



国家级精品课程配套教辅

普通高等教育电气自动化类 国家级特色专业系列规划教材

模拟电子技术基础教程 学习指导与习题解析

王友仁 李东新 编著
姚 睿 林 华



科学出版社

国家级精品课程配套教辅
普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材

模拟电子技术基础教程 学习指导与习题解析

王友仁 李东新 编著
姚 睿 林 华

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是王友仁教授等编著的《模拟电子技术基础教程》的配套教学指导书。全书共有8章,主要内容有半导体器件、放大电路基础、模拟集成运算放大器、模拟信号运算与处理电路、反馈放大电路、信号产生电路、功率放大电路和直流稳压电源,各章包括“教学基本要求”、“重点分析”、“例题精解”和“习题解析”4个模块。

本书可作为高等学校电气信息类专业(包括电气工程及其自动化、自动化、测控技术与仪器、探测制导与控制技术、生物医学工程等)模拟电子技术课程的辅助教材或学习指导书,也可作为准备报考有关专业研究生的本科生和工程技术人员的系统复习、自学参考用书,还可作为教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础教程学习指导与习题解析/王友仁等编著. —北京:科学出版社,2011.2

(国家级精品课程配套教辅·普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-024714-8

I. ①模… II. ①王… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教学参考资料 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第004212号

责任编辑:匡敏 张丽花/责任校对:朱光兰
责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年2月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年2月第一次印刷 印张:15

印数:1—3 500 字数:298 000

定价:26.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是王友仁教授等编著的《模拟电子技术基础教程》(科学出版社,2011)的配套学指导书,其目的是帮助从事模拟电子技术基础课程教学的教师更好地实施教学,进而提高课程教学质量;帮助学习该课程的同学和有关读者更好地掌握该课程的基本概念、基本电路、基本方法和应用技术。

全书共有8章,分别为半导体器件、放大电路基础、模拟集成运算放大器、模拟信号运算与处理电路、反馈放大电路、信号产生电路、功率放大电路和直流稳压电源。各章包括“教学基本要求”、“重点分析”、“例题精解”和“习题解析”4个模块。

“教学基本要求”模块指明每章的教学要求与学习内容掌握程度;“重点分析”模块给出每章的主要内容、知识要点、重要的概念与结论;“例题精解”模块通过每章精选的有代表性例题的分析求解,着重讲清解题思路、方法、步骤和过程,以帮助学生提高分析设计模拟电路的能力和拓宽知识面;“习题解析”模块除了包含教材中各章相应的习题之外,还额外增加了一定数量的习题(如综合题、扩充提高题、选择题及填空题),并给出了所有习题的答案与解题思路,便于读者学习参考。在例题和习题的选材上注意典型性、实用性和系统性,在内容的编排上由浅入深,兼顾了不同层次水平读者的要求。

本书由王友仁主编,其中第3、4、5、8章由南京航空航天大学王友仁和林华编写,第1、2章由河海大学李东新编写,第6、7章由南京航空航天大学姚睿编写。

南京航空航天大学陈鸿茂教授审阅了本书,并提出了宝贵的修改意见与建议,在此深表谢意。研究生杨玲、陈好、任晋华、吴祎、袁鹏、王晓艳、刘斐文和罗慧等参与了书中插图绘制和文稿录入工作,在此一并致谢。

由于编者的能力和水平所限,书中可能存在疏漏和不当之处,恳请各位读者批评指正。

编 者

2010年11月于南京

目 录

前言

第 1 章 半导体器件	1
1.1 教学基本要求	1
1.2 重点分析	1
1.2.1 半导体基础知识	1
1.2.2 半导体二极管	2
1.2.3 半导体三极管	4
1.2.4 场效应晶体管	6
1.3 例题精解	9
1.4 习题解析	12
第 2 章 放大电路基础	22
2.1 教学基本要求	22
2.2 重点分析	22
2.2.1 放大器的概念与技术指标	22
2.2.2 共射放大电路	23
2.2.3 共基和共集放大电路	25
2.2.4 场效应管放大电路	26
2.2.5 多级放大电路	29
2.2.6 放大电路的频率响应	29
2.3 例题精解	31
2.4 习题解析	37
第 3 章 模拟集成运算放大器	52
3.1 教学基本要求	52
3.2 重点分析	52
3.2.1 电流源电路	52
3.2.2 差动放大电路	54
3.2.3 双极型集成运算放大器	56
3.2.4 场效应管集成运算放大器	57
3.2.5 集成运算放大器的主要参数	57
3.2.6 理想集成运算放大器	58

