

高等学校试用教材

电工学基本教程

孙骆生 主编

DIANGONGXUE

JIBEN

JIAOCHENG

下

高等教育出版社

高等学校试用教材

电工学基本教程

下 册

孙骆生 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据1980年6月制定的高等工业学校120学时类型《电工学教学大纲(草案)》编写的,经过高等学校工科电工教材编审委员会电工学教材编审小组评选,作为高等工业学校非电专业120学时类型电工学课程的基本教材。

本书分上、下册出版。下册包括二极管和整流电路、晶体管和交流放大电路、晶体管振荡器、晶体管直流放大电路、晶闸管及其应用,书后附有常用电子器件型号和参数的附表。每章均穿插有例题、思考题,并附有小结、习题和部分习题答案。

编 主 主 部 心

高等学校试用教材 电工学基本教程

下 册
孙骆生 主编

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
黑龙江新华印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 7.25 字数 175,000

1984年4月第1版 1984年9月第3次印刷

印数 87,001—50,030

书号 15010·0579 定价 1.30元

二、动态工作情况的图解	62
三、非线性失真的图解和静态工作点的选择	65
10-4 晶体管和放大器的小信号模型	70
一、晶体管的简化小信号模型	70
二、单管放大器的简化小信号模型	72
三、放大器的输入电阻和输出电阻	73
10-5 静态工作点的稳定	76
一、温度对静态工作点的影响	76
二、分压式电流负反馈偏置电路	77
10-6 多级电压放大器	80
一、电路的联接	81
二、电压放大倍数	82
10-7 阻容耦合放大器的频率特性	84
一、频率特性和失真	84
二、低频特性	86
三、高频特性	87
10-8 放大器中的负反馈	88
一、放大器中负反馈的基本类型	88
二、常用的负反馈放大电路	93
三、负反馈对放大器性能的影响	100
10-9 功率放大器	103
一、无输出变压器的功率放大器	104
二、变压器耦合推挽功率放大器	114
本章小结	118
习题	120
第十一章 晶体管振荡器	127
11-1 自激振荡器的基本工作原理	127
一、自激振荡现象	127
二、自激振荡条件	129
11-2 LC 振荡器	131
一、LC 振荡电路及其选频特性	131
二、变压器反馈 LC 振荡器	135
三、自激振荡的建立和振幅的稳定	137

101	11-3 RC 振荡器	138
101	一、 RC 串并网络的选频特性	139
301	二、桥式 RC 振荡器	141
801	本章小结	143
801	习题	143
	第十二章 晶体管直流放大电路	145
002	12-1 单端式直接耦合放大电路	145
802	一、静态工作点的设置	146
102	二、电压放大倍数	147
202	三、零点漂移	148
702	12-2 差动式放大电路	150
802	一、基本电路	150
102	二、具有射极电阻的差动式放大电路	153
	三、差动放大电路的几种接法	155
122	四、具有恒流源的差动式放大电路	160
322	12-3 运算放大器和线性集成放大电路	161
	一、线性集成放大电路简介	162
	二、运算放大器的基本联接方式	165
	12-4 运算放大器的应用	170
	一、比例运算	170
	二、加、减运算	170
	三、积分运算	172
	四、电压-电流和电流-电压转换器	173
	五、比较器	174
	本章小结	176
	习题	177
	第十三章 晶闸管及其应用	181
	13-1 晶闸管的结构、特性和参数	182
	一、晶闸管的结构和可控单向导电特性	182
	二、晶闸管的伏安特性	184
	三、晶闸管的参数	186
	13-2 单相半波可控整流电路	188
	一、带电阻负载的电路	188

