

高等职业教育机电类专业“十一五”规划教材

模拟电子技术

MONI DIANZI JISHU

主编 汪涛 王爽



國防工業出版社

National Defense Industry Press

高等职业教育机电类专业“十一五”规划教材

模拟电子技术

主 编 汪 涛 王 爽
副主编 李德明 奚 洋 王 博
主 审 张业明 孙官武

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/汪涛,王爽主编. —北京:国防
工业出版社,2010.1
高等职业教育机电类专业“十一五”规划教材
ISBN 978-7-118-06664-7

I. ①模... II. ①汪... ②王... III. ①模拟电路-电
子技术-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 234242 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14¼ 字数 258 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书遵照教育部提出的以就业为导向、高职高专教育从专业本位向职业岗位和就业为本转变的指导思想,在编写的过程中力求按照由浅入深、由易到难、由简到繁、循序渐进的顺序,在保证必要的基本理论、基本知识、基本分析方法和技能的基础上,强调知识的深度与广度的结合;注重内容的精选,突出重点;讲解上尽量减少理论的推导,力求通俗易懂,强调知识的应用;每章开始部分都有本章的学习目标,结尾有本章小结和思考与练习题,以帮助读者加深对知识的理解与应用,提高分析问题和解决问题的能力。

本书由汪涛、王爽担任主编,汪涛负责全书的规划、组织、统稿和审稿,李德明、奚洋、王博担任副主编。湖北咸宁职业技术学院副院长张业明副教授、孙官武高级教师担任主审,为本书提出了不少宝贵意见。本书在编写过程中得到了以下领导和老师们的大力支持与帮助:咸宁职业技术学院副院长吴高岭教授、方新平副教授、余佑财副教授、吴涛和江喜娥老师;合肥通用职业技术学院吴秣陵副教授、陈栋高级工程师和吴金权老师。

全书具体编写工作分配如下:咸宁职业技术学院汪涛编写第1章、第3章、第6章中第3节和第4节,合肥通用职业技术学院王爽编写第7章、第8章、第6章第1节,湖北长江职业技术学院李德明编写第4章、第5章,咸宁职业技术学院奚洋编写第2章、第6章第2节,咸宁职业技术学院王博编写第9章。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中恐有一些疏漏、欠妥和错误之处,敬请读者批评指正。如有问题,请与张永生编辑联系,电子邮箱:zhangyongsheng100@163.com。

编 者

目 录

第 1 章 半导体二极管及其基本应用电路分析	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 PN 结及其特性	3
1.2 半导体二极管	5
1.2.1 二极管的结构与符号	5
1.2.2 二极管的特性	6
1.2.3 二极管的主要参数	9
1.2.4 二极管的识别与检测	9
1.3 半导体二极管的电路模型分析	11
1.4 半导体二极管的基本应用	14
1.4.1 二极管限幅电路	14
1.4.2 二极管门电路	15
1.5 特殊二极管	16
1.5.1 稳压二极管	16
1.5.2 发光二极管	18
1.5.3 光电二极管	19
1.5.4 光电耦合器件	20
1.5.5 变容二极管	20
本章小结	21
思考与练习题	21
第 2 章 晶体三极管及其基本放大电路	25
2.1 晶体三极管	25
2.1.1 晶体三极管的结构和放大原理	26
2.1.2 晶体三极管的特性曲线	29

2.1.3	晶体三极管的主要参数	33
2.1.4	晶体三极管的命名与引脚识别	35
2.2	共发射极基本放大电路	36
2.2.1	共发射极基本放大电路的组成	36
2.2.2	共发射极基本放大电路的静态分析	38
2.2.3	共发射极基本放大电路的动态分析	40
2.3	静态工作点的稳定及其偏置电路	50
2.3.1	温度对静态工作点的影响	50
2.3.2	分压式偏置共射极放大电路	51
2.4	共集电极放大电路	54
2.4.1	静态分析	54
2.4.2	动态分析	55
2.5	共基极放大电路	58
2.5.1	静态分析	58
2.5.2	动态分析	58
2.5.3	三种基本放大电路的比较	60
	本章小结	60
	思考与练习题	61
第3章	场效应管及其基本放大电路	66
3.1	结型场效应管	66
3.1.1	结型场效应管的结构	66
3.1.2	结型场效应管的工作原理和特性曲线	67
3.2	绝缘栅型场效应管	71
3.2.1	N 沟道增强型 MOS 场效应管	72
3.2.2	N 沟道耗尽型 MOS 场效应管	74
3.2.3	P 沟道 MOS 场效应管	75
3.3	场效应管的主要参数及使用注意事项	77
3.3.1	场效应管的主要参数	77
3.3.2	使用场效应管的注意事项	78
3.4	场效应管与三极管的比较	78
3.5	场效应管放大电路	79
3.5.1	共源极基本放大电路	79
3.5.2	共漏极基本放大电路	85

