

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 模拟电子技术基础 学习指导书

■ 孙肖子 李会方 谢松云 张进成 谢 楷 编

· · · · · ·  
· · · · · ·  
· · · · · ·  
· · · · · ·  
· · · · · ·  
· · · · · ·  
· · · · · ·

高等教育出版社

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 模拟电子技术基础 学习指导书

MONI DIANZI JISHU JICHU XUEXI ZHIDAO SHU

■ 孙肖子 李会方 谢松云 张进成 谢 楷 编

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| ISBN 7-04-016111-1 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016112-9 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016113-7 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016114-5 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016115-3 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016116-1 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016117-9 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016118-7 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016119-5 | 定价：18.00元 |
| ISBN 7-04-016120-3 | 定价：18.00元 |

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是西安电子科技大学和西北工业大学联合编写、高等教育出版社2012年12月出版发行的《模拟电子技术基础》的配套学习指导书。

本书主要介绍各章基本要求及重点、难点；各章习题类型分析及例题精解；以及各章习题解答。其中例题精解是补充一些教材和习题中没有的题目，以加强某些重要概念和解题方法。最后给出几份模拟电子技术基础课程的模拟试题及其答案。本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程、电气工程及其自动化、医学信息工程、微电子科学与工程、电子科学与技术等有关专业学生学习课程的参考资料，也可作为教师的教学手册。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础学习指导书/孙肖子等编. --北京:高等教育出版社,2015.1  
ISBN 978-7-04-041242-0

I. ①模… II. ①孙… 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(2014)第 244621 号

策划编辑 吴陈滨      责任编辑 平庆庆      封面设计 赵 阳      版式设计 范晓红  
插图绘制 黄建英      责任校对 王 雨      责任印制 韩 刚

|      |                   |      |                                                                       |
|------|-------------------|------|-----------------------------------------------------------------------|
| 出版发行 | 高等教育出版社           | 咨询电话 | 400-810-0598                                                          |
| 社 址  | 北京市西城区德外大街 4 号    | 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>             |
| 邮政编码 | 100120            |      | <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>             |
| 印 刷  | 涿州市京南印刷厂          | 网上订购 | <a href="http://www.landradio.com">http://www.landradio.com</a>       |
| 开 本  | 787mm×1092mm 1/16 |      | <a href="http://www.landradio.com.cn">http://www.landradio.com.cn</a> |
| 印 张  | 13.25             | 版 次  | 2015 年 1 月第 1 版                                                       |
| 字 数  | 310 千字            | 印 次  | 2015 年 1 月第 1 次印刷                                                     |
| 购书热线 | 010-58581118      | 定 价  | 19.90 元                                                               |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 41242-00

# 序 一

由教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐,西安电子科技大学与高等教育出版社联合策划的这套电子信息类专业基础课程系列教材即将陆续出版发行,我很高兴,这是我国高校电子信息类教材建设工作的一个新举措!

本系列教材的编写基于西安电子科技大学的电子信总办学特色和长期的教学经验积累。学校从1931年诞生于江西瑞金的中央军委无线电学校,到1949年张家口的军委工校和20世纪60年代的“西军电”,80年代的西北电讯工程学院,到现在的西安电子科技大学,一直致力于为国家和军队培养电子信息方面的高级专业人才,是国内最早建立信息论、信息系统工程、雷达、微波天线、电子机械、电子对抗等专业的高校之一,形成了鲜明的电子与信息学科特色与优势。本系列教材由学校众多知名教授担任主编,他们长期从事电子信息专业基础课教学和研究,努力继承和发扬学校在电子信息类专业基础课教学方面的经验和特色,并结合最新的科技进展组织和编写了系列教材。

大家知道,培养高素质的电子信息专门人才的前提,是要加强基础课程建设,尤其是数理基础和专业技术基础,要打造一个高水平的专业基础课程平台;本系列教材正是瞄准这一目标,从电路分析、信号与系统、模电(低频、高频)、数电、电磁场等专业基础课,到通信原理、雷达原理、软件技术基础、微波技术与天线等技术基础课,构成了一个知识面宽阔的电子信息类专业基础课教材体系。

本系列教材在编写时强调了如下几点,也可看做是本系列教材的特色:

(1) 本系列教材自成体系,以西安电子科技大学的优势学科和特色专业为依托,覆盖了学校电子信息类专业的主干专业基础课程,知识结构系统完整,内容精练,具有先进性、系统性、完整性等特点。

(2) 本系列教材由学校知名教授、专家(包括国家级教学名师、教育部相关教指委委员、学科带头人等)担任主编,他们具有较丰富的教学和科研经验,保证了该系列教材的编写质量。

(3) 本系列教材具有很好的基础,大部分教材都是在原有教材的基础上进行修订,在此基础上增加先进的内容和新的方法,而部分原有教材是国家“九五”“十五”“十一五”国家级规划教材和普通高等教育精品教材,获得过省部级优秀教材奖。