13-2	二、带电感性负载的电路	191
13-3	单相半控桥式整流电路	194
13-4	晶闸管的保护	198
13-4-1	一、晶闸管的过电流保护	198
13-4-2	二、晶闸管的过电压保护	199
13-5	单结晶体管触发电路	200
13-5-1	一、单结晶体管的结构和特性	200
13-5-2	二、单结晶体管的自振荡电路	203
13-5-3	三、可控整流的单结晶体管触发电路	204
	本章小结	206
	习题	207
附表一	常用半导体二极管的型号和主要参数	209
附表二	常用晶体管的型号和主要参数	214
附表三	普通晶闸管的参数及各种单相可控整流电路的比较	221
	参考文献	225
101		
102		
103		
104		
105		
106		
107		
108		
109		
110		
111		
112		
113		
114		
115		
116		
117		
118		
119		
120		
121		
122		
123		
124		
125		
126		
127		
128		
129		
130		
131		
132		
133		
134		
135		
136		
137		
138		
139		
140		
141		
142		
143		
144		
145		
146		
147		
148		
149		
150		
151		
152		
153		
154		
155		
156		
157		
158		
159		
160		
161		
162		
163		
164		
165		
166		
167		
168		
169		
170		
171		
172		
173		
174		
175		
176		
177		
178		
179		
180		
181		
182		
183		
184		
185		
186		
187		
188		
189		
190		
191		
192		
193		
194		
195		
196		
197		
198		
199		
200		
201		
202		
203		
204		
205		
206		
207		
208		
209		
210		
211		
212		
213		
214		
215		
216		
217		
218		
219		
220		
221		
222		
223		
224		
225		
226		
227		
228		
229		
230		
231		
232		
233		
234		
235		
236		
237		
238		
239		
240		
241		
242		
243		
244		
245		
246		
247		
248		
249		
250		
251		
252		
253		
254		
255		
256		
257		
258		
259		
260		
261		
262		
263		
264		
265		
266		
267		
268		
269		
270		
271		
272		
273		
274		
275		
276		
277		
278		
279		
280		
281		
282		
283		
284		
285		
286		
287		
288		
289		
290		
291		
292		
293		
294		
295		
296		
297		
298		
299		
300		

第九章 二极管和整流电路

通常, 电力网供给的是交流电, 而在工业生产、交通运输和科学实验中, 却常常要用直流电。这就需把交流电变换为直流电。本章讲的就是用来实现这种变换的整流电路。

整流电路中必需有整流元件, 以前主要用电子管和离子管, 从六十年代起已广泛采用半导体二极管。

半导体二极管所以能用作整流元件, 关键在于管子内部的PN结具有单向导电性。有关半导体的理论, 物理学中作过介绍, 本章只作扼要复习, 而主要讲述半导体二极管的伏安特性和参数, 以及整流电路的分析计算, 最后还要简略介绍稳压管及简单稳压电路。

9-1 半导体的导电方式

常用的半导体, 例如硅和锗, 属于四价元素, 即其原子的最外层轨道上有四个价电子。硅和锗的单晶体, 原子排列非常整齐, 且每个原子的四个价电子各为相邻的四个原子所分别共有, 如图9-1所示。原子间的这种结合叫做共价键结构。温度为绝对零度时, 共价键中的电子被束缚得很紧, 这种情况下的半导体几乎相当于绝缘体。在一般情况下, 硅单晶体(或锗单晶体)受室温作用或光的照射, 共价键中的束缚电子, 有的吸收一定能量而冲破键的束缚, 成为自由电子, 这个过程叫做激发。被冲破的键, 失去一个电子, 就在键中出现一个电子的空位, 通常把它叫做空穴, 如图9-2所示。空穴既然是共价键失去电子的结果, 自然呈正电性。

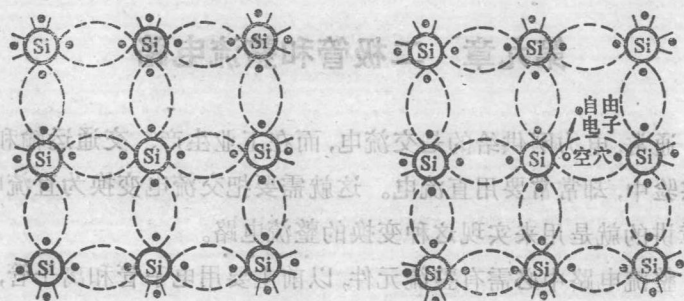


图 9-1 硅原子间的共价键结构

图 9-2 由激发产生的自由电子和空穴

共价键中出现的空穴，很容易被附近另一共价键中的电子移过来填充，从而又在移出电子的键中出现空穴，如此连续进行，表现为空穴的移动，即相当于正电荷的移动。如有外电场作用，由激发产生的自由电子将逆着电场方向运动，而空穴则顺着电场方向连续移动，前者形成电子电流，后者形成空穴电流，二者方向相反，所带电荷符号也相反，但电流效应相同。可见，半导体中的电流是电子流和空穴流的总和。电子和空穴统称为半导体中的载流子。

