



晶体管线路基础

复旦大学四一公社
工人学员教材编写组编

1970.7.1

PDG

作者的话

在偉大領袖毛主席关于“走上海机床厂从工人中培养技术人员的道路。”的光輝指示指引下，我們一百另八名战斗在祖国各地的不同工种的工人，来到复旦大学，参加了“四·一”公社第二期工人电子技术短训班的学习。我們工人能够进大学全靠偉大領袖毛主席，我們工人能够进大学是战无不胜的毛泽东思想的偉大胜利，是毛主席革命路綫的偉大胜利。

‘毛主席为我們撑腰，我們要为毛主席爭光，’在駐校工宣队的直接领导下，我們以阶级斗争为主課，以毛主席关于“教育必須为无产阶级政治服务，必須同生产劳动相結合。”的方針为綱，用革命大批判开路，狠批反革命修正主义教育路綫，以专用数字电子计算机为典型教材，采取了“官教兵、兵教官、兵教兵”的教学原則，一边教学，一边生产，发揚“一不怕苦，二不怕死”的革命精神，经过半年的辛勤实践，胜利地完成了这一光荣的学习任务，成功地制造了28台供《綫切割机》专用的数字电子计算机。这是无产阶级文化大革命的又一丰硕成果，是毛主席无产阶级革命路綫的又一偉大胜利。

电子工业是现代工业的基础。大力发展电子工业，广泛应用电子技术，是把我国建设成为强大的社会主义国家的需要。用电子技术武装工人群众，向工人群众普及电子技术知識，是把我国电子工业提高到一个新水平的重要条件。对于这一点，我們参加内地建设的工人，更是深刻地感到普及电子技术的迫切需要以及它深远的政治意义。

“教材要彻底改革。”半年来的教育革命实践，便我們对偉大領袖毛主席的这一光輝指示有了更深刻的理介。特别是通过“一打三反”的阶级斗争，使我們进一步認識了教育革命与巩固政权的关系，从而增强了把无产阶级教育革命进行到底的决心。为此我們在工宣队的领导下，自寬地成立了教材编写組，把我們的学习体会結合兄弟单位的先进經驗，大搞群众运动，編写了这本关于电子技术的基础教材——晶体管綫路基础，供战斗在“抓革命促生产，”

第一线的工人师傅学习。同时也为今后大学的教材提供了素材。但是，由于我们对毛主席著作学得不够，编出来的教材一定会有错误和不足之处，希望工人师傅在学习过程中向我们提出批评和改正的意见。

在伟大的中国共产党诞生四十九周年到来之际，我们赶编了这本教材，谨向伟大领袖毛主席汇报我们的学习成绩，向党的生日“七一”献礼。

复旦大学“四、一”公社工人学员教材
编写组 1970. 6. 29.

目 录

第一章 晶体二极管	1
§1. 晶体二极管的单向导电性	2
§2. 晶体二极管的基本原理	4
一、 半导体	4
二、 杂质半导体	7
三、 PN 结	8
§3. 晶体二极管的基本参数	11
一、 二极管的伏安特性曲线	11
二、 二极管的主要参数	12
三、 二极管的分类	13
第二章 晶体三极管	14
§1. 晶体三极管的工作原理	15
一、 晶体三极管的结构特点	15
二、 晶体三极管的放大原理	16
三、 共基极电路	18
四、 共发射极电路	19
§2. 晶体三极管的特性曲线	21
§3. 晶体三极管的主要参数	24
一、 晶体三极管的放大特性参数	24
二、 集电极反向饱和电流 I_{CBO} 和穿透电流 I_{CEO}	25
三、 晶体三极管的频率特性	26
四、 晶体三极管的极限参数	26
§4. 晶体三极管的简易测量	27
一、 测试前要注意事项	27
二、 用万用表识别晶体管三个管脚及 PNP 与 NPN 的判别	27
三、 用万用表判断管子的性能	28