(4) 本系列教材对应的本科生课程大部分是国家级精品课程或省级精品课程,课程建设和教材建设十分注重基础理论知识与实际工程应用之间的紧密结合,注重对学生的分析问题和解决问题能力的培养。

电子信息领域是一个发展异常迅速的领域,新的需求不断产生,新技术不断涌现,电子信息产品迅速更新并广泛应用于社会的各个方面,从而对IT人才培养提出了更高的要求,反映在课程建设和教材建设上,就是要有前瞻性,并不断强化基础、不断适应新技术和新要求,就是要通过教学改革与创新,不断提高教学质量,进而促进人才培养质量的全面提升。

希望本系列教材能在这方面产生一些积极的促进作用,并在实践中不断改进和提高,为国家培养出更多优秀的电子信息高级专业人才做出贡献!

保铮

2012年5月于西安

## 序 二

自 1999 年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。

2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过 2~3 年的试用,形成适用于本层次教学的教材。

3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。

4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010 年 12 月

# 前 言

本书是西安电子科技大学和西北工业大学联合编写,由高等教育出版社2012年12月出版发行的《模拟电子技术基础》的配套学习指导书,是教材的补充与辅助材料。教材、学习指导书、电子教案,构成了本课程的基本教学资源。

编写学习指导书的目的是为了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,开展互相交流和教学研究,以进一步提高教学质量,也帮助学习本课程的同学和广大读者更好地掌握该课程的基本概念、基本电路原理、基本分析方法以及提高综合应用能力。

本书将给出如下内容:

◆ 各章基本要求及重点、难点;各章习题类型分析及例题精解;各章习题解答。其中例题精解是补充一些教材和习题中没有的题目,以加强理解某些重要概念和解题方法。

◆ 附录给出西安电子科技大学和西北工业大学的部分模拟试题及答案,供读者参考。

本书主要由西安电子科技大学孙肖子教授和西北工业大学李会芳教授编写,孙肖子编写了第一、二、三、七、八章全部内容及第五章的习题解答;李会芳编写了第四、六章全部内容及第五章的习题类型和例题精解。孙肖子教授、李会芳教授与西北工业大学谢松云教授、西安电子科技大学张进成教授、西安电子科技大学谢楷副教授共同编写了《模拟电子技术基础》教材。西安交通大学邓建国教授审阅了本书的全部书稿,提出了许多宝贵意见,高等教育出版社的编辑老师们为本书的出版付出了辛劳。在此,对于所有帮助我们的同仁表示深切的感谢!我们希望本书的出版对广大教师、学生、有志考研者和自学者将会有所帮助。

书中可能存在不妥之处,请读者给予批评指正,如有问题可直接联系编者([XZSUN@xidian.edu.cn](mailto:XZSUN@xidian.edu.cn))。

编 者

2014年4月于西安

# 目 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                         | 1   |
| 1.1 基本要求及重点、难点 .....                 | 1   |
| 1.2 习题类型分析及例题精解 .....                | 1   |
| 1.3 习题解答 .....                       | 1   |
| 第二章 常用半导体器件原理 .....                  | 2   |
| 2.1 基本要求及重点、难点 .....                 | 2   |
| 2.2 习题类型分析及例题精解 .....                | 2   |
| 2.3 习题解答 .....                       | 7   |
| 第三章 双极型晶体管和场效应管放大器基础 .....           | 16  |
| 3.1 基本要求及重点、难点 .....                 | 16  |
| 3.2 习题类型分析及例题精解 .....                | 16  |
| 3.3 习题解答 .....                       | 25  |
| 第四章 集成运算放大器内部电路设计 .....              | 49  |
| 4.1 基本要求及重点、难点 .....                 | 49  |
| 4.2 习题类型分析及例题精解 .....                | 49  |
| 4.3 习题解答 .....                       | 57  |
| 第五章 集成运算放大器的基本应用电路 .....             | 69  |
| 5.1 基本要求及重点、难点 .....                 | 69  |
| 5.2 习题类型分析及例题精解 .....                | 69  |
| 5.3 习题解答 .....                       | 85  |
| 第六章 基于集成运算放大器的有源 $RC$ 滤波器分析与设计 ..... | 101 |
| 6.1 基本要求及重点、难点 .....                 | 101 |
| 6.2 习题类型分析及例题精解 .....                | 101 |
| 6.3 习题解答 .....                       | 112 |
| 第七章 反馈与振荡 .....                      | 128 |
| 7.1 基本要求及重点、难点 .....                 | 128 |
| 7.2 习题类型分析及例题精解 .....                | 128 |

