

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

模拟电子技术基础 问答·例题·试题

MONI DIANZI JISHU JICHU WEN DA · LITI · SHITI

主编 陈大钦 副主编 傅恩锡

华中理工大学出版社

184053

模拟电子技术基础
问答·例题·试题

主 编 陈大钦
副主编 傅恩锡
编 者 陈大钦 傅恩锡 彭容修
舒介武 周京广

华中理工大学出版社

1710/32
13
(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础问答·例题·试题/陈大钦主编

武汉:华中理工大学出版社,1996年7月

ISBN 7-5609-1317-2

I. 模…

I. ①陈… ②傅… ③彭… ④舒… ⑤周…

Ⅱ. 电子元件-电子技术基础

N. TN6·60

模拟电子技术基础

问答·例题·试题

主编:陈大钦 副主编:傅恩镜

责任编辑:黄以铭

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山,邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

中南三〇九印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:18.75 字数:478 000

1996年7月第1版 1996年7月第1次印刷

印数:1-10 000

ISBN 7-5609-1317-2/TN·40

定价:16.80元

(本书若有印装质量问题,请向承印厂调换)

内 容 提 要

本书是为配合高等学校(本、专科)“模拟电子技术基础”课程有关教材而编写的一本教学和自学参考书。编者根据多年教学实践的体会,并归纳总结了学生在学习中所遇到的各种典型问题,以问答和例题分析的形式来编排内容。在选题上,侧重于课程的重点和难点,并非面面俱到。全书共列出了 300 多个问题和例题,以集成电路为主,自成体系,颇具特色。此外,每章还安排了经过精选的自测题(即试题),书末附有典型的模拟电子技术基础试卷及自测题和试卷答案。

该书形式活泼,内容丰富,适用于普通高校本、专科学生和电大、职大、函大学生自学、复习和备考,也适用于其他从事电子技术的教学人员和自学者参考。

序

本书是为配合高等学校(本、专科)“模拟电子技术基础”课程有关教材的学习,并参考国家教委颁布的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》和《高等工程专科学校电子技术基础课程教学基本要求》而编写的一本教学参考书。编者根据多年来教学实践过程中学生所提出的疑难问题,并考虑到读者的特点,以问答和例题的形式分析和解答各种问题。

编写本书的指导思想是:

1. 在选材编排方面,力求做到由浅入深,循序渐进,引导学生运用基本概念、基本原理和基本分析方法来分析疑难问题,注意培养学生解决实际问题的能力;

2. 题材围绕课程的重点、难点来选取,而非面面俱到;

3. 在保证基本教学内容的前提下,为了适应电子技术迅速发展的新形势和因材施教的需要,该书选材内容与教材和《基本要求》相比有适当拓宽;

4. 为了帮助读者巩固所学知识,检查学习情况,每章后面附有经过精选的自测题(即试题),书末附有典型的模拟电子技术基础试卷,以及自测题和试卷答案;

5. 本书可供普通高校本科、专科学生和电大、职大、函大学生自学、复习和备考,也适用于其他从事电子技术的教学人员和自学者参考。

根据以上思想,全书共分十章,共计 300 多个问题,以集成电路为主,自成体系。读者可根据需要选学有关内容。

参加本书编写工作的有周京广(第 1、4 章及附录 B-Ⅳ)、傅恩锡(第 2 章)、彭容修(第 3、9 章)、舒介武(第 5、10 章及附录 B-Ⅲ)和陈大钦(第 6、7、8 章及附录 B-Ⅰ、Ⅱ),陈大钦为主编,傅恩锡为副主编,彭容修同志审阅并修改了部分书稿。

电子技术的发展日新月异,教学改革任重道远,我们的能力与所提出的要求相比,还有很大差距,且由于水平所限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

