



高等学校信息工程类“十二五”规划教材

《电子线路基础(第二版)》 学习和解题指导

闵锐 蒋榴英 编著

DIANZILXIANLU
JICHU
XUEXI
DAO



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

21 世纪高等学校信息工程类“十二五”规划教材

《电子线路基础(第二版)》 学习和解题指导

闵 锐 蒋榴英 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是配合《电子线路基础(第二版)》(闵锐等编著)而编写的学习指导书。全书共9章,分别为常用半导体器件、基本放大电路、多级放大电路和集成运算放大电路、放大电路的频率响应、放大电路中的反馈、信号的运算和处理电路、信号产生与转换电路、直流稳压电源、逻辑门电路等。前8章为模拟电子技术基础,各章均由知识要点、习题解答、补充例题、自测题和自测题参考答案五部分组成。第9章为数字电子技术基础,考虑到内容相对简单,本章仅给出知识要点和习题解答。书中的习题和例题选择恰当,讲解详细,分析清楚;自测题便于读者检查自己对所学内容的掌握程度,有助于加强对理论知识的理解和巩固。

本书可作为高等院校电气类、电子类、测控类、计算机类和其他相关专业学生的辅导教材,也可作为教师的教学参考书,还可供有关工程技术人员自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

《电子线路基础(第二版)》学习和解题指导/闵锐,蒋榴英编著. —2版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2012.8

21世纪高等学校信息工程类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2794-6

I. ①电… II. ①闵… ②蒋… III. ①电子电路—高等学校—教学参考资料

IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第083039号

策 划 马乐惠

责任编辑 马乐惠 曹 锦

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2012年8月第2版 2012年8月第3次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 20

字 数 503千字

印 数 5001~8000册

定 价 34.00元

ISBN 978-7-5606-2794-6/TN·0655

XDUP 3086002-3

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本书是在原《〈电子线路基础〉学习和解题指导》(闵锐等编著,西安电子科技大学出版社2004年出版)的基础上,经过教学改革和实践,为配合西安电子科技大学出版社出版的《电子线路基础(第二版)》(闵锐等编著)而编写的配套学习指导书。其主要内容为配套教材中各章节的知识要点、习题解答、补充例题和自测题等。各章由五部分组成:第一部分为知识要点,主要是将教材各章节的重点和难点内容进行归纳和总结,指明学习的方向和侧重点,使读者能够把握各章所要求的基本概念、基本原理以及分析方法;第二部分为习题解答,主要是根据《电子线路基础(第二版)》教材中的各章习题而编写的,便于读者进行自我检测及启发解题思路,掌握解题方法;第三部分为补充例题,这部分内容是在第二部分的基础上,在解题思路和学习知识面上进行了进一步的扩充,使读者能够更进一步巩固和理解基本理论,并从解题方法上给予指导和分析,以帮助学生解决“课堂能听懂、习题不会做”的问题;第四部分为自测题,便于学生独立地分析问题、解决问题,通过做习题来检验是否真正掌握了基本知识和基本的分析方法;第五部分为自测题参考答案。

“电子线路基础”课程的特点是电路种类多、分析复杂,并且新概念、新内容多,学习和掌握比较困难。经过几年的教学实践,我们发现在学习该课程时学生经常会出现“课堂明白、课后糊涂”的现象,当面对具体电路时不知如何把所学的理论知识应用到具体的电路分析中。我们编写这本配套学习指导书的目的就是为了让学生从工程实践的角度去分析模拟电子电路,教会学生面对具体电路应从何处着手解决问题、归理解题思路、变换解题方法。本书的编写力求思路清晰、方法介绍详尽,选取习题、例题典型,并具有举一反三的作用。为拓宽知识面,本书还增加了有较大难度的例题及解题方法,兼顾了不同层次水平读者的需求。

我们认为学习模拟电子线路决不能死记硬背,而应是熟练掌握、灵活运用。也就是说,学习模拟电子线路中的电路,不是记下公式套用,而是通过运用通用的解题方法,一步一步地按“先静态、再动态”的原则将题目层层分解,最后求得答案。模拟电子线路基本题目的解题思路是一条线,应根据题目所给的条件,决定是从前往后还是从后向前,或以线的中间为起点来解决问题,看似复杂,实则简单。当你在学习中领略到其中的奥妙时,就会从中获得无限的乐趣,并很自然地将它应用到工程实践中。

全书共9章,闵锐负责第2、5、7、8章的编写,蒋榴英负责第1、3、4、6、9章的编写。在编写此书的过程中,教研室的领导及同事们给予了大力支持,西安电子科技大学出版社为本书的策划和出版给予了指导和帮助,在此谨向他们表示诚挚的谢意。

