



· 经典教材辅导用书 ·

模拟电子技术基础 学习辅导与考研指南

配套主教材 《电子技术基础（模拟部分）》
（康华光主编 陈大钦和张林副主编）（高教版）

主编 陈大钦 副主编 傅恩锡

知识归纳 重点难点
习题解析 考研辅导



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

经典教材辅导用书

模拟电子技术基础 学习辅导与考研指南

配套主教材 《电子技术基础(模拟部分)》
(康华光主编、陈大钦和张林副主编) (高教版)

主 编 陈大钦
副主编 傅恩锡
编 者 陈大钦 傅恩锡 彭容修
周京广

华中科技大学出版社
中国·武汉

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,可与康华光主编、陈大钦和张林副主编、由高等教育出版社出版的《电子技术基础》(模拟部分)的主教材配套使用。编者根据多年教学实践的体会,并总结、归纳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。考虑到当今电子技术发展的现实,即MOSFET器件在电子产品中已占统治地位。本书加强了MOSFET的相关内容。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试卷解答,这些试卷也可作为硕士研究生入学考试参考。

该书形式活泼,内容丰富,既可供普通高校本、专科学生和电大、职大、函大学生自学、复习和备考,也可供从事电子技术的教学人员和自学者参考。

目 录

第 1 章 半导体器件	1
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	24
自测题	34
自测题答案	43
第 2 章 基本放大电路	46
2.1 双极型三极管共射极基本放大电路的组成及工作原理	46
2.2 放大电路的静态分析	52
2.3 放大电路的动态分析	62
2.4 放大电路的工作点稳定问题	85
2.5 双极型三极管共集电极电路和共基极电路	93
2.6 场效应管放大电路	112
自测题	131
自测题答案	145
第 3 章 多级放大及放大器的频率响应	148
3.1 多级放大器	148
3.2 放大器频率响应的基本概念	166
3.3 单级放大器的低频响应	172
3.4 单级放大器的高频响应	176
3.5 单级放大器的瞬态响应	189

3.6 多级放大器的频率响应	193
3.7 扩展放大器通频带的方法	197
自测题	199
自测题答案	206
第4章 功率放大器	209
4.1 功率放大器的特殊问题	209
4.2 实用的功率放大器	222
自测题	243
自测题答案	252
第5章 模拟集成运算放大器	257
5.1 组成集成运算放大器的基本单元电路	257
5.2 集成运算放大器	280
自测题	296
自测题答案	305
第6章 反馈放大电路	309
6.1 反馈的基本概念与分类	309
6.2 负反馈对放大器性能的影响	323
6.3 深度负反馈条件下的近似估算	330
6.4 负反馈放大器的方框图分析法	337
6.5 负反馈放大器的稳定问题	349
自测题	354
自测题答案	365
第7章 信号的运算与处理电路	368
7.1 理想运放的重要特性及其应用举例	368
7.2 基本运算及其应用电路	371
7.3 非理想运算放大器运算电路分析	389
7.4 模拟乘法器	394
7.5 有源滤波器、模拟电感与电容倍增电路	400
7.6 开关电容滤波器	412

目 录

7.7 线性整流器及采样-保持电路	415
自测题	418
自测题答案	429
第8章 信号发生器	433
8.1 RC 正弦波振荡器	433
8.2 LC 正弦波振荡器	441
8.3 石英晶体振荡器	451
8.4 比较器	453
8.5 非正弦波发生器	456
8.6 压控振荡器	463
自测题	466
自测题答案	474
第9章 直流电源	477
9.1 整流与滤波电路	477
9.2 稳压管稳压电路	484
9.3 串联型稳压电路	487
9.4 三端集成稳压电路	496
9.5 开关型稳压电路	501
9.6 晶闸管整流电路	507
自测题	513
自测题答案	519
附录 模拟电子技术基础试卷及其答案	521

第 1 章

半导体器件

1.1 PN 结和半导体二极管

例 1.1.1 PN 结的伏安特性是怎样的？它有何特点？

答 PN 结是半导体器件的基本构件。掌握 PN 结的伏安特性及其特点，有助于了解其他半导体器件的工作原理和特性。

根据理论分析，PN 结的伏安特性可表示为

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

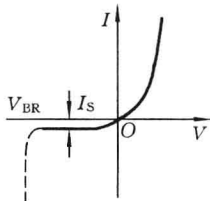
式中： I 为流过 PN 结的电流； I_s 为 PN 结的反向饱和电流，是一个与环境温度和材料等有关的参数，单位与 I 的单位一致； V 为外加电压； $V_T = kT/q$ ，为温度的电压当量（其单位与外加电压的单位一致），其中玻耳兹曼常量 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K，电子电量 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C，则 $V_T = \frac{T}{11600}$ V，在常温（ $T = 300$ K）下， $V_T = 26$ mV。

当外加正向电压，即 V 为正值，且 V 比 V_T 大几倍时， $e^{\frac{V}{V_T}} \gg 1$ ，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呈指数规律增大，PN 结为正向导通状态。

当外加反向电压，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,如图例 1.1.1 所示。

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



图例 1.1.1

例 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?

