

工业技术知识小丛书

# 晶体管问答

[英] 克莱门特·布朗 著

柯朴方锦 编译

科学普及出版社

## 内 容 提 要

晶体管在电子学领域占据着主导地位,被大量地应用于收音机、电视机、录音机及其它家用电子设备、计算机、仪器、工业控制设备、数据处理设备、航空及航海导航与通信设备、远程通信系统等等。小小的半导体器件具有如此广泛的应用,引起了人们的极大兴趣。这本小册子用问答的形式,生动地向读者介绍了晶体管的基本特性、工作原理和功能,并概括地介绍了晶体管的许多用途。此外,本书还介绍了利用半导体材料制成的有关器件,其中有很多常与晶体管配合使用。

本书可供各行各业的技术人员、工人及大中学校的学生阅读,也可做技工学校、职业学校的教学参考书。

Questions & Answers

Transistors

Clement Brown

Newnes Technical Books 1978.

工业技术知识小丛书

晶体管问答

[英] 克莱门特·布朗 著

柯 朴 方 锦 编译

责任编辑:朱桂兰

科学普及出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
北京怀柔孙史山印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 3 字数: 65千字

1984年5月第1版 1984年5月第1次印刷

印数: 1—45,000册 定价: 0.31元

统一书号: 15051·1095 本社书号: 0784

## 序 言

近几年来，“晶体管”这个词已经家喻户晓。在英国，人们常常把便携式晶体管收音机简称为“晶体管”。这种称呼虽然人人都懂，但却是不正确的。现在，晶体管在电子学领域已经占据主导地位，被大量地应用于无线电收音机和其它家用电子设备、计算机、仪器、工业控制设备、数据处理设备、航空及航海导航与通信设备、远程通信系统等等。小小的半导体器件具有如此广泛的应用，这引起了人们的极大兴趣。这本小册子的目的，是说明晶体管的基本特性、工作原理和功能，并概括地介绍了晶体管的许多用途。

利用半导体材料的电特性，可以制造出很多种器件，晶体管只是其中的一种。因此，本书除了讲解晶体管之外，还介绍了一些有关的器件，它们当中有很多常与晶体管配合使用。

在编写本书过程中，承蒙布罗什 (Brush) 电气工程公司、爱厄雷德 (Ever Ready) 公司、赫尔德-布朗 (Hird-Brown) 公司、国际商用机器公司英国分公司、M. E. L 设备公司、马拉德 (Mullard) 公司和纽玛凯特 (Newmarket) 晶体管公司为本书提供了许多宝贵的资料。对于他们给予的合作，作者谨在此表示谢意。

本书中图55~57取自《实用电子学》一书，谨向该书作者致谢。

克莱门特·布朗

# 目 录

## 序 言

|                    |    |
|--------------------|----|
| 一、半导体.....         | 1  |
| 二、晶体管.....         | 11 |
| 三、基本的晶体管电路.....    | 23 |
| 四、晶体管在无线电中的应用..... | 29 |
| 五、其它半导体器件.....     | 54 |
| 六、晶体管的工业应用.....    | 63 |
| 七、半导体器件的其它用途.....  | 79 |
| 八、晶体管设备的维修.....    | 90 |

## 一、半 导 体

### 什么是晶体管？

在电子电路中，晶体管这种器件能起放大电信号的作用，除此以外它还能完成许多其它功能。虽然晶体管不能直接代替电子管，但是它能完成从前电子管所执行的大多数任务，并且还有许许多多的新发展，这些，对于电子管来说简直是鞭长莫及。

晶体管是用半导体材料制成的。最简单和最常用的晶体管，它的构造就象夹心面包一样，是由三层半导体材料组成的。把这样的组件固定在管壳内，再接上引线，就做成了只晶体管。晶体管比电子管小得多，图1将这两种器件的尺寸进行了比较。