本章小结	86
思考与练习题	87
第4章 多级放大电路	90
4.1 多级放大电路的组成与耦合方式	90
4.1.1 多级放大电路的组成	90
4.1.2 多级放大电路的耦合方式	91
4.2 多级放大电路的分析	93
4.2.1 多级放大电路的静态工作点分析	93
4.2.2 多级放大电路的动态分析	94
4.3 放大电路的频率特性	97
4.3.1 频率响应的概念	97
4.3.2 单级阻容耦合放大电路的频率特性	98
4.3.3 多级放大电路的频率特性	100
本章小结	102
思考与练习题	102
第5章 负反馈放大电路	104
5.1 反馈的基本概念	104
5.1.1 反馈的概念	104
5.1.2 反馈放大电路的基本关系式	105
5.2 放大电路中反馈类型的判断	106
5.2.1 正、负反馈及其判定方法	106
5.2.2 直流反馈和交流反馈	108
5.2.3 电压反馈和电流反馈	109
5.2.4 串联反馈和并联反馈	110
5.2.5 交流负反馈放大电路的四种组态	110
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	113
5.3.1 减小环路内的非线性失真	113
5.3.2 提高增益的稳定性	114
5.3.3 扩展通频带	115
5.3.4 改变输入电阻和输出电阻	115
5.3.5 放大电路引入负反馈的一般原则	116
5.4 深度负反馈放大电路的估算	117

5.4.1	深度负反馈的特点	117
5.4.2	深度负反馈放大电路的参数估算	118
	本章小结	121
	思考与练习题	122
第 6 章	集成运算放大器及其应用	126
6.1	差分放大电路	126
6.1.1	零点漂移	126
6.1.2	基本差分放大电路	127
6.1.3	长尾式差分放大电路	127
6.1.4	具有调零电路的差分放大电路	130
6.1.5	差分放大电路的四种接法	130
6.2	集成运算放大器	134
6.2.1	集成运放的组成、符号及外形	134
6.2.2	集成运放的种类	135
6.2.3	集成运放的主要参数	136
6.2.4	理想集成运放的性能指标	137
6.2.5	集成运放的电压传输特性	138
6.3	集成运算放大器的线性应用	139
6.3.1	比例运算电路	140
6.3.2	加法运算电路	142
6.3.3	减法运算电路	143
6.3.4	积分与微分电路	144
6.4	有源滤波器	147
6.4.1	基本概念	147
6.4.2	低通滤波器	148
6.4.3	高通滤波器	149
6.4.4	带通滤波器和带阻滤波器	150
	本章小结	152
	思考与练习题	153
第 7 章	信号发生电路	158
7.1	正弦波振荡电路	158
7.1.1	正弦波振荡电路的基本概念	158

7.1.2	RC 正弦波振荡电路	160
7.1.3	LC 正弦波振荡电路	163
7.1.4	石英晶体振荡电路	168
7.2	非正弦信号发生电路	170
7.2.1	电压比较器	170
7.2.2	方波发生电路	173
7.2.3	三角波发生电路	174
	本章小结	175
	思考与练习题	176
第 8 章	低频功率放大电路	180
8.1	低频功率放大电路概述	180
8.1.1	功率放大电路的特点和要求	180
8.1.2	功率放大电路的分类	181
8.1.3	改善功率放大电路输出的措施	182
8.2	乙类双电源互补对称功率放大电路(OCL)	183
8.2.1	电路组成及其工作原理	183
8.2.2	参数分析计算	184
8.3	甲乙类互补对称功率放大电路	186
8.3.1	实用的甲乙类双电源互补对称功率放大电路	186
8.3.2	甲乙类单电源互补对称功率放大电路(OTL)	189
8.4	集成功率放大器	190
	本章小结	192
	思考与练习题	192
第 9 章	直流稳压电源	196
9.1	整流电路	196
9.1.1	单相半波整流电路	196
9.1.2	单相桥式整流电路	198
9.2	滤波电路	200
9.2.1	电容滤波电路	200
9.2.2	其它类型滤波电路	201
9.3	稳压电路	203
9.3.1	稳压二极管稳压电路	203

