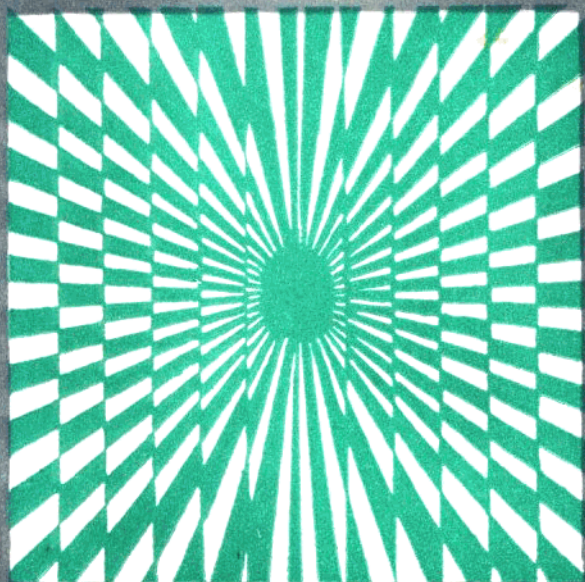


电子技术学习指导书

李西平 沈雅芬 王金城 编



DIAN ZI JI SHU
XUE XI ZHI DAO SHU

中央广播电视大学出版社

前 言

本书是为配合中央广播电视大学电子技术课程教材而编写的学习指导书。

本书分两部分,第一部分为学习指导,第二部分是实验。

根据电大生和自学生的学习特点,学习指导部分,基本教学内容一节以突出基本概念、基本原理和基本分析方法为宗旨,引导学生抓住重点、突破难点,力求做到主次分明,详略得当。为了帮助学生巩固所学的知识,掌握正确的解题思路和解法,学习指导部分还对精选的典型综合练习题进行了较为详尽的解析。

培养实验技能是提高学生分析问题与解决问题能力的重要手段,而实验技能的培养又是建筑在基本理论的掌握上的。为此,在实验部分所列出各实验的简述中,贯穿了对与该实验内容有关的基本理论问题的说明,学生在实验前务求充分理解。

参加本书编写工作的有李西平(1至6章)、沈雅芬(7至13章)、王金城(实验部分)等。在编写过程中,曾得到魏志源教授和任为民副教授的具体指导。此外,天津电大电气系为实验部分的顺利编写亦给予了热忱的帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

由于水平有限,兼之时间甚为匆促,书中难免有欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1991年7月15日

目 录

第一部分 学习指导

第一章 半导体器件	1
第二章 放大电路基础	15
第三章 差动放大电路及理想运算放大器	27
第四章 放大电路中的反馈	33
第五章 集成运算放大器及其应用	40
第六章 直流稳压电源	57
第七章 逻辑代数基础	71
第八章 门电路	84
第九章 组合逻辑电路	105
第十章 触发器	117
第十一章 时序逻辑电路	126
第十二章 脉冲的产生与整形电路	141
第十三章 数模、模数转换器和半导体存储器	155

第二部分 实 验

实验一 常用电子仪器的使用练习及单管放大电路	163
实验二 集成运放的应用	173
实验三 门电路及触发器功能测试	178
实验四 组合逻辑电路	184
实验五 可控硅整流	187
实验六 集成 555 电路的应用	191
实验七 简单设计型实验	195
附录一 TVU-854 型实验箱简介	200
附录二 TVU-1 型实验箱简介	200

第一部分 学习指导

第一章 半导体器件

本章的重点是器件的外部性能,对器件内部的微观物理过程,教材中仅作扼要介绍,不求深入。但考虑到读者在学习过程中可能会产生一些涉及到半导体导电机理方面的疑问,故在此就半导体晶体结构先略作介绍。为便于格式统一,此部分亦归入教学基本内容中。

一、教学基本内容

(一) 半导体

1. 半导体的特性

半导体之所以获得广泛应用,取决于它自身具有一些独特的性能。例如,半导体的导电能力会随温度、光照、掺入杂质而显著变化。特别是掺杂,它是半导体能够制造成各种晶体管及集成电路的基本依据。

2. 半导体的共价键结构

目前制作晶体管最常用的有锗、硅等半导体材料。锗原子中有 32 个电子,分四层围绕原子核运动。硅原子中有 14 个电子,分三层围绕原子核运动。锗和硅原子结构的共同特点是最外层的电子都是 4 个。最外层的电子称为价电子,所以锗和硅都是四价元素。鉴于靠近原子核内几层上的电子受原子核束缚力较大,很少有跃出的可能,故而为分析方便起见,这里将锗和硅原子结构用图 1-1(a)所示的简化图来表示。应当提及,原子核带正电荷,电子带负电荷,正负电荷量相等,原子应呈中性,简化图的描绘亦遵循此意。

