

TA32/262

全国电子类技工学校试用教材

晶体管原理

北 京 张 国 忠 主 编
椿树整流器厂

赠北京科普作协

作协: 张国忠 88.5.3



Z0031064

天津科学技术出版社

全国电子技工学校试用教材

晶体管原理

北京市 张国忠 主编
椿树整流器厂

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷二厂印刷

天津市新华书店发行

*

开本787×1092毫米 1/16 印张 11.35 字数 279,000

一九八三年十月第一版

一九八三年十月第一次印刷

印数：1—12,000

书号：15212·110 定价：1.10元

本书较系统地讲述了半导体物理和晶体管原理基本理论。全书共分四章，包括半导体物理基础、PN 结、晶体管原理和场效应晶体管。每章均附有复习题，书末备有附录。

书中着重介绍了物理概念和基本原理，力求内容紧凑、重点突出、深浅适当。

本书除可作为电子类技工学校教材外，还可作为半导体器件、无线电整机行业技术人员和初级技术人员的培训和自学教材。

本书第一、二章及附录由张国忠编写，第三、四章由宋尔生编写。本书由张国忠主编，王德和主审，高振英等参审。

前 言

为了适应技工学校电子类专业的教学需要，不断提高技工学校的培训质量，加速实现我国的四个现代化，国家劳动总局、第四机械工业部委托北京、天津、上海三市和四川、广东两省的劳动局、电子工业主管部门，组织编写了技工学校电子类三个专业（无线电技术、半导体器件、电子计算机）的部分技术基础课和专业课十二种教材。计有：电工基础、电子电路基础、电子测量与仪器、无线电接收设备、电视机原理调试与维修、无线电整机装配工艺基础、半导体器件制造工艺、半导体工艺化学、晶体管原理、制图与钳工知识、半导体集成电路、电子计算机原理。

这套教材对于二年制（招收高中毕业生）和三年制（招收初中毕业生）的技工学校均适用。这些专业的普通课教材没有另行编写，建议采用国家劳动总局和第一机械工业部委托上海市劳动局、上海市第一机电工业局一九七九年组织编写的全国技工学校机械类通用教材中的普通课教材。我们在组织这套教材的编写时，注意到了这两套教材在内容上的衔接。

根据技工学校的培养目标和教学计划的要求，这套教材在强调加强生产实习教学的同时，注意了加强基本理论知识和对新技术、新工艺的吸收。由于技工学校在教学范围内还有许多问题需要探讨，加之这套教材还没有通过教学实践的检验，故先作为试用教材出版发行。

因为时间仓促，编写经验不足，这套教材难免存在一些问题，恳切希望广大读者批评指正，以便作进一步修改。

国家劳动总局培训司

第四机械工业部教育局

一九八一年十二月

目 录

第一章 半导体物理基础	(1)
§1-1 半导体	(1)
§1-2 半导体中的能带	(4)
§1-3 半导体中的载流子	(11)
§1-4 费米能级	(15)
§1-5 非平衡载流子	(20)
§1-6 载流子的输运	(28)
§1-7 半导体表面	(43)
§1-8 晶格和缺陷	(47)
复习题一	(56)
第二章 PN结	(58)
§2-1 PN结	(58)
§2-2 PN结的电流—电压特性	(61)
§2-3 空间电荷区中的复合—产生电流	(69)
§2-4 空间电荷区的电场和宽度	(73)
§2-5 PN结的击穿	(86)
§2-6 PN结的电容效应	(93)
§2-7 金属—半导体接触	(97)
复习题二	(101)
第三章 晶体管原理	(103)
§3-1 晶体管的电流放大特性	(103)
§3-2 晶体管的反向电流与击穿电压	(117)
§3-3 晶体管的频率特性	(122)
§3-4 晶体管的大电流和功率特性	(131)
§3-5 晶体管的开关特性	(140)
复习题三	(153)
第四章 场效应晶体管	(155)
§4-1 结型场效应晶体管	(155)
§4-2 MOS 场效应晶体管	(161)
复习题四	(169)
附录	(170)
一、室温 (300K) 下硅、锗、砷化镓及二氧化硅的主要性质	(171)
二、硅、锗电阻率与杂质浓度的关系	(171)
三、常用的物理常数	(171)
四、半导体器件型号命名方法	(172)