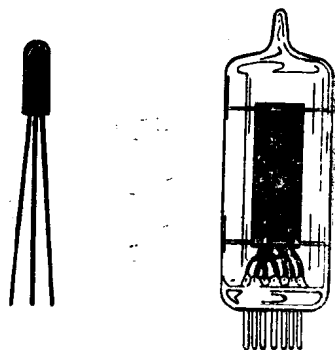


图 1 典型的小信号晶体管和电子管的比较。这两个器件具有相似的功能

### 试说明半导体的性质？

许多材料，其性质介于导体和绝缘体之间，可归入半导

体这一类。大多数金属是很容易导电的，这是因为在这些材料中含有大量的自由电子。电子带负电荷，它们在电压的作用下运动，起着载流子的作用。反之，在绝缘体加上电压以后，绝缘体（如云母或用于电器中的塑料）中几乎不存在能够自由运动的电子，所以没有电流；即使有电流，也非常微小。

自由电子的存在，取决于材料的原子结构、原子的相对位置 and 温度。在这里，有一点十分重要，那就是少数“外来的”原子能够影响某些材料的电特性（我们所指的材料就是半导体）。目前，制造晶体管最重要的半导体材料，是锗和硅。一般说来，当温度升高时，半导体更容易导电，但是良导体（例如铜）则相反，当温度升高时，导电性能变坏。

### 锗是怎样成为半导体的？

锗是一种金属元素，它象所有的半导体一样呈结晶状，

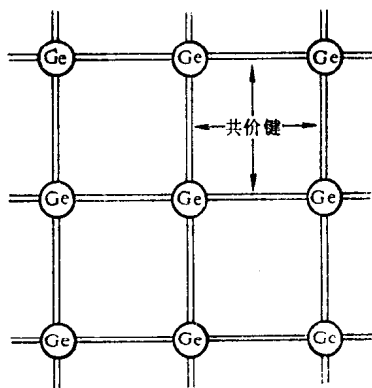


图 2 在温度为绝对零度时锗的晶格结构，相邻原子之间形成共价键

原子按照一定的形式——晶格排列着。由于这种晶格结构，使材料在某些方向上比其它方向更容易断裂，就象钻石在某些特定方向上能够切割一样。为了简单起见，我们将理想的晶格画在二维平面上，如图 2 所示。

锗原子有32个电

子。其中，外层电子有 4 个，它们可以形成化学键或价键。这些电子叫做价电子，它们所受到的原子束缚作用，比内层电子小得多。在锗的晶体结构中，这些价电子与相邻原子的价电子形成共价键，如图 2 所示。每个原子与四个相邻的原子都是等距离的，每个价电子与相邻原子的一个价电子形成一对，即共价键。

但是，晶格上有时也会出现缺陷。例如，当一个电子脱离共价键时，带走了一个电荷，便造成缺陷；再比如，当一块锗晶体中有一个锗原子被另一元素的原子所代替（通常称为掺杂）时，也会造成缺陷。还有，在绝对零度（ $-273^{\circ}\text{C}$ ）下，理想晶体中所有的键都是完好无缺的，然而当温度上升时，一些共价键上的电子就得到足够的能量而脱离键，因此在键上就留下了空位，这就是通常所说的空穴。这种情形如图 3 所示。一个电子带有一个负电荷，而一个空穴则代表一个正电荷。

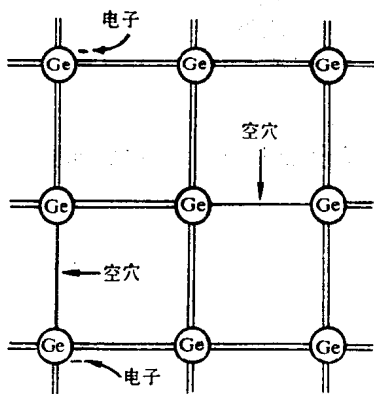


图 3 在室温下锗的晶格，表明在通常温度下，在晶体结构中存在自由电子和空穴

对于纯锗来说，空穴和电子的数目是相等的。为了改变这种状态，可以采用掺杂的办法。在控制掺杂的条件下，能够获得较高的电导率，并且维持了原来的晶格排列。

如果掺入的原子含有 5 个价电子（例如锑），那么就可



格中，这时就留下一个空穴，如图 5 所示。这个空穴能够俘获经过它附近的电子，从而造成另一个空穴；这新形成的空穴又会被另一个电子所填充。于是就形成了一种正电荷载流子连续流动的过程。三价杂质原子称为受主，这是因为它们接受一个电子来填充这个空穴。这样的杂质，叫做p型杂质。英文“p”代表“正”的意思。掺入受主杂质的锗，称为p型锗。