第三章	晶体管放大器	30
§1.	晶体管基本放大器的试验	30
一、	测定晶体管的 β	30
二、	放大倍数	30
§2.	晶体管功率放大器	37
一、	单管电阻负载功率放大器	37
二、	单管变压器耦合功率放大器	40
三、	双管推挽电路——推挽功率放大器	43
§3.	晶体管多级放大器	45
一、	阻容放大器	45
二、	变压器耦合放大器	47
§4.	晶体管直流放大器	48
一、	直流放大器的特殊问题	48
二、	级间耦合的方法	49
三、	零点漂移的克服——分差放大器的工作特性	52
第四章	晶体管脉冲技术基础	56
§1.	简单惰性电路的暂态特性	59
一、	$R-C$ 电路	59
二、	暂态过程的宽度和时间常数的关系	61
三、	$R-C$ 电路的特点	62
四、	微分电路	62
五、	箝位电路	64
§2.	晶体管的开关工作特性	68
一、	晶体管的工作状态	68
二、	晶体管的开关工作过程	69
§3.	双稳态触发电路	75
一、	基本电路及工作原理	75
二、	触发器的静态分析	78
三、	加速电容的应用	81

四、	双稳态触发器的計算	82
五、	常用双稳态触发电路实例	89
§4.	单稳态触发电路	94
一、	基本电路及工作原理	94
二、	单稳态触发电路設計实例	99
§5.	多諧振盪器	103
一、	基本电路及工作原理	103
二、	自激多諧振盪电路設計	109
§6.	鋸齿波发生器	111
一、	什么是鋸齿波?	111
二、	产生鋸齿波的基本原則	111
三、	鋸齿电路构成	112
第五章	晶体管綫路的直流电流和稳压原理	116
§1.	整流技术	116
一、	交流电	116
二、	单相半波整流	119
三、	单相全波整流	121
四、	单相桥式整流	122
五、	滤波器	124
六、	三相电源	128
七、	三相整流电源	130
八、	倍压整流电路	136
§2.	参数稳压器的稳压原理	139
一、	硅稳压管	139
二、	硅稳压管的稳压原理	141
三、	参数稳压器的設計	141
§3.	电子稳压器的工作原理	144
一、	稳定电路	145
二、	輔助电源	154

三、	保护电路	154
四、	电子稳压器的晶体管散热问题	157
五、	设计举例与常见的几种稳压电源	159
六、	串联式稳压电源的调正	168
第六章	高频技术初步	174
§1.	电蚀加工的基本原理	174
§2.	高频脉冲发生器	176
一、	高频脉冲发生器的原理	176
二、	脉冲发生器的技术指标	176
三、	晶体管高频电源电路	177

第一章 晶体二极管

引言：

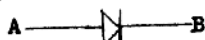
晶体管线路是近代发展起来的一門先进技术，它是促进国民经济发展、加强国防、巩固无产阶级专政、支援世界革命的一种有用的工具。偉大領袖毛主席教导我們說：“我們不能走世界各国技术发展^所的老路，跟在別人后面一步一步地爬行。我們必須打破常規，尽量采用先进技术，在一个不太长的时期內，把我国建設成为一个社会主义的現代化的强国。”偉大領袖毛主席还号召我們說：“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。”所以我們工人階級掌握這一門新技术並不是單純地打一場技术仗而更重要的是落实偉大領袖毛主席战斗号令的一場政治仗。當我們在前进的道路上遇到各种各样困难的时候，我們要高举毛澤东思想偉大紅旗，以一不怕苦，二不怕死的彻底革命精神，“从战争中学习战争”、“下定决心，不怕牺牲，排除万难，去争取胜利。”胜利一定是属于我們的。

晶体二极管和晶体三极管是晶体管线路中二种最主要的元件，它和其他的无綫电元件——电阻、电容、电感等，有机地按一定的規律結合起来，就能够制造出符合我們需要的各种类型的电子线路和电子仪器，例如我們最熟悉的半导体收音机，就是二极管、三极管以及电阻、电容、电感等无綫电元件有机地結合起来的一种电子线路。

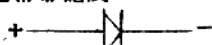
什么是晶体二极管呢？要了解晶体二极管，我們就必须从“它的性質、它和它以外事情的关联”讲起。

晶体二极管是二极管的一种，所以我們先應該了解什么是二极管，在我們的生活實踐中，我們对单向閥門是有經驗的，也就是說在一个水管中装了单向閥門，水就只能向一个方向流动。当水反方向流动时，閥門就会自动关上，呈现出极大的阻力。所謂二极管就是类似单向閥門一样的一种只允许电流向一个方向流动的电子元件，这种电流向一个方向流动的特性称为单向导电，所

