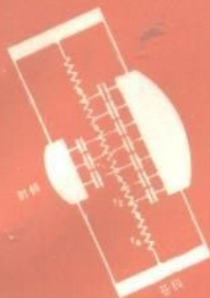
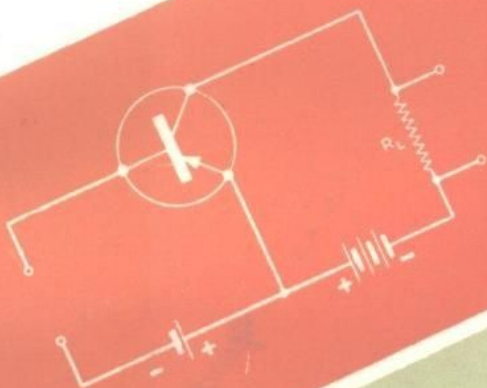


新技术、科学系列



晶体管手册



希伯德 编著
学出版社



新技术、科学系列

晶体管手册

R. G. 希伯德 编著

陈菊华 译

顾世杰 校

科学出版社

1991

内 容 简 介

晶体管手册是英国巴特沃思出版公司出版的新技术、科学系列之一。本书于1965年出版,1968年、1971年、1973年、1976年、1981年连续再版,深受读者欢迎。

本书全面介绍了各类晶体管的基本原理、特性、直流工作条件、等效电路和参数、生产工艺、使用与操作等。对其它半导体器件,诸如各类放大器、振荡器、开关、无线电接收机及电源装置的原理和特性也作了介绍。书中还介绍了固体电路技术。

本书可作为有关技术学校的学生、技工、工程师及大学有关专业师生的工具书和参考书。

R. G. Hibberd

TRANSISTOR POCKET BOOK

Butterworth & Co. (Publishers) Ltd., 1971

新技术、科学系列

晶 体 管 手 册

R. G. 希伯德 编著

陈菊华 译

顾世杰 校

责任编辑 方开文

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991年12月第一版 开本: 787×1092 1/32

1991年12月第一次印刷 印张: 9 1/2

印数: 0001—7 000 字数: 209 000

ISBN 7-03-002407-9/O · 451

定价: 5.20 元

序 言

当出版社与我商量写这本书时，他们提出，“这套丛书的各种手册主要是供学生和工程技术人员使用的，因此要求在叙述时尽量避免数学推导，而强调实际应用。”

在编写本书的整个过程中，我按照这一要求，一般采用文字叙述的方式努力说明各个专题。为此，有时需要作些简化和近似，但我希望通过阅读本书，能促使这些学生和工程技术人员进一步学习有关晶体管的理论及特殊应用方面程度更深的一些书籍。

我很高兴地得到英国得克萨斯仪器有限公司和美国得克萨斯仪器公司同事的许多帮助，特别是在许多实际电路方面的帮助，在此表示衷心感谢。

R. G. 希伯德

目 录

第一章	历史介绍	1
第二章	基本原理	4
第三章	晶体管特性	26
第四章	晶体管工艺	40
第五章	一些相关的半导体器件	65
第六章	晶体管等效电路与参数	86
第七章	直流工作条件	103
第八章	低电平低频放大器	113
第九章	高功率声频放大器	130
第十章	高频放大器	153
第十一章	晶体管振荡器	172
第十二章	晶体管无线电接收机	190
第十三章	开关晶体管	199
第十四章	直流放大器	221
第十五章	电源	240
第十六章	晶体管的使用和操作	261
第十七章	固体电路技术	266
第十八章	最近的发展	282
附录		289
索引		293

第一章 历史介绍

关于晶体管的发明，可以追溯到晶体管出现以前的一些历史。早在 1827 年，有关固体的线性电传导的欧姆定律首先被阐明。到了 1870 年，科学家观测到金属硫化物（例如方铅矿与黄铁矿）中电的非线性或整流作用。20 世纪初，无线电报的出现促使人们对用作无线电检波器的硫化物作进一步的研究。1920—1925 年期间，即在无线电广播的早期，晶体检波器已在晶体接收机中广泛使用。当时的检波器普遍使用了带有金属“触须”接触的一小片方铅矿。