3.3	例题精解	58
3.4	习题解析	64
第4章	模拟信号运算与处理电路	83
4.1	教学基本要求	83
4.2	重点分析	83
4.2.1	基本运算电路	83
4.2.2	有源滤波器	85
4.2.3	电压比较器	87
4.2.4	模拟乘法器	88
4.3	例题精解	89
4.4	习题解析	96
第5章	反馈放大电路	125
5.1	教学基本要求	125
5.2	重点分析	125
5.2.1	反馈的基本概念与分类	125
5.2.2	负反馈对放大电路性能的影响	127
5.2.3	深度负反馈放大电路的分析计算	129
5.2.4	负反馈放大电路的稳定性分析	129
5.3	例题精解	130
5.4	习题解析	137
第6章	信号产生电路	158
6.1	教学基本要求	158
6.2	重点分析	158
6.2.1	正弦波振荡电路	158
6.2.2	非正弦信号发生器	162
6.3	例题精解	163
6.4	习题解析	168
第7章	功率放大电路	185
7.1	教学基本要求	185
7.2	重点分析	185
7.2.1	功率放大电路的一般问题	185
7.2.2	互补推挽功率放大电路	187
7.2.3	丁类功率放大器	191
7.2.4	集成功率放大器	191
7.2.5	功率器件	191

7.3	例题精解	192
7.4	习题解析	197
第8章	直流稳压电源	206
8.1	教学基本要求	206
8.2	重点分析	206
8.2.1	整流与滤波电路	206
8.2.2	线性直流稳压电路	208
8.2.3	开关直流稳压电路	210
8.3	例题精解	211
8.4	习题解析	217

第 1 章 半导体器件

1.1 教学基本要求

- (1) 了解本征半导体、杂质半导体和 PN 结的形成,理解 PN 结的单向导电性。
- (2) 理解普通二极管、稳压二极管、双极型三极管和场效应管的基本工作原理,掌握它们的特性、主要参数和等效电路模型。
- (3) 了解常用光电子器件的种类、特性及应用。

1.2 重点分析

1.2.1 半导体基础知识

1. 本征半导体

(1) 在本征半导体中,由于晶体中共价键的结合力很强,所以本征半导体的导电能力非常弱。

(2) 在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现,称为自由电子-空穴对。本征半导体中载流子的浓度除了与半导体材料本身的性质有关外,还与温度密切相关。

(3) 一旦空穴和自由电子浓度建立起来,载流子(自由电子和空穴)的复合率等于产生率,即达到一种动态平衡。

2. 杂质半导体

(1) 杂质半导体可分为 P 型半导体和 N 型半导体两大类。

(2) P 型半导体中空穴为多数载流子;N 型半导体中自由电子为多数载流子。

(3) 半导体掺入杂质后,载流子的数目大大增加,使半导体的导电能力增强。

3. PN 结

(1) 在 P 型和 N 型半导体的交界面两侧,由于多数载流子的电子和空穴存在浓度差,所以 N 区中的多数载流子电子要向 P 区扩散;同时,P 区的多数载流子空穴也要向 N 区扩散,这就称为多数载流子的扩散运动。内电场的作用有利于少数载流子的运动,既有利于 P 区中的电子向 N 区运动,也有利于 N 区中的空穴向 P 区运动。少数载流子在电场作用下的定向运动称为漂移运动。

(2) 随着扩散运动的进行,空间电荷区的宽度逐渐增大;随着漂移运动的进行,空间电荷区的宽度逐渐减小。扩散与漂移达到动态平衡时,空间电荷区的宽度不再变化,则PN结形成。

