

电力电子器件 及其应用

DIANLI DIANZI QIJIAN JIQI YINGYONG

宋昌才 主编

陶根宁 利 森 副主编

303
55



化学工业出版社

电力电子器件 及其应用

DIANLI DIANZI QIJIAN JIQI YINGYONG

宋昌才 主编

陶根宁 利 森 副主编



TN303

S755



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子器件及其应用/宋昌才主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 9

ISBN 978-7-122-06536-0

I. 电… II. 宋… III. 电力系统-电子器件 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 147981 号

责任编辑: 刘 哲
责任校对: 郑 捷

文字编辑: 王 洋
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 9½ 字数 180 千字 2010 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

前言

随着电力电子器件产业日益受到国家重视，国家对企业 and 科研机构的扶持力度逐渐增大。电力电子器件技术直接关系到交流技术的发展与进步，是建设节约型社会和创新型国家的关键技术。近几年来，电力电子器件技术水平不断提高，应用领域日益广泛，逐渐成为国民经济发展中基础性的支柱型产业之一。

随着我国特高压直流输电、高压变频、交流传动机车/动车组、城市轨道交通等技术发展和市场需求的增加，对晶闸管、IGCT（集成门极换流晶闸管）、IGBT（绝缘栅双极型晶体管）的需求非常紧迫，而且需求量也非常大。为推进节能降耗，促进电力电子技术和产业的发展，国家将实施电力电子器件产业专项，提高新型电力电子器件技术和工艺水平，提升电力电子产业化能力。

本书重点介绍了电力电子器件的原理、结构、特性和技术参数，并从其应用的角度出发，介绍了直流斩波电路、逆变电路、交流电力控制电路和交交变频电路等。内容浅显，旨在普及电力电子器件基础知识。

本书适合各类电子技术人员、职业院校电气自动化专业和电子类专业师生和电子爱好者阅读。

本书由江苏大学工业中心宋昌才主编，江苏大学理学院陶根宁、国电泰州发电有限公司利森担任副主编，参编的有：河南平顶山天源盐化有限责任公司王红娜，江苏大学研究生郑鸿运，南通农业职业技术学院机电系刘志刚，镇江华晨华通路面机械有限公司史镜奇。本书由江苏大学李长生、李金伴主审。

由于时间仓促，学识有限，疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

编 者

目 录

第1章 半导体器件及应用	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN 结	4
1.1.4 半导体二极管	5
1.1.5 稳压二极管	9
1.2 三极管与放大电路	10
1.2.1 基本结构	10
1.2.2 三极管的工作原理与作用	10
1.2.3 特性曲线	11
1.2.4 主要参数	12
1.3 基本交流放大电路	14
1.3.1 单管电压放大电路	14
1.3.2 共射放大电路的静态分析	15
1.3.3 共射放大电路的动态分析	16
1.3.4 微变等效电路法	17
1.4 多级放大电路	21
1.4.1 直接耦合	21
1.4.2 阻容耦合	21
1.5 运算放大器的基本放大电路	22
1.5.1 基本结构	22
1.5.2 主要参数	23
1.5.3 理想运放的特性	23
1.5.4 运算放大器基本放大电路	24
1.5.5 集成运放的线性应用	26
1.5.6 集成运放的非线性应用——电压比较器	28

