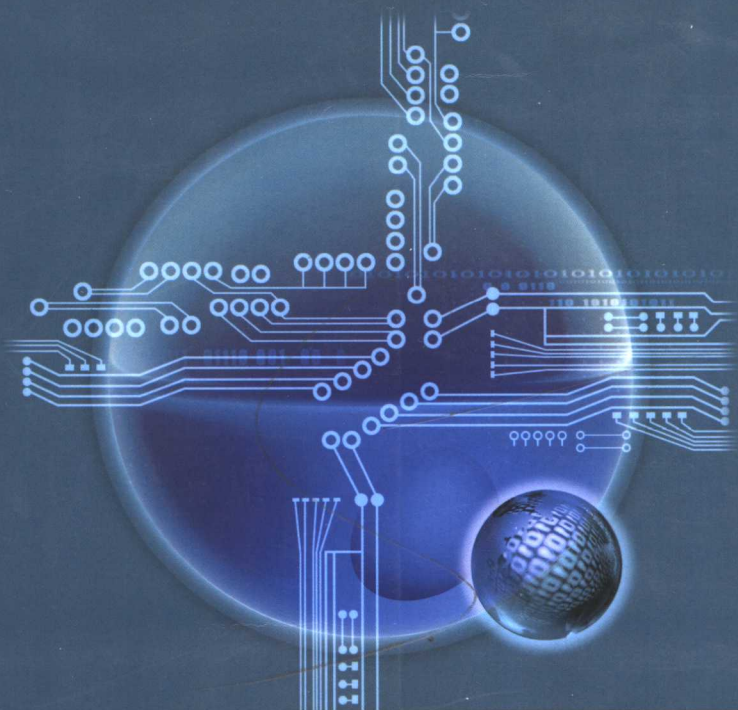




21 世 纪 高 等 院 校 电 气 信 息 类 系 列 教 材

模拟电子线路 学习指导与习题详解

杨 凌 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书对模拟电子线路课程的主要内容,包括基本概念、常用器件、典型电路、各种分析方法等进行了全面总结和学习指导。全书共 10 章。前 9 章每章都包含教学要求、基本概念和内容要点、典型习题详解三大部分,共提供了 252 道习题及其详细解答;第 10 章给出了 10 套综合测试题及参考答案,具有较强的针对性、启发性、指导性和补充性,可以帮助读者检查自己对基本内容的理解和掌握程度。

本书可作为高等院校电子信息、通信类专业本科生学习模拟电子线路课程的辅导教材,也可供报考有关专业研究生的读者在复习时参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路学习指导与习题详解/杨凌编著. —北京:机械工业出版社, 2006.5

(21 世纪高等院校电气信息类系列教材)

ISBN 7-111-19449-7

I. 模... II. 杨... III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 070240 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策 划: 胡毓坚

责任编辑: 赵丽欣

责任印制: 洪汉军

中国农业出版社印刷厂印刷

2006 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18 印张·443 千字

0001—5000 册

定价: 25.00 元

凡购本图书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话:(010)68326294

编辑热线电话:(010)88379739

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步,整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展,社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中,电气信息类(Electrical and Information Science and Technology)包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时,也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下,只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去,才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要,机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的,期间,与高等院校相关课程的主进教师进行了广泛的交流和探讨,旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业材料。

本套教材涵盖多层面专业课程,定位准确,注重理论与实践、教学与教辅的结合,在语言描述上力求准确、清晰,适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

“模拟电子线路”课程是电子类、电气类、自动化类等专业的基础课程,其内容庞杂、概念性强、分析方法多、难点集中,教与学都有困难。因此,为本课程编写一本适用的学习辅导教材是很有必要的。

作者根据多年来积累的教学经验,结合课程内容的重点、难点,考虑到学习者的实际需求编写了此书。在本书的编写中,主要作了如下考虑:

(1) 力求较全面地概括和总结“模拟电子线路”课程的基本内容,形成独立的内容体系结构,能配合不同的教材,适用于不同院校的学生使用。

(2) 针对目前教材中习题增多、例题减少,学生能听懂课、读懂书,但不会做题的现象,书中精选了大量典型习题,给出了详细解答,以帮助学生突破课程的重点及难点。

(3) 在典型习题的解析过程中,注重剖析题目的设计思想、归纳解题要领、介绍解题技巧,并注重难点释疑,启发思维,以使读者深刻领会重要概念的实质,开拓思路。

(4) 综合测试题选编和改编了近年来国内外有关书刊及优秀试题,选题类型多、范围广,知识覆盖面宽,在紧扣重点、难点的前提下难、易并举,适合于读者作自测练习使用。

(5) 本书除可作为在校大学生学习“模拟电子线路”课程的辅导书之外,也可供报考硕士研究生的考生复习时参考。

本书的编写得到了兰州大学信息科学与工程学院吕振肃教授的关心和支持,在此致以深深的谢意!

