

21 世纪电 工 学 系 列 教 材

模拟电子技术基础

王 英 主 编



西南交通大学出版社

21 世纪电工学系列教材

模拟电子技术基础

王 英 主编

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础 / 王英主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2000.8

21 世纪电工学系列教材

ISBN 7-81057-490-6

I. 模... II. 王... III. 模拟电路-电子技术-教材

IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 35952 号

21 世纪电工学系列教材

模 拟 电 子 技 术 基 础

王 英 主 编

*

出 版 人 宋绍南

责任编辑 唐 晴

封面设计 肖 勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787 mm × 960 mm 1/16 字数: 220 千字 印张: 14

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-490-6 / TN · 212

定价: 18.00 元

内 容 简 介

本书是根据 1998 年 7 月在北京召开的铁道部高等工科院校关于《面向 21 世纪电工电子系列课程教学改革》会议的精神编写的。全书共分七章，其内容包括有双极型半导体器件、基本放大电路、场效应管放大电路、差动放大电路及集成运算放大器、自激振荡、直流稳压电源、电力电子学基础等。主要阐述模拟电路的基本概念、基本原理、基本分析方法及电力电子学基础。本书每章节后附有思考题与习题，以巩固学习。

本书可作为高等工科院校大学本科、机械类、材料类、工程力学类、测量类、机电一体化类、经贸管理类、运输类、建筑类、土木类等有关非电类各专业的《模拟电子技术基础》课程的教材，也可作为职业大学、成人教育大学、电视大学等同类专业的教材，还可供具有一定电路基础知识的工程技术人员学习和参考。

前 言

本教材是以教育部 1995 年颁发的《高等学校工科本科电子技术（电工学 II）课程教学基本要求》为依据，根据 1998 年 7 月在北京召开的铁道部高等工科院校关于《面向 21 世纪电工电子系列课程教学改革》会议的精神编写的。《模拟电子技术基础》是与《电路基础》、《电机控制与供电基础》、《数字电子技术基础》、《电子技术解题指导》的配套教材。本教材可供 48~64 学时教学使用。

“模拟电子技术”是非电类专业的技术基础课程。包括有双极型半导体器件、基本放大电路、场效应管放大电路、差动放大电路及集成运算放大器、自激振荡、直流稳压电源、电力电子学基础等七章内容。通过本课程的学习，学生能掌握模拟电子技术的基础理论、基本分析方法、基本测量技能，提高学生分析问题、解决问题的能力，拓宽知识面，为今后的学习、创新和科学研究工作打下扎实的理论和实践基础。

为了适应高等教育教学改革的新形势，转变教育思想，更新教育观念，在保证基础内容的前提下，增加了集成电路方面的内容，着重于分析和应用，此外，还增加了“电力电子学基础”的内容，重新编写了多种类型的例题、思考题、习题及各章“小结”，力求做到深入浅出，培养学生独立自学、开拓视野的能力。

本书可作为高等工科院校大学本科、机械类、材料类、工程力学类、测量类、机电一体化类、经贸管理类、运算类、建筑类、土木类等有关非电类各专业的《模拟电子技术基础》课程的教材，也可作为职业大学、成人教育大学、电视大学等同类专业的教材，还可供具有一定电路基础知识的工程技术人员学习和参考。

本书由西南交通大学王英（编写第一、二、三章）担任主编，王莉（编写第三、四章）和华东交通大学徐祥征（编写第五、六、七章）参编，西南交通大学张维廉教授主审。

在本书编审过程中，曾得到北方交通大学李守成教授的热心关怀和悉心指导，以及 1999 年 10 月在大连召开“电工电子系列课程教学改革”研讨会上，大连、上海、兰州、石家庄铁道学院、华东交通大学、北方交通大学、西南交通大学的有关教师提出的许多宝贵意见，在此谨向他们致以最诚挚的谢意。本书在编写过程中，参考了许多同类的电工学教材，我们对这些教材的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处，在所难免，恳请使用本书的教师和读者多加指正。

编 者

1999 年 12 月

目 录

1 双极型半导体器件

1.1 PN 结及其单向导电性	1
1.2 半导体二极管	5
1.3 稳压管	11
1.4 双极型晶体管	13
小 结	25
习 题	25

2 基本放大电路

2.1 基本放大电路的组成及分析	29
2.2 放大电路静态工作点的稳定	44
2.3 射极输出器	51
2.4 阻容耦合放大电路	55
2.5 功率放大电路	65
小 结	78
习 题	79

