

职工高等学校试用教材

数 字 电 子 技 术

傅成立 凌印川 汪岳辰 编著
刘殿瑜 蔡惟琪

上海科学技术文献出版社

职工高等学校试用教材

数 字 电 子 技 术

*

上海科学技术文献出版社出版

(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行

上 海 商 务 印 刷 厂 印 刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 22 字数 542,000

1986年10月第1版 1986年10月第1次印刷

印数: 1—10,400

书号: 15192·453 定价: 4.05 元

《科技新书目》120-205

前 言

本教材是根据教育部一九八三年十一月在无锡召开的职工高等工业学校教学大纲审订会审订的“数字电子技术基础”课程教学大纲,并结合江苏、上海地区职工大学、电视大学、业余大学的实际情况编写的。它是供职工高等工业学校电类专业“数字电子技术”课程使用的试用教材,亦可作其它院校有关专业“数字电子技术”课程的教材和教学参考书。

针对职工大学、电视大学、业余大学学生的现状和特点,本教材在内容的深度和广度上尽量贯彻少而精的原则,一方面紧扣大纲规定的基本内容,一方面逐步更新教材,剔除陈腐过时的内容,有选择地充实现代科学技术发展的新东西。对一些理论性较强的题材,在考虑科学性和系统性的同时,着重物理概念和工程实践,使学生更容易理解和接受。在内容的安排上,力图分散难点,减少不必要的重复;在叙述上尽可能注意深入浅出、循序渐进、通俗易懂、便于自学,使学生能在规定的学时内掌握数字电子技术的基本内容。

本教材的主要内容安排如下:

第一章介绍半导体二极管、三极管的开关特性,着重说明开关管的外部特性,对电荷分布和存贮效应等内部特性则不作过多的讨论。MOS管基本工作原理部分应同“模拟电子技术”适当分工,并按具体需要进行增删。本章讨论的重点放在半导体管和MOS管反相器上。

第二章以具有代表性的TTL和MOS门电路为主,重点介绍各种门电路的基本工作原理和逻辑功能,并说明它们的使用条件和使用时的注意事项以供参考。而其它的一些门电路,如HTL、ECL、I²L电路等,考虑到它们的基本工作原理与TTL和MOS门电路类似,所以没有放在本教材中。关于门电路参数的测试等,则可放在实验里去详细说明。

第三章讲述数字电路分析和设计的主要数学工具——逻辑代数的基本内容,重点是化简逻辑函数的方法。

第四章讨论组合逻辑电路的设计和分析。为了在分析电路时能够说明电路的逻辑功能,所以开始先讨论电路的设计,在学生熟悉了电路的逻辑功能后,再讲述电路的分析方法。本章还介绍了使用中、大规模集成电路的设计方法,可以根据条件有选择地介绍几个有代表性的电路。

第五章主要介绍触发器的逻辑功能及其结构特点,常用的时序逻辑部件——寄存器、计数器和分配器,对大规模集成电路产品亦作了适当介绍。

第六章讨论了一般意义上的时序电路,重点放在同步时序电路的分析上。同步时序电路的设计和异步时序电路均属打*号的内容。

第七章叙述脉冲信号的特点,产生脉冲信号的各种振荡器、单稳态电路、斯密特电路等常规电路以及它们的单块集成电路,同时增加了集成时基电路的原理及应用。

第八章简单介绍了模-数、数-模转换电路的基本原理,这部分内容可以放在有关专业课中去讲授。

第九章通过四个典型实例,介绍数字装置的基本组成,整机线路的阅读和分析方法,以期培养学生的“整体”概念。限于学时,本章内容可以仅选讲一、二个或在教师指导下让学生

自学。

现代电子技术的发展是非常迅速的,昨天还是很先进的技术,可能今天就被更完善、更先进的技术所代替,但就其基础而言,已经大体稳定,而基本的分析和设计方法也日趋成熟,由于本课程是电子技术方面的一门技术基础课,所以其主要内容仍是已稳定和成熟的基本理论、概念和方法。另外,适当增加了一些有关中大规模集成电路的新内容,以适应科学技术的新发展,在教学过程中可以根据具体情况选用。

本教材由上海第二工业大学傅成立同志主编,参加编写工作的有上海静安区业余大学刘殿瑜(第一、四章),上海第二工业大学傅成立(第二、三章),凌印川(第五、六章),南京七一二厂职工大学蔡惟琪(第七、八章),苏州机械局职工大学汪岳辰(第九章、附录)。

本教材由上海工业大学孔宪豪副教授、清华大学阎石副教授审订。

本教材在编写过程中曾得到上海市和江苏地区有关职工大学、业余大学许多同志的热情支持和帮助,谨此一并表示衷心的感谢。

对于本教材中存在的错误或不妥之处,恳切希望使用本教材的师生和读者批评指正。

编 者

1985. 11.

目 录

第一章 半导体管的开关特性	
第一节 半导体二极管的开关特性	1
第二节 半导体三极管的开关特性	4
第三节 半导体三极管反相器	9
第四节 MOS 场效应管的开关特性	12
第五节 MOS 场效应管反相器	16
思考题和习题	20
第二章 门电路	
第一节 基本逻辑关系	26
第二节 二极管门电路	29
第三节 三极管门电路	35
第四节 TTL 集成门电路	41
第五节 MOS 集成门电路	59
思考题和习题	70
第三章 逻辑代数基础	
第一节 逻辑代数的基本运算和基本公式	78
第二节 逻辑函数的标准表达式	84
第三节 化简逻辑表达式的方法	94
思考题和习题	109
第四章 组合逻辑电路	
第一节 组合电路的设计	112
第二节 组合电路的分析	124
第三节 使用 MSI 电路和 LSI 电路的组合电路	128
第四节 组合电路的竞争和冒险	151
思考题和习题	155
第五章 触发器与基本时序逻辑部件	
第一节 概述	160
第二节 各种逻辑功能的触发器	162
第三节 触发器的电路结构	168
第四节 基本时序逻辑部件	178
第五节 MSI 电路举例	206
思考题和习题	215
第六章 时序逻辑电路	
第一节 同步时序电路的分析	221

第一章 半导体管的开关特性

在数字电路中,用于接通或切断电路的开关元件,应该具有两种不同的工作状态:一种是接通状态,这时要求元件的等效阻抗极小,在电路中相当于短路作用;另一种是断开状态,这时要求元件的等效阻抗极大,在电路中相当于开路作用。

