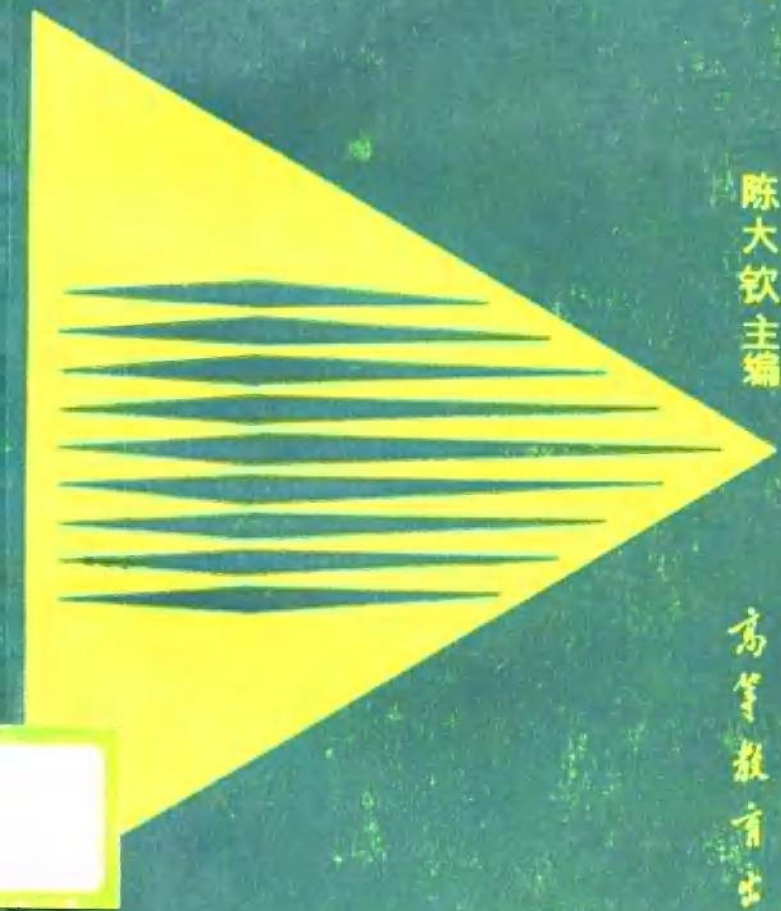


模拟电子技术自学问答

高等学校教学参考书

陈大钦主编

高等教育出版社



本书是为配合康华光主编的《电子技术基础》(第三版)模拟部分和童诗白主编的《模拟电子技术基础》(第二版)等教材的学习,并参考1987年国家教委颁布的《高等工业学校电子技术课程教学基本要求》而编的教学参考书。

编者根据多年教学实践中学生所遇到的各种典型问题,以问答的形式来编排内容。在选题上,围绕课程的重点、难点进行,并非面面俱到。每个问题之间在内容上相互衔接,有一定的连续性。全书共分十一章,共计200多个问题,该书内容以集成电路为主,自成体系,颇具特色。

本书可供电大、职大、函大和自学者使用,也可供普通高等工业院校师生及从事电子技术应用的工程技术人员参考。

责任编辑 章浩平

高等学校教学参考书

模拟电子技术自学习问答

陈大钦 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.875 字数 330 000

1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数 0001—4,655

ISBN7-04-002250-8/TN·118

定价 3.90 元

序

本书是为配合康华光主编的《电子技术基础》(第三版)模拟部分和童诗白主编的《模拟电子技术基础》(第二版)等教材的学习,并参考1987年国家教委颁布的《高等工业学校电子技术课程教学基本要求》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遇到的疑难问题,并考虑到读者的特点,以问答的形式处理各种问题。

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、难点来进行,而非面面俱到;

3. 在保证基本教学内容的前提下,为了适应电子技术不断发展的新形势和因材施教的需要,与教材和《基本要求》相比,选题内容要适当拓宽;

4. 本书可供电大、职大、函大学生和自学者使用,也可供普通高等工业院校师生和从事电子技术应用的工程技术人员参考。

根据上述思想,全书分十一章,共200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肖锡湘(第1、2、3、4、5、11章)、陈大钦(第6、7、8、9章)和彭容修(第10章)等同志,陈大钦同志为主编,负责全书的组织和定稿。在编写过程中一直得到了康华光教授的指导和帮助,康华光教授审阅了部分书稿。杨晓安、丁素芳、张德芳等同志为本书绘制了全部插图。

本书由东南大学(原南京工学院)陈黎明副教授主审,对初稿

进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵意见和修改建议,在此谨致衷心的感谢。

由于水平有限,时间匆促,书中难免有错误和不妥之处,敬希读者批评指正!

