

黄正荣等编著

半导体和半导体器件

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书介绍半导体的性质,半导体器件的基本结构、工作原理及某些特性,并扼要介绍制造工艺的主要内容。讨论着重在定性概念的介紹,定量知識則尽可能求其簡單,避免較深的数学討論。

本书适合具有高中及以上文化程度的讀者閱讀。

半导体和半导体器件

黄正荣等编著

上海科学技术出版社出版(上海瑞金二路450号)
上海市书刊出版业营业许可证出093号

上海洪兴印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 6 24/32 排版字数 116,000
1963年6月第1版, 1966年3月第3次印刷
印数 21,001—30,000

统一书号 13119·514 定价(科四) 0.65元

目 录

序	i
1 半导体的一些基本性质	1
§ 1-1 单个原子中的电子能级(2) § 1-2 晶体和非晶体(4) § 1-3 电子的共有化运动和能带(6) § 1-4 满带和导带(10) § 1-5 导体、半导体和绝缘体的区别(12) § 1-6 半导体中的空穴(15) § 1-7 杂质和晶格缺陷(17) § 1-8 温度的影响(25) § 1-9 迁移率(28) § 1-10 复合和寿命(31)	
2 半导体材料	33
§ 2-1 锗、硅元素半导体(36) § 2-2 III-V 族化合物(38) § 2-3 区域提纯(40) § 2-4 抽单晶(48)	
3 $p-n$ 结	52
§ 3-1 扩散现象(52) § 3-2 $p-n$ 结中的电场(55) § 3-3 $p-n$ 结的能带(56) § 3-4 $p-n$ 结的伏安特性(59) § 3-5 $p-n$ 结的反向击穿和势垒电容(65)	
4 半导体二极管和整流器	68
§ 4-1 二极管和整流器(69) § 4-2 点接触二极管(71) § 4-3 面结型二极管(75) § 4-4 氧化亚铜整流器和硒整流器(78) § 4-5 锗、硅整流器(81)	
5 晶体管	90
§ 5-1 晶体三极管的基本结构(92) § 5-2 放大作用的	

简单原理 (93) § 5-3 电流放大系数和截止频率 (98)
 § 5-4 点接触晶体三极管 (106) § 5-5 合金结晶体三极管 (107)
 § 5-6 晶体四极管 (109) § 5-7 本征势垒晶体管 and 漂移晶体管 (110)
 § 5-8 面垒管、微合金管和微合金扩散管 (114) § 5-9 合金扩散管 (116) § 5-10 台式晶体管 and 外延式晶体管 (118)

6

光电器件121

§ 6-1 光电导现象 (121) § 6-2 光敏电阻 (126)
 § 6-3 光电二极管 (133) § 6-4 光生伏特效应 (140)
 § 6-5 光电池 (141) § 6-6 电子生伏特效应和原子能电池 (146)

7

热敏电阻148

§ 7-1 半导体的热敏性 (148) § 7-2 热敏电阻的制造工艺 (149)
 § 7-3 热敏电阻的特性 (151) § 7-4 热敏电阻的应用 (155)
 § 7-5 半导体辐射热计 (161)

8

温差电器件164

§ 8-1 塞贝克效应 (164) § 8-2 温差发电机 (166)
 § 8-3 珀耳帖效应 (171) § 8-4 致冷器和发热器 (172)

9

霍尔器件177

§ 9-1 霍尔效应 (177) § 9-2 霍尔器件 (179)

10

其他类型的晶体管187

§ 10-1 空间电荷管 (187) § 10-2 场效应晶体管 (191)
 § 10-3 齐纳二极管 (193) § 10-4 变电容二极管 (198)
 § 10-5 隧道二极管 (203)