在数字电路中,半导体二极管、三极管和 MOS 场效应管经常工作在开关状态,它们在数字信号的作用下,时而饱和导通,时而截止,相当于开关的接通和断开。

讨论半导体管的开关特性,就是具体分析它们处在饱和导通或截止两种状态时的静态特性,以及它们在这两种状态之间转换的动态特性。

第一节 半导体二极管的开关特性

一、二极管开关的静态特性

半导体二极管开关的静态特性是指二极管处于稳定导通和稳定截止状态时,所具有的开关特性。

二极管开关的静态特性如图 1.1-1 所示。

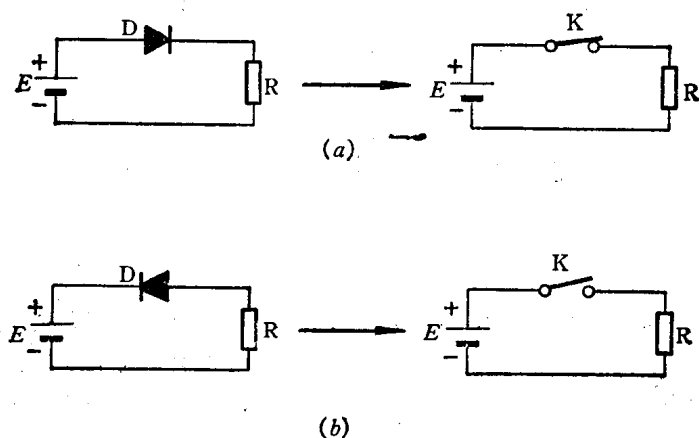


图 1.1-1 二极管开关导通与截止特性

由图 1.1-1 可知,二极管在正向电压作用下处于导通状态,如果不计二极管的正向电压,它相当于一个闭合状态的开关。二极管在反向电压作用下处于截止状态,如果不计二极管的反向电流,它相当于一个断开状态的开关。

二极管开关的静态特性说明二极管具有单向导电特性,这可由二极管的伏安特性曲线来描述,如图 1.1-2 所示。

由图 1.1-2(b)可以看出:当二极管在正向电压作用下,若外加电压 $V < V_T$, 则正向电流 I 约等于 0, 若 $V > V_T$, 则 I 随 V 的增加而增加,且 I 增加很快,而在 V_D 附近 V 却基本不变。其中, V_T 称为二极管的开启电压或阈值电压,对于硅管 V_T 约为 0.5 伏,对于锗管 V_T

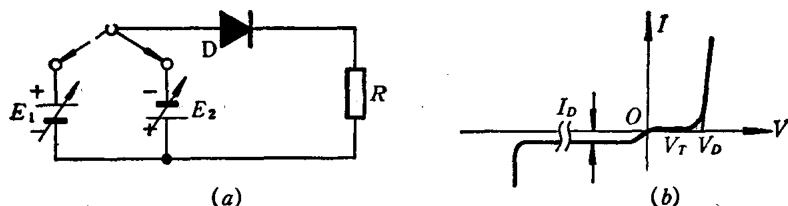


图 1.1-2 二极管的静态特性

约为 0.2 伏。 V_D 称为二极管的正向导通压降, 对于硅管 V_D 约为 0.7 伏, 对于锗管 V_D 约为 0.3 伏。当二极管在反向电压作用下, 外加电压 V 在相当大的范围内变化, 反向电流 I 近似为一个很小的常数 I_0 。 I_0 称为二极管的反向漏电流, 对于硅管 I_0 约为纳安数量级, 对于锗管 I_0 约为微安数量级。

二极管的伏安特性表明, 二极管在正向电压作用下, 有正向电流通过, 处于导通状态, 当正向电流较大时, 相应的等效阻抗很小。这时在电路中, 它相当于一个(具有一定压降的)闭合的开关。在反向电压作用下, 仅有反向漏电流通过, 处于截止状态。一般反向漏电流很小, 相应的等效阻抗非常大。这时在电路中, 它相当于一个(有一定漏电流的)断开的开关。

在数字电路中, 二极管通常工作在大信号的情况下。所谓大信号工作是指作用于二极管电路的输入信号电压幅度在较大范围内变化。这时根据二极管的伏安特性, 对外电路而言可以把二极管等效成如图 1.1-3 所示的大信号等效电路。

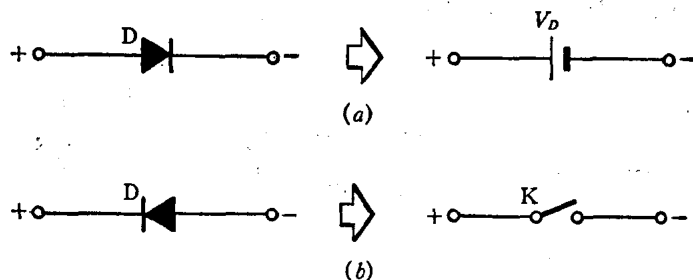


图 1.1-3 二极管大信号等效电路

由图 1.1-3 可以看出, 二极管在大信号情况下工作, 在正向偏置时, 可以等效成一个电压为 V_D 的电压源, 当反向偏置时, 可以等效成一个断开状态的开关。

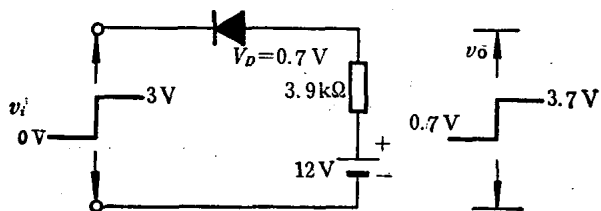


图 1.1-4 二极管的正向箝位作用

二极管在正向偏置的情况下, 它两端的正向压降 V_D 为一恒定值, 和通过它的正向电流 I_D 大小(在一定范围内变化)无关, 因此它具有箝位作用。

例如在图 1.1-4 所示电路中, 当输入电压为 0 伏时, 二极管处在导通状态, 输出电压被箝在 0.7 伏, 在保证二极管正常工作电流的情况下, 它不受电源电压和负载电阻变化的影响。当输入电压为 3 伏时, 输出电压被箝在 3.7 伏, 同样在保证二极管正常工作电流的情况