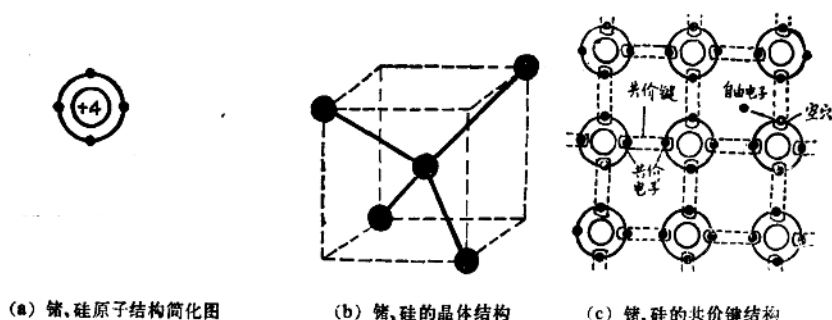


图 1-1 锗、硅的原子结构及晶体结构图

将锗或硅半导体材料提炼成单晶体时,它们就要按四角形系统组成晶体点阵,即每个原子是处于正四面体中心,而有四个其它原子位于四面体的顶点,如图 1-1(b)所示。由于原子彼此距离很近,因此若将价电子所在的外层看成平面的话,相邻原子的外层则环接在一起。这

样,原来分属于每个原子的价电子就要受到相邻原子的影响而使价电子为两个原子所共有。这意味着,原子间所共有的价电子形成了一种运动结构,这种运动结构称为共价键。由于共价键有很强的结合力,故价电子不易脱离外层,图 1-1(c)是锗或硅晶体构成共价键的示意图。

3. 半导体的载流子

在室温下(25℃),有少数电子由于热激发可以摆脱共价键的束缚而成为自由电子。同时在原来共价键的位置上留下一个缺少负电荷的空位,这个空位称为空穴(见图 1-1(c))。这个空穴不仅为其它共价键中的价电子提供了递补的空位,且为新的空穴的产生创造了条件。

自由电子和空穴均为运载电荷的粒子,故统称载流子。在外电场作用下,二者运动的方向是相反的,但形成电流的方向是相同的。

在纯净的半导体中,自由电子和空穴总是成对地产生,相遇复合时也是成对地消失,因此两者的数目总是彼此相等的。

(二) 杂质半导体

纯净的锗或硅半导体中掺入某些杂质则称为杂质半导体。

P 型半导体:

掺入三价元素 { 多子——空穴(主要由掺杂形成)
 { 少子——电子(本征激发产生)

N 型半导体:

掺入五价元素 { 多子——电子(主要由掺杂形成)
 { 少子——空穴(本征激发产生)

杂质半导体仍呈电中性,故有下式成立:

P 型半导体:

空穴数 = 自由电子数 + 负离子数

N 型半导体:

自由电子数 = 空穴数 + 正离子数

(三) PN 结及其特性

PN 结的形成是载流子扩散与漂移达到动态平衡的体现。因此,理解载流子两种不同的运动方式当为首要。现作表 1-1 加以说明

表1-1

运动方式	产生的原因	载流子运动方向	电流方向
扩 散	浓度分布不均匀	浓度高处向浓度低处	电子: 反运动方向 空穴: 同运动方向
漂 移	电场力的作用	电子: 逆电场方向 空穴: 顺电场方向	同电场方向

1. PN 结的形成

P 区和 N 区载流子的浓度差→引起多子向对方扩散→产生空间电荷层形成内电场→阻止扩散,产生少子漂移→当扩散和漂移达到动态平衡→形成稳定的空间电荷层,即 PN 结。

2. PN 结单向导电性

加正偏(P 正 N 负): 削弱内电场, 扩散大于漂移, 允许正向电流通过。此电流主要由多子引起, 其大小取决于外加电压。

加反偏(P 负、N 正): 增强内电场, 漂移大于扩散, 产生的反向电流很小。此电流主要由少子引起, 在一定电压范围内, 其大小近似不变, 故而又称其为反向饱和电流。

3. PN 结的温度特性

反向饱和电流 I_s 由少子漂移形成, 而少子的产生依赖于本征激发, 所以温度升高使得 I_s 迅速增大。

4. PN 结的电容效应

工作频率愈高电容效应愈明显, 将影响 PN 结的单向导电特性。

耗尽层电容 C_i : 外加电压的增高或降低导致空间电荷层结宽的减薄或增厚, 这好像有一部份电子和空穴“存入”PN 结, 或从 PN 结中“取出”, 这与普通电容在外加电压作用下进行“充、放电”的过程相似, 故可用平板电容公式计算

$$C_i = \epsilon \frac{A}{l} \quad (1-1)$$

注意: 偏置电压正向增加 C_i 增大 (l 减小), 偏置电压正向减小 C_i 减小 (l 增大)。

扩散电容 C_d : 扩散电容是由于 P 区空穴和 N 区电子在扩散过程中的积累引起的。以 N 区为例, 当 PN 结外加正压时, 注入 N 区的少子空穴大致分布情况见图 1-2。为维持 N 区内整体的电中性, 即是说为形成正向电流, 外电路需提供 N 区相同数量的多子电子。当电流源源不断地流过时, N 区内的少子空穴和多子电子的动态积累亦维持下去, 积累量即为扩散电容“两极板”上的总电荷量。

应当提及: 在高频运用时, PN 结施加正压或反压, 产生的电容效应的程度不同。图 1-3 高频等效电路, 其中 r 表示结电阻, C 表示结电容, 包括耗尽层电容 C_i 和扩散电容 C_d 。