硅晶体混频器二极管

热离子管的出现可以上溯到 1904 年。到了 1930 年，它已被广泛地用于无线电接收机。在紧接着的 10 年中，它获得迅速的发展。到第二次世界大战开始时，热离子管的电子仪器就已经被普遍采用。大战期间，甚至以更高的速度继续发展。

使用的信号频率起初为 3000 MHz，尔后达到 10000 MHz 的高清晰度雷达的发展，要求有一种性能比热电子二极管更好的检波器。由于晶体检波器具有低电容和低正向电阻的特性，所以人们把研究的注意力又集中在晶体检波器上。进一步的研究工作导致了硅晶体二极管的出现。硅晶体二极管是由一小片硅和紧压在硅片表面上的一条尖钨丝组成。这种二极管主要作为“混频器”二极管，用于带本机振荡器的超外差接收中，把它作为信号频率的直接检波器，也有多种用

途,尤其是用于监视和测量。

锗点接触型二极管

第二次世界大战将结束时,在为了得到性能有所改进的混频器二极管所做的实验过程中发现,利用锗可以获得比较高的反向电压特性。现在已显而易见,这些器件后来的制作成功取决于对半导体材料(特别是锗和硅)的较全面的了解,以及对如何控制这些材料的特性有较好的掌握。当还在对这种性质做较基础的研究工作时,锗点接触型二极管就正被设计成为一种相当满意的器件。它应用到中、低频时,具有好的通用的特性,即具有几百欧姆的正向电阻,约 $10\text{ k}\Omega$ 的反向电阻,可允许的正向电流为 20 mA ,而反向电压最高达 100 V 。锗点接触型二极管在电子电路中可用作检波器和限幅器,代替以前起这种作用所使用的热离子二极管,立刻得到了广泛的承认。但是在那时,对二极管的作用还没有很好的了解,因而二极管的设计和制造主要是靠经验。

点接触型晶体管

当时,对于整流的正确的理论上的认识工作已经在进行了。1948年贝耳电话实验室在做这类工作的过程中,科学家利用第二个接触探测电场的方法对点接触周围的表面电位进行了研究。当两个触点之间的间隔很小(0.025 mm 或 0.05 mm)时,他们观测到主触点电流的改变会影响另一个触点中电流的流动。由于这个观测结果,产生了点接触型晶体管。它是由一片扁平的锗片和压上面的两条尖的金属丝做成的,金属丝相距约 0.025 mm 。每个点接触都独自具有整流特性。第一点(称为发射极)加正向偏压时,具有低的电阻,而第

二点(称为集电极)加反向偏压时,给出高电阻(正偏压和反偏压在下一章进行解释).当通过低电阻发射极的正向电流改变时,高电阻集电极的电流也产生了类似的改变,因此功率得到放大.电流从低电阻电路“转移”(transferring)到高电阻电路的这种概念是晶体管这一名称的来历(晶体管英文为 transistor, 即由 transfer 的前部分和 resistor 的后部分组成的).

这是第一次在固态器件中观察到放大,其意义是显而易见的.新的器件比热离子管小得多,而且不需要热丝电源,因此它能使电子仪器的大小、重量和功率消耗减小.此外,那时热离子管的发展也已经达到了饱和状态,这就使人们对新的选择增加了兴趣.