1.6 放大电路中的反馈电路	29
1.6.1 反馈的基本概念	29
1.6.2 负反馈的类型	30
1.6.3 负反馈对放大电路性能的影响	30
第2章 电力电子器件	32
2.1 电力电子器件概述	32
2.1.1 电力电子器件的概念和特征	32
2.1.2 电力电子器件的系统组成	33
2.1.3 电力电子器件的分类	33
2.2 不可控器件——电力二极管	34
2.2.1 PN结与电力二极管的工作原理	34
2.2.2 电力二极管的基本特性	36
2.2.3 电力二极管的主要参数	37
2.2.4 电力二极管的主要类型	37
2.3 半控型器件——晶闸管	38
2.3.1 基本结构	39
2.3.2 工作原理	39
2.3.3 晶闸管型号及其含义	41
2.3.4 晶闸管的基本特性	41
2.3.5 晶闸管的主要参数	43
2.3.6 晶闸管的保护	45
2.3.7 晶闸管的派生器件	47
2.4 典型全控型器件	49
2.4.1 门极可关断晶闸管	49
2.4.2 电力晶体管	51
2.4.3 电力场效应晶体管	54
2.4.4 绝缘栅双极晶体管	58
2.5 其他新型电力电子器件	61
2.5.1 MOS控制晶闸管	61
2.5.2 静电感应晶体管	62
2.5.3 静电感应晶闸管	62
2.5.4 集成门极换流晶闸管	62
2.5.5 功率模块与功率集成电路	62
2.6 电力电子器件的驱动	63

2.6.1	电力电子器件驱动电路概述	63
2.6.2	晶闸管触发电路	63
2.6.3	典型全控型器件的驱动电路	64
2.7	电力电子器件的保护	67
2.7.1	过电压的产生及过电压保护	67
2.7.2	过电流保护	69
2.7.3	缓冲电路	69
2.8	电力电子器件的串联和并联使用	71
2.8.1	晶闸管的串联	71
2.8.2	晶闸管的并联	72
2.8.3	电力 MOSFET 和 IGBT 并联运行的特点	73
	本章小结	73

第3章 直流斩波电路 76

3.1	基本斩波电路	76
3.1.1	降压斩波电路	76
3.1.2	升压斩波电路	77
3.1.3	升降压斩波电路和 Cuk 斩波电路	79
3.1.4	Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路	81
3.2	复合斩波电路和多相多重斩波电路	82
3.2.1	电流可逆斩波电路	82
3.2.2	桥式可逆斩波电路	83
3.2.3	多相多重斩波电路	83
	本章小结	84

第4章 交流电力控制电路和交交变频电路 85

4.1	交流电力控制	85
4.1.1	单相交流调压电路	85
4.1.2	三相交流调压电路	90
4.2	其他交流电力控制电路	93
4.2.1	交流调功电路	93
4.2.2	交流电力电子开关	93
4.3	交交变频电路	95
4.3.1	单相交交变频电路	95
4.3.2	三相交交变频电路	99

本章小结.....	102
第5章 逆变电路	104
5.1 换流方式	104
5.1.1 逆变电路的基本工作原理	104
5.1.2 换流方式分类	105
5.2 电压型逆变电路	107
5.2.1 电压型单相逆变电路	107
5.2.2 电压型三相桥式逆变电路	109
5.3 电流型逆变电路	111
5.3.1 电流型单相逆变电路	112
5.3.2 电流型三相逆变电路	114
本章小结.....	117
第6章 PWM 控制技术	119
6.1 PWM 控制的基本原理	119
6.2 PWM 逆变电路及其控制方法	120
6.2.1 计算法和调制法	120
6.2.2 异步调制和同步调制	125
6.2.3 规则采样法	126
6.2.4 PWM 逆变电路的谐波分析	127
6.2.5 提高直流电压利用率和减少开关次数	129
6.2.6 PWM 逆变电路的多重化	132
6.3 PWM 跟踪控制技术	133
6.3.1 滞环比较方式	133
6.3.2 三角波比较方式	135
6.3.3 定时比较方式	136
6.4 PWM 整流电路及其控制方法	136
6.4.1 PWM 整流电路的工作原理	136
6.4.2 PWM 整流电路的控制方法	139
本章小结.....	141
参考文献	142

1.1 半导体的基本知识

半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物体。典型的元素半导体有硅 Si 和锗 Ge，此外还有化合物半导体砷化镓 GaAs 等。

半导体的导电特性如下。

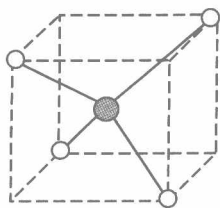
① 热敏性。当环境温度升高时，导电能力显著增强（可做成温度敏感元件，如热敏电阻）。