第一章 半导体物理基础

§1-1 半 导 体

在日常生活中，物质一般处于三种状态，即气态、液态和固态。气态的特点是它们的微粒（分子、原子或离子等）彼此相距很远，相互吸引力很弱，各微粒可以自由向各方向运动，因此就不能有规则的排列。液态则不同，它们的微粒排列要紧密得多，吸引力相当显著，所以液态物质有一定的体积，可是这种吸引力还没有大到使微粒保持在一定位置上，因此液体没有一定形状，其微粒排列一般说来也是没有秩序的。只有固态，它们具有固定体积和形状，内部的微粒稳固地彼此联系着，只能在固定位置作轻微振动，因此可以说，只有物质处于固态时，构成物质的微粒才具有一定规则的排列。

一、晶体和非晶体

固态物质按其内部结构即微粒的排列形式而分为晶体和非晶体两种。晶体和非晶体原子排列平面示意图见图1-1。属于晶体（如图a）的物质有食盐、云母、金刚石、雪花以及半导体材料单晶硅、多晶硅等；属于非晶体（如图b）的物质有玻璃、石蜡、松香、塑料以及无定形硅等。

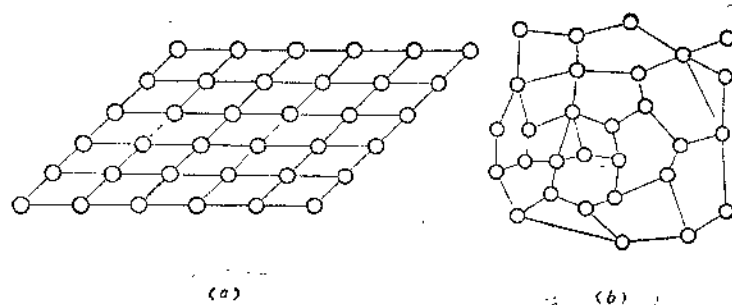


图 1-1 晶体和非晶体原子排列平面示意图

我们把由分子、原子或离子有规则的周期性排列构成的物体称为晶体。与非晶体相比，晶体的主要外部特征和宏观性质有如下几点：

（1）晶体的外表一般具有整齐规则的几何外形（如图1-2）。例如，自然生长起来的食盐，如果生长环境良好，就形成一个完整端正的立方体如图（a），明矾则形成八面体（如图b）。而非晶体在外形上不能自然形成规则的多面体。

（2）晶体的许多物理性质具有各向异性。也就是说，晶体的许多物理效应在不同的方

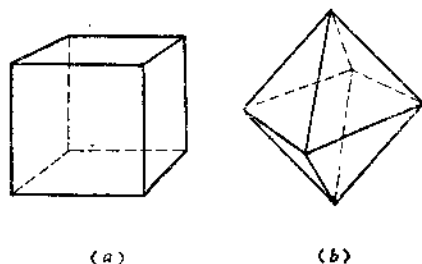


图 1-2 晶体的外形

向上是不同的。例如，晶体的解理性，即当我们打击一块晶体时，晶体特别容易沿着某一平面裂开，这就是晶体各向异性的一个突出例子。此外，晶体的膨胀系数、热导率、电导率、光折射率以及晶体的生长和熔解速率等，在不同的方向上也是不同的。而非晶体的物理性质则是各向同性的。

(3) 晶体具有最小的内能和固定的熔点。实验指出，由同样化学组分组成的物质，当它们从气态、液态或非晶态过渡到结晶态时(结晶过程)都要放热；与此相反，从晶态转变为非晶态、液态和气态时都要吸热。这说明在一定的热力学条件(压力和温度)下，由同样化学组分组成的物质以结晶状态所具有的内能最小。晶体受热到一定温度开始熔化，从熔解

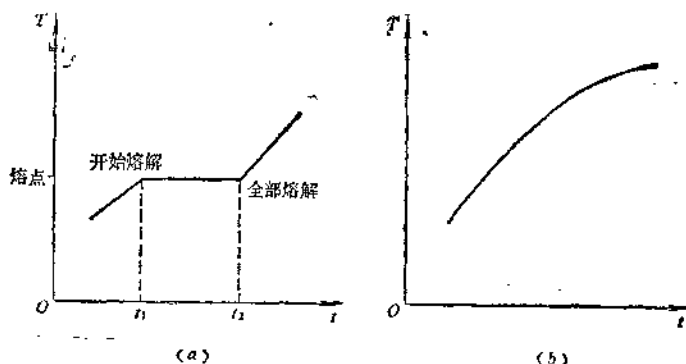


图 1-3 晶体和非晶体的加热曲线

开始到全部熔解成液态为止，温度始终保持恒定，也就是说，晶体具有固定的熔点。例如，冰的熔点为 0°C ，单晶硅的熔点为 1420°C 。而非晶体，例如，玻璃、松香等则无固定的熔点，非晶体受热至某一温度时，开始软化为粘度很大的液体，然后粘度逐渐变小，最后过渡到流动性很大的液体，在由固态逐步过渡到液态的整个过程，非晶体的温度随时间而连续不断升高，即无固定熔点。晶体和非晶体受热熔解的过程，可由图1-3表示。从图中可看出，晶体的加热曲线(如图a)有一段水平部分，非晶体的加热曲线(如图b)则是连续升高的。

