入、输出及相应电极间的动态电压分量。

二、其他符号。下列符号带不同的下标时表示不同的意义。

1. $G, g; Z; H, h; Y$ 网络参数。
2. D 漏极, 非线性失真系数, 二极管。
3. T 晶体三极管, 环路增益、温度、周期。
4. Q 静态工作点, 品质因数。
5. S 系数, 面积, 源极。
6. s 复频率; σ 复频率的实部。
7. N 电子型半导体。
8. N_F 噪声系数。
9. $CMRR, \bar{\alpha}$ 共模抑制比。
10. η 效率。
11. τ 时间常数, 非平衡少子寿命。
12. $\alpha, \bar{\alpha}$ 共基 BJT 的电流传输系数。
13. $\beta, \bar{\beta}$ 共射 BJT 的电流增益。
14. φ 相位差。
15. δ 倾斜率, 误差。
16. t 时间。
17. ψ_T 相位裕量。
18. G_T 增益裕量。
19. ζ 阻尼系数。
20. K 常数, 增益系数。

目 录

第一章 晶体管特性与模型1	2.6.1 密勒定理及其近似条件104
1.1 晶体二极管.....1	2.6.2 共射放大电路106
1.1.1 晶体二极管的重要特性1	2.6.3 共基放大电路119
1.1.2 二极管小信号模型8	2.6.4 共集电极放大电路124
1.2 双极型晶体管(BJT).....11	2.6.5 三种基本组态小结129
1.2.1 共基 BJT 的静态特性曲线.....12	2.6.6 FET 放大电路129
1.2.2 共射 BJT 的静态特性曲线.....15	2.6.7 双管放大电路135
1.2.3 共射 BJT 的大信号模型.....18	2.7 有源负载放大电路的特性144
1.2.4 正向电流增益 β 与管子工作 状态的关系.....26	2.7.1 有源负载射随器的特性145
1.2.5 共射 BJT 的小信号模型.....27	2.7.2 电阻负载共射电路的大信号特性和 微变增益150
1.3 场效应管的特性、模型及特点44	2.7.3 有源负载共射放大电路的特性151
1.3.1 场效应管的种类及主要特点44	2.7.4 有源负载共基放大电路的小信号 特性158
1.3.2 场效应管的伏安特性与模型.....48	2.8 基本差动放大电路的特性与分析... 160
参考文献54	2.8.1 差动放大电路的基本概念160
第二章 基本放大电路原理、特性与分析56	2.8.2 共射差放的低频差模特性163
2.1 概述56	2.8.3 共射差放的低频共模特性166
2.2 放大电路的工作原理56	2.8.4 单端输入共射差放171
2.2.1 BJT 放大电路.....56	2.8.5 基本共射差放的大信号特性174
2.2.2 FET 放大电路.....64	2.8.6 FET 差动放大电路的特性.....181
2.3 放大电路的主要性能参数与信号传递 方式69	2.8.7 有源负载共射差动放大电路的大信号 特性183
2.3.1 放大电路的主要性能参数.....69	2.8.8 有源负载共射差放的小信号特性187
2.3.2 放大电路中的信号传递方式.....75	2.8.9 共射差放非理想对称时的共模抑制特性 和输入失调特性193
2.4 基本放大电路的直流偏置电路78	2.9 多级放大电路210
2.4.1 设计直流偏置电路的原则.....78	总结219
2.4.2 BJT 放大电路的偏置稳定电路.....78	综合练习题220
2.4.3 FET 放大电路的偏置稳定电路.....84	参考文献223
2.4.4 电流源电路.....85	第三章 放大电路的频率特性225
2.5 基本放大电路的图解分析92	3.1 放大电路频率特性的基本概念225
2.5.1 概述92	3.2 复频域分析法228
2.5.2 BJT 放大电路的完整图解法.....92	3.2.1 网络函数228
2.5.3 FET 放大电路 Q 点的图解.....97	3.2.2 零点、极点与波特图的近似表示234
2.5.4 图解动态输出范围.....98	3.2.3 电路网络函数的零、极点分析242
2.6 基本放大电路的微变量等效电路 分析103	3.2.4 主极点和(-3dB)频率的分析——短