编 者

1988年9月

目 录

1 半导体二极管和三极管	1
1.1 PN 结和半导体二极管	1
1.2 半导体三极管.....	11
2 基本放大电路	18
2.1 基本放大电路.....	18
2.2 图解分析法.....	25
2.3 等效电路分析法.....	34
2.4 偏置电路.....	45
2.5 三种组态及组合电路.....	57
3 场效应管放大器	85
3.1 场效应管.....	85
3.2 场效应管放大电路的分析方法.....	95
3.3 场效应管恒流源及组合电路.....	105
4 功率放大器	121
4.1 功率放大器的特殊问题.....	121
4.2 实用的功率放大电路.....	132
5 模拟集成电路	148
5.1 差动放大器.....	148
5.1.1 基本差动放大器	148
5.1.2 恒流源差动放大器	159
5.1.3 多级放大器	170
5.2 集成运算放大器.....	176
6 反馈放大器	189
6.1 反馈的基本概念与分类.....	189
6.2 负反馈对放大器性能的影响.....	201
6.3 深度负反馈条件下的近似估算.....	209

6.4	负反馈放大器的方框图分析法	217
7	频率响应与稳定性	228
7.1	频率响应的基本概念和基本分析法	228
7.2	单级放大器的高频响应	234
7.3	单级放大器的低频响应	245
7.4	单级放大器的瞬态响应	249
7.5	多级放大器的频率响应	253
7.6	扩展放大器通频带的方法	257
7.7	负反馈放大器的稳定问题	262
8	信号的运算与处理电路	268
8.1	基本运算及其应用电路	268
8.1.1	理想运放的重要特性及其应用举例	268
8.1.2	基本运算及其应用电路	271
8.1.3	非理想运算放大器运算电路分析	292
8.2	模拟乘法器	298
8.3	有源滤波器	306
8.4	线性整流器及采样-保持电路	325
9	信号发生器	330
9.1	RC 正弦波振荡器	330
9.2	LC 正弦波振荡器	341
9.3	石英晶体振荡器	351
9.4	非正弦波发生器	354
9.4.1	比较器	354
9.4.2	非正弦波发生器	359
9.5	压控振荡器	368
10	直流电源	373
10.1	综述	373
10.2	整流电路	374
10.3	滤波电路	375

10.4	稳压电路.....	380
10.5	开关型直流稳压电源.....	400
10.6	可控硅整流电路.....	407
10.7	直流电源的应用.....	413
11	模拟电子电路读图练习.....	416
11.1	阅读电子电路图的基本步骤.....	416
11.2	HGELA-II 函数发生器	417
11.3	带音调控制的功率放大器.....	424

1 半导体二极管和三极管

1.1 PN 结和半导体二极管

1.1-1 PN 结的伏安特性方程有何特点?

答: 根据半导体物理可以推导出 PN 结的伏安特性方程为

$$I = I_S(e^{qV/kT} - 1) \quad (1.1-1a)$$

式中 I 为流过 PN 结的电流

I_S 为流过 PN 结的反向饱和电流

V 为外加电压

$V_T = kT/q$ 为温度的电压当量, 其中波耳兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 电子电量 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 则 $V_T = \frac{T}{11600}$, 在常温 (300 K) 下, $V_T = 26 \text{ mV}$ 。于是上式可写为

$$I = I_S(e^{V/V_T} - 1) \quad (1.1-1b)$$

外加正向电压 V 比 V_T 大数倍时, $e^{V/V_T} \gg 1$, 于是 $I \approx I_S e^{V/V_T}$, 即正向电流随正向电压增加按指数规律增大。

外加反向电压 V 为负值, 且 $|V|$ 比 V_T 大数倍时, $e^{V/V_T} \ll 1$, 于是 $I \approx -I_S$, 即加反向电压时, PN 结只流过很小的反向饱和电流, 反向饱和电流的数值基本上不随反向电压而变。

由特性方程分析可见, PN 结具有单向导电性, 具有非线性特性。

1.1-2 PN 结电容包括哪些成分? 和普通电容相比有何区别?