3 场效应管放大电路

3.1 结型场效应管	85
3.2 绝缘栅场效应管	90
3.3 场效应管的主要参数和使用注意事项	94
3.4 场效应管基本放大电路	95
3.5 共漏极放大电路——源极输出器	101
3.6 VMOS 场效应管及其功率放大电路	102
小 结	104
习 题	104

4 差动放大电路及运算放大器

4.1 直耦放大电路的特殊问题	107
4.2 差动式放大电路	111
4.3 集成运算放大器	120

小 结.....	150
习 题.....	150
5 自激振荡	
5.1 振荡电路的概念	157
5.2 自激振荡	158
5.3 RC 正弦波振荡电路	160
5.4 LC 正弦波振荡电路	163
小 结.....	165
习 题.....	165
6 直流稳压电源	
6.1 桥式整流电路及滤波电路	167
6.2 滤波电路	173
6.3 稳压管稳压电路	176
6.4 集成稳压电路	178
小 结.....	181
习 题.....	181
7 电力电子学基础	
7.1 晶闸管	185
7.2 可控整流电路	190
7.3 单结晶体管触发电路	194
7.4 晶闸管逆变电路	199
7.5 晶闸管电路的应用	202
小 结.....	203
习 题.....	203
附录 1 半导体分立器件型号命名方法	205
附录 2 半导体集成电路型号命名方法	207
附录 3 模拟电子技术部分基础符号说明	208
附录 4 新旧图形符号对照表	212
附录 5 国产晶闸管型号命名法及其电参数	214
参考文献	217

1 双极型半导体器件

用半导体材料制成的电子器件统称为半导体器件。半导体器件又根据参与导电载流子种数分为双极型和单极型半导体器件两种。双极型半导体器件有电子、空穴两种载流子参与导电，单极型半导体器件是只有一种载流子（电子或空穴）参与导电的器件。

本章主要讨论常用的双极型半导体器件（如：半导体二极管、稳压管、双极型晶体管）的基本结构、工作原理、特性及其基本参数。

1.1 PN 结及其单向导电性

在自然界中，所有物质按其导电能力的强弱可分为导体、绝缘体、半导体三大类。容易传导电流的材料称为导体，如金属；几乎不传导电流的材料称为绝缘体，如橡胶、陶瓷、石英、塑料等；而导电能力介于导体和绝缘体之间的称为半导体，由于绝大多数半导体的原子排列呈晶体结构，所以由半导体构成的管件也称晶体管，最常用的半导体材料有锗（Ge）和硅（Si）。

半导体的导电性能具有如下两个显著的特点：

① 具有光敏性和热敏性。即半导体受到光照或热的辐射时，其电阻率会发生很大的变化，导电能力将有明显的改善，利用这一特性可制造光敏元件和热敏元件。

② 具有掺杂特性。即在纯净的半导体中掺入微量的其他元素，半导体的导电能力将有明显的增加。

1.1.1 本征半导体

按照半导体理论，对不含杂质而且结构非常完整的半导体单晶称为本征半导体。

本征半导体在绝对温度下，又无外界能源施加能量（如光照等），是不导电的。但在温度增加或接受光照时，一些共价键中的价电子由于获得一定的能量而激发成自由电子。电子挣脱束缚后，在共价键中留下了一个空位，称为空穴。空穴的出现是半导体的一个重要特点。如图 1.1.1 所示。