路和开路时间常数分析法	218	4.4 四种反馈放大电路的计算	336
3.3 共射放大电路的频率特性	259	综合练习题	349
3.3.1 阻容耦合共射电路的低频响应特性	260	参考文献	351
3.3.2 共射放大电路的高频响应特性	262	第五章 线性集成电路基础	355
3.3.3 共射电路的增益带宽积GB	266	5.1 概述	355
3.3.4 共射差放其模抑制比的频率响应特性	267	*5.1.1 集成电路中的元器件结构及特点	355
3.3.5 容性负载共射电路的高频响应	268	5.1.2 集成运放的主要技术参数	362
3.3.6 单级共射电路的阶跃响应	269	5.2 模拟集成电路的改进型单元电路	365
3.4 共基放大电路的频率特性	272	5.2.1 改进型镜象电流源	365
3.5 共集电极放大电路的频率特性	275	5.2.2 差动级的变型电路	369
3.5.1 电压增益函数	275	5.2.3 乙类推挽输出级电路	377
3.5.2 高频输入阻抗和输出阻抗	278	5.3 典型集成运放 F007 电路分析	385
3.6 多级放大电路的频率特性	281	5.3.1 F007 的工作原理	385
3.6.1 RC 耦合多级放大电路的低频截止频率 ω_1 的分析	281	5.3.2 F007 的直流分析	387
3.6.2 多级共射电路高频截止频率 ω_h 的分析	283	5.3.3 F007 的小信号特性	390
3.6.3 宽带放大电路分析举例	287	5.3.4 F007 的幅频特性	393
综合练习题	292	5.3.5 F007 的上升速率 SR	395
参考文献	294	5.3.6 集成运放时域特性与频域特性的联系	396
第四章 反馈放大电路	295	综合练习题	398
4.1 基本概念	295	参考文献	404
4.1.1 反馈极性	295	第六章 集成运放应用电路的基本组态与特性	405
4.1.2 理想反馈方块图和基本反馈方程式	296	6.1 集成运放等效模型与运算特性	406
4.1.3 环路增益和反馈深度	298	6.1.1 理想集成运放及其等效模型	406
4.1.4 四种反馈组态及其判别方法	300	6.1.2 实际集成运放的等效模型及运算特性	409
4.2 负反馈对放大电路性能的影响	307	6.2 反相输入组态的负反馈特性	416
4.2.1 输入电阻	307	6.2.1 闭环电压增益函数 $A_{v_f}(s)$	416
4.2.2 闭环增益	310	6.2.2 反相输入组态电路分析举例	421
4.2.3 闭环增益的稳定性	312	6.2.3 反相输入组态的闭环输入和输出阻抗	427
4.2.4 输出电阻	314	6.3 同相输入组态的负反馈特性	432
4.2.5 非线性失真	317	6.3.1 闭环电压增益函数 $A_{v_f}(s)$	433
4.2.6 负反馈放大电路的噪声特性	320	6.3.2 闭环输入和输出阻抗	434
4.3 反馈放大电路的分析方法	322	6.3.3 电压跟随器	437
4.3.1 电压并联负反馈放大电路	323	6.4 差动输入组态的特性	440
4.3.2 电流串联负反馈放大电路	327	6.4.1 基本型差动输入组态的特性	441
4.3.3 电压串联负反馈放大电路	330	6.4.2 同相串联型差动输入组态的特性	446
4.3.4 电流并联负反馈放大电路	333	6.4.3 同相并联型差动输入组态的特性	451
4.3.5 总结	335		