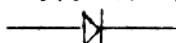
以二极管就是一种单向导电的电子元件，用下列記号表示：



也就是对一个二极管來說，电流只允许从A流向B，而当从B流向A时，就呈现出极大的电阻，但我們知道电流的方向是从正极到负极的，所以二极管的A端对应于电源的正极，而B端对应于电源的负极，所以通常都記成



但因二极管記号（箭头形）本身就帶有一定的方向性，所以在实际上都不再另外标記正、負号，而简单地記成

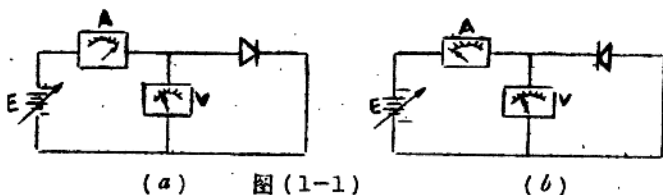


並且記号左面一端称为二极管的正极，而另一端称为二极管的负极。所以我們討論晶体二极管，（以下简称二极管）就得从二极管的单向导电性开始。

§ 1. 晶体二极管的单向导电性

偉大領袖毛主席教导我們說：“認識从实践开始”，要認識二极管的单向导电性，我們就得通过一定的实践，並且在做实验过程中，应注意“要看它的实质，而把它的現象只看作入門的向导，一进了門就要抓住它的实质”。

下面我們来做一个实验，把二个二极管分别以下列二种方式連接起来，下图(1-1)(a)称为順向連接图(1-1)(b)称为反向連接，並且图中的电源E是可变的，在順向連接的图(1-1)(a)



中只要稍微变动可变电源E（一般都小于1伏）就有很大的电流产生，这个电流的变化从电流表A中可以直接讀出。

但在相同的条件下,图(1-1) b 中的二极管由于是反向连接,所以从电流表 A 可以看出,在电路中几乎没有电流流过,即使 R 变得很大,电流还是很小,很小,(一般小于 $1\mu A$)。

相同条件下的二种不同结果就是由于二极管的单向导电性所造成。即当二极管顺向连接时就有电流通过,当反向连接时就没有电流通过。

通过这个实验,我们就可以理解什么是二极管的单向导电性了。但当拿到一个二极管,要利用它的单向导电性时,就必须知道二极管的极性,在实践中,如何识别二极管的极性也是一个很重要的问题。通常我们都用万用表来识别二极管的极性和二极管的好坏,其基本原理也是利用二极管的单向导电性,当外加电压使二极管顺向连接时,在二极管中就有电流流过,也就是说,它的正向电阻比较小,一般在几百欧姆以下,而当外加电压使二极管反向连接时,就只有极少的电流流过,也就是说它的反向电阻很大,一般在几十 $K\Omega$ 到几百 $K\Omega$,我们知道万用表在测量电阻时其本身就是一个电源,所以我们可以用万用表来测量二极管的极性和好坏,但关键在于要知道万用表表棒的极性,实际上在万用表的内部,正表棒(红色)是接电池的负极,而负表棒(黑色)接电池的正极,这一点务必注意不要搞错。

一般测量二极管的正向电阻时,使用万用表的 $R \times 10$ 一档,因为用 $R \times 1$ 档来测时,流过二极管的电流太大,有时会损坏二极管,但测反向电阻时应使用万用表的 $R \times 1000$ 档,而不能使用 $R \times 10K$ 这一档,因为 $R \times 10K$ 这一档,表内使用的电池是 $+15V$,有时会损坏二极管。

如果用万用表测出正向电阻很大,说明二极管性能不好,或者已损坏,而测出的反向电阻很小时,也说明二极管性能不好,或者已击穿,一般二极管的反向电阻都在数百 $K\Omega$ 上。

二极管的实际形状是:



§ 2 晶体二极管的基本原理

在第一节中，我們通过实验等办法，对二极管的单向导电性有了比較直觀的認識，但仅仅这一点是很不够的，偉大領袖毛主席教导我們說：“我們的实践証明：感覺到了的东西，我們不能立刻理介它，只有理介了的东西才更深刻地感覺它。感覺只解決現象問題，理論才解決本質問題。” 所以我們要真正理解二极管，我們还必须进一步掌握关于二极管的基本理論。