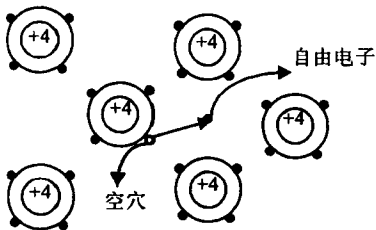


图 1.1.1 本征半导体的电子空穴对

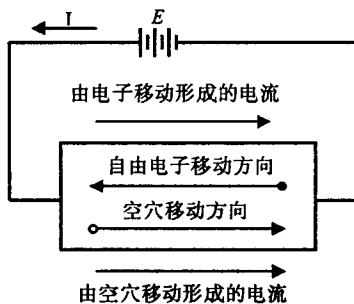


图 1.1.2 半导体中电子和空穴在外电场作用下的移动方向和形成的电流

本征半导体中的自由电子和空穴是成对出现的，称为电子空穴对。如果在半导体两端加上电源 E ，如图 1.1.2 所示，则自由电子将向电源正端定向运动形成电子电流。空穴虽不移动，但因为带正电，故能吸收相邻原子中的价电子来填补，这样共价键中受束缚的价电子在晶体内不断的递补空位而间接产生空穴的定向移动，从而形成空穴电流。电子移动时是负电荷的移动，空穴移动时是正电荷的移动，电子和空穴都能运载电荷，所以它们都称为载流子。

1.1.2 N 型和 P 型半导体

在本征半导体中掺进微量的其他元素（称为“杂质”），其导电性能将大大增强。掺有杂质的半导体称为杂质半导体，如 N 型半导体、P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素（如：磷、砷），这些微量原子的外层有五个电子，其中四个与本征半导体的外层电子组成共价键，多余的一个电子便成为自由电子。自由电子的增加使其导电能力大大增强。由于自由电子为多数载流子，故称这类半导体为 N 型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入三价元素（如：硼、铝），这些微量原子的外层有三个电子，在组成共价键过程中多出一个空位，空位的增加使其导电能力

大大增强就形成空穴为多数载流子，称这类半导体为 **P 型半导体**。

在杂质半导体中，多数载流子的数目是与掺入杂质有关，掺入杂质越多，多数载流子的数目就越多；而少数载流子的数目则与温度有关，温度越高，少数载流子的数目就越多。应当注意，不论是哪一种掺杂半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但是整个晶体仍然是电中性的。

1.1.3 PN 结的形成

PN 结是构成各种半导体器件的核心。许多半导体器件都是用不同数量的 PN 结构成的，所以，PN 结的理论是半导体器件的基础。

1. 载流子的两种运动——扩散和漂移

(1) 载流子的扩散运动

在电中性的半导体中，当出现同一种载流子浓度上有差别时，载流子将从浓度较高的区域向浓度较低的区域运动，这种运动称为“扩散运动”。由载流子扩散运动形成的电流称为“扩散电流”。

(2) 载流子的漂移运动

在电场的作用下，载流子作有规则的定向运动，这种运动称为“漂移运动”。由载流子漂移运动形成的电流称为“漂移电流”。

2. PN 结的形成

在一块半导体晶体上，采取一定的掺杂工艺，使两边分别形成 P 型半导体和 N 型半导体，由于两种半导体所含的载流子浓度不同，因而在界面附近产生载流子的扩散运动。P 区的空穴向 N 区扩散，并与界面附近的电子复合，在交界处的 P 区侧形成负离子。同样，N 区的自由电子浓度比 P 区自由电子浓度大得多，因此自由电子由 N 区向 P 区扩散，交界处的 N 区侧形成正离子。这样就在 P 区和 N 区交界处的两侧形成一个空间电荷区，这个空间电荷区就称为 **PN 结**。如图 1.1.3 所示。

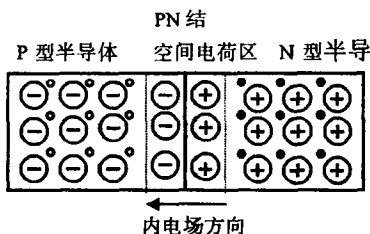


图 1.1.3 PN 结示意图

在空间电荷区中，两侧出现正负离子，由于离子是不移动的，于是产生内电场。扩散运动的结果使空间电荷区加宽，内电场增强。而内电场的建立和加强对多数载流子的扩散运动起阻碍削弱作用，对少数载流子（P区的自由电子和N区的空穴）的漂移运动却起推动作用，其结果又使空间电荷区变窄，内电场减弱，多数载流子的扩散运动又增强。最后扩散运动与漂移运动达到相对的稳定，此时内电场不再增强，空间电荷区的厚度也不再改变，PN结达到动态平衡。