在半导体中，自由电子如果同空穴相遇，可能放出吸收的能量而填充到空穴中去，这个过程叫做复合。每一次复合，都有一个自由电子和一个空穴同时消失。而且，激发和复合总是在半导体中不断地进行。所以，在一定环境下，半导体中的载流子数目基本上一定。

在结构完整和高度纯净的半导体中，电子和空穴总是成对出现，彼此数目完全相等，两种载流子同时产生，又同时参加导电，这样的半导体叫做本征半导体。

在室温条件下，本征半导体的载流子数量很少，其导电性能远比导体差。

如在纯净的硅中掺入微量三价元素硼(或铝、镓等)，在硼原子

(B)同周围四个硅原子(Si)组成的共价键结构中,因硼原子只有三个价电子而出现空穴(图9-3),从而使空穴的数目相应增加,自由电子的数目仍然极少。这种半导体主要靠空穴导电,叫做空穴型半导体,又称P型半导体。换句话说,P型半导体中的多数载流子为空穴。应当指出,因掺入三价元素而引起空穴数目的增加,并不使半导体带电,即半导体对外仍呈电中性。

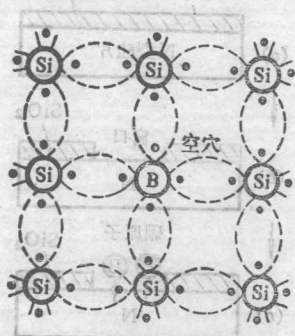


图9-3 硅单晶体中掺入硼(B)元素形成空穴

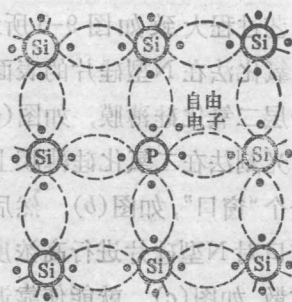


图9-4 硅单晶体中掺入磷(P)元素提供自由电子

如果在硅的单晶体中掺入微量的五价元素磷(或锑),则在磷原子(P)同周围四个硅原子组成的共价键结构中,因磷原子有五个价电子而多出一个电子(图9-4),从而使自由电子的数目相应增加,空穴仍然极少。这种半导体主要靠电子导电,或者说,它的多数载流子为电子,故叫做电子型半导体,又叫做N型半导体。同样,自由电子数目的增加,并不改变半导体的电中性。

上述两种掺杂半导体的多数载流子浓度,基本上取决于掺杂浓度,而少数载流子浓度则随着温度的升高而增大。

思考题9-1 在半导体中,空穴的移动实质上也是电子的移动。那末,它和自由电子的移动有何区别?

9-2 PN 结及其单向导电性

如果采取某种措施在同一块半导体上形成 P 型区和 N 型区两部分,就构成了所谓的 PN 结。

制造 PN 结的方法,常用的有扩散法和合金法,而前者用得较多。用扩散法制造平面型 PN 结的工艺流程大致如图 9-5 所示,先用氧化法在 N 型硅片的表面生成一层二氧化硅薄膜,如图(a)。再用光刻法在二氧化硅薄膜上开出一个“窗口”,如图(b),然后通过窗口对 N 型硅片进行高浓度的硼扩散,如图(c),就能使靠近窗口的部分获得足够的硼原子而转化为 P 型硅,如图(d)。适当控制扩散温度和扩散时间,此 P 型区将有合适的杂质浓度和深度。

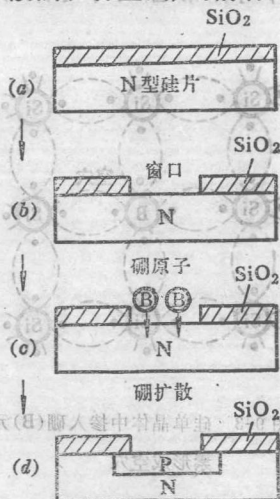


图 9-5 用扩散法制造 PN 结的过程示意

由于 P 区空穴浓度高, N 区却几乎没有空穴, P 区的空穴就要穿过 P 区和 N 区的交界面向 N 区扩散。同样,因 P 区电子浓度远低于 N 区, N 区的电子也要向 P 区扩散。随着扩散的进行,在交界面附近, P 区的空穴和 N 区的电子都将消失。前面曾经指出,无论是 P 型半导体还是 N 型半导体都是电中性的,如图 9-6(a)所示。现在,由于相互扩散的结果,交界面两侧将分别出现带电荷的薄层,如图 9-6(b)所示。P 区的薄层带负电, N 区的薄层带正电,统称为空间电荷区。在这个区域内,电子和空穴都已复合,基本上没有载流子,有的只是不能移动的负离子和正离子,在

