

电子 线路 基础 题解与分析

田科英 宋庆华 主编

湖北科学技术出版社

电子线路基础题解与分析

田科英 宋庆华
冯昌昆 曹国初
石 英 全先科

编著

湖北科学技术出版社

1987年

电子线路基础题解与分析

田科英 宋庆华 主编

湖北科学技术出版社出版发行 新华书店湖北发行所经销

武汉市汉阳县印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 9.625印张 210千字

1987年7月第1版 1988年1月第1次印刷

ISBN 7—5352—0219—5/TN·11

统一书号：7304·36

印数：1—8 100 定价：2.20元

内 容 提 要

本书是根据国家教委颁发的高师物理专业《电子线路基础》大纲的要求并按华中师范大学、湖南师范大学、广西师范大学合编的《电子线路基础》一书中的思考题和习题编写的。内容包括：晶体二极管和三极管、放大器基础、场效应管放大器、负反馈放大器、直流放大器、集成运算放大器、低频功率放大器、直流稳压电源、调谐放大器、正弦波振荡电路、无线电广播与收音机、数字与脉冲电路、黑白电视接收机原理共十三章，约200个思考题和习题。书中对每个思考题和习题均进行了详细的分析和解答，每章前面对有关内容的基本概念和规律，以及解题方法等都进行了简要的叙述和必要的指导。

前 言

1991年7月 青 春 社

根据国家教育委员会颁发的高师物理专业《电子线路基础》教学大纲的要求,为帮助学生和其他读者理解物理基础理论概念,牢固掌握电子线路知识,达到提高分析和解决问题的能力,我们按原华中师范大学、湖南师范大学、广西师范大学合编的《电子线路基础》一书中的思考题和习题编写了这本书。

在编写过程中,我们考虑到不少学生特别是自修的读者,在解题过程中经常遇到这样或那样的困难,所以对每一个思考题和习题都进行了较为详细的分析和解答;同时,每章前面对有关内容的基本概念和规律以及对解题方法给予了简要的叙述和介绍。

本书总共十三章,由田科英、宋庆华两同志负责全书的主编工作,参加编写的同志有冯昌昆(第一、二、四章)、全先科(第三、八章)、石英(第五章)、王振伟(第六章)、曹国初(第七、十一章)、田科英(第九、十三章)、宋庆华(第十、十二章)。

本书可作高师物理系(科)和综合大学物理系以及电大、函大、职大、业大、夜大、部队院校学生学习电子线路课程的参考书,也可供从事电子线路基础课教学的教师、从事电子技术的工程技术人员和无线电爱好者阅读与参考。

在编写过程中,华中师范大学肖福运教授和湖南师范大学王学维副教授给予了很大的帮助,华中师范大学物理系制图教研室的余汉香同志描绘了全部插图,在此一并致以衷心的感谢。

目 录

第 一 章	晶体二极管和三极管	(1)
第 二 章	放大器基础	(17)
第 三 章	场效应管放大器	(50)
第 四 章	负反馈放大器	(57)
第 五 章	直流放大器	(87)
第 六 章	集成运算放大器	(116)
第 七 章	低频功率放大器	(139)
第 八 章	直流稳压电源	(158)
第 九 章	调谐放大器	(170)
第 十 章	正弦波振荡电路	(188)
第十一章	无线电广播与收音机	(206)
第十二章	数字与脉冲电路	(215)
第十三章	黑白电视接收机原理	(273)

第一章 晶体二极管和三极管

半导体和PN结、二极管和三极管的结构特点、工作原理、特性曲线和主要参数，是学习和掌握晶体管电路所必须具备的基础知识，概括起来主要有如下几点：

一、半导体基础知识和PN结的特性

1. 纯净的半导体称为本征半导体。硅和锗是制造半导体器件的主要材料。硅和锗都是四价化学元素。

所有半导体都具有光敏、热敏和掺杂等重要特性。

半导体中由本征激发产生的自由电子和空穴是成对出现的。若以 n 和 p 分别表示单位体积内自由电子和空穴的数量，则有

$$n = p = n_i$$

其中 n_i 称为本征浓度。常温下硅的 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ，锗的 $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 。