在空间电荷区中，多数载流子扩散到对方并被复合掉，或者说是消耗尽了，所以这个区域可称为耗尽层；又由于所建立的内电场对多数载流子的扩散起阻挡作用，所以又称为阻挡层。

1.1.4 PN结的单向导电性

PN结在未加外电压时处于动态平衡状态，PN结内无宏观电流。如在PN结上外加一定的电压，将会破坏这种动态平衡状态。

1. PN结的正向偏置

如图 1.1.4 所示，在PN结上加正向电压（也称正向偏置，简称正偏），则外加电场与内电电场方向相反，使空间电荷区变窄，内电场减弱，多数载流子的扩散运动增强，于是“动态平衡”被破坏。在一定范围内，外电场越强，正向电流越大。这时PN结呈低阻状态。

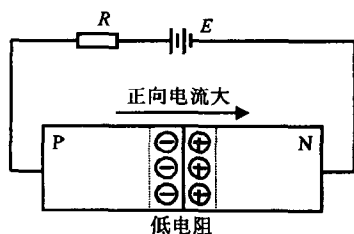


图 1.1.4 PN结加正向电压图

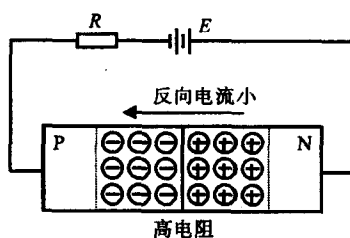


图 1.1.5 PN结加反向电压

2. PN结的反向偏置

如图 1.1.5 所示，在PN结加上反向电压（也称反向偏置，简称反偏），外电场和内电场方向一致，使空间电荷区加宽，内电场增强，多数载流子的扩散运动几乎不能进行，只有少数载流子在电场作用下产生漂移运动，形成微弱的反向电流。PN结呈高阻状态。

综上所述, PN 结加正偏, PN 结电阻很小, 正向电流很大, PN 结处于导通状态; PN 结加反偏时, PN 结电阻很高, 反向电流很小, PN 结处于截止状态, 这种特性称为 **PN 结的单向导电性**。

思 考 题

1.1.1 电子电流和空穴电流是怎样形成的?

1.1.2 N 型半导体电子多于空穴, P 型半导体空穴多于电子, 是否可理解为 N 型半导体带负电? P 型半导体带正电?

1.1.3. 流过 PN 结的正、反向电流各与什么因素有关?

1.1.4. 什么是 PN 结的反向击穿现象? 击穿是否就意味着 PN 结的损坏?

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和符号

半导体二极管就是由一个 PN 结加上相应的电极引线和管壳封装制成的。P 型半导体端的电极为阳极(也称正极), N 型半导体一端的电极为阴极(又称负极)。半导体二极管的外形和图形符号如图 1.2.1 所示。

半导体二极管按其结构来分, 可分为点接触型和面接触型两种, 点接触型二极管如图 1.2.2 (a) 所示。由于其 PN 结的结面积很小, 不能通过大的电流。但其结电容很小, 高频性能较好, 因此常用于高频和小电流的电路中, 面接触型二极管如图 1.2.2 (b) 所示。由于其 PN 结的结面积大, 可通过较大电流。但因其结电容较大, 所以常用于低频整流电路中。

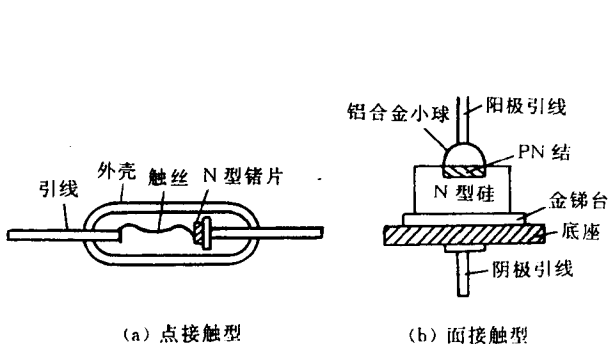
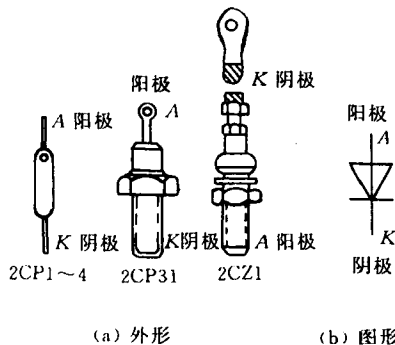