4. PN结的单向导电性

(1) 当外加正向电压时,PN结的内电场强度将减小,有利于多数载流子的扩散运动而形成扩散电流,称为正向电流 I 。

(2) 当外加反向电压时,PN结的内电场强度将增大,N区和P区中的少数载流子更容易产生漂移运动,产生漂移电流。由于少数载流子的浓度很小,所以漂移电流是很微弱的。

1.2.2 半导体二极管

1. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性曲线如图 1.2.1 所示。

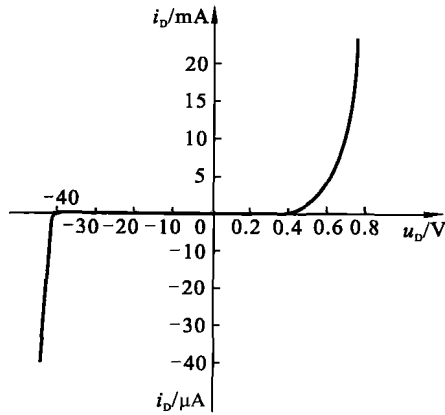


图 1.2.1 二极管的伏安特性曲线

1) 二极管方程

$$i_D \approx I_S \left[\exp \left(\frac{u_D}{U_T} \right) - 1 \right] \quad (1.2.1)$$

2) 正向特性

当正向偏置电压较小时,二极管仍未完全导通,这一电压区域称为死区。硅管的死区电压约为 0.5V,锗管的死区电压约为 0.1V。 u_D 大于死区电压后,有

$$i_D \approx I_S \exp \left(\frac{u_D}{U_T} \right)。$$

3) 反向特性

二极管反向偏置时,反向电流很小,几乎不随反向电压的变化而改变。当反向电流超过一定范围时,反向电压的增加使反向电流急剧增大,二极管发生反向击穿。

2. 二极管的主要参数

1) 最大整流电流 I_F

当二极管长期运行时,允许通过的最大正向平均电流称为 I_F 。

2) 反向击穿电压 U_{BR}

二极管反向击穿时的电压值。击穿时二极管的单向导电性被破坏,甚至因过热而烧坏二极管。

3) 反向电流 I_R

二极管未击穿时的反向电流称为 I_R 。

3. 二极管的电路模型

图 1.2.2(a)~(d)分别为理想模型、恒压降模型、折线模型和小信号模型。其中

$$r_D = \frac{1}{g_D} = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})} \quad (1.2.2)$$

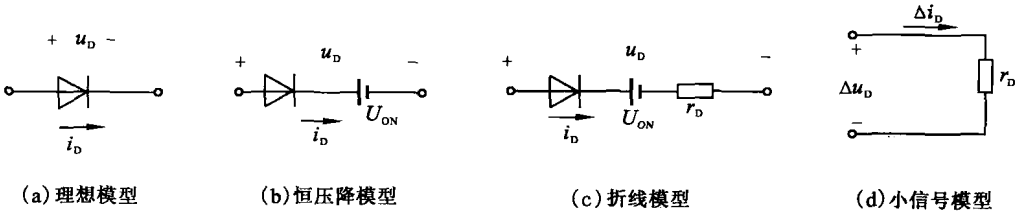


图 1.2.2 二极管的电路模型

4. 稳压二极管

稳压二极管是一种用特殊工艺制成的面结型硅半导体二极管,当反向电压加到某一定值时,反向电流剧增产生反向击穿。端电压 U_Z 表示反向击穿电压,即稳压二极管的稳定电压。稳压二极管的主要参数有稳定电压 U_Z 、稳定电流 I_Z 、动态内阻 r_z 和额定功耗 P_Z 等。简单稳压二极管电路如图 1.2.3 所示。

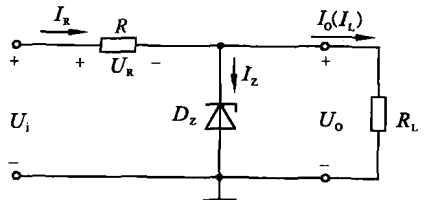


图 1.2.3 稳压二极管的应用电路

1.2.3 半导体三极管

1. 三极管的结构

双极型三极管分为两种类型：NPN型和PNP型，结构如图1.2.4所示。从三个杂质区域各自引出一个极，分别称为发射极e、集电极c和基极b，它们对应的杂质区域分别称为发射区、集电区和基区。