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评和指正。

作 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 教学要求	1
1.1.1 半导体物理基础知识	1
1.1.2 晶体二极管	1
1.1.3 晶体三极管(BJT)	1
1.1.4 场效应管(FET)	1
1.2 基本概念和内容要点	2
1.2.1 半导体物理基础知识	2
1.2.2 晶体二极管	4
1.2.3 晶体三极管	6
1.2.4 场效应管	9
1.3 典型习题详解	12
第 2 章 放大电路基础	38
2.1 教学要求	38
2.2 基本概念和内容要点	38
2.2.1 放大电路的基本概念	38
2.2.2 三极管放大电路	41
2.2.3 场效应管放大电路	43
2.2.4 多级放大电路	44
2.3 典型习题详解	44
第 3 章 放大电路的频率响应	74
3.1 教学要求	74
3.2 基本概念和内容要点	74
3.2.1 表征放大电路频响的主要参数和渐近波特图的表示方法	74
3.2.2 放大电路频率响应的分析方法	75
3.2.3 三种基本组态放大电路的频率响应	78
3.2.4 多级放大电路的频率响应	80
3.2.5 单级放大电路的瞬态响应	81
3.3 典型习题详解	82
第 4 章 低频功率放大电路	90
4.1 教学要求	90
4.2 基本概念和内容要点	90
4.2.1 功率放大电路的特点和主要研究对象	90

4.2.2 低频功率放大电路的分类	90
4.2.3 乙类双电源(OCL)互补对称功率放大电路	91
4.2.4 甲乙类双电源(OCL)互补对称功率放大电路	93
4.2.5 单电源(OTL)互补对称功率放大电路	94
4.2.6 集成功率放大电路	94
4.3 典型习题详解	94
第5章 集成运算放大器	106
5.1 教学要求	106
5.2 基本概念和内容要点	106
5.2.1 集成运算放大器的组成及特点	106
5.2.2 电流源电路	107
5.2.3 差分放大电路	108
5.2.4 集成运算放大器	111
5.3 典型习题详解	113
第6章 放大电路中的负反馈	137
6.1 教学要求	137
6.2 基本概念和内容要点	137
6.2.1 反馈的基本概念	137
6.2.2 负反馈放大电路的四种组态	139
6.2.3 负反馈对放大电路性能的影响	140
6.2.4 深度负反馈放大电路的近似估算	141
6.2.5 负反馈放大电路的稳定性	141
6.3 典型习题详解	144
第7章 信号的运算与处理电路	168
7.1 教学要求	168
7.2 基本概念和内容要点	168
7.2.1 理想运放的条件及特点	168
7.2.2 基本运算电路	169
7.2.3 有源滤波电路	171
7.2.4 仪用放大器	173
7.2.5 精密整流电路	174
7.2.6 电压比较器	174
7.3 典型习题详解	175
第8章 信号产生电路	204
8.1 教学要求	204
8.2 基本概念和内容要点	204
8.2.1 正弦波振荡器的工作原理	204
8.2.2 RC 正弦波振荡电路	205
8.2.3 LC 正弦波振荡电路	206

8.2.4 高频率稳定度的典型振荡电路	206
8.2.5 非正弦波信号产生电路	207
8.3 典型习题详解	207
第9章 直流稳压电源	226
9.1 教学要求	226
9.2 基本概念和内容要点	226
9.2.1 小功率直流稳压电源的组成	226
9.2.2 单相桥式整流、电容滤波电路	226
9.2.3 稳压电路	227
9.3 典型习题详解	228
第10章 综合测试题及参考答案	239
10.1 综合测试题一	239
参考答案	242
10.2 综合测试题二	243
参考答案	245
10.3 综合测试题三	245
参考答案	249
10.4 综合测试题四	250
参考答案	252
10.5 综合测试题五	253
参考答案	255
10.6 综合测试题六	257
参考答案	260
10.7 综合测试题七	262
参考答案	265
10.8 综合测试题八	266
参考答案	268
10.9 综合测试题九	269
参考答案	272
10.10 综合测试题十	273
参考答案	276
参考文献	279

第1章 常用半导体器件

1.1 教学要求

1.1.1 半导体物理基础知识

- 1) 熟悉本征半导体、杂质半导体、施主杂质、受主杂质、多子、少子、漂移、扩散的概念;
- 2) 熟悉 PN 结的形成机理和基本特性——单向导电性、击穿特性、电容效应。

1.1.2 晶体二极管

- 1) 了解二极管的结构、分类、符号、主要参数;
- 2) 熟悉二极管的几种模型表示——数学模型、曲线模型、简化电路模型,掌握各种模型的特点及应用场合;
- 3) 熟悉二极管电路的三种分析方法——图解法、简化分析法、小信号分析法,并能熟练运用简化分析法分析各种功能电路;
- 4) 了解几种特殊二极管的性能。

1.1.3 晶体三极管(BJT)