答：PN 结电容由势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 两部分组成。

势垒电容 C_B 是由空间电荷引起的。空间电荷区内不能移动的正负离子相当于存储的正负电荷，由于缺少载流子，导电率很低，相当于介质，而两侧的 P 区和 N 区，其导电率相对来说比较高，相当于金属极板。外加反向电压值变小时，空间电荷区的厚度变窄，存储电荷量减小，且等效的金属极板间距也减小；外加反向电压值变大时，存储电荷量增加，等效的金属极板间距也增加。这种现象与普通极板电容的作用相似。但势垒电容的大小随外加电压而改变，是一种非线性电容。因此，它应采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特性比较显著的二极管。其电容 C_B 的大小随外加反向电压 V_R 变化的关系如图 1.1-2(a) 所示。

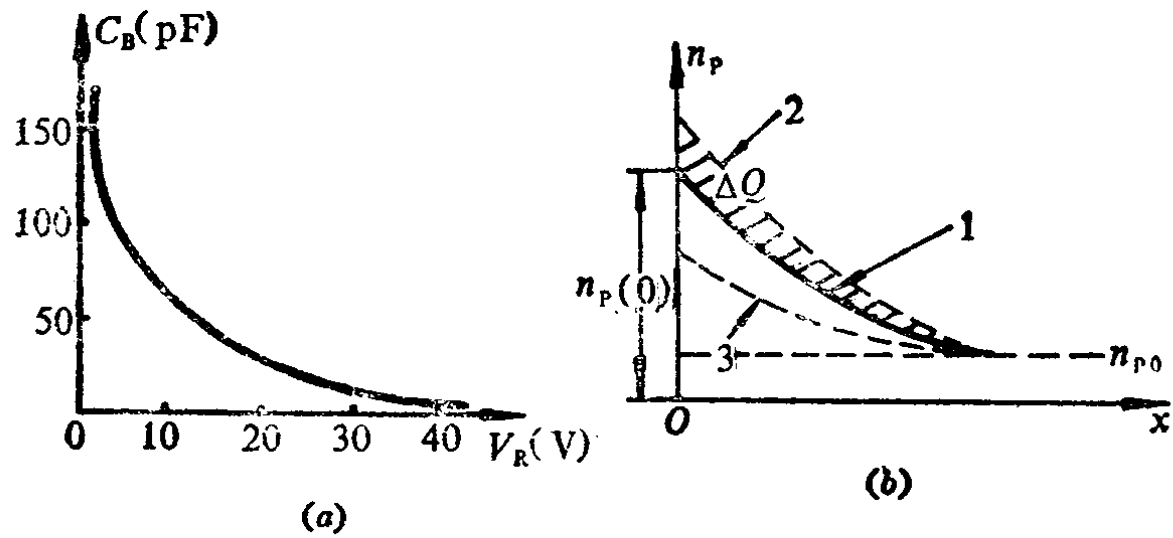


图 1.1-2

扩散电容 C_D 是由载流子在扩散区分布而引起的。PN 结加正偏时，N 区的电子向 P 区扩散，形成一定的电子浓度分布如图 1.1-2(b) 中的曲线 1 所示。当正偏电压增加时，电子浓度按指数规律增大，电子浓度分布如图 1.1-2(b) 中的曲线 2 所示，载流子积累增加了 ΔQ ，反之则减小积累，如曲线 3 所示。由于电中性的要求，在扩散区内的电子浓度的变化与空穴浓度的变化是相同的，因

此,外加电压增减 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。它也是一种非线性的分布电容,但正负电荷是存储在 PN 结的同一空间(P 区或 N 区),不象普通电容器的正负电荷分别存储在电容器的两极板上。

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。与普通电容相比,PN 结电容是非线性的分布电容,而普通电容为线性电容。

1.1-3 PN 结的反向击穿有哪几种? 各有何特点?