1996 年 1 月

目 录

1 半导体器件

1.1 PN 结和半导体二极管	(1)
1.2 双极型三极管	(14)
1.3 场效应管	(27)
自测题	(37)

2 基本放大电路

2.1 共射极基本放大电路的组成及工作原理	(47)
2.2 放大电路的静态分析	(54)
2.3 放大电路的动态分析	(65)
2.4 放大电路的工作点稳定问题	(89)
2.5 共集电极电路和共基极电路	(97)
2.6 场效应管放大电路	(112)
自测题	(128)

3 多级放大及放大器的频率响应

3.1 多级放大器	(144)
3.2 放大器频率响应的基本概念	(169)
3.3 单级放大器的低频响应	(173)
3.4 单级放大器的高频响应	(178)
3.5 单级放大器的瞬态响应	(190)
3.6 多级放大器的频率响应	(195)
3.7 扩展放大器通频带的方法	(198)
自测题	(201)

4 功率放大器

4.1 功率放大器的特殊问题	(209)
4.2 实用的功率放大器	(223)
自测题	(245)

5 模拟集成运算放大器

5.1 组成集成运放的基本单元电路	(255)
5.2 集成运算放大器	(297)
自测题	(306)

6 反馈放大器

6.1 反馈的基本概念与分类	(315)
6.2 负反馈对放大器性能的影响	(325)
6.3 深度负反馈条件下的近似估算	(333)
6.4 负反馈放大器的方框图分析法	(339)
6.5 负反馈放大器的稳定问题	(351)
自测题	(356)

7 信号的运算与处理电路

7.1 基本运算及其应用电路	(367)
7.2 模拟乘法器	(395)
7.3 有源滤波器	(401)
7.4 线性整流器及采样-保持电路	(416)
自测题	(420)

8 信号发生器

8.1 RC 正弦波振荡器	(432)
8.2 LC 正弦波振荡器	(440)

8.3 石英晶体振荡器	(451)
8.4 非正弦波发生器	(453)
8.5 压控振荡器	(464)
自测题	(467)

9 直流电源

9.1 整流与滤波电路	(476)
9.2 稳压管稳压电路	(483)
9.3 线性串联型稳压电路	(487)
9.4 线性集成稳压电路	(499)
9.5 开关型直流稳压电路	(503)
9.6 可控硅整流电路	(510)
自测题	(517)

10 模拟电子电路读图练习

10.1 阅读电子电路图的基本步骤	(523)
10.2 带音调控制的音频放大器	(524)
10.3 脉冲按键式电话机电路	(533)
附录 A 参考文献及进一步阅读资料	(543)
附录 B 模拟电子技术基础试卷	(544)
I. 试卷一(本科)	(544)
II. 试卷二(本科)	(550)
III. 试卷三(高等工程专科)	(556)
IV. 试卷四(高等工程专科)	(561)
附录 C 自测题及模拟电子技术基础试卷答案	(565)

1 半导体器件

1.1 PN 结和半导体二极管

1.1.1 PN 结的伏安特性有何特点?

答 根据理论分析,PN 结的伏安特性可用下式表示:

$$I = I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) = I_s(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1.1.1)$$

式中, I 为流过 PN 结的电流;

I_s 为 PN 结的反向饱和电流,是一个与环境温度和材料等有关的参数,单位与 I 的单位一致;

V 为外加电压;

$V_T = kT/q$, 为温度的电压当量(其单位与 V 的单位一致),其中玻耳兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$, 电子电量 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, 则 $V_T = \frac{T}{11600} \text{V}$, 在常温($T = 300\text{K}$)下, $V_T = 26\text{mV}$ 。

当外加正向电压,即 V 为正值,且 V 比 V_T 大几倍时, $e^{V/V_T} \gg 1$, 于是 $I \approx I_s e^{\frac{V}{V_T}}$, 这时正向电流随正向电压的增加按指数规律增大,PN 结为正向导通状态。

外加反向电压,即 V 为负值,且 $|V|$ 比 V_T 大几倍时, $e^{\frac{V}{V_T}} \ll 1$, 于是 $I \approx -I_s$, 这时 PN 结只流过很小的反向饱和电流,且数值上基本不随外加电压而变,PN 结呈反向截止状态。

PN 结的伏安特性也可用特性曲线表示,如图 1.1.1 所示。

从式(1.1.1)伏安特性方程的分析和图 1.1.1 特性曲线(实线部分)可见,PN 结具有单向导电性和非线性伏安特性。

1.1.2 什么是 PN 结的反向击穿? PN 结的反向击穿有哪几种类型? 各有何特点?