下,它不受电源电压和负载电阻变化的影响。

利用二极管的正向导位作用,在电路计算中可以很方便地确定连接二极管两端处电位的大小。

二、二极管开关的动态特性

二极管开关的动态特性是指二极管在导通状态和截止状态之间转换时,所具有的过渡特性。

二极管开关的动态特性如图 1.1-5 所示。

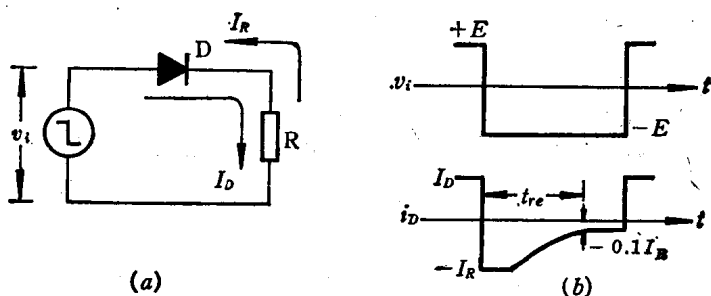


图 1.1-5 二极管的动态特性

对于二极管开关的动态特性可以从两方面进行分析。

1. 二极管从导通向截止转换的过渡特性

由图 1.1-5 可以看出,当二极管 D 的输入信号为 $+E$ 时,它处于正向偏置工作状态,这时 D 导通,则 $I_D = \frac{E - V_D}{R}$,通常 $+E$ 比 V_D 大得多,所以 $I_D \approx \frac{E}{R}$ 。

当输入信号从 $+E$ 突然转换成 $-E$ 时,开始二极管 D 仍处于导通状态, $I_R = -\frac{E + V_D}{R} \approx -\frac{E}{R}$,但反向电流 I_R 维持一段时间后,就按指数规律减小到反向漏电流 I_o 的数值,同时 D 处于反向偏置工作状态,即二极管 D 截止。

因此,二极管从导通向截止转换时,存在一个反向恢复过程。在这个过程中,二极管处于反向导通状态并产生很大的反向电流,只有到这个过程结束之后,反向电流才减少到反向漏电流 I_o 的数值,使二极管处于截止状态。

反映二极管反向恢复过程长短的参数,称为二极管反向恢复时间 t_{re} 。 t_{re} 是指从二极管输入负跳变信号的瞬间开始,到反向电流减少到最大反向电流的十分之一时为止所需要的时间。

二极管的反向恢复时间,实质上就是二极管结电容与扩散电容中存贮电荷在反向电压作用下消散所需要的时间。

2. 二极管从截止向导通转换的过渡特性

由图 1.1-5 可以看出,当二极管 D 从截止向导通转换时,它所需要的过渡时间,即二极管开通时间很小,和二极管反向恢复时间 t_{re} 相比,可以忽略不计。

二极管开关的动态特性,说明二极管从导通到截止的转换过程中,存在一个反向恢复时间 t_{re} 。二极管在 t_{re} 时间内将失去单向导电特性,从而使二极管的开关速度受到限制。为了提高二极管电路的开关速度,必须减小二极管的反向恢复时

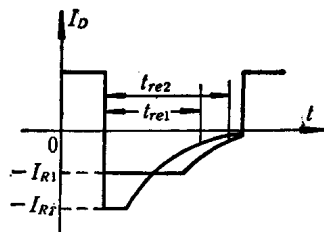


图 1.1-6 二极管反向电流对 t_{re} 的影响

间 t_{re} 。

提高二极管电路工作速度的措施有两个：第一可以选用反向恢复时间 t_{re} 较小的开关二极管。第二尽可能地减小流过二极管的正向电流和加大反向电流。其中反向电流对 t_{re} 的影响如图 1.1-6 所示。

三、二极管的开关参数

(1) 最大正向电流 I_M 指二极管正向电流的最大容许值，在使用时不能超过这一数值。

(2) 最高反向峰值电压 V_{RM} 指二极管反向电压的最高容许值，在使用时不能超过这一数值。

(3) 反向恢复时间 t_{re} 指二极管在规定负载、正向电流及最大反向瞬态电流下，所测出的反向恢复时间，在使用时脉冲信号的工作频率应小于 t_{re} 倒数的十分之一。

(4) 零偏压电容 C_0 指二极管在两端电压为 0 时的等效电容，使用时按需要选择。

例如，2AK15（锗键开关二极管）

$$I_M \geq 250 \text{ mA}, V_{RM} = 12 \text{ V}, t_{re} \leq 150 \text{ ns}, C_0 \leq 1 \text{ pF}$$

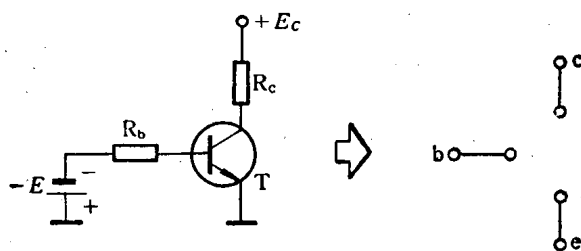
2CK83A（硅台面开关二极管）

$$I_M = 30 \text{ mA}, V_{RM} \geq 15 \text{ V}, t_{re} \leq 5 \text{ ns}, C_0 \leq 5 \text{ pF}$$

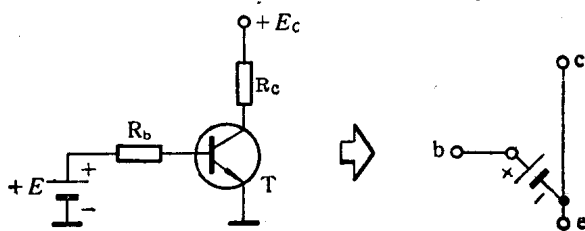
第二节 半导体三极管的开关特性

一、三极管开关的静态特性

三极管开关的静态特性是指三极管处于稳定饱和状态和稳定截止状态时，所具有的开关特性，如图 1.2-1 所示。



(a) 三极管处于截止状态



(b) 三极管处于饱和状态

图 1.2-1 三极管静态开关特性

由图 1.2-1 可以看出, 当三极管 T 输入反向电压时, 处于截止状态, 如果不考虑反向漏电流的影响, 这时三极管的输出端相当于一个断开状态的开关。当三极管 T 输入足够的正向电压时, 合理地选择电路中元件的参数, 使 T 处于饱和状态。如果不计饱和时的管压降, 这时三极管的输出端相当于一个闭合状态的开关。