---

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 7.3 习题解答 .....             | 137        |
| <b>第八章 功率电路及电源管理 .....</b> | <b>161</b> |
| 8.1 基本要求及重点、难点 .....       | 161        |
| 8.2 习题类型分析及例题精解 .....      | 161        |
| 8.3 习题解答 .....             | 166        |
| <b>附录 A .....</b>          | <b>175</b> |
| 模拟试题(一) .....              | 175        |
| 模拟试题(二) .....              | 179        |
| 模拟试题(三) .....              | 183        |
| 模拟试题(四) .....              | 187        |
| <b>附录 B .....</b>          | <b>191</b> |
| 模拟试题(一) 参考答案 .....         | 191        |
| 模拟试题(二) 参考答案 .....         | 194        |
| 模拟试题(三) 参考答案 .....         | 197        |
| 模拟试题(四) 参考答案 .....         | 200        |

# 第一章 绪 论

## 1.1 基本要求及重点、难点

### 1. 基本要求

- (1) 了解电子器件的发展历程,从中得到创新启示;
- (2) 了解本门课程的教学脉络和路线图,为学好本门课程做好准备;
- (3) 初步建立“反馈”概念及“负反馈”给予我们的启示,了解“负反馈”方法在放大器、电源等模拟电路中的广泛应用。

### 2. 重点、难点

重点:本门课程的教学脉络和路线图。

难点:“反馈”概念。

## 1.2 习题类型分析及例题精解

(略)

## 1.3 习题解答

(略)

## 第二章 常用半导体器件原理

### 2.1 基本要求及重点、难点

#### 1. 基本要求

(1) 理解本征半导体、P型半导体、N型半导体的特点,多数载流子、少数载流子及电中性等概念。理解漂移电流和扩散电流产生的条件,它们的大小及方向与哪些因素有关。

(2) 理解PN结的工作原理,掌握PN结的指数特性及单向导电性,了解PN结的温度特性、击穿特性及电容特性。

(3) 深刻理解晶体二极管及稳压二极管的特性,掌握其基本应用(如:限幅、整流、开关、稳压等应用)。了解其他二极管的基本功能(发光二极管、光电二极管、肖特基二极管、变容二极管等)。

(4) 掌握双极型晶体管的工作原理,电流电压指数特性,输入特性、输出特性(放大区、饱和区、截止区等)的特点,以及主要参数的含义(如: $g_m$ ,  $\beta$ ,  $I_{CBO}$ ,  $I_{CEO}$ ,  $U_A$ ,  $U_{(BR)CEO}$ ,  $I_{Cmax}$ ,  $P_{Cmax}$ 等)。

(5) 掌握场效应管(结型、特别是增强型MOS管)的工作原理,平方律转移特性、输出特性的特点及应用,理解参数的含义(如: $g_m$ ,  $U_A$ ,  $I_{DSS}$ ,  $U_{GS(off)}$ ,  $U_{GS(th)}$ ,  $P_{Dmax}$ ,  $U_{BR(DSO)}$ 等)。

(6) 对比双极型晶体管(简称晶体管)及场效应管的不同特点(如:指数特性与平方律特性、 $g_m$ 大小、输入电阻大小、工艺复杂程度等)。

(7) 初步掌握双极型晶体管及场效应管电路直流工作点的分析与计算。

(8) 深刻理解双极型晶体管小信号交流简化模型及主要参数( $\beta$ ,  $g_m$ ,  $r_e$ ,  $r_{be}$ ,  $r_{ce}$ 等)的含义及计算。深刻理解场效应管小信号交流简化模型及主要参数( $g_m$ ,  $r_{ds}$ 等)的含义及计算。

#### 2. 重点、难点

重点:二极管特性及应用,双极型晶体管及场效应管工作原理、特性及参数的掌握与理解。

难点:概念多,头绪多,管子种类多,要好好对比、总结,梳理清楚。

### 2.2 习题类型分析及例题精解

#### 1. 半导体基本原理及PN结

**【例2-1】** 在硅本征半导体中掺入某些五价元素形成N型半导体,多数载流子——自由电子数远远多于少数载流子——空穴数,故N型半导体带负电。反之,在硅本征半导体中掺入某些三价元素形成P型半导体,空穴数远远多于自由电子数,故P型半导体带正电,这种说法对吗?