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,如图例 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。

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,击穿电压降低。

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,击穿电压增高。

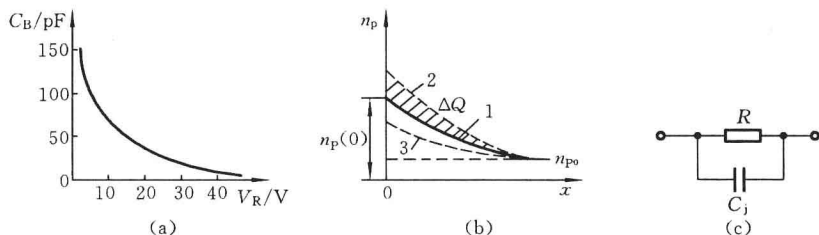
齐纳击穿和雪崩击穿都属于电击穿,这种击穿是可逆的,当外加电压(绝对值)下降到击穿电压以下时,PN 结又恢复单向导电性。但是,当反向电流和反向电压的乘积超过 PN 结允许的耗散功率时,PN 结就由电击穿变为热击穿,造成永久性破坏。

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。

例 1.1.3 PN 结的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 结的结电容由势垒电容 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的变化而变化比较显著的二极管。势垒电容 C_B 的大小随外加反向电压 V_R 变化的关系如图例 1.1.3(a)所示。



图例 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, 如图例 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。

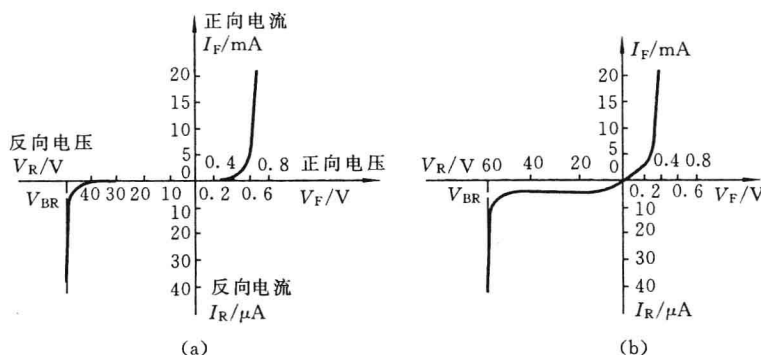
在低频工作时, PN 结的结电容的容抗很大, 可视为开路, 对 PN

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。图例1.1.3(c)所示为PN结的高频等效电路。其中, R 表示结电阻, C_j 表示结电容。

例 1.1.4 硅二极管和锗二极管的伏安特性有何异同?

答 半导体二极管由一个PN结再加上电极、引线封装而成,所以,二极管的伏安特性与PN结的伏安特性基本类似。

图例1.1.4(a)和(b)所示分别为实测的硅二极管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。



图例 1.1.4

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。硅二极管的为0.6~0.8V(通常取0.7V),锗二极管的为0.2~0.3V(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

二极管的反向饱和电流小于 $0.1 \mu\text{A}$, 锗二极管的则为几十微安。因此, 虽然硅二极管的温度系数大, 温度变化时, 硅二极管的反向电流变化比锗二极管的变化快, 但在同一温度下, 硅二极管的反向饱和电流比锗二极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。普通二极管禁止工作在反向击穿区。通常, 硅二极管的击穿电压比锗二极管的击穿电压高, 硅二极管的反向击穿特性曲线比锗二极管的陡直。

现将硅二极管和锗二极管的性能比较列于表例 1.1.4 中, 以供选用二极管时参考。

表例 1.1.4

二极管类型	正向压降 V_F/V	V_F 的温度系数/ $\text{mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	开启电压/ V	反向电流 I_R	反向工作电压 V_R	允许结温/ $^\circ\text{C}$
硅二极管	0.6~0.8	约-2.5	约 0.5	小, 小于 $1 \mu\text{A}$, 温度每升高 8°C , I_R 约增加一倍	高	150~200
锗二极管	0.2~0.3	约-2.5	约 0.1	大, 几十微安, 温度每升高 10°C , I_R 约增加一倍	低	75~100

例 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? 用万用表欧姆挡测量的二极管电阻属于哪一种? 为什么用万用表欧姆挡的不同量程测出的二极管阻值也不同?