晶体在熔解过程中所吸收的，热量全部消耗在状态的转变上，因而温度不升高。而在晶体全部转变为液态后，则所加的热量又用来增高液体的温度。这样，晶体的加热曲线就呈现出图1-3(a)的形状。

(4) 晶体和非晶体在结构稳定性和化学稳定性方面有较大的差异。由同样化学组分组成的物质，其化学性质同聚集状态有很重要的关系，结晶状态的物质要比非结晶状态的稳定。结晶状态的硼不仅在高温时不受氧的作用，而且能耐浓硝酸、烧碱等强腐蚀剂的作用；而非结晶状态的硼和浓硝酸、烧碱都起化学反应。

上面介绍了晶体宏观特征的主要方面，但应注意，由于生长条件的不同，同一种物质可以形成晶体，也可以形成非晶体。例如，半导体材料硅是晶体，但也有非晶态硅(无定形硅)存在。

二、多晶和单晶

组成晶体的微粒虽然是按一定规则排列的，但是由于规则排列的程度不同，晶体又可分为两种，即多晶和单晶。原子在整个晶体内的排列取向为单一者称为单晶，否则称为多晶。多晶内的原子也呈周期性的排列，但在不同的局部区域，原子的排列取向不同，即多晶可以看成是由若干取向不同的小单晶(称为晶粒)组成的。在这些小区域的交界处，原子的规则排列遭到破坏，出现了混乱。图1-4(a)、(b)分别画出多晶和单晶原子排列平面示意图。

为了形象地说明多晶和单晶的区别，我们作个比喻：体育场有团体操表演，在表演前，各队都集合各自的队伍，对每一个队伍来说，都是按一定规则排列的，不过有的队伍朝东，

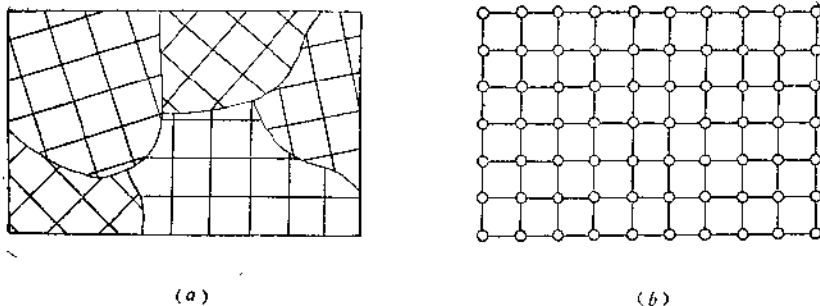


图 1-4 多晶和单晶原子排列平面示意图

有的朝南，甚至有的还朝西北，可以说，他们的各自“方位”是不一致的，整个团体操队伍表现出不规则排列，这时的团体操队伍就好像是以队为单位的“小单晶”所组成的多晶体。当各队进入体育场后，各队都面向指挥者，排列整齐，全体表演者方向一致，这样的团体操队伍就相当于一个单晶体。

前面曾经指出，晶体能够具有一定规则的外形，物理性质上具有各向异性，都是由组成晶体的微粒在空间排列上的规则性决定的。因此，确切地说，只有单晶才具有这两个性质。对多晶来说，虽然其内部的各个小单晶仍具有上述两个性质，但是这些小单晶取向不同，不同方向上物理性质的各向异性互相抵消，所以多晶体没有严格的规则的外形，各向异性也不明显了。特别值得注意的是，多晶中存在晶粒边界又带来一些新的问题。例如，边界处的成分和性质与晶粒内部不同，因此，一般而言，多晶不宜用来制作半导体器件。