答: 作用到 PN 结的反向电压增加到某一数值 V_{BR} 时,反向电流急剧增大,如图 1.1-3 所示,这种现象称为 PN 结的反向击穿。电压 V_{BR} 称为击穿电压。反向击穿有电击穿和热击穿两类。产生电击穿的机理有雪崩击穿和齐纳击穿两种类型。

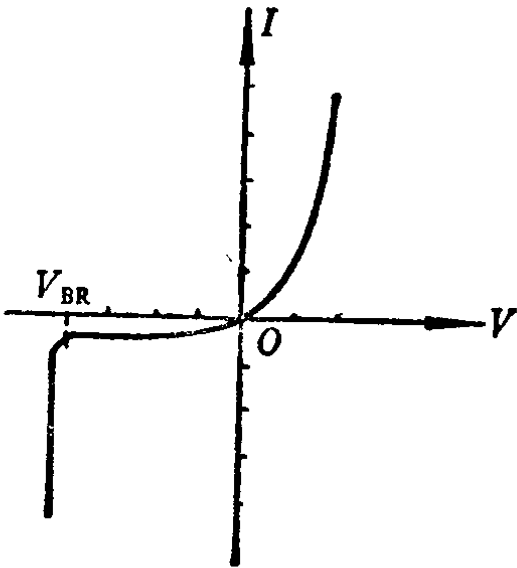


图 1.1-3

雪崩击穿常发生在掺杂浓度低的 PN 结,其空间电荷区较厚,击穿电压较高(如 7V 以上)。具有正的温度系数即温度升高时,击穿电压增大。

齐纳击穿常发生在掺杂浓度高的 PN 结,其空间电荷区较窄,击穿电压较低(如 5V 以下)。具有负的温度系数即温度升高时,击穿电压减小。

雪崩击穿和齐纳击穿都属于电击穿,发生在空间电荷区内部,使空间电荷区内的原子共价键结构破坏,产生电子空穴对而导致

击穿。这种击穿是可逆的，当外加电压恢复到小于击穿电压 V_{BR} 时，反向电流将减小到正常值。但是反向电流和反向电压的乘积超过 PN 结容许的耗散功率时，就可能由电击穿变为热击穿，而造成永久性破坏。

如果将 PN 结与限流电阻串联，工作在反向击穿特性上，将反向电流限制在容许范围内，使 PN 结不至损坏。此时电流在很大范围内变化时，PN 结两端电压基本不变，能达到稳定电压的作用。稳压管就是利用这种稳压特性工作的一种二极管，其稳压值就是其击穿电压。

1.1-4 为什么 PN 结两端有电位差 V_0 ，而将二极管两端短路后无电流？光照二极管的电气特性如何？

答：这是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。根据热平衡状态下 PN 结内载流子运动规律，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 不能再驱使载流子流通形成电流，用电压表也无法量得 PN 结两端的接触电位差 V_0 。

二极管只有在外界提供能量，如加偏置电压、光照、加温才能使外接微安表中有电流指示。

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与空穴的浓度增加，对多子而言，原来的浓度大，光激发后多子数增加不显著，对扩散运动影响不大；但对少子而言，原来的浓度小，光激发后少子数增加许多倍，在内电场的作用下，少子漂移运动大大加强，超过平衡状态的少子穿过 PN 结形成光电流。如果将二极管短路，微安表就有显示，如锗二极管在光照下电流方向是从 P 极流入表头的。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 比较硅二极管和锗二极管的伏安特性有何异同？

答：由于二极管的核心是一个 PN 结，因此二极管伏安特性与 PN 结的伏安特性基本相似，图 1.1-5(a) 和图 1.1-5(b) 分别示出了硅二极管和锗二极管的实际伏安特性。

