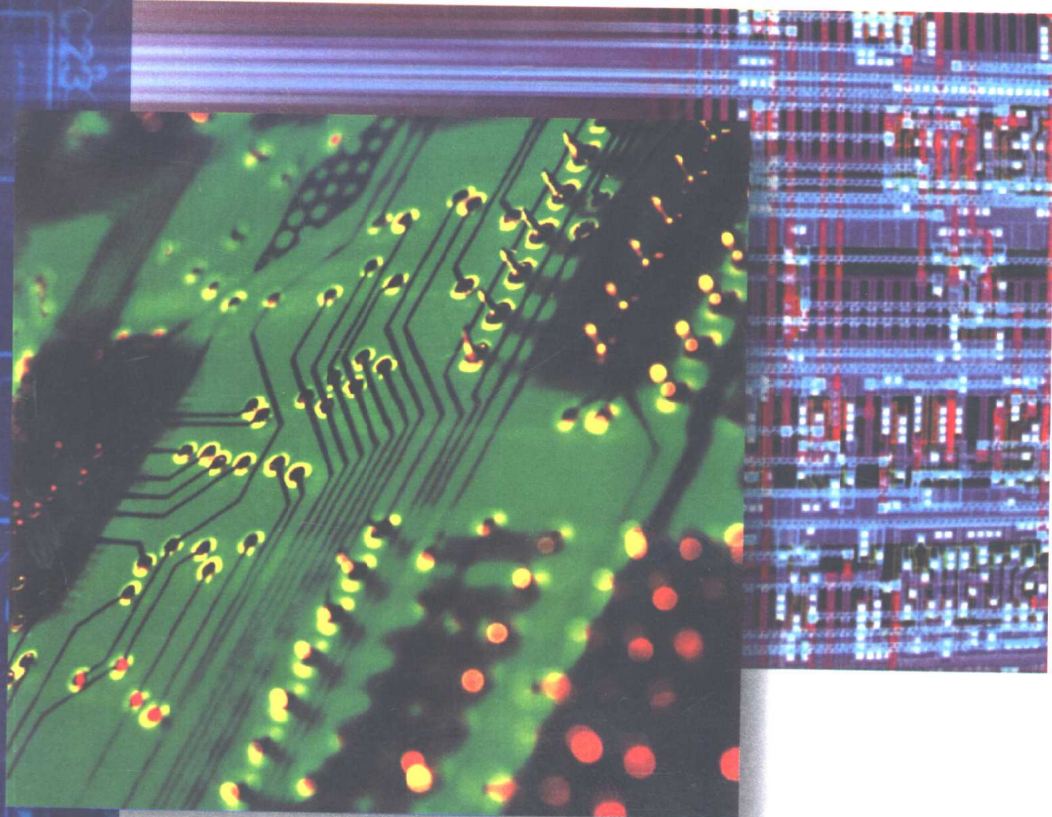


刘福太 主编 刘福太 张立民 修建华 梁发麦 编著

电子线路 学习指导与习题详解



国防工业出版社

电子线路 学习指导与习题详解

刘福太 主编
刘福太 张立民 编著
修建华 梁发麦

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电子线路学习指导与习题详解/刘福太主编. —北京:
国防工业出版社, 2002.6
ISBN 7-118-02771-5

I. 电... II. 刘... III. 电子电路-高等学校-学习参考
资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 005897 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 19½ 452 千字

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

当今世界已进入信息时代,以计算机技术、现代控制技术、电子和通信技术为代表的新技术正在迅速渗透到各个领域,而作为这些新技术基石的《电子线路》和《模拟电子技术》的教育越来越受到关注和重视,本书将作者多年教学积累和搜集的资料进行整理汇编,以满足这些领域学者的需要。

本书根据“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系”中的电子、通信和控制类本科教学中的《电子线路》和《模拟电子技术》课程要求,全面系统地揭示该课程的学习要点、解题技巧、工程应用方法,包含了大量的例题和习题及详解。习题大部分精选自目前高校正在使用的教材和相关资料。全书共分两篇 12 章。上篇为低频电子线路部分,包括基本器件原理、放大电路基础、负反馈放大电路及放大器的频率特性、集成运算放大器及其应用、线性功率放大电路和直流稳压电源。下篇为高频电子线路部分,包括小信号调谐放大器、谐振功率放大电路、正弦波振荡器、振幅调制、解调与混频电路、角度调制与解调电路及反馈控制电路。各部分内容中均包含基本概念、内容要点、解题指导与技巧、工程近似方法和习题详解等方面的内容。全书提供了 500 多道习题及其详细解答。本书可供院校电子、控制和机电类专业学生学习、使用,也可供相应专业教师和工程技术人员阅读参考。

本书习题及习题详解中的图表编号,采用与习题编号一致并加前缀的方法,题图用“图 Px-x”、题解图用“图 Ax-x”表示,以便与习题对应。

参加本书资料搜集和编写的主要有刘福太教授、张立民副教授、修建华副教授和梁发麦讲师。第 1、2 章由梁发麦讲师编写,第 3、4 章由修建华副教授编写,第 5、6 章由张立民副教授编写,下篇(第 7 章至第 12 章)由刘福太教授编写。刘福太教授任主编,对全书的内容进行了审查和修订。参加编写的同志长期从事电子线路和电子技术基础的教学和科研,理论基础扎实,实践经验丰富,编写中力求做到简明、通俗、实用,使读者从中受益。