半导体中，自由电子和空穴都参与导电，所以半导体中的电流应为电子电流和空穴电流之和，即

$$I = I_N + I_P$$

2. 本征半导体中掺入施主杂质（五价元素）便成为N型半导体，掺入受主杂质（三价元素）便成为P型半导体。

在一定温度下，杂质半导体中 n 、 p 与 n_i 三者间有如下关系

$$n \cdot p = n_i^2$$

3. 在电场力作用下, 半导体中的载流子将产生漂移运动, 总的漂移电流密度为

$$J = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

式中 μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率。根据欧姆定律微分形式, 可求得半导体的电导率为

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

半导体中还由于载流子浓度分布不均匀而产生扩散运动, 由扩散运动形成的电子扩散电流密度和空穴扩散电流密度分别为

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

式中 D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数。

4. PN结是构成各种半导体器件的基础。PN结的基本特性是单向导电性, 即: 给PN结加正向电压(电源正极接P区、负极接N区)时, 正向电阻很小; 加反向电压时, 反向电阻很大。

PN结的击穿机理可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种。

二、晶体二极管

晶体二极管内含有一个PN结, 所以二极管具有PN结的全部特性, 最重要的是单向导电性。

二极管的直流电阻和交流电阻是两个不同的概念, 其大小均与工作电流有关, 表明了二极管是一个非线性元件。

二极管反向击穿时, 具有稳压特性, 利用这一特性, 制成了专门工作于反向击穿状态的稳压管。

二极管的伏安特性可用下式近似表示为

$$I = I_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

式中 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/开。

二极管的主要参数是直流电阻、交流电阻、最大整流电流和反向击穿电压等。

三、晶体三极管

三极管内含有二个紧密相邻的PN结, 载流子的运动规律和电流分配关系都受这两个PN结相互制约, 因此, 工作原理要比二极管复杂很多。

1. 三极管用作放大时, 发射结必须加正向电压, 集电结加反向电压。此时管内载流子的运动情况大体分为发射区注入、基区扩散与复合、集电区收集等三个过程, 形成发射极电流 I_E 、基极电流 I_B 、集电极电流 I_C , 同时还有对晶体管放大作用没有贡献的反向饱和电流 I_{CB0} 和穿透电流 I_{CE0} , 它们的分配关系是

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B + I_{CE0}$$

$$I_B = I_E - I_C$$

$$I_{CE0} = (1 + \beta) I_{CB0}$$

式中 β 称为共发射极电流放大系数, 它与共基极电流放大系数 α 的关系是

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

2. 晶体管具有放大作用, 在电路中有三种连接方式, 即: 共基极连接、共发射极连接和共集电极连接。

3. 晶体管的伏安特性与连接方式有关, 其中用得最多的是共发射极输入特性和输出特性。

在输出特性上可以将晶体管的工作状态划分为放大区、饱和区和截止区。在放大区,发射结被正向偏置、集电结反向偏置,且 $I_C = \beta I_B$ 。在饱和区内两个PN结均被正向偏置,截止区内两个PN结均被反向偏置,且 $I_C = \beta I_B$ 的关系已不成立。

4. 晶体管的主要参数是电流放大系数(α 、 β)、反向饱和电流(I_{CB0} 、 I_{CE0})、截止频率(f_α 、 f_β 、 f_T)和极限参数(I_{Cm} 、 P_{Cm} 、 BV_{CE0})等。

〔题1—1〕什么是本征半导体、P型半导体和N型半导体?

半导体的电阻温度系数是正的还是负的?为什么?

硅的温度稳定性比锗好,为什么?

答:纯净的半导体称为本征半导体。本征半导体是纯度很高、结构完整的半导体。“本征”二字的含义是指这种半导体的特性由其本身的特征所决定,而没有外来杂质的影响。

P型半导体是在本征半导体(例如锗)中掺入少量三价元素(杂质)而得到的。譬如掺入硼元素,硼原子取代了晶格中某些锗原子的位置,并与邻近的四个锗原子组成共价键,由于硼原子只有三个价电子,便有一个共价键缺少一个价电子,出现一个空位。这时,其它共价键中的价电子只需获得较小的热能,就可以进入这个空位,而在原来共价键上留下一个空穴。实际上在常温下所有由三价元素提供的空位都可被邻近共价键中的价电子所填补,产生与硼原子数量相等的空穴,而接受了一个价电子的硼原子都变成了负离子,被固定在晶格中不能移动。结果,半导体中的空穴大大增加,而自由电子却因空穴增多导致复合机会增多而减少。在这种半