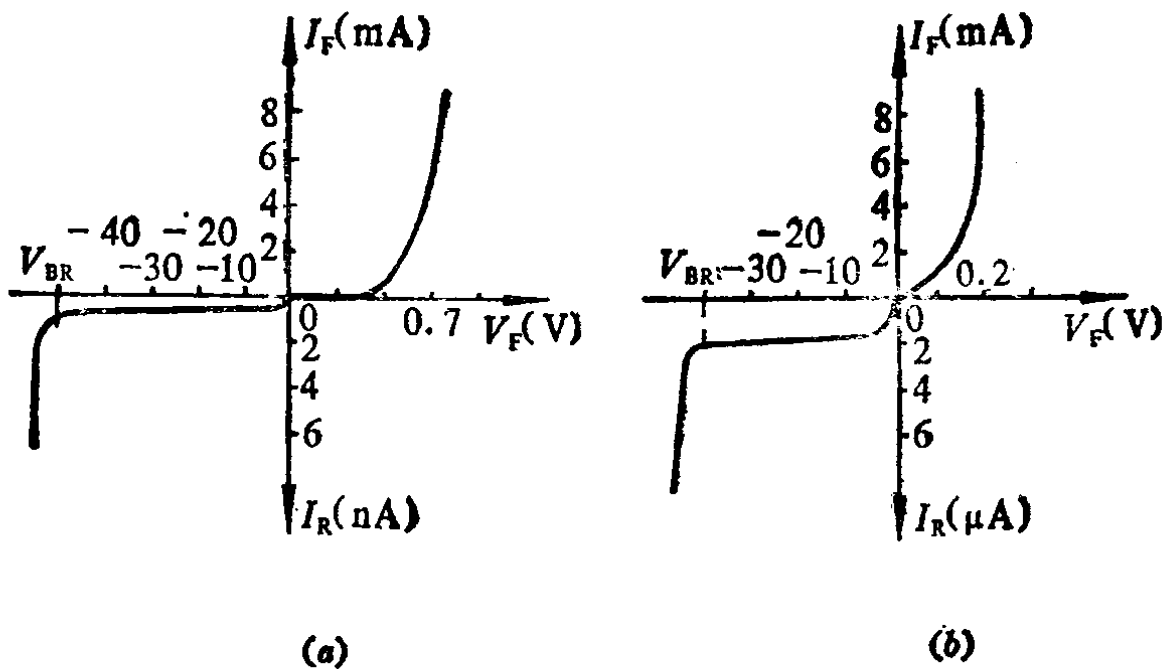


图 1.1-5

由图可见，二极管的正向电压很低时，正向电流很小，常称为“死区”，硅二极管的死区电压约为 0.5 V，锗二极管的死区电压约为 0.1 V。实际应用中，常近似认为死区电压范围内正向电流为零，二极管不导通。

正向电压大于死区电压之后，正向电流明显增加，电压和电流关系符合式(1.1-1a)所示的指数规律，二极管等效电阻很小，呈导通状态。

正向电流较大时，电压变化却很小，呈恒压特性，但由于二极管引线的接触电阻及半导体的体电阻的作用随工作电流的增大而加强，曲线最终渐近于一根直线。一般锗管正向特性上升部分比

硅管陡。

当二极管承受反向电压时,反向电流很小,在同样的温度下,硅管的反向电流比锗管更小,锗管是微安级,硅管是纳安级,因此,温度变化时,硅管的反向电流变化比锗管的变化小。

当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。普通二极管不允许工作在反向击穿区,一般硅管的反向击穿电压也比锗管高,且硅管的反向击穿特性曲线比锗管的陡直。

由上可见,二极管的伏安特性具有下述特点:

(1) 具有单向导电性。外加正向电压(正偏)时,电流大,电阻小,呈导通状态;外加反向电压(反偏)时,电流小,电阻大,呈截止状态。

(2) 非线性伏安特性。无论外加正向或反向电压时,电流与电压均不成正比;直流电阻和交流电阻与所加电压极性和大小有关。

(3) 伏安特性随温度变化而变化。二极管正偏时,温度升高,正向电压降减小,伏安特性曲线向左移;二极管反偏时,温度升高使反向电流增加。

1.1-6 二极管的伏安特性是非线性的,如何分析二极管电路的直流工作状态?