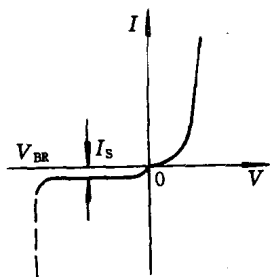


图 1.1.1

答 当作用在 PN 结的反向电压增大到 V_{BR} 值时,反向电流剧增,如图 1.1.1 中虚线部分所示,这种现象称为 PN 结的反向击穿。发生反向击穿的电压 V_{BR} 称为击穿电压。

反向击穿有电击穿和热击穿两类。产生电击穿的物理过程又有齐纳击穿和雪崩击穿两种类型。

型。

齐纳击穿常发生在掺杂浓度高、空间电荷区较薄的 PN 结,其击穿电压较低,具有负的温度系数,即温度升高时,击穿电压减小。

雪崩击穿常发生在掺杂浓度低,空间电荷区较厚的 PN 结,其击穿电压较高,具有正的温度系数,即温度升高时,击穿电压增大。

齐纳击穿和雪崩击穿都属于电击穿,这种击穿是可逆的,当外加电压(绝对值)下降到击穿电压以下时,PN 结又恢复单向导电性。但是,当反向电流和反向电压的乘积超过 PN 结允许的耗散功率时,PN 结就由电击穿变为热击穿,造成永久性破坏。

如果将 PN 结与限流电阻串联,使其工作在反向击穿状态时,流过的反向电流被限止在允许的范围内,则 PN 结不至于损坏。利用 PN 结反向击穿时,流过的电流在较大范围内变化,而两端的电压 V_{BR} 基本保持不变的特点,可以达到稳定电压的效果。硅稳压管就是利用这种稳压特性工作的一种特殊二极管,其稳压值就是其击穿电压值。

1.1.3 PN 结电容是怎样形成的? 和普通电容相比有什么区别? 结电容对二极管的单向导电性有什么影响?

答 PN 结电容由势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 组成。

势垒电容 C_B 是由空间电荷区引起的。空间电荷区内有不能移动的正负离子,各具有一定的电量。当外加反向电压变大时,空间

电荷区变宽,存储的电荷量增加;当外加反向电压变小时,空间电荷区变窄,存储的电荷量减小,这样就形成了电容效应。势垒电容大小随外加电压改变而变化,是一种非线性电容,而普通电容为线性电容。在实际应用中,常用微变电容作为参数,变容二极管就是势垒电容随外加电压变化比较显著的二极管。电容 C_B 的大小随外加反向电压 V_R 变化的关系如图 1.1.3(a) 所示。