晶体二极管，顧名思義是用晶体材料制成的电子元件，所謂晶体材料就是一种叫做半导体的物質，所以要了解二极管的基本理論，我們就得从討論半导体开始。

一、半导体

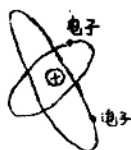
1. 原子的結構：

大家知道，物質是由原子构成的，隨着原子結構的不同，就形成各种各样不同的物質。

各种物質的原子結構虽然有差別，但是它們万变不离其宗，这个宗就是原子是由帶正电的原子核和帶負电的电子組成，我們知道正电和負电是互相矛盾的，且互相吸引。偉大領袖毛主席教导我們說：“在一定条件之下，矛盾的东西能够統一起来”，也就是說原子核和电子“在一定条件之下”可以“共处于一个統一体中”，这个一定条件，就是电子圍繞着原子核在自己軌道上的高速运动，这一点我們可以从地球和人造地球卫星的关系来想象原子的結構，地球吸引着地球人造卫星，为什么卫星不掉下来呢？这就是由于卫星在它自己的运动軌道上圍繞着地球做高速度的运动，它的运动情况如图(1-2)(a)所示。



图(1-2)(a)



图(1-2)(b)

所以我們把原子結構設想成類似地球和人造衛星的運動形式如圖(1-2)不過原子結構中電子繞原子核的運動是一層一層的，在同一層上同時有幾個電子在自己軌道上運動，所以原子結構的“模型”可以描述成更確切的形式。如圖(1-3)。



圖(1-3)

在每一個原子中，原子核所帶的正電量正好是帶負電荷的電子的個數，因此，在正常的情况下，原子是呈中性的，隨着外界條件的變化，離原子核較遠的軌道上的電子有可能“在一定條件下”離開原子核的吸引而脫離自己的軌道而自由運動，這時原子就少了一個電子，原子核的正電荷的數量就超過了帶負電荷的電子數量，于是就呈現出帶正電的狀態，而離開軌道的自由電子因其本身是帶負電荷的，所以呈現出帶負電的狀態。但是不是所有的原子中的電子會受外界條件的影響而離開自己的軌道的。當原子的最外層的電子個數是8個的時候，原子的電子就最穩定，（或者凡是在同一層的電子個數是2, 8, 18 時這些電子總是比較穩定的）幾乎沒有可能使電子脫離自己的軌道而自由運動。

2. 金屬為什麼能夠導電：

我們知道金屬材料的原子結構的最外層的電子個數一般只有1-3個，科學的實踐證明原子的最外層的電子是1-3個的時候，這些電子就顯得很不穩定，很容易成為自由的電子，這樣一來我們就不難想象這些帶負電的自由電子在外加電壓的作用下，它們就會朝着電壓的正極運動而產生電流，帶正電子的原子核就從電源負極那里補充負電荷，這樣循環往復，就不斷地有電流通過。這就是金屬為什麼能夠導電的基本道理。同金屬材料相比。

3. 什麼叫半導體：

那些原子中的電子最穩定的物質，在外加電壓的作用下是沒有任何電子流動的，這類物質就叫它絕緣體。相反地那些原子中最外層的電子不穩定的物質，只要有外界電壓就能有電流通過，這種物質就叫它導體。從上面的討論可以知道金屬材料就是最好

的导体，那些原子中的电子稳定程度介于绝缘体和导体之间的物质，我们就叫它半导体，也就是说，半导体的导电性能是介于绝缘体和导体之间，所以得半导体的名称。

4. 半导体的原子结构：

下面我们来分析半导体材料的原子结构，在自然界半导体元素很多，有硒、锗、硅等，其中锗是典型的半导体元素，我们以锗为例来说明为何在半导体物质内会产生电流和单向导电等性能的。在锗的原子结构中，原子核的周围有 32 个电子，这 32 个电子按一定的规律分成四层，电子在每一层上沿着自己的轨道

围绕原子核而作高速度的运动。锗原子的电子分布规律是从里往外数，第一层上有 2 个电子，依次为 2, 18, 4 个电子，即最外层的电子个数是 4 个（图 1-4）。为简单起见，我们把锗原子的结构简化成图（1-5）的形式，因为其他三层上的电子都是稳定的。图上 4 个电子是属于不稳定的