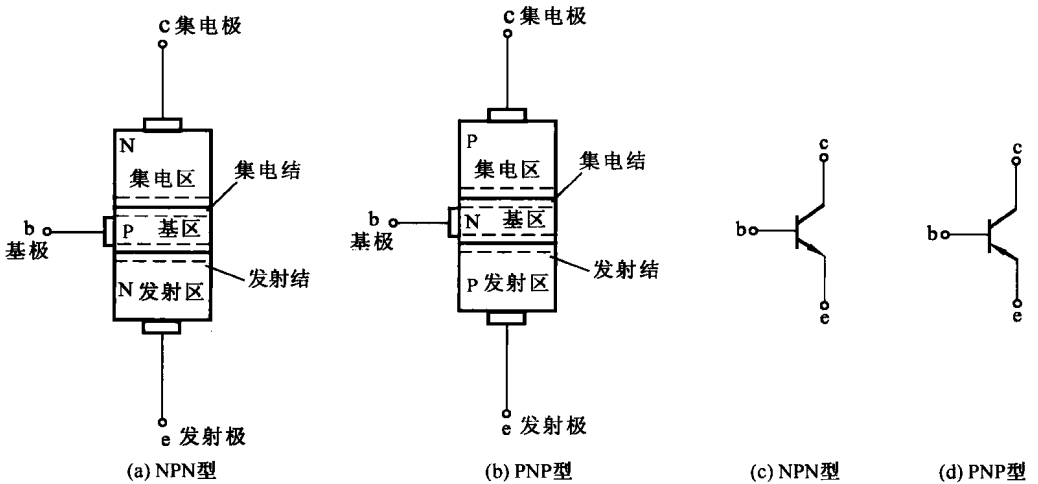


图 1.2.4 双极型三极管的结构示意图及符号

2. 三极管的伏安特性曲线

1) 输入特性

如图1.2.5所示，当输出电压 u_{CE} 为某一数值(即 u_{CE} 为常数)时，输入电流 i_B 与输入电压 u_{BE} 之间的关系为

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE}=\text{常数}} \quad (1.2.3)$$

2) 输出特性

如图1.2.6所示，共射极连接时的输出特性曲线描述了当输入电流 i_B 为某一数值(即 i_B 为常数)时，集电极电流 i_C 与电压 u_{CE} 间的关系为

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{i_B=\text{常数}} \quad (1.2.4)$$

发射结正向偏置且集电结反向偏置的区域为放大区。发射结和集电结均处于正向偏置的区域为饱和区。发射结和集电结均反向偏置的区域为截止区。

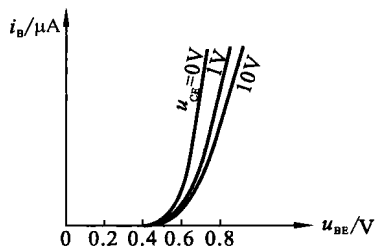


图 1.2.5 输入特性曲线

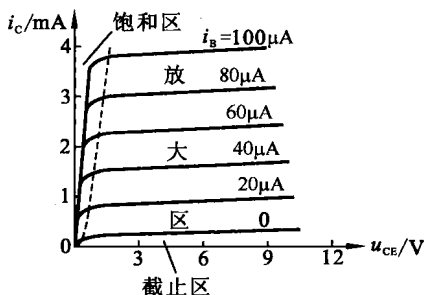


图 1.2.6 输出特性曲线

3. 三极管的主要参数

1) 电流放大系数

共发射极交流电流放大系数为 $\beta = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{u_{CE}=\text{常数}}$ 。

共基极交流电流放大系数为 $\alpha = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \right|_{u_{CE}=\text{常数}}$ 。

2) 极间反向电流

集电极-基极反向饱和电流为 I_{CBO} ，集电极-发射极反向饱和电流为 I_{CEO} ，满足以下关系

$$I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO} \quad (1.2.5)$$

3) 极限参数

集电极最大允许电流 I_{CM} ；集电极最大允许耗散功率 P_{CM} ；反向击穿电压 $U_{(BR)EBO}$ ；反向击穿电压 $U_{(BR)CBO}$ ；反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。