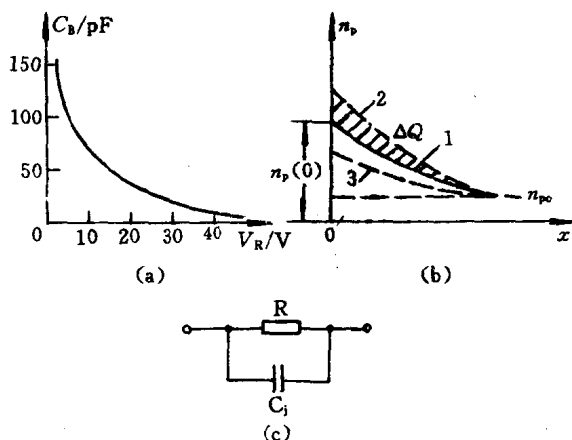


图 1.1.3

扩散电容 C_D 是载流子在扩散过程中的积累而引起的。PN 结加正向电压时, N 区的电子向 P 区扩散, 在 P 区形成一定的电子浓度 (n_p) 分布, PN 结边缘处浓度大, 离结远的地方浓度小, 电子浓度按指数规律变化, 如图 1.1.3(b) 的曲线 1 所示 (图中 x 表示离 PN 结的距离)。当正向电压增加时, 电子浓度分布如图 1.1.3(b) 的曲线 2 所示, 载流子积累增加了 ΔQ ; 反之, 则减小载流子积累, 如曲线 3 所示。同理, 在 N 区内空穴浓度随外加电压变化而变化的关系与 P 区电子浓度的变化相同。因此, 外加电压增加 ΔV 时所出现的正负电荷积累变化 ΔQ , 可用扩散电容 C_D 来模拟。 C_D 也是一种非线性的分布电容。

综上所述, 势垒电容和扩散电容是同时存在的。PN 结正偏

时,扩散电容远大于势垒电容;PN 结反偏时,扩散电容远小于势垒电容。势垒电容和扩散电容的大小都与 PN 结面积成正比。

在低频工作时,PN 结的结电容的容抗很大,可视为开路,对 PN 结的单向导电性无影响。而在高频运用时,由于容抗变小,结电容将旁路 PN 结的等效电阻,使 PN 结反偏时的等效阻抗变得很小,于是,PN 结的单向导电性变差,所以,在高频时必须考虑结电容的影响。图 1.1.3(c)示出了 PN 结的高频等效电路。其中, R_j 表示结电阻, C_j 表示结电容。

1.1.4 由于 PN 结中空间电荷区的存在,PN 结两端有电位差 V_0 ,那么,用导线将二极管两端短路,回路中会有电流吗?如果用光照射二极管情况又会怎样?

答 因为金属和半导体之间存在着接触电位差,二极管短路时,二极管两端的接触电位差抵消了 PN 结上的电位差。在热平衡状态下,PN 结两侧载流子的扩散力与由 V_0 形成的 PN 结内电场力平衡,故 V_0 不能驱使载流子流通而形成电流,所以回路中无电流。

当光照二极管时,PN 结两侧的 P 区和 N 区吸收了足够的能量使电子和空穴的浓度增加。对多子(多数载流子)而言,原来的浓度大,光激发后多子数量增加不显著,对扩散运动影响不大;对少子(少数载流子)而言,原来的浓度小,光激发后少子增加很多倍,在内电场的作用下,少子漂移运动加强,超过平衡状态的少子穿过 PN 结形成光电流。此时在短路回路中正确串入微安表,将显示有电流,且从 P 极流入表头。光照越强,反向饱和电流越大。

利用光能激发半导体内载流子的特点,常制成光电二极管来实现光电转换。

1.1.5 二极管是非线性元件,它的直流电阻和交流电阻有何区别?用万用表欧姆档测量的二极管电阻属于哪一种?为什么用万用表欧姆档的不同量程测出的二极管阻值也不同?

答 二极管的直流电阻 R_D 是指二极管两端所加直流电压 V

与流过它的直流电流 I 之比。
如图 1.1.5 所示,二极管工作在 Q 点(又称静态工作点)时的直流电阻 $R_D = V/I$ 。

二极管的交流电阻是指在工作点 Q 附近电压变化量 ΔV_D 与电流变化量 ΔI_D 之比,即 $r_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$,也就是曲线在工作点处的切线斜率的倒数。