三极管开关的静态特性说明三极管工作在饱和状态和截止状态时具有开关作用, 它可以由三极管的输出特性曲线来描述, 如图 1.2-2 所示。

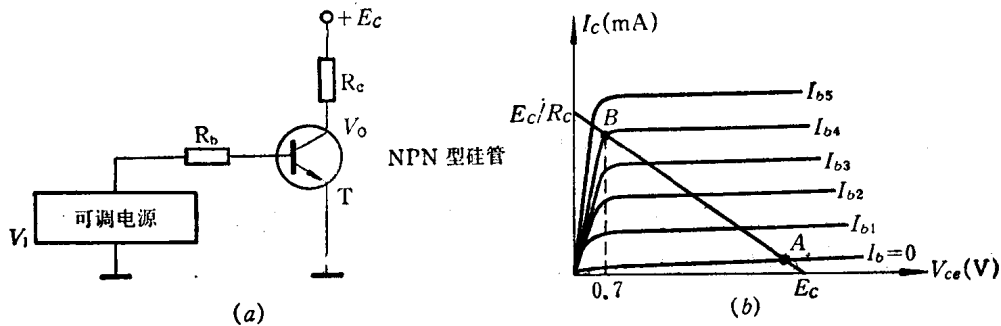


图 1.2-2 NPN 型硅三极管的输出特性

由图 1.2-2 可知, 当可调电源的输出使三极管 T 的输入电压在 $-E$ 到 $+0.5$ 伏之间变化时, T 的发射结电压小于开启电压, 相应的基极电流 $I_b \approx 0$ 。这时 T 的集电结处于反向偏置, 相应的集电极电流 $I_c \approx 0$ 。由 T 的输出电路得出 $V_{ce} = E_c - I_c \times R_c \approx E_c$, 对应于输出特性曲线, 这时三极管工作在 A 点或 A 点以下的位置, 由于 T 的基极电流、集电极电流均等于 0, 所以它工作在截止状态, 相等于一个断开状态的开关。

当可调电源的输出使三极管 T 的输入电压超过 $+0.5$ 伏后, T 的发射结处于正向偏置且大于开启电压。如将 T 的发射结看成一个二极管, 由于二极管的箝位作用, V_{be} 被箝在 0.7 伏, 相应的基极电流 $I_b = \frac{V_i - 0.7 \text{ V}}{R_b}$ 。此时 T 的发射区向基区发射的电子, 在基区内除了少部分和空穴复合产生 I_b 之外, 绝大部分在基区内继续扩散, 最后在集电结边界面处被集电区吸收形成集电极电流 I_c , 这时 I_c 和 I_b 存在 $I_c = \beta I_b$ 的关系, 其中参数 β 是三极管的电流放大系数, 由三极管的输出回路可以得出 $V_{ce} = E_c - I_c \times R_c$ 。当三极管 T 在这段范围内工作时, 随着输入电压 V_i 增加, 基极电流 I_b 相应增加, 集电极电流 I_c 亦随之增加, 结果输出电压 $V_o (V_{ce})$ 减小。只要三极管 T 的集电极和发射极之间的压降 V_{ce} 大于 0.7 伏, 则基极和集电极之间的压降 $V_{be} < 0$, 集电结始终处于反向偏置。对应于输出特性曲线, 这时 T 工作在 A 点和 B 点之间的位置, 集电极电流 I_c 和基极电流 I_b 有 β 倍的关系, 三极管 T 工作在放大状态。

当可调电源的输出继续增加时, 基极电流 I_b 随输入电压 V_i 的增加而增加, 并达到

$$I_b \geq \frac{E_c - 0.7 \text{ V}}{\beta R_c}$$

时, 由

$$V_{ce} = E_c - I_c \times R_c = E_c - \beta I_b \times R_c \leq 0.7 \text{ 伏}$$

可以看出, 这时 $V_{ce} \geq 0$, 三极管的集电结处于零偏置或正向偏置, 此时三极管的集电区已不能全部吸收从发射区发射经基区扩散到集电结边界面处的电子, 因而在 I_b 进一步增加

时, I_c 将不再明显地增加。这时集电极电流 I_c 由外部电阻 R_c 和电源 $+E_c$ 决定,

$$I_c = \frac{E_c - V_{ce}}{R_c} \approx \frac{E_c}{R_c}$$

我们把这时的集电极电流称为集电极饱和电流用 I_{cs} 表示,

$$I_{cs} \approx \frac{E_c}{R_c}$$

把 $\frac{I_{cs}}{\beta}$ 称为基极饱和电流用 I_{bs} 表示; 三极管集电极和发射极之间的电压称为集电极饱和压降, 用 V_{ces} 表示, $V_{ces} = V_{be} - V_{bc}$ 。三极管饱和时, V_{be} 用 V_{bes} 表示 (V_{bes} 称为基极与发射极之间的饱和压降, 通常 V_{bes} 为 0.7 伏), V_{bc} 的数值随三极管的饱和深度而变化, 通常用 $S = \frac{I_b}{I_{bs}}$ 表示三极管的饱和深度 (S 称为饱和系数)。当三极管处于临界饱和状态, 即 $I_b = I_{bs}$ 时, $V_{bc} = 0V$, 这时 $V_{ces} = 0.7V$ 。当三极管处在较深的饱和状态时, V_{ces} 约在 0.1~0.7 伏之间变化, 为了方便 V_{ces} 的数值通常用 0.3 伏表示。由于三极管饱和时集电极和发射极之间的压降很小, 相当于一个闭合状态的开关。