- 1) 了解三极管的结构、分类、符号,熟悉其主要参数及温度对参数的影响;
- 2) 掌握三极管在放大状态下的电流分配关系;
- 3) 熟悉三极管处在放大、饱和、截止三种工作状态下的条件及特点;
- 4) 熟悉三极管的几种模型表示——数学模型、共射曲线模型、直流简化电路模型、小信号电路模型,掌握各种模型的特点及应用场合;
- 5) 熟悉三极管放大电路的三种分析方法——图解法、估算法、小信号等效电路分析法,并能熟练运用估算法判断三极管的工作状态。

1.1.4 场效应管(FET)

- 1) 了解场效应管的工作原理,理解场效应管中预夹断的概念;
- 2) 熟悉场效应管的几种模型表示——数学模型、曲线模型、直流简化电路模型、小信号电路模型,掌握各种模型的特点及应用场合;
- 3) 熟悉放大状态下几种场效应管的外部工作条件;
- 4) 熟悉场效应管与三极管之间的异同点。

1.2 基本概念和内容要点

1.2.1 半导体物理基础知识

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,其导电能力随温度、光照或所掺杂质的不同而发生显著变化,特别是掺杂可以改变半导体的导电能力和导电类型,因而半导体广泛应用于各种器件及集成电路的制造。

1. 本征半导体

高度提纯、几乎不含任何杂质的半导体称为本征半导体。

硅(Si)和锗(Ge)是常用的半导体材料,均属四价元素,原子序号分别为 14 和 32,它们的原子最外层均有四个价电子,与相邻四个原子的价电子组成共价键。图 1-1a、b 分别是硅、锗原子的简化模型和它们的晶体结构平面示意图。

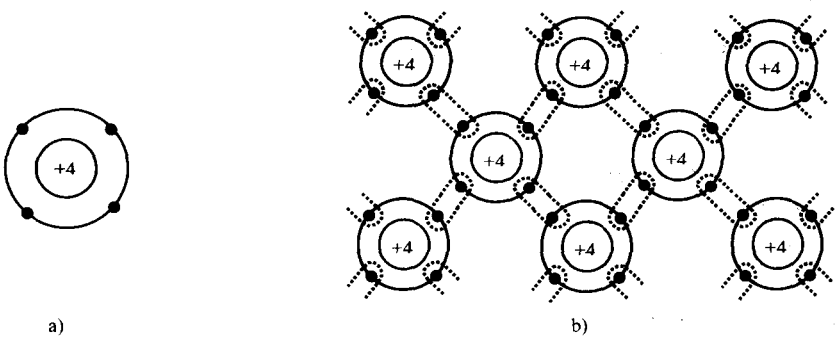


图 1-1 硅、锗原子

a) 硅、锗原子的简化模型 b) 硅、锗原子的晶体结构平面示意图

(1) 本征激发

共价键中的价电子受激发获得能量并摆脱共价键的束缚而成为“自由电子”(简称电子),并在原共价键的位置上留下一个“空位”(称空穴),这一过程称为本征激发。

热、光、电磁辐射等均可导致本征激发,但热激发是半导体材料中产生本征激发的主要因素。

本征激发产生成对的电子和空穴。

(2) 复合

电子被共价键俘获,造成电子-空穴对消失,这一现象称为复合。

(3) 载流子

电子和空穴均是能够自由移动的带电粒子,称为载流子。可见,半导体中存在两种类型的载流子。

(4) 热平衡载流子浓度

当温度一定时,半导体中本征激发和复合在某一热平衡载流子浓度值上达到动态平衡。该浓度值为

$$n_i = p_i = AT^{3/2}e^{-E_g/2kT} \quad (1-1)$$

式中:

$$A = \begin{cases} 3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2} & (\text{Si}) \\ 1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2} & (\text{Ge}) \end{cases} \quad E_g(T=0 \text{ K 时的禁带宽度}) = \begin{cases} 1.21 \text{ eV} & (\text{Si}) \\ 0.785 \text{ eV} & (\text{Ge}) \end{cases}$$

k (玻尔兹曼常数) $= 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

n_i, p_i 与 T 成指数关系, 随温度升高而迅速增大。室温下 ($T = 300 \text{ K}$ 即 27°C), 有

$$n_i \approx \begin{cases} 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} & (\text{Si}) \\ 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} & (\text{Ge}) \end{cases}$$

n_i 的数值虽然很大, 但它仅占原子密度 (硅的原子密度为 $4.96 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) 很小的百分数, 故本征半导体的导电能力很弱 (本征硅的电阻率约为 $2.2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$)。

2. 杂质半导体

在本征半导体中, 掺入一定量的杂质元素, 就成为杂质半导体。

(1) N 型半导体 (电子型半导体)

在本征半导体 (硅或锗) 中掺入五价施主杂质 (如磷、砷) 而成。其中多子是电子, 少子是空穴, 还有不能自由移动 (不参与导电) 的正离子。

(2) P 型半导体 (空穴型半导体)

在本征半导体 (硅或锗) 中掺入三价受主杂质 (如硼、镓) 而成。其中多子是空穴, 少子是电子, 还有不能自由移动 (不参与导电) 的负离子。

杂质半导体中, 多子的浓度取决于掺杂的多少, 其值几乎与温度无关; 且少量的掺杂便可导致载流子几个数量级的增加, 故杂质半导体的导电能力显著增大。而少子由本征激发产生, 其浓度主要取决于温度, 少子浓度具有温度敏感性。

(3) 转型

在 N 型半导体中掺入比原有的五价杂质元素更多的三价杂质元素, 可转型为 P 型; 在 P 型半导体中掺入足够的五价杂质元素, 可转型为 N 型。

(4) 半导体的两种导电机理——漂移和扩散

载流子在外电场作用下的定向运动称为漂移运动, 所形成的电流称为漂移电流。漂移电流的密度为

$$J_t = J_{pt} + J_{nt} = q(p\mu_p + n\mu_n)E \propto E$$

式中, p, n 分别为空穴和电子的浓度; q 是电子电荷量; μ_p, μ_n 分别为空穴和电子的迁移率 (迁移率影响半导体器件的工作频率); E 为外加电场强度。

因浓度差而引起的载流子的定向运动称为扩散运动, 所形成的电流称为扩散电流。电子和空穴的扩散电流密度分别为

$$J_{nd} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{负值}) \quad J_{pd} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (\text{正值})$$

式中, D_n, D_p 分别为电子和空穴的扩散系数; $dn(x)/dx, dp(x)/dx$ 分别为电子和空穴的浓度梯度。

3. PN 结

(1) PN 结的形成

将一种杂质半导体(N型或P型)通过局部转型,使之分成N型和P型两个部分,在界面处出现了载流子的浓度差,导致多子互相扩散,从而形成了PN结。其过程如下:

载流子浓度差→多子扩散→电中性被破

坏→空间电荷区(内电场)→阻碍多子扩散
利于少子漂移

当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时→形成一定厚度的PN结。如图1-2所示。

(2) PN结的单向导电性

正偏时,外电场削弱内电场,PN结变薄,势垒降低,利于多子扩散,不利于少子漂移,由多子扩散形成大的正向电流。PN结呈现低阻,处于正向导通状态。

反偏时,外电场增强内电场,PN结变厚,势垒提高,不利于多子扩散,但利于少子漂移,由少子漂移形成很小的反向电流。PN结呈现高阻,处于反向截止状态。

(3) PN结的击穿特性

当加在PN结上的反偏压超过一定数值时,反向电流急剧增大,这种现象称为击穿。按击穿机理的不同,击穿可分为齐纳击穿和雪崩击穿两种。齐纳击穿发生于重掺杂的PN结中,击穿电压较低(<4V)且具有负的温度系数;雪崩击穿发生于轻掺杂的PN结中,击穿电压较高(4~6V)且具有正的温度系数。

当PN结击穿后,若降低反偏压,PN结仍可恢复,这种击穿称为电击穿。电击穿是可以利用的,稳压二极管便是根据这一原理制成的。当PN结击穿后,若继续增大反偏压,会使PN结因过热而损坏,这种击穿称为热击穿。热击穿是要避免的。

(4) PN结的伏安特性

PN结的伏安特性曲线如图1-3所示。

$$I = I_S(e^{V/V_T} - 1) \quad (1-2)$$

式中, I_S 为PN结的反向饱和电流; V_T 为温度的电压当量(热电压)。

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (1-3)$$

室温下, $V_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

(5) PN结的电容效应

PN结电容 C_j 由势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 组成($C_j = C_T + C_D$)。正偏时扩散电容为主;反偏时势垒电容为主。利用势垒电容效应可制成变容二极管。

1.2.2 晶体二极管

晶体二极管是由一个PN结,再加上电极、引线封装而成的,简称二极管。

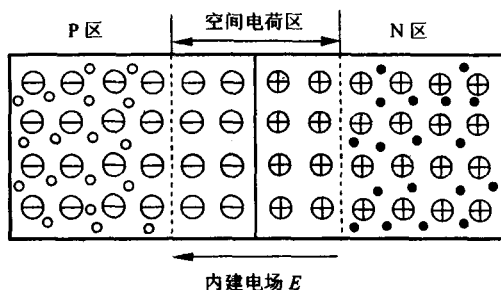


图1-2 PN结的形成

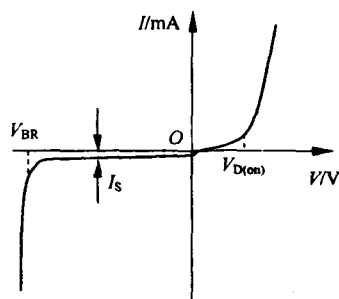


图1-3 PN结的伏安特性曲线

1. 二极管的结构、类型、符号

表 1-1 示出了二极管的分类及用途。

表 1-1 二极管的分类及用途

分类方法		主要类型
制作工艺		合金型二极管;扩散型二极管;合金扩散型二极管;平面型二极管;外延型二极管
结构形态		点接触二极管;面接触二极管;台面二极管;肖特基势垒二极管;PIN 二极管;体效应二极管;双基极二极管;双向二极管
应用范围	普通应用	检波二极管;整流二极管;稳压二极管;开关二极管;恒流二极管
	光电应用	光电二极管;太阳能电池;发光二极管;激光二极管
	微波应用	变容二极管;阶跃恢复二极管;崩越二极管;隧道二极管;肖特基势垒二极管;体效应二极管
	敏感应用	温敏二极管;磁敏二极管;力敏二极管;气敏二极管;湿敏二极管;光敏二极管

其中,点接触型和面接触型二极管是常用的两种。前者结面积小,结电容小,适用于高频、小电流的场合,如检波电路;后者的形式较多,有结面积大的,因此结电容也大,适用于低频、大电流的场合,如整流电路。

二极管的符号如图 1-4 所示。



图 1-4 二极管的符号

2. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性与 PN 结的伏安特性基本相同。

3. 二极管的主要电参数

(1) 直流参数

最大整流电流 I_F ;正向压降 V_{DF} ;反向电流 I_R ;反向击穿电压 V_{BR} ;直流电阻 R_D 。

(2) 交流参数

交流电阻 r_d ;结电容 C_j ;最高工作频率 f_M 。

每一型号的二极管,在技术手册中总是以极值给出上述参数。

(3) 温度对二极管参数的影响

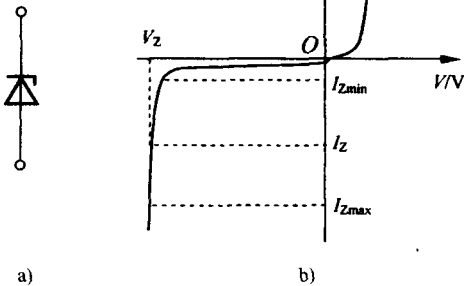
温度每升高 10°C , I_R 增大一倍;温度每升高 1°C , V_{DF} 减小 $(2\sim 2.5)\text{mV}$ 。

4. 几种特殊的二极管

(1) 硅稳压二极管

① 符号、伏安特性。

硅稳压二极管简称稳压管,其符号及伏安特性曲线如图 1-5 所示。



② 主要参数。

稳定电压 V_Z ;稳定电流 I_Z ;动态电阻 r_Z ;最大稳定电流 I_{ZM} ;耗散功率 P_{ZM} 及 V_Z 的温度系数 α_V 。

图 1-5 稳压管的符号及伏安特性曲线

(2) 变容二极管

变容二极管是应用十分广泛的一种半导体器件。例如,谐振回路的电调谐;压控振荡器;频率调制;参量电路等。其符号如图 1-6 所示。

(3) 发光二极管(LED)

发光二极管是将电能转换为光能的一种半导体器件,广泛用来构成七段数字显示器。其符号如图 1-7 所示。



图 1-6 变容二极管的符号



图 1-7 发光二极管的符号

(4) 光敏二极管

光敏二极管是将光能转换为电能的一种半导体器件。其符号如图 1-8 所示。

(5) 光耦合器

光耦合器是由发光器件和光敏器件组成的一种器件。它是用光传输信号的电隔离器件，应用十分广泛。其构成如图 1-9 所示。



图 1-8 光敏二极管的符号

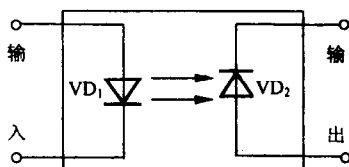


图 1-9 光耦合器

1.2.3 晶体三极管

晶体三极管也称为双极型晶体管,简称晶体管或三极管。

1. 结构、符号、分类

(1) 结构、符号

三极管有三个区——发射区、基区、集电区;三根电极——发射极 E、基极 B、集电极 C;两个结——发射结 J_e 、集电结 J_c 。其结构示意图及相应的符号如图 1-10 所示。

结构特点:发射区重掺杂;基区很薄;集电区轻掺杂且集电结面积大。这正是三极管具有放大作用的内部物质基础。

(2) 分类

按结构不同可分为 NPN 型和 PNP 型;按材料不同可分为硅管和锗管;按照工作频率可为高频管、低频管等;按照功率可分为大、中、小功率管等。其封装形式有金属封装、玻璃封装和塑料封装等。

2. 放大作用和电流分配关系

(1) 直流偏置条件

J_e 正偏、 J_c 反偏是三极管实现放大所需要的外部条件。

(2) 直流电流分配关系

$$\begin{cases} I_E = I_C + I_B \\ I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \\ I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \end{cases} \quad (1-4)$$

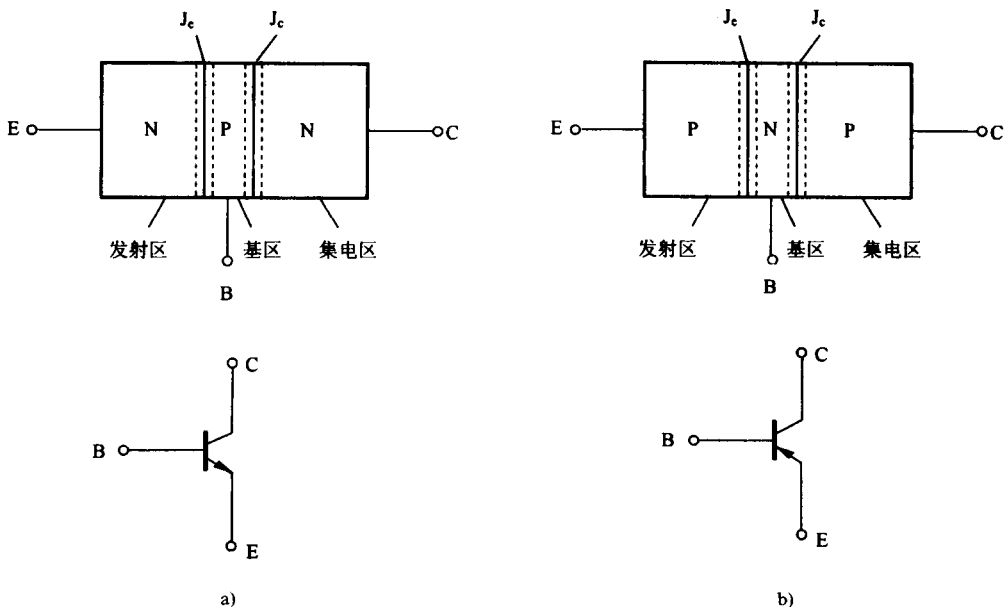
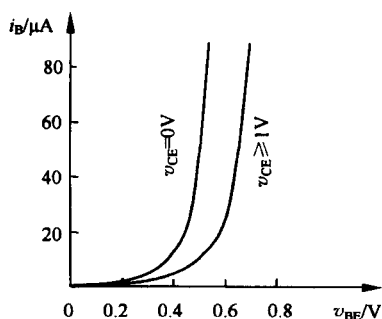


图 1-10 三极管的结构及符号
a) NPN 型三极管 b) PNP 型三极管

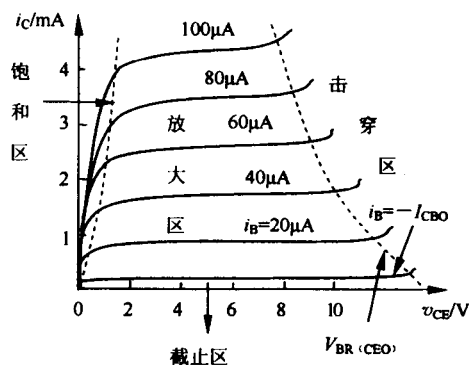
3. 伏安特性曲线

(1) 共射输入特性曲线 $i_B = f(v_{BE})|_{v_{CE} \text{一定}}$

如图 1-11a 所示。 v_{CE} 从零增大到约 1 V, 曲线逐渐右移(基区宽度调制效应); 当 $v_{CE} > 1 \text{ V}$ 后, 曲线几乎不再移动。因此, 在工程分析时, 近似认为输入特性曲线是一条不随 v_{CE} 而移动的曲线。



a)



b)

图 1-11 三极管的伏安特性曲线
a) 共射输入特性曲线 b) 共射输出特性曲线

(2) 共射输出特性曲线 $i_C = f(v_{CE})|_{i_B \text{一定}}$

如图 1-11b 所示。整个曲线族可划分为四个区域。

① 放大区: J_e 正偏、 J_c 反偏。 i_C 主要受 i_B 的控制, 由于基区宽度调制效应的影响, 当 i_B 一

定,而 v_{CE} 增大时, i_C 略有增加。曲线上翘的程度与厄尔利电压 V_A 的大小有关。

② 截止区: J_e, J_c 均反偏。 $i_B = -I_{CBO}$ 的那条曲线与横轴间的区域。 $i_B \approx 0, i_C \approx 0$ 。

③ 饱和区: J_e, J_c 均正偏。对应于不同 i_B 的输出特性曲线几乎重合, i_C 不受 i_B 控制, 只随 v_{CE} 增大而增大。

④ 击穿区: 随着 v_{CE} 增大, J_c 的反偏压增大。当 v_{CE} 增大到一定值时, J_c 反向击穿, 造成 i_C 剧增。集电极反向击穿电压 $V_{BR(CEO)}$ 随 i_B 的增大而减小。

4. 主要参数

(1) 直流参数

共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$; 共射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$; 极间反向电流 I_{CBO}, I_{CEO} 。

(2) 交流参数

共基极交流电流放大系数 α ; 共射极交流电流放大系数 β ; 共基极截止频率 f_α ; 共射极截止频率 f_β ; 特征频率 f_T 。

(3) 极限参数

集电极最大允许电流 I_{CM} ; 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} ; 击穿电压 $V_{BR(CEO)}, V_{BR(CBO)}, V_{BR(EB0)}$ 。通常将 $I_{CM}, P_{CM}, V_{BR(CEO)}$ 三个参数所限定的区域称为三极管的安全工作区。

(4) 温度对三极管参数的影响

严格来讲, 温度对三极管的所有参数几乎都有影响, 但受影响最大的是 β, I_{CBO}, V_{BE} 。

温度每升高 1°C , β 值增大 $0.5\% \sim 1\%$;

温度每升高 1°C , V_{BE} 减小 $(2 \sim 2.5)\text{mV}$;

温度每升高 10°C , I_{CBO} 约增大一倍, 即 $I_{CBO}(T_2) = I_{CBO}(T_1) \times 2^{(T_2 - T_1)/10}$

5. 电路模型

(1) 放大状态下三极管的模型

① 数学模型。

$$i_C \approx I_S(e^{v_{BE}/V_T} - 1) \quad (1-5)$$

其中 $I_S = \bar{\alpha} I_{EBS}$, I_S 是指发射极反向饱和电流 I_{EBS} 转化到集电极上的电流值。

② 三极管的直流简化电路模型如图 1-12 所示。

图中, $V_{BE(on)}$ 称为发射结导通电压。

$$V_{BE(on)} = \begin{cases} 0.7 \text{ V (硅管)} \\ 0.2 \sim 0.3 \text{ V (锗管)} \end{cases}$$

③ 三极管的交流小信号电路模型如图 1-13 所示。

$$r_{b'e} = (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} \quad (1-6)$$

$$\beta = g_m r_{b'e} \quad (1-7)$$

$$g_m \approx \frac{I_{CQ}}{V_T} \quad (1-8)$$

$$r_{ce} = \frac{|V_A|}{I_{CQ}} \quad (1-9)$$

$r_{bb'}$ 为基区体电阻, 其值较小, 约几十欧姆, 常忽略不计。

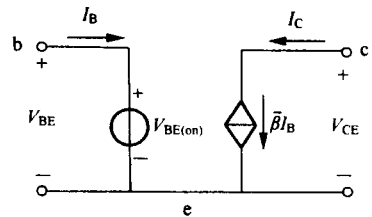


图 1-12 三极管的直流简化电路模型

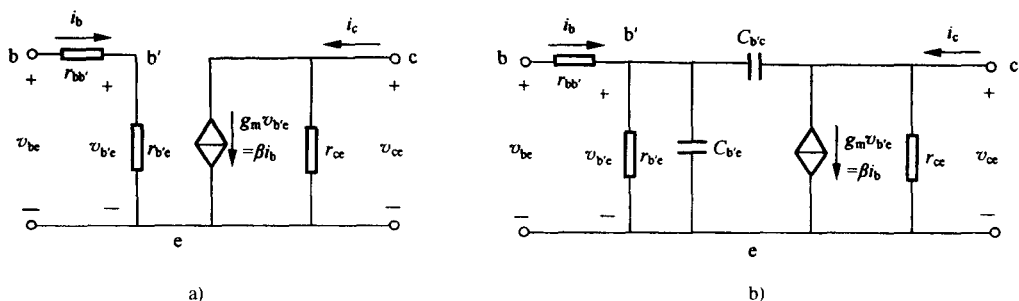


图 1-13 三极管的交流小信号电路模型

a) 低频电路模型; b) 高频电路模型

(2) 饱和与截止状态下三极管的模型

饱和与截止状态下三极管的模型如图 1-14 所示。

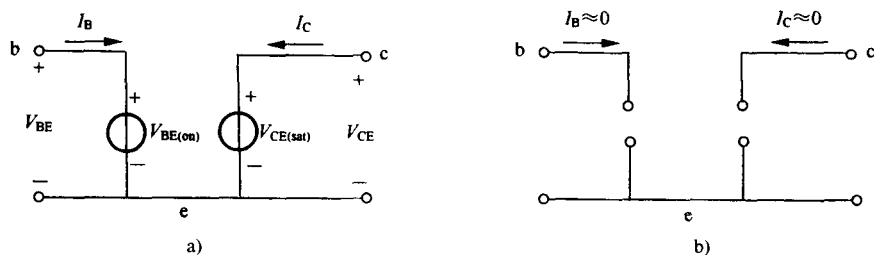


图 1-14 饱和与截止状态下三极管的模型

a) 饱和状态 b) 截止状态

图中, $V_{CE(sat)}$ 称为三极管的饱和压降。对于硅管和锗管, $V_{CE(sat)}$ 分别约为 0.3 V 和 0.1 V。

1.2.4 场效应管

场效应管又称为单极型晶体管,它是一种利用电场效应来控制电流的半导体器件,具有输入阻抗高、温度稳定性好、噪声低、抗辐射能力强、集成度高、成本低等特点,因此已成为当今集成电路的主流器件。

1. 分类、符号、特性曲线

场效应管的分类及符号如图 1-15 所示。

各种场效应管的特性曲线如图 1-16 所示。

2. 放大状态下场效应管的电路模型

(1) 数学模型

对结型场效应管和耗尽型 MOS 场效应管,有

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2 \quad (1-10)$$

对增强型 MOS 场效应管,有

$$i_D = \frac{\mu_n C_{OX} W}{2l} (v_{GS} - V_{GS(th)})^2 \quad (1-11)$$

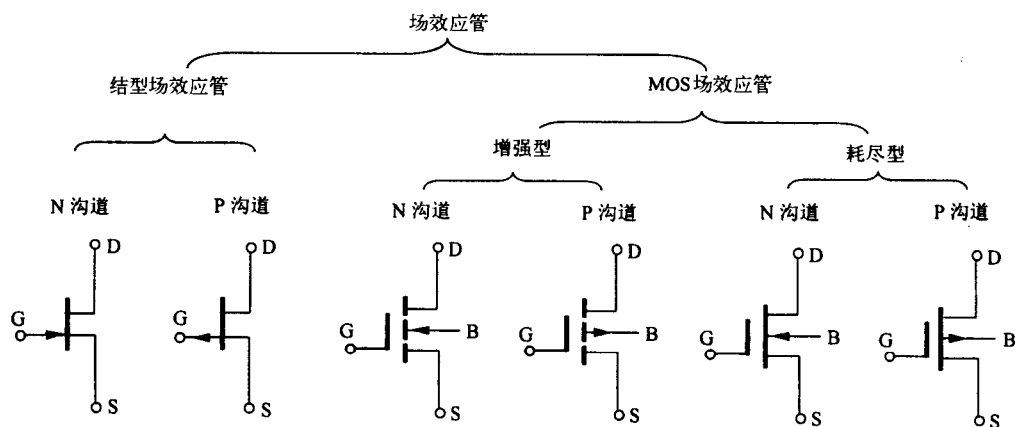


图 1-15 场效应管的分类及符号

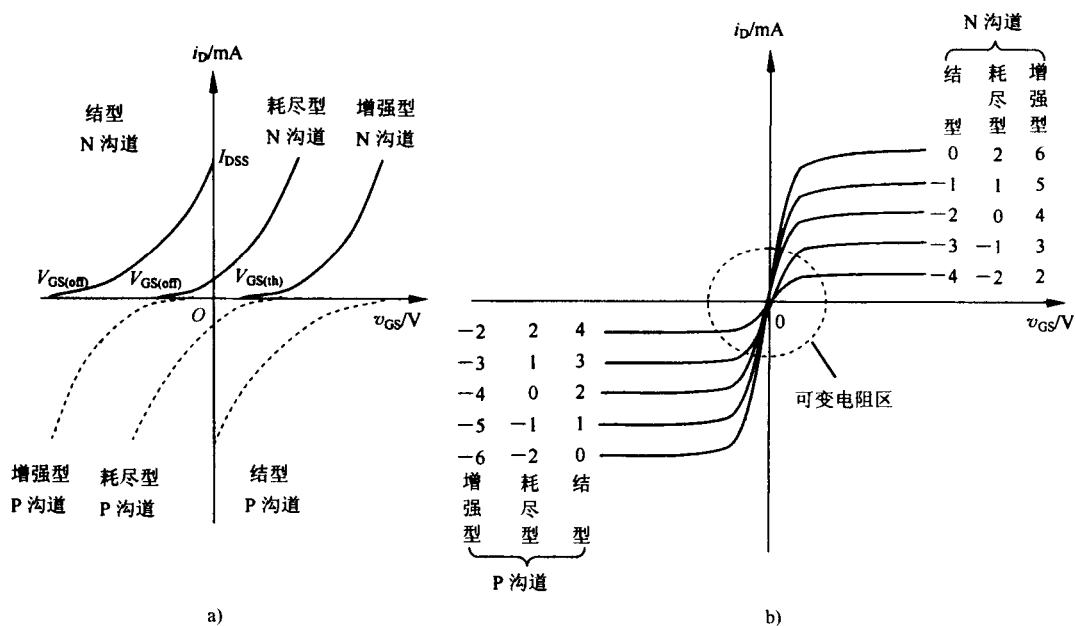


图 1-16 各种场效应管的特性曲线

a) 转移特性 b) 输出特性

式中， μ_n 为自由电子迁移率， C_{OX} 为单位面积的栅极电容， W/l 称为沟道宽长比，它是场效应管的一项重要参数。

实际上，耗尽型 MOS 管也可用式(1-11)表示，只需将 $V_{GS(th)}$ 改为 $V_{GS(off)}$ 即可。

(2) 直流简化电路模型

场效应管的直流简化电路模型如图 1-17 所示。

图中， I_D 与 V_{GS} 之间满足平方律关系。

注意该图与图 1-12(三极管的直流简化电路模型)之间的区别。

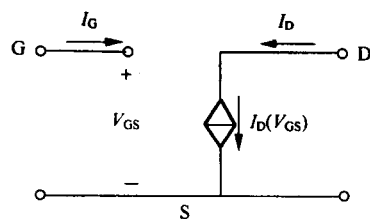


图 1-17 场效应管的直流简化电路模型