图 1.2.1 半导体二极管的外形及图形符号

图 1.2.2 半导体二极管的结构

1.2.2 伏安特性

通常我们把二极管的端电压与二极管的电流之间的关系称为二极管的伏安特性，不同的二极管的伏安特性是有差异的，但伏安特性曲线的基本形状是相似的。下面我们以硅二极管为例进行讨论。

1. 正向特性

通过电路图 1.2.3 的数据测量,可测得电压和电流的一组数值,如图 1.2.5 中的第一象限内的曲线所示(即:伏安特性的正向特性)。从曲线图可见,当所加的正向电压较小时,由于外部电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动所造成的阻力,因此这时的正向电流很小,二极管呈现很高的电阻。这段区域称为“死区”。当正向电压超过(图 1.2.5 中 A 点)一定数值后,内电场大大削弱,于是电流增长很快。这个一定数值的正向电压称为“死区电压”,它与管子材料和环境温度有关,如在环境温度为 25°C 时,硅管死区电压约为 0.5 V ;锗管约为 0.2 V 。当正向电压稍微增加一点,而电流增加很多,二极管呈现低阻状态,称这时二极管为“正向导通”状态。通常,硅管的正向导通压降为 $0.6\sim 0.7\text{ V}$,锗管为 $0.2\sim 0.3\text{ V}$ 。

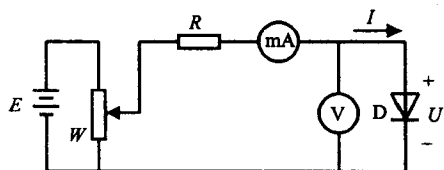


图 1.2.3 二极管正向伏安特性测试电路

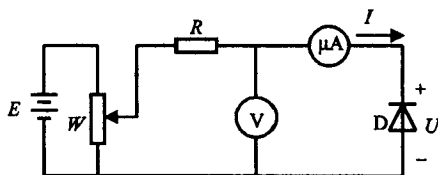


图 1.2.4 二极管反向伏安特性测试电路

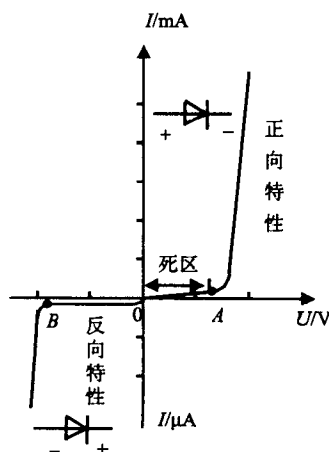


图 1.2.5 硅二极管的伏安特性曲线

2. 反向特性

图 1.2.4 为反向特性测试电路。反向特性表示在图 1.2.5 第三象限中。

在二极管两端外加反向电压不超过一定范围时，由少数载流子的漂移运动而形成很小的反向电流。反向电流有两个特点，一是易受温度的影响，二是反向电压在一定范围时，电流基本上是恒定。在一定的温度下，一定范围内增加反向电压基本上是不会使少数载流子数目增加的，即反向电流与反向电压大小无关。所以反向电流通常称为“反向饱和电流”。硅管的反向电流常在几微安以下，大的可达数十微安，锗管可达几百微安。

3. 反向击穿特性

当外加反向电压过高而超过一定范围时，反向电流突然增大，二极管失去单向导电性能，出现反向击穿现象。对应电流突然增大（图 1.2.5 中 B 点）的电压称为二极管的反向击穿电压。二极管被反向击穿时流过 PN 结的电流很大，PN 结的损耗功率也很大，如果超过允许功耗值，就会使 PN 结由过热而过渡到热击穿，使二极管的 PN 结烧毁。

*4. 二极管伏安特性表达式

根据理论分析，二极管的电流 i 与端电压 u 的关系可由下式表示：

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中， I_S 为反向饱和电流； $U_T = 1/(q/kT)$ ，为温度电压当量，在绝对温度 300K（27℃）时， $U_T \approx 26 \text{ mV}$ ； q 为电子的电荷量， $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ； T 为绝对温度，单位 K（开尔文）； k 为波尔兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

例 1.1 在图 1.2.6 所示的电路中，已知二极管为理想元件， $U_{S1} = 5 \text{ V}$ ， $U_{S2} = 10 \text{ V}$ ， $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ， $R_3 = R_4 = 5 \text{ k}\Omega$ ，试判断二极管是导通还是截止，并求流过二极管的电流。