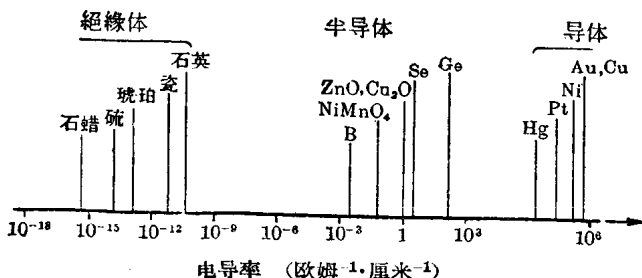


半导体的一些基本性质

我們周圍的一切物质，可以按电导率——导电本领的大小而区别为导体、半导体和絕緣体三大类。图1-1所列出的是一些典型材料的电导率。从图上可以看到：銀、銅、鎳等金属，它们的电导率很高，在 $10^5 \sim 10^8$ 欧姆 $^{-1} \cdot$ 厘米 $^{-1}$ 之間，石英、瓷器、石蜡等一类絕緣体，它们的导电性能极差，电导率低于 10^{-10} 欧姆 $^{-1} \cdot$ 厘米 $^{-1}$ ；半导体的电导率則介于两者之間。

本章将环绕着导电过程，来介绍半导体的一些基本的电学性质和有关知識。要了解半导体中的物理現

图 1-1 一些典型材料的电导率

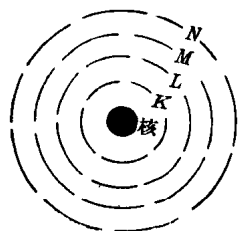


象，必須先懂得一些关于能帶的理論。現在我們就从电子能級和能帶的形成談起。

§ 1-1 单个原子中的电子能級

大家都知道，电子是組成原子的基本粒子之一，它繞着原子核運轉不息。不过，电子在原子核周圍運轉时，受到一定的限制；如图 1-2 所示：它只能在 K 、 L 、 M 、 N 、 \dots 等軌道层上運轉。除了这些固定的軌道以外，在原子核周圍的其他空間中电子是无法“立足”的。电子在軌道上運轉时，受到原子核的吸引，不能任意离开原子核，被束縛在原子核的附近。原子内电子的能量随着它所处的軌道层次而异。关于这一点，可以这样来考虑：当电子从离原子核較近的軌道层跳到較远的軌道层时，譬如說从 K 层跳到 M 层时，它就必須化去一定的能量来克服原子核对它的引力。如果电子所具的动能不足以克服原子核的引力，那么它只能在 K 层上運轉。可見只有能量大的电子才能从 K 层跳到 M 层，所以 M 层上电子的能量大于 K 层上的电子。由此可以推知：在原子内部，处于不同軌道层上的电子，它

图 1-2



們所具的能量是各不相同的，离原子核較远的电子具有較大的能量。

在物理学中，常常用能量图（如图 1-3）来描写电子在不同軌道层上所具的能量。图 1-3 的右边是电子運轉軌道的

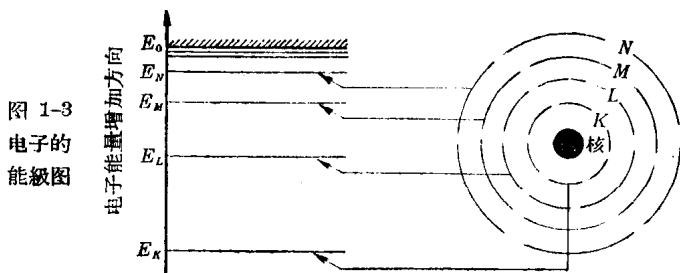


图 1-3
电子的
能级图

平面图,左边是电子的能量图。图中 E_K 、 E_L 、 E_M 、 E_N 等分别为电子处于 K 层、 L 层、 M 层、 N 层等上所具有的能量。因为电子只能处在这些轨道层中的某一个上,所以它所具有的能量只能是 E_K 、 E_L 、 E_M 、 E_N 中的某一个。这些标志电子能量高低的线段就叫做电子的能级。图上的 E_0 是自由电子的能级。所谓自由电子,是指不受原子核吸引的电子,它不受原子核的束缚,可以自由行动。电子距原子核越远,原子核对其的吸引力就越小。当电子和原子核距离足够远时,它就不再受原子核吸引了,这时电子就成为自由电子。电子距离原子核越远,能量越大,所以自由电子的能级 E_0 高于 E_K 、 E_L 、 E_M 、 E_N 等能级。

在原子中最外层电子离原子核最远,原子核对其的吸引力最小,因此在受到外来影响时比内层电子容易脱离原子。从能级图上来说,最外层的电子能级较高;和内层电子相比,它只要从外界得到较小的能量,自己的能量就能增大到足够挣脱原子核的束缚。这些最外层的电子称为价电子,在晶体的电学性质上起着十分重要的作用。