② 光敏性。当受到光照时，导电能力明显变化（可做成各种光敏元件，如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管等）。

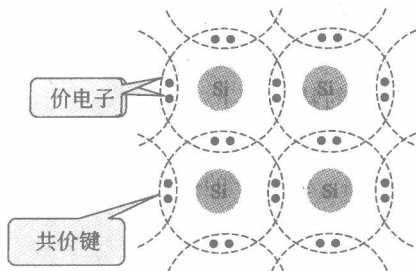
③ 掺杂性。往纯净的半导体中掺入某些杂质，其导电能力明显改变（可做成各种不同用途的半导体器件，如二极管、三极管和晶闸管等）。

1.1.1 本征半导体

完全纯净的、具有晶体结构的半导体，称为本征半导体。如图 1-1(a) 所示，硅或锗原子组成晶体后，原子之间靠得很近，原来分属于每个原子的价电子就要受



(a) 硅或锗的晶体结构



(b) 硅晶体共价键结构

图 1-1 本征半导体结构

到相邻原子的影响而使价电子为两个原子所共有了，这样，每个价电子的轨道就变成两个相邻原子之间两个价电子的公共轨道，形成了晶体中共价键结构。图 1-1 (b) 就是硅晶体构成共价键的示意图。共价键中的两个电子，称为束缚电子。因此，共价键是表示两个共有价电子所形成的束缚作用。共价键有很强的结合力，使各原子在晶体中按一定形式排列，形成点阵。而共价键中的电子受两个原子核引力的约束，如果没有足够的能量，是不易脱离公共轨道的。在无外界激发时，硅晶体中没有自由电子存在，只有在激发的情况下，价电子在获得一定能量（温度升高或受光照）后，才可挣脱原子核的束缚，成为自由电子（带负电），这一现象称为本征激发。温度越高，晶体中产生的自由电子便越多。

在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中留下一个空位，称为空穴（带正电）。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点，如图 1-2 所示。在外电场的作用下，邻近价电子就可填补到这个空位上，而在这个电子原来的位置上又留下新的空位，该原子中又出现一个空穴，这样就使共价键中出现一定的电荷迁移。其结果相当于空穴的运动（相当于正电荷的移动）。

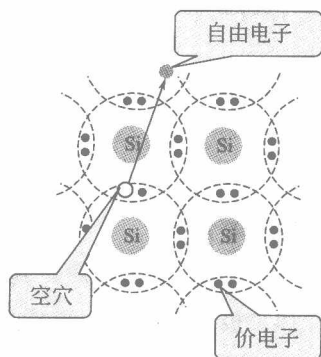


图 1-2 空穴的形成

当半导体两端加上外电压时，在半导体中将出现两部分电流：一部分是自由电子定向运动产生的电子电流；另一部分是价电子递补空穴产生的空穴电流。自由电子和空穴都称为载流子。自由电子和空穴成对产生的同时，又不断复合。在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，半导体中载流子便维持在一定的数目。

本征半导体的特点如下。

- ① 本征半导体中载流子数目极少，其导电性能很差。
- ② 温度越高，载流子的数目越多，半导体的导电性能也就越好。所以，温度对半导体器件性能影响很大。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质（某种元素），形成杂质半导体。

(1) N 型半导体 在硅的晶体内掺入少量五价元素杂质，如磷，则晶体点阵中某些位置上的硅原子将被磷原子所取代，磷原子有五个价电子，它以四个价电子与相邻的硅原子组成共价键后，必定还多余一个价电子，如图 1-3 所示。这个多余的价电子虽不受共价键的束缚，但仍受磷原子核的正电荷所吸引而只能在磷原子的周围活动，只不过这个束缚作用较弱，只要较小的能量就能挣脱束缚，成为自由电子。掺杂后自由电子数目大量增加，自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式，称为电子半导体或 N 型半导体。在 N 型半导体中自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