由于我们的水平有限,书中一定存在不妥之处,敬请使用本书的读者给予批评指正。

编 者

2012年2月

目 录

第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 知识要点	1
1.1.1 半导体基础知识	1
1.1.2 半导体二极管	3
1.1.3 半导体三极管	4
1.1.4 场效应管	6
1.2 习题解答	9
1.3 补充例题	16
1.4 自测题	23
1.5 自测题参考答案	27
第 2 章 基本放大电路	29
2.1 知识要点	29
2.1.1 放大电路的基本概念和主要性能指标	29
2.1.2 放大电路的分析方法	30
2.1.3 三种基本组态放大电路的性能比较	31
2.1.4 场效应管放大电路	32
2.2 习题解答	34
2.3 补充例题	53
2.4 自测题	75
2.5 自测题参考答案	81
第 3 章 多级放大电路和集成运算放大电路	84
3.1 知识要点	84
3.1.1 多级放大电路	84
3.1.2 差分放大电路	85
3.1.3 电流源电路	88
3.1.4 功率放大电路	91
3.1.5 集成运算放大电路	94
3.2 习题解答	95
3.3 补充例题	111
3.4 自测题	122
3.5 自测题参考答案	128
第 4 章 放大电路的频率响应	132
4.1 知识要点	132
4.1.1 频率响应的分析方法	132
4.1.2 单级放大电路的频率响应	133
4.1.3 多级放大电路的频率响应	136
4.1.4 集成运放的频率响应和频率补偿	137

4.2 习题解答	138
4.3 补充例题	149
4.4 自测题	154
4.5 自测题参考答案	157
第 5 章 放大电路中的反馈	158
5.1 知识要点	158
5.1.1 反馈的基本概念	158
5.1.2 反馈放大电路的类型及判别	159
5.1.3 负反馈的四种组态	159
5.1.4 负反馈对放大电路性能的改善	160
5.1.5 深度负反馈放大电路的分析	161
5.1.6 负反馈放大电路的稳定性	162
5.2 习题解答	163
5.3 补充例题	176
5.4 自测题	181
5.5 自测题参考答案	187
第 6 章 信号的运算和处理电路	190
6.1 知识要点	190
6.1.1 基本运算电路	190
6.1.2 模拟乘法器	190
6.2 习题解答	191
6.3 补充例题	203
6.4 自测题	211
6.5 自测题参考答案	216
第 7 章 信号产生与转换电路	218
7.1 知识要点	218
7.1.1 电压比较器	218
7.1.2 非正弦波发生器	219
7.1.3 正弦波发生器	222
7.1.4 精密整流电路	223
7.2 习题解答	223
7.3 补充例题	240
7.4 自测题	251
7.5 自测题参考答案	258
第 8 章 直流稳压电源	261
8.1 知识要点	261
8.1.1 整流电路	261
8.1.2 滤波电路	263
8.1.3 倍压整流电路	264
8.1.4 串联型稳压电源	265
8.1.5 三端集成稳压器	267
8.1.6 开关稳压电路	267

8.2 习题解答	268
8.3 补充例题	274
8.4 自测题	285
8.5 自测题参考答案	289
第 9 章 逻辑门电路	290
9.1 知识要点	290
9.1.1 分立元件逻辑门	290
9.1.2 TTL 集成逻辑门	290
9.1.3 其他类型的 TTL 门	292
9.1.4 CMOS 集成门电路	292
9.2 习题解答	293
附录	301
模拟试题一	301
模拟试题二	307
参考文献	312

第 1 章 常用半导体器件

1.1 知 识 要 点

1.1.1 半导体基础知识

1. 本征半导体和杂质半导体

半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。常用于制作电子器件的半导体是硅(Si)和锗(Ge)等四价元素。

本征半导体是将纯净的半导体经过一定的工艺制成的单晶体。晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵(称为晶格),原子之间通过共价键结合。

半导体中有两种载流子——自由电子(带一个单位负电荷)和空穴(带一个单位正电荷)。本征半导体中两种载流子的浓度相等,载流子的浓度是环境温度的函数,绝对零度时载流子的浓度为 0,温度升高时载流子的浓度增大(且在一定温度范围内,载流子浓度随温度的升高近似地按指数规律增大)。半导体导电性能对温度的这种敏感性,既可用于制作热敏器件,又是半导体器件温度稳定性差的原因。

杂质半导体是通过扩散工艺,在本征半导体中掺入少量合适的杂质元素得到的。这里“合适的杂质元素”就是五价元素或三价元素,它们相对于四价元素而言是“杂质”,掺入不同的杂质元素,可形成 N 型半导体和 P 型半导体。在本征半导体中掺入少量五价元素(如磷),使之取代晶格中四价原子的位置,就形成了 N 型半导体。在 N 型半导体中,自由电子的浓度远大于空穴的浓度,自由电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子),因此 N 型半导体主要靠自由电子导电。在本征半导体中掺入少量三价元素(如硼),使之取代晶格中四价原子的位置,就形成了 P 型半导体。在 P 型半导体中,空穴为多子,自由电子为少子,因此 P 型半导体主要靠空穴导电。

2. 扩散电流和漂移电流

扩散电流是指由载流子的扩散运动形成的电流。载流子的扩散运动是指在浓度差的作用下,载流子从浓度高的地方向浓度低的地方的运动。

漂移电流是指由载流子的漂移运动形成的电流。载流子的漂移运动是指载流子在电场力作用下的运动(自由电子逆电场方向运动,空穴顺电场方向运动)。

3. PN 结及其内电场

PN 结是将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一块硅片上形成的,在无外电场和其他

激发作用下,当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡时,就在两种半导体的交界面两侧形成空间电荷区(也称PN结耗尽层或阻挡层)。当P区与N区杂质浓度相等时,形成的是对称结(正、负电荷区的宽度相等);而当P区与N区杂质浓度不同时,形成的是不对称结(正、负电荷区的宽度不同)。实际的PN结通常是不对称结,而且正、负电荷区的宽度相差较大。