最后要告诉大家，除了用掺入一定杂质的方法能获得电荷载流子以外，用电离的办法（例如借助热或光的效应）也能使电子释放出来。

### 什么叫整流二极管？

如果在p-n结上加一交流电压，那么，p-n结对电流的阻力就时而强些，过一段时间又弱些，如此强、弱、强、弱地循环变化下去。换句话说，p-n结对电流的阻力取决于外加电压的量值和极性。这样，我们就得到了整流作用。起这种作用的二极管，称为结型二极管或整流二极管。请注意，所谓p-n结，就是一块晶体中p型区和n型区之间界面附近的区域。

在某些情况下，也采用点接触型半导体二极管。半导体中的电荷载流子向表面集中，于是电子所在的表面区域，和施主原子的邻近区域形成一个势垒，就象上述p-n结势垒一样。点接触二极管是用一条很细的、头部腐蚀成尖端的金属触丝压在光洁的半导体晶片表面上，通以短时间的强脉冲电流而制成的。这种二极管有两根引线，一根就是上述触丝，另一根接在锗的基体上。在两根引线上加交流电压，就会产生整流作用。点接触具有增强电场的作用，从而使电流增大。

## 正向偏置和反向偏置是什么意思？

如果将直流电压加在p-n结上，象图6(a)所示那样，p区为负、n区为正。我们就说，这个结叫做反偏（反向偏置）结。这时，通过结的载流子受到阻滞。反之，如果把电压的极性变更一下，即n区为负、p区为正，如图6(b)所示，我们就说，这个结是正偏（正向偏置）结。这时，通过结的载流子将增加。

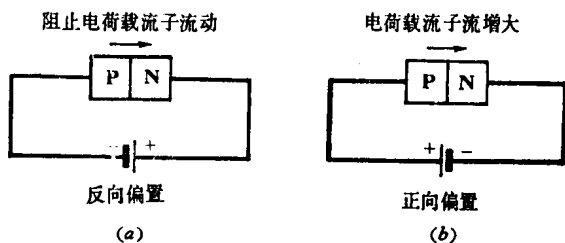


图 6 半导体p-n结的反向偏置(a)和正向偏置(b)

## “固态”一词表示什么意义？

“固态”这个词是个术语，它包括半导体二极管、晶体管 and 所有半导体器件，以及使用这些器件的装置。正如本章所介绍的那样，固态器件是依赖分子结构中电子键的相互作用而工作的；当然，这里说的分子结构是指的固体。相反，电子管是热电子（离子）器件，在这种器件中，自由电子是在真空中或在气体中运动。

## 锗是怎样得到的？

锗有两个完全不同的来源。一种方法，是燃烧含有0.02%

锗元素的诺森姆勃运 (Northumbrian) 煤, 从煤烟灰获得锗。燃烧煤是提炼锗的第一道工序, 就重量来说, 煤烟灰中含有 2% 的锗。刚果的铜矿和西南非洲的锌矿是锗的另一个重要来源, 提取出的材料以二氧化锗的形式送去进一步加工, 然后制造晶体管。

### **还有其它半导体材料能用来制造晶体管吗?**

在制造半导体二极管、晶体管和其它半导体器件方面, 硅显得越来越重要。硅是最普通的元素之一。但是, 与锗相比, 硅需要更复杂的提纯过程。然后才能用来生产半导体器件。象锗一样, 硅也是一种结晶物质, 它有 4 个价电子。

### **硅的主要优点是什么?**

上面我们说过, 由于热效应, 在半导体材料中出现了空穴和自由电子。热提供了足够的能量, 使得一些电子脱离共价键。这些空穴和自由电子往往会产生不需要的电流, 干扰半导体中正常的电流。由于硅的禁带宽度 (它表示一个电子脱离其原子所需要的能量) 比锗大, 因此用硅半导体器件工作, 要比锗半导体器件受热的影响小。