当 PN 结处于正偏置时, r 为正向电阻, 数值很小。由于积累在 P 区的电子和 N 区的空穴随正向电压的增加而很快增加, 扩散电容较大, 因此结电容较大 (主要决定于扩散电容)。当 PN 结处于反偏置时, r 为反向电阻, 数值很大。此时由于载流子数目很少, 因此扩散电容数值很小, 结电容主要决定于耗尽层电容 C_i , 其数值较小。

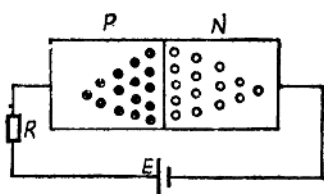


图 1-2 载流子扩散引起电荷的积累

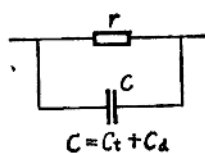


图 1-3 PN 结的高频等效电路

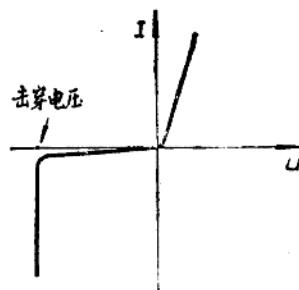


图 1-4 PN 结的击穿

5. PN 结的反向击穿

图 1-4 表示当 PN 结施加反压达到一定数值时, 反向电流突然增加的情况。

必须指出: 雪崩击穿和齐纳击穿均为电击穿, 是可逆的。即是说, 当施加的反压降低后,

PN 结仍可恢复原来的状态。但是，如果反向电流和反压的乘积超过 PN 结所容许的耗散功率，结温过高可烧毁 PN 结，这种现象称为热击穿。

雪崩击穿 $> 6 \text{ V}$

齐纳击穿 $< 6 \text{ V}$

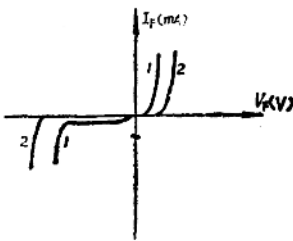
(四) 半导体二极管

半导体二极管应用极为广泛。其结构：PN 结。

1. 二极管的性能

硅、锗二极管的性能比较见表 1-2。

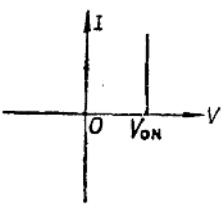
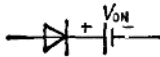
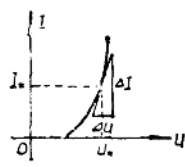
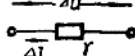
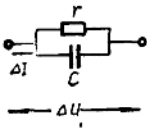
表 1-2

	导通电压	反向饱和电流	伏、安关系式	伏、安特性曲线
硅管	约 0.7V	小 每升 10°C 加倍	$I = I_s(e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$	
锗管	约 0.3V	大 每升 10°C 加倍		

注：表中曲线 1 所指为锗管，曲线 2 所指为硅管。

2. 二极管电路模型

表 1-3

	伏安特性	等效电路	应用场合
开关电路模型			只呈现开或关两种状态，可用作开关器。适用于 r 及 I_s 可忽略的情况
微变等效模型		低频时：  高频时： 	在小信号工作状态下，用来分析静态工作点附近电流、电压的变化情况

注：①表中 U_T 为温度电压当量，室温下有 $r = \frac{26 \text{ mV}}{I_s}$ ，一般在几 Ω ~ 几十 Ω 之间。

②图中电压参数 $V(v)$ 均为 $U(u)$ ，以下同。

二极管特性的两种主要描述方法及等效电路示于表 1-3。

3. 二极管主要参数

半导体器件的参数反映了器件在各方面的电性能,是合理选择和正确使用的依据。

在一般的半导体器件手册中,给出的二极管参数大致可分为以下三类:

极限参数:最大整流电流和最高反向工作电压。

直流参数:正向平均电流、反向饱和电流、反向击穿电压、正向压降。

交流参数:结电容、最高工作频率。

用的最多的参数是正向平均电流和最大反向工作电压。

(五) 稳压管

稳压管工作于反向击穿状态,是具有稳压特性的特殊二极管。

注意:电路中必须接有限流电阻,使其功率不超过额定值。

稳压管的伏安特性曲线与普通二极管类似,故不再赘述。应提及的是,因其工作于反向击穿状态,所以性能参数均围绕着击穿区域。使用时,主要考虑稳定电压、动态电阻及额定功耗等。

(六) 双极型晶体管

双极型晶体管又称半导体三极管(管子对外有三个引出线),它是通过一定的工艺,将两个 PN 结结合在一起的器件。由于两个 PN 结间的相互作用,使双极型晶体管体现出不同于单个 PN 结的特性而具有电流放大功能。

1. 结构与种类

有两个互相联系的 PN 结——发射结和集电结。为获得放大特性,必须使发射区、基区和集电区的掺杂浓度不同。 e 区最高、 c 区次之、 b 区最弱。基区的宽度很小。

三个区域的功能:

发射区——向基区发射载流子;

基区——传输载流子;

集电区——收集载流子。

半导体三极管种类很多,按频率分,有高、低频管;按功率分,有小、中、大功率管;按半导体材料分,有硅、锗管等。分类方式及标号可查阅晶体管手册。

2. 放大的条件

(1) 偏置的条件

发射结——正向偏置

集电结——反向偏置

NPN 管: $U_c > U_b > U_e$

PNP 管: $U_c < U_b < U_e$

(2) 工艺的条件

基区做的很薄且杂质浓度比发射区低得多。

3. 放大原理

利用电子或空穴(NPN 管或 PNP 管)在基区的扩散和复合这一矛盾,使扩散大大超过复合,在线性区 I_c 和 I_b 两者的比例基本一定,通过改变 I_b 的大小来达到控制 I_c 的目的。

4. 电流分配关系

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

$$I_E = I_C + I_B$$

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

共基电流放大系数:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \approx 1$$

共射电流放大系数:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

5. 三极管的特性曲线

三极管内部物理过程反映到外部电路,就是三极管各极电压和电流间的相互关系,可用特性曲线来表示。教材中介绍的为共射接法下的特性曲线(NPN型)。

(1) 输入特性曲线

输入特性曲线是指 u_{CE} 一定时, $i_B = f(u_{BE})|_{u_{CE}=\text{常数}}$ 的关系曲线。

i_B 是 u_{BE} , u_{CE} 的多元函数。当 u_{BE} 一定时, u_{CE} 大, i_B 小。这是由于从发射区注入基区的电子在 u_{CE} 增大时,集电结内电场的加强使其更多地移入集电区,进而在基区复合的电子数减少,故 i_B 减小(见图 1-5(a)虚线所示)。当 $u_{CE} \geq 3 \text{ V}$ 以后, i_B 将不随 u_{CE} 改变。这是因为集电结内电场的加强如果足以收集大部分电子进入集电区,那么在 i_B 一定的情况下, u_{CE} 的再增大,也不会有更多的电子进入集电区。因此,当 $u_{CE} > 3 \text{ V}$ 后,输入特性曲线变化甚微。

(2) 输出特性曲线

i_C 是 i_B , u_{CE} 的多元函数,即 $i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$ 。前已叙及,当 $u_{CE} > 3 \text{ V}$ 后, i_C 几乎不受 u_{CE} 的影响。

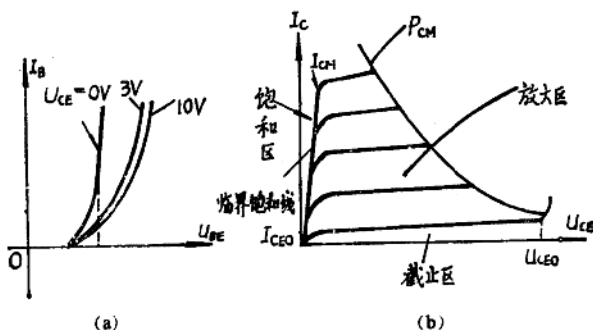


图 1-5 共射的输入、输出曲线

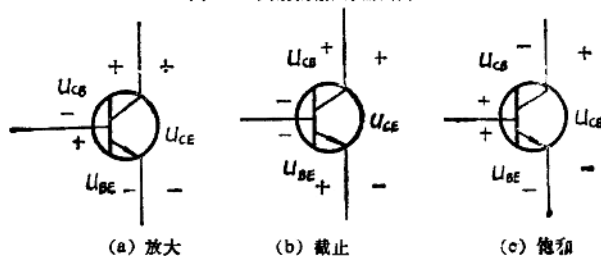


图 1-6 三极管的三种工作状态

图 1-5(b) 标出了三极管的三个工作区域

所谓截止, 意指发射结由于反向偏置, 输入端不能注入电流。

所谓饱和, 意指集电结为正向偏置, 集电结失去收集基区电子的能力, i_c 不再受 i_b 控制。

图 1-6 标出三极管在三种工作状态下, 各极间相对的电压极性。

6. 主要参数

三极管的主要参数在输出特性曲线上均有反映, 见图 1-5(b)。

由 I_{CM} 、 P_{CM} 、 I_{CEO} 、 U_{CEO} 以及临界饱和线所包围的区域为放大区, 而曲线间隔反映 β 。由此可见, 三极管的参数不是各自孤立的, 它们互有联系并确定了放大区。

前已叙及, 三极管的电流放大作用体现在基极对集电极的控制上。而 I_{CBO} 、 I_{CEO} 是不受控的, 是妨碍三极管正常放大的潜在内因, 这里仅就其产生和影响略作说明。

集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO} 表示发射极开路, c, b 间加上一定反向电压后产生的反向电流, 它实际上和单个 PN 结的反向电流一样。

在一定温度下, 这个反向电流基本上是个常数, 所以称为反向饱和电流。

集电极-发射极间反向饱和电流 I_{CEO} 表示基极开路, c, e 间加上一定反向电压时的集电极电流, 由于这个电流贯穿三区, 故又称穿透电流。当 c, e 间加上电压 u_{CE} 后, 载流子运动情况如图 1-7 所示。

