

清华大学试用教材

工业电子技术

清华大学自动化系编

1971.12.

毛主席语录

我们的教育方针，应该使受教育者在德育、智育、体育几方面都得到发展，成为有社会主义觉悟的有文化的劳动者。

大学生，尤其是高年级，主要是自己研究问题，……

要把精力集中在培养分析问题和解决问题的能力上，……

前 言

在毛主席教育革命路线的指引下，在全国教育工作会议的推动下，教育战线的形势大好。

为了落实毛主席关于“**教材要彻底改革**”的伟大指示，在工人阶级领导下，我们编写了这本教材。

这本教材是试用稿，是为我校机械、电力、化工、精密仪器、工物等系的有关专业编写的，希望有一定的通用性。在编写时，我们着重于基本电路的定性分析，配合适当的定量估算，希望能做到由浅入深，便于自学。但由于我们对毛主席的教育思想领会不深，在运用毛主席的哲学思想来统帅业务知识方面做得很不够，实践经验又很差，时间也很仓促，习题、实验等部分还来不及编入。初稿中肯定存在许多缺点错误，恳切希望广大工农兵学员和其他革命同志提出批评和建议，以便在这份初稿的基础上，不断充实提高，真正能做到“**为工农兵服务，为无产阶级政治服务，为社会主义服务**”。

自动化系
四 连 《工业电子技术》编写小组

1971.12

符号及脚注的说明

(一) 符 号

D :	晶体二极管
T :	晶体三极管; 周期
Q :	晶体管的静态工作点; LC 谐振回路的品质因数
J :	继电器
W :	电位器
B :	变压器
N :	变压器初、次级线圈匝数
n :	变压器变比
L :	电感
C :	电容
R :	电阻
r :	动态电阻
X :	电抗
Z :	阻抗
E :	直流电源电压; 交流电源电压有效值
e :	交流电源电压
U :	直流电压; 交流电压有效值
u :	交流电压(瞬时值); 变化电压
I :	直流电流; 交流电流有效值
i :	交流电流(瞬时值); 变化电流
P :	功率
ω :	交流电的角频率
f :	频率
f_0 :	谐振频率; 振荡频率
t :	时间
τ :	时间常数
Δ :	变化量; 增量
K :	电压放大倍数; 开关
β :	晶体管共发射极动态电流放大系数
$\beta_{=}$:	晶体管共发射极直流电流放大系数

(二) 脚 注

- D : 二极管 (i_D : 二极管瞬时电流)
 c : 集电极 (U_c : 集电极电压, I_c : 集电极电流)
 e : 发射极 (I_e : 发射极电流)
 b : 基极 (i_b : 基极的交流电流瞬时值)
 C : 电容 (X_C : 容抗, u_C : 电容电压)
 L : 电感 (X_L : 感抗)
 m : 最大值; 峰值; 幅度 (U_m : 脉冲幅度)
 S : 饱和 (U_S : 晶体管饱和电压)
 j : 加速 (C_j : 加速电容)
入: 输入 ($u_{入}$: 交流输入电压, $r_{入}$: 输入电阻)
出: 输出 ($u_{出}$: 交流输出电压, $P_{出}$: 放大器输出功率)
负: 负载 ($R_{负}$: 负载电阻)

(三) 补充符号

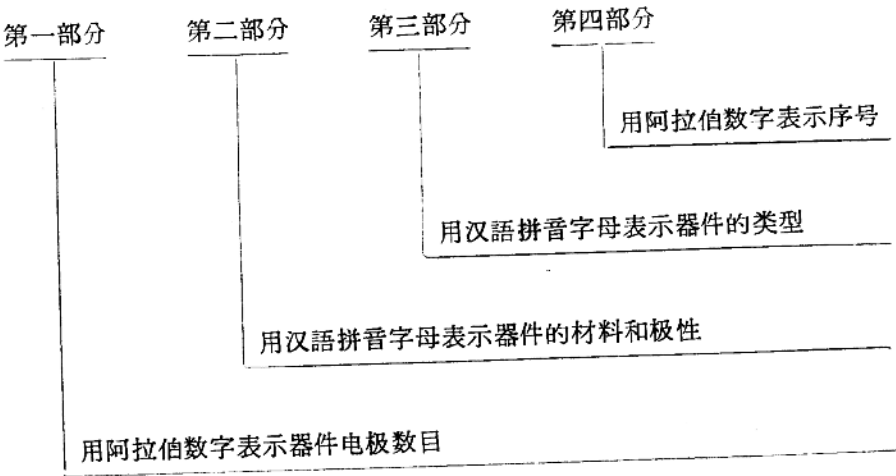
- $R_{负}'$: 放大器的总负载电阻
 $r_{内}$: 电源内阻
 I_{cb0} : 集电极反向截止电流
 I_{cs} : 集电极临界饱和电流
 I_{bs} : 基极临界饱和电流
 U_{cm} : 集电极最大电压
 I_{cm} : 集电极最大电流
 P_{cm} : 集电极最大耗散功率
 E_2 : 电源变压器次级电压
 I_2 : 电源变压器次级电流
 $U_{入m}$: 输入电压幅值
 $U_{出m}$: 最大输出电压
 U_{DM} : 二极管最大反向电压
 $U_{e1导}$: T_1 饱和导电时集电极电压
 $U_{b1截}$: T_1 截止时基极电压
 $t_{上}$: 脉冲前沿
 $t_{下}$: 脉冲后沿
 t_K : 脉冲宽度
 t_h : 恢复时间

