

OHM
冬解

〔日〕 富山忠宏 著
周南生 译

晶体管 实用电路

科学出版社
www.sciencep.com

图解晶体管实用电路

〔日〕富山忠宏 著
周南生 译

科学出版社
北 京

图字:01-2003-7989 号

内容简介

本书从二极管的基础知识入手,主要介绍晶体管的基础、二极管的基本电路,双极型晶体管的基本电路、基本放大电路、实用电路等。本书采用大量图示的方法,对电路的原理、基本思路及其工作情况进行了详细的介绍。另外,本书中作为例子给出的电路,都经过工作检验,只要按照图示装配电路,就能正确地工作。

本书既可作为电子线路初学者的入门书,也可供从事电路设计、电路组装的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

图解晶体管实用电路/(日)富山忠宏著;周南生译. —北京:
科学出版社,2004

ISBN 7-03-012613-0

I. 图… II. ①富… ②周… III. 晶体管电路-图解
IV. TN710.2-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 125398 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:白 羽 / 封面设计:李 祥

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>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004 年 3 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004 年 3 月第一次印刷 印张: 8

印数: 1—5 000 字数: 235 000

定 价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

现在,放在口袋里的移动电话已经很普及,无论男女老幼,无论什么地方都能够进行通话。谁都能利用性能可与过去的超级计算机相匹敌的个人计算机愉快地登录高速互联网,线性电动机驱动车辆在奔驰,地球返回式宇宙飞船飞来飞去,即使在这样的时代里,也离不开二极管和晶体管。

实现这些机器的电子设备是集成电路(IC),事实上 IC 是由二极管和晶体管组成的。而且在大功率器件和耐高压器件及大电流器件等不利于集成化的情况下,采用分立式二极管和晶体管的例子还有很多。

· 将二极管和晶体管组合起来能构成什么样的电路? 为了提高所需要的特性采用什么样的器件? 这种思考方法也是集成化的出发点。要回答上述问题必须熟知二极管和晶体管的性质,即“知己知彼,百战不殆”。充分了解二极管和晶体管的特性以及有效地利用这些特性的晶体管使用方法,对设计性能良好的电路是非常有利的。

本书是为此目的而编写的,即面向从现在开始学习电子线路的人,或者对电子线路多少有些了解的人,他们虽然考虑二极管和晶体管的性质及种类,但其目的是实际设计某种电路、组装电路并使电路工作,当电路不能正常工作时,能够研究其原因。但是,要在本书中列出所有的电路既不可能也无意义,所以,本书未采用教科书式的结构方式,而是列出一般经常使用的实用电路,大量采用图示的方法来说明该电路的原理和基本思路及其工作情况。另外,对于具体的设计方法,尽可能详细地、易于

理解地进行说明。

本书中,对于种类丰富、利用价值高的二极管,均举出具体电路进行较详细的叙述。另外,对于双极型晶体管,避开使用多个晶体管的大型电路,原则上只对使用几个晶体管的电路进行叙述。而对于脉冲电路,因为大部分情况下采用运算放大器和数字 IC 较为有利,所以对于这类电路也进行了解说及设计。对于初学者来说比较困难的超高频电路,或者没有处理过的特殊电路,本书将其限定于一定知识范围内,不做过于深入的解说。对于电路的名称和技术术语,在笔者知识范围内尽可能地给予了说明。另外,在本书中作为例子给出的电路,都经过工作检验,所以如果按照图示装配电路,应该是能够正确工作的。如果本书对读者有所帮助,则不胜欣慰!

写本书时参考了书末列出的文献,对这些文献的作者和企业深表谢意!

最后对给予本书执笔机会的日本大学教授高桥宽先生,以及在本书出版过程中给予帮助的 OHM 社的各位深表谢意!