结型晶体管

人们很快就认识到点接触型晶体管有某些局限性,如很难制造出具有相同特性的样品,成本高,强度不够,并且具有高的噪声因数.然而,通过对点接触型晶体管的研究证实了固态放大的可行性,同时也促使人们深入细致地去研究各种类型的晶体管.这些研究的第一个成果是产生了结型晶体管,它也是贝耳实验室发明的.结型晶体管不再使用两根金属丝来与半导体的表面相接触,而是在固体内部形成两个整流结,两结之间的距离依然很小,小于 0.025 mm. 从 50 年代到现在,结型晶体管的发展像其它新技术的发展那样已经过了许多阶段,每一个阶段都产生了更好的新型晶体管,例如,生长结晶体管、合金晶体管、面垒晶体管、扩散合金型晶体管、扩散台面晶体管、外延扩散台面晶体管、平面晶体管、外延平面晶体管、扩散场效应晶体管(金属-氧化物硅晶体管)等等.

本书就是要介绍这些类型的晶体管.

第二章 基本原理

为了了解晶体管的作用，即了解晶体管是如何使电流以产生放大的方式流入一片固体晶体的，首先需要了解晶体的原子结构。在非常简化的原子结构图中，原子是由含有带正电荷的质子的中心核以及围绕中心核旋转的许多带负电荷的电子所组成。电子所带负电荷的电量正好等于质子所带正电荷的电量，而两者电极性相反。在中性原子中，绕核旋转的电子数等于核中带正电荷的质子数。

不同元素所具有的电子数不同，这些电子也不都处在与核的距离相等的轨道上进行旋转，而是在几个分开的环形轨道上进行旋转运动，例如，锗共有 32 个电子，位于 4 个环形轨道上；硅有 14 个电子，处于 3 个轨道上。接近核的那些轨道上的电子紧紧束缚于核的周围，而处于外层轨道上的电子的束缚是比较松散的，并且在某种情况下这些电子可能会离开原子。元素的性质基本上是由外层电子轨道所处的条件来决定。这个外层轨道称为价环形轨道，处于价环形轨道的电子称为价电子。通常只有这些价电子参与化学反应，因此，我们可方便地把原子的简化图象想象成一个中心核及围绕着中心核处于一个环形轨道中的一些价电子。

导体与绝缘体

价电子如果很松散地束缚于原子上，这种物质就是电的良导体。明显的例子是金属铜，它的价电子的束缚是如此松

散,以致于在室温下,热能就足以从每个原子中大致近似分离出一个电子。在一根被绝缘的铜棒中,这些自由电子无规则地运动,如果在铜棒的两端加一个电压,电子就被吸引而靠近正端形成电流,电子从铜棒流到电池的正端,同时,等量的电子从电池流入铜棒的负端,这样,铜棒中电子的数目总是相同的。重要的是要记住,当一个电子从原子上分离出来之后,原子被留下,并带有净正电荷,因此,在铜棒中虽然有许多自由的带负电荷的电子,但铜棒不会变成带电体,因为其中还有等量的带正电荷的原子。

可以看出,各种金属是电的良好导体,金属中通常存在着大量的自由电子,当加上电压时,这些电子就能运动。

绝缘体则是这样一些物质,这些物质中的价电子紧紧地束缚在原子核上,而需要大量的能量才能把电子释放出来。在这些物质中,通常只有极少数的自由电子,因此,当加上电压时,实际上没有电流流动。

半导体

在导体和绝缘体这两大类物质之间有一类物质叫做半导体。这个名称意味着,半导体是电阻率大致上介于导体与绝缘体之间的物质。然而,半导体并不只是不良导体。半导体还具有另外两个重要的性质。第一,它的电阻通常随着温度的增加而减小,这与导体(例如金属)相反,导体的电阻随着温度的升高而稍微有些增加。第二,半导体中电流的流动可以有两种机制:一种如导体中的情况那样,是带负电的电子的流动;另一种是带正电的空穴在反方向的流动过程。这种空穴流的概念对理解半导体是相当重要的,这种概念将在本章的后面部分作较详细的讨论。