附 录

国产半导体器件型号命名方法

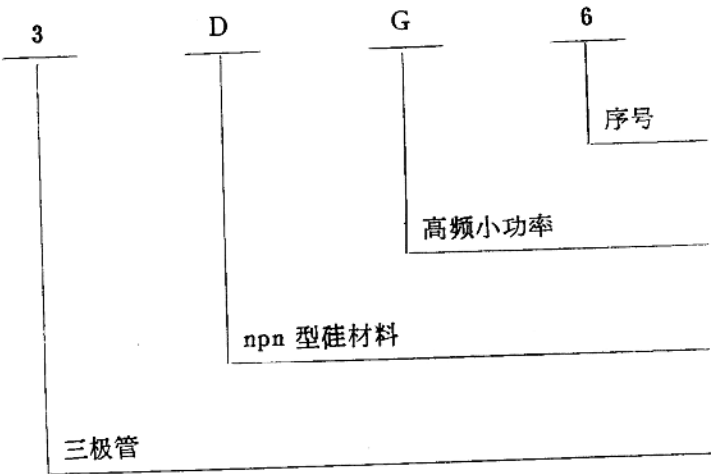
(国家标准 GB 249—64)

半导体器件的型号由四个部分组成：



示例：

硅高频小功率三极管



型号组成部分的符号及其意义:

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分
用数字表示器件电极数目		用汉语拼音字母表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母表示器件类型		用数字表示器件序号
符号	意义	符号	意义	符号	意义	
2	二极管	A	n 型锗材料	P	普通管	
3	三极管	B	p 型锗材料	V	微波管	
		C	n 型硅材料	W	稳压管	
		D	p 型硅材料	C	参量管	
		A	pn _p 型锗材料	Z	整流元件	
		B	np _n 型锗材料	L	整流堆	
		C	pn _p 型硅材料	S	隧道管	
		D	np _n 型硅材料	U	光电管	
				K	开关管	
				X	低频小功率管 (截止频率 $< 3 \text{ MHz}$ 耗散功率 $< 1 \text{ W}$)	
				G	高频小功率管 (截止频率 $\geq 3 \text{ MHz}$ 耗散功率 $< 1 \text{ W}$)	
				D	低频大功率管 (截止频率 $< 3 \text{ MHz}$ 耗散功率 $> 1 \text{ W}$)	
				A	高频大功率管 (截止频率 $\geq 3 \text{ MHz}$ 耗散功率 $\geq 1 \text{ W}$)	
				T	可控整流元件	

目 录

第一章 晶体二极管及整流电路	1
第一节 晶体二极管	1
(一) p 型半导体、 n 型半导体、 $p-n$ 结的伏安特性	2
(二) 晶体二极管的特性和参数	4
(三) 晶体二极管的识别和简易测试	6
第二节 单相整流电路	7
(一) 单相半波整流电路	7
(二) 单相全波整流电路	8
(三) 单相桥式整流电路	10
第三节 滤波器	11
(一) 电容滤波器	12
(二) $LC-\Pi$ 型滤波器	13
(三) $RC-\Pi$ 型滤波器	14
小 结	15
第二章 晶体三极管	17
第一节 晶体三极管的结构	17
第二节 晶体三极管的电流分配和放大作用	18
第三节 晶体三极管简单实用电路举例	22
(一) 光电控制	22
(二) 温度控制计	23
第四节 晶体三极管的特性曲线	24
(一) 输入特性	24
(二) 输出特性	25
第五节 利用万用表检查晶体管	26
(一) 检查穿透电流 I_{ceo} 的大小	26
(二) 检查电流放大系数 β 的大小	26
(三) 三极管管脚的辨别	27
小 结	28
第三章 低频放大器	29
第一节 单管低频放大器	30
(一) 工作原理	30
(二) 分析放大电路的图解法	33