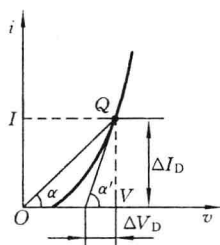
答 二极管的直流电阻 R_D 是指二极管两端所加直流电压 V 与流过它的直流电流 I 之比。图例 1.1.5 所示为二极管工作在 Q 点 (又称静态工作点) 时的直流电阻 $R_D = V/I$ 。

二极管的交流电阻是指在 Q 点附近电压变化量 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。

交流电阻还可利用 PN 结的伏安特性方程求得。因为

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



图例 1.1.5

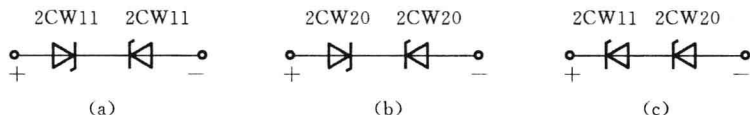
所以 $r_D = V_T/I$, $V_T = 26 \text{ mV}$

式中: I 是静态工作点的电流值。工作点的位置不同,交流电阻也不同。 I 越大,曲线越陡, r_D 越小,反之则曲线越缓, r_D 越大。

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

用欧姆挡的不同量程去测量二极管的正向电阻,由于表的内阻不同,测量时流过二极管的电流大小不同,也就是工作点的位置不同(见图例 1.1.5),故测出的 R_D 值不同。

例 1.1.6 硅稳压二极管有哪些主要参数? 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,如图例 1.1.6(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,如图例 1.1.6(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?



图例 1.1.6

答 硅稳压二极管,简称稳压管,是模拟电子电路中常用的一种特殊二极管。稳压管在发生电击穿时,在反向电流变化的很大范围

内,稳压管两端电压几乎不变,利用这一特性可稳压。

稳压管的主要参数有稳定电压 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} 及稳压管的温度系数等。

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

图例 1.1.6(a)所示电路中,两个型号为 2CW11 的稳压管反向串联,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。

图例 1.1.6(b)所示电路的连接方式与图例 1.1.6(a)所示电路的相同,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。

图例 1.1.6(c)所示电路是两个电压温度系数相反的不同稳压管顺向串联,温度变化对两稳压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。其稳压值是两稳压管稳压值之和。

例 1.1.7 二极管中 PN 结的伏安特性是 $I = I_S(e^{V/V_T} - 1)$ 。若 $I_S = 20 \times 10^{-12}$ A, $V_T = 26$ mV,当用一个 1.5 V 的干电池接在二极管两端时,将有多大电流?

解 将 $I_S = 20 \times 10^{-12}$ A 及 $V = 1.5$ V = 1500 mV 代入 PN 结的伏安特性方程,得

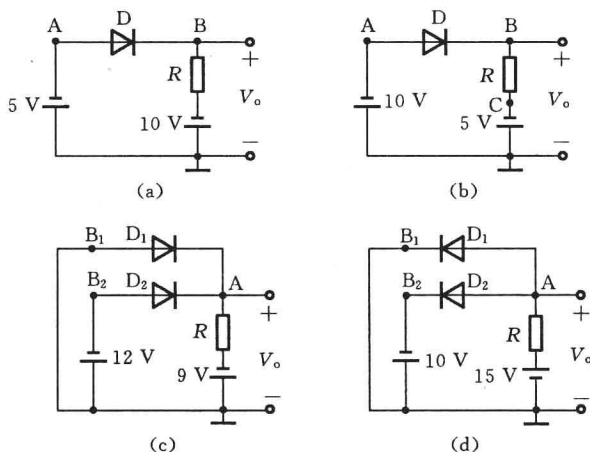
$$I = 20 \times 10^{-12} (e^{\frac{1500}{26}} - 1) \text{ A} = 2.27 \times 10^{14} \text{ A}$$

此时二极管的等效直流电阻为

$$R_D = \frac{V}{I} = \frac{1.5}{2.27 \times 10^{14}} \Omega = 6.6 \times 10^{-15} \Omega$$