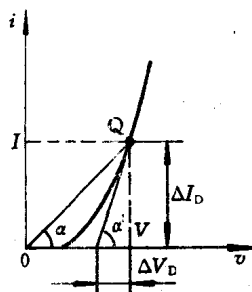


图 1.1.5

交流电阻还可利用 PN 结的伏安特性方程求得。

因为
$$\frac{1}{r_D} = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_D} \approx \frac{dI}{dV} = \frac{d[I_S(e^{V/V_T} - 1)]}{dV}$$

$$= \frac{I_S}{V_T} e^{V/V_T} \approx \frac{I}{V_T}$$

所以
$$r_D = \frac{V_T}{I} \quad V_T = 26\text{mV}$$

式中, I 是静态工作点的电流值,工作点的位置不同,动态电阻也不同。 I 越大,曲线越陡, r_D 越小,反之亦然。

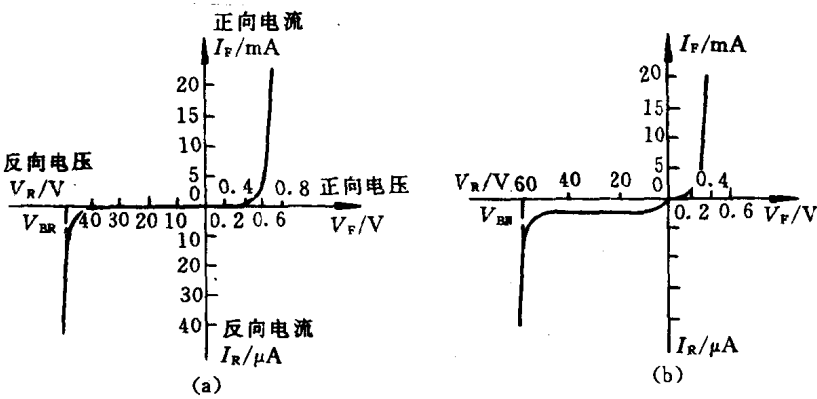
交流电阻是动态电阻,不能用万用表测量。用万用表欧姆档测出的正、反向电阻是二极管的直流电阻。

用欧姆档的不同量程去测量二极管的正向电阻,由于表的内阻不同,使测量时流过管子的电流大小不同,也就是工作点的位置不同(参见图 1.1.5),故测出的 R_D 值不同。

1.1.6 硅二极管和锗二极管的伏安特性有何异同?

答 二极管的核心是 PN 结,所以二极管的伏安特性与 PN 结的伏安特性基本类似,图 1.1.6(a)和(b)分别示出了实测的硅和锗二极管的伏安特性曲线。由图可见,当正向电压比较小时,正向电流几乎为零,这个区域称为“死区”,硅管的死区电压(又称开启电压)约为 0.5V,锗管的死区电压约为 0.1V。在实际应用中常

近似认为,死区电压范围内的正向电流为零,二极管不导通。



1.1.6

正向电压大于死区电压以后,正向电流明显增加,在正常使用的电流范围内,二极管的正向压降很小,且几乎维持恒定。硅管约为 $0.6 \sim 0.8V$ (通常取 $0.7V$),锗管约为 $0.2 \sim 0.3V$ (通常取 $0.2V$)。

当二极管承受反向电压时,反向电流很小,在室温下,小功率硅管的反向饱和电流小于 $0.1\mu A$,锗管为几十 μA 。因此,虽然硅管的温度系数大,温度变化时,硅管的反向电流变化比锗管的变化快,但在同一温度下,硅管的反向饱和电流比锗管的反向饱和电流仍小得多。

当二极管的反向电压达到反向击穿电压 V_{BR} 时,反向电流剧增,二极管被击穿。对于普通二极管禁止工作在反向击穿区。通常硅管的击穿电压比锗管的击穿电压高,硅管的反向击穿特性曲线比锗管的陡直。