	(三) 电路参数对放大器性能的影响	41
	(四) 偏流稳定电路	48
	小结	52
第二节	多级放大电路	53
	(一) 两级阻容放大电路	53
	(二) 放大器的输入电阻与输出电阻	55
	(三) 射极输出器	57
	(四) 阻容耦合放大器	60
	(五) 变压器耦合放大器	65
	小结	70
	(六) 放大器的调整 and 测试	71
	(七) 放大器的噪声与振荡	74
第四章	直流放大器	78
第一节	直接耦合放大器	79
	(一) 耦合方式	79
	(二) 零点漂移问题	81
第二节	差动放大器	83
	(一) 对称式差动放大器	83
	(二) 单端式差动放大器	86
	小 结	88
第五章	LC 振荡器	89
第一节	自激振荡	89
	(一) 放大器的自激振荡	89
	(二) 正弦波振荡的条件	90
第二节	LC 振荡器的原理	91
	(一) 分析振荡电路的方法	91
	(二) LC 并联回路的选频特性	92
	(三) LC 振荡器的分析	93
第三节	几种典型的 LC 振荡器	94
	(一) 变压器反馈的振荡电路	95
	(二) 电感反馈的振荡电路	97
	(三) 电容反馈的振荡电路	99
	小 结	101
第六章	脉冲电路	102
第一节	脉冲电路的基础	103
	(一) 什么是电脉冲	103
	(二) 晶体管的开关特性	103

	(三) RC 电路的充放电过程	106
第二节	门电路	109
	(一) 二极管与门	110
	(二) 二极管或门	111
	(三) 晶体管反相器(非门)	113
	(四) 带有反相器的门电路	115
第三节	双稳态触发器	117
	(一) 双稳态触发器电路的组成	117
	(二) 维持稳定状态的条件	119
	(三) 触发器电路的触发	121
	(四) 双稳态触发器电路的一些问题	127
	(五) 脉冲计数器	127
	小结	130
第四节	单稳态触发器	131
	(一) 单稳态触发器的用途和特点	131
	(二) 电路的组成	132
	(三) 电路的工作原理	133
	(四) 输出脉冲的主要指标	136
	小结	139
第五节	多谐振荡器	139
	(一) 多谐振荡器的工作原理	140
	(二) 多谐振荡器的振荡周期	143
	(三) 消除因过饱和而不振的改进电路	144
	小结	145

毛主席语录

人们为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然里得到自由。

第一章 晶体二极管及整流电路

使用交流电有很多优点，所以一般发电厂供给的几乎全是交流电。然而电解、电镀、电子仪器、蓄电池充电等却一定要用直流电。如何把交流电转变成直流电？在老式设备中是用直流发电机，它的缺点是体积大，结构复杂，维护使用很不方便，要消耗大量有色金属。目前，在工矿企业中广泛使用的是利用晶体二极管做成整流器，将电网供给的交流电转变成直流电。

整流器为什么能使交流电变为直流电呢？这首先要从晶体二极管的单向导电性能谈起。

第一节 晶体二极管

我们用晶体二极管（即半导体二极管）做图 1—1 的实验，就是在电源和灯泡回路中串接一个二极管。可以发现，当电源正端与二极管某一端相接时，灯亮；把二极管反向，灯就不亮。

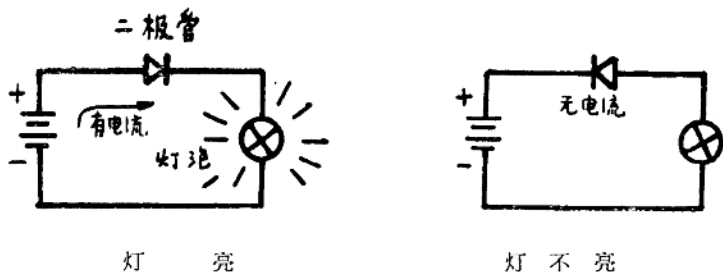


图 1—1

这说明晶体二极管有一种特别的性能，只允许电流从一个方向通过，反之则不能通过，这种特性称为单向导电性。晶体二极管为什么会有单向导电性呢？毛主席教导我

们：“外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。”为了弄明白晶体二极管为什么具有单向导电性能，必须了解一下晶体二极管的特点。