PN结的内电场是指由于正负电荷之间的相互作用在PN结内(空间电荷区中)形成的电场,其方向是从带正电的N区指向带负电的P区。内电场阻止载流子扩散运动的进行,但却是载流子漂移运动的源动力。

4. PN结的四大特性

(1) 单向导电特性。PN结的主要特性是单向导电性,即当外加正向电压(P端接高电位,N端接低电位)时,空间电荷区变窄,载流子的扩散运动加剧,漂移运动减弱,形成较大的扩散电流(正向电流)(此时称PN结处于导通状态);外加反向电压时,空间电荷区变宽,载流子的扩散几乎停止,PN结中只有少数载流子漂移运动产生的漂移电流(反向电流)。由于少子的数目极少,形成的反向电流非常小,且当反向电压足够大(超过130 mV)时,反向电流的数值几乎与外加反向电压大小无关(因而称为反向饱和电流),近似分析时常可将它忽略(此时称PN结处于截止状态)。因此PN结具有非线性电阻特性。

(2) 击穿特性。当加在PN结上的反向电压超过一定数值 $U_{(BR)}$ 后,反向电流急剧增加,这就是反向击穿。击穿根据机理不同分为齐纳击穿和雪崩击穿两种情况。在高掺杂的情况下,因空间电荷区宽度很小,反向电压过大时在空间电荷区内形成很强的电场,从而直接破坏共价键,产生电子—空穴对,致使电流急剧增加,这种击穿称为齐纳击穿。齐纳击穿的击穿电压低,且具有负的温度系数(即温度升高时击穿电压值降低)。在掺杂浓度较低的情况下,空间电荷区的宽度较宽,反向电压过大时空间电荷区的电场使少子的漂移速度加快,从而把价电子撞出共价键,产生电子—空穴对,新产生的电子与空穴被电场加速后又撞出其他价电子,载流子的数目雪崩式地倍增,致使电流急剧增加,这种击穿称为雪崩击穿。雪崩击穿的击穿电压高,且具有正的温度系数(即温度升高时击穿电压值也升高)。

如果对通过PN结的反向电流加以限制,那么PN结的反向击穿是可逆的,PN结的这一特性可用来制成稳压二极管;若不对通过PN结的反向电流加以限制,则可能因为过热而造成PN结的永久破坏。

(3) 电容特性。在一定条件下,PN结具有电容效应,根据其产生的原因不同分为势垒电容和扩散电容两种。势垒电容是指当PN结外加电压变化时,空间电荷区宽度变化所等效的电容,它具有非线性特性,与外加在PN结上的电压以及PN结的结面积、空间电荷区的宽度、半导体的介电常数有关。扩散电容是指当PN结外加正向电压时,扩散区内电荷的积累和释放所等效的电容,它也具有非线性特性,与流过PN结的正向电流 i 、温度电压当量 U_T 以及非平衡少子的寿命有关。

PN结正偏时,其结电容以扩散电容为主(此时空间电荷区很窄,势垒电容值远小于扩散电容值);反偏时,则以势垒电容为主(此时载流子的扩散运动几乎停止)。

(4) 温度特性。温度升高时,PN结两边热平衡少子的浓度相应增加,从而导致由少子漂移产生的反向饱和电流 I_S 增大(实验结果表明:温度每升高 10°C , I_S 约增加1倍);温度电压当量 U_T 也随温度的升高而增大。两个变化因素作用的结果是:当PN结正偏且电压

数值保持不变时,正向电流随温度的升高而略有增大;当 PN 结反偏且电压数值保持不变时,反向电流随温度的升高而呈指数规律增大。

1.1.2 半导体二极管

1. 半导体二极管的结构和类型

将 PN 结用外壳封装起来,并引出两个电极就构成了半导体二极管。由 P 区引出的电极为正极(或称阳极),由 N 区引出的电极为负极(或称阴极)。电路符号中的箭头表示二极管加正向电压时电流的方向。

根据制作工艺不同,常用的二极管可分成点接触型、面接触型及平面型等三种。点接触型二极管的 PN 结由一根金属丝经过特殊工艺与半导体表面相接而形成,PN 结的结面积小,不能通过大电流,但其结电容也较小,因此适用于高频电路和小功率整流。面接触型二极管的 PN 结是采用合金法工艺制成的,PN 结的结面积大,能流过较大的电流,但结电容也较大,因此只能在较低频率下工作,一般仅作为整流管。平面型二极管的 PN 结采用扩散法制成,PN 结的结面积可大可小,结面积大的可用于大功率整流,结面积小的可作为脉冲数字电路中的开关管。

2. 二极管的伏安特性

由于二极管是封装起来的 PN 结,因此二极管的伏安特性基本上与 PN 结的伏安特性相同。但由于二极管中存在半导体体电阻和引线电阻,管的表面还存在漏电流,因而当外加正向电压时,在电流相同的情况下,二极管的端电压大于 PN 结上的压降;当外加反向电压时,其反向电流也比 PN 结上的大。

3. 二极管的等效电路(或称等效模型)

在一定条件下,根据二极管的伏安特性,可用线性组件构成的电路(等效电路)来近似模拟二极管的特性,从而简化电路的分析。二极管的等效电路有多种,在不同的应用场合,应根据不同的分析要求(特别是对误差的要求)合理选用其中一种。