集电结在反压作用下, 集电区的少子空穴就要漂移到基区。同时, 发射结在正压作用下, 发射区多子电子也要扩散到基区。由于基极开路, 空穴与电子只能在基区复合, 然而电子的数量远多于空穴, 故大部份电子仍过集电结到达集电区。根据三极管电流分配规律: 发射区每向基区供给一个复合用的载流子, 就要向集电区供给 β 个载流子, 因此, 到达集电极的电子数等于在基区复合数的 β 倍。于是有

$$I_{CEO} = I_{CBO} + \beta I_{CBO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$

I_{CBO} 和 I_{CEO} 均是衡量三极管稳定性的重要参数。由于 I_{CEO} 是 I_{CBO} 的 $(1 + \beta)$ 倍, 因此 I_{CEO} 对三极管工作影响更大。一般锗管的 I_{CEO} 在几十微安以上, 硅管在几微安以下, 所以对于制作于硅片上的集成电路来说, I_{CBO} 的影响较小。而对于分立元件电路, 尤其是锗管, I_{CEO} 的影响必须考虑。

(七) 场效应晶体管(FET)

1. 场效应管的主要特点

比较场效应管(FET)和双极型晶体管(BJT)的结构及性能(见表 1-4), 可见场效应管具有以下特点:

- (1) 输入电阻高
- (2) 温度稳定性好

FET 是单极型, 只有沟道中多子参与导电, 所以稳定性好。

- (3) 工艺简单, 便于集成。

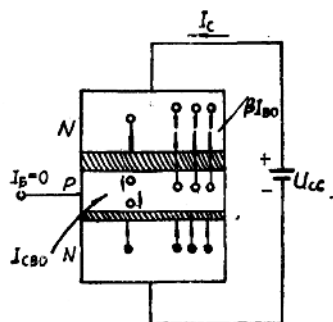


图 1-7 穿透电流的形成

表1-4

类型	控制电极	输入回路	输入电阻 Ω	控制方式	放大系数
FET	栅极 G	结型: 反偏的PN结	很高 10^9	电压控制 $\Delta u_{GS} \xrightarrow{(g_m)} \Delta i_D$	$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}}$
		MOS: 有氧化膜绝缘	极高 10^{14}		
BJT	基极 B	正偏的PN结	较低 $< 10^4$	电流控制 $\Delta I_B \xrightarrow{(\beta)} \Delta I_C$	$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

2. 场效应管的类型

(1) 按结构分

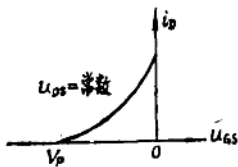
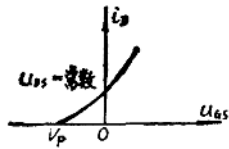
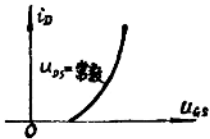
$$\text{FET} \begin{cases} \text{结型 (JFET)} \begin{cases} \text{N 沟道} \\ \text{P 沟道} \end{cases} \\ \text{绝缘栅 (MOSFET)} \begin{cases} \text{N 沟道 (NMOS)} \\ \text{P 沟道 (PMOS)} \end{cases} \end{cases}$$

(2) 按特性分

$$\text{FET} \begin{cases} \text{耗尽型} \begin{cases} \text{JFET} \\ \text{MOSFET} \end{cases} \\ \text{增强型} \text{—— MOSFET} \end{cases}$$

3. 场效应管的特性曲线

表1-5

类型	转移特性曲线	偏置要求
结型 NJFET		$U_P < u_{GS} < 0$ U_P : 夹断电压
耗尽型 NMOS		$u_{GS} > U_P$ U_P : 夹断电压
增强型 NMOS		$u_{GS} > U_T$ U_T : 开启电压

(1) 转移特性

$$i_D = f(u_{GS}) |_{u_{DS} = \text{常数}}$$

上式反映出 u_{GS} 对 i_D 的控制作用。

表 1-5 示出 JFET 管和 MOS 管的转移特性

耗尽型 NMOS 管和 JETT 管在放大区的转移特性可近似用下式表示

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_P} \right)^2$$

(2) 输出特性

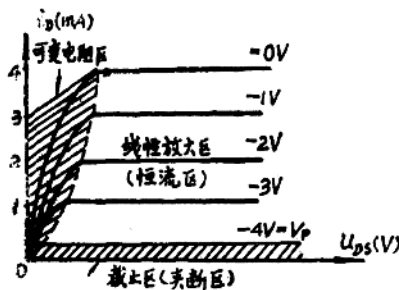
$$i_D = f(u_{DS}) |_{u_{GS} = \text{常数}}$$

上式反映出 u_{GS} 对 i_D 的控制作用和 u_{DS} 对 i_D 的影响。

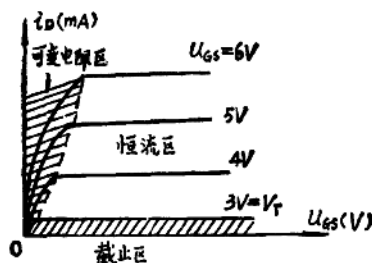
JFET 管和 MOS 管的输出特性曲线相似, 仅 u_{GS} 取值范围不同。