根据以上分析, 现将 NPN 型硅三极管的截止、放大、饱和三种工作状态的条件和特点, 列于表 1.2-1 中。

表 1.2-1 三极管三种工作状态的条件和特点

状态	条 件		特 点				
	V_{be}	I_b	电流	电压	发射结	集电结	c~e间等效电阻
截止	$< 0.5V$	≈ 0	$I_b \approx 0$ $I_c \approx 0$ $I_e \approx 0$	$V_{ce} \approx E_c$	反偏或正偏 $< 0.5V$	反偏	约数百 kΩ 左右 相当于断开
放大	$\approx 0.7V$	$< I_{bs}$ $\approx \frac{E_c}{\beta R_c}$	$I_c = \beta I_b$ $I_e = (1 + \beta) I_b$	$V_{ce} > 0.7V$	正偏 $\approx 0.7V$	反偏	可 变
临界饱和	$\approx 0.7V$	$= I_{bs}$ $\approx \frac{E_c}{\beta R_c}$	$I_c = \beta I_b$ $I_e = (1 + \beta) I_b$	$V_{ce} = 0.7V$	正偏 $\approx 0.7V$	零偏	可 变
饱和	$\approx 0.7V$	$> I_{bs}$ $\approx \frac{E_c}{\beta R_c}$	$I_c \approx \frac{E_c}{R_c}$ $I_e = I_b + I_c$	$V_{ce} \approx 0.3V$	正偏 $\approx 0.7V$	正偏	约数 + Ω 左右 相当于闭合

从表 1.2-1 可以得出判别三极管处于何种工作状态的条件: 当三极管满足 $V_{be} \leq 0.5$ 伏时, 它处于截止工作状态, 通常为了使三极管工作时具有一定的抗干扰能力, 则进一步要求 $V_{be} \leq 0$ 伏, 让它工作在可靠截止状态。当三极管满足 $I_b \geq I_{bs} \approx \frac{E_c}{\beta R_c}$ 时, 它处于饱和工作状态。同样为了使三极管工作时具有一定的抗干扰能力, 进一步要求三极管具有一定的饱和深度, 一般 $s = 2 \sim 4$, 让它工作在可靠饱和状态。当三极管满足 $V_{be} = 0.7$ 伏和 $I_b < I_{bs}$ 时, 则 $I_c = \beta I_b$, 它处于放大工作状态。

二、三极管开关的动态特性

三极管开关的动态特性是指三极管在截止状态和饱和状态之间转换时, 所具有的过渡

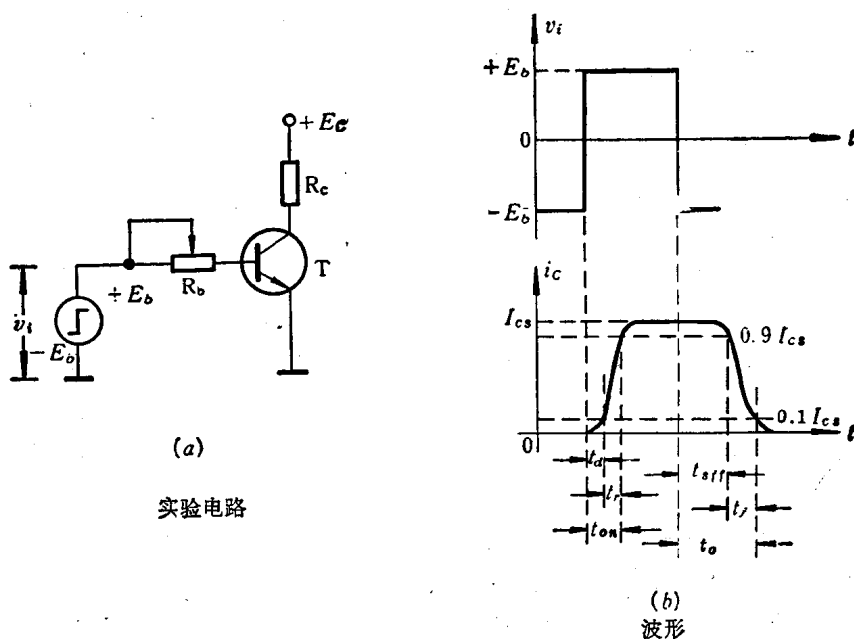


图 1.2-3 三极管的动态特性

特性,如图 1.2-3 所示。

三极管开关的动态特性分析如下:

1. 三极管从截止向饱和转换的过渡特性

由图 1.2-3(b) 所示的波形可知,三极管从截止状态向饱和状态转换是需要时间的,这个时间称为三极管的开通时间 t_{on} ,其中 $t_{on} = t_d + t_r$ 。由于三极管存在开通时间 t_{on} ,从而限制了三极管的开关速度。

(1) 三极管延迟时间 t_d 指从输入信号正跳变的瞬间开始,到集电极电流上升到 $0.1 I_{cs}$ 时为止所需要的时间。

产生三极管延迟时间 t_d 的原因是三极管在反向输入电压作用下处于截止状态。这时发射结处于反向偏置状态,空间电荷区很宽。当输入电压从反向转换成正向时,正向电压首先使空间电荷区由宽变窄。它可以理解为发射结电容的正向充电过程,随着空间电荷区从宽到窄,发射结从反向偏置转换成正向偏置。这时发射区向基区发射电子,注入基区的电子,在基区内形成一定的电子浓度分布梯度。扩散到集电结边缘上的电子被集电区吸收,形成集电极电流。由此得出,三极管从输入正跳变信号开始,发射结电容充电并在基区形成 $0.1 I_{cs}$ 所对应的电子浓度分布,整个过程所需要的时间就是三极管的延迟时间 t_d 。

为了提高三极管的开关速度,减小延迟时间 t_d ,第一可以选用结电容小的高频管和开关管,结电容小相应的充电过程就短, t_d 也就小。第二可以减小反向偏置和增大正向驱动电流。反向偏置小,相应的发射结空间电荷区就较窄,发射结电容的充电时间就短,正向电流驱动大,相应的发射结空间电荷区充电快, t_d 也就小。

(2) 三极管上升时间 t_r 指从 $0.1 I_{cs}$ 开始,到集电极电流上升至 $0.9 I_{cs}$ 为止所需要的时间。

产生三极管上升时间 t_r 的原因是三极管在正向输入电压作用下,基区内已经建立起对

应于 $0.1I_{cs}$ 的电子浓度分布梯度, 因此三极管从建立 $0.1I_{cs}$ 所对应的电子浓度分布, 到建立 $0.9I_{cs}$ 所对应的电子浓度分布, 所需要的时间就是三极管的上升时间 t_r 。

为了提高三极管的开关速度, 减小上升时间 t_r , 第一可以选用基区长度短的高频管和开关管。基区长度短, 建立同样的电子浓度分布梯度, 所需要的电荷量少, 相应的 t_r 也就小。第二可以增大正向驱动电流。正向驱动电流大, 建立一定电子浓度分布梯度就快, 相应的 t_r 也就小。