作为非线性电阻器件的半导体二极管,它的非线性特性主要表现在单向导电性上,而导通后伏安特性的非线性是第二位的。因此,在分析和利用由二极管单向导电性构成的电路的性能时,二极管的伏安特性可以合理地用两段直线逼近。根据实际电路的情况不同,可采用不同的等效电路进行近似分析。

(1) 理想模型。正偏导通时正向压降为 0(相当于短路),反偏时反向电流为 0(相当于开路)。实际电路中,在把除二极管以外的电路等效成电压源,而该电压源的等效电动势远大于二极管的导通电压 U_{on} ,且等效内阻远大于二极管的正向导通电阻的情况下,二极管可用该模型近似。

(2) 恒压降模型。正偏导通时正向电压为常量,反偏或者正偏电压小于导通电压时反向电流为 0(即在理想模型上串联恒压源 U_{on})。在实际电路中,在把除二极管以外的电路等效成电压源,而该电压源的等效内阻远大于管子的正向导通电阻的情况下,二极管可用该模型近似。

(3) 折线模型。正偏导通时等效为一个电阻 r_D ,反偏或者正偏电压小于导通电压时反向电流为 0(可在恒压降模型上串联电阻 r_D 等效)。分析和利用由二极管单向导电性构成的

电路的性能时,二极管一般都可用该等效电路近似。

(4) 微变等效电路。当二极管外加直流正向偏置电压(且正偏电压大于导通电压)时,若在此基础上外加微小的电压变化量,则对变化量来说,二极管可等效为一个线性电阻 r_d (该电阻称为二极管的动态电阻, $r_d \approx U_T / I_D$, 其值随着二极管正向直流电流的增大而减小)。

需要注意的是: ① 微变等效电路是在二极管已有了合适直流电流的基础上的等效电路, 因此要已知或者先求直流电流(电流不合适时不能作如此等效); ② 微变等效电路要求加在二极管上的电压变化量足够小, 即应远小于温度电压当量 U_T , 工程上一般限定最大变化量不超过 5.2 mV。

4. 稳压二极管伏安特性的特点及其等效电路

稳压管的伏安特性与普通二极管相似, 但稳压管的伏安特性在击穿区的曲线很陡, 几乎与纵轴平行, 表现出很好的稳压特性。

要使稳压管起到稳压作用, 必须在稳压管上串联一个限流电阻, 外加反向电压必须超过稳压管的稳定电压。

1.1.3 半导体三极管

1. 半导体三极管的结构和类型

半导体三极管又称双极型三极管(BJT)或晶体三极管(简称三极管), 它由两个靠得很近且背靠背排列的 PN 结组成。根据排列方式的不同, 半导体三极管可分为 NPN 和 PNP 两种类型。其中三个中性区依次称为发射区(掺杂浓度很高)、基区(很薄且掺杂浓度很低)和集电区, 它们所引出的三个电极分别为发射极、基极和集电极; 两个 PN 结分别称为发射结(发射区与基区之间的 PN 结)和集电结(基区与集电区之间的 PN 结)。三极管符号中有箭头的线段表示了发射结的位置, 箭头方向表示发射结外加正向电压时实际电流的方向。

从不同的角度来看, 三极管有不同的分类方式:

- 根据极型不同, 可分为 NPN 型管、PNP 型管;
- 根据制作材料不同, 可分为硅管、锗管;
- 根据工作信号的大小不同, 可分为小功率管、中等功率管、大功率管;
- 根据工作频率的高、低, 可分为高频管、低频管。

不同类型的三极管, 它们的性能和参数也不同, 适用于不同的应用场合, 必须合理选用。

2. 三极管的电流放大作用和伏安特性

半导体三极管和半导体二极管一样都是非线性器件, 但三极管的主要特性与其工作状态有关。三极管最基本的一种应用就是对微弱信号的放大作用, 此时三极管必须工作在放大状态。为保证三极管具有电流放大作用, 其内部结构和外部电路必须满足一定的条件。

(1) 内部结构必须满足的条件: ① 发射结为不对称结, 且发射区的掺杂浓度远大于基区(几十到上百倍); ② 基区宽度很小; ③ 集电结面积大于发射结面积。

(2) 外部电路必须满足的条件: ① 发射结外加正向电压(正偏); ② 集电结外加反向电压(反偏)。

三极管的电流放大作用表现为小的基极电流控制大的集电极电流。具体来说, 在直流电压作用下有

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

三极管的伏安特性曲线是指其各极间电压与电流之间的关系曲线。由于三极管有三个电极,因此它的伏安特性不像二极管那么简单,工程上最常用的是其输入特性和输出特性曲线。由于三极管的连接不同有不同的输入、输出电压和电流,因而就有不同的输入、输出特性曲线,但一般情况下要掌握的是应用最广的共射接法的特性曲线。

3. 三极管共射接法时的特性曲线

(1) 输入特性曲线。三极管的共射输入特性描述在管压降 u_{CE} 一定的情况下,基极电流 i_B 与发射结压降 u_{BE} 之间的函数关系。当处于放大状态时,三极管的输入特性近似为指数函数。

(2) 输出特性曲线。三极管的共射输出特性描述在基极电流 i_B 一定的情况下,集电极电流 i_C 与管压降 u_{CE} 之间的函数关系。每一个确定的 i_B 都对应一条输出特性曲线,所以输出特性曲线是一族曲线。整个输出特性曲线族可分为四个区域。