富山忠宏

目 录

第 1 章 二极管的基础	1
1.1 二极管的工作原理	1
1.1.1 p 型半导体与 n 型半导体	1
1.1.2 pn 结	3
1.2 二极管的电压电流特性	5
1.3 二极管的种类与特点	9
1.3.1 小信号二极管	9
1.3.2 整流二极管	12
1.3.3 稳压二极管	13
1.3.4 发光二极管	16
1.3.5 变容二极管	18
1.3.6 光电二极管	19
1.3.7 其他二极管	19
1.4 二极管的规格与读法	20
1.4.1 二极管主要的最大额定值	21
1.4.2 二极管主要的电特性	22
1.4.3 二极管的型号名	22
第 2 章 晶体管的基础	24
2.1 晶体管的工作原理	24
2.1.1 双极型晶体管	24
2.1.2 场效应晶体管	27
2.2 晶体管的特性	30
2.2.1 电压电流特性	30
2.2.2 功率特性与热阻	34

2.2.3	频率特性	39
2.2.4	噪声特性	40
2.3	晶体管的种类	43
2.4	晶体管的规格	45
2.4.1	晶体管主要的最大额定值	45
2.4.2	晶体管主要的电特性	46
2.4.3	晶体管的型号名	47
第3章	二极管的基本电路	50
3.1	小信号二极管的电路	50
3.1.1	开关二极管	50
3.1.2	变容二极管	66
3.1.3	检波二极管	69
3.2	与电源有关的二极管电路	74
3.2.1	整流二极管	74
3.2.2	齐纳二极管	81
3.3	与光有关的二极管电路	84
3.3.1	发光二极管	84
3.3.2	光电二极管	86
第4章	双极型晶体管的基本电路	88
4.1	晶体管的等效电路与四端参数	88
4.1.1	晶体管的等效表示	88
4.1.2	四端参数	88
4.1.3	晶体管的等效电路	90
4.2	晶体管的接地方式与特点	94
4.2.1	发射极接地方式	94
4.2.2	基极接地方式	95
4.2.3	集电极接地方式	97
4.2.4	各种接地方式的比较	99
4.3	晶体管的偏置电路	102
4.3.1	偏置的必要性	102
4.3.2	偏置设定方式	103

- 4.3.3 偏置的稳定性 105
- 4.3.4 各种偏置电路 107
- 4.3.5 偏置电路的偏置稳定度 109

第 5 章 双极型晶体管的基本放大电路 … 111

- 5.1 晶体管开关电路 111
 - 5.1.1 脉冲整形电路 111
 - 5.1.2 开路集电极电路 115
- 5.2 低频放大电路 118
 - 5.2.1 简易固定偏置电路 119
 - 5.2.2 电流反馈偏置稳定化简易固定偏置电路 129
 - 5.2.3 电流反馈偏置稳定化固定偏置电路 142
 - 5.2.4 电流反馈偏置稳定化自偏置电路 151
 - 5.2.5 射极跟随器 156
 - 5.2.6 达林顿连接 161
- 5.3 高频放大电路 164
 - 5.3.1 单调谐电路 164
 - 5.3.2 双调谐电路 169
 - 5.3.3 基极接地放大电路 171
 - 5.3.4 渥尔曼连接放大电路 172
- 5.4 功率放大电路 174
 - 5.4.1 变压器耦合电路 174
 - 5.4.2 推挽电路 175
 - 5.4.3 互补 SEPP 电路 179
- 5.5 负反馈放大电路 184

第 6 章 双极晶体管的实用电路 …………… 190

- 6.1 脉冲电路 190
 - 6.1.1 波形整形电路 190
 - 6.1.2 施密特触发电路 198
 - 6.1.3 多谐振荡器 201
 - 6.1.4 间歇振荡器 207

6.2	直流电路	209
6.2.1	差分放大电路	209
6.2.2	电流镜像电路	211
6.2.3	稳流电路	212
6.2.4	电平移动电路	213
6.2.5	稳压电路	215
6.3	正弦波振荡电路	217
6.3.1	LC 振荡电路	217
6.3.2	RC 振荡电路	221
6.3.3	石英振荡电路	223
6.4	调制电路	224
6.4.1	振幅调制电路(AM 电路)	225
6.4.2	频率调制电路(FM 电路)	227
6.4.3	脉冲调制	229
6.5	与频率有关的电路	230
6.5.1	音质调整电路	231
6.5.2	有源滤波器	234
6.5.3	频率变换电路	235
6.6	电压稳定化电源电路	238
6.6.1	波纹滤波器	238
6.6.2	电压稳定化电路	239
6.6.3	开关电源	243
参考文献		246

第 1 章

二极管的基础

1 二极管的工作原理

1.1.1 p 型半导体与 n 型半导体

按照物质的电学性质,可以分为导电的导体与难于导电的绝缘体,但是还有依赖于环境的条件或者易于导电或者难于导电的物质,称此类物质为**半导体**。

硅(Si)和锗(Ge)等由 4 价原子¹⁾组成的物质,其本身通常是绝缘体。但当加上光和热时,价电子运动出来成为**自由电子**²⁾,在价电子的地方产生孔穴,称此孔穴为**空穴**。总之,自由电子与空穴成对的产生。如图 1.1 所示。