4. 三极管的简化 H 参数电路模型

简化 H 参数模型如图 1.2.7 所示，其中 r_{be} 的计算公式为

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} \quad (1.2.6)$$

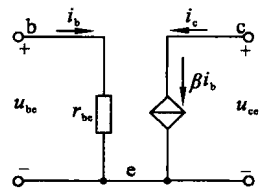


图 1.2.7 简化 H 参数模型

式中， $r_{bb'}$ 为晶体管的基区体电阻，低频小功率管的

$r_{bb'}$ 约几百欧姆，在估算中一般取 300Ω ； U_T 为温度的电压当量，室温下一般取 $26mV$ 。

1.2.4 场效应晶体管

1. 结型场效应管

1) 结构与符号

N 沟道结型场效应管的结构示意图和符号分别如图 1.2.8(a)、(b)所示。

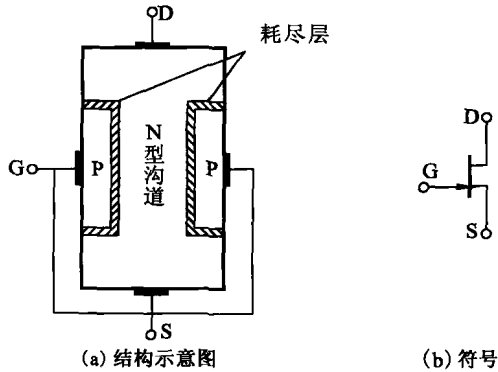


图 1.2.8 N 沟道结型场效应管的结构和符号

2) 特性曲线

(1) 输出特性:

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{u_{GS} = \text{常数}} \quad (1.2.7)$$

输出特性曲线如图 1.2.9(a)所示。

(2) 转移特性:

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{u_{DS} = \text{常数}} \quad (1.2.8)$$

转移特性曲线如图 1.2.9(b)所示。

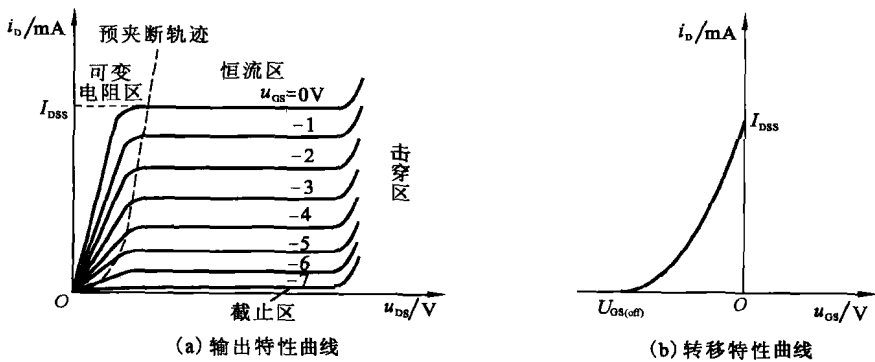


图 1.2.9 N 沟道结型场效应管的特性曲线

转移特性曲线可近似用以下公式表示：

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \quad (\text{当 } U_{GS(off)} \leq u_{GS} \leq 0 \text{ 时}) \quad (1.2.9)$$

2. 绝缘栅场效应管

1) 结构符号

N 沟道增强型 MOS 场效应管(FET)的结构示意图和符号如图 1.2.10(a)、(b)所示。

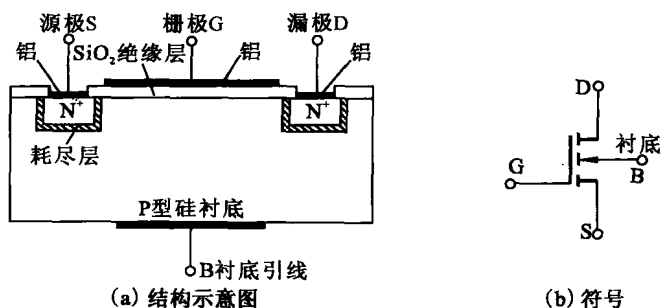


图 1.2.10 N 沟道增强型 MOSFET 的结构示意图和电路符号

2) 特性曲线(图 1.2.11)