硅的另外一个优点, 是它的表面能够被氧化而生成一层二氧化硅绝缘层。这对制造某些半导体器件 (包括集成电路) 是十分重要的。

### **锗还有什么特别的优点吗?**

由于锗的禁带宽度较小, 所以锗比硅受热的影响大。然而, 禁带宽度小就意味着锗的空穴迁移率较大。由于这个原因, 同硅相比, 锗半导体器件能在更高的频率下工作; 同

时，这还意味着锗半导体器件可以在较低的电源电压下工作。

### 多数载流子和少数载流子指的是什么？

正如我们在前面说过的那样，在半导体材料中有两种电流。一种是由带负电荷的电子的运动所引起的电流（电子流向电池的正极），它产生的是负电流。另一种是由空穴的运动所引起的电流。通过掺杂的方法，可以使电子数超过空穴数，或者相反，使空穴数超过电子数。在p型材料中，掺入的是受主杂质，就有过多的空穴出现。所以在p型材料中，空穴被称为多数载流子。在n型材料中，掺入的是施主杂质，就有过多的电子出现。所以在n型材料中，电子被称为多数载流子。当p-n结加正向偏压时，多数载流子将穿过p-n结。穿过p-n结以后，它们就成了少数载流子，形成少数载流子电流。半导体器件的工作原理，基本上就是靠p-n结的偏置来控制通过p-n结的电流。

### 什么是p-n结耗尽层？

当p-n结形成以后，就有一个初始的载流子流穿过p-n

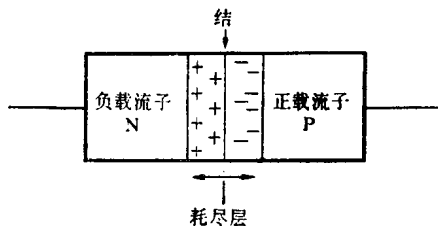


图 7 p-n结界面附近的耗尽层。在耗尽层内载流子较少

结：n区的电子被p区带正电荷的空穴所吸引而穿过p-n结，反之亦然。这样，就产生了图7所示的结果，在p-n结的两边产生了一个区域，在这个区域内载流子相对稀少，这就是耗尽层。一旦形成了耗尽层，就不再有初始电场来吸引空穴和电子穿过p-n结，因此，耗尽层起着阻止载流子进一步扩散的作用。正向偏置使耗尽层减小或受到中和，反向偏置则会扩大耗尽层。

### p-n结特性曲线是什么样的？

特性曲线用来表示p-n结的电特性。图8就是p-n结特性曲线的一个例子。我们看到，当正向电压（正向偏压）提高时，引起电流增大。在p-n结上加一个反向偏压，在达到某个临界点（称为齐纳击穿电压）之前，不产生电流。达到齐纳击穿电压时，电流突然增大。这电流有可能使p-n结遭到破坏。

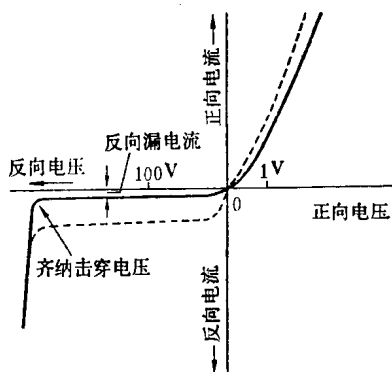


图8 p-n结的特性曲线。它表示p-n结的电特性。虚线表示当温度升高时对特性曲线的影响。反向漏电流主要是由耗尽层内因电离而产生的电子和空穴所引起的

在达到这点以前，有一个很小的电流流过p-n结，这电流叫做反向漏电流。它是由于热效应的电离作用引起的。虚线表示当温度升高时特性曲线的变化：由于温度升高，反向漏电流和正向电流都增大了。

### **什么叫双极晶体管和单极晶体管？**

象上面所介绍的，凡是靠空穴和电子这两种载流子工作的晶体管，都称为双极晶体管。某些特殊类型的晶体管（场效应晶体管）在工作时，只有多数载流子起主要作用，所以又叫做单极晶体管。

## 二、晶体管

### 晶体管和二极管有什么区别？

晶体管是一种非常精巧的电子器件，它有两个p-n结，这两个结背靠背地放置在一起。晶体管的结构，如图9所示。早期的晶体管是点接触型结构，现在已经被结型晶体管所取代。本书主要讨论结型晶体管。