晶体结构

当一种元素的原子靠在一起(如固体中的情况那样)时,

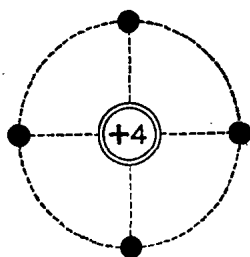


图 2.1 锗或硅原子结构示意图

这些原子趋于使它们自身以一种均匀的花样排列起来,形成所谓的晶体结构。晶体的精确形状取决于价电子的数目以及在相邻近的原子间这些价电子是怎样形成键的。锗和硅原子在它们外层的环形轨道中都有 4 个价电子,这两种原子形成相同的基本结构。在这种结构中,每一个原子与其它 4 个原子是等距离的,

并且一个原子中的每一个价电子与另一个原子的一个价电子形成对,这种对称为共价键。这种结构当然是三维的,但

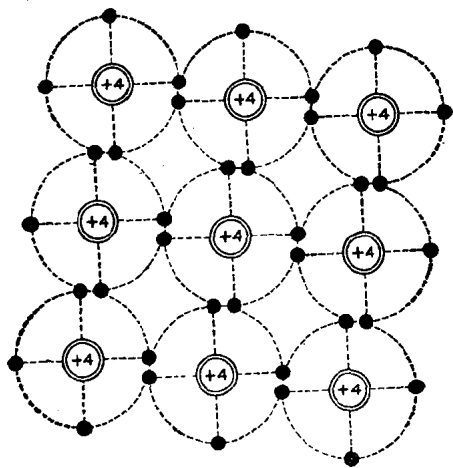


图 2.2 锗或硅晶体结构示意图

把它画成如图 2.1 所示的二维形式比较方便。图 2.1 就是锗或硅原子的结构示意图。图 2.2 是说明锗或硅完整晶体的结构示意图。位于中心的大圆圈表示原子核，大圆圈内的数字表示原子核内带正电荷的质子数。每一个小黑点表示一个电子。

电子与空穴

如图 2.2 所示的完整晶体中，所有的共价键是完整的，没有电子从它的原子上被移去。在这种状态下，甚至锗和硅都是绝缘体。但是，当这种晶体的温度从绝对零度开始升高时，就要考虑所发生的情况。当温度升高时，每一个原子的能量增加，价电子就可以获得足够的能量脱离它的母原子。这种电子现在是自由的，如果加上一个电压，它们就能运动形成电流，如导体中的情况那样。

当电子脱离原子后，留下一个未被占用的空位，这个空位称为空穴，如图 2.3 所示。空穴的存在可产生导电现象，这种导电方式与自由电子的导电方式不同。由电子脱离原子而在原子中产生的空穴，实际上出现一个净的正电荷。一个刚从邻近原子脱离出来的带负电荷的电子如果跳进这个空穴，则该原子形成电中性。但是，在电子离开的那个邻近原子上又留下了一个新的带正电荷的空穴。因此，我们可以说，这时空穴已经从第一个原子运动到第二个原子，然后，从第三个原子来的电子可以填到第二个空穴中，并且空穴从一个原子跳跃到另一个原子的过程可以反复出现。如果加上一个电压，电子以一个接一个跳跃的方式向正端运动，而空穴则可认为是以相反的方向向着负端运动。虽然事实上在晶体中只有电子在运动，但比较方便的是把空穴看作一个带正电荷的实体，它能以类似的方式但向着相反的方向运动。因为空穴是以一连