答: 电路和二极管伏安特性如图 1.1-6(a)和(b)所示。一般

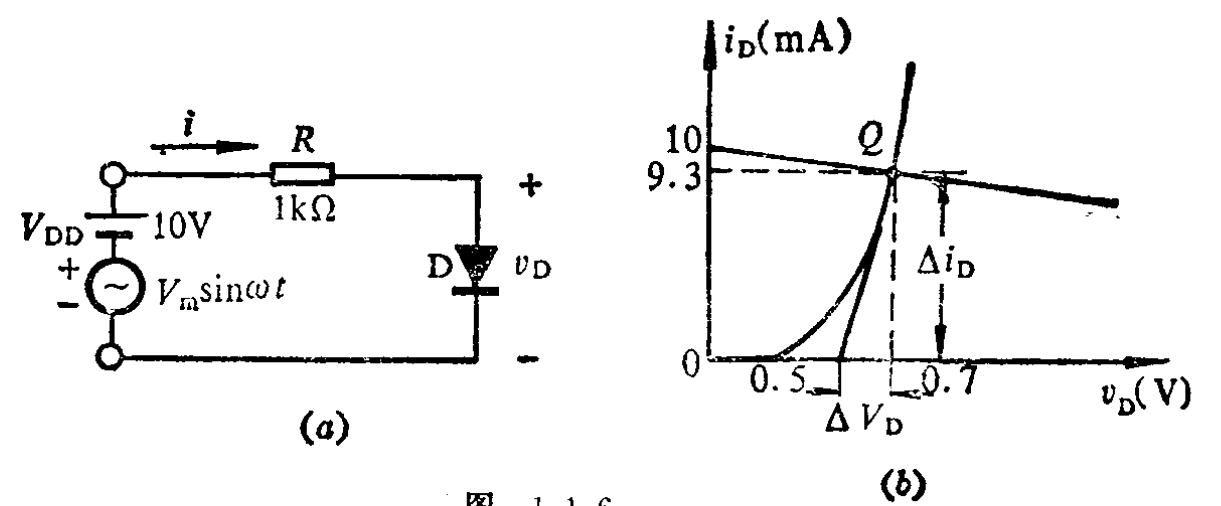


图 1.1-6

可采用图解分析法来求解二极管中的电流 i_D 和电压 v_D 。

当 $V_m \sin \omega t = 0$ 时, 将电路分为线性和非线性两部分, 非线性部分的二极管伏安特性曲线表示为

$$i_D = f(v_D)$$

电源和电阻组成的线性电路可用一直线方程表示为

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R} - \frac{1}{R} V_D$$

用两点法求得: 当 $I_D = 0, V_D = V_{DD} = 10 \text{ V}$; 当 $V_D = 0, I_D = \frac{V_{DD}}{R} = 10 \text{ mA}$ 。连接这两点与二极管伏安特性曲线相交于 Q 点, Q 点对应的 $I_D = 9.3 \text{ mA}, V_D = 0.7 \text{ V}$ 为所求。

图解分析法的实质是利用解析几何求解方程组。二极管是非线性元件, 通常用伏安特性表示, 二极管外电路的伏安特性常称为负载线方程, 对应上述两曲线的交点 Q 称为静态工作点, 即为图解分析法的解。

1.1-7 二极管的直流电阻和交流电阻是否一样? 举例说明。

答: 二极管的直流电阻指二极管两端所加直流电压与流过它的直流电流之比。

正向电阻 $R_{DF} = \frac{V}{I}$

反向电阻 $R_{DR} = \frac{V_R}{I_R}$

在图 1.1-6(b) 中, 设工作在 Q 点, $V_D = 0.7 \text{ V}, I_D = 9.3 \text{ mA}$ 则

$$R_{DF} = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.7 \text{ V}}{9.3 \text{ mA}} = 75 \Omega$$

平时用万用表量出的正、反向电阻就是直流电阻。要注意不同欧姆挡(即欧姆量程)的内阻不同, 测出的 R_D 也不同。

二极管伏安特性上工作点附近电压变化量与相应的电流变化

量之比就是交流电阻 r_D , 即

$$r_D = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D}$$

也就是工作点切线斜率的倒数。

在图 1.1-6(a) 所示电路中, 视 V_{DD} 对交流短路。在图 1.1-6(b) 中过 Q 点作一切线, 取 $\Delta v_D = 0.2 \text{ V}$, 则 $\Delta i_D = 9.3 \text{ mA}$ 因此

$$r_D = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} = \frac{0.2 \text{ V}}{9.3 \text{ mA}} = 2.1 \Omega$$