6.5 集成运放工作在比较组态	457	综合练习题.....	516
6.5.1 比较组态电路	457	参考文献.....	517
6.5.2 比较组态应用举例	462	第八章 模拟乘法器原理与应用	518
综合练习题.....	465	8.1 模拟相乘原理.....	518
参考文献.....	470	8.2 变跨导模拟乘法器电路原理与 特性分析.....	520
第七章 反馈放大器的频率响应 与稳定化基础	471	8.2.1 简单的双象限乘法器	520
7.1 负反馈对放大器响应特性的影响.....	471	8.2.2 完整的四象限模拟乘法器	522
7.1.1 负反馈对放大器传输函数极零点的 影响	471	8.2.3 压控吉尔伯特乘法器单元 电路	522
7.1.2 如何评价负反馈放大器的响应特性	473	8.2.4 流控吉尔伯特乘法器单元 电路	527
7.1.3 单极点闭环系统的响应特性	473	8.2.5 差模电压-电流变换器的分析.....	529
7.1.4 具有双极点开环增益函数的负反馈 系统	476	8.2.6 差模输出电流-单端输出电压变换 器	531
7.1.5 具有三极点开环增益函数的负反馈 系统	483	8.2.7 集成四象限模拟乘法器 MC 1595 及其 外部电路元件参数选择	533
7.2 反相和同相输入比例器的 闭环带宽.....	487	8.2.8 调零	537
7.3 负反馈放大器的不稳定性与稳定性 判据.....	489	8.3 对数求和-反对数乘法器电路原理 与特性分析.....	538
7.3.1 负反馈放大器的不稳定性与自激振荡 条件	489	8.3.1 一象限乘法器电路和特性	538
7.3.2 用奈奎斯特图判断负反馈系统的稳 定性	491	8.3.2 四象限乘法器电路原理及特性	539
7.3.3 用波特图判断反馈系统的稳定 性	492	8.4 乘法器的参数.....	540
7.3.4 稳定裕量(稳定裕度)	494	8.5 模拟乘法器应用电路.....	543
7.4 相位补偿原理与补偿技术.....	495	8.5.1 除法器及乘除器	543
7.4.1 相位补偿技术的设计原则	496	8.5.2 平方电路和平方根电路	544
7.4.2 主极点补偿	497	8.5.3 自动电平控制电路(ALC)	545
7.4.3 极点分离补偿	500	8.5.4 线性自动增益控制宽频带放大器	547
7.4.4 基本放大器的零-极点补偿.....	507	8.5.5 频带电控低通滤波器	548
7.4.5 反馈网络的极-零点补偿.....	509	8.5.6 波形产生器及波形变换器	549
7.4.6 相位补偿举例	510	8.5.7 整流器和幅度检测器	551
		8.5.8 锁相环系统中的鉴相器	552
		8.5.9 调制器和解调器	553
		参考文献.....	555

第一章 晶体管特性与模型

在低频电子线路中常用的半导体器件是晶体二极管、双极型晶体管和场效应晶体管。本章先综述各种晶体管的特性，而后根据工作机理，再分别引出各种晶体管的模型。掌握晶体管的特性及模型是分析各种低频电子线路的基础。本章介绍的“等效”概念和“线性化”的方法是电子线路课程中常用的重要概念及方法。

1.1 晶体二极管

1.1.1 晶体二极管的重要特性

晶体二极管是由PN结加上欧姆接触电极、引出线及管壳构成的。二极管的特性实质上几乎完全决定于PN结的物理特性。它有以下几个重要特性。

一、单向导电性

二极管能完成整流、限幅(箝位)、调制、解调等许多电路功能，皆以二极管的单向导电特性为基础。当二极管加上正极性电压(正偏)时，如图1.1.1(a)所示，外加电场削弱了PN结的内电场，阻挡层变窄，位垒高度降低，有利于多数载流子(多子)的扩散运动，正向电流为扩散电流。而且，在限流电阻 R 不变时， E 增加， i_D 随之增加。当二极管加负极性电压时(反偏)，如图1.1.1(b)所示，外加电场增强PN结的内电场，阻挡层变宽，位垒高度增加，不利于多子的扩散，形成的反向电流为漂移电流。在PN结的耗尽层未击穿以前， E 增加，反向电流 i_D 基本不变。

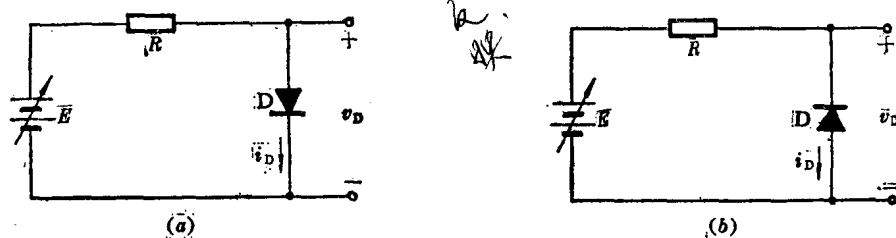
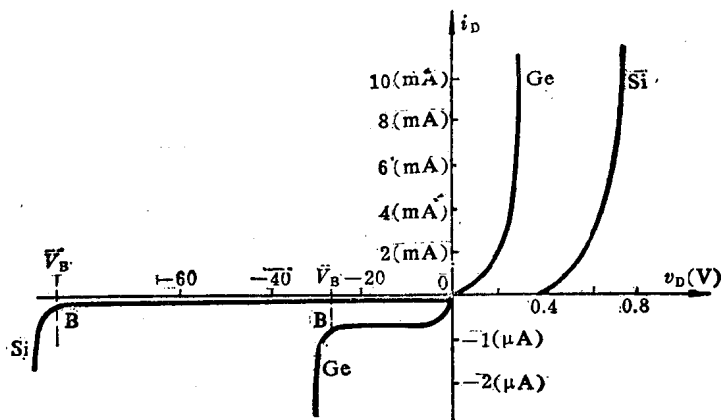