9.3.2 串联型晶体管稳压电路	204
9.4 开关型稳压电源	208
9.4.1 开关电源电路的特点和应用	208
9.4.2 开关稳压电源的电路结构	208
9.5 集成稳压器	210
9.5.1 三端集成稳压器型号和参数	210
9.5.2 三端集成稳压器的应用	212
本章小结	214
思考与练习题	214
参考文献	216

第1章 半导体二极管及其基本应用电路分析

【学习目标】

1. 了解半导体的基础知识,理解PN结的单向导电性。
2. 掌握二极管的电路符号、伏安特性以及二极管的识别与检测。
3. 掌握二极管的电路模型和其它类型的二极管。
4. 掌握二极管的基本应用。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 本征半导体

自然界中的物质按导电能力强弱的不同,可分为导体、绝缘体和半导体三大类。其中导电性能很强的物质,如银、铜、铝、铁等称为导体。另一些物质如橡胶、塑料等导电性能极差,称为绝缘体。半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。常用的半导体材料有锗(Ge)、硅(Si)等。完全纯净的、不含杂质的半导体叫本征半导体。

在电子器件中,用得最多的半导体材料是硅和锗,它们都是四价元素,在原子结构中最外层轨道上都有四个价电子。为便于讨论,采用图1-1所示的原子结构简化模型。对于单晶体硅或锗,每个原子都和周围的4个原子以共价键的形式互相紧密地联系起来形成稳定的结构,如图1-2所示。

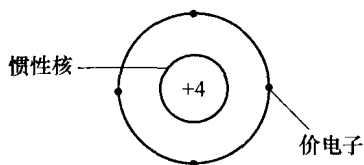


图1-1 硅和锗原子结构简化模型

由于共价键的存在,使本征半导体中不像导体那样有大量自由移动的电荷,但当温度升高或受光照时,共价键中的价电子由于热运动而获得一定的能量,其中少数价电子能够摆脱共价键的束缚而成为自由电子,同时必然在共价键中留下

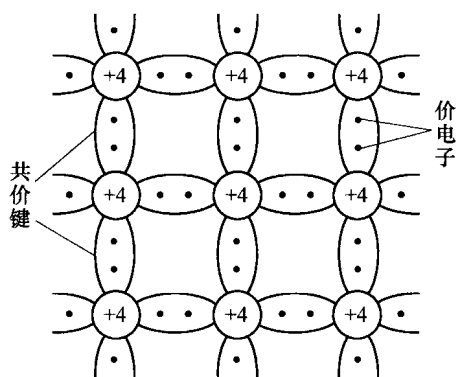


图 1-2 硅和锗的共价键结构

空位,称为空穴,如图 1-3 所示。在本征半导体中,每产生一个自由电子,必然会有一个空穴出现,自由电子和空穴总是成对出现,称它们为电子空穴对,这种物理现象称为本征激发。

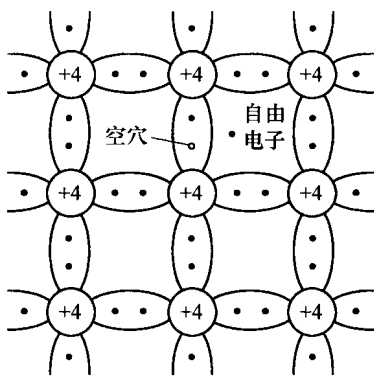


图 1-3 本征激发产生的电子空穴对

由此可见,本征半导体有两种导电的粒子,一种是带负电荷的自由电子,另一种是相当于带正电荷的粒子——空穴。自由电子和空穴在外电场的作用下都会定向移动而形成电流,所以人们把它们统称为载流子,只不过两种载流子在外电场的作用下运动方向相反。由于常温下本征激发产生的自由电子和空穴的数目很少,所以本征半导体的导电性能很差。但当温度升高或光照增强时,本征半导体内的自由电子运动加剧,载流子数目增多,导电性能提高,这就是半导体的热敏特性和光敏特性。如果在本征半导体中通过一定的工艺掺入少量的特定杂质,其导电性能就会极大提高,这就是半导体的掺杂特性,也是半导体最重要的特性。