① 截止区。其特征是发射结反向偏置,或虽正偏但 $|u_{BE}| \leq |U_{on}|$ (U_{on} 为三极管发射结的导通电压,硅管的约为 0.5 V,锗管的约为 0.1 V),集电结反向偏置(对 NPN 管, $u_{BE} \leq U_{on}$, $u_{CE} > u_{BE}$)。此时, $i_B = 0$, $i_C \leq I_{CEO}$ (近似分析时,可认为 $i_C \approx 0$)。

② 放大区。其特征是发射结正向偏置且 $u_{BE} > |U_{on}|$,集电结反向偏置。此时, i_C 几乎仅取决于 i_B ,而与 u_{CE} 无关,即 $i_C \approx \beta i_B$, $\Delta i_C \approx \beta \Delta i_B$,表现出 i_B 对 i_C 的控制作用,故该区域又称为线性区。

③ 饱和区。其特征是发射结和集电结均正向偏置。此时, i_C 不仅与 i_B 有关,而且明显随 u_{CE} 的增大而增大,且 $i_C < \beta i_B$ (实际电路中,当三极管的 u_{BE} 增大(i_B 随之增大)但 i_C 基本不变时,说明该管已进入饱和区), $u_{CE} \approx U_{CES}$ (饱和管压降)。

当 $u_{CE} = u_{BE}$ (即 $u_{CB} = 0$) 时,称三极管处于临界(临界饱和或临界放大)状态,此时的基极电流称为三极管的基极临界饱和电流 I_{BS} ,集电极电流称为三极管的集电极临界饱和电流 I_{CS} , $I_{CS} = \beta I_{BS}$ 。当 i_B 继续增大,使得 $i_B > I_{CS}$ 时,三极管进入饱和区, $i_C \approx I_{CS} < \beta i_B$ 。

④ 击穿区。随着 u_{CE} 的增大,加在集电结上的反偏电压 u_{CB} 也相应增大。当 u_{CE} 增大到一定值时,集电结反向击穿,造成集电极电流剧增,这时三极管“工作”于击穿区。反向击穿电压随 i_B 的增大而减小,这是因为反向击穿一般是轻掺杂的集电结的雪崩击穿,当 i_B 增大时, i_C 也相应增大,通过集电结的载流子增多,碰撞机会增大,这使得产生雪崩击穿的电压减小。

4. 温度对三极管特性和参数的影响

(1) 温度对 I_{CBO} 的影响。因为 I_{CBO} 是由集电结反偏时,热平衡少子的漂移运动形成的,而温度升高时热平衡少子的浓度明显增大,所以温度升高时 I_{CBO} 增大。温度每升高 10℃, I_{CBO} 大约增大 1 倍;反之,当温度降低时, I_{CBO} 减小。

(2) 温度对输入特性的影响。当温度升高时,正向特性左移,反向特性下移;当温度降低时,正向特性右移,反向特性上移。正向特性:在基极电流 i_B 保持不变的情况下,温度每升高 1℃, $|U_{BE}|$ 大约下降 2 mV ~ 2.5 mV。反向特性:温度每升高 10℃,反向饱和电流增大 1 倍。

(3) 温度对输出特性的影响。温度升高时, I_{CBO} 、 β 增大,加上正向输入特性左移,导

致在外部条件不变的情况下集电极电流增大, 因此输出特性曲线上移, 且曲线间隔增大。

5. 三极管工作状态的判定方法

(1) 偏置电压判定法。若发射结反偏或者虽然正偏但 $|u_{BE}| \leq |U_{on}|$ 、集电结反偏, 则三极管工作于截止状态。

若发射结正偏且 $|u_{BE}| > |U_{on}|$ 、集电结反偏(具体对于 NPN 管来说, 三个电极的电位满足 $u_C > u_B > u_E$, 且 $u_B - u_E > U_{on}$; 对于 PNP 管来说, 三个电极的电位满足 $u_C < u_B < u_E$, 且 $u_E - u_B > U_{on}$), 则三极管工作于放大状态。

若发射结正偏, 集电结也正偏, 则三极管工作于饱和状态。

(2) 电流关系判定法。先假设三极管饱和, 求出集电极临界饱和电流 I_{CS} , 再求基极临界饱和电流 I_{BS} , 然后根据下列方法判定:

- ① 若 $i_B = 0$ 、 $i_C \approx 0$, 则三极管工作于截止状态;
- ② 若 $i_B > 0$ 、 $i_C \approx \beta i_B$, 则三极管工作于放大状态;
- ③ 若 $i_B > I_{BS}$ 、 $i_C < \beta i_B$ (因为 i_C 的增大受到外电路的限制), 则三极管工作于饱和状态(临界饱和时, $I_{CS} = \beta I_{BS}$)。

分析实际电路时, 通常将上述两种方法结合起来使用。一般先利用“偏置电压判定法”判断三极管是否处于截止区, 然后利用“电流关系判定法”判断三极管是工作于放大区还是饱和区。