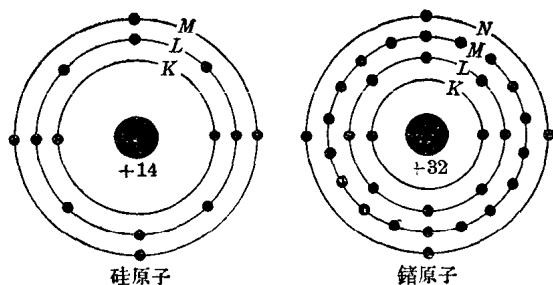


图 1-4
硅原子和鋅
原子的結構
示意图

在我們現在所应用的半导体材料中，鋅和硅是重要的半导体元素，它們的原子結構如图 1-4 所示。硅原子共有 14 个电子，分別处于 *K*、*L* 和 *M* 层上；处于 *M* 层上的价电子共有四个。鋅原子共有 32 个电子，最外层价电子有四个，处于 *N* 层上。

上面所說的单个原子只是一种理想情况，在自然界中并没有单个原子单独存在的情况，因为所有的物质都是由大量的原子組成的。这时电子不仅受到自己所属的原子的作用，而且还受到相邻原子的作用。那么在由大量原子所組成的物质中，电子又是怎样的呢？

§ 1-2 晶体和非晶体

虽然世界上的物体都是由原子組成的，但是从原子的排列方式来看，可以分成晶体和非晶体两类。属于前者的例如岩盐、雪花、水晶、絕大多数的金属和半导体等等；属于后者的例如气体、液体、玻璃体等等。晶体通常都具有特殊的外形，例如岩盐是立方形的，雪花是六角形的，水晶是六方柱体形的。晶体所以会有特殊的外形，是因为它內部的原子排列具有一定的規

律性。科学家們用倫琴射綫对晶体和非晶体的結構进行了詳細研究和分析,发现在晶体中,所有的原子都遵循一定的規律,周期性地排列在空間。而在非晶体里,原子的排列毫无規律,混乱得很。

在不同的晶体中,原子的排列方式可以是各不相同的。图 1-5~图 1-8 是几种大家所熟悉的半导体材料的晶格結構图形。图 1-8 是著名的金剛石晶格結構,属于这类的晶体有金剛石、鍺、硅和灰錫。

构成晶体的原子所以能够按照某种規律彼此之間保持一定的距离处于指定的位置上,是因为它們之間存在的力的作用,这种作用力叫做鍵。图 1-8 中的圓球代表鍺(或硅)原子实。球与球之間的“棒”代表把它們連結起来的鍵。在鍺(或硅)晶体里面,两个相邻的原子各拿出一个价电子互相“公用”,即这对价电子成为两个原子所“共有”。这对共有的价电子把这两个原子紧紧地連結起来。人們把原子的这种結

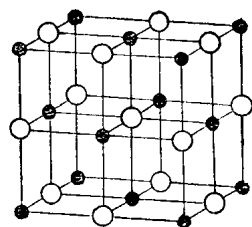


图 1-5 CuO 和 BaO 的晶格結構

● 代表 Cu^{++} 或 Ba^{++}
○ 代表 O^{--}

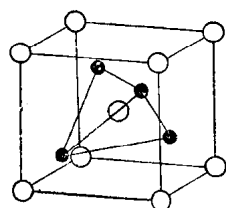


图 1-6 Cu_2O 的晶格結構

● 代表 Cu^+
○ 代表 O^{--}

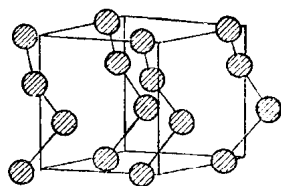


图 1-7 硒和碲的晶格結構
(黑圈代表硒或碲原子)