2. 三极管从饱和向截止转换的过渡特性

由图 1-2-3(b) 所示的波形可知, 三极管从饱和向截止状态转换, 也是需要时间的, 这个时间称为三极管的关闭时间 t_{off} , 这里 $t_{off} = t_s + t_f$ 。其中, t_s 称为三极管的存贮时间, t_f 称为三极管的下降时间。由于 t_{off} 的存在, 同样也限制了三极管的开关速度。

(1) 三极管存贮时间 t_s 指从输入信号负跳变瞬间开始, 到集电极电流下降至 $0.9I_{cs}$ 为止所需要的时间。

产生三极管存贮时间 t_s 的原因是三极管在较大的正向输入电流作用下, 处于饱和状态, 这时集电结处于正向偏置状态, 集电区对电子的吸收能力减弱, 使基区内积累了过剩的电子。另外基区中的多数载流子空穴也要向集电区扩散, 集电区也存在空穴的存贮。当输入电压从正向转换成反向时, 基区和集电区中积累的过剩电荷首先消散。随着过剩电荷的消散, 集电结从正向偏置转换成反向偏置。这时三极管开始脱离饱和状态, 反向电压使基区中的电子浓度分布梯度逐渐减小, 集电极电流亦开始逐步下降。由此分析得出, 三极管从输入负跳变信号的瞬间开始, 过剩的电荷消散, 集电结等效电容放电和基区电子浓度减少到 $0.9I_{cs}$ 所对应的电子浓度分布所需要的时间就是三极管的存贮时间 t_s 。

为了提高三极管的开关速度, 减小存贮时间 t_s , 第一可以选用基区很薄的高频管和开关管, 由于基区薄, 三极管饱和时过剩积累的电荷少, 相应的 t_s 时间也就小。此外开关管采用了掺金工艺, 在基区和集电区内增加了复合中心, 载流子寿命短, 相应的 t_s 时间就更小。第二可以减小正向驱动电流(降低三极管的饱和深度), 增大反向偏置(增加反向驱动电流), 正向驱动电流小, 三极管的饱和程度浅, 积累的电荷就少; 反向偏置大, 过剩积累的电荷消散就快, 相应的存贮时间 t_s 也就小。

(2) 三极管下降时间 t_f 指从 $0.9I_{cs}$ 开始, 到集电极电流下降至 $0.1I_{cs}$ 为止所需要的时间。

产生三极管下降时间 t_f 的原因是三极管在反向输入电压作用下, 基区内电子浓度分布已经下降到对应于 $0.9I_{cs}$ 的电子浓度分布, 反向电压的继续作用, 使基区中的电子浓度分布梯度越来越小, 集电极电流亦逐步减小, 因此三极管从 $0.9I_{cs}$ 所对应的电子浓度分布, 下降到 $0.1I_{cs}$ 所对应的电子浓度分布所需要的时间就是三极管的下降时间 t_f 。

为了提高三极管的开关速度, 减小下降时间 t_f , 第一可以选用基区长度短的高频管和开关管, 基区长度短, 同样的电子浓度梯度, 所对应的电荷量少, 消散快, 相应的 t_f 也就小。第二可以增大反向偏置, 反向偏置大, 一定的电子浓度梯度消散快, t_f 也就小。

三、三极管的开关参数

(1) 电流放大系数 β 指三极管在放大状态时, 集电极电流的变化量 ΔI_c 和基极电流的变化量 ΔI_b 的比值, 即 $\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$ 。

(2) 集电极——发射极反向电流 I_{ceo} 指三极管在基极开路时,集电极与发射极之间的反向漏电流。作为开关,希望 I_{ceo} 小一点好。

(3) 集电极最大允许电流 I_{CM} 指三极管参数的变化不超过规定允许值时的集电极最大电流。使用时不允许超过这一数值。

(4) 集电极——发射极击穿电压 BV_{ceo} 指三极管在基极开路时,集电极与发射极之间在一定条件下的最大允许电压。使用时不容许超过这一数值。

(5) 饱和压降 V_{bes} 、 V_{ces} V_{bes} 指三极管在饱和状态时的发射结正向压降, V_{ces} 指三极管在饱和状态时的集电极-发射极压降。作为开关,希望 V_{ces} 小一点好。

(6) 开通时间 t_{on} 和关闭时间 t_{off} t_{on} 指三极管从截止状态到饱和状态的过渡时间, t_{off} 指三极管从饱和状态到截止状态的过渡时间。使用时开关速度越高,则要求 t_{on} 和 t_{off} 越小。

例如, 3AK20 (PNP 锗合金扩散型小功率高速开关三极管): $\beta=20\sim150$, $I_{ceo}\leq 100\mu A$, $I_{CM}=30mA$, $BV_{ceo}\geq 12V$, $V_{bes}\leq 0.5V$, $V_{ces}\leq 0.4V$, $t_{on}\leq 80ns$, $t_{off}\leq 140ns$ 。

3DK4 (NPN 硅平面型小功率开关三极管): $\beta\geq 20$, $I_{ceo}\leq 10\mu A$, $I_{CM}=800mA$, $BV_{ceo}\geq 15V$, $V_{bes}\leq 1.5V$, $V_{ces}\leq 1V$, $t_{on}\leq 50ns$, $t_{off}\leq 100ns$ 。

第三节 半导体三极管反相器

一、反相器的静态分析

典型的半导体三极管反相器电路如图 1.3-1 所示。

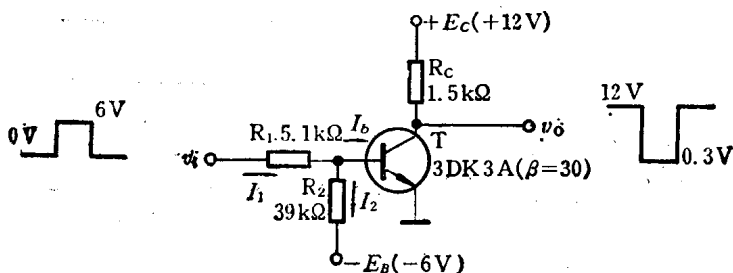


图 1.3-1 反相器电路图

在反相器电路中,引入负电源 $-E_B$ 是为了保证电路能可靠地截止。

由图 1.3-1 所示电路可知,当电路的输入信号 V_I 为 0 伏时,这时三极管 T 处于截止工作状态,基极电流 $I_b=0$,由三极管 T 的基极回路可以得到基极电位:

$$V_{be} = V_I - \frac{V_I - (-E_B)}{R_1 + R_2} \times R_1 = 0 - \frac{0 + 6}{5.1 + 39} \times 5.1 = -0.69V$$