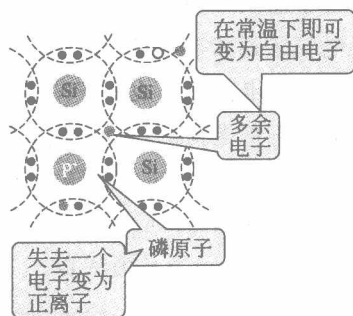


图 1-3 N 型硅半导体的共价键结构

(2) P 型半导体 在硅的晶体内掺入少量三五价元素杂质，如硼，硼原子只有三个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空位，当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他条件下获得能量时，就有可能填补这个空位，使硼原子成为不能移动的负离子，而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子，形成了空穴，如图 1-4 所示。掺杂后空穴数目大量增加，空穴导电成为这种半导体的主要导电方式，称为空穴半导体或 P 型半导体。在 P 型半导体中空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

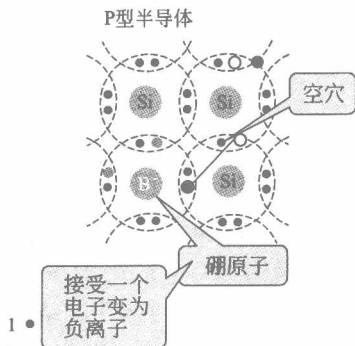


图 1-4 P 型硅半导体的共价键结构

无论 N 型半导体还是 P 型半导体，都是中性的，对外不显电性。

1.1.3 PN 结

(1) PN 结的形成 如图 1-5 所示，在 P 型半导体和 N 型半导体结合后，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别。这样电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散，因此有一些电子要从 N 区向 P 区扩散，也有一些空穴要从 N 区向 P 区扩散。由于电子和空穴都是带电的，它们的扩散结果就使 P 区和 N 区中原来的电中性被破坏了：P 区一边失去空穴，留下了带负电的杂质离子（图中用 $\ominus$ 表示）；N 区一边失去电子，留下了带正电的杂质离子（图中用 $\oplus$ 表示）。半导体中的离子虽然也带电，但由于物质结构的关系，它们不能任意移动，因此并不参与导电。这些不能移动的带电粒子通常称为空间电荷，它们集中在 P 区和 N 区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区，也称 PN 结。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉，由于正负电荷的相互作用，在空间电荷区中就形成了一个电场，称为内电场。这个电场将使 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移，使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，漂移的方向正好与扩散的方向相反，当漂移运动达到和扩散运动相等时，PN 结便处于动态平衡状态。

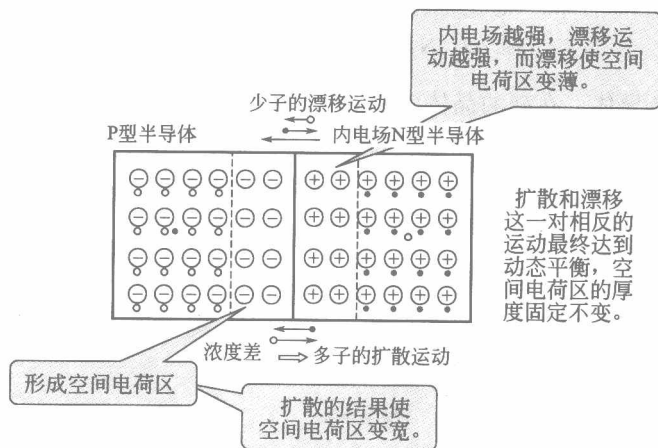


图 1-5 PN 结的形成

(2) PN 结的单向导电性

① PN 结加正向电压（正向偏置）。在图 1-6 中，PN 结加上外电压，而且外电压的正端接 P 区，负端接 N 区，外加电场与 PN 结内电场方向相反，在这个外电场作用下，PN 结的平衡状态被打破，P 区中的多数载流子空穴和 N 区多数载流子电子都要向 PN 结移动，当 P 区空穴进入 PN 结后，就要和原来的一部分负离子中和，使 P 区的空间电荷量减少。同样，当 N 区电子进入 PN 结时，中和了部分正离子，使 N 区的空间电荷量减少，结果使 PN 结变窄。所以这个方向的外