1.1.4 场效应管

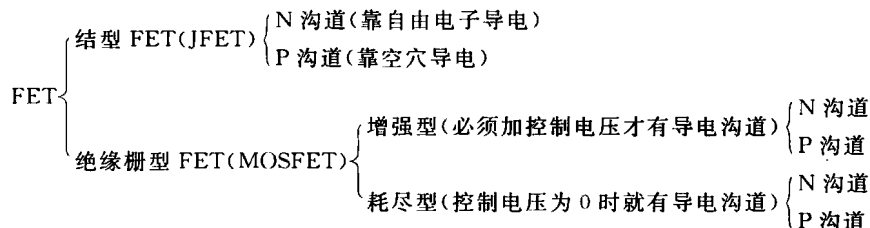
1. 场效应管的工作特点和类型

1) 场效应管的工作特点

场效应管(FET)是利用栅—源之间的外加电压所产生的电场来控制导电沟道的宽窄, 从而控制漏极电流的一种半导体器件, 并因此而得名。由于 FET 仅靠半导体中的多数载流子导电, 故又称为单极型晶体管。

2) 场效应管的类型

场效应管的分类如下所示:



JFET 利用 PN 结在反向电压作用下体积的变化来控制导电沟道的宽度, 从而达到控制输出电流的目的。

绝缘栅型 FET 因它的栅极与源极、栅极与漏极之间均采用 SiO_2 绝缘层隔离而得名, 简称 MOS 管。MOS 管有四种类型: N 沟道增强型、P 沟道增强型、N 沟道耗尽型和 P 沟道耗尽型。MOS 管的电路符号中的箭头表示衬底(它的性质与沟道的性质相反)B 与漏极 d (或源极 s)之间的 PN 结中正向电流的方向(但正常时不会使它产生正向电流)。沟道类型

相同的增强型与耗尽型 MOS 管符号的区别在于：增强型 MOS 管的电路符号中连接漏极与源极的是一条虚线(寓意是控制电压为 0 时，沟道还未建立)，而耗尽型 MOS 管的符号中相应的线是实线(寓意是控制电压为 0 时，沟道已经建立)。实际应用时，通常将衬底与源极接在一起使用，这样栅极和衬底各相当于一个极板，中间是绝缘层，形成电容。当栅—源电压变化时，将改变衬底靠近绝缘层处感应电荷的数量(即沟道的大小)，从而控制漏极电流的大小。

2. 场效应管的伏安特性以及饱和区的电流方程

因为场效应管的栅极电流近似为 0，所以在共源接法时，其伏安特性只需用输出特性表示；场效应管工作于饱和区时，输出电流近似地只与输入电压有关，因此工作于饱和区的场效应管的特性可用一条转移特性曲线来表示。

1) 结型场效应管(JFET)的共源伏安特性及转移特性方程

(1) 输出特性曲线。JFET 的共源输出特性描述当栅—源电压 u_{GS} 为常量时，漏极电流 i_D 与漏—源电压 u_{DS} 之间的函数关系。由于一定数值的 u_{GS} 对应一条曲线，因此 JFET 的输出特性是一族曲线，它与 NPN 型三极管的共发射极输出特性曲线族相似，而且同样可分成四个区域(但与三极管的名称不同)。

① 可变电阻区(也称非饱和区)。其特征是 $u_{GS} > U_{GS(off)}$ ， $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(off)}$ (即 $u_{GD} > U_{GS(off)}$ ，结型场效应管的沟道还没有预夹断)。 $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(off)}$ (即 $u_{GD} = U_{GS(off)}$)的点连接成的曲线称为预夹断轨迹， u_{GS} 愈大，预夹断时 u_{DS} 的值也愈大。预夹断轨迹左边的区域称为可变电阻区，该区域中输出特性曲线近似为不同斜率的直线，且斜率值取决于 u_{GS} 。由于输出特性曲线斜率的倒数为漏—源之间的等效电阻，因此改变 u_{GS} 的大小可以改变漏—源之间等效电阻的阻值，这是该区域被称为可变电阻区的原因。

② 饱和区(也称恒流区)。该区是指输出特性曲线图中预夹断轨迹右边的区域。其特征是 $u_{GS} > U_{GS(off)}$ ， $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(off)}$ (即 $u_{GD} < U_{GS(off)}$ ，结型场效应管的沟道已经预夹断)。随着 u_{DS} 增大，夹断区加长， u_{GS} 为定值时 i_D 几乎不变，表现出恒流特性，这是该区域被称为恒流区的原因。FET 用于放大电路时，一般就工作在这个区域，所以也称为线性放大区。

③ 夹断区。其特征是 $u_{GS} < U_{GS(off)}$ ，结型场效应管的导电沟道被夹断， $i_D \approx 0$ ，是输出特性曲线图中靠近横轴的部分(一般将使 i_D 等于一个很小电流(如 $5 \mu A$)时的 u_{GS} 定义为夹断电压 $U_{GS(off)}$)。

④ 击穿区。当 u_{DS} 增大到一定程度时，漏极电流会骤然增大，结型场效应管被击穿，这时该管“工作”于击穿区。当 u_{GS} 增大时，漏—源击穿电压也增大。

(2) 转移特性曲线。转移特性描述当漏—源电压 u_{DS} 为常量时，漏极电流 i_D 与栅—源电压 u_{GS} 之间的函数关系。当 FET 工作在饱和区时，由于输出特性曲线近似为一组与横轴平行的直线，因此可以用一条转移特性曲线代替饱和区所有的输出特性曲线。

(3) 饱和区的转移特性方程

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

式中， $U_{GS(off)}$ 为夹断电压(即 $u_{DS} = 0$ 情况下沟道刚被夹断时的 u_{GS} 之值)； I_{DSS} 为饱和漏极电流(即 $u_{GS} = 0$ 情况下该管产生预夹断时的漏极电流 i_D)。对于 N 沟道管， $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ ；对于 P 沟道管， $0 < u_{GS} < U_{GS(off)}$ 。