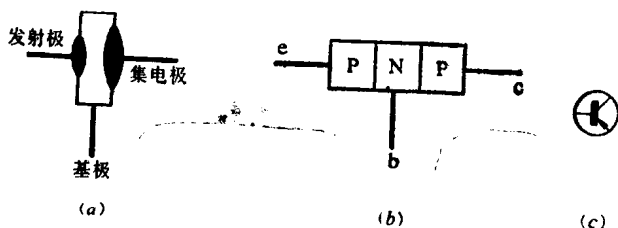


图 9

- (a) 一种简单的结型晶体管
- (b) 结型晶体管的方框图
- (c) 电路符号

### 晶体管是什么时候发明的？

晶体检波器的历史相当长久，早在电子管发明（1904年弗莱明发明真空二极管）以前，人们就已经使用晶体检波器。大家知道，在无线电初创时期，实验工作者就使用方铅矿和其他晶体进行检波。但是，在一段很长的时期内，这些器件却没有获得进一步的发展。

直到本世纪40年代，由于许多科学领域的专家的努力，

人们对这种器件才重新热衷起来。在这些专家之中，有美国贝尔（Bell）电话实验室的三位研究人员，他们在1948年发明了具有三个电极的晶体器件。这种器件既能放大电信号，又能对电信号进行检波。象早期的晶体检波器一样，这种新的器件当时也用了两根触丝。对晶体管的工作原理进行研究以后，人们把它定名为“Transistor”，这个词是由两个英文单词Transfer（转移）和Resistor（电阻）组合而成的。

### 试叙述晶体管的工作原理？

前面说过，结型晶体管是由三层锗或硅组成的，有p-n-p型和n-p-n型两种。晶体管有三根引线，分别与发射极、基极和集电极相连接。基区（对p-n-p型晶体管，基区为n区）很薄，而且掺杂较轻，产生电子载流子。基区两边的区域掺杂较重，产生正的空穴。p-n-p型晶体管的结构如图10所示。

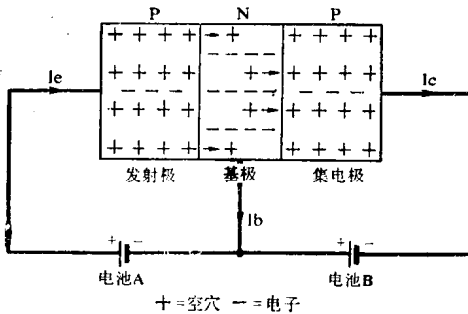


图 10 加偏压的p-n-p晶体管

在p-n-p结构中，发射区与基区之间的p-n结称为“发射结”，基区与集电区之间的n-p结称为集电结。在图10中，

发射结是由电池A加正向偏压（对基极来说，发射极为正），集电结是由电池B加反向偏压（对基极来说，集电极为负）。p区比n区掺杂重。因而，流过发射结的电流，主要是由来自p区的空穴所形成的。

此外，还有穿过结由基极流向发射极的电流。不过，由于发射区（p区）掺杂重，这个电流很微弱。对发射结加正向偏压，意味着把空穴从发射区注入到基区。如果用电池B对集电结加较高的负偏压，则大部分空穴受到吸引将越过集电结穿过集电区，最后到达集电极的外引线。在这里，空穴相当于正电荷，把电源的电子吸引到集电极上去。这样，空穴就沿一个方向流过晶体管，而电子则沿相反方向流过晶体管，这就建立起流过晶体管的电流。

在通过基区的过程中，大约有2%的空穴在基区与自由电子复合，产生基极电流 $I_b$ 。这表明，进入集电极的电流比经过发射结的空穴电流小2%。

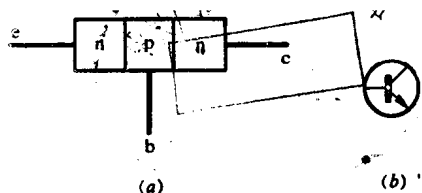


图 11 n-p-n 晶体管的方框图(a)和电路符号(b)

然而，重要的一点是：98%的空穴从低阻电路（正向偏置的发射极-基极电路）流进高阻电路（反向偏置的集电极-基极电路）。从这里可以看出，人们为什么把“转移”、“电阻”这两个英文单词组合起来，产生了“Transistor”（晶体管）这个词。尽管集电极电流比发射极电流小，但也能得