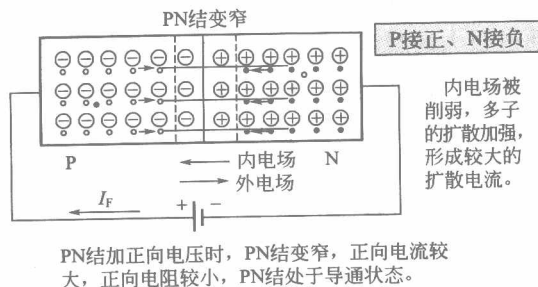


图 1-6 外加正向电压时的 PN 结

加电压称为正向电压或正向偏置电压。当 PN 结处于正向偏置时, 扩散运动将大于漂移运动, N 区电子不断扩散到 P 区, P 区的空穴不断扩散到 N 区, 形成了处于支配地位的扩散电流, 在外电路上形成一个流入 P 区的电流, 称为正向电流 I_F 。

② PN 结加反向电压 (反向偏置)。在图 1-7 中, PN 结加上外电压, 而且外电压的负端接 P 区, 正端接 N 区, 外加电场与 PN 结内电场方向相同, 在这个外电场作用下, P 区中的空穴和 N 区中的电子都将进一步离开 PN 结, 使空间电荷区加宽, 这时 PN 结处于反向偏置, 这样 P 区和 N 区中的多数载流子就很难越过空间电荷区, 因此扩散电流趋近于零。但由于结电场的增加, 使 N 区和 P 区的少数载流子更容易产生漂移运动, 因此, 在这种情况下, 漂移成为主要运动, PN 结内的电流由处于支配地位的漂移电流所决定。漂移电流的方向与扩散电流相反, 表现在外电路上有一个流入 N 区的反向电流 I_R 。

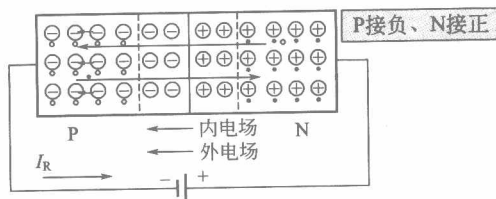


图 1-7 外加反向电压时的 PN 结

1.1.4 半导体二极管

(1) 基本结构 半导体二极管按其结构的不同可分为点接触型、面接触型、平面型。

① 点接触型二极管是由一根很细的金属触丝和一块半导体（如锗）的表面接触，然后在正方向通过很大的瞬时电流，使触丝和半导体牢固地熔接在一起，构成 PN 结，并做出相应的电极引线，外加管壳密封而成，如图 1-8(a) 所示。点接触型二极管金属丝很细，形成的 PN 结面积小，结电容小，正向电流小，适用于小电流高频电路。

② 面接触型或称面接型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法做成的，其结构如图 1-8(b) 所示。由于面接触型二极管的 PN 结面积大，正向电流大，结电容大，用于低频大电流电路。

③ 平面型二极管是一种特制的硅二极管，在半导体单晶片（主要是 N 型硅单晶片）上扩散 P 型杂质，利用硅片表面氧化膜的屏蔽作用，在 N 型硅单晶片上仅选择性地扩散一部分而形成的 PN 结，其结构如图 1-8(c) 所示。它不仅能通过较大的电流，而且性能稳定可靠，多用于集成电路制作工艺、开关、脉冲及高频电路中。