本书的出版得到了张景生主任、顾钻处长的大力支持和帮助,在此深表谢意。另外参加本书试题解算和文字录入的还有郭天杰、孟祥伟、刘华章、洪天慧、李玉光、蔡新举、陈敏、林洪文、刘贤忠、张力、徐进、张静、王秋菊、王子铃、杨粹斌、董华、周丽萍、黄宁、陈亮、潘静、张建中、孙霞、葛强、王晶、洪是惠、彭庆、李晓英、王菊、刘章、张和力、张健英和海军航空工程学院电子技术基础教研室的部分同志,在此表示感谢。

欢迎广大读者阅读本书。由于我们的水平有限,书中可能会存在一些缺点和错误,恳请读者批评指正。

作 者
2002 年 2 月



目 录

上篇 低频电子线路

第1章 半导体器件	1
1.1 基本概念和内容要点	1
1.1.1 概 述	1
1.1.2 半导体二极管	2
1.1.3 晶体三极管	3
1.1.4 场效应管	6
1.2 习题与解答	8
第2章 放大电路基础和应用	34
2.1 基本概念和内容要点.....	34
2.1.1 放大电路的基本组成.....	34
2.1.2 图解分析法.....	34
2.1.3 基本组态电路的性能.....	35
2.1.4 差动式放大器.....	37
2.1.5 放大电路的频率响应.....	38
2.2 习题与解答.....	39
第3章 放大电路中的反馈	81
3.1 基本概念和内容要点.....	81
3.1.1 反馈的基本概念及分类.....	81
3.1.2 负反馈对放大电路工作性能的影响.....	82
3.1.3 反馈的判断.....	82
3.1.4 负反馈放大电路的分析方法.....	82
3.1.5 反馈放大电路的自激振荡.....	83
3.2 习题与解答.....	83
第4章 集成运算放大器的应用	103
4.1 基本概念和内容要点	103
4.1.1 虚短和虚断的重要概念	103
4.1.2 运算电路中集成运放的输入方式及比较	103
4.1.3 基本运算的组成	104
4.1.4 运算电路的分析方法	104
4.1.5 基本运算电路的应用	105
4.2 习题与解答	105

第5章 线性功率放大器	133
5.1 基本概念和内容要点	133
5.1.1 功率放大器的电路组成和工作特性	133
5.1.2 甲类变压器耦合功率放大器	134
5.1.3 乙类推挽功率放大电路	134
5.1.4 功率合成技术	135
5.2 习题与解答	137
第6章 直流稳压电源	155
6.1 基本概念和内容要点	155
6.1.1 直流稳压的基本组成	155
6.1.2 小功率整流滤波电路	155
6.1.3 稳压电路	158
6.2 习题与解答	159

下篇 高频电子线路

第7章 小信号调谐放大器	167
7.1 基本概念和内容要点	167
7.1.1 小信号调谐放大器的主要指标	167
7.1.2 单调谐小信号调谐放大器	168
7.1.3 单调谐小信号调谐放大器的级联	169
7.1.4 双调谐小信号调谐放大器	169
7.1.5 其他问题	170
7.2 习题与解答	170
第8章 谐振功率放大器电路	176
8.1 基本概念和内容要点	176
8.1.1 丙类谐振功率放大器的原理及特点	176
8.1.2 谐振功率放大器的馈电及滤波匹配网络	177
8.2 习题与解答	178
第9章 正弦波振荡电路	197
9.1 基本概念和内容要点	197
9.1.1 振荡器稳定工作的条件	197
9.1.2 LC 正弦波振荡器	197
9.1.3 晶体振荡器	197
9.1.4 RC 振荡器	198
9.1.5 负阻振荡器	198
9.1.6 振荡电路的选择	199
9.1.7 选择晶体管和静态工作点	199
9.2 习题与解答	200
第10章 振幅调制、解调与混频电路	223

10.1 基本概念和内容要点·····	223
10.1.1 振幅调幅波与调幅电路模型·····	223
10.1.2 振幅解调电路·····	226
10.1.3 模拟乘法器电路·····	228
10.1.4 混频电路·····	229
10.2 习题与解答·····	232
第 11 章 角度调制与解调电路 ·····	270
11.1 基本概念和内容要点·····	270
11.1.1 角度调制波的基本特性·····	270
11.1.2 调频电路·····	271
11.1.3 扩展线性频偏的方法·····	273
11.1.4 调频波解调电路·····	273
11.2 习题与解答·····	274
第 12 章 反馈控制电路 ·····	296
12.1 基本概念和内容要点·····	296
12.1.1 自动电平控制电路·····	296
12.1.2 自动频率控制电路·····	296
12.1.3 自动相位控制电路(锁相环路)·····	296
12.2 习题与解答·····	298

上篇 低频电子线路

第 1 章 半导体器件

1.1 基本概念和内容要点

1.1.1 概 述

导体是容易传导电流的物质，绝缘体是不容易传导电流的物质，半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物质。由于半导体的导电能力随温度、光照或所掺杂质的不同而显著变化，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管子及集成电路的制造。