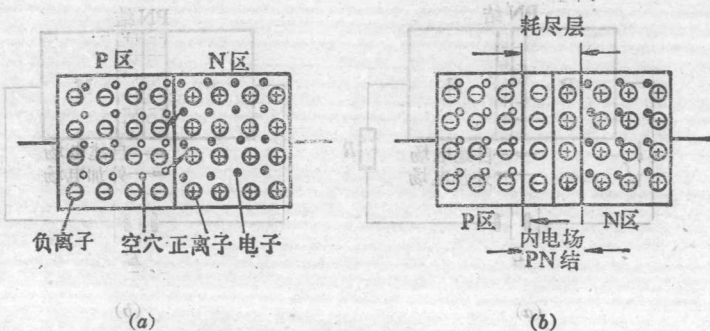


图 9-6 PN 结的形成

P区是获得了电子的三价杂质原子，在N区是失去了电子的五价杂质原子，它们都处在半导体的晶格结构中，都是不能移动的。所以，空间电荷区有很高的电阻率，故又叫做阻挡层，或叫做耗尽层（载流子耗尽了）。

随着交界面两侧正、负电荷层的出现，同时形成一个电场，叫做内电场或自建电场，其方向为从N区指向P区，如图9-6(b)所示。这个自建电场，既阻碍P区的空穴向N区扩散，又阻碍N区的电子向P区扩散。或者说，自建电场要使两种载流子分别向着与前述扩散方向相反的方向运动。载流子在电场作用下的运动叫做漂移运动。PN结没有外加电压时，其中的扩散运动和漂移运动处于动平衡状态，总的看来，没有载流子越过PN结。

实际工作中的半导体器件，PN结上总有外加电压。由于外加电压的方向不同，PN结的情况也有明显的不同。

PN结加正向电压的情况，如图9-7(a)所示。直流电源正极接P区，负极接N区，外加电压在PN结上形成外加电场，其方向从P区指向N区，恰好与自建电场方向相反，削弱了自建电场，打破了PN结中的动平衡状态，载流子的扩散运动超过了漂移运动。于是，P区和N区的多数载流子又能越过PN结向对方扩散。从

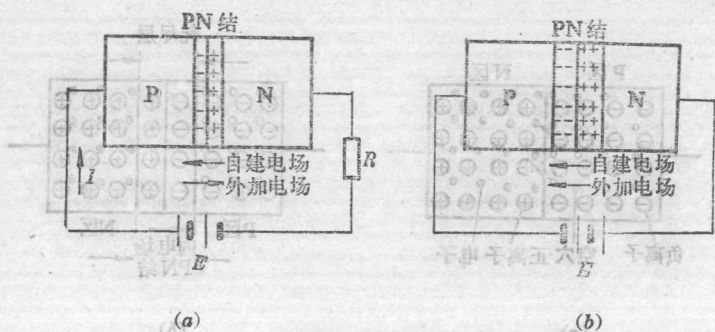


图 9-7 外加电压对 PN 结的影响

N 区注入到 P 区的电子，在扩散过程中先后同 P 区的空穴复合，外加电源正极则不断给 P 区补充空穴（实际是拉走共价键中的电子，从而留下空穴）；同样，从 P 区注入到 N 区的空穴，也先后同 N 区的电子复合，电源负极则不断给 N 区补充电子。可见，在给 PN 结加正向电压情况下，整个电路中有载流子的连续和定向的移动，即形成了电流。此电流通过 PN 结的方向为从 P 区到 N 区，叫做正向电流。

PN 结加反向电压的情况，如图 9-7(b) 所示。直流电源负极接 P 区，正极接 N 区，在 PN 结上的外加电场方向与自建电场方向相同，使空间电荷区电场强度增强，即正、负电荷量加大。由于空间电荷区的电荷密度是由杂质浓度决定的，不随外加电压变化，因此，空间电荷量的加大，将表现为空间电荷区的加宽。于是，P 区的空穴和 N 区的电子更难以越过 PN 结而向对方扩散，只有少数载流子（P 区的电子和 N 区的空穴）在外加电场作用下越过 PN 结，形成从 N 区流向 P 区的电流，叫做反向电流。由于少数载流子数量极微，故反向电流很小，可以看成 PN 结反向不导通。