导体中，空穴成为多数载流子，自由电子成为少数载流子。我们称这种主要靠空穴导电的半导体为空穴型半导体或P型半导体。

由同样的过程，在本征半导体中掺入五价元素可得到电子型半导体或N型半导体，这里不再赘述。

半导体的电阻温度系数是负的，原因是随着温度升高，热能增大，本征激发的数量增多，能够参与导电的自由电子一空穴对增多，所以电阻率减小。

硅的温度稳定性较锗好，是因为硅的本征浓度比锗低（低2~3个数量级）的缘故。

〔题1—2〕室温下，分别给硅和锗半导体掺入百万分之一的施主杂质原子，求所得杂质半导体的少数浓度和电导率各为多少？

解：已知常温下硅和锗的本征浓度及迁移率分别为

$$n_i(\text{Si}) = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

$$n_i(\text{Ge}) = 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3$$

$$\mu_n(\text{Si}) = 1300 \text{ cm}^2 / \text{v} \cdot \text{s}$$

$$\mu_p(\text{Si}) = 500 \text{ cm}^2 / \text{v} \cdot \text{s}$$

$$\mu_n(\text{Ge}) = 3800 \text{ cm}^2 / \text{v} \cdot \text{s}$$

$$\mu_p(\text{Ge}) = 1800 \text{ cm}^2 / \text{v} \cdot \text{s}$$

硅的原子密度为 $4.96 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ ，掺入施主杂质浓度为

$$N_d(\text{Si}) = 4.96 \times 10^{22} \times 10^{-6} / \text{cm}^3 = 4.96 \times 10^{16} / \text{cm}^3$$

锗的原子密度为 $4.42 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ ，掺入施主杂质浓度为

$$N_d(\text{Ge}) = 4.42 \times 10^{22} \times 10^{-6} / \text{cm}^3 = 4.42 \times 10^{16} / \text{cm}^3$$

于是可求得N型硅的少数空穴浓度和电导率为

$$p(Si) = \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$= \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{4.96 \times 10^{16}} = 0.45 \times 10^4 / \text{cm}^3$$

$$\sigma(Si) = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

$$\approx q(N_d\mu_n + p\mu_p)$$

$$= 1.6 \times 10^{-19} (4.96 \times 10^{16} \times 1300 + 0.45 \times 10^4 \times 500)$$

$$\approx 10.31 (1/\Omega \cdot \text{cm})$$

N型锗的少数空穴浓度和电导率为

$$p(Ge) = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$= \frac{(2.5 \times 10^{13})^2}{4.42 \times 10^{16}} = 1.41 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

$$\sigma(Ge) \approx q(N_d\mu_n + p\mu_p)$$

$$= 1.6 \times 10^{-19} (4.42 \times 10^{16} \times 3800 + 1.41 \times 10^{10} \times 1800)$$

$$\approx 26.87 (1/\Omega \cdot \text{cm})$$

〔题1—3〕PN结是怎样形成的？怎样给PN结加正向电压？加正向电压时PN结内载流子的运动过程怎样？

答：

答：(1) PN结的形成过程：在两种半导体的分界面两侧，由于载流子浓度差别很大，将产生多数载流子越界面向对方扩散的扩散运动，同时分别在界面两侧留下一薄层不能移动的异号离子；由于界面两侧出现异号离子——空间电荷，激发产生一个自N区一侧指向P区一侧的内电场，在此内电场作用下，阻碍扩散运动的进行，并同时产生少数载流子的漂移运动；当漂移运动的强度达到与扩散运动强度相等时，即

达到动态平衡时，空间电荷的数量达到稳定，便最终在两种半导体的分界面两侧形成了稳定的空间电荷区，这就是PN结。

(2) 给PN结加正向电压，电源正极应与P区连接，负极应与N区连接。

(3) 给PN结加正向电压时，外电场方向与内电场相反，削弱了内电场的作用，破坏了PN结原来的动态平衡，这时，扩散运动超过漂移运动，多数载流子源源不断地向对方扩散，形成了通过PN结的正向电流。只要维持外加正向电压不变，这种扩散运动就将维持不变，正向电流的大小也不变。