**解:** 不对。在N型半导体中,除了可移动的载流子——自由电子和空穴外,还有五价元素失去电子所留下的带正电的正离子,正离子数加上空穴数等于自由电子数,正负电荷总体平衡,所以,N型半导体不带电,呈现“电中性”。不过,正离子是带电的原子核,不可移动,不是载流子。“多子”与“少子”都是指可移动的、可参与导电的载流子。同理,P型半导体

也呈现“电中性”。

**【例 2-2】** 在 N 型半导体中掺入足够数量的三价元素,可将其改型为 P 型半导体,这种说法正确吗?

**解:**正确。如果掺入的三价元素远远多于原来的五价元素,那么多数载流子将变为空穴,电子将成为少数载流子,N 型半导体就可演变为 P 型半导体。反之,在 P 型半导体中掺入足够数量的五价元素,也可将其改型为 N 型半导体,半导体制作工艺就是这样进行的。

**【例 2-3】** “漂移电流”与“扩散电流”与哪些因素有关?

**解:**所谓“漂移电流”是指载流子在电场(电位差)作用下定向运动所形成的电流,它的大小与电场强度、载流子浓度以及迁移率(单位电场强度下载流子移动的速度)有关,电场强度越大、载流子浓度越高、迁移率越大,则漂移电流越大。由于自由电子在共价键外移动,比较容易,而空穴移动是共价键中的价电子的反向递补运动,显然比较慢,故自由电子的迁移率比空穴大。“扩散电流”是载流子在浓度差作用下定向运动所形成的电流(载流子由浓度高的地方向浓度低的地方移动)浓度梯度越大,扩散电流将越大,即使载流子浓度很大,但处处均匀分布,也不会产生扩散电流。

## 2. 二极管与稳压管电路分析

二极管与稳压管电路分析的关键是:判断二极管何时导通,何时截止;稳压管何时反向击穿,何时不击穿,何时正向导通。

**【例 2-4】** 二极管电路如图 2-4 所示,输入电压  $u_i = 8 \sin \omega t (\text{V})$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,二极管导通电压  $U_D = 0.7 \text{ V}$ ,求输出电压  $u_o$  的波形。

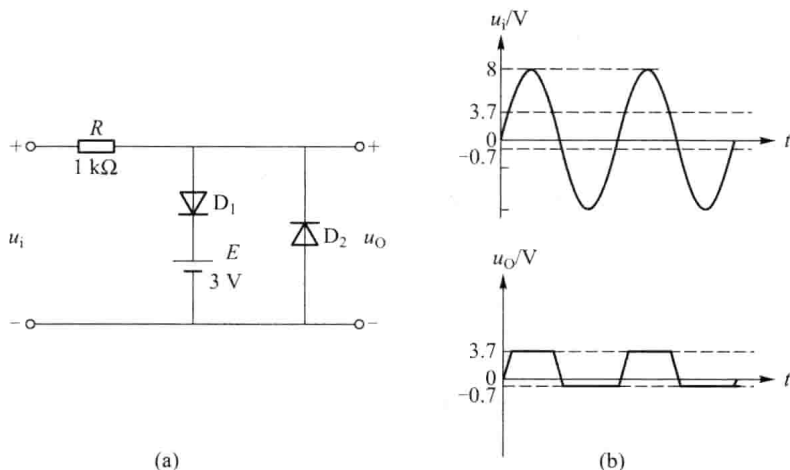


图 2-4

**解:**首先假设两个二极管都不导通(断开),看其两端是正偏或是反偏,如是正偏,则二极管导通,端电压为  $0.7 \text{ V}$  (若是理想二极管,则为短路),如是反偏,则仍为开路。该题中,对应输入电压为正半周时,  $D_2$  反偏,故  $D_2$  截止。再观察  $D_1$ ,当输入电压  $u_i$  小于  $3.7 \text{ V}$  时,  $D_1$  仍为反偏而截止,电阻  $R$  无电流流过,故输出电压  $u_o = u_i$ ,但当输入电压  $u_i$  大于  $3.7 \text{ V}$  时,  $D_1$  转为正偏而导通,端电压为  $0.7 \text{ V}$ ,故输出电压  $u_o = 3.7 \text{ V}$ 。当输入电压  $u_i$  为负半周且绝对值小于  $0.7 \text{ V}$  时,  $D_1$ 、 $D_2$  均截止,  $u_o = u_i$ ,但当输入电压  $u_i$  绝对值大于  $0.7 \text{ V}$  时,  $D_1$  仍截止,而  $D_2$  转为正偏而导通,故输出电压  $u_o = -0.7 \text{ V}$ 。所以输出电压  $u_o$  的波形如图 2-4(b) 所示。

【例 2-5】 若某信号  $u_A$  受噪声和干扰影响,如图 2-5(a) 所示,请设计一个二极管电路,将信号选出,且将噪声和干扰去掉。

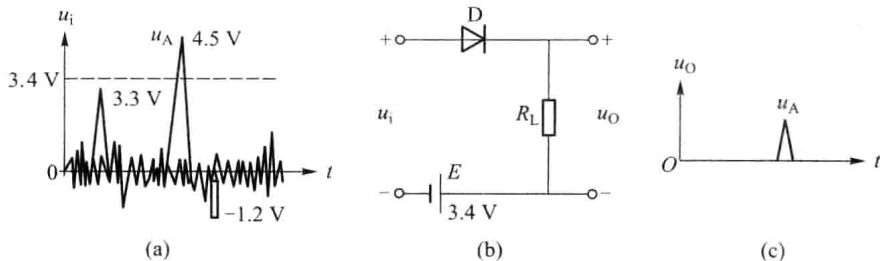


图 2-5

解:设计的二极管电路如图 2-5(b) 所示,选择限幅电平  $E > 3.3 \text{ V}$  (选  $E = 3.4 \text{ V}$ ),则只有当  $u_i > 3.4 \text{ V}$  时二极管才正偏而导通,信号才有输出,  $u_o$  波形如图 2-5(c) 所示(此解设二极管为理想二极管)。