如果由外部供给电子,多余的自由电子来到外边,供给的电子稳定在空穴处,所以电流流动。空穴是价电子抽出之后的孔穴,与电子相结合而消失(复合),所以,空穴总体上朝电子供给的方向移动。这种情况可以认为空穴也参与电传导。

因为电子带有负电荷,所以可以认为与此相反的空穴带有正电荷。因此称空穴为**正空穴**。另外,从运输电的意义

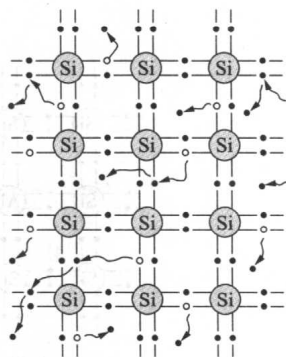


图 1.1 本征半导体根据条件产生电子·与空穴。

1) 4 价原子是在包围原子核的电子轨道中,绕着最外层轨道的电子(价电子)数为 4 个的原子。

2) 自由电子是不被原子束缚而自由运动的、参与电传导的电子。

上来说,电子与空穴都称为**载流子**。

这样,硅和锗根据条件由绝缘体变成导体,所以是半导体。因为空穴也参与电传导,所以如果将硅和锗等4价原子与铝(Al),镓(Ga)等3价原子进行**共价键合**¹⁾,强制性地制作出具有许多空穴的材料,则不依据环境的条件也常常显示出导电性。另外,与磷(P)和砷(As)等5价原子共价键合,强制性地制作出电子很多的半导体,则在通常状态下显示出导电性。此时的Al,Ga,P,As等对于Si,Ge来说称为**杂质**。如大量加入杂质,则半导体的电阻减少,与铜线那样的金属导体相近,因此杂质混入量通常是极微小的。

掺入Al和Ga等杂质的半导体,其载流子空穴是多数,电子是少数,所以电传导主要由认为是带有正电荷的空穴进行的。故在正的(Positive)的意义上称此半导体为**p型半导体**。与此相反,掺入P和As等杂质的半导体,带负电荷的电子是多数载流子,空穴是少数载流子,在负的(negative)的意义上称此半导体为**n型半导体**。这些半导体都含有杂质,所以称为**杂质半导体**(参见图1.2)。

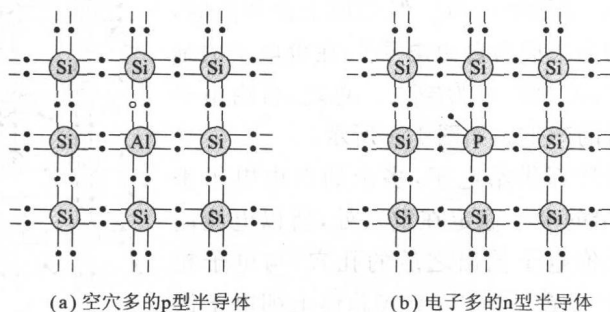


图 1.2 杂质半导体

另外,与杂质半导体相对应,由硅和锗等单一纯粹的元素构成的半导体称为**本征半导体**。

1) 共价键合是相邻原子之间,共有相互的价电子而结合的化合物形态。

1.1.2 pn 结

如果将 p 型半导体与 n 型半导体相连接,则显示出特异的性质。所谓的连接、完全不同于用接合剂的粘接,而是要使两者连接后的边界成为在原子间能够共价电子那样的合金。因此该边界面当然是不明确的,但是都叫作**结面**。另外,p 型半导体与 n 型半导体相连接的结称为**pn 结**。

如果结面成为**合金形式**的话,电子或空穴就能通过结面。所以在将 p 型半导体与 n 型半导体相连接的瞬间,p 型半导体的多数载流子空穴移向 n 型半导体一侧,n 型半导体的多数载流子电子移向 p 型半导体一侧,在结面附近发生复合。因此,在结面附近既没有电子也没有空穴,即产生没有载流子的绝缘体那样的区域。该区域称为**耗尽层**。图 1.3 表示的是构成 pn 结的瞬间,电子和空穴的情况,以及由于复合产生耗尽层的情况。