交流电阻 r_D 还可以通过二极管伏安特性方程求得。

$$g_D = \frac{dI}{dV} = \frac{d}{dV} [I_S (e^{V/V_T} - 1)] = \frac{I_S}{V_T} e^{V/V_T} \approx \frac{I}{V_T}$$

所以

$$r_D = \frac{1}{g_D} = \frac{V_T}{I} = \frac{26 \text{ mV}}{I}$$

当 Q 点的 $I = 9.3 \text{ mA}$ 时

$$r_D = \frac{26 \text{ mV}}{9.3 \text{ mA}} = 2.8 \Omega$$

比较上述结果可见, 由于图解分析法误差较大, r_D 值偏小。

交流电阻是动态电阻, 不能用万用表来测量, 也不能用它来计算静态工作点。

1.1-8 由理想二极管组成的电路如图 1.1-8(a) 和 (b) 所示。试分析二极管的工作状态, 并求出输出端电压 V_O 。

答: 在图 1.1-8(a) 中, 输入端中 $V_C = 0$, 而 $V_A = V_B = 6 \text{ V}$, D_1 、 D_2 两端电位差较大而优先导通, 使 V_O 钳制在 6 V , 此时, D_3 受反向电压作用而截止, 故

$$V_O = 6 \text{ V}$$

在图 1.1-8(b) 中, 输入端 $V_B = V_C = 0$, 而 $V_A = 6 \text{ V}$, D_2 、 D_3 两端电位差较大而优先导通, 使 V_O 钳制在 0 V , 此时 D_1 受反向电压

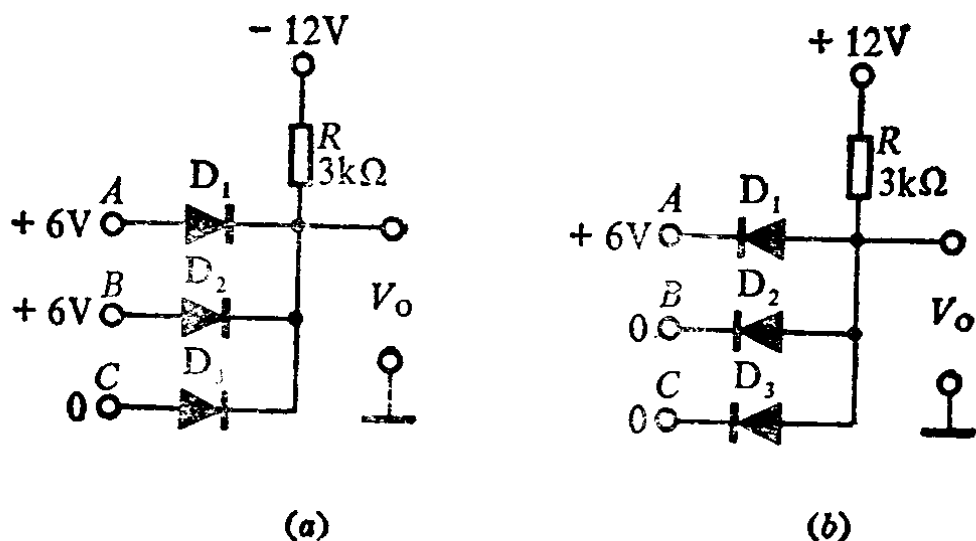


图 1.1-8

作用而截止,故

$$V_O = 0 \text{ V}$$

1.1-9 如何判断一个二极管是整流二极管还是稳压管?