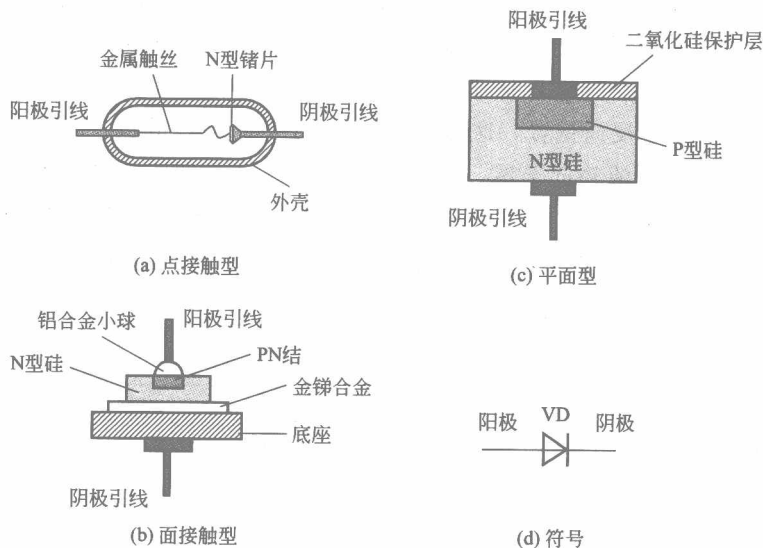


图 1-8 半导体二极管的结构和符号

(2) 伏安特性

① 正向特性。图 1-9 中第一象限中的曲线为正向特性，此时加于二极管的正向电压只有零点几伏，但相对来说流过管子的电流却较大，因此管子呈现的正向电阻较小。但是，在正向特性的起始部分，由于正向电压较小，外电场还不足以克服 PN 结的内电场，这时的正向电流几乎为零，二极管呈现出一个大电阻，这个电压称为死区电压。硅管和锗管的死区电压见图 1-9。当正向电压大于死区电压时，二极管导通。

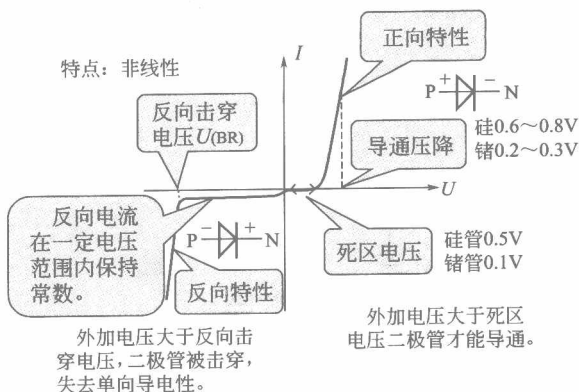


图 1-9 半导体二极管伏安特性曲线

② 反向特性。图 1-9 中第三象限中的较平曲线为反向特性。在反向电压作用下, P 型半导体少数载流子电子和 N 型半导体少数载流子空穴很容易通过 PN 结, 形成反向饱和电流。

③ 反向击穿特性。图 1-9 中第三象限中的陡变曲线为反向击穿特性。当反向电压增加到一定的大小时, 反向电流剧增, 二极管被反向击穿。

(3) 主要参数

① 最大整流电流 I_{FM} 。指允许长期流过二极管的最大正向平均电流。

② 反向击穿电压 U_{BR} 。指管子击穿时的电压, 一旦超过, 管子将被击穿而损坏。

③ 最高反向工作电压 U_{BM} 。指管子允许的最高反向工作电压, 通常取反向击穿电压的一半。

④ 反向电流 I_R 。指常温下反向电压一定时, 流过管子的反向电流。

(4) 二极管的单向导电性

① 二极管加正向电压 (正向偏置, 阳极接正、阴极接负) 时, 处于正向导通状态, 二极管正向电阻较小, 正向电流较大。

② 二极管加反向电压 (反向偏置, 阳极接负、阴极接正) 时, 处于反向截止状态, 二极管反向电阻较大, 反向电流很小。

③ 外加电压大于反向击穿电压, 二极管被击穿, 失去单向导电性。

④ 二极管的反向电流受温度的影响, 温度越高, 反向电流越大。

(5) 二极管电路分析举例

① 定性分析: 判断二极管的工作状态是导通还是截止。

若二极管是理想的, 正向导通时正向管压降为零; 反向截止时, 二极管相当于断开。否则, 正向管压降硅为 $0.6 \sim 0.7V$, 锗为 $0.2 \sim 0.3V$ 。