【例 2-6】 稳压二极管(简称稳压管)电路如图 2-6 所示,图中  $U_i = 15 \text{ V}$ ,稳压管稳定电压  $U_Z = 6 \text{ V}$ ,稳压管最小允许电流  $I_{Z\min} = 2 \text{ mA}$ ,最大允许电流  $I_{Z\max} = 15 \text{ mA}$  ( $P_{Z\max} = 90 \text{ mW}$ )。负载电流变化范围为  $5 \text{ mA} < I_L < 10 \text{ mA}$ ,求限流电阻  $R$  的值。

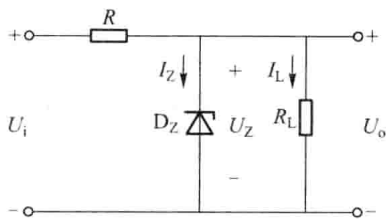


图 2-6

解:当  $U_i$  与  $R$  一定时,总电流  $I_R = I_Z + I_L$  也是一定的,负载电流变化是靠稳压管电流变化来调节的,负载电流大,则稳压管电流小,反之亦然。

$$I_R = \frac{U_i - U_Z}{R} \quad \frac{U_i - U_Z}{R} - I_{L\min} < I_{Z\max}$$

$$R > \frac{U_i - U_Z}{I_{L\min} + I_{Z\max}} = \frac{(15 - 6) \text{ V}}{(5 + 15) \text{ mA}} = 0.45 \text{ k}\Omega = R_{\min}$$

又有

$$\frac{U_i - U_Z}{R} - I_{L\max} > I_{Z\min} \quad R < \frac{U_i - U_Z}{I_{L\max} + I_{Z\min}} = \frac{(15 - 6) \text{ V}}{(10 + 2) \text{ mA}} = 0.75 \text{ k}\Omega = R_{\max}$$

故  $450 \Omega < R < 750 \Omega$  选  $R = 600 \Omega$

### 3. 关于晶体管工作状态及复合管的 $\beta$ 值

【例 2-7】 用三用表直流电压测量挡测得电路中晶体管各极对地电位如图 2-7 所示,试判断各管的工作状态(放大、截止或饱和)。

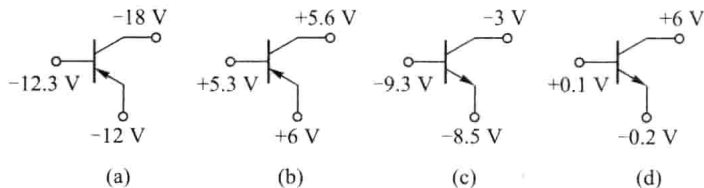


图 2-7

解:(a) 图为 PNP 管,发射结正偏( $U_{BEQ} = -0.3 \text{ V}$ ),集电结反偏( $U_{CBQ} = -5.7 \text{ V}$ ),故该管

工作在放大区,且为锗 PNP 管。

(b) 图为 PNP 管,发射结正偏( $U_{BEQ} = (5.3-6) \text{ V} = -0.7 \text{ V}$ ),集电结正偏( $U_{CEQ} = (5.6-6) \text{ V} = -0.4 \text{ V}$ ,  $U_{CBQ} = +0.3 \text{ V}$ ),故该管工作在饱和区,且为硅 PNP 管。

(c) 图为 NPN 管,发射结反偏( $U_{BEQ} = -0.8 \text{ V}$ ),集电结反偏( $U_{CEQ} = +5.5 \text{ V}$ ),故该管工作在截止区。

(d) 图为 NPN 管,发射结正偏( $U_{BEQ} = +0.3 \text{ V}$ ),集电结反偏( $U_{CEQ} = +6.2 \text{ V}$ ),故该管工作在放大区,且为锗 NPN 管。

【例 2-8】 复合晶体管(简称复合管)如图 2-8 所示,图(a)等效为一个 NPN 管,图(b)等效为一个 PNP 管,试求等效管的  $\beta$  值。