三、导体、绝缘体和半导体

当我们剥开一根导线时，就会看到里面是铜线或铝线，外面包着的是塑料或橡胶。铜线或铝线是用来传导电流的，面外面包着的塑料或橡胶是用来隔绝电流的。具有良好导电能力的物质叫做导体，金、银、铜、铝等金属就是导体的例子，它们的电阻率在 $10^{-1} \sim 10^{-8}$ 欧姆·厘米的范围内。导电能力很差或不能导电的物质叫做绝缘体，其电阻率一般大于 10^{15} 欧姆·厘米，这类物质有塑料、橡胶、陶瓷、玻璃和干木材等。还有另一类物质，它既不属导体，又不属绝缘体，其导电能力介于导体和绝缘体之间，这种物质叫做半导体。

半导体的种类很多，按其化学成分可以分为元素半导体和化合物半导体；按其是否含有杂质，可以分为本征半导体和杂质半导体；按其导电类型，可以分为N型半导体和P型半导体。此外，还可分为磁性半导体、压电半导体、铁电半导体、有机半导体、玻璃半导体、气敏半导体等。

目前，应用的半导体材料有硅、锗、硒、砷化镓、磷化镓、铟化镓等，其中以硅、锗应用的最为广泛。

四、半导体的特性

半导体得以被广泛的实际应用，这不仅是由于它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，更重要的是，在不同的外界条件下，半导体的导电能力能够在很大范围内变化，其主要性质有：

1. 半导体的导电能力随温度升高而迅速增加

半导体与金属相比，主要有两个差别：

(1) 金属的电阻率是随温度的升高而增加的, 也就是说, 金属的温度系数是正的; 而对于半导体则相反, 当温度升高时, 半导体的电阻率会迅速减小, 可见其电阻率的温度系数是负的。

(2) 金属的电阻率随温度的变化较慢, 而半导体的电阻率随温度的变化则快得多。以纯硅为例, 当温度从 30°C 降低至 20°C 时, 其电阻率增加一倍; 而金属铜, 即使温度上升 100°C , 电阻的增加也不到一半。

2. 半导体的导电能力随所含的微量杂质而发生十分显著的变化

普通材料纯度达到99%或99.9%就算是很高了, 而剩余的1%或0.1%杂质通常不会影响物质原来的特性。但对于半导体来说, 情况就不同了。纯硅室温时的电阻率为 $214000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, 如果在纯硅中以每一百万个硅原子中掺入一个杂质原子的比例掺入杂质(例如磷原子), 此时硅的纯度虽然仍高达99.9999%, 但其电阻率却从 $214000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 骤降到 $0.2\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 。

3. 半导体的导电能力随光照而发生显著变化

一个沉积在绝缘基板上的硫化镉薄膜, 其暗电阻为几十兆欧。当受光照后, 电阻可能下降到只有几十千欧, 阻值改变了几百倍。实际上这样的硫化镉薄膜就是一个光敏电阻。

此外, 半导体的导电能力还随电场、磁场等的作用而改变。

人们正是利用半导体导电能力容易随力、热、电、磁、光和杂质等作用而改变的特点, 制成了花样繁多的半导体器件, 如力敏、热敏、光敏器件、场效应器件、霍尔器件以及各种半导体二极管、晶体管、可控硅(硅晶体闸流管)、集成电路、体效应器件等。

§1-2 半导体中的能带

导体、绝缘体和半导体的导电能力为什么会有显著的差别? 为什么半导体的导电能力具有上述的一些特点? 半导体的导电机构是怎样的? 为了弄清这些问题, 就需要了解物质的原子结构和半导体的能带理论。

一、原子中电子的运动状态和能级

我们知道, 物质由分子组成, 分子由原子组成, 原子又由原子核和电子构成。原子核带正电, 在原子的中心; 电子带负电, 按一定的轨道绕原子核旋转, 就同行星围绕太阳运行一样。电子的运行轨道有好几层, 称为电子壳层。每一个壳层包含一定数目的轨道, 每个可能的轨道上最多只能有一个电子, 硼原子结构行星图如图1-5所示。图1-5(a)为立体示意图, (b)为平面示意图。

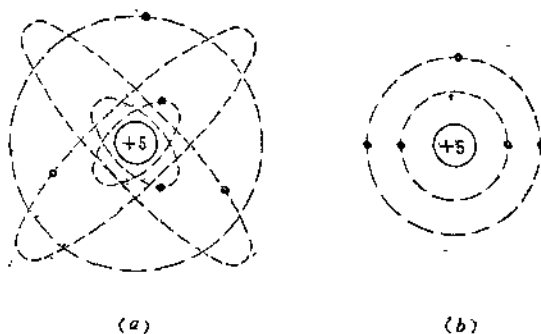


图 1-5 硼原子结构行星图

原子的结构和元素的化学性质有着密切的关系。在元素周期表中, 随着原子序数的增多, 核外电子数也增多。由于每一电子壳层容纳的电子数有一定限制, 多出来的电子就得排

到外一层去。排列的规则是：第一层（最内层）最多为2个电子，第二层为8个电子，第三层为18个电子……。硅原子有14个电子，锗原子有32个电子，它们排列的平面结构分别以图1-6(a)、(b)所示，最外层都只有4个电子。