1) 原子结构和共价键

半导体材料用得最多的是锗(Ge)和硅(Si)，Ge 的电子量为 32，电子排列顺序为 2、8、18、4，最外层电子是 4 个。Si 的电子量为 14，电子排列顺序为 2、8、4，最外层电子也是 4 个，它们都是四价元素。外层电子受原子核的束缚力最小，称为价电子。物质的化学性质以及其导电性能都是由价电子决定的。

共价键结构表示两个原子共有价电子而形成的束缚作用。强结合力使各原子在晶体中按一定形式排列成点阵，原来分属于每个原子的价电子受到相邻原子的影响而成为两个原子所共有，这样每个价电子个别的轨道就变成两个相邻原子之间的两个价电子公共的轨道，形成了晶体的共价键结构。共价键内的电子称为束缚电子，因获得动能而打破共价键束缚的电子称为自由电子。

2) 杂质半导体

完全纯净且结构完整的半导体晶体称为本征半导体，在本征半导体中，掺入杂质后，其导电能力将大幅提高。利用半导体这个特点，可根据需要制成各种性能的半导体。根据掺入杂质不同，半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。P 型半导体是在纯净半导体中掺入三价杂质（如硼），受主杂质在室温下电离成为带正电的空穴和带负电的受主离子。N 型半导体是在纯净半导体中掺入五价的杂质（如磷等），施主杂质在室温下电离成为带负电的电子和带正电的施主离子。同时 P 型、N 型半导体中仍存有少数受本征激发而产生的电子和空穴。

3) 半导体中载流子的漂移和扩散

(1) 载流浓度的计算。

用 p 表示空穴浓度(即每立方厘米晶体中价带空穴数), 用 n 表示电子浓度, 对于本征半导体, $n=p=n_i=p_i$, n_i 、 p_i 为半导体的本征载流浓度, 其值为

$$n_i(T) = p_i(T) = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_G}{2kT}}$$

其中 Ge 的 $E_G=0.68$ eV, Si 的 $E_G=1.1$ eV, 波尔兹曼常数 $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K, 常温下($T=300$ K) 时 Si 的 $n_i=p_i=1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, Ge 的 $n_i=p_i=2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, n 、 p 与 T 成指数关系, 所以温度升高, 半导体导电能力剧增, 这是半导体一个重要特性。

(2) 载流子的漂移运动。

半导体中导带的电子和价带空穴参加导电, 当有电场作用在半导体上时, 导带电子和价带空穴将在电场作用下运动。载流子在电场作用下有规则的运动称为漂移运动, 所形成的电流称为漂移电流。

导带电子、价带空穴 $\xrightarrow{\text{电场}}$ 规则运动 $\rightarrow$ 漂移运动 $\rightarrow$ 漂移电流

电子和空穴在漂移运动中有各自的平均漂移速度, 分别用 v_n 、 v_p 表示, 与外加电场 E 成正比, 即

$$v \propto E \Rightarrow \begin{cases} v_n = \mu_n E \\ v_p = \mu_p E \end{cases}$$

式中, μ_n 、 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率, 是指单位电场作用下, 载流子的漂移速度。

电导率 σ 表示电流的流通能力(电阻率 $\rho=1/\sigma$)。

总电导率 $\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q(n_i \mu_n + p_i \mu_p)$ 。本征半导体中 $n_i=p_i$, 所以 $\sigma_p = q n_p (\mu_n + \mu_p)$ 。N 型半导体: $\mu_n \gg \mu_p$, $\sigma = q N_D \mu_n$; P 型半导体: $\mu_n \ll \mu_p$, $\sigma = q N_A \mu_p$ 。 N_A 和 N_D 分别为相应掺杂杂质的浓度。

(3) 载流子的扩散运动。

扩散运动是载流子的无规则的热运动, 方向为高浓度向低浓度扩散。

扩散电流(空穴电流)密度 $J_{pd} = -q D_p \frac{dp}{dx}$, 其中 $\frac{dp}{dx}$ 为空穴浓度梯度, D_p 为空穴扩散系数, q 为正, $\frac{dp}{dx}$ 为负, J_{pd} 为正, 扩散电子电流密度为 $J_{nd} = q D_n \frac{dn}{dx}$ 。

学习要点: 半导体的导电特性, 本征激发, P 型、N 型半导体的特点, 扩散运动和漂移运动。

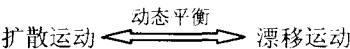
1.1.2 半导体二极管

1) PN 结的形成

半导体掺入杂质后, P 型、N 型半导体中出现了空穴和电子, 半导体的导电能力有了明显的提高。如果通过杂质补偿的办法, 在一块晶体上一边形成 P 型半导体, 一边形成 N 型半导体, N 型区多电子少空穴, P 型区多空穴少电子, P 区、N 区交界处出现浓度差, 这样电子和空穴都要从浓度高处向低处扩散, 故 P 区、N 区的交界处形成了 PN 结。

浓度差别 $\longleftrightarrow$ 多子扩散 $\xrightarrow{\text{空穴从 P} \rightarrow \text{N}}$ 电中性破坏 $\xrightarrow{\text{不能移动}} \xrightarrow{\text{正负离子}} \text{空间电荷区} \longleftrightarrow \text{空间电场}$

另一方面，电场的方向：N 区少子空穴向 P 区漂移，补充原来界面处 N 区所失去的电子；P 区少子电子向 N 区漂移，补充原来界面处 P 区所失去的空穴，使空间电荷区变小，与扩散相反，最后达到一种动态平衡。