〔题1—4〕雪崩击穿和齐纳击穿的过程怎样？击穿是否意味着PN结一定损坏？为什么？

答：雪崩击穿是当PN结的外加反向电压足够大时，少数载流子在外电场加速作用下，具有很高速度和足够的动能，当其在运动过程中与晶格中的原子发生碰撞时将产生碰撞电离，放出自由电子，同时产生一个空穴。而新生的载流子又被加速然后与其它中性原子碰撞，使更多原子电离，……如此循环，象雪崩一样，载流子急剧增加，导致反向电流急剧增大。这就是雪崩击穿。

齐纳击穿常发生在掺杂浓度很高而阻挡层很薄的PN结中。由于PN结很薄，只需不大的反向电压就足以产生很强的外电场，使大量共价键中的价电子挣脱原子的束缚，成为自由电子参与导电，导致反向电流剧增，这就是齐纳击穿。由此可知，齐纳击穿电压较低，约5~6伏以下，而雪崩击穿电压较高，约7伏以上。介于两者之间，雪崩击穿和齐纳击穿都可能发生。

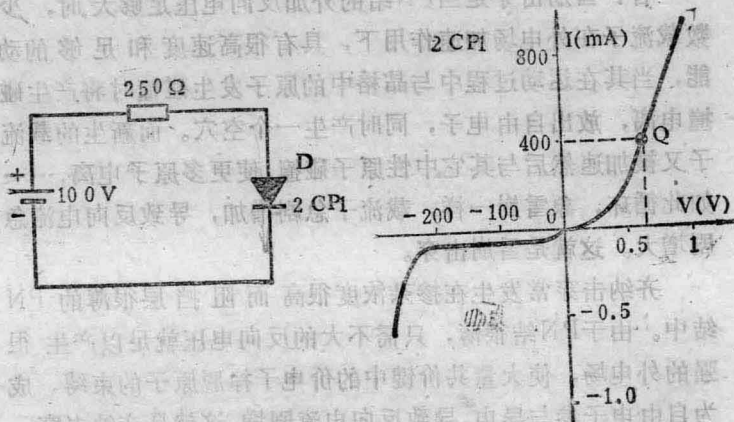
PN结击穿并不表明一定损坏。我们把上述两种击穿称为电击穿。发生电击穿时，即使流过PN结的反向电流变化很大，其两端电压降却几乎恒定不变，若适当限制电流，即限制PN结耗散功率，使温升不超过允许范围，PN结就不会损坏，一旦外加电压撤去，就能恢复单向导电性。也就是说，单纯电击穿是可逆的。

反之，若不对电流加以限制，当耗散功率超过额定值时，PN结温升过高，电击穿变为热电击穿，热电击穿是不可逆的，将导致PN结的永久性击穿。

〔题1—5〕 图1—1电路中， $E=100\text{V}$ ， $R=250\Omega$ ，二极管伏安特性如图所示。

(1) 求流过二极管2CP1的电流；

(2) 求这时二极管的直流电阻和交流电阻。



(a) 图 1-1 (b)

解：(1) 求二极管电流。

设 2CP1 正向压降为 0.7V，可求得

$$I = \frac{100 - 0.7}{250} \approx 400 \text{ mA}$$

(2) 求直流电阻 R_D 和交流电阻 r_d 。

从特性曲线上作图查得当 $I = 400 \text{ mA}$ 时，对应的管压降 $V = 0.65 \text{ V}$ ($V = 0.7 \text{ V}$ 为近似值，作图结果实际 $V = 0.65 \text{ V}$ ，以下计算应以 $V = 0.65 \text{ V}$ 进行)。于是

$$R_D = \frac{V}{I} = \frac{0.65}{0.4} = 1.6 \Omega$$

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0.75 - 0.50}{0.6 - 0.2} \approx 0.6 \Omega$$

〔题 1—6〕 图 1—2 中， D_1 为锗二极管，正向电阻 $r_d = 20 \Omega$ ，阈电压 $V_r = 0.2 \text{ V}$ ； D_2 为硅二极管， $r_d = 15 \Omega$ ，阈电压 $V_r = 0.6 \text{ V}$ 。求下列两种情况下每个二极管中的电流。

(1) $R = 10 \text{ K}\Omega$ 时；

(2) $R = 1 \text{ K}\Omega$ 时。

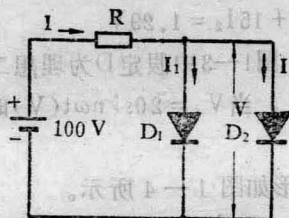


图 1—2

解：此图中两个二极管种类不同，必须注意 D_1 和 D_2 在何条件下方能导通。按题意， $V \leq 0.2 \text{ V}$ ，则 D_1 、 D_2 均不导通； $0.2 \text{ V} < V \leq 0.6 \text{ V}$ ， D_1 导通， D_2 不导通； $V > 0.6 \text{ V}$ ， D_1 、 D_2 同时导通。