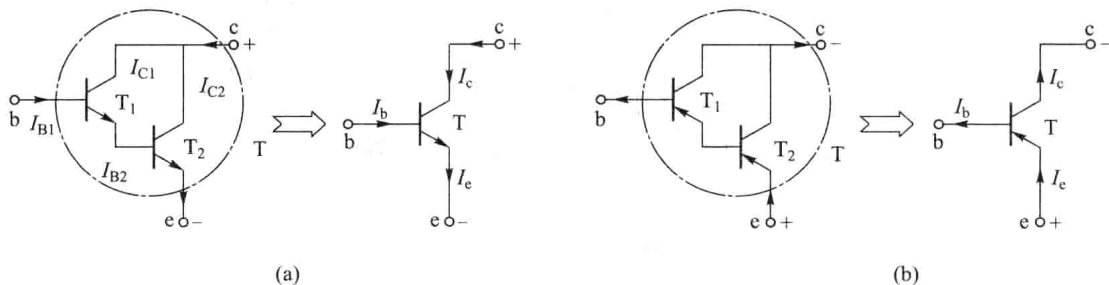


图 2-8

$$\text{解: 复合管 } \beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{I_{C1} + I_{C2}}{I_{B1}} \approx \frac{I_{C2}}{I_{B1}} = \frac{\beta_2 I_{B2}}{I_{B1}} = \frac{\beta_2 (1 + \beta_1) I_{B1}}{I_{B1}} \approx \beta_2 \beta_1$$

若  $\beta_1 = 80, \beta_2 = 60$ , 则

$$\beta = \beta_1 \beta_2 = 80 \times 60 = 4800$$

可见,复合管的等效  $\beta$  等于两管  $\beta$  值的乘积,故复合管是提高  $\beta$  值的好方法。

#### 4. 晶体管作为开关的应用

双极型晶体管和场效应管可作为开关,控制发光二极管、继电器、小电机、加热丝等。

【例 2-9】 图 2-9 给出一个晶体管开关驱动发光二极管(LED)电路,试说明其工作原理。

解:如图所示,当输入控制信号为低电平(0 V)时,晶体管 T 截止,  $I_c = 0$ , 相当于开关打开,发光二极管不发光。而当输入信号为高电平(5 V)时,晶体管 T 导通,且进入深度饱和状态,相当于开关闭合,发光二极管发光,其工作电流最大为 6 mA 左右。理由如下:

$$\text{当 } I_B = \frac{5 - 0.7}{R_B} = \frac{4.3 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 0.43 \text{ mA}, \text{ 若工作在放大区, 设 } \beta = 50, \text{ 则 } I_c = \beta I_B = 50 \times 0.43 \text{ mA} =$$

21.5 mA, 这显然不可能, 因为 T 管最大集电极电流, 即饱和电流  $I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_D - U_{CES}}{R_C} \approx \frac{(12 - 1.2 - 0.3) \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 5.25 \text{ mA}$  (式中: 设发光二极管导通电压为 1.2 V, 晶体管饱和电压为 0.3 V), 故按放大状态计算的电流值显然不对, 可见, 0.43 mA 的基极电流足以驱动并使晶

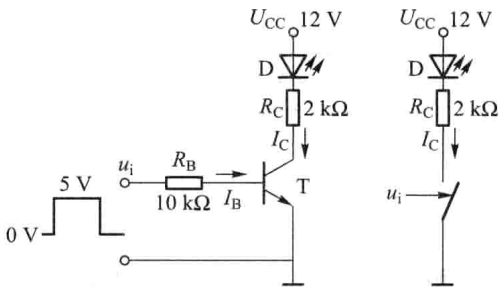


图 2-9

体管进入深度饱和状态。发光二极管的工作电流为 5.25 mA。图中  $R_B, R_C$  均为限流电阻。

图 2-9'(a)、(b) 分别给出晶体管开关控制继电器和电热器的简易电路,其中(a)图是双极型晶体管作为开关控制继电器的电路,当晶体管截止时,继电器线包无电流流过,继电器触点断开,当晶体管导通时,电流流过线包产生磁场,继电器触点吸合。图中二极管 D 用来旁路晶体管开关电流突然变化时,继电器线包电感所产生的反电势,以保证晶体管的安全运行。(b) 电路是一个大功率 MOS 管开关驱动电热丝的加热电路,图中二极管 D 同样用于保护,即当输入有一个很大的负电压时,二极管导通,以免 MOS 管反向击穿。

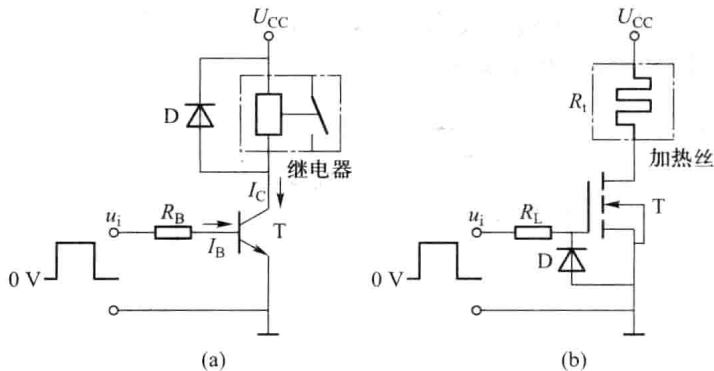


图 2-9'