为保证 JFET 栅—源间的耗尽层加反向电压,对 N 沟道管, $u_{GS} \leq 0$, $U_{GS(off)} < 0$, $u_{DS} \geq 0$, i_D 的实际方向由漏极流向源极;对 P 沟道管, $u_{GS} \geq 0$, $U_{GS(off)} > 0$, $u_{DS} \leq 0$, i_D 的实际方向由源极流向漏极(即 P 沟道管的各极电压和电流的实际极性 or 方向都与 N 沟道管的相反)。

2) MOS 管的共源伏安特性及转移特性方程

(1) 共源特性曲线。MOS 管的结构虽然与结型 FET 不同,但它们伏安特性曲线的形状相似,尤其是输出特性曲线,只是参变量的数值有所不同而已。由于两种类型的 MOS 管的结构类似,因此它们的特性曲线也类似,但稍有不同。

对于 N 沟道增强型 MOS 管,输出特性曲线图中的预夹断轨迹是满足 $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$ 的点连接成的曲线,它左边的区域为可变电阻区,满足 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 、 $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$;右边的饱和区满足 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 、 $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$;而夹断区则满足 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ 。

对于 N 沟道耗尽型 MOS 管,各极间电压的大小关系与 N 沟道 JFET 的情况相同,唯一不同的是 N 沟道耗尽型 MOS 管的 u_{GS} 可以大于 0、小于 0 或者等于 0,而 N 沟道 JFET 的 u_{GS} 不能大于 0。

(2) 饱和区的转移特性方程。

① N 沟道增强型 MOS 管在饱和区的转移特性方程为

$$i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2, \quad (u_{GS} > U_{GS(th)})$$

式中, I_{DO} 是 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 情况下管子预夹断时的漏极电流。

② N 沟道耗尽型 MOS 管在饱和区的转移特性方程与 N 沟道 JFET 的相同,为

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2, \quad (U_{GS(off)} < u_{GS} < 0)$$

P 沟道 MOS 管也有着与 N 沟道 MOS 管相同形状的伏安特性曲线和相同形式的转移特性方程,只是对于 N 沟道 MOS 管来说, $U_{GS(th)} > 0$, $U_{GS(off)} < 0$, $u_{DS} \geq 0$, i_D 的实际方向由漏极流向源极;对于 P 沟道 MOS 管, $U_{GS(th)} < 0$, $U_{GS(off)} > 0$, $u_{DS} \leq 0$, i_D 的实际方向由源极流向漏极(也就是说, P 沟道 MOS 管的各电压和电流的实际极性 or 方向都与 N 沟道 MOS 管的相反)。并且对于 P 沟道 MOS 管来说,可变电阻区满足的条件为 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$), $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$);饱和区满足的条件为 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$), $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$);夹断区满足的条件为 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$)。

3. 场效应管工作状态的判定方法

(1) 先根据栅—源间电压 u_{GS} 是否高于夹断电压(或开启电压),来判断场效应管是否处于夹断区。具体对于 N 沟道 FET 来说,若 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$),则该管处于夹断区;对于 P 沟道 FET 来说,若 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$),则该管处于夹断区。

(2) 若不处于夹断区,再根据场效应管栅—漏间电压 u_{GD} 是否高于夹断电压(或开启电压),来判断该管是工作于饱和区还是可变电阻区(非饱和区)。具体对于 N 沟道 FET 来说,若 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$) (沟道预夹断),则该管工作于饱和区;否则(沟道没有预夹断)该管处于可变电阻区。对于 P 沟道 FET 来说,若 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} > U_{GS(th)}$ (或 $U_{GS(off)}$) (沟道预夹断),则该管工作于饱和区;否则(沟道没有预夹断)该管处于可变电阻区。

4. 场效应管与三极管的异同

1) 类似之处

场效应管的栅极 g 、源极 s 、漏极 d 分别对应于三极管的基极 b 、发射极 e 、集电极 c ，它们的作用相类似。FET 和三极管都可用于放大电路和开关电路，但利用三极管组成的放大电路可以得到比 FET 放大电路更大的电压放大倍数。

2) 不同之处

(1) FET 是电压控制型器件 (u_{GS} 控制 i_D ，且 $i_G \approx 0$)，而三极管是电流控制型器件 (i_B 控制 i_C)。因此，FET 具有比三极管高得多的输入电阻。

(2) FET 只有多子参与导电 (因而称为单极型器件)，而三极管内多子和少子都参与导电 (因而称为双极型器件)。因为少数载流子数目受温度、辐射等因素的影响较大，所以 FET 比三极管的温度稳定性好、抗辐射能力强。

(3) FET 的漏极和源极可以互换，互换后特性变化不大；而三极管的发射极和集电极互换后特性差异很大 (因为为了保证三极管具有正向电流控制作用，其发射区和集电区的掺杂浓度相差很大，集电结与发射结的结面积差别也较大)。

(4) FET 的噪声系数很小，种类也比三极管的多，因而在组成电路时具有更大的灵活性。

1.2 习题解答

1.1 温度为 25°C 时，锗二极管和硅二极管的反向电流分别为 $10\ \mu\text{A}$ 和 $25\ \mu\text{A}$ ，计算在 45°C 时它们的反向电流。