图1.1.1 二极管正偏和反偏电路
(a) 正偏； (b) 反偏

二、伏安特性的非线性

PN结内部载流子的运动规律反映在二极管外部端点电压及其产生电流的关系上叫做外特性，亦即伏安特性。将二极管电流与电压的关系显示在平面坐标上即为伏安特性曲线，如图1.1.2所示。坐标第一象限表示二极管正偏时的 i_D 与 v_D 的关系，第三象限表示二极管反偏时的 i_D 与 v_D 的关系。伏安特性可分三个区。 $v_D > 0$ 的区域是正向工作区；图中B点是反向击穿点， V_B 是二极管反向击穿电压， $V_B < v_D < 0$ 的区域是反向工作区； $v_D < V_B$ 的区域是击穿区。在不用于



注意正负坐标刻度不同

图 1.1.2 二极管的伏安特性

稳定电压和未接限流保护电阻时,为安全应避免反向击穿。

中小功率硅(Si)管的正向开启电压 V_{on} 一般为 0.5V 左右,正向电流在数 mA~数十 mA 时,相应 v_D 在 0.6V~0.8V,经常近似取 0.7V,正向电流大到 A 量级时,相应 v_D 在 1V 左右,中小功率锗(Ge)管开启电压 V_{on} 一般在 0.1V 左右,在 mA 量级时,相应 $v_D \approx 0.2V$ 左右。

硅管反向饱和电流 I_S 比锗管的至少小三个数量级。常温下,锗管的反向饱和电流 I_S 在 μA 量级,而优质硅管的反向饱和电流 (I_S) 小于 pA ($10^{-12} A$) 量级。

二极管的外特性可用下面的理论公式来描述,即二极管的特性方程式为

$$i_D = I_S \left(\exp \frac{v_D}{V_T} - 1 \right) \quad (1.1.1)$$

式中 I_S 为反向饱和电流, v_D 为二极管的跨结电压, V_T 为温度的电压当量, PN 结的热力学电压, $V_T = \frac{kT}{q}$, k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子电荷量, 常温时, $T = 300K$, 得 $V_T \approx 26 mV$ 。

由上式可知, 正偏 $V_D > 4V_T$ 时, $i_D \approx I_S \exp \frac{v_D}{V_T}$; 反偏 $v_D < -4V_T$ 时, $i_D \approx -I_S$ 。式 (1.1.1) 可描述二极管的正向和反向特性, 但不适用于反向击穿区。式 (1.1.1) 表明 i_D 与 v_D 的关系是非线性关系, 正向电流随正偏电压 v_D 的增加按指数规律而上升。 i_D 与 v_D 的非线性特性具体表现在不服从欧姆定律:

① 伏安特性曲线上各点对应的直流电压与直流电流的比值(叫二极管的直流电阻)不是常数。

② 伏安特性曲线上各点相对应的交流(动态)电阻不是常数。在确定的工作点附近的那段曲线视为直线, 该直线斜率的倒数即为工作点附近的交流电阻。

③ 伏安特性曲线上每点的直流电阻与其交流电阻不等。

由图(1.1.3)可知, 若选定 Q 点为二极管的工作点, 相应的正偏电压为 V_D , 正向电流为 I_D , 则相应的直流电阻用 R_D 表示为

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} \quad (1.1.2)$$

R_D 是伏安特性上 Q 点纵坐标与横坐标的比值的倒数, 即

$$R_D = \left(\frac{I_D}{V_D} \right)^{-1} \quad (1.1.3)$$

当二极管的正向电流为 I_D 时, 在 Q 点附近的交流电阻用 r_d 表示为

$$r_d = \left(\frac{di_D}{dv_D} \right)^{-1} \approx \frac{2v_d}{2i_d} \quad (1.1.4)$$

r_d 是伏安特性曲线上 Q 点切线在既定坐标系中斜率的倒数, 即

$$r_d \approx \frac{1}{\frac{i_d}{v_d}} \quad (1.1.5)$$

按上述定义, 由二极管的特性方程式(1.1.1)可求出 r_d 为

$$r_d = \left(\frac{di_D}{dv_D} \right)^{-1} \approx \left[\frac{d}{dv_D} \left(I_S \exp \frac{v_D}{V_T} \right) \right]^{-1} = \frac{V_T}{I_D} \approx \frac{26\text{mV}}{I_D} \quad (1.1.6)$$