(一) p 型半导体、n 型半导体、p—n 结的伏安特性

1. 什么叫半导体

在实践中，我们知道电线中的铜线或铝线是能够导电的，而铜线外面包着的一层橡皮或塑料是不导电的，可见物体的导电能力是不同的。容易导电的物体，我们通称为导体；反之，不容易导电的物体，我们称为绝缘体。除了导体和绝缘体外，还存在着一大类物体，它们的导电性能介于导体和绝缘体之间，我们把这类物体叫做半导体。半导体的种类非常多，象锗、硅、硒以及大多数金属的氧化物（例如氧化亚铜）等都是半导体。

既然半导体既不能做导体，又不能做绝缘体，我们为什么这样重视它呢？因为它有一种特殊的性能，即如果在纯净的半导体中，适当地掺入极微量的外加杂质，那么半导体的导电能力就会有上百万倍的增加，这种半导体我们称为杂质半导体。正因为半导体具有这种独特的性能，我们可以利用掺杂质的方法，有意识地在半导体中加入不同种类和不同数量的杂质，制造出不同性质、不同用途的多种多样的半导体材料。

加到半导体中的杂质可以分成两种类型。一种杂质加到半导体中去后，在半导体中会产生许多带负电的电子，这种半导体叫做电子型半导体（或叫 n 型半导体）；另一种杂质加到半导体中会产生许多缺少电子的空位（空穴，带正电），这种半导体叫做空穴型半导体（或叫 p 型半导体）。

对于锗和硅半导体来说，加入杂质砷、磷和砷等元素，就成为 n 型半导体；如果加入杂质镉、铝和硼等元素，则成为 p 型半导体。

2. $p-n$ 结

如果使一块完整的半导体的一部分是 n 型的，另一部分是 p 型的，如图 1—2 所示，这时在 p 型和 n 型半导体的交界处就会形成一个称做 $p-n$ 结的特殊薄层。

$p-n$ 结有一个特别的性能，就是对于电流有单方向的导电性。 $p-n$ 结为什么会有单向导电性呢？如果我们将 $p-n$ 结中的 p 型半导体部分连接到电池的正极， n 型半导体部分连接到电池的负极，这种外加电源的极性促使 p 型半导体中的空穴（带正电）向 n 型运动， n 型中的电子（带负电）向 p 型运动，这样就形成了比较大的电流，

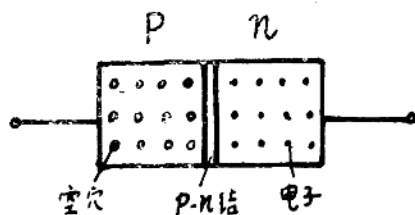
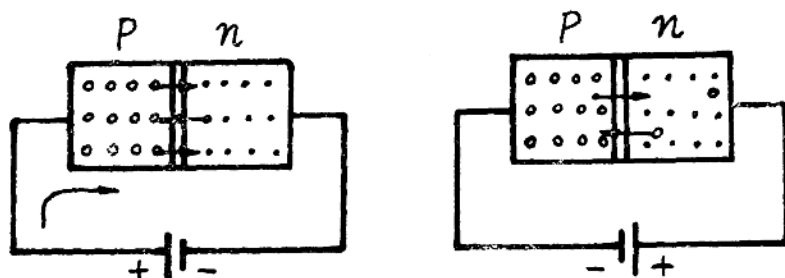


图 1—2

如图 1—3 所示。这个电流通常称为正向电流，电源极性的这种接法称为正向接法。如果电源极性相反，则外加电源将阻止 p 型中的空穴和 n 型中的电子向对方运动。但是，反向接法时电流是否一点也没有呢？不是的。我们必须注意到， p 型半导体中除

了空穴（这是大量的）以外，由于热运动的原因也存在极少量的电子；同样在 n 型半导体中也存在极少量的空穴。在反向接法时（ p 型接电源负极， n 型接正极），外加电源的极性促使这些极少量的电子和空穴运动，就形成了微弱的反向电流，见图 1—3(b)。由于 p 型中极少量的电子和 n 型中极少量的空穴是热运动产生的，所以反向电流的大小主要取决于温度，而且随着温度的变化而急剧变化。