现将硅二极管和锗二极管的性能比较列于表 1.1.6 中,以供选用管子时参考。

表 1.1.6

二极管类型	正向压降 V_F (V)	V_F 的温度系数 (mV/°C)	开启电压 (V)
硅二极管	约 0.6~0.8	约 -2.5	约 0.5
锗二极管	约 0.2~0.3	约 -2.5	约 0.1
二极管类型	反向电流 I_R	反向工作电压 V_R	允许结温(°C)
硅二极管	小, 小于 $1\mu\text{A}$, 温度每升高 8°C , I_R 约加一倍	高	150~200
锗二极管	大, 几十 μA , 温度每升高 10°C , I_R 约加一倍	低	75~100

1.1.7 已知稳压管 2CW11 的电压温度系数为 $-0.05\%/^\circ\text{C}$, 2CW20 为 $+0.095\%/^\circ\text{C}$ 。为了减小温度对稳压值的影响, 有人把同一型号的两个稳压管正、反向串联, 如图 1.1.7(a) 和(b)所示。也有人把这两种不同型号的稳压管顺向串联使用, 如图 1.1.7(c)所示。这三种做法都能起到减小电压温度系数绝对值的作用吗?

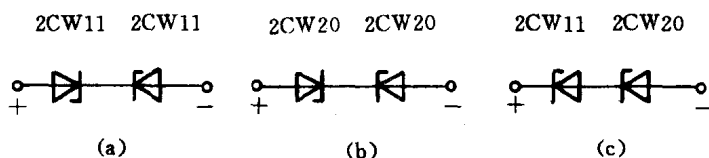


图 1.1.7

答 稳压管正向运行时与普通二极管正向偏置时一样, 具有负的电压温度系数。稳压管反向稳压工作时的电压温度系数, 则与稳压值 V_Z 的大小有关。通常, V_Z 低于 4V 的稳压管, 电压温度系

数是负值(齐纳击穿); V_Z 高于 7V 的稳压管,电压温度系数是正值(雪崩击穿); V_Z 为 4~7V 的稳压管,电压温度系数很小,其温度稳定性较好。

图 1.1.7(a)中,两个 2CW11 同型号的管子反向串联,一个作正向使用,有负温度系数,另一个作稳压管使用,也是负温度系数,故不但不能实现温度补偿,相反增大了电压温度系数的绝对值。

图 1.1.7(b)的连接方式与图 1.1.7(a)相同,两个管子同为 2CW20,故两个管子的正、反向电压温度系数相反,使总的温度系数绝对值减小,因此,可以减小温度对稳压值的影响。

图 1.1.7(c)是两个电压温度系数相反的不同稳压管顺向串联,温度变化对两管稳压值的影响相反而抵消,使总的电压温度系数绝对值减小。其稳压值是两管稳压值之和。

例 1.1.8 二极管电路如图 1.1.8 所示,判断图中二极管是导通还是截止,并确定各电路的输出电压 V_o 。设二极管的导通压降为 0.7V。

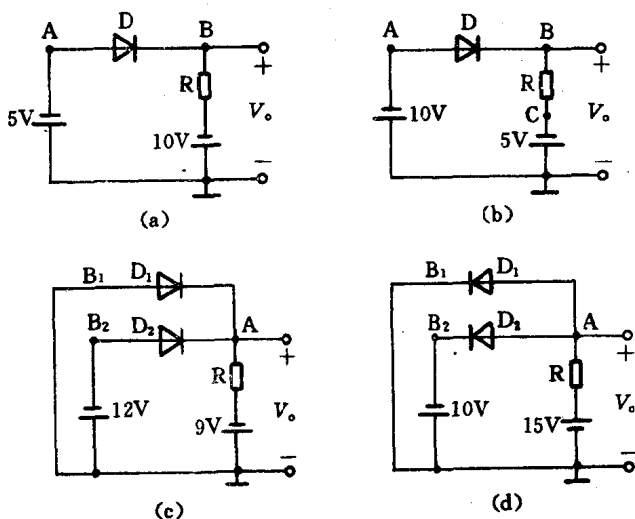


图 1.1.8