由于热运动,一方面本征半导体不断产生自由电子和空穴,另一方面自由电子在运动中又会与空穴重新结合,这是一种完全相反的过程,称为复合。在一定

的温度下,自由电子和空穴既产生又复合,最终达到相对动态平衡。从宏观上看两种载流子的浓度保持定值并且相等。但是这个定值与温度有关,当温度发生变化时,即在新的动态平衡状态下,它将保持新的定值。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入不同的微量元素就会得到导电性质不同的半导体材料。根据半导体掺杂特性的不同,可制成N型和P型杂质半导体。

1. N型半导体

如果在本征半导体硅或锗的晶体中掺入微量的五价元素(如磷),那么半导体内部的自由电子数量将增加成千上万倍,导电能力大幅提高,这类杂质半导体称为N型半导体,也称为电子型半导体。在N型半导体中,自由电子成为半导体导电的多数载流子(简称多子),空穴成为少数载流子(简称少子)。就整块半导体来说,它既没有失去电子也没有得到电子,所以也呈电中性。

2. P型半导体

如果在本征半导体硅或锗的晶体中掺入微量的三价元素(如硼),那么半导体内部空穴的数量将增加成千上万倍,其导电能力也将大幅提高。这类杂质半导体称为P型半导体,也称为空穴型半导体。在P型半导体中,空穴成为半导体导电的多数载流子,自由电子为少数载流子。就整块半导体来说,它既没有失去电子也没有得到电子,所以呈电中性。

由上述分析可知,杂质半导体的导电性能主要由多数载流子浓度决定,而多数载流子主要由掺杂产生,所以多数载流子浓度取决于掺杂浓度,其值相对较大,它基本上不受温度影响。而少数载流子由本征激发产生,其数量与温度有关,温度越高,其值就越大,反之就越小。

1.1.3 PN结及其特性

1. PN结的形成

将N型半导体和P型半导体通过特殊的工艺结合在一起,则在这两种半导体的交界面形成一个极薄的特殊层,这个薄层就是PN结。由于P型半导体中空穴浓度高、电子浓度低,而N型半导体中电子浓度高、空穴浓度低,因此在交界面附近电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。P区的空穴要扩散到N区,并与N区的电子复合,在P区一侧就留下了不能移动的负离子空间电荷区。同样,N区的电子要扩散到P区,并与P区的空穴复合,在N区一侧就留下了不能移动的正离子空间电荷区,如图1-4所示。这样在两种半导体的交界面就形成了一个不能移动的正负离子空间电荷区。

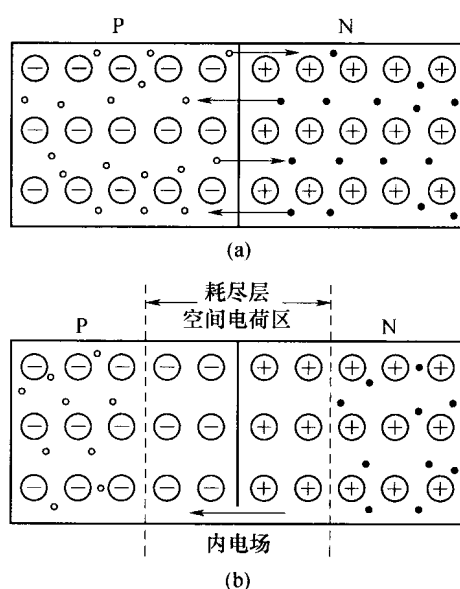


图 1-4 PN 结的形成

(a) 多数载流子的扩散运动；(b) 平衡时空间电荷区的形成。

由图 1-4(b)可以看出空间电荷区形成了一个方向由 N 区指向 P 区的内电场,内电场的作用是阻碍多数载流子的继续扩散,但它有利于 N 区和 P 区中的少数载流子越过空间电荷区向对方区域运动,这种定向运动称为漂移运动。扩散运动和漂移运动是相互联系又相互矛盾的,当它们最终达到动态平衡时,空间电荷区的宽度便确定了,形成了平衡的 PN 结。空间电荷区中没有载流子,所以也叫耗尽层;同时它阻碍多数载流子的扩散,故也称为阻挡层,它的宽度一般为几微米。

2. PN 结的单向导电性

如图 1-5 所示将 P 区接电源的正极,N 区接电源的负极,PN 结处于正向偏置状态,简称正偏。此时外加电压在阻挡层内形成的电场与内电场方向相反,削弱了内电场,使阻挡层变窄。显然,多数载流子的扩散作用大于少数载流子的漂移作用,在电源的作用下,多数载流子向对方区域扩散形成正向电流 I_F ,其方向由电