(a) 正向接法，电流很大，

(b) 反向接法，电流极小

图 1—3

3. $p-n$ 结的伏安特性

为了进一步弄清 $p-n$ 结的单向导电性能，我们在 $p-n$ 结的两端加不同的电压，然后测量流过 $p-n$ 结的电流，把电压和电流之间的关系画成曲线，我们称之为 $p-n$ 结的伏安特性。典型曲线如图 1—4 那种形状，横坐标表示所加电压的大小，纵

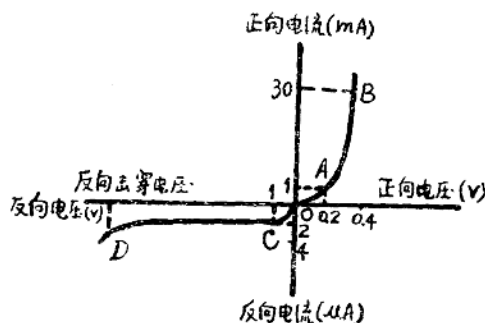


图 1—4

坐标表示流过 $p-n$ 结的电流的大小。

当 $p-n$ 结两端不加电压时，流经 $p-n$ 结的电流也为零，在图上就是横坐标和纵坐标的交点 O 点。

当 $p-n$ 结正向连接时（ p 型部分接电压的正端， n 型部分接电压的负端），开始，随着 $p-n$ 结两端电压的逐渐增加，流经 $p-n$ 的电流也慢慢增加，如图上的 OA 段。当正向电压超过一定值（例如 0.2 V ）时，正向电流随着正向电压的增加就非

常快，如图上的 AB 段。

当 $p-n$ 结反向连接时（ p 型部分接电压负端， n 型部分接电压正端），开始，随着加在 $p-n$ 结上的反向电压的增加，反向电流也略有增加，如图上的 OC 段。但当反向电压继续增加时，反向电流几乎保持不变，这个电流称为反向饱和电流，如图上的 CD 段（反向电流比较小，图 1—4 中反向电流是微安量级，而正向电流是毫安量级）。当反向电压增加到一定数值时，反向电流会很快增加，这表示 $p-n$ 结已经被击穿了（也即丧失了单向导电性），这个电压叫做反向击穿电压。

从上面可以知道， $p-n$ 结的单方向导电不是绝对的，只是正方向容易导电，而反方向不容易导电。而且当反向电压超过一定值（反向击穿电压）时， $p-n$ 结被击穿，反方向也就从不容易导电转化为容易导电了。

从伏安特性上可以看到，当 $p-n$ 结在正向接法时，它的压降很小（为零点几 V ），而电流较大（几十 ma 或几 a ），所以，若把 $p-n$ 结看成一个电阻，则正向时，它的电阻很小，一般为几 Ω 到几百 Ω ；而当 $p-n$ 结在反向接法时，所加电压较大（几 V 到几十 V ），而电流很小（几个 μa 或更小），所以它的电阻很大，一般为几百 $K\Omega$ 至几 $M\Omega$ 。

（二）晶体二极管的特性和参数

晶体二极管就是由一个 $p-n$ 结，加上相应的电极引线和管壳做成的。我们采用符号 $\circ-\triangleright-\circ$ 来表示。其左端是正极（即 p 型半导体引出线），右端是负极（即 n 型半导体引出线）。