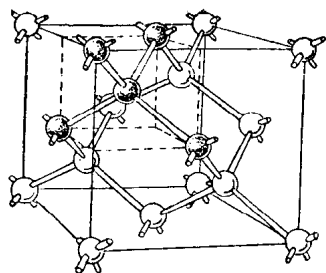


图 1-8 金剛石結構

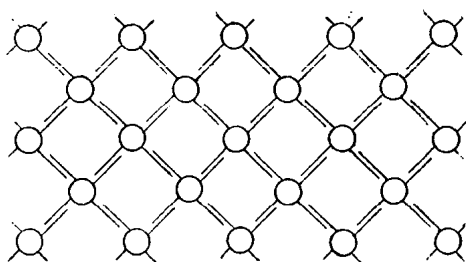


图 1-9 鍺(硅)晶格結構平面示意图

合叫做共价結合，把这对共有的价电子叫做共价鍵。从图上还可以看出，虽然每个鍺原子四周有很多原子，但是和它最接近的只有四个(图 1-8 中用黑色圓球表示)，每个鍺原子正好用它的四个价电子和最相邻的四个原子进行共价結合，构成鍺晶体。在說明鍺(或硅)晶体中所发生的一些物理現象时，为了方便起見，可以用平面示意图(图 1-9)来表示鍺(或硅)的晶格結構。图 1-9 中的圓圈代表鍺(或硅)原子实，圓圈周圍的四根黑綫代表四个价电子，象征原子的共价結合。

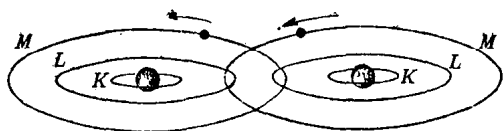
現在来看一下晶体中电子所处的状态。

§ 1-3 电子的共有化运动和能帶

在晶体里面，由于原子和原子間的距离比較近，因此电子不仅受到自己所属的原子作用，同时还受到相邻原子的作用；这种相邻原子的作用，使电子的每个能級分裂成能帶。下面我們用电子的共有化运动来说明这一点。

当原子和原子比較接近时，相邻原子的电子軌道

图 1-10
电子的共有化运动



将互相交迭。图 1-10 所示就是这种情况理想化的最简单的示意。从图上可以看到 M 层轨道发生了交迭，处于 M 层上的电子，通过轨道的交迭，可以从自己所属的原子跑到相邻的原子上去。如果交迭的原子不止两个，那么电子跑到相邻原子上去以后，又可以通过轨道的交迭跑到更远的原子上去；这样电子就不再被局限于自己所属的原子范围内，而可以在晶体中所有的原子上运转。于是电子就不再为个别原子所有，而是为晶体中所有的原子所共有的了。电子的这种运动就叫做共有化运动。

虽然一般地说来，晶体中原子的电子都兼有围绕核运转的原子运动和上述的共有化运动，但实际上只有最外层的价电子才有显著的共有化运动。这是因为价电子和原子核的距离比内层电子来得远，受原子核的作用最弱，在受到外来影响时最容易脱离原子。另一方面，价电子的轨道层比较大，它和相邻原子的距离比内层电子小，相邻原子对它的作用比内层电子也强。至于内层电子，由于它的轨道层比较小，它一方面与自己所属的原子核比较近，受到的束缚比较紧；另一方面，受到相邻原子的影响又比价电子小。因此内层电子的共有化运动是不显著的，它基本上仍然保持着单个原子中所处的状态。

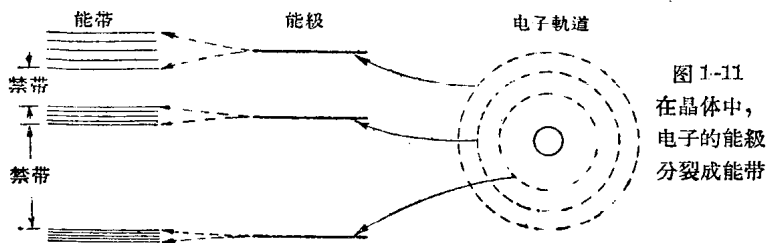


图 1-11
在晶体中，
电子的能级
分裂成能带

在討論单个原子时，曾經介紹过能级图(图 1-3)，說明电子的每一个轨道层都有一个对应的能级。在晶体中，电子的轨道层发生了交迭；电子除了原子运动以外，还兼有共有化运动。这时，与轨道对应的能级就分裂成为能带，就是每个能级分裂成很多很多个非常靠近的能级。本来在能量图上是用一条线来代表一个能级，现在就要象图 1-11 中那样用一条宽的带来表示。这条由很多根细线组成的带叫做能带。假如晶体是由 N 个原子组成的，那么在每条能带中共有 N 个能级。以锗为例，每立方厘米的锗晶体中有 4×10^{23} 个原子；故在单位立方厘米的锗晶体中，每条能带中有 4×10^{23} 个能级，这实在是一个相当大的数目。由此可以想见，能级和能级之间的距离是很小的，约为 10^{-21} 电子伏特^①。