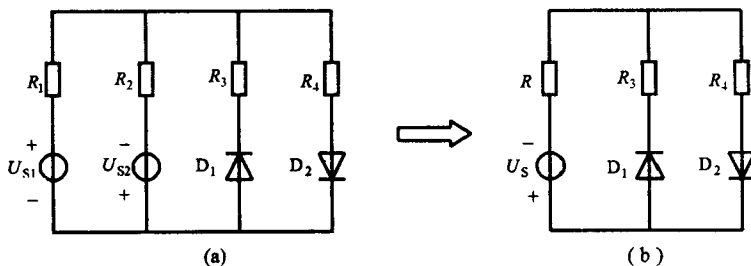
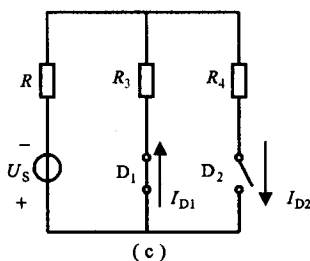


图 1.2.6



续图 1.2.6

解 二极管是非线性元件,不能用叠加原理进行分析计算,先用电源等效变换法将图 1.2.6 (a) 等效变换为图 (b),再根据电源的极性判断二极管是否导通。

$$R = R_1 // R_2 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$U_s = \left(\frac{U_{s2}}{R_2} - \frac{U_{s1}}{R_1} \right) R = \left(\frac{10}{10} - \frac{5}{10} \right) 5 = 2.5 \text{ V}$$

在电源作用下,二极管 D_1 承受的是正向电压, D_1 导通; D_2 承受是反向电压, D_2 截止。由于二极管 D_1 和 D_2 是理想元件,可将其等效为一个开关元件。二极管正向导通时电压降为零,相当于开关闭合;反向截止时通过电流为零(其电阻为无穷大),相当于开关断开。如图 1.2.6(c)所示。其流过二极管的电流分别为

$$I_{D2} = 0$$

$$I_{D1} = \frac{U_s}{R + R_3} = \frac{2.5}{5 + 5} = 0.25 \text{ mA}$$

思 考 题

1.2.1 判断图 1.2.7 电路中的二极管是导通还是截止,并求出 AO 两端的电压 U_{AO} (忽略二极管的正向压降)。

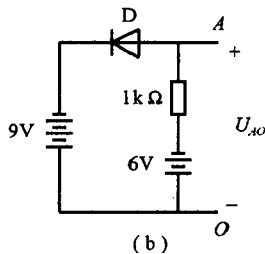
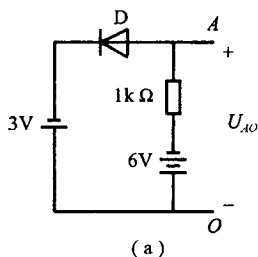


图 1.2.7

1.2.3 主要参数

二极管的特性可用两种方式来说明, 一种是用伏安特性曲线, 另一种是用一些数据, 这些数据就称为二极管的参数。参数一般可从半导体器件手册中查到。主要参数有:

(1) 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长期工作时, 允许通过的最大正向平均电流。使用时应注意流过二极管的平均电流值不大于 I_{OM} , 否则将会使二极管中 PN 结的结温超过允许值而损坏。

(2) 最大反向工作电压 U_{DRM}

是指二极管不被击穿所允许的最高反向电压。一般规定最高反向工作电压 U_{DRM} 为反向击穿电压的 $1/2 \sim 2/3$ 。

(3) 最大反向电流 I_{RM}

在规定的环境温度下, 二极管加上最大反向工作电压时的反向电流。反向电流越小, 管子的单向导电性能越好。

半导体二极管还有一些其他参数, 如正向压降、最高工作频率等。

1.2.4 二极管的应用

二极管的应用范围很广, 主要都是利用它的单方向导电性能。其典型的应用如图 1.2.8 所示。

例 1.2 在图 1.2.8 (c) 电路中, $E = 5 \text{ V}$, $u_i = 10 \sin \omega t \text{ V}$, 忽略二极管的正向压降, 试画出电压 u_o 的波形图。