2) PN 结的伏安特性

根据 PN 结的特点，在正偏时，阻挡层厚度变小，扩散电流为主(较大)；反偏时，阻挡层厚度变大，漂移电流为主(很小)，表现为单向导电性。

正向时，二极管处于导通状态，反向时近似处于不导通状态，其伏安特性可表示为： $I = I_S(e^{U/U_T} - 1)$ 。由该式可以近似得出，正偏时， $I \approx I_S e^{U/U_T}$ ，为指数关系；反偏时 $I \approx -I_S$ 。式中 I_S 为反向饱和电流； $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量， $T = 300K$ 时， $U_T = 26\text{ mV}$ 。伏安特性曲线如图 1-1 所示。

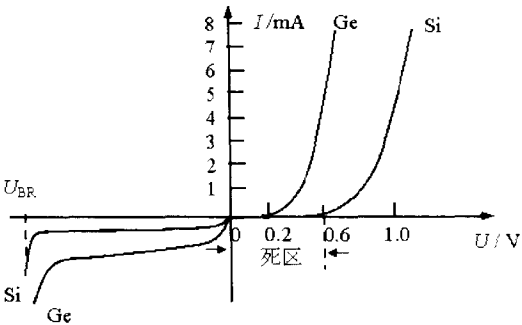


图 1-1 PN 结伏安特性

反偏时电压过大会出现反向击穿，对应的电压称为反向击穿电压。根据击穿电压的不同，可分为雪崩击穿和齐纳击穿。

注意电击穿与热击穿的区别：电击穿是可以利用的，热击穿是要力求避免的。电击穿是可以恢复的，稳压二极管是根据这一原理被广泛应用的。热击穿是反向电流电压乘积超过 PN 结容许的耗散功率，使 PN 结的温度升高，造成 PN 结的烧毁。

3) 半导体二极管

根据制造工艺的不同，半导体二极管分为点接触型和面接触型两种。二极管伏安特性与 PN 结的理想伏安特性基本相同。

二极管参数有直流参数和微变参数两类。直流参数包括最大整流电流、反向击穿电压、反向电流、直流电阻。微变参数包括微变电阻、二极管的极间电容(势垒电容 C_B 、扩散电容 C_D)。

学习要点：PN 结的形成，PN 结的单向导电性和伏安特性表达式，二极管的应用。

1.1.3 晶体三极管

1) 概述

晶体三极管是由两个靠得很近的，背对背排列的 PN 结组成。PN 结是构成许多半导体器件最重要、最基本的单元，利用一个 PN 结做成的二极管具有单向导电性，当把两个 PN 结结合在一起时，两个 PN 结之间的互相影响，就会表现出不同于单个 PN 结而是具有电流放

大功能,从而使PN结的应用发生质的飞跃。晶体三极管又称双结晶体管(BJT)。

晶体三极管由结构可分为NPN型和PNP型,结构示意图和符号如图1-2所示。

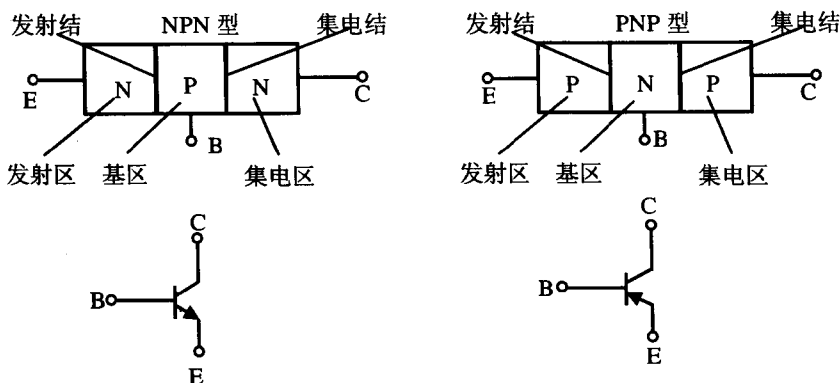


图 1-2 三极管结构与符号

符号中发射极的箭头方向表示发射结正向偏置时实际电流方向,一般来说,晶体管中发射区的掺杂浓度总是远大于其他两个区,故用 N^+PN 、 P^+NP 表示。

晶体三极管与二极管本质上的区别是三极管具有正向受控作用。

2) 放大模式下晶体三极管的工作原理

三极管放大作用的基本条件:

- (1) 发射结外加正向电压,以 N^+PN 说明,保证发射区要向基区注入电子。
- (2) 集电结外加反向电压,保证注入到基区的电子经过基区后能传输到集电区。

在众多的载流子中间,仅有发射区的多子(自由电子),通过发射结注入基区、在基区扩散和复合、集电区收集三个环节,将发射结电流转化为集电结电流,成为产生正向受控作用的载流子流,其它的载流子流只能分别产生两个结的电流,不能将一个结的电流转化为另一个结的电流,对正向受控作用是无用的,是晶体三极管的寄生电流。

根据发射结电压对三极管电流的控制作用,三极管的连接方式有:共基极、共发射极、共集电极三种方式。

(1) 共基极直流电流传输方程

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{cn1}}{I_E} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}$$

$I_C = \bar{\alpha}I_E + I_{CBO}$ 是描绘共基电路电流传输的基本方程。 $I_C \gg I_{CBO}$, $\bar{\alpha} \approx \frac{I_C}{I_E}$, 通常 $\bar{\alpha}$ 的值在0.95~0.99之间。