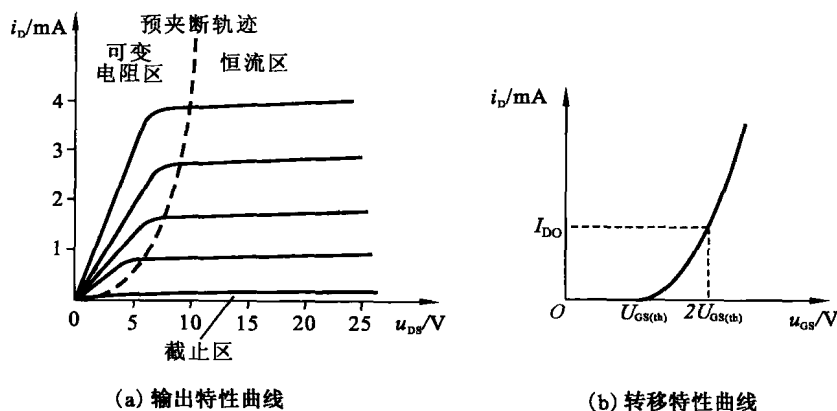


图 1.2.11 N 沟道增强型 MOSFET 的特性曲线

3. 场效应管的主要参数

1) 直流参数

主要有饱和漏极电流 I_{DSS} ；耗尽型夹断电压 $U_{GS(off)}$ ，增强型开启电压 $U_{GS(th)}$ ；直流输入电阻 R_{GS} 。

2) 交流参数

主要有低频跨导 g_m ，以及极间电容 C_{GS} 、 C_{GD} 和 C_{DS} 。

3) 极限参数

主要有漏极最大允许耗散功率 P_{DM} 、漏源击穿电压 $U_{(BR)DS}$ 、栅源击穿电压 $U_{(BR)GS}$ 。

4. 场效应管的小信号模型

场效应管(FET)的低频简化小信号模型如图 1. 2. 12(a)所示,场效应管的高频小信号模型如图 1. 2. 12(b)所示。

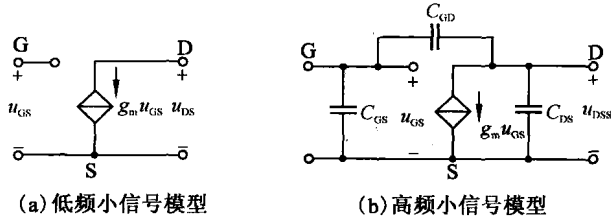


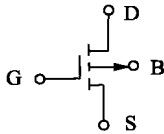
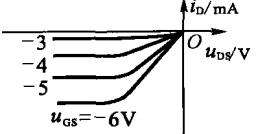
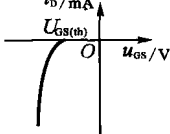
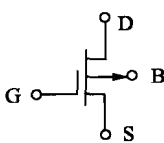
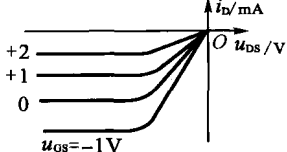
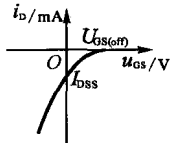
图 1. 2. 12 FET 小信号模型