常见的晶体二极管的外形有如图 1—5 所示的几种。

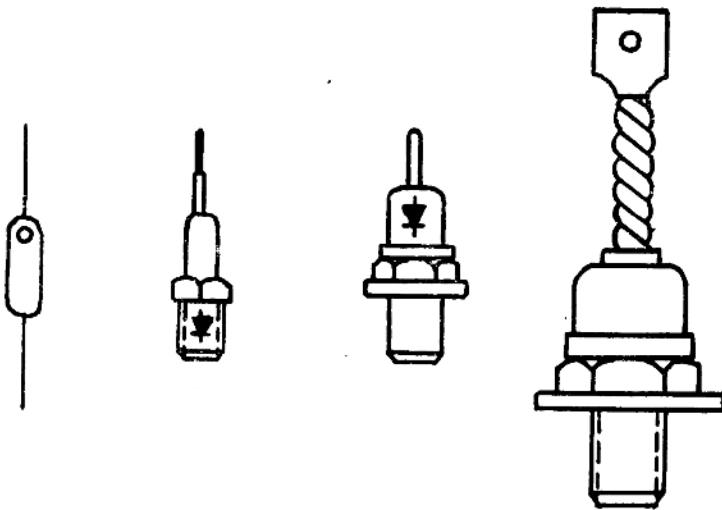


图 1—5

根据不同的结构、材料、用途等等，晶体二极管可分成许多类型。
根据结构不同可以分成点接触型和面接触型两种，如图 1—6 所示

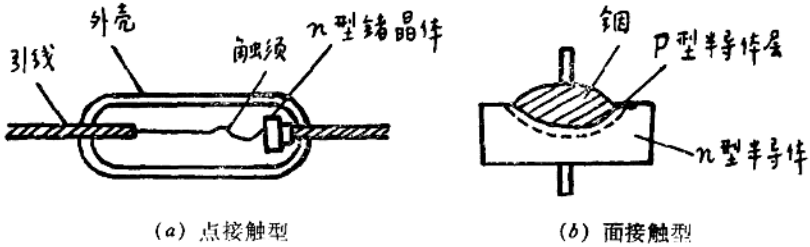


图 1—6

点接触型由于接触点小，不能通过大的电流，但正因为接触点小，所以电容小，可用于高频检波和计算机里的开关元件。面接触型则相反，由于接触面大，可以通过较大的电流，但它的电容大，因此不能用于高频线路中。

根据半导体材料不同，可分为锗二极管、硅二极管及硒片、氧化铜等等。

对于不同材料、不同结构和不同工艺做成的晶体二极管，伏安特性各有差异，但伏安特性的基本形状是相似的。

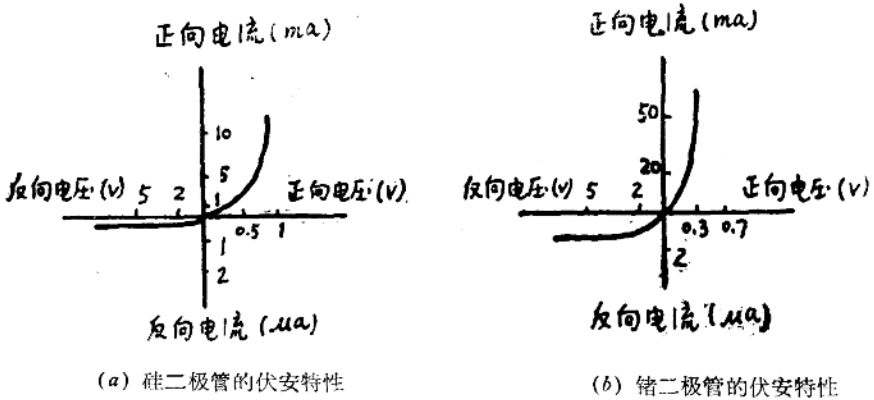


图 1—7

图 1—7 是某小功率硅和锗晶体二极管的伏安特性曲线。从曲线可以看出，锗二极管正向电流上升很快，对应于曲线转折点的正向电压值要比硅二极管来得小。前者约 0.3V，后者约 0.6V。但锗二极管的反向电流比硅二极管要大得多（几十倍以至几百倍）。

晶体二极管的主要参数有下列两个：

1. 最大整流电流：长期运行时晶体二极管能通过的最大正向电流值。因为电流通过晶体二极管要发热，所以不能太大，否则要损坏。

对于大功率的晶体二极管，为了降低它的温度，以便提高最大整流电流，要在电极上装上散热片，散热片的尺寸有一定的规定。在使用时不可忘记装上，以防止二极管过热而烧坏。此外，还可采用风冷、水冷和油冷等，以达到散热的目的。

2. 最大反向电压：若加在二极管上的反向电压超过此值，就有击穿的危险。反向击穿的二极管就失去了单向导电性。

晶体二极管的寿命很长，一般可达十万小时以上。但是如果我们使用不当，就可能很快损坏。“要节约闹革命”，我们就必须掌握晶体二极管的参数，以便既经济又安全地使用它。

(三) 晶体二极管的识别和简易测试

利用普通的万用表可以测定晶体二极管哪一端是它的正极，哪一端是负极，并粗略地测出二极管的正反向电阻值。二极管正向容易导电，所以电阻小；反向不容易导电，所以电阻很大。这两个阻值相差越大越好。若二者差不多，则表明这个二极管性能不好或完全坏了。