由于 $V_{be} = -0.69 < 0$ (伏),因此三极管 T 处于可靠截止状态。在 T 处于截止状态时,相应的集电极电流 $I_c \approx 0$,根据 T 的输出回路得出,输出信号

$$V_o = V_{ce} = E_c - I_c \times R_c \approx E_c = 12V$$

当电路的输入信号 V_I 为 6 伏时,假设三极管 T 这时处于饱和工作状态, $V_{bes} = 0.7$ 伏, $V_{ces} = 0.3$ 伏,由三极管的输入端可以得出基极电流 $I_b = I_1 - I_2$, 其中:

$$I_1 = \frac{V_I - V_{bes}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_{bes} + E_B}{R_2}$$

$$I_b = \frac{6-0.7}{5.1} - \frac{0.7+6}{39} = 0.87 \text{ mA}$$

根据 T 的输出回路可以得出饱和基极电流:

$$I_{bs} = \frac{I_{cs}}{\beta} = \frac{E_c - V_{ces}}{\beta \cdot R_o} = \frac{12-0.3}{30 \times 1.5} = 0.26 \text{ mA}$$

由于 $I_b = 0.87 \text{ 毫安} > I_{bs} = 0.26 \text{ 毫安}$, 三极管 T 处于饱和状态, 这和原来的假设情况一致。在 T 处于饱和状态时, 相应的集电极与发射极间的压降 $V_{ces} \approx 0.3 \text{ 伏}$, 所以输出信号:

$$V_o = V_{ces} \approx 0.3 \text{ V}$$

从以上分析可知, 当反相器输入低电平 $V_{IL} = 0 \text{ 伏}$ 时, 输出高电平 $V_{OH} = 12 \text{ 伏}$; 当反相器输入高电平 $V_{IH} = 6 \text{ 伏}$ 时, 它输出低电平 $V_{OL} = 0.3 \text{ 伏}$ 。

由此可以列出反相器电路的截止条件和饱和条件:

截止条件:

$$V_{be} = V_{IL} - \frac{V_{IL} - (-E_B)}{R_1 + R_2} \times R_1 \leq 0.5 \text{ V}$$

饱和条件:

$$I_B = \frac{V_{IH} - V_{bes}}{R_1} - \frac{V_{bes} - (-E_B)}{R_2} \geq \frac{E_c - V_{ces}}{\beta \cdot R_o}$$

二、反相器的动态分析

反相器电路在输入矩形脉冲信号时, 由于三极管开关参数和电路负载电容或分布电容的影响, 相应的输出波形将发生延迟和变化(即失真)如图 1.3-2 所示。

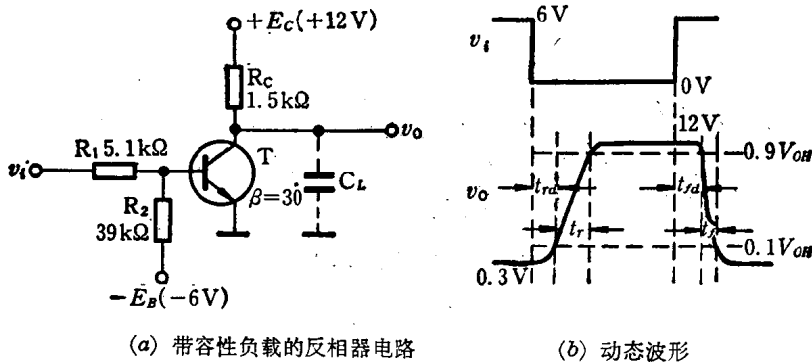


图 1.3-2 反相器的动态特性

由图 1.3-2(b) 所示的波形看出, 当反相器电路的输入电压波形从 6 伏向下跳到 0 伏时, 相应的输出波形要经过一段上升延迟时间 t_{rd} 和一段上升时间 t_r 之后才能从 0.3 伏上升到 12 伏; 当反相器电路的输入电压波形从 0 伏向上跳到 6 伏时, 相应的输出波形要经过一段下降延迟时间 t_{fd} 和一段下降时间 t_f 之后才能从 12 伏下降到 0.3 伏。由于反相器输出波形的延时和变化, 将影响反相器电路的工作速度。

(1) t_{rd} (反相器的上升延迟时间) 指从输入信号 V_i 下跳瞬间开始, 到输出电压 V_o 上升到 $0.1V_{OH}$ 为止所对应的一段时间。它主要由三极管的存贮时间 t_s 决定。

(2) t_r (上升时间) 指电路在输入下跳信号之后, 输出电压 V_o 从 $0.1V_{OH}$ 上升到 $0.9V_{OH}$ 所对应的一段时间。它主要由时间常数 $R_o \cdot C_L$ 所决定。这是因为反相器输出端电压的变化一方面决定于三极管的下降时间 t_f , 一方面决定于输出等效电容 C_L 的充电时间, 通常

由于 $R_c C_L$ 较大, t_r 主要由 $R_c C_L$ 决定。

(3) t_{fd} (反相器的下降延迟时间) 指从输入信号 V_i 上跳瞬间开始, 到输出电压 V_o 下降到 $0.9V_{OH}$ 为止所对应的一段时间。它主要由三极管的延迟时间 t_d 决定。

(4) t_f (下降时间) 指电路在输入上跳信号之后, 输出电压 V_o 从 $0.9V_{OH}$ 下降到 $0.1V_{OH}$ 所对应的一段时间。它主要由三极管的上升时间 t_r 所决定。

以上分析说明在反相器电路中, 由于各段开关时间的影响, 输出电压波形不仅滞后于输入电压波形, 而且在上升边沿和下降边沿处还产生一定的变化。反相器电路的各段开关时间, 不仅取决于三极管的开关参数, 而且和电路中的元件参数也有很大关系。如果将输出电压波形的上升沿和下降沿作一下比较, 就可发现上升沿所需要的时间比下降沿所需要的时间更长一些, 因此上升边沿的延迟是影响反相器电路工作速度的主要因素, 而上升沿主要由反相器电路的元件参数决定。所以反相器电路中元件参数的选择, 对反相器电路的工作速度是有很大影响的, 如图 1.3-3 所示。