图 1-8(a)、(b) 反映出共同的工作情况:

$$\begin{aligned} \text{可变电阻区} & \begin{cases} u_{DS} \uparrow \xrightarrow{u_{GS} \text{ 不变}} i_D \uparrow & (\text{电阻特性}) \\ u_{GS} \uparrow \xrightarrow{u_{DS} \text{ 不变}} i_D \uparrow & (\text{压控电阻}) \end{cases} \\ \text{恒流区} & \begin{cases} u_{DS} \uparrow \xrightarrow{u_{GS} \text{ 不变}} i_D \text{ 恒定} & (\text{恒流特性}) \\ u_{GS} \uparrow \xrightarrow{u_{DS} \text{ 不变}} i_D \uparrow & (\text{受控电流}) \end{cases} \end{aligned}$$



(a) N-JFET 输出特性曲线



(b) 增强 NMOS 输出特性曲线

图1-8 输出特性曲线

4. 几个问题的讨论

(1) 电流的形成是管内载流子的迁移通过外部电源提供载流子的递补来实现的, 因此当夹断后, 如果整个沟道完全被耗尽层填满, 耗尽层中仅有不可移动的正、负离子, 故无电流。

(2) 预夹断条件是分析场效应晶体管工作状态的依据

预夹断的条件:

$$u_{DS} = u_{GS} - U_P \quad (\text{即 } u_{GD} = U_P) \quad \text{JFET 和耗尽型 MOS 管}$$

$$u_{DS} = u_{GS} - U_T \quad (\text{即 } u_{GD} = U_T) \quad \text{增强型 MOS 管}$$

在分析时, 需注意各参数的极性。在典型例题解析中将结合具体实例再行讨论。

(3) u_{DS} 和 u_{GS} 的合理设置是场效应晶体管正常工作的保证, 为此 u_{DS} 和 u_{GS} 的极性取决是必须要明确的。

u_{DS} 的极性取决于导电沟道类型:

$$\begin{cases} \text{N 沟道} & u_{DS} > 0 \\ \text{P 沟道} & u_{DS} < 0 \end{cases}$$

u_{GS} 的极性取决于工作方式和导电沟道类型:

$$\text{结型} \begin{cases} \text{N 沟道} & u_{GS} < 0 \\ \text{P 沟道} & u_{GS} > 0 \end{cases}$$

$$\text{绝缘栅} \begin{cases} \text{耗尽型: } u_{GS} \leq 0 \text{ 或 } u_{GS} \geq 0 \\ \text{增强型: } \begin{cases} \text{N 沟道: } u_{GS} \geq U_T \\ \text{P 沟道: } u_{GS} \leq -U_T \end{cases} \end{cases}$$

(4) $g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}=\text{常数}}$ 反映了 u_{GS} 对 i_D 的控制能力, 是表征 FET 放大作用的重要参数。

g_m 的求法有多种, 不仅可在转移特性曲线上求出, 亦可在输出特性曲线上求出。在输出特性曲线上求出工作点附近的 $\Delta i_D / \Delta u_{GS}$, 即为 g_m 。此外, 依据 g_m 的定义, 对转移特性近似公式求导, 也可求出 g_m 。

5. 主要参数

场效应管也有与晶体三极管类似的参数。如性能参数有 g_m 、 I_{DSS} 、 U_P 、 U_T 等, 极限参数有 P_{DM} 、 BU_{DS} 等。

二、典型例题解析

1-1 在图 1-9 所示电路中, 设二极管伏安特性为已知, 且 $e = 0.02 \sin \omega t (\text{V})$, $E = 6 \text{ V}$, $f = 1 \text{ KHZ}$, 求二极管的电流和电压并画出波形。

题意分析: 首先应该理解, 当交流成分的影响远小于直流成分的影响时, 二极管的工作范围很小, 可以认为器件工作在线性区, 因此可用叠加法来分析。

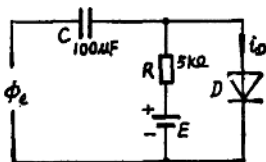


图 1-9

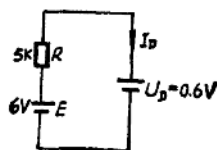


图 1-10

解 (1) 直流分析

暂不考虑交流电源的影响, 将其视为短路, 而电容对于直流电源可视为开路。由此可得等效图 1-10。

由此可计算出通过二极管的直流电流为

$$I_D = \frac{E - U_D}{R} = \frac{(6 - 0.6) \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega} \approx 1.08 \text{ mA}$$

(2) 交流分析

交流分析时, 应作如下处理: 对直流电压 E , 应将其短路; 由于 $X_C \ll R$, 故对交流 C 也可视为短路; 对二极管 D , 因其工作在近似线性区很小的范围内, 可用一斜率为 $\Delta I_D / \Delta U_D = 1/r_D$ 的直线去近似, 如图 1-11(a) 所示。