(2) 共射极直流电流传输方程

$$I_C = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} I_B + \frac{1}{1 - \bar{\alpha}} I_{CBO} \quad [I_C = \frac{I_C - I_{CBO}}{\bar{\alpha}} - I_B]$$

令 $\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$, 称为共射极直流电流放大系数。

$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

上式称为共射极直流传输方程,其中 $I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$, I_{CEO} 表示基极开路($I_B = 0$)时,

集电极到发射极的直通电流，称为三极管共射极连接时的穿透电流。

(3) 共集电极直流电流传输方程

$$I_C = (1 + \bar{\beta})(I_B + I_{CBO})$$

通常 $\bar{\beta} \gg 1$ ，因此共集电极情况与共发射极近似相同。

3) 三极管的一般模型

(1) 简化电路模型。三极管一般模型如图 1-3 所示。

(2) 晶体三极管的特性曲线。

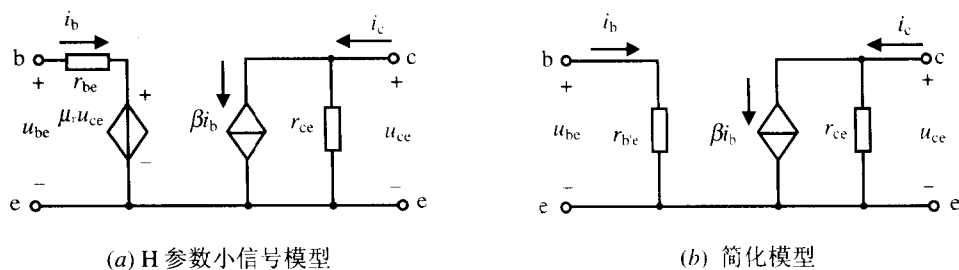


图 1-3 BJT 小信号模的简化

三极管和二极一样，也是非线性元件，不能用一个固定数值或简单的方程式来描述，同型号的三极管，特性曲线也不完全相同，所以用伏安特性曲线来描述电极间电压与电流之间的关系。

根据三极管的三种连接方式，分别有相应的输入和输出特性曲线。图 1-4 为 NPN 型三极管的共射极输入输出特性曲线。

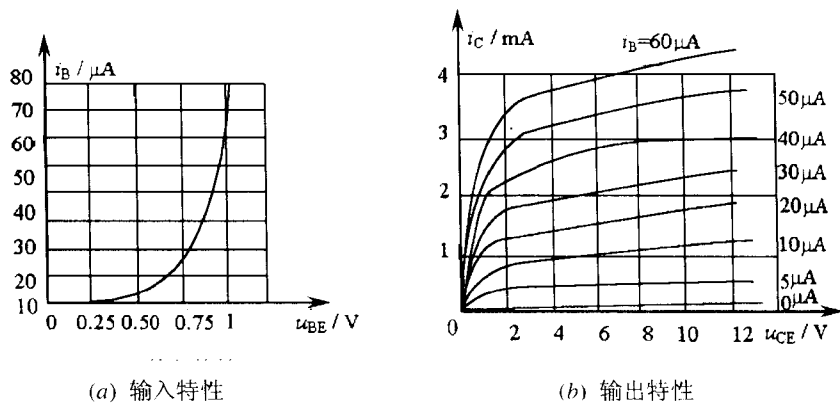


图 1-4 NPN 型 BJT 的共射级接法特性曲线

可将输出特性曲线划分为放大区、截止区、饱和区和击穿区。

4) 三极管的主要参数

三极管的电流参数包括电流放大系数 α 与 β 、极间反向电流 I_{CBO} 、 I_{CEO} ，极限参数有集电极最大允许电流 I_{CM} 、集电极最大允许功率损耗 P_{CM} 和相应的反向击穿电压 $U_{(BR)EBO}$ 、 $U_{(BR)CBO}$ 、

$U_{(BR)CBR}$ 、 $U_{(BR)CER}$ 、 $U_{(BR)CES}$ 、 $U_{(BR)CES}$ ，以及后面内容还要涉及到的一些频率参数。

学习要点：三极管具有放大作用的内部、外部条件，放大原理，极间电流关系，伏安特性曲线上三个区的特点，小信号等效电路。

1.1.4 场效应管

1) 场效应管分类及主要特点

晶体场效应管(FET)分为：结型场效应管(JFET)、绝缘栅型效应管(IGFET 或 MOSFET)。场效应管与双极型晶体管的比较，如表 1-1 所列。

场效应管具有输入阻抗高、温度稳定性好(只有多子参与导电)、噪声低、抗辐射能力强、集成度高、成本低的特点。

表 1-1 场效应管与双极型晶体管的比较

管型	控制电极和控制方式	输入回路	输入电阻	导电机构	导电方式	放大系数
场效应管	栅极 G $\Delta u_{GS} \rightarrow \Delta i_D$	MOS: 有氧化膜绝缘	极高 10^{14}	P 沟道: 空穴 N 沟道: 电子	多子的电场漂移	$g_m = \Delta i_D / \Delta u_{GS}$ $g_m = (1 \sim 5) \text{ mA/V}$
		结型: 反偏的 PN 结	很高 10^9			
晶体管	基极 B $\Delta i_B \rightarrow \Delta i_C$	正偏的 PN 结	较低 $< 10^4$	电子和空穴	多子的浓度扩散 少子的电场漂移	$\beta = \Delta i_C / \Delta i_B$ ($\beta = 20 \sim 200$)