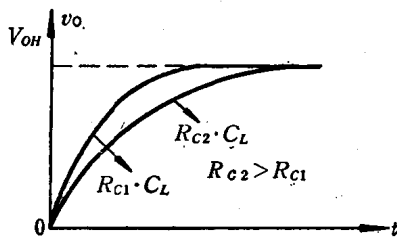


图 1.3-3 电路参数对开关时间的影响

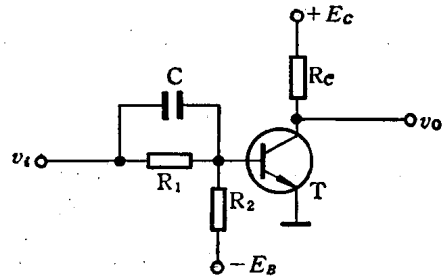


图 1.3-4 带加速电容的反相器电路

三、改善反相器动态特性的方法

为了提高反相器电路的工作速度, 要求减小反相器电路的各段开关时间。

首先可以选用开关管来组成反相器电路。开关三极管的结构和工艺决定了它所对应的各段开关时间参数都比较小。其次可以合理地选择反相器电路的元件参数, 以加速电路在截止状态和饱和状态之间的转换过程, 达到提高电路工作速度的目的。

为了显著地改善反相器电路的动态特性, 以获得更高的工作速度, 还可以采用以下两个措施:

(1) 采用加速电容电路, 如图 1.3-4 所示。

在图 1.3-4 所示电路中, 当 V_i 输入下跳变信号时, 由于电容器 C 两端的电压不能突变, 三极管 T 的基极电位相应下跳。此时基极电位 V_b 较低, 对 T 形成一个很大的基极反向电流 $-I_b'$, 迅速地驱散基区中过量的存贮电荷, 存贮时间 t_s 显著地减小, 促使 T 很快地向截止状态转换, 改善了输出电压波形的上升边沿。待反相器电路进入稳态之后, 输入低电平经 R_1 和 R_2 分压, 使 T 的基极电位 V_b 不至于过低, 因而对输出波形的下降沿不会产生什么影响。

同样, 当 V_i 输入上跳变信号时, 由于电容器 C 两端的电压不能突变, 三极管 T 的基极电位相应上跳。此时 V_b 电位较高, 对 T 形成一个很大的基极正向电流 $+I_b'$ 。它迅速地使三极管 T 开通, 延迟时间 t_d 显著地减小, 促使 T 很快向饱和状态转换, 改善了输出电压波形的下降边沿。待反相器电路进入稳态之后, 输入经 R_1 和 R_2 的分流作用, 使 T 的基极电流

I_b 不至于过大, 因而对输出波形的上升沿不会产生什么影响。

由此分析得出, 加速电容 C 不仅改善了输出波形的上升沿, 而且也改善了输出波形的下降沿, 使整个反相器电路的工作速度得到了提高。有加速电容的反相器的动态波形如图 1-3-5 所示。

(2) 采用箝位电路, 如图 1-3-6 所示。

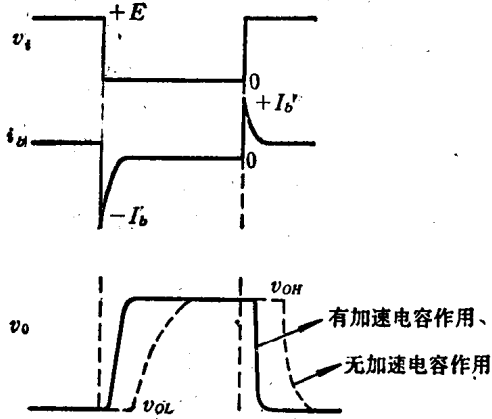


图 1-3-5 有加速电容的反相器的动态波形

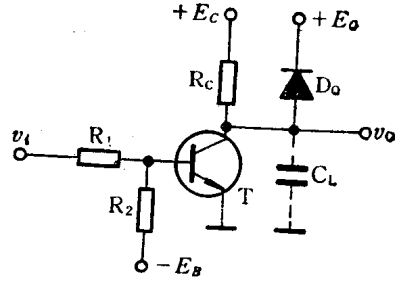


图 1-3-6 有箝位电路的反相器电路

在反相器电路的各段开关时间中, 以上升时间 t_r 的影响最大, 当反相器电路不带箝位电路时, 三极管 T 截止之后, 电源 $+E_c$ 经电阻 R_c 向电容 C_L 充电, 时间常数 $\tau = R_c \cdot C_L$ 。经 $3 \sim 5\tau$ 时间, 输出电位从低电平 V_{ces} 上升到高电平 $+E_c$ 。为了减小上升时间, 就需要减小 R_c 的阻值。但 R_c 的减小将使电路其他指标变差, 所以不能单纯靠减小 R_c 来改善输出波形的

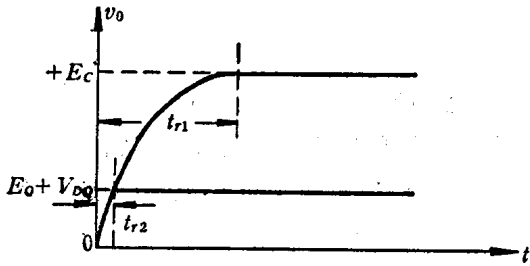


图 1-3-7 箝位电路对输出电压波形的影响

输出电压波形上升沿将得到明显的改善。有箝位电路反相器的输出电压变化, 如图 1-3-7 所示。

由图 1-3-7 可知, 当反相器电路不带箝位电路时, 它的上升时间为 t_{r1} 。当反相器电路带箝位电路时, 它的上升时间为 t_{r2} 。显然 t_{r2} 要比 t_{r1} 小得多, 输出电压波形的上升沿获得了显著改善。

第四节 MOS 场效应管的开关特性

半导体管主要分为两类, 第一类为双极型, 它的两种极性不同的载流子空穴和电子都参与导电, 如 NPN 型三极管。第二类为单极型, 它只有一种载流子空穴或电子参与导电, 如 MOS 场效应管。

本节以 N 沟道增强型 MOS 场效应管为例, 讨论 MOS 管的结构、工作原理、特性曲线和