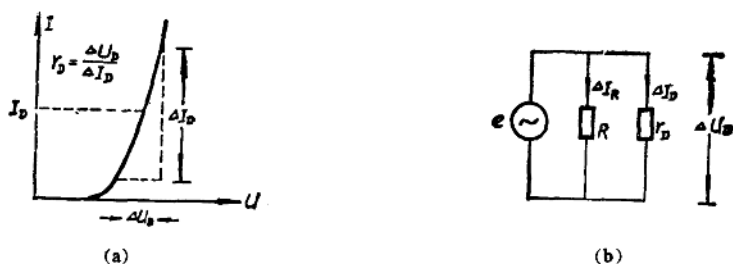


图 1-11

经上述处理后,得图 1-11(b)所示模型。

由于 $E \gg U_T$ (常温下, $U_T \approx 26 \text{ mV}$), 二极管正向特性可近似表示为 $I_D \approx I_S e^{U/U_T}$, 于是可得出

$$\frac{1}{r_D} = \frac{dI_D}{dU_D} \approx \frac{d}{dU_D} (I_S e^{U/U_T}) \approx \frac{I_D}{U_T}$$

故 $r_D \approx \frac{U_T}{I_D} = 24.07 \Omega$, 这样

$$\Delta I_D = \frac{\Delta U_D}{r_D} = \frac{0.02 \sin \omega t (\text{V})}{24.07 \Omega} = 0.83 \sin \omega t (\text{mA})$$

最后把交、直流成分叠加, 即得

$$i_D = I_D + \Delta I_D = (1.08 + 0.83 \sin \omega t) \text{ mA}$$

$$u_D = U_D + \Delta U_D = U_D + r_D \Delta I_D = (0.6 + 0.02 \sin \omega t) \text{ V}$$

波形如图 1-12 所示。

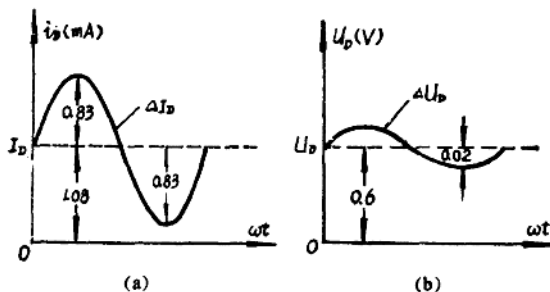


图 1-12

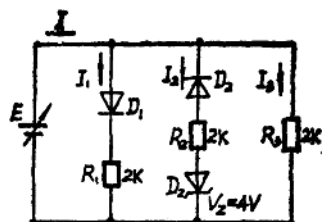


图 1-13

1-2 在图 1-13 所示电路中, 假设二极管和稳压管均为理想化元件, 试将虚线框内电路的伏安特性曲线绘制在 $I = f(u)$ 的坐标平面上。

题意分析: 此题看似复杂, 但在二极管和稳压管理想化的条件下, 求解并不困难。在电源可变时, 伏安特性应全面反映电路出现的情况。要注意稳压管开始稳压前后的状态。

解 根据二极管和稳压管的工作状态, 分段考虑:

(1) 当 $E > 0$ 时, D_1 导通, D_2 截止, 则

$$I = I_1 + I_3 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) E$$

代入 R_1 和 R_3 的数值, 得

$$I = \frac{E}{1 \text{ k}\Omega}$$

(2) 当 $-4\text{V} < E < 0$ 时, D_1 和 D_2 均不导通, 则

$$I = \frac{E}{R_3} = \frac{E}{2\text{k}\Omega}$$

(3) 当 $V < -4\text{V}$ 时, D_1 截止, D_2 导通, 则

$$I = I_2 + I_3 = \frac{E - V_2}{R_2} + \frac{E}{R_3}$$

于是

$$I = \frac{E}{1\text{k}\Omega} - 2\text{mA}$$

伏安特性曲线如图 1-14 所示。

1-3 用万用表测得某三极管三个管脚对

地电压分别是 $U_1 = -7\text{V}$, $U_2 = -2\text{V}$, $U_3 =$

-2.6V , 试判断此三极管的类型? 何种材料制成? 三个管脚的名称?

题意分析: 此题可按下列四条原则进行分析: (1) B 极一定居中间电位; (2) 按 $U_{BE} = 0.2\text{V}$ 或 0.6V 可找出 E 极, 并判定硅管或锗管; (3) 第三管脚必为 C 极; (4) 若 $U_{CE} > 0$, 为 NPN 型管, $U_{CE} < 0$, 为 PNP 型管。

解 遵照以上原则, 可判定 1 脚为 C 极 2 脚为 E 极, 3 脚为 B 极。

管子为 PNP 型硅管。

1-4 三极管输出特性曲线如图 1-15 所示, 确定 β , I_{CEO} , P_{CM} , BV_{CEO} 。

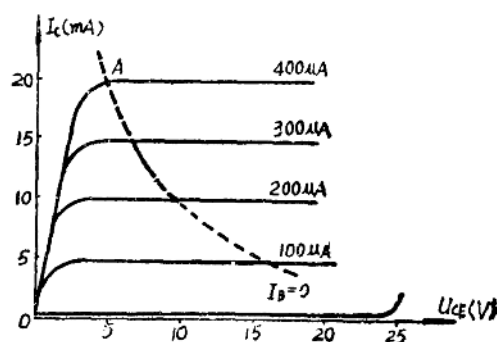


图 1-15

题意分析: 前已叙及, 三极管的主要参数在输出特性曲线上均有反映。因此, 围绕着曲线上的放大区域即可确定各参数。

解 根据定义 $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$, 因此曲线的间距即为所求。取 $200\mu\text{A} \sim 300\mu\text{A}$ 的间距, 则