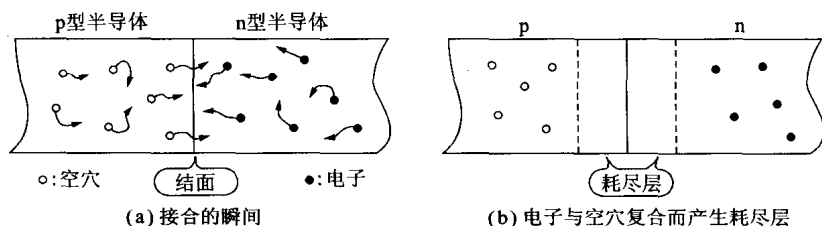


图 1.3 p 型半导体与 n 型半导体相接合,则在结面附近产生耗尽层

已经叙述过,因掺入杂质在 p 型半导体中产生很多空穴,在 n 型半导体中有过剩的电子。往往认为如空穴具有正电荷,则 p 型半导体整体具有正电荷,n 型半导体整体具有负电荷。然而这是不正确的。即使有很多空穴,有过剩的电子,半导体本身不应该是离子化的。因为构成杂质半导体的各自元素的原子核中,质子数与电子数相同,因此是电中性的。

然而一构成 pn 结,就产生耗尽层。分别在 p 型及 n 型半导体中产生没有空穴也没有电子的区域,以及与其相反的区域。在 p 型半导体耗尽层中,由 n 型半导体进入电子,降低了原来是电中性的这一部分的电位,成为具有负的空间电荷。另外,在 n 型半导体的耗尽层中,由 p 型半导体进入空穴,在此出现正的空间电荷。

这样一来,在 p 型半导体与 n 型半导体的耗尽层中,发生如图 1.4 所示的电位势垒,它夹着结面。这个电位势垒称为**电势垒**。另外,两者的电位差是因为接触而产生的,所以称为**接触电位**,或者因随着杂质的加入而产生的原因,称为**扩散电位**。

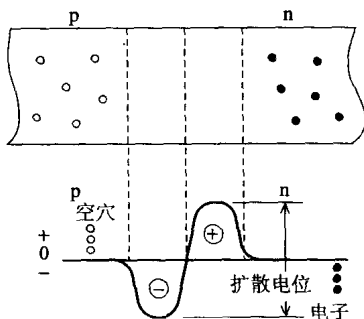


图 1.4 耗尽层的空间电荷产生的扩散电位

一旦在耗尽层中产生电势垒,则余下的电子和空穴就不能越过这电势垒,所以 p 型半导体与 n 型半导体的整体就不能成为耗尽层,耗尽层只在紧靠结面处产生,以结面为界产生扩散电位。

在这个状态下,由外部加上热和光等能量,则在耗尽层内产生电子空穴对,破坏电势垒,电子和空穴通过结面开始往来。加多大程度的能量才开始发生这种情况呢?它是根据组成半导体的元素而不同。

电子离开原子核的距离越远,越不被原子核束缚,所以仅接受小的能量就能够成为自由电子。看一下元素周期表就知道,绕着 Si 原子核周围的电子轨道有 3 个,Ge 有 4 个,Ge 的价电子离原子核的距离要远些。因此比起 Si 来 Ge 的抗光、抗热能力弱,作为半导体来说是不太稳定的。地球上可以说最多的元素是 Si,作为半导体是稳定的元素,它现在成为半导体的主流。

但是,越是用稳定的元素制作的半导体,如不给予较大能量,则越不容易破坏电势垒。这些半导体可以说成是原来的电势垒高的即扩散电位高的半导体。稳定的硅元素的扩散电位约为 0.6V 左右,锗约为 0.3V 左右,扩散电位依元素而不同,但几乎是一定的。

了解半导体知识同器件的选择和电路结构的技巧等有关系,所以对于电路的设计是非常重要的。

2 二极管的电压电流特性

为了消除电势垒,不仅是加上光和热的能量,也可以给 pn 结两端加上电压。现在, pn 结接上图 1.5(a)所示的电池,则电势垒下降,电池电压比扩散电位高,则电势垒消失。这样,如图 1.5(b)那样,电子和空穴能够通过结面,电流能够在电路上流动。这种状态称为正向偏置。