(1) $R = 10\text{K}\Omega$ 时

此时电源总电流 $I \approx \frac{E}{R} = \frac{100}{10} = 10(\text{mA})$ 。 D_1 、 D_2 均

为正偏，设此时两管同时导通，则有

$$\begin{cases} 0.2 + 20I_1 = 0.6 + 15I_2 \\ I_1 + I_2 = I \end{cases}$$

$$I_1 + I_2 = I$$

解得 I_2 为负值，表明 D_2 实际上不导通，故这种情况下只有

D_1 导通， $I_1 = I = 10\text{mA}$ ，管压降 $V = 0.2 + I_1 r_{d1} = 0.4\text{V}$ ，

小于 D_2 阈电压，说明 D_2 实际上不导通。

(2) $R = 1\text{K}\Omega$

此时电源总电流 $I \approx \frac{E}{R} = \frac{100}{1} = 100\text{mA}$ 。由前列方

程解得

$$I_1 = 54.3\text{mA}$$

$$I_2 = 45.7\text{mA}$$

管压降

$$V = 0.2 + 20I_1 = 1.29\text{V}$$

或

$$V = 0.6 + 15I_2 = 1.29\text{V}$$

〔题 1—7〕 图 1—3 中假定 D 为理想二极管 ($V_r = 0$ ， $r_d = 0$ ， $r_r = \infty$)，当 $V_i = 20\sin\omega t(\text{V})$ 时，分别绘出 V_o 之波形。

解： V_o 之波形如图 1—4 所示。

〔题 1—8〕 用万用表测量二极管的正向电阻时，发现用 $R \times 10$ 档测出的电阻小，用 $R \times 1\text{K}$ 档测出的电阻大，为什么？

答：这是由于二极管伏安特性的非线性造成的。根据万用表测电阻原理，表内有一内电池（一般用 1.5V ）。设欧姆档的中值电阻为 12欧姆 ($R \times 1$ 档)，当使用到 $R \times 10$

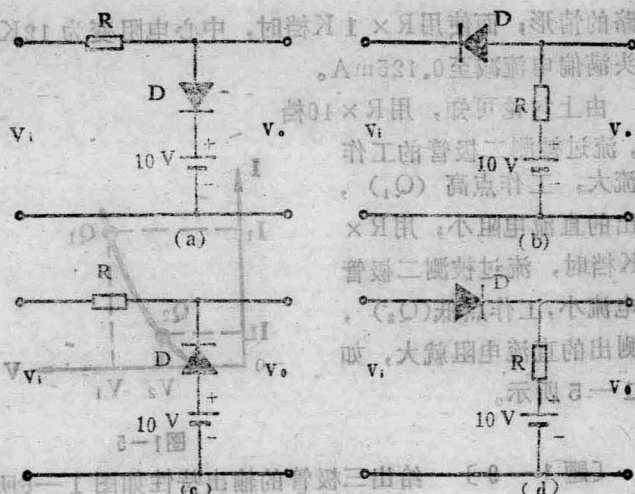


图1-3

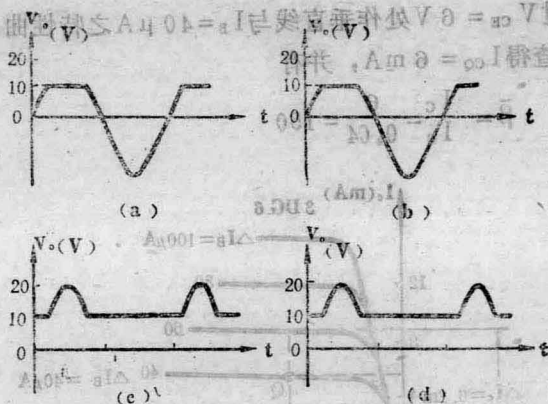


图1-4

档时，中心电阻变为 120Ω ，通过表头的最大电流（满偏）为 $1.5/120 = 12.5 \times 10^{-3} = 12.5\text{mA}$ ，这时相当于两测试笔