电子，这个最外层的电子叫做“价电子”。锗原子的 4 个价电子和其他 4 个

锗原子的价电子组成 4 个共价键如图（1-6），这样一来，在原子核的最外层就相当于有 8 个电子在围绕原子核而运动，于是这些电子就能够处于稳定的状态。



图 (1-4)



图 (1-5)

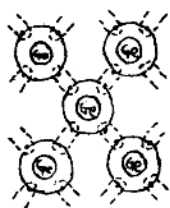


图 (1-6)

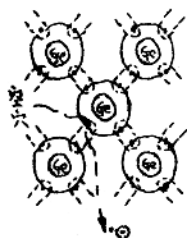


图 (1-7)

在温度相当低的时候，每个电子都坚固地連結着，很少有活动自由，这时晶体就不能导电。但当温度升高时，这些最外层的电子受热，而有可能获得足够的能量，会冲出共价键，脱离原子核的束缚，成为自由电子，如图(1-7)。在电场的作用下，这些自由电子可以参与导电，这种导电就叫做半导体的电子导电。由于这些电子跳出共价键，就使共价键留下了空位，而其他共价键上的电子就有可能跳到这个空位上来，使该电子所在的共价键出现了新的空位。这种空位移动的方向是和电子运动的方向相反的，所以就把它看作一个带正电荷的空位在运动。这种带正电荷的空位就称为“空穴”。在电场的作用下，它也可以参与导电，这就是半导体的空穴导电。所以在半导体中，参与导电的有空穴和电子二种。

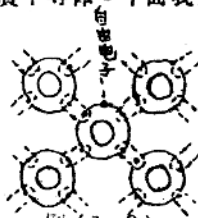
在上述晶体中自由电子和空穴是成对出现的，温度越高，自由电子、空穴的数目就越大。所以在半导体中温度越高，导电性能就越大。上述半导体都是纯粹的半导体，所以就在这种半导体称为本征半导体。实际上制造晶体管所用的半导体都掺入一定的杂质，这样可以大大地改善半导体的导电性能，掺有杂质的半导体称为杂质半导体。

二、杂质半导体

在本征半导体中掺有杂质就成为杂质半导体。其导电性能可以大大地改善。这是因为掺了杂质以后，参与导电的空穴或自由电子大大地增加了。如果在一种杂质半导体中电子比空穴多得多，我们就称这种杂质半导体为N型杂质半导体。如果空穴比电子多得多，我们就称这种杂质半导体为P型杂质半导体。下面我们具体地来分析。

1. N型杂质半导体：

在晶体里掺入一些五价元素砷(As)、锑(Sb)等。这种五价原子最外层有五个电子，这时它其中的四个电子便和周围四个硅原子的最外层

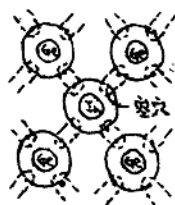


图(1-8)

的四个电子组成四对共价键。而第五个电子不受共价键的约束，成了自由运动的状态，即成为自由电子。如图(1-8)。在这种杂质半导体中有很多的自由电子，其数量比空穴多得多，这就是N型半导体，有时也称电子型半导体。

2. P型杂质半导体

若在锗晶体中掺入一些三价原子（如 I_n ）、镓（ G_a ）等，这种三价原子最外层有三个电子。这时晶体共价键的结构不完整，必定有一个空位，而形成“空穴”，如图(1-9)。



图(1-9)

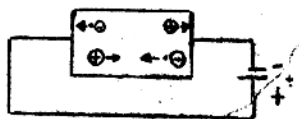
显然在这种杂质半导体中空穴是很多的，其数量比自由电子多得多，这就是P型半导体，有时也称空穴型晶体。

3. 漂移电流和扩散电流

我们讲了在半导体中参与导电的是电子和空穴。在形成电流时，半导体中电子和空穴有两种运动形式：

① 漂移运动：在半导体中加了一个电场，则电子向电场的正极运动，空穴向电场的负极运动，这叫漂移运动，这样形成的电流叫漂移电流。如图(1-10)。

② 扩散运动：在半导体中电子（或空穴）“浓度”分布不均匀时，那么电子（或空穴）就一定从“浓度”大的地方向“浓度”小的地方运动，直到“浓度”分布均匀为止。这种运动叫做扩散运动，这样形成的电流叫扩散电流。



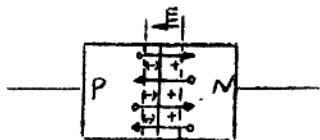
图(1-10)