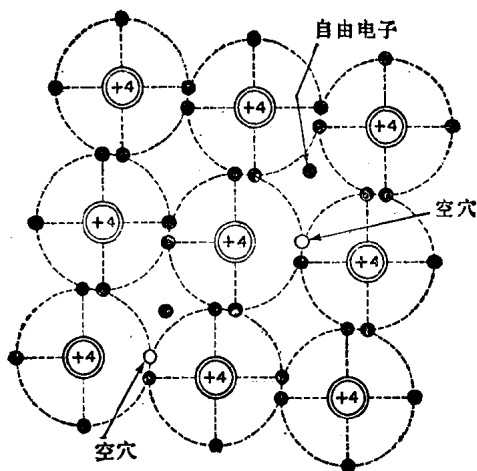


图 2.3 由于温度升高产生的自由电子和空穴

串短运动的方式进行运动的,所以它比自由电子运动得慢,而自由电子可以在各原子之间不断地进行运动.这个事实(如在后面将要看到的那样)在设计晶体管时可能是很重要的。

因此,半导体中电流的流动通常是由两部分组成的,即在一个方向上的自由电子的流动和在相反方向上的空穴的流动。当温度升高时,会形成更多的自由电子和空穴,因此就有更多的载流子,并且电阻减小。将会看到,在纯半导体中,对应于每一个自由电子必须有一个空穴,因此,自由电子的总数必须等于空穴的总数。这种纯材料称为内禀型材料。

杂质电导

将少量另一种元素加入半导体,就有可能使半导体具有某一种类型占优势的电导,或者是电子电导,或者是空穴电导。如果加入的这种元素有 5 个价电子,则产生了自由电子

过剩,于是得到电子电导。如果加入的杂质只有 3 个价电子,就会在结构中产生空穴,达到空穴电导。下面我们将依次讨论这两种电导的条件。

n 型半导体

现在我们来考虑在环形轨道上有 5 个电子的杂质加到本来是纯的锗中去时会发生什么变化。这种情况在图 2.4 中作了说明。这种杂质元素的原子将以尽可能合适的方式进入晶体结构,其中 4 个价电子与邻近锗原子的价电子形成共价键。杂质原子的第 5 个价电子趋向于绕该原子旋转的轨道,但这个电子与原子的束缚是很松散的,以致于在室温下它实际上是自由的,并且可作为一个载流子。因为杂质原子现在只有 4 个价电子被束缚着,所以它是带正电荷的,并把它叫作正离

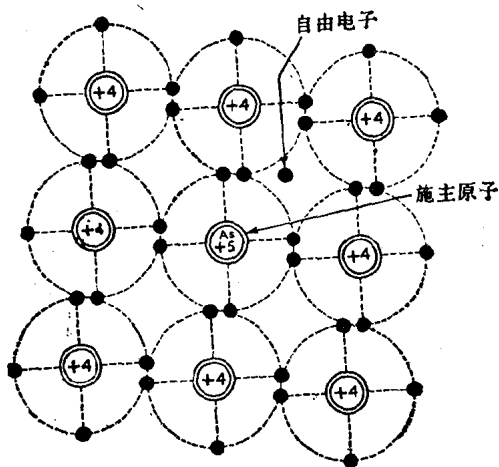


图 2.4 由施主杂质原子产生的自由电子

子。晶体整体来说保持电中性，因为对于每一个带正电荷的杂质原子就有一个带负电荷的自由电子，但必须记住这些电子是自由运动的，而带正电荷的杂质原子是固定在晶格中的。

典型的五价杂质元素是砷、锑及磷。因为它们贡献出自由电子给半导体，所以把它们叫作施主，并由于载流子是带负电荷的电子，所以这种材料就叫作 n 型（n 代表负载流子）材料。加入很少量的杂质可以大大地改变半导体的电阻。为了制造晶体管，加入锗中的杂质的典型量是锗的一亿分之一，这些杂质将使本征锗的电阻率从 $70\Omega \cdot \text{cm}$ 降到 $1\Omega \cdot \text{cm}$ 。

p 型半导体

如果将具有 3 个价电子的杂质加入锗中，就得到与上述不同的情况。这种杂质原子对晶体结构也是适合的，但此时只能形成 3 个共价键。为了完成第 4 个键，这种杂质原子要从邻近锗原子吸收一个电子，而那个邻近原子则产生一个空穴，图 2.5 说明了这种情况。这种杂质元素的每一个原子使锗的结构中产生一个空穴，形成空穴电导，如前面所述。这种稳定的杂质原子，这时具有一个额外的电子，也就是具有一个净的负电荷，所以它是一个负离子。典型的三价杂质元素是铟、硼及铝。因为这些杂质原子从半导体材料的原子中接受一个电子，所以称为受主。因为现在电流是由带正电荷的空穴所形成，故掺有这种杂质的半导体材料称为 p 型（p 代表正载流子）半导体材料。