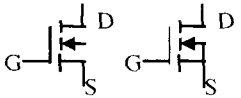
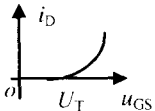
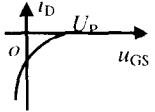
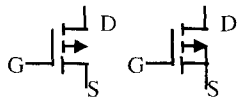
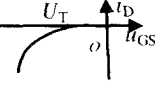
2) 各种场效应管的偏置方法和转移特性

各种场效应管的偏置方法和转移特性如表 1-2 所列。

表 1-2 各种场效应管的偏置方法和转移特性

结构种类	工作方式	图形符号	电压极性				转移特性 $i_D = f(u_{GS})$
			U_{DS}	U_{GS}	U_P	U_T	
N 沟道结型 (JFET)	耗尽型		+	0 或 -	-		
P 沟道结型 (JFET)	耗尽型		-	0 或 +	+		
N 沟道绝缘栅型 (MOSFET)	耗尽型		+	+	-		

(续)

结构种类	工作方式	图形符号	电压极性				转移特性 $i_D = f(u_{GS})$
			U_{DS}	U_{GS}	U_P	U_T	
N 沟道 绝缘栅型 (MOSFET)	增强型		+	+		+	
P 沟道 绝缘栅型 (MOSFET)	耗尽型		-	+	+		
	增强型		-	-		-	

3) 场效应管的工作状态
场效应管的三种工作状态和特点如表 1-3 所列。

表 1-3 场效应管的三种工作状态和特点

	可变电阻区	线性放大区(饱和区)	开关状态
特点	$0 \leq u_{DS} \leq u_{GS} - U_P$ 漏源间相当于有一个受 u_{GS} 控制的可变电阻	$u_{DS} > u_{GS} - U_P$ u_{DS} 增加时, i_D 几乎不变——恒流特性	$u_{GS}=0$ 时, 管子导通, $i_D=I_{DSS}$, 相当于开关闭合 $u_{GS}<U_P$ 时, 管子截止, $i_D=0$ 相当于开关断开

4) 小信号模型
小信号模型如图 1-5 所示。

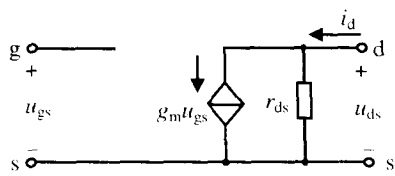


图 1-5 场效应管小信号模型

5) 场效应管的主要参数

直流参数包括夹断电压 U_P 、饱和漏电流 I_{DSS} 、直流输入电阻、漏源击穿电压 $U_{(BR)DS}$ 、栅源击穿电压 $U_{(BR)GS}$ 。微变参数有低频跨导 g_m 、输出电阻 r_{ds} 、极间电容 (C_{GS} , C_{GD} , C_{DS})、低频噪声、最大耗散功率等。

学习要点：各种类型场效应管的结构特点，放大原理，伏安特性曲线上三个区的特点，小信号等效模型。

1.2 习题与解答

1-1 一块本征锗半导体，掺入三价受主杂质硼，浓度为 $1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，试分别求出 $T=300\text{K}(27^\circ\text{C})$ 、 $400\text{K}(127^\circ\text{C})$ 时自由电子和空穴热平衡浓度值，并指出相应半导体类型。

解： $T=300\text{K}$ 时， $p_0 \approx N_a = 1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ， $n_0 = n_i^2/p_0 = 3.84 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ ， $p_0 \gg n_0$ ， P 型。

$$T=400\text{K} \text{ 时, } n_i = 1.76 \times 10^{16} \times 400^{3/2} \times e^{-0.785/(2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times 400)} = 1.62 \times 10^{15} (\text{cm}^{-3})$$

$$\therefore p_0 = N_a + n_0 = 1.5 \times 10^{15} + n_0, \quad n_0 p_0 = n_i^2 = (1.62 \times 10^{15})^2$$

$$\therefore p_0 = 2.5 \times 10^{15} (\text{cm}^{-3}), \quad n_0 = 1.03 \times 10^{15} (\text{cm}^{-3}), \quad p_0 \text{ 和 } n_0 \text{ 同一数量级, 本征半导体。}$$

1-2 一块本征硅半导体，掺入五价元素砷，浓度为 10^{14}cm^{-3} ，试分别求出 $T=300\text{K}$ 、 $T=500\text{K}$ 时自由电子和空穴热平衡浓度值，并指出相应半导体类型。

解： $T=300\text{K}$ 时， $n_0 \approx N_d = 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ， $p_0 = (1.5 \times 10^{10})^2 / 10^{14} = 2.25 \times 10^6 (\text{cm}^{-3}) \ll n_0$ ， N 型。

$$T=500\text{K} \text{ 时, } n_i = 3.88 \times 10^{16} \times 500^{3/2} \times e^{-1.21/(2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times 500)} = 3.49 \times 10^{14} (\text{cm}^{-3}), \text{ 本征半导体。}$$