三、PN结

1. 什么是PN结：

把一块N型半导体和一块P型半导体利用化学的方法紧密地联接在一起，我们将会产生怎样的现象？

前面已經講过，P型半导体中空穴比电子多得多，而N型半导体中电子比空穴多得多。当N型半导体和P型半导体紧密地联在一起的时候，P型中的空穴向N型中扩散，由于空穴向N型中扩散引起P型中缺少了空穴而带负电；同样N型中的电子向P型半导体中扩散，N型中由于缺少了电子而带正电。由于扩散的结果，在PN交界处建立起一个斥拒电场。如图(1-11)这个电场E的方向是N型正，P型负。



图(1-11)

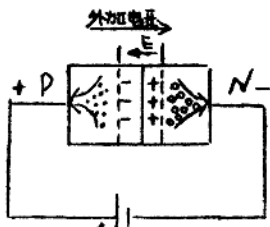
随着电子(或空穴)不断地运动，斥拒电场也就愈来愈强，阻碍了电子(或空穴)的继续运动，(因为这电场的作用力是阻止电子(或空穴)流动的)，最后电子(或空穴)便逐渐停止了运动，达到了相对的动态平衡状态，这时两种晶体的分界面上形成了一层“阻挡层”，P型和N型晶体的这样的结合就称为PN结。

2 PN结的单向导电性：

偉大領袖毛主席教导我們：“無論什么事物的运动都采取两种状态，相对地静止的状态和显著地变动的状态。两种状态的运动都是由事物内部包含的两个矛盾着的因素互相斗争所引起的”在PN结中，当没有外加电压时，扩散运动和漂移运动这二个矛盾着的因素相互斗争着达到相对的平衡。如果在外加电压的情况下，相对的平衡就破坏了，因而便转化为显著地变动的状态。

如果在PN结上加一个电压使PN结的P端接正、N端接负，这个外加电压和PN结电场正好相反，削弱了“阻挡层”的斥拒电压这样接法称PN结正向连接。如图(1-12)这相当于电阻减少，就使电子(或空穴)的扩散运动大大加强。偉大領袖毛主席教导我們：

“事物的性质主要地是由取得支配



图(1-12)

地位的矛盾的主要方面所规定的。” 这时电路里有很大的电流流过，这电流是起主要作用的扩散电流所决定的。当外加电压越大，PN 结电场就削弱得越大，相当于电阻越小，电路中的电流就越大。这就是 PN 结的正向电流。

如果在 PN 结上加一个电压，使 P 端接负，N 端接正，这个电压和 PN 结电场 E 方向相同，所以起着加强 PN 结的阻挡层的作用，也可以理解为加大了 PN 结的电阻。

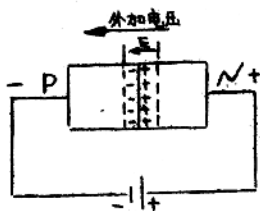


图 (1-13)

如图 (1-13) 这种接法称 PN 结反向连接。在这种情况下，漂移运动大大加强，“取得支配地位的矛盾的主要方面起了变化，事物的性质也就随着起变化。” 这时 PN 结中起支配地位的是漂移电流。这个电流很小，称为 PN 结的反向电流。

3. PN 结为什么会被击穿：

以上在 PN 结两端加不同电压的情况同第一节我们讲的二极管的单向导电性一样。实质上一个 PN 结就构成了一个二极管。我们分析了二极管的 PN 结内部运动的变化规律，也就了解了二极管为什么有单向导电的性能。

我们知道二极管反向电压极大时会发生击穿，这是什么原因呢？因为当在 PN 结二端加上极大的反向电压时，漂移的电子（或空穴）在这极大的电压作用下，得到加速，会引起破坏共价键，产生新的电子和空穴，新的电子和空穴在极大的反向电压作用下加速运动，又会破坏其他共价键，……如此下去使 PN 结内电子和空穴急剧增加，产生了很大的反向电流，这种恶性循环的结果就把二极管击穿。这时的反向电压叫做二极管的反向击穿电压。

另外我们知道，半导体随着温度的上升，空穴和电子就成对地增加，导电性能就越强。对一个二极管来说，当温度上升时，在 PN 结中空穴和电子也同样成对地增加，相对地，反向电流也