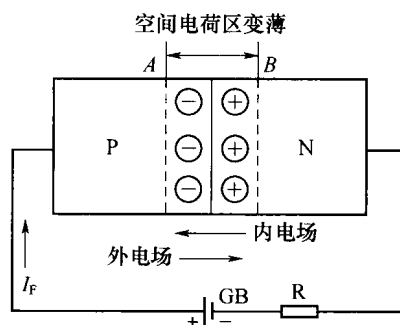


图 1-5 PN 结外加正向电压

源正极通过 P 区、N 区指向电源负极。在一定的范围内,外加正向电压越大,正向电流就越大,这种状态称为 PN 结的正向导通状态。

如图 1-6 所示将 P 区接电源的负极,N 区接电源的正极,PN 结处于反向偏置状态,简称反偏。此时外加电压在阻挡层内形成的电场与内电场方向一致,因而内电场加强了,使阻挡层变宽,阻碍了多数载流子的扩散运动。少数载流子在电场的作用下作漂移运动,由于其电流方向与正向电压极性相反,故称为反向电流。由于反向电流是由少数载流子所形成的,故反向电流很小。

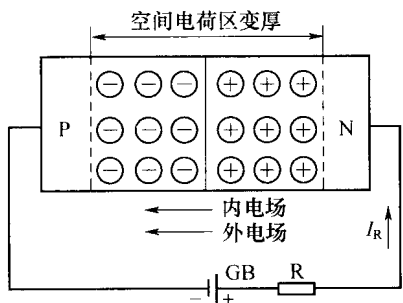


图 1-6 PN 结外加反向电压

由上述分析可知,当 PN 结正偏时,呈现较小的电阻,正向电流较大;当 PN 结反偏时,呈现较大的电阻,反向电流较小,几乎没有电流通过,可认为 PN 结是截止的。这就是 PN 结的单向导电性,即正偏导通、反偏截止。它就像一道阀门,其性能被广泛地应用。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构与符号

半导体二极管的核心就是一个 PN 结。以 PN 结为管芯,在 P 区和 N 区两侧分别接上电极引线,并用外壳封装,就可制成一个半导体二极管。半导体二极管组成示意图如图 1-7(a)所示。从 P 区接出的引线称为二极管的阳极,从 N 区接出的引线称为二极管的阴极,阳极又称为正极,阴极又称为负极。二极管的电路符号如图 1-7(b)所示。