测量的方法是先把万用表拨到“欧姆挡” ($R \times 100$ 或 $R \times 1000$)，然后用两个表笔分别正反向测二极管的两端，如图 1—8 所示，由表上读出两个阻值，一个大，一个小。小的就是晶体二极管的正向电阻，大的就是二极管的反向电阻。一般小功率晶体二极管的正向电阻约几百 Ω ，反向电阻约几十 $K\Omega$ ，大功率管的电阻相应要小得多。

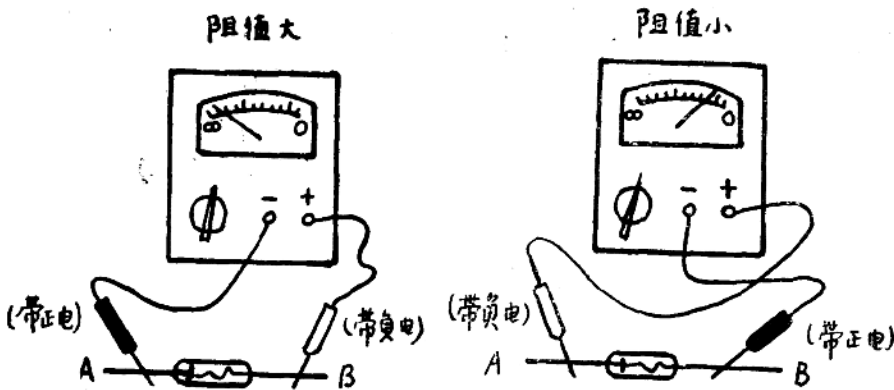


图 1—8

普通万用表在电阻挡时负的表笔带正电，正的表笔带负电，所以由图 1—8 可以判断出二极管 A 端是负极，B 端是正极。

第二节 单相整流电路

我们已经知道了晶体二极管的单向导电性能，但是究竟怎样利用晶体二极管使交流电变为直流电呢？本节我们就要讨论由晶体二极管组成的整流电路。

(一) 单相半波整流电路

整流电路的关键元件是具有单向导电性能的晶体二极管 D ；因为负载所要求的直流电压的大小是多种多样的，而通常电网供给的电压是 $\sim 380V$ 或 $\sim 220V$ ，因此需要有变压器 B 将电网电压转变为合适的电压；整流所得的直流电供给负载（某一电气设备），我们用电阻 $R_{\text{负}}$ 来表示负载。所以单相半波整流电路如图 1—9 所示。其中电源 e_1 由电网取得，是一个 50 周的按正弦规律变化的交流电压 $e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$ 。经过变压器以后，次级电压 e_2 变化规律和初级电压 e_1 一样，但大小不同（根据负载的需要来

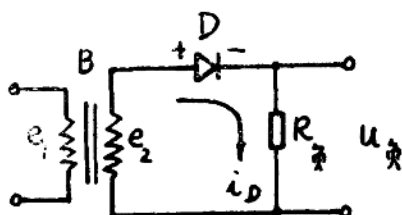


图 1—9

确定)， $e_2 = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t$ 。其中 E_2 是次级电压的有效值， $\sqrt{2} E_2$ 是次级电压的最大值， $\sin \omega t$ 表示按正弦规律变化。

整流电路的工作原理见图 1—10。

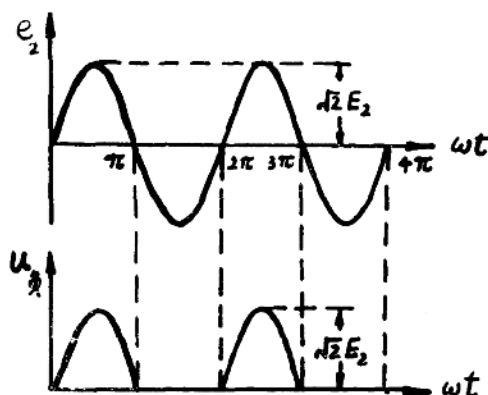


图 1—10

在 $0-\pi$ 时间内，变压器次级电压为正，二极管 D 的正极接电源的正端，它的负极接电源的负端，即 D 受正向电压，所以导通，有电流 i_D 流过二极管 D 和负载电阻 $R_{\text{负}}$ 。由于在正向导通时二极管 D 两端的电压很小（零点几 V ），所以负载电压