解 当 $u_i \leq 5 \text{ V}$ 时, 二极管 D 截止, $u_o = E = 5 \text{ V}$;

当 $u_i > 5 \text{ V}$ 时, 二极管 D 导通, $u_o = u_i$ 。

输出电压 u_o 的波形图如图 1.2.9 所示。通过此例说明, 利用整形器可以在输出端得到预期的波形。

例 1.3 在图 1.2.8 (d) 电路中, $E_1 = E_2 = 5 \text{ V}$, $u_i = 10 \sin \omega t \text{ V}$, 若忽略二极管的正向压降, 试画出电压 u_o 的波形图。

解 当 $u_i > +5 \text{ V}$ 时, D_1 导通、 D_2 处于截止状态, 此时输出电压 $u_o = +5 \text{ V}$;

当 u_i 在 $+5 \text{ V}$ 和 -5 V 之间时, D_1 、 D_2 处于反向偏置截止, 此时输出电压 $u_o = u_i$;

当 $u_i < -5\text{ V}$ 时, D_2 导通、 D_1 处于截止状态, 此时输出电压 $u_o = -5\text{ V}$ 。

输出电压 u_o 的波形图表示在图 1.2.10 中。由图所示, 输入电压 u_i 正负半周的幅值受到限制, 使输出电压 u_o 近似于梯形波, 这就是限幅器的作用。

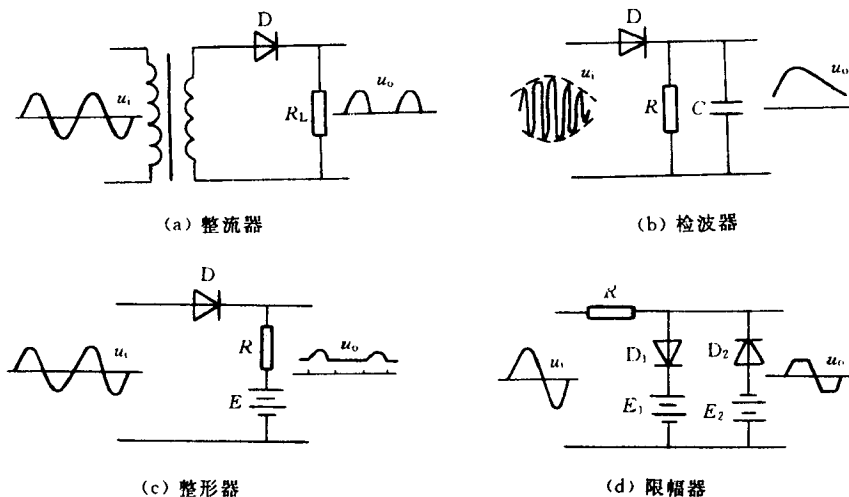


图 1.2.8 半导体二极管典型应用

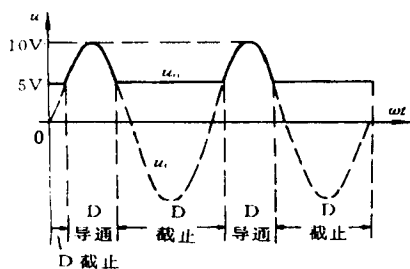


图 1.2.9

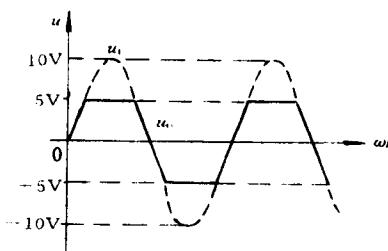


图 1.2.10

例 1.4 判断图 1.2.11 电路中, 哪个二极管导通, 并求出 U_{AO} 电压值。

解 两个二极管阳极连接在一起, 在电路中其阳极电位是相同的。因此两二极管中, 阴极电位最低的那只管子导通。显然 D_2 管导通, 并使 AO 电压箝于 -6 V , 即 $U_{AO} = -6\text{ V}$ 。 D_1 管上加的是 -6 V , 所以 D_1 管截止。

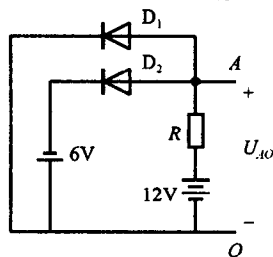


图 1.2.11