② 分析方法: 将二极管断开, 分析二极管两端电位的高低或所加电压 U_D 的

正负。若 $U_{\text{阳}} > U_{\text{阴}}$ 或 U_D 为正（正向偏置），二极管导通；若 $U_{\text{阳}} < U_{\text{阴}}$ 或 U_D 为负（反向偏置），二极管截止。

【例 1-1】 电路如图 1-10 所示，求 U_{AB} 。

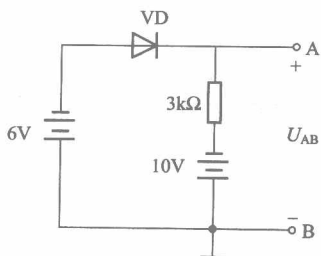


图 1-10 【例 1-1】 电路图

取 B 点作参考点，断开二极管，分析二极管阳极和阴极的电位。

$$U_{\text{阳}} = -6\text{V} \quad U_{\text{阴}} = -10\text{V}$$

$U_{\text{阳}} > U_{\text{阴}}$ 二极管导通。

若忽略管压降，二极管可看成短路， $U_{AB} = -6\text{V}$ ，否则， U_{AB} 低于 -6V 一个管压降，为 -6.3V 或 -6.7V 。

在这里，二极管起钳位作用。

【例 1-2】 电路如图 1-11 所示。已知 $u_i = 18\sin\omega t\text{V}$ ，二极管是理想的，试画出 u_o 波形。

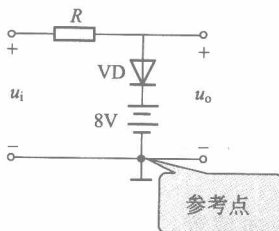


图 1-11 【例 1-2】 电路图

二极管阴极电位为 8V 。 $u_i > 8\text{V}$ ，二极管导通，可看成短路； $u_i < 8\text{V}$ ，二极管截止，可看成开路， $u_o = u_i$ 。

u_o 的波形如图 1-12 所示。

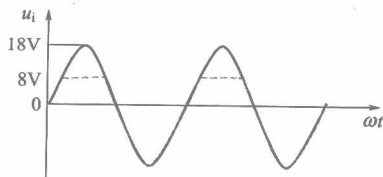


图 1-12 【例 1-2】 波形图

1.1.5 稳压二极管

稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管，如图 1-13 所示。这种管子的杂质浓度较大，空间电荷区内的电荷密度也大，因而该区域很窄，容易形成强电场。当反向电压加到某一定值时，反向电流剧增，产生反向击穿，伏安特性曲线如图 1-14 所示，图中 U_Z 表示反向击穿电压，即稳压管的稳定电压。稳压管的稳压作用在于：电流增量 ΔI_Z 很大，只引起很小的电压变化 ΔU_Z 。

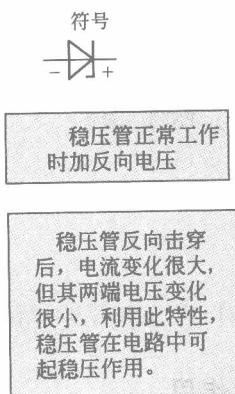


图 1-13 稳压二极管的符号

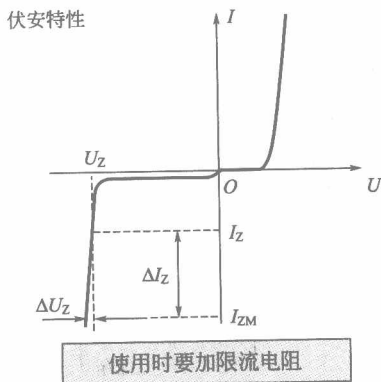


图 1-14 伏安特性曲线

稳压二极管主要参数如下。

- ① 稳定电压 U_Z 。稳压管反向击穿后稳定工作的电压值。
- ② 稳定电流 I_Z 。指稳压二极管正常工作时的参考电流值。
- ③ 动态电阻 r_Z 。 $r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ ， r_Z 越小，曲线越陡，稳压性能越好。