实际情况是二极管的体电阻、接线电阻及干电池的内阻远大于 R_D , 故不会产生如计算结果那样大的电流。电路的电流值最终不是由二极管的伏安特性决定, 而是由二极管的体电阻、接线电阻及电池内阻决定。通常后者远小于 $1\ \Omega$, 故电路中的电流将远大于 $1\ \text{A}$, 足以将干电池和二极管损坏。因此, 在实际应用中不允许将电池直接与二极管相连接, 而必须串接一限流电阻。

例 1.1.8 二极管电路如图例 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 $0.7\ \text{V}$ 。



图例 1.1.8

解 判断二极管在电路中的工作状态, 常用的方法是: 首先假设二极管断开, 然后求得二极管阳极与阴极之间将承受的电压。如果该电压值大于导通电压, 则说明该二极管处于正向偏置而导通, 两端的实际电压为二极管的导通压降; 如果该电压值小于导通电压, 则说明该二极管处于反向偏置而截止。

值得注意的是, 在用上述方法判断的过程中, 如果电路中出现两

个或两个以上二极管承受大小不相等的正向电压,则应判定承受正向电压较大者优先导通,其两端电压为导通电压降,然后再用上述方法判断其余二极管。本题判断如下。

(1) 在图例 1.1.8(a)所示电路中,首先将二极管 D 断开,求二极管两端将承受的电压

$$V_{AB} = V_A - V_B = -5 \text{ V} - (-10 \text{ V}) = 5 \text{ V}$$

显然,二极管接入以后处于正向偏置,工作在导通状态。

如果设二极管是理想器件,正向导通压降 $V_F = 0 \text{ V}$,则输出电压 V_o 。被二极管钳位在 $V_o = V_A - V_F = -5 \text{ V}$ 。若考虑二极管的正向压降 $V_F = 0.7 \text{ V}$,那么,输出电压 $V_o = V_A - V_F = -5 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = -5.7 \text{ V}$ 。

(2) 在图例 1.1.8(b)所示电路中,断开二极管 D,有

$$V_{AB} = V_A - V_B = [-10 - (-5)] \text{ V} = -5 \text{ V}$$

可见,二极管 D 接入以后,将承受反向电压,D 处于截止状态(断开),电路中电流等于零(认为反向饱和电流为零),电阻 R 上的电压降等于零,故

$$V_o = V_B = V_C = -5 \text{ V}$$

(3) 在图例 1.1.8(c)所示电路中,首先将 D_1 和 D_2 断开,求得两二极管将承受的电压。

$$\text{对于 } D_1 \text{ 管,有 } V_{B1A} = V_{B1} - V_A = [0 - (-9)] \text{ V} = 9 \text{ V}$$

$$\text{对于 } D_2 \text{ 管,有 } V_{B2A} = V_{B2} - V_A = [-12 - (-9)] \text{ V} = -3 \text{ V}$$

二极管接入以后, D_1 因正偏处于导通状态, V_A 被 D_1 钳位在 -0.7 V ,故

$$V_o = V_A = -0.7 \text{ V}$$

而 $V_{B2A} = [-12 - (-0.7)] \text{ V} = -11.3 \text{ V}$,所以, D_2 因反偏处于截止状态。

(4) 在图例 1.1.8(d)所示电路中,首先将 D_1 和 D_2 断开,求得两管将承受的电压。

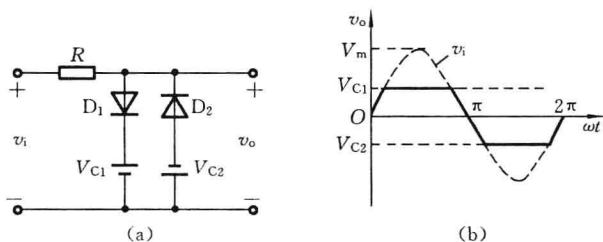
$$\text{对于 } D_1 \text{ 管,有 } V_{AB1} = V_A - V_{B1} = V_A = 15 \text{ V}$$

对于 D_2 管, 有 $V_{AB2} = V_A - V_{B2} = [15 - (-10)] \text{ V} = 25 \text{ V}$

二极管接入以后, D_2 因承受的正向电压较 D_1 高, 优先导通, 使 V_A 钳制在 $V_A = V_{B2} + V_{F2} = (-10 + 0.7) \text{ V} = -9.3 \text{ V}$ 。此时, D_1 因承受反向电压而截止。故

$$V_o = V_A = -9.3 \text{ V}$$

例 1.1.9 二极管的双向限幅电路如图例 1.1.9(a) 所示。设 v_i 为幅值大于直流电源 V_{C1} ($= -V_{C2}$) 值的正弦波, 二极管为理想器件。试画出 v_o 的波形。