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(15 - 10)\text{mA}}{(300 - 200)\mu\text{A}} = 50$$

曲线 $I_B = 0$ 对应到纵轴上的数值即为 I_{CEO} 。

P_{CM} 曲线已在图中标出, 取 A 点: A 点对应到横轴上 U_{CE} 的读数为 5V ; 对应到纵轴上 I_C 的读数为 20mA , 因此

$$P_{CM} = I_C \cdot U_{CE} = 20\text{mA} \times 5\text{V} = 100\text{mW}$$

BV_{CRO} 为 25 V

1-5 试从图 1-16(b) 的输出特性中, 作出 $u_{DS} = 4$ V 时的转移特性。

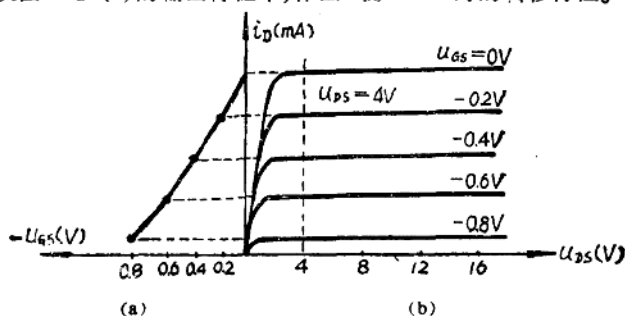


图 1-16

题意分析: 输出特性与转移特性都是反映 FET 的同一物理过程, 它们可以互相导出, 此题是练习从输出特性画转移特性的方法。

解 由输出特性画出转移特性如图 1-6(a)。

1-6 请分别说明图 1-17 中四个电路各工作在什么区。

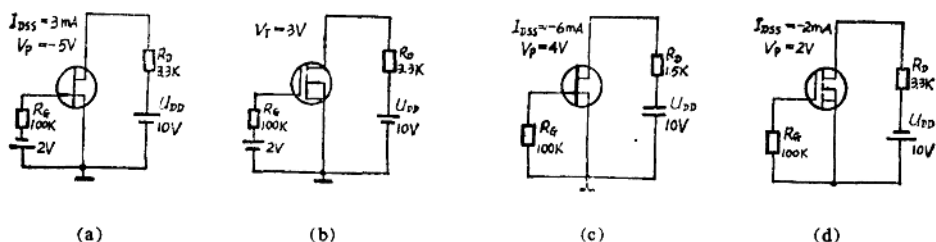


图 1-17

题意分析: 本题是 FET 基本工作原理概念题。应首先根据管子符号判别管子类型, 再由管子的预夹断条件判断其工作状态。

解 图 1-17(a) 是 N 沟道 JFET。由已知条件可求得

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 = 3 \times \left(1 - \frac{2}{5} \right)^2 = 1.08 \text{ mA}$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D = 10 - 1.08 \times 3.3 = 6.4 \text{ V}$$

预夹断条件为 $U_{DS} = U_{GS} - U_P$ 即

$$U_{GS} - U_{DS} = U_P$$

对于 N 沟道 JFET, 只要 $U_{GS} - U_{DS} = U_{GS} < U_P$, 则管子工作在恒流区(饱和区)。对于本例 $U_{GS} - U_{DS} = -2 - 6.4 = -8.4 \text{ V} < U_P$, 故工作在恒流区。

图 1-17(b) 是增强型 NMOSFET, 当 $U_{GS} > U_T$ 时, 管子进入恒流区。本例 $U_{GS} = 2 \text{ V} < U_T = 3 \text{ V}$, 故管子工作在截止区。

图 1-17(c) 是 P 沟道 JFET。由已知条件可求得

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 = I_{DSS} = -6 \text{ mA}$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D = -10 - (-6 \times 1.5) = -1 \text{ V}$$

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = 0 - (-1) = 1 \text{ V} < U_P$$

对于 P 沟道 JFET, $U_P > 0$, $U_{GD} > U_P$ 时, 管子进入恒流区。本例管子工作在可变电阻区。

图 1-17(d) 是耗尽型 PMOS。由已知条件可求得

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 = -2 \text{ mA}$$

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = 0 - (-3.4) = 3.4 \text{ V} > U_P$$

由此可见, 管子工作在饱和区。

三、教学基本要求

1. 一般了解半导体的导电特点。
2. 理解 PN 结的形成和特性以及二极管、稳压管的工作机理。
3. 掌握二极管和稳压管的伏安特性、主要参数。
4. 理解双极型和单极型两种三极管的基本工作机理。
5. 掌握双极型和单极型两种三极管的主要特点、伏安特性曲线和主要参数。