解 由于温度每升高 10°C ，二极管的反向饱和电流约增大 1 倍，因此温度为 45°C 时，两个二极管的反向饱和电流分别为

$$\text{锗管: } I_S = 10 \times 2^{\frac{15-25}{10}} = 40\ \mu\text{A}$$

$$\text{硅管: } I_S = 25 \times 2^{\frac{45-25}{10}} = 100\ \mu\text{A}$$

1.2 理想二极管组成的电路如题 1.2 图所示。试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。

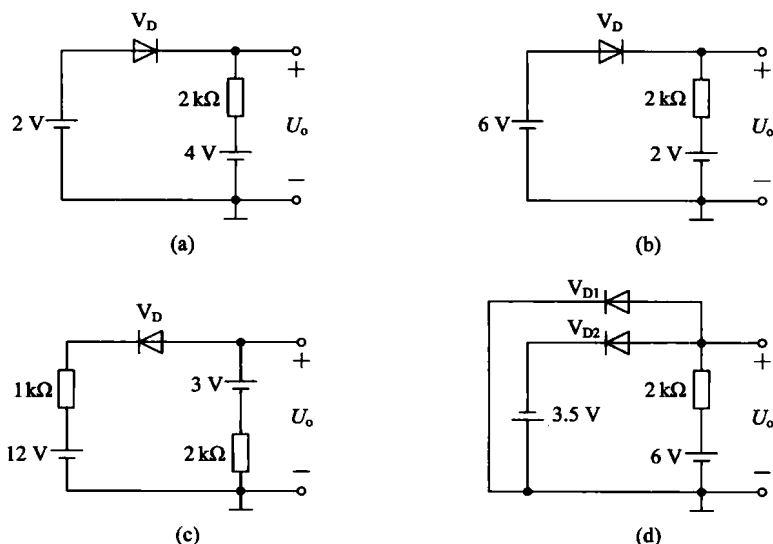
解 图(a)电路中，由于除二极管以外的电路可以等效为一个 $-2\ \text{V}$ 理想电压源串联 $2\ \text{k}\Omega$ 电阻，因此二极管因反偏而截止，电路中没有电流，所以 $U_o = 4\ \text{V}$ 。

图(b)电路中的二极管导通， $U_o = 6\ \text{V}$ (因为 $U_o = -U_{VD} + 6\ \text{V}$)。

图(c)电路中的二极管截止， $U_o = 3\ \text{V}$ 。

图(d)电路中，先假设 V_{D1} 截止，则 V_{D2} 因正偏而导通；再假设 V_{D1} 导通，则 V_{D2} 还是因正偏而导通，因此，可以确定 V_{D2} 处于导通状态。在 V_{D2} 导通的情况下，加在 V_{D1} 上的等效外电源电压就为 $-3.5\ \text{V}$ ，因此 V_{D1} 截止。所以 V_{D1} 截止， V_{D2} 导通， $U_o = -3.5\ \text{V}$ 。

或解 在图(d)电路中,先断开两只二极管,则将加于两只二极管的电压分别为 $U_{VD1}=6\text{ V}$ 、 $U_{VD2}=9.5\text{ V}$,由于 V_{D2} 的正偏电压大于 V_{D1} 的,所以 V_{D2} 抢先导通,结果使 V_{D1} 因反偏而截止。



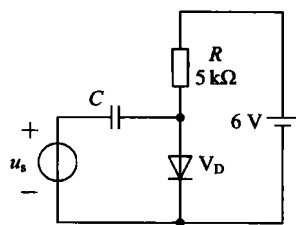
题 1.2 图

1.3 在题 1.3 图所示电路中, V_D 是硅二极管, 设导通电压 $U_{on}=0.5\text{ V}$ 。

(1) 估算二极管的直流电流;

(2) 估算二极管的交流电阻;

(3) 若 u_s 为正弦波电压, 其有效值为 10 mV , 电容 C 的数值足够大, 对交流可视为短路, 试计算流经二极管的电流中交流成分的有效值。



题 1.3 图

解 (1) 二极管的直流电流为

$$I_{DQ} = \frac{U - U_{on}}{R} = \frac{6 - 0.5}{5} = 1.1\text{ mA}$$

(2) 二极管的交流电阻为

$$r_d = \frac{U_T}{I_{DQ}} = \frac{26}{1.1} = 23.6\text{ }\Omega$$

(3) 因为 $r_d \ll R$, 所以流过二极管的电流中的交流成分有效值为

$$I_d \approx \frac{U_s}{r_d} = \frac{10}{23.6} = 0.42\text{ mA}$$

1.4 电路如题 1.4 图所示, 已知 $u_i = 10 \sin \omega t (\text{V})$, 二极管的导通电压 $U_{on}=0.7\text{ V}$, 试画出 u_i 与 u_o 的波形, 并标出幅值。

解 当 $u_i > 3.7\text{ V}$ 时, V_{D1} 导通、 V_{D2} 截止, $u_o = 3.7\text{ V}$; 当 $u_i < 2.3\text{ V}$ 时, V_{D1} 截止、 V_{D2} 导通, $u_o = 2.3\text{ V}$; 当 $2.3\text{ V} \leq u_i \leq 3.7\text{ V}$ 时, V_{D1} 和 V_{D2} 均截止, $u_o = u_i$ 。

由上述分析结果画出的对应于输入电压的输出电压波形如题 1.4 解图所示。