上式中的电流 I_D 是流过二极管的直流电流, 而 r_d 是二极管在 Q 点处的交流电阻(动态电阻)。式(1.1.6)中, 当温度不变时, V_T 为一常数, 此时交流电阻 r_d 与 Q 点电流成反比, 在概念上与式(1.1.3)迥异, 切不可混淆。

图(1.1.3)及式(1.1.1)不仅表征了二极管对直流或低频信号的非线性, 而且还表示出它对直流或低频信号具有单向导电性。因此, 掌握二极管的伏安特性及特性方程是很重要的。

三、电容特性

由 PN 结构成的所有二极管都有结电容效应。由于点接触二极管是由一根很细的金属触丝和一块半导体(如 Ge)的表面接触, 而后通过很强的正向脉冲电流熔接形成 PN 结, 故接触面积小, 结电容很小, 能在甚高频甚至微波波段完成混频或检波的电路功能。用合金法或扩散法形成 PN 结做成的二极管称面接触型或面结型二极管。因 PN 结面积大, 极间电容大, 虽可流通很大的直流或低频电流, 但对频率不太高的交流信号却呈现很明显的电容外特性, 如 2CP 系列的二极管, 当信号频率从 50Hz 升高到 500 kHz 时, 不仅电流的相位变化很大, 而且电流的幅值要减小很多。

PN 结的电容 C_j 包括势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 两部分。即

$$C_j = C_T + C_D \quad (1.1.7)$$

1. 势垒电容 C_T

众所周知, 极板电容为线性电容, $C = \epsilon \frac{S}{l}$, $C = \frac{Q}{V} = \frac{dQ}{dV}$ 。

若给 PN 结加上反向电压, 见图 1.1.4, 当 E 增大 ΔE 时, 耗尽层变厚, 正电荷量和负电荷量

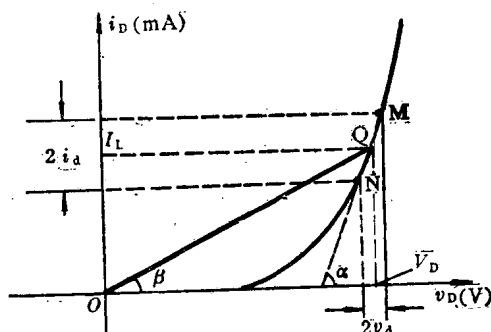


图 1.1.3 伏安特性的非线性

增加,相当于充电;当 E 减小 ΔE 时,耗尽层变薄,耗尽层内的正、负电荷量减小,相当于放电。跨结反偏电压变化引起耗尽层内的充放电效应与上述的极板电容的充放电效应很相象。可用下式表示势垒电容 $C_T^{[1]}$:

$$C_T = \frac{dQ}{dV_D} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta E} \quad (1.1.8)$$

$$C_T = \frac{K}{\sqrt{V_D}} \quad (1.1.9)$$

$$C_T \approx \frac{S\varepsilon}{l_p} \quad (n_n \gg p_p) \quad (1.1.10)$$

$$C_T = \frac{S\varepsilon}{l_n} \quad (p_p \gg n_n) \quad (1.1.11)$$

实际上的PN结通常是不对称结,若N型半导体中的载流子浓度 n_n 和P型半导体中的载流子浓度 p_p 满足 $n_n \gg p_p$,则 C_T 可用式(1.1.10)来表示, l_p 是PN结在P型区的长度;反之,若不对称结是 $p_p \gg n_n$ 则 C_T 用式(1.1.11)表示, l_n 是PN结在N型区中的长度。对势垒电容 C_T 需强调以下几点:

① 式(1.1.10)及(1.1.11)只表示势垒电容 C_T 类似于极板电容。式中 S 是PN结面积, ε 是半导体元素的介质常数, l_p 或 l_n 相当于极板距离,但 l_p 或 l_n 不是常数,它与跨结反偏电压 V_D 的平方根成正比。也可由式(1.1.9)看出, C_T 与 V_D 的平方根成反比,式中 K 是系数。