上述情况表明，PN 结具有单向导电性，导电方向从 P 区到 N 区。导电条件是加正向电压。

PN 结加反向电压时,空间电荷区电场强度增强,正、负电荷量加大,PN 结加宽。所加反向电压越高,交界面两侧的正、负电荷量越大;反向电压降低,正、负电荷量则随之减小,即 PN 结上反向电压改变 ΔU 时,空间电荷区的电荷量将随之改变 ΔQ ,这说明 PN 结空间电荷区有电容效应,称为结电容,其电容量为 $C_j = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$,具有非线性的性质。利用结电容的非线性,可制成变容二极管。对其它一些 PN 结器件,如晶体三极管,结电容会给它的高频特性和开关特性带来不良影响。

9-3 半导体二极管的伏安特性和主要参数

半导体二极管的外形因型号和规格的不同而有所不同,图 9-8 所示是常见的几种。由图可见,不管二极管的外形如何,都有

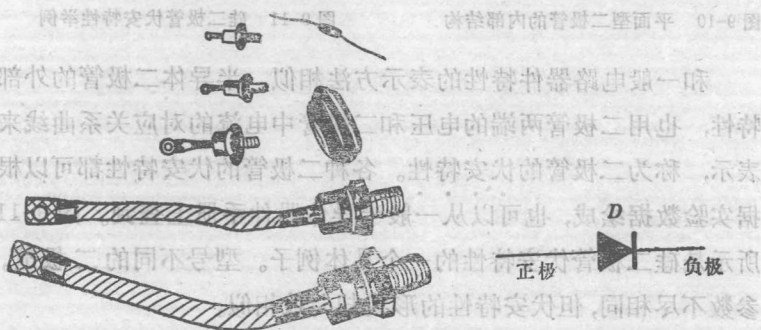


图 9-8 几种半导体二极管的外形

图 9-9 二极管的符号

两个电极,一为**正极**(又叫**阳极**),一为**负极**(又叫**阴极**)。在电路图中,二极管的图形符号如图 9-9 所示,文字符号用 D 表示。

半导体二极管的结构,就是一个 PN 结加上电极引线和管壳,正极从 P 区引出,负极从 N 区引出,故它的导电方向是从正极指

向负极。按照PN结的构成方式,可将半导体二极管分成点接触型、面结合型和平面型三类,图9-10所示是平面型二极管的内部结构。

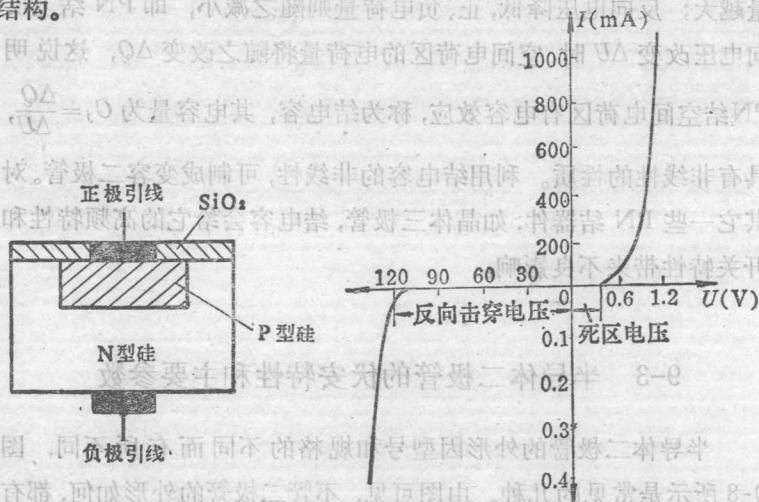


图9-10 平面型二极管的内部结构

图9-11 硅二极管伏安特性举例

和一般电路器件特性的表示方法相似,半导体二极管的外部特性,也用二极管两端的电压和二极管中电流的对应关系曲线来表示,称为二极管的伏安特性。各种二极管的伏安特性都可以根据实验数据绘成,也可以从一般半导体器件手册上查到。图9-11所示是硅二极管伏安特性的一个具体例子。型号不同的二极管,参数不尽相同,但伏安特性的形状却大致相似。