在单个原子中，电子只能停留在能级上，能级与能级间的区域是不允许电子停留的。既然能带是由能级分裂而成的，因此在晶体中，电子只能停留在能带里的

① 电子伏特是电学中衡量能量的一种单位。一个电子伏特，就等于在强度为 1 伏特/厘米的电场中，使电子顺着电场方向移动 1 厘米时所作的功。1 电子伏特 = 1.6×10^{-19} 尔格。

能級上。至于能帶与能帶之間的区域也是不允許电子停留的。这个不允許电子存在的区域,称为禁帶。

能帶的寬度和晶体中原子的总数沒有关系。晶体中原子总数的增加,仅仅引起能帶中能級的增加,使能級与能級之間的距离变得更小,但不影响能帶的寬度。能帶的寬度是由晶体的性质决定的。能帶的寬度在一定程度上反映了电子共有化运动的强弱:外层电子的共有化运动比較显著,电子在晶体中的共有化速度比較大,它所对应的能帶就比較寬;內层电子的共有化运动比較弱,所对应的能帶也就比較窄,如图 1-11 所示。

也有这样的情况:在有些晶体里,价电子能級所对应的能帶很寬,以致和上面的另一条能帶发生了交迭。这时,这两条能帶之間禁帶就不存在了,某些二价金属晶体的能帶結構就是这样的。这类能帶結構跟我們所要討論的内容关系不大,所以不詳細談了。

每个能級就像双人座位一样,只能容納 2 个电子。假定一条能帶共有 N 个能級,那么它只能容納 $2N$ 个电子。电子在能帶里面,总是喜欢“占坐”能量較小的能級,也就是比較下面的能級。所以电子在填充能帶时,总是先从下面填起。因此,如果能帶中的能級沒有全部被电子填满。那么,在正常的情况下,能帶中較高的能級,即上面的一些能級是空的。

內层电子能級所对应的能帶都是被电子填满的;价电子能級所对应的能帶,有被电子填满的,也有沒有

被电子填满的,这要由晶体的具体性质来决定。像铜、银、金等晶体,它们的价电子能带有一半能级是空的;像金刚石、锗、硅等晶体,它们的价电子能带正好全部被电子填满。能带理论告诉我们:只有当能带里有空能级的时候,能带中的电子才能参加导电运动。

§ 1-4 满带和导带

为什么只有当能带中有空能级的时候,电子才能参加导电运动呢?

我们知道,电流就是电子沿着某一方向移动而形成的。电子所以会沿着某一方向移动,是因为它受到了电场的加速作用。电场的这一加速作用,使电子获得了附加的动能,电子的总能量因此增大。电子能量的增大,就相当于电子从能带中较低的能级跳到较高的能级。这一点我们要牢记,这是我们理解半导体中一切电现象的出发点。

在讨论单个原子中的电子运动时,曾经用电子的能级图来描写电子的运动状态。譬如当电子在 K 或者 M 层上运转时,我们说电子停留在能级 E_K 或者 E_M 上面(参见图 1-3);当电子从 K 层跳到 M 层时,我们就说电子从能级 E_K 跳到 E_M 上。在谈到电子的导电运动时,根据上面所讲,也可以用能量的变化来解释。所以要重复这一点,是让大家了解:电子参加导电运动,和电子从能带中较低的能级跳到较高的能级,实际

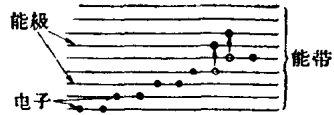


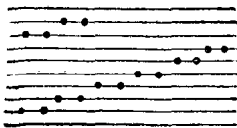
图 1-12 当电子参加导电运动时，它就下面較低的能级跳到上面的空能级上去

上是一件事情的两种讲法。按照这样说来，能带中的电子能不能参加导电运动，首先要看能带里有没有空的能级。如果能带里面有空的能级，那么在电場的作用下，电子就能跳到上面的空能级上去参加导电运动(参见图 1-12)。这样的能带我们叫做导带。反之，如果能带中没有空的能级；那么即使电子受到电場的作用，企图跳到高能级上去，但是因为沒有空的能级，它还是没有办法参加导电运动。这样的能带，我们称之为满带。