② 由以上论述可知,典型二极管的动态势垒电容 C_T 与结反偏电压 V_D 是非线性关系, C_T 是非线性电容。基于上述原理而做成的变容二极管的外特性曲线如图1.1.5所示。变容管模型中的 r_T 是管子耗尽层以外P型和N型半导体的体电阻。因反偏,与 C_T 并联的结电阻极大,可忽略。

③ C_T 是分布电容, C_T 存在于PN结内。它表征的是跨结反偏电压变化而引起耗尽层内离子电荷量变化。

2. 扩散电容 C_D

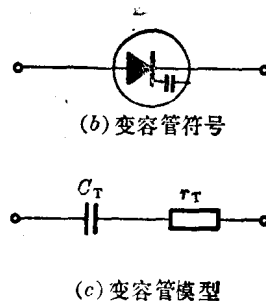
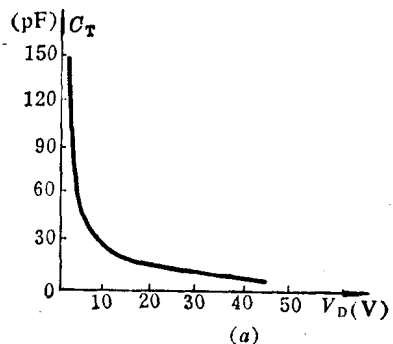


图1.1.5 变容管及其动态特性

(a) 变容管的动态电容与反压 V_D 的关系; (b) 变容管符号; (c) 变容管模型

当PN结加正偏电压 E 时,流过的扩散电流为 I_D 。因中性区内的阻挡层边界处的非平衡注入少数浓度 $n_p(0)$ 或 $p_n(0)$ 与正偏电压有关,当正偏电压增大 ΔE 时,注入非平衡少子的浓度也增加,见图1.1.6,因而少数浓度分布曲线上移。图中表明了相应于电压 E 和 $E+\Delta E$ 时两种条件下的非平衡少数浓度分布曲线。两曲线之间的面积可以表示增加的电荷量。可见,因正偏电压增加 ΔE ,在中性区就存在电荷积累。对于不对称结,因弱掺杂区向强掺杂区的注入可以忽略,所以,电荷贮存效应,主要在弱掺杂区。

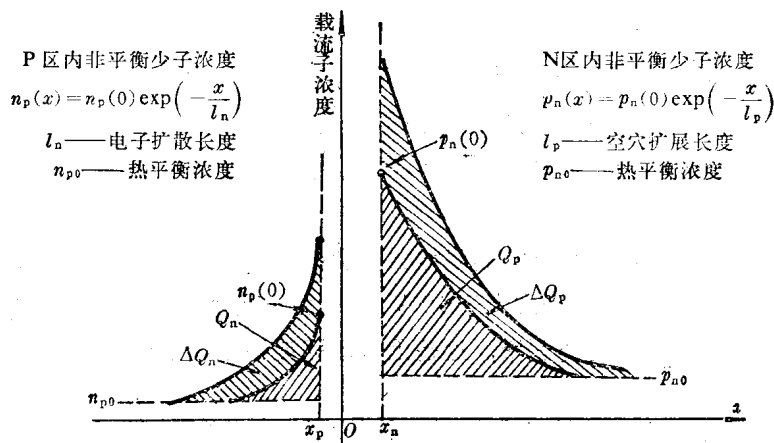


图1.1.6 PN结扩散电流引起的电容效应(非平衡少数浓度分布)

由于中性区内电中性的要求,P区中的每一个注入少数,均有一个多子在它附近,于是便构成一个点电容。扩散电容就是无数个点电容构成的。

外加电压的变化,使积累的载流子的电荷量变化。扩散电容 C_D 就是表征该电荷的变化量与外加电压变化量之比,即

$$C_D = \frac{dQ}{dV_D} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta V_D} \quad (1.1.12)$$

$$C_D = \frac{\tau}{V_T} I_D \quad (1.1.13)$$

式中 τ 是非平衡载流子的平均寿命。

关于扩散电容的概念必须强调几点:

① 扩散电容 C_D 是PN结在正向电压作用下,由于多子扩散到另一区而形成多余少数引起的。

② 扩散电容效应是指载流子在中性区内(不是在阻挡层空间离子区内)的电荷存贮效应(积累)。在电中性的P型区和N型区内,不仅有非平衡少子的积累,而且还有非平衡多子的积累。高浓度掺杂的P⁺型区与N型区构成的不对称P⁺N结的 C_D ,主要是N型中性区内非平衡少数空穴与N区内非平衡多子的积累产生的;而PN⁺结的 C_D 则主要是P型中性区内非平衡少数电子及P区内的非平衡多子空穴的积累产生的。

③ C_D 与扩散电流成正比。其本质是点电容,因而它是分布电容,与势垒电容本质不同。但可等效并联在 PN 结上。它是 PN 结电容的组成部分之一。当外加反向电压时, $I_D = -I_S$, I_S 非常小, $C_D \approx 0$, PN 结的电容主要是势垒电容;加正偏时,正向电流可以很大, $C_D \gg C_T$, PN 结电容的主要成分是 C_D 。故可知

$$C_j = C_T + C_D$$

④ C_T 和 C_D 都与 PN 结面积成正比。点接触二极管如 2AP9 或 2AP30, 因结面积很小, C_T 和 C_D 均很小, $C_j < 0.5 \text{ pF}$; 面结型二极管因结面积大, C_T 和 C_D 均较大, 均在数十 pF 到数百 pF。

四、PN 结的反向击穿特性

以 PN 结为基本物理结构的半导体器件都存在反向击穿问题。PN 结击穿特性的外电路表现(外特性)就是在反向电压足够大时,反向电流急剧增长。一般除稳压管在安全限流条件下充分利用 PN 结的反向击穿特性外,其他半导体器件都应避免发生反向击穿。

1. 场致击穿——齐纳击穿

掺杂浓度很高的半导体构成的 PN 结,其阻挡层宽度很窄,例如 $0.04 \mu\text{m}$,加上较小的反向电压,例如 4V,则产生的场强很大,若等于或大于 10^6 V/cm ,强电场可将耗尽区内原子的共价键电子拉出,电子空穴成对产生,反向电流剧增,这是因电场强度很强而造成 PN 结的击穿,故名为场致击穿。

2. 碰撞电离——雪崩击穿

掺杂浓度低的半导体构成的 PN 结,耗尽层较厚。在较大反向电压作用下,形成漂移电流的少子,在耗尽层内获得加速,动能越来越大。在反向电压大到漂移少子的动能足以撞出耗尽层中原子的共价键电子而产生新的电子空穴对时,便发生碰撞电离。新产生的电子得到足够能量又与其他原子发生碰撞电离,导致反向电流雪崩式的急剧增加。雪崩击穿的实质是碰撞电离。

应当注意:① 齐纳击穿和雪崩击穿都是发生在耗尽层内的击穿,击穿是耗尽层内的原子的共价键结构的破坏——两种击穿的共同特征是电子空穴成对产生。② 一般 6V 以下的击穿属于齐纳击穿,而高于 6V 的击穿主要是雪崩击穿^[1]。雪崩击穿电压的温度系数是正的。因温度增加,一方面载流子多次碰撞平均自由路程短,两次碰撞之间获得能量小,但另一方面耗尽层内晶格的原子振动幅度加大,越过耗尽层的电子与原子的碰撞的机会增加,因此只有增加反向电压才能得到足够能量产生碰撞电离,故雪崩击穿电压的温度系数是正的。因齐纳击穿是场致激发,温度增加,使价电子受热、能量增大,更易于被拉出共价键,齐纳击穿电压的温度系数是负的。③ PN 结的反向电压较高反向电流较大时,会使 PN 结的功耗较大,结温升高,而导致永久性损坏的热击穿。测试或使用二极管时应避免热击穿。

3. 稳压管

PN 结的击穿,可用来制作稳压二极管。当稳压管 D_Z 接入具有限流保护电阻 R 的电路时,如图 1.1.7(a)所示,只要 E_2 超过 D_Z 的反向击穿电压, D_Z 便呈现良好的击穿特性,如图 1.1.7(b)所示。 V_Z 是 D_Z 的反向击穿电压,当 E_2 增加时, D_Z 上的反压只变化很小的 ΔV ,便会引起 I_L 很大的变化 ΔI ,则稳压管在反向击穿工作区呈现的动态电阻为

$$r_z = \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{1.1.14}$$

将 D_z 的反向击穿特性视为直线, 由图 1.1.7(b) 便可画出 D_z 反向击穿后的线性等效电路, 如图 1.1.8 所示。若 $\Delta V \approx 0.2V$, $\Delta I \approx 22mA$, 则 $r_z \approx 9\Omega$ 。 r_z 与管子型号及其工作电流大小有关, 一般在允许功耗内, 电流越大, r_z 越小, 如图 1.1.9 所示。