5. 各种场效应管的符号和特性曲线(表 1. 2. 1)。

表 1. 2. 1 各种场效应管的符号和特性曲线

种类	符号	输出特性	转移特性
结型 N 沟道			
结型 P 沟道			
绝缘栅型 N 沟道	增强型 		
	耗尽型 		

续表

种类	符号	输出特性	转移特性
绝缘栅型 P沟道	增强型 		
	耗尽型 		

1.3 例题精解

【例 1.1】 请选择正确答案的序号。

- (1) 本征半导体的载流子浓度随温度上升而变, 其中_____。
- (a) 自由电子浓度增加, 而空穴浓度不变
 (b) 空穴浓度增加, 而自由电子浓度不变
 (c) 空穴和自由电子浓度以同样的规律和倍数增加
 (d) 空穴和自由电子浓度不变
- (2) 杂质半导体中的少数载流子浓度_____。
- (a) 与掺杂浓度和温度无关
 (b) 只与掺杂浓度有关
 (c) 只与温度有关
 (d) 与掺杂浓度和温度都有关
- (3) 硅二极管的死区电压约为_____ V, 锗二极管的死区电压约为_____ V。
- (a) 0.5 (b) 1 (c) 1.5 (d) 0.1
- (4) 一个硅二极管在正向电压 $U_D = 0.6\text{V}$ 时, 正向电流 $I_D = 10\text{mA}$ 。若 U_D 增加到 0.66V (即增加 10%), 则电流 I_D _____。
- (a) 约为 11mA (也增加 10%) (b) 约为 20mA (增大 1 倍)
 (c) 约为 100mA (增大到原先的 10 倍) (d) 仍为 10mA (基本不变)
- (5) 测得晶体三极管 $I_B = 30\mu\text{A}$ 时, $I_C = 2.4\text{mA}$; $I_B = 40\mu\text{A}$ 时, $I_C = 3\text{mA}$, 则该晶体三极管的交流电流放大系数为_____。
- (a) 80 (b) 60 (c) 75 (d) 100
- (6) 三极管工作在放大区时, 发射结为_____, 集电结为_____; 工作在截止区时, 发射结为_____, 集电结为_____; 工作在饱和区时, 发射结为_____, 集电结为_____。
- (a) 正偏 (b) 反偏 (c) 零偏

(7)三极管的三管脚的对地电压分别为 $U_A = 12V$ 、 $U_B = 4.7V$ 和 $U_C = 4V$ ，则此三极管是_____材料_____型管，A 为_____极，B 为_____极，C 为_____极，该三极管处于_____工作状态。

- (a)硅 (b)锗 (c)NPN (d)PNP (e)集电
(f)基 (g)发射 (h)放大 (i)截止 (j)饱和

(8)在放大电路中，场效应管应工作在漏极特性的_____区域。

- (a)欧姆 (b)截止 (c)饱和 (d)击穿

解:答案为(1)c; (2)d; (3)a, d; (4)c; (5)b; (6)a, b, b, b, a, a; (7)a, c, e, f, g, h; (8)c。

【例 1.2】 二极管限幅电路如图 1.3.1(a)所示，已知 $R = 1k\Omega$ ， $U_{REF} = 3V$ ，二极管理想， $u_i = 6\sin\omega t$ (V)，试绘出 u_o 的波形。

解:当 $u_i \geq 3V$ 时，二极管 D 导通， $u_o = 3V$ 。

当 $u_i < 3V$ 时，二极管 D 截止， $u_o = u_i$ 。 u_i 和 u_o 的波形如图 1.3.1(b)所示。

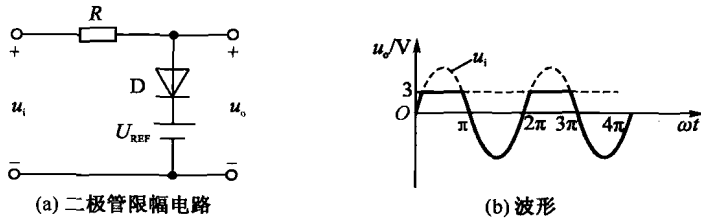


图 1.3.1 二极管限幅电路和波形

【例 1.3】 二极管的伏安特性如图 1.3.2(a)所示。要求：

(1)在二极管回路中加 1.5V 的电压，如图 1.3.2(b)所示，求此时二极管的电流和电压。

(2)如果回路中的电压改为 3V，此时二极管的电流和电压各为多少？

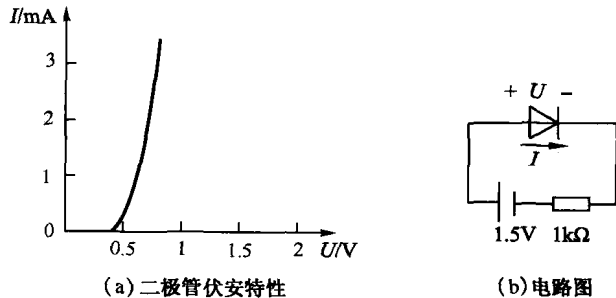


图 1.3.2 二极管伏安特性和电路图