图9-11表明,二极管的伏安特性曲线由正向特性(在第一象限)和反向特性(在第三象限)两部分组成。

正向特性表明,当二极管的正向电压很小时,流过它的正向电流也很小;当正向电压稍为增大(硅管超过0.5V,锗管超过0.1V,即所谓死区电压)时,正向电流开始增大。对一定型号的半导体二极管,允许通过的正向电流平均值 I_F 有一定限制,这个允许值叫

做二极管的**最大整流电流**，它是一个重要参数。在最大整流电流范围内，管子正向压降都不大(表 9-2)，或者说，二极管的正向电阻很小。以后在讨论二极管整流电路时，常将管子的正向压降忽略不计。

反向特性表明，二极管的反向电压小于某一数值时，反向电流很小(即二极管的反向电阻很大)，它是由激发所生少数载流子形成的，在一定温度下是个常数，不随外加反向电压的大小而变化，通常称为**反向漏电流**或**反向饱和电流**。前面曾经指出，半导体中少数载流子的浓度与温度有关，故半导体二极管反向漏电流的大小也与环境温度有关，它随着温度的升高而剧烈增加。以硅二极管为例，如果设它在室温为 25°C 时的反向漏电流等于 1 个单位，则随着室温的升高，其增长情况如表 9-1 所示。

硅二极管的反向电流随环境温度增长的情况

表 9-1

环境温度	25°C	55°C	95°C	140°C
反向电流	1	10	100	1000

值得注意的是，即使在室温条件下，若二极管的反向电压大于某一定值，反向电流也会急剧增大，这种现象叫做**反向击穿**，该一定值叫做二极管的**反向击穿电压**。一般半导体器件手册上给出的各种二极管的**最高反向工作电压** U_{PR} ，就是按其反向击穿电压的 $1/2$ 或 $2/3$ 规定的，这是它的又一个重要参数。在使用二极管时，一般要注意加给它的反向电压最大值应小于它的 U_{PR} 值。

不同型号的半导体二极管有不同的参数值，表 9-2 仅举几例常用的半导体二极管。其中，型号的第一位是数字，2 是二极管的代号；第二位是文字，A 表示管心用 N 型锗作基片，C 表示用 N 型硅作基片；第三位也是文字，表示管子的用途，P 代表普通管，Z 代表整流管；最后一位数字(和文字)是管子序号，详见 36 页表 10-1。

常用半导体二极管主要参数举例 表 9-2

型号	最大整流电流 (mA)	最高反向工作电压 (峰值) (V)	反向击穿电压 (V)	最高工作频率 (MHz)	最大整流电流下的正向压降 (V)	最高反向工作电压下的反向电流 (μA)
2AP3	25	30	≥ 45	150	< 1	≤ 250
2AP6	12	100	≥ 150	150	< 1	≤ 250
2CP10	100	25			≤ 1.5	≤ 5
2CP33H	500	400			≤ 1	≤ 300
2CZ11A	1000	100			≤ 1	$\leq 0.6 \times 10^3$
2CZ14F	10×10^3	600			≤ 0.8	$\leq 6 \times 10^3$

思考题 9-2 用一节 1.5 V 的干电池和一个小电珠串联，可作为测定半导体二极管好坏和判别其正、负极的装置。试说明其原理和测试方法。

思考题 9-3 实际上，常用万用表的欧姆(Ω)档来测定半导体二极管的好坏和极性，如图 9-12 所示。其中，(a)、(b)两图的差别在于：二极管的正、负极同万用表的红、黑表笔的联接对调了位置，且图(a)显示的电阻小(几百欧)，图(b)显示的电阻大(几百千欧)。试指出二极管的好坏和它的正、负极，并说明理由。(提示：万用表端钮上标的“+”、“-”代表万用表测量电流的入端和出端恰好“+”端同其内部电池的负极相联“-”端同电池的正极相联。)

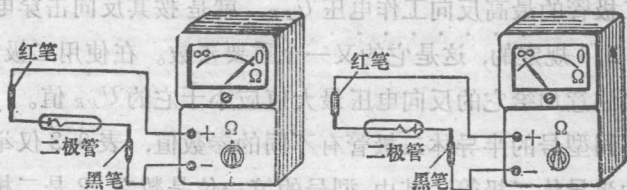


图 9-12 用万用表欧姆档检测二极管