产生与复合

如前所述，如果半导体的温度从绝对零度开始增加，电子

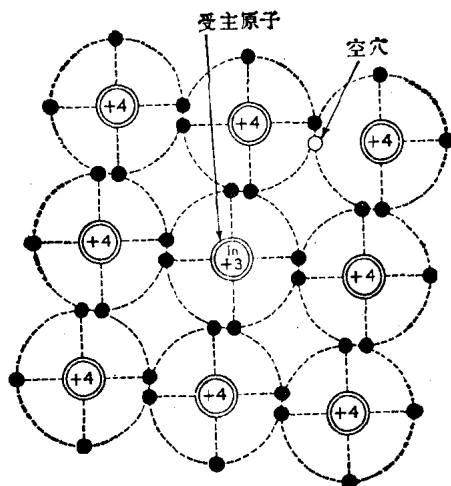


图 2.5 由受主杂质形成的空穴

获得更多的能量,某些电子就脱离它原来的原子,产生了数目相等的自由电子和空穴。这些电子和空穴被认为是受热产生的。如果半导体保持在给定的温度(比如说室温),那么空穴和电子会连续不断地产生出来,似乎它们的浓度应该不断地增加,但是事实并非如此,因为自由电子在晶体中运动时可以遇到空穴。如果自由电子遇到了空穴,它就会进入空穴,形成共价键,于是空穴不复存在,电子也不再自由,两种载流子消失,这个过程称为复合。因为物质是处于平衡的,所以在恒定温度下半导体中载流子的复合速率必须等于载流子的产生速率。

杂质导电通常是某一种类型的载流子过量,这种载流子称为多数载流子。在 n 型材料中电子是多数载流子,在 p 型材料中空穴是多数载流子。

少数载流子的复合

如果大量的空穴突然注入到一种 n 型半导体中，与半导体内连续不断地产生空穴的情况正好相反，它们要与自由电子复合而逐渐消失，直到它们全部不复存在。存在于 n 型材料中的这种空穴称为少数载流子。这些空穴在它们最后复合之前连续存在的时间称为少数载流子的寿命。这是半导体材料的一个重要性质。

用类似的方法，注入 p 型半导体材料中的电子也是少数载流子，当电子进入空穴时，由于复合作用电子也消失了。

大多数晶体管的工作情况取决于相反类型的半导体材料中少数载流子的运动情况。下面将对这个问题作更多的叙述。

pn 结

在一连续的半导体晶体中，从 p 型材料到 n 型材料的过渡区域称为 pn 结。大多数半导体器件中包含有一个或多个 pn 结，因此，很好地了解 pn 结的性质是很重要的。

单独一种 n 型或 p 型的半导体，纯粹是电阻性的，也就是说，当与它连接的电池反向时，它的电流方向就会反向，但不影响电流的幅度。相反，一片有一个 pn 结的半导体，它具有整流性质，也就是说，当加上一个电压时，它的电流向一个方向流动，但如果所加电压反向时，就没有电流。

现在我们考虑两种半导体材料，一种是具有一定空穴密度的 p 型半导体材料，另一种是具有类似的自由电子密度的 n 型半导体材料。图 2.6 中线 AB 的右边是 n 型区域，它有固定的带正电荷的施主原子及可移动的带负电荷的电子。重要的是记住，带正电荷的施主原子是固定在晶体结构中的，而带