### 5. 场效应管工作状态判断

【例 2-10】 场效应管电路如图 2-10 所示,试判断各电路的工作状态(恒流区、可变电阻区或截止区)。

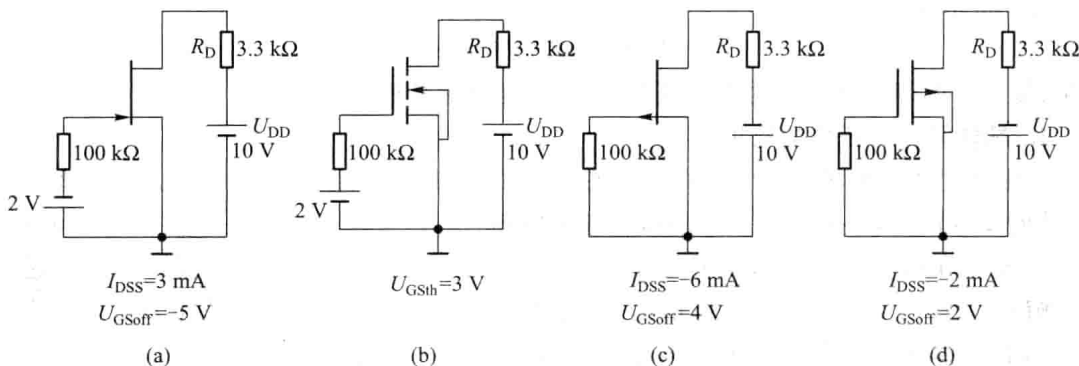


图 2-10

解:图 2-10(a) 为 N 沟道结型场效应管,偏置电压为 -2 V,漏极电流  $I_{DQ}$  必小于 3 mA,  $U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} \times R_D > 0$  V,故该场效应管工作在恒流区(即放大区)。

图(b) 为 N 沟道增强型 MOS 场效应管,偏置电压为 2 V,小于开启电压  $U_{GS(th)}$  (3 V),故该管工作在截止区。

图(c) 为 P 沟道结型场效应管,偏置电压为 0 V,漏极电流  $I_{DQ} = -6$  mA,  $U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} \times R_D = [-10 - (-6 \times 3.3)]$  V = 9.8 V,这是不可能的,因为  $U_{DS}$  最小等于零,电源电压全部降在负载电阻上,最大漏极电流  $I_{Dmax} = \frac{10 \text{ V}}{3.3 \text{ k}\Omega} \approx 3 \text{ mA}$ ,故该电路工作在深度可变电阻区。

图(d) 为 P 沟道耗尽型 MOS 场效应管,偏置电压为 0 V,漏极电流  $I_{DQ} = -2$  mA,  $U_{DSQ} =$

$U_{DD} - I_{DQ} \times R_D = [-10 - (-2 \times 3.3)] \text{ V} = -3.4 \text{ V}$ , 故该场效应管工作在恒流区(即放大区)。

## 2.3 习题解答

2-1 本征半导体中,自由电子浓度\_\_\_\_\_空穴浓度;杂质半导体中,多子的浓度与\_\_\_\_\_有关。

答:等于;掺杂浓度。

2-2 扩散电流与\_\_\_\_\_有关,而漂移电流则取决于\_\_\_\_\_;PN 结正偏时,耗尽区\_\_\_\_\_,扩散电流\_\_\_\_\_漂移电流。

答:载流子浓度差,电场强度与载流子浓度;变窄,大于。

2-3 二极管的伏安特性如图 P2-3 所示。求点 A、B 处的直流电阻  $R_D$  和交流电阻  $r_D$ 。

解:A 点处电压  $U_{DA} = 0.6 \text{ V}$ , 电流  $I_{DA} = 3 \text{ mA}$ , 则直流电阻

$$R_{DA} = \frac{U_{DA}}{I_{DA}} = \frac{0.6 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 200 \Omega$$

交流电阻

$$r_{DA} = \frac{U_T}{I_{DA}} = \frac{26 \text{ mV}}{3 \text{ mA}} = 8.67 \Omega$$

B 点处电压  $U_{DB} = 0.6 \text{ V}$ , 电流  $I_{DB} = 6 \text{ mA}$ , 则直流电阻

$$R_{DB} = \frac{U_{DB}}{I_{DB}} = \frac{0.6 \text{ V}}{6 \text{ mA}} = 100 \Omega$$

交流电阻

$$r_{DB} = \frac{U_T}{I_{DB}} = \frac{26 \text{ mV}}{6 \text{ mA}} = 4.33 \Omega$$