答: 二极管和稳压管相同之处是在一定范围内都具有单向导电性, 因此, 可用测量二极管正反向电阻的办法来判断稳压管的好坏。

二者不同之处是, 一般稳压管的反向击穿电压比较低(几伏到十几伏), 而整流二极管的击穿电压在 50 V 以上, 甚至达 2kV。因此用欧姆挡内接 15 V 或 22.5 V 电池的万用表去测一个管子的反向电阻时, 管子两端的电阻很小, 而换成低电阻挡(欧姆挡接 1.5 V ~ 3 V 电压)后测得管子两端的电阻很大, 那么这个管子就是稳压管。

1.1-10 在图 1.1-10(a)和(b)中, 当稳压管稳定电压 $V_{Z1} = 6 \text{ V}$, $V_{Z2} = 8 \text{ V}$ 时, 由给定 $v_I = 10 \sin \omega t$ 的波形对应画出输出端 v_O 的波形, 并分析稳压管的作用。

答: 由图可知, D_{Z1} 、 D_{Z2} 反向串接, 所以

当 v_I 为正半周时, D_{Z2} 反向击穿, 稳定电压为 8V, D_{Z1} 正向

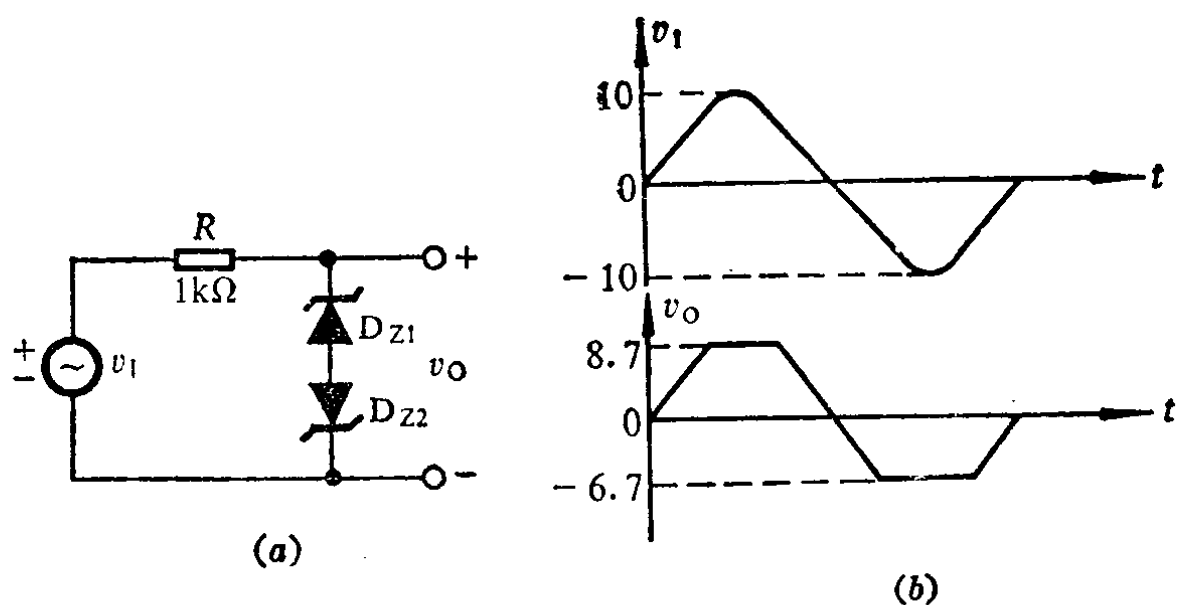


图 1.1-10

导通,管压降为 0.7 V,输出电压钳位在 8.7 V。

当 v_I 为负半周时, D_{Z1} 反向击穿, 稳定电压为 6V, D_{Z2} 正向导通,管压降为 0.7 V,因此,输出电压钳位在 6.7 V, 故得一限幅波形如图 1.1-10(b)所示。

由上分析可见:

(1) 稳压管正向偏置时也有稳压作用,只是稳定电压较低,为 0.7 V 左右。

(2) 如果将温度变化 1°C 时, 稳定电压变化的百分数定义为电压温度系数。则稳定电压大于 6V 的稳压管, 温度系数是正的, 其正向特性的温度系数是负的,因此在图示接法中, 正负温度系数可以互相补偿,其温度系数最小,温度稳定性好。稳压管对管就是两个稳压值相同的管子反向串联实现温度补偿。

(3) 两个稳压管串接可以得到四种稳压值: 14 V、1.4 V、6.7V、8.7V。因此,不同的连接方式可以得到不同的限幅波形。