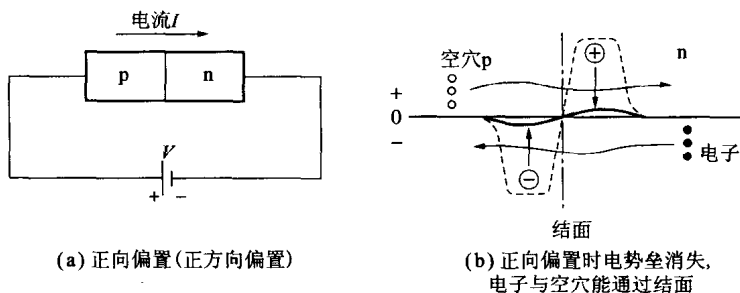


图 1.5 正向偏置时的样子

一旦电流流动,则电流的大小与加在 pn 结间的电压呈指数函数地增加。设流动的电流为 $I(\text{A})$, pn 结间的电压为 $V(\text{V})$, 反向饱和电流为 $I_s(\text{A})$, 结的绝对温度为 $T(\text{K})$, q 为电子电荷($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$), k 为玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$), 则可用下式来表示:

$$I = I_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (1.1)$$

e 为自然对数的底(2.718...).

这是很显然的,若结的温度 T 高,即使电压一定,电流 I 也变大。环境温度高的话,当然结的温度也变高,所以流过 pn 结的电流也增大。

其次,如图 1.6 那样, pn 结接上与图 1.5(a)相反方向的电池,则电势垒比原来更高,耗尽层也增宽,电流愈来愈不流动。称这个状态为反向偏置。

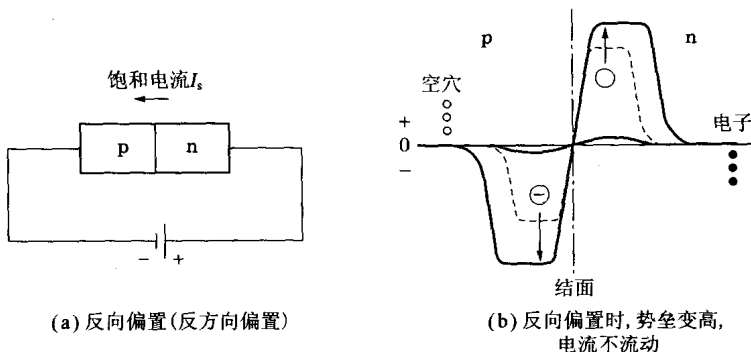


图 1.6 反向偏置时的样子

但是,对于 p 型半导体中的空穴或 n 型半导体中的电子这种多数载流子来说,因为常温下的热能,在 p 型半导体中产生的电子或在 n 型半导体中产生的空穴是少数载流子。对于这些少数载流子是正向偏置,所以即使在耗尽层中复合的比率很高,也只有很微小的电流在 pn 结间流动。这是反向饱和电流 I_s 。

如已叙述的那样,结的温度变高,则电子空穴对急速地增加,所以少数载流子也增加,饱和电流 I_s 也增加。

如果进一步提高反向偏压,在耗尽层上加上强电场,耗尽层发生一种绝缘破坏,引起大电流的急剧流动。这称为**击穿现象**。该状态是因为强电场的作用,使得被原子核束缚的电子释放出来,反复地与其他电子相碰撞,像雪崩那样使电子空穴对急剧增加。因此这种击穿现象也称为**雪崩击穿**。当这种现象开始时,则有大的电流流动,结的温度增高电流进一步增加,最终烧毁 pn 结。

将上述各种现象作为电特性来表示的是图 1.7。pn 结因为有两个端,故称为**二极管**。二极管有各种各样,图 1.7 表示一般二极管的电压电流特性。

在图 1.7 中,纵轴右边是正向偏置特性,左边是反向偏置特性。在这里,假设正向偏置时的正向电压的方向为+,正向电流的方向为+。反向偏置时,电压和电流都与正向偏置时相反,所以电压和电流都加上负号。