1-3 在本征硅半导体中，(1) 掺入浓度为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 的受主杂质，试指出 $T=300\text{K}$ 时所形成的杂质半导体类型。(2) 若再掺入浓度为 10^{16}cm^{-3} 的施主杂质，则将成为何种类型半导体？(3) 若将该半导体温度分别上升到 $T=500\text{K}$ 、 $T=600\text{K}$ ，试分析为何种类型半导体。

解：(1) P 型。

$$(2) N_d - N_a = 10^{16} - 5 \times 10^{15} = 5 \times 10^{15} (\text{cm}^{-3}) = N'_d, \text{ N 型。}$$

$$(3) T=500\text{K} \text{ 时, } n_i = 3.83 \times 10^{16} \times 500^{3/2} \times e^{-1.21/(2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times 500)} = 3.49 \times 10^{14} (\text{cm}^{-3}) \ll N'_d, \text{ N 型半导体。}$$

$$T=600\text{K} \text{ 时, } n_i = 3.83 \times 10^{16} \times 600^{3/2} \times e^{-1.21/(2 \times 8.63 \times 10^{-5} \times 600)} = 4.74 \times 10^{15} (\text{cm}^{-3}) \approx N'_d, \text{ 本征半导体。}$$

1-4 若在每 10^5 个硅原子中掺杂一个施主原子，试计算在 $T=300\text{K}$ 时自由电子和空穴热平衡浓度值，掺杂前后半导体的电导率之比。

$$\text{解: } N_d = 4.96 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}, \quad N_a = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{4.96 \times 10^{17}} = 4.54 \times 10^2 (\text{cm}^{-3}), \quad N_d/N_a = 1.09 \times 10^{15}$$

$$\sigma_* = (\mu_n + \mu_p) n_i q = (1.5 + 0.6) \times 10^3 \times 1.5 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} = 5.04 \times 10^{-6} \text{cm}^{-3} (\text{S/cm})$$

$$\sigma_{**} \approx \mu_n n q = 1.5 \times 10^3 \times 496 \times 10^{17} \times 1.6 \times 10^{-19} = 119 (\text{S/cm})$$

$$\sigma_{**}/\sigma_* = 119/5 \times 10^{-6} = 2.38 \times 10^7$$

1-5 有一 N 型硅棒，棒长 l 为 1mm ，其左端边界处不断注入空穴，空穴浓度 $p(0)$ 为 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，右端边界处的空穴浓度 $p(l)$ 为 $4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，空穴的扩散系数 $D_p = 13 \text{cm}^2/\text{s}$ 。设空穴浓度以线性规律由左端向右端扩散，试计算扩散电流密度 J_{pD} 。

解: $\frac{dp(x)}{dx} = \frac{4 \times 10^{15} - 2 \times 10^{16}}{10^{-1}} = -16 \times 10^{16}$

$$J_{ed} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} = -1.6 \times 10^{-19} \times 13 \times 16 \times 10^{16} = 333 (\text{mA/cm}^2)$$

1-6 已知硅 PN 结两侧的杂质浓度分别为 $N_a = 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $N_d = 1.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。试求温度在 27°C 和 100°C 时的内建电位差 U_B , 并进行比较。

解: $T = 27^\circ\text{C}$ 时, $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$

$$U_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} \ln \frac{10^{16} \times 1.5 \times 10^{17}}{(1.5 \times 10^{10})^2} = 0.764 (\text{V})$$

$$T = 100^\circ\text{C} \text{ 时, } n_i = 1.9 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}, U_B = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 373}{1.6 \times 10^{-19}} \ln \frac{10^{16} \times 1.5 \times 10^{17}}{(1.9 \times 10^{12})^2} = 0.64 (\text{V})$$

1-7 已知锗 PN 结的反向饱和电流为 10^{-8}A 。当外加电压 U 为 0.2V 、 0.36V 及 0.4V 时, 试求室温下流过 PN 结的电流 I , 由计算结果说明其伏安特性的特点。

解: $U = 0.2\text{V}$ 时, $I = I_S(e^{U/U_T} - 1) = 10^{-8}(e^{200/26} - 1) = 21.91 (\mu\text{A})$

$U = 0.36\text{V}$ 时, $I = 10.3 (\text{mA})$, $U = 0.4\text{V}$ 时, $I = 48 (\text{mA})$

结果表明: 当外加电压较小时, 电流随电压的变化较小; 当外加电压较大时, 电流随电压的变化较大。

1-8 在室温下锗二极管和硅二极管的反向饱和电流分别为 $1\mu\text{A}$ 和 0.5pA , 若两个二极管均通过 1mA 正向电流, 试求它们的管压降分别为多少。

解: 根据 $U = U_T \ln(1 + \frac{I}{I_S})$

$$\text{锗二极管: } U = 26 \ln(1 + \frac{1 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-6}}) = 180 (\text{mV})$$

$$\text{硅二极管: } U = 26 \ln(1 + \frac{1 \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-12}}) = 557 (\text{mV})$$

1-9 在室温(300K)情况下, 若二极管的反向饱和电流为 1nA , 问它的正向电流为 0.5mA 时应加多大的电压。设二极管的指数模型为 $i_D = I_S(e^{u_D/nU_T} - 1)$, 其中 $n=1$, $U_T=26\text{mV}$ 。