为了解释能带中电子能不能参加导电运动，我们不妨这样来譬喻：把电子比作一辆载有单位负电荷的汽車，把能带比作一条公路。能带中的电子就相当于停在公路上的汽車。这样一来，满带就相当于这样一条公路：路面上停满了汽車，連汽車轉身的余地都沒有了，交通阻塞，汽車无法通行(图 1-13)。假使能带沒有被电子填满，在正常的情况下，能带中較高的能级是空的。这相当于公路的一边是空的，一边停满了汽

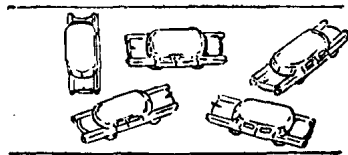
图 1-13

(a) 能带被电子填满，电子无法参加导电运动

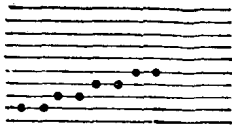


(a)

(b) 公路上停留了汽車，交通阻塞

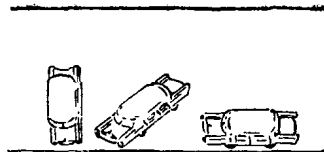


(b)



(a)

(a) 能帶沒有被電子填滿，電子可以跳到上面的空能級上參加導電運動



(b)

(b) 公路的一邊是空的，汽車可以从旁側通行

图 1-14

車。有了这部分空的路面，汽車就可以通行无阻（图 1-14）。

晶体的电学性质主要是由晶体中电子所处的状态来决定的。在介绍了晶体中电子的能带以后，下面我们就来談談导体、半导体和絕緣体有些什么区别。

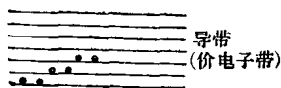
§ 1-5 导体、半导体和絕緣体的区别

人們在很早以前就知道晶体有导体、半导体和絕緣体之分。它們的电导率何以有那么大的差别，利用能带理論就很容易解釋清楚。

导体和非导体（指絕緣体和半导体）的区别 导体和非导体的能带結構分別如图 1-15 (a) 和 (b) 所示。导体的价电子能带是条沒有被电子填滿的导带。譬如像鋰、鈉、鉀、銅、銀、金等晶体，它們的价电子能带有一半

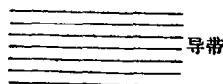
图 1-15

(a) 导体的能带結構



禁带

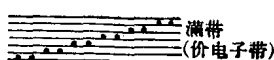
(b) 非导体的能带結構



禁带



(a)



(b)

能級是空的，其中的电子都能够参加导电运动，所以这些晶体是电导率很高的导体。至于非导体，它的价电子能带正好全部被电子填满；而价电子带上面的另一条能带则又是空的（这条能带我们称之为导带，理由在下面会讲到），一个电子也没有，所以也不能导电。这样的晶体就称为非导体。属于这类的晶体有金刚石、碘、碲、锗、硅等。

既然非导体的价电子能带是条满带、上面的导带又是空的；那么所有的非导体应该都是绝缘体，为什么有的非导体是半导体呢？

半导体和绝缘体的区别 原来上面所说的电子在能带中的分布，是假定在温度为绝对零度时的情况。只有在绝对零度时，非导体的价电子能带才真正是满的，它的导带才完全是空的；这时，所有的非导体晶体确实都是绝缘体。但是，如果晶体的温度高于绝对零度，那么情况就不同了。

当温度高于绝对零度时，晶体的内部开始出现无规则的热运动，这种热运动有时会使满带中的某些电子获得足够大的能量，激发它越过禁带，跃迁到上面的导带中去（这个过程叫做热激发）。这样一来，在导带里面就出现了少量的电子，导带也就具有一定的导电能力了。因此，在温度高于绝对零度时，非导体晶体并不是一点都不导电的。

激发到导带上去的电子数目，是由温度和晶体的