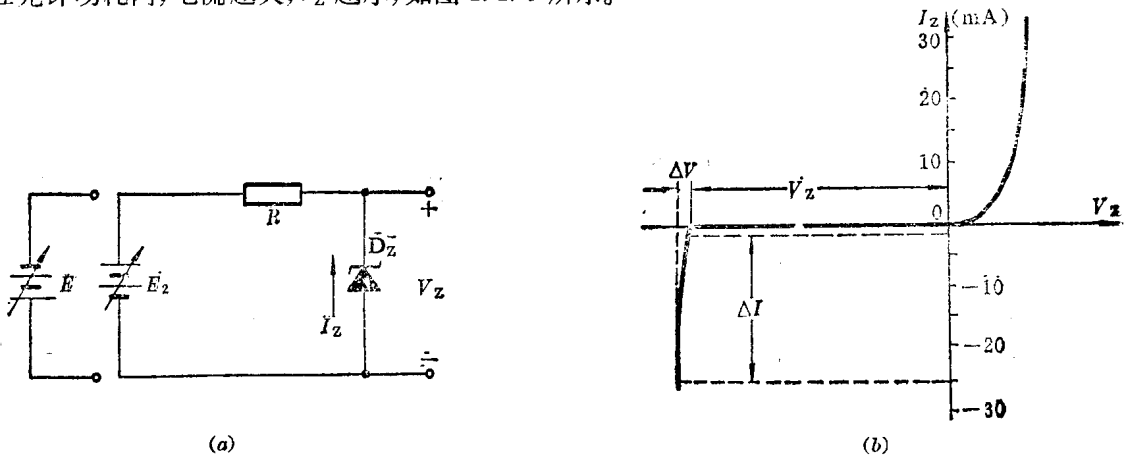


图 1.1.7 硅稳压管电路及外特性

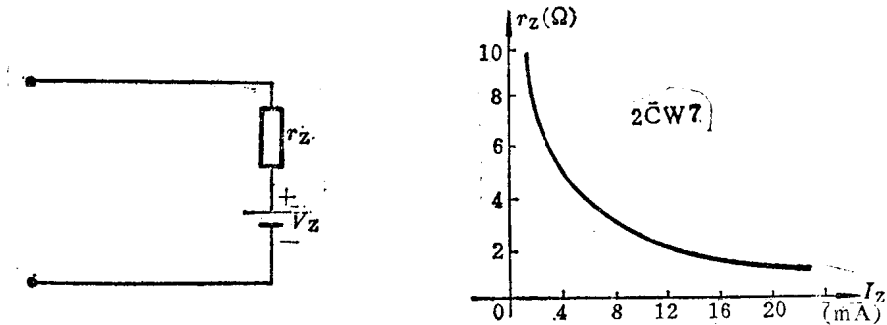


图 1.1.8 稳压管的模型

图 1.1.9 稳压管动态电阻

由以上分析可知: 通常以反向击穿特性为工作区的稳压管, 其反向击穿特性越陡, 内阻 r_z 越小, 稳压性能越好; 稳压管用以稳压时必须加限流保护; 在图 1.1.7(a) 中用 E 代替 E_2 并改变 E , D_z 工作在正向导通状态, 二极管的正向特性也有稳压作用, 例如正向电流 I_D (若用 D_z 正向特性稳压即为其正向 I_D) 取 26mA 时, 由式(1.1.6)可知, 这时的动态电阻 $r_d = \frac{V_T}{I_D} = 1\Omega$, 可见具有较好稳压性能。只是稳定电压较低, 在(0.7~0.8)V左右。

五、温度特性

以 PN 结为基本物理结构的各种半导体器件的特性及参数都要随温度的变化而漂移。

1. PN 结正向电压的温度系数是负的, 不论是硅管或锗管, 此温度系数基本上是个常数。参见图 1.1.10, 当温度由 T_1 升高到 T_2 时, 二极管的正向特性大体上向左平移。在保持二极管正向电流不变的条件下, 温度每变 $1^\circ C$ 而引起的 V_D 的变化称为正向电压的温度系数, 由图可得