正向偏置时,超过扩散电位 V_d ,则电流开始流动,电流 I_f 随着二极管

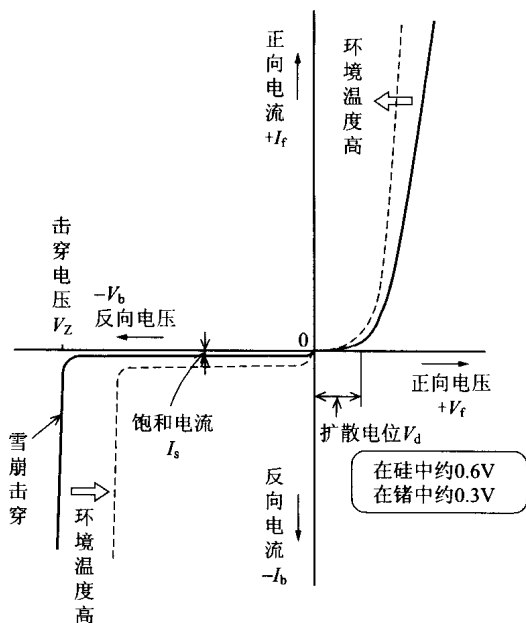


图 1.7 二极管的电压电流特性

端头间电压 V_f 的增加呈指数函数地增加。环境温度增高, 则与 V_f 相同, I_f 增加。在图 1.7 中, 用虚线表示这种情况。

在反向偏置时, 仅有很微弱的饱和电流 I_s 流动, 但是超过击穿电压 V_Z 时, 则发生雪崩击穿, 大量的电流急剧地流动而发生损毁。因此 V_Z 为二极管的反向偏置电压的最大值。称二极管能够承受的反向偏置电压的最大值为反向耐压。

一发生雪崩击穿, 则呈现大量电流流动的状态, 所以二极管的端电压几乎成为定值, 如果很好地利用这一特性, 则可以制作稳压电路。为此目的而制作的二极管称为齐纳二极管或雪崩二极管。这将在后面进行叙述。此时的 V_Z 与其称作反向偏置电压的最大值, 还不如称为齐纳电压更好。

如果环境温度增高, 则在 pn 结器件的所有地方产生电子空穴对, 所以饱和电流 I_s 增加, 击穿电压 V_Z 下降。这种情况用虚线表示在图 1.7 的反向特性中。

简单地说, 二极管是电流只在一个方向流动的器件, 其作用类似于水

泵的阀,水不能倒流。在理想的情况下,希望是图 1.8(a)那样的电压电流特性。在正方向,正向偏置电压 V_f 几乎为 $0V$ 时就有非常大的电流 I_f 流动。在反向时,与反向偏置电压 V_b 的大小无关,电流 I_b 完全不流动。但是,因为直至扩散电位 V_d ,正向电流不流动,所以如果考虑到这一点,则电压电流特性成为图 1.8(b),等效电路为图 1.8(c)。在图 1.8(c)中用符号表示的二极管是具有图 1.8 特性的理想二极管。 V_d 的大小完全由形成二极管的半导体材料所决定。在考虑二极管电路时,该理想二极管特性将是非常有用。

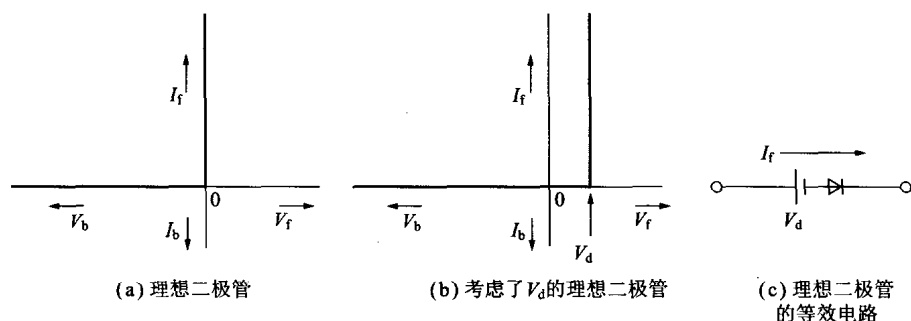


图 1.8 理想二极管的电压电流特性

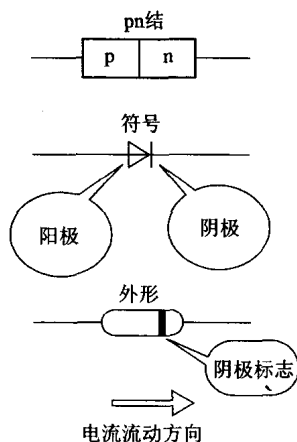


图 1.9 二极管方向的对应关系

pn 结二极管在正向时,电流由 p 型半导体向 n 型半导体流动,将此与二极管的符号相对比,则如图 1.9 所示。称 p 型半导体一侧为阳极,称 n 型一侧为阴极。因为二极管具有这样的极性,所以市售的二极管中大部分都在阴极侧刻有带状线的标志。