半导体二极管的类型很多,按所用材料划分,可分为硅管和锗管;按制造工艺划分,可分为点接触型、面接触型和平面型三类,其结构示意图如图 1-8 所示。

1. 点接触型二极管

其结构如图 1-8(a)所示,它的结面积很小,故极间电容很小,适合于高频下工作,主要应用于小电流的整流、检波和混频等电路中。

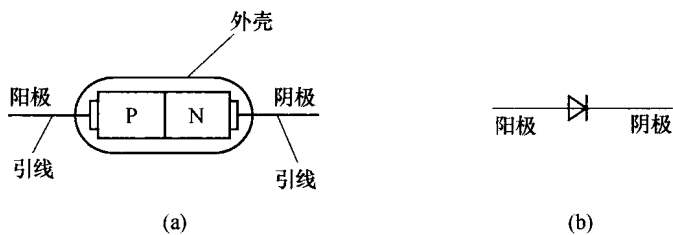


图 1-7 二极管组成示意图和电路符号

(a) 组成示意图; (b) 电路符号。

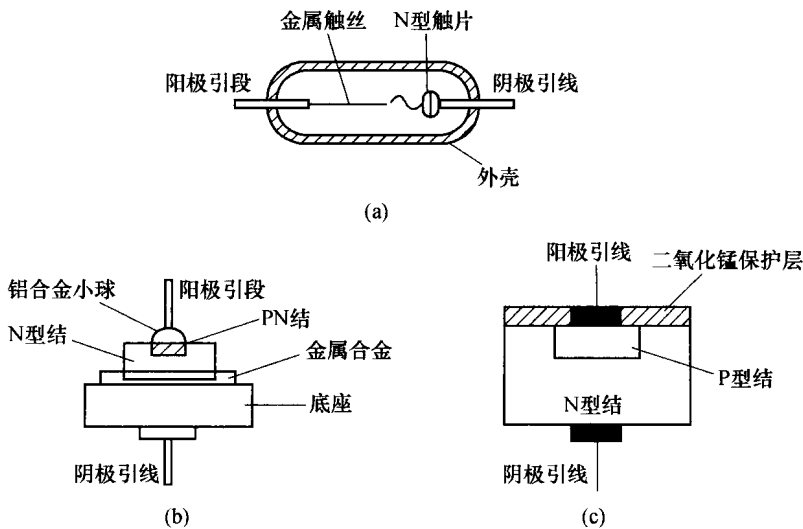


图 1-8 二极管的结构

(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 平面型。

2. 面接触型二极管

其结构如图 1-8(b)所示,它的结面积大,能通过较大的电流,但其结电容较大,故只能工作在较低的频率中,可用于较大电流、较低频率的整流电路中。

3. 硅平面型二极管

其结构如图 1-8(c)所示,结面积大的可通过较大的电流,适用于大功率整流;结面积小的结电容小,适用于在数字电路中作开关管使用。

1.2.2 二极管的特性

1. 二极管的单向导电性

将二极管接成图 1-9(a)所示电路,当开关 S 闭合时,二极管阳极接电源正极,阴极接电源负极,这种情况称为二极管正向偏置。当开关 S 闭合时,灯泡发亮,电流表中显示有较大电流。这时称为二极管导通,流过二极管的电流 I_F 称为正向电流。

将二极管接成图 1-9(b) 所示电路,这时二极管阳极接电源负极,阴极接正极,这时二极管称为反向偏置。开关 S 闭合,灯泡不亮,从电流表中看到电流很小,几乎为零,这时称为二极管截止。此时二极管中仍有微小电流通过,在二极管未反向击穿的情况下,该微小电流基本上不随外加反向电压的变化而变化,故称为反向饱和电流(亦称反向漏电流),用 I_s 表示。 I_s 很小,但它会随温度上升而显著增加。故半导体二极管的热稳定性较差,一般硅管的热稳定性比锗管要好,在使用半导体二极管时,要考虑环境温度对器件和由它造成的电路的影响。

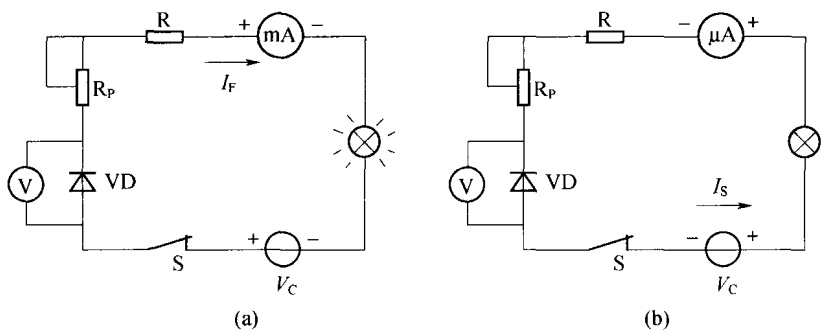


图 1-9 半导体二极管单向导电性实验与伏安特性的测试
(a) 二极管正向测试; (b) 二极管反向测试。

二极管正向导通、反向截止的这种特性称为二极管的单向导电性。

2. 二极管的伏安特性

在图 1-9 所示的电路中,改变电位器 R_p 的阻值,就可改变二极管两端的电压,电压表用来测定二极管两端的电压,电流表用来测定通过二极管电流。通过实验测定,可得出如图 1-10 所示的二极管的伏安特性曲线。

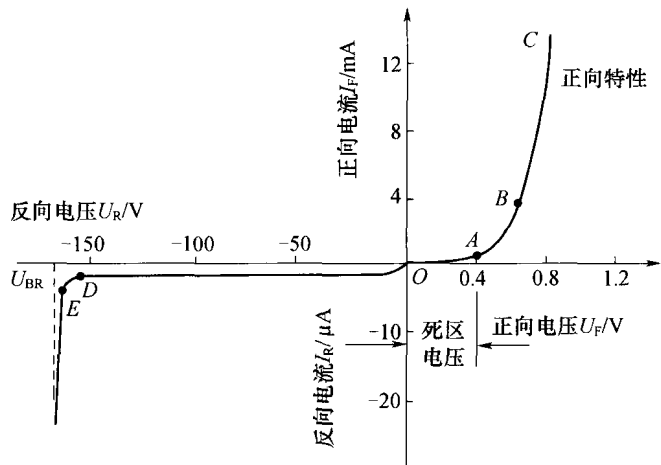


图 1-10 半导体二极管伏安特性曲线