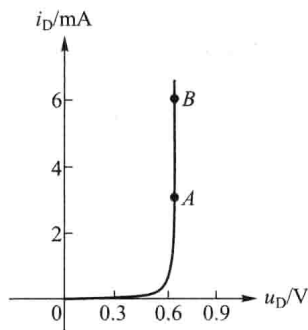


图 P2-3

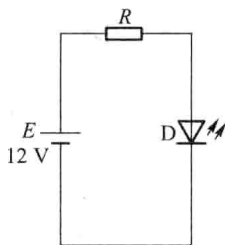


图 P2-4

2-4 如图 P2-4 所示,某发光二极管导通电压为  $2.5 \text{ V}$ ,工作电流范围为  $18 \sim 20 \text{ mA}$ 。外接  $12 \text{ V}$  直流电压源时,需要给二极管串联多大的电阻?

解:电阻  $R$  的压降  $U_R = (12 - 2.5) \text{ V} = 9.5 \text{ V}$ , 电流极值  $I_{R\min} = 18 \text{ mA}$ ,  $I_{R\max} = 20 \text{ mA}$ , 则  $R$  的最大值

$$R_{\max} = \frac{U_R}{I_{R\min}} = \frac{9.5 \text{ V}}{18 \text{ mA}} = 528 \Omega$$

其最小值

$$R_{\min} = \frac{U_R}{I_{R_{\max}}} = \frac{9.5 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 475 \Omega$$

所以,发光二极管正常工作时要求串联电阻的取值范围为  $475 \Omega \leq R \leq 528 \Omega$ 。

**2-5** 某二极管电路如图 P2-5 所示。当  $E=4 \text{ V}$  时,电流表读数  $I=3.4 \text{ mA}$ ,当  $E$  增加到  $6 \text{ V}$  时, $I$  的测量结果如何? 另一二极管  $U_D=0.65 \text{ V}$  时,测得  $I_{D0}=13 \text{ mA}$ ,当  $U_D=0.67 \text{ V}$  时, $I_D$  应该是多少?

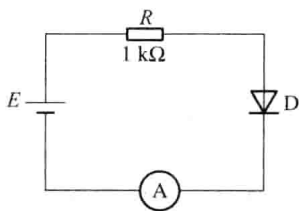


图 P2-5

**解:**根据图示电路,有

$$I = \frac{E - U_{D(\text{on})}}{R}$$

所以

$$U_{D(\text{on})} = E - IR = 4 \text{ V} - 3.4 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega = 0.6 \text{ V}$$

当  $E=6 \text{ V}$  时,测量结果为

$$I = \frac{E - U_{D(\text{on})}}{R} = \frac{6 \text{ V} - 0.6 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 5.4 \text{ mA}$$

由  $I_{D0}=13 \text{ mA}$ ,得二极管的交流电阻

$$r_D = \frac{U_T}{I_{D0}} = \frac{26 \text{ mV}}{13 \text{ mA}} = 2 \Omega$$

$U_D$  的增加量  $\Delta U_D = (0.67 - 0.65) \text{ V} = 0.02 \text{ V}$  很小,所以  $I_D$  可以线性近似得到

$$I_D = I_{D0} + \frac{\Delta U_D}{r_D} = 13 \text{ mA} + \frac{0.02 \text{ V}}{2 \Omega} = 23 \text{ mA}$$

**2-6** 计算图 P2-6 所示电路中节点 A、B 的电压,已知二极管导通电压  $U_{D(\text{on})} = 0.7 \text{ V}$ 。

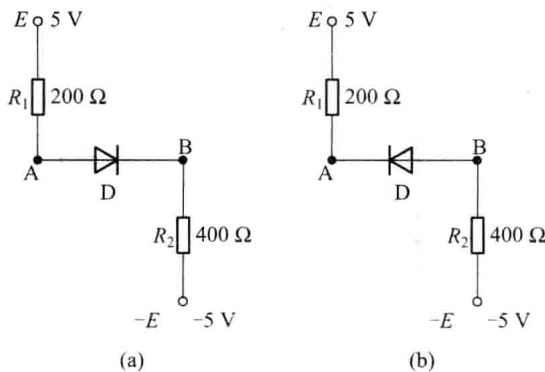


图 P2-6

**解:**图 P2-6(a) 中,二极管 D 导通,电阻  $R_1$  和  $R_2$  的总压降为

$$U = E - (-E) - U_{D(\text{on})} = [5 - (-5) - 0.7] \text{ V} = 9.3 \text{ V}$$

根据串联分压的比例关系, $R_1$  的压降

$$U_{R1} = \frac{R_1}{R_2 + R_1} U = \frac{200 \Omega}{400 \Omega + 200 \Omega} \times 9.3 \text{ V} = 3.1 \text{ V}$$

所以节点 A 的电压

$$U_A = E - U_{R1} = (5 - 3.1) \text{ V} = 1.9 \text{ V}$$