图例 1.1.9

解 该电路的输出波形, 取决于二极管 D_1 、 D_2 的工作状态, 因此, 本题的关键是确定二极管 D_1 、 D_2 分别由截止状态转变为导通状态时所需的输入电压值。

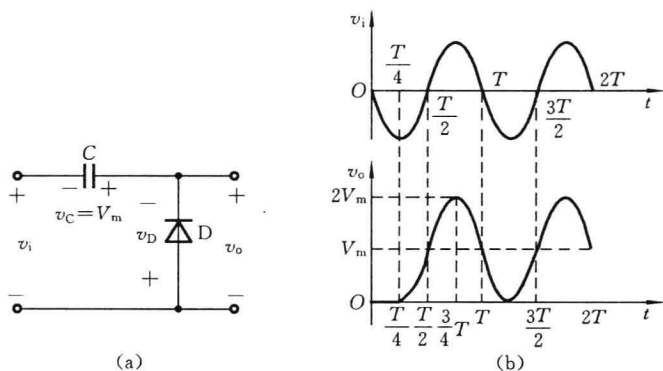
当 v_i 为正半周时, 若 $v_i < V_{C1}$, 二极管 D_1 、 D_2 均截止, 输出电压 $v_o = v_i$; 若 $v_i > V_{C1}$, D_1 因正偏而导通, $v_o = V_{C1}$ 。 D_2 仍反偏截止。

当 v_i 为负半周时, 若 $|v_i| < |V_{C2}|$, 二极管 D_1 、 D_2 均截止, 输出电压 $v_o = v_i$; 若 $|v_i| > |V_{C2}|$, D_2 正偏导通, D_1 截止, $v_o = V_{C2}$ 。

综上所述, 可画出 v_o 的波形如图例 1.1.9(b) 所示。

例 1.1.10 在图例 1.1.10(a) 所示钳位电路中, 已知其输入电压信号 $v_i = -V_m \sin \omega t$, 其波形如图例 1.1.10(b) 所示。设二极管是理想器件, 试画出输出电压 v_o 的波形, 并说明 v_o 钳位在何值。

解 本题中, $v_o = v_C + v_i = -v_D$, 若 $v_D > 0$, D 导通, 电容 C 充电; 若 $v_D < 0$, 则 D 截止, v_C 保持不变。



图例 1.1.10

设 $t=0$ 时, 电容两端电压为 0。在 $0 \sim T/4$ 期间, v_i 为负值, $v_D = -v_i - v_C > 0$, 二极管 D 正偏导通, $V_o = 0$ V, 电容 C 通过 D 充电, v_C 随 v_i 的负向增加而上升至 V_m , 极性如图例 1.1.10(a) 所示。从 $t > T/4$ 开始, $v_D = -v_i - v_C < 0$, 二极管一直反偏截止, 电容无放电, v_C 基本保持不变, 则

$$v_o = v_C + v_i = V_m + (-V_m \sin \omega t) = V_m - V_m \sin \omega t$$

故 $t = T/4$ 时, $v_o = 0$; $t = T/2$ 时, $v_o = V_m$;

$$t = 3T/4 \text{ 时, } v_o = 2V_m; \quad t = T \text{ 时, } v_o = V_m$$

画出 v_o 的波形如图例 1.1.10(b) 所示。可见, v_o 的波形是 v_i 的波形向上平移 V_m , v_o 的负向最大值被钳制在零伏。如果把二极管 D 反接, 则 v_o 的正向最大值被钳制在零伏。

例 1.1.11 电路如图例 1.1.11(a) 和 (b) 所示。试估算流过二极管的电流和 A 点的电位。设二极管的正向压降 V_F 为 0.7 V。

解 (1) 在图例 1.1.11(a) 所示电路中, 首先断开 D, 求得 $V'_A = \frac{V_C}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = 8$ V, 故 D 正偏导通, 由此可得

$$V_A = (6 + V_F) \text{ V} = 6.7 \text{ V}$$

$$I_D = I_1 - I_2 = \frac{V_C - V_A}{R_1} - \frac{V_A}{R_2} = \frac{(10 - 6.7) \text{ V}}{0.5 \text{ k}\Omega} - \frac{6.7 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 3.25 \text{ mA}$$