原子中的电子和原子核之间存在着吸引力，最内层电子离原子核最近，受的引力最大，或者说受到原子核的束缚最强，越外层的电子受原子核的束缚就越弱。最外层的电子受的引力最小，这些电子称为价电子。元素的许多化学、物理性质都取决于价电子的数目。

从能量上看，每一层轨道上的电子都有确定的能量（电子的能量包括电子的动能和它在原子核电场中的电位能）。不同壳层上的电子的能量是不相同的，越里层的电子，能量越低，越外层的电子能量越高。其原因是，如果要将第一层的电子移到第二层上，就必须克服原子核的作用力，从能量来讲，也就是必须给电子以能量。这可以用人造卫星绕地球环行运动做一个比喻，越外层的电子轨道相当于越高的人造卫星轨道。而我们都知道，要把人造卫星射到更高的轨道上去，必需用更大的推力，给它更大的能量，这就是说，轨道越高，能量也越高。在原子中，电子只能在一些特定的轨道上运动，不同壳层轨道上的电子能量不同。所以，原子中电子的能量只容许取一些特定的值，其中每个能量值称为一个能级。为了形象地描绘出各个壳层的能量，可在表示能量高低的图上用一条条高低不等的水平线表示电子的能级。这种图称为电子的能级图，如图1-7所示。图中每条横线代表一层轨道的能量——能级，最下面的一条横线的高度是 E_1 ，它代表第一层轨道的能量；高度 E_2 的横线代表第二层轨道的能量 E_2 ，依此类推。

有了能级图就可以用电子填充能级来描述电子运动的情况，而不需要考虑电子在空间运动的具体轨道了。这样，我们说第一层轨道上的电子与电子填充在能级 E_1 是一回事了。

电子总是先填充能量较低的能级，后填充能量较高的能级，直至电子填满为止。每个能级上最多能填的电子数由下式决定：

$$2n^2 \quad n \text{ 是 } 1、2、3 \cdots \cdots \text{正整数}$$

如第一层 $n=1$ ，最多能填2个电子；第二层 $n=2$ ，最多能填8个电子；第三层 $n=3$ ，最多能填18个电子……。

硅原子有14个电子，填满第一个和第二个能级后，第三个能级只有4个电子而未填满，更高的能级则完全是空的，如图1-8所示。这好比一幢宿舍大楼，一层和二层都住满了人，三层只住满了部分房间，四层以上则都空着。

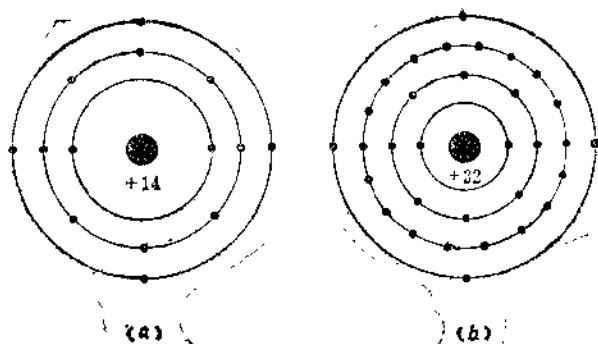


图 1-6 硅、锗原子结构平面示意图

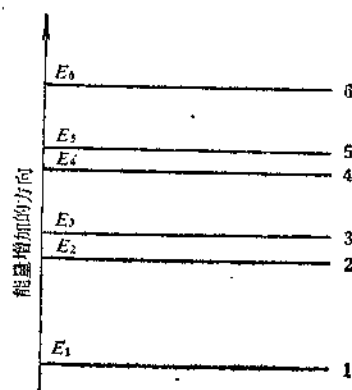


图 1-7 电子能级图

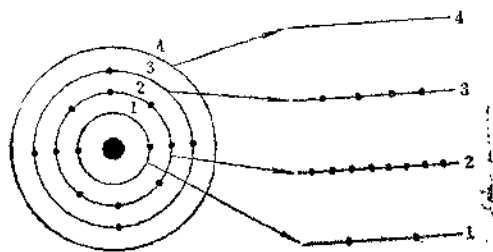