解: $\because I_S = 1\text{nA}$, $i_D = I_S(e^{u_D/nU_T} - 1)$

$$\therefore u_D = nU_T \cdot \ln(1 + \frac{i_D}{I_S}) = 26 \times \ln(1 + \frac{0.5}{10^{-6}}) = 341 (\text{mV})$$

1-10 两个硅二极管在室温时反向饱和电流分别为 $2 \times 10^{-12} \text{A}$ 和 $2 \times 10^{-15} \text{A}$, 若定义二极管电流 $I=0.1\text{mA}$ 时所需施加电压为导通电压, 试求各导通电压 $U_{D(\text{on})}$ 。若 I 增加到 10 倍, 试问 $U_{D(\text{on})}$ 增加多少伏。

$$\text{解: } I_S = 2 \times 10^{-12} \text{A} \text{ 时, } U_{D(\text{on})} = U_T \ln \frac{I}{I_S} = 26 \ln \frac{0.1}{2 \times 10^{-12}} = 461 (\text{mV})$$

$$I_S = 2 \times 10^{-15} \text{A} \text{ 时, } U_{D(\text{on})} = U_T \ln \frac{I}{I_S} = 26 \ln \frac{0.1}{2 \times 10^{-15}} = 640 (\text{mV})$$

$$I \text{ 增加到 10 倍时, } \Delta U_{D(\text{on})} = 26 \ln 10 = 59.87 (\text{mV})$$

1-11 已知 $I_S(27^\circ\text{C}) = 10^{-9} \text{A}$, 试求温度为 -10°C 、 47°C 、 60°C 时的 I_S 值。

解: 因为温度每升高 10°C , I_S 约增加一倍。 $t = -10^{\circ}\text{C}$, $I_S(-10^{\circ}\text{C}) = 10^{-9} \times 2^{\frac{(-10-27)}{10}} = 77(\text{pA})$

$$t = 47^{\circ}\text{C}, I_S(47^{\circ}\text{C}) = 10^{-9} \times 2^{\frac{(47-27)}{10}} = 4(\text{nA})$$

$$t = 60^{\circ}\text{C}, I_S(60^{\circ}\text{C}) = 10^{-9} \times 2^{\frac{(60-27)}{10}} = 9.85(\text{nA})$$

1-12 一晶体二极管, 已知 $T = 300\text{K}$ 时, $I_S = 2 \times 10^{-16}\text{A}$, $r_S = 10\Omega$, $n \approx 1$, 试求: (1) $I_{D1} = 1\text{mA}$ 时的正向电压 U_{D1} ; (2) $I_{D2} = 0.1\text{mA}$ 时的正向电压 U_{D2} ; (3) 相应于 $I_{D1}/I_{D2} = 10$ 倍时的 U_{D1}/U_{D2} 值, 并进行分析。

解: (1) $\because U_D = I r_S + n U_T \ln(1 + I/I_S)$

$$\therefore I_{D1} = 1\text{mA} \text{ 时, } U_{D1} = 770.25 \text{ mV}$$

$$(2) I_{D2} = 0.1\text{mA} \text{ 时, } U_{D2} = 701.39 \text{ mV}$$

$$(3) \frac{U_{D1}}{U_{D2}} = \frac{770.25}{701.39} = 1.098, \text{ 可见二极管电流从 } 0.1\text{mA} \text{ 增加到 } 1\text{mA}, \text{ 变化 } 10 \text{ 倍, 其}$$

正向电压仅变化 9.8%。

1-13 电路如图 P1-13 所示。(1) 利用硅二极管恒压降模型求电路的 I_D 和 $u_o = U_o = ?$ (2) 在室温(300K)的情况下, 利用二极管的小信号模型求 u_o 的变化范围。

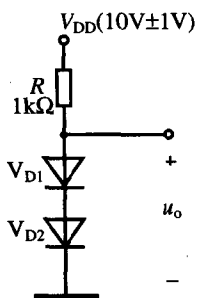


图 P1-13

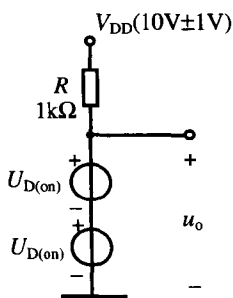


图 A1-13(a)

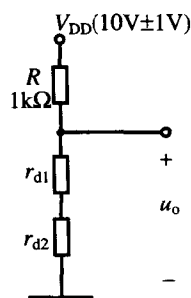


图 A1-13(b)

解: (1) 二极管恒压降模型电路如图 A1-13(a)所示。

$$I_D = \frac{V_{DD} - 2U_{D(on)}}{R} = \frac{10 - 2 \times 0.7}{1} = 8.6(\text{mA})$$

$$u_o = U_o = 2U_{D(on)} = 2 \times 0.7 = 1.4(\text{V})$$

(2) 小信号模型电路如图 A1-13(b)所示。

$$r_d = r_{d1} = r_{d2} = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26\text{mV}}{8.6\text{mA}} = 3.02(\Omega)$$

$$u_o = \frac{\Delta V_{DD}}{R + 2r_d} \times 2r_d = \frac{\pm 1}{10^3 + 2 \times 3.02} \times 2 \times 3.02 = \pm 6 \times 10^{-3}(\text{V}) = \pm 6(\text{mV})$$

1-14 设二极管为理想的, 试判断图 P1-14 电路中, 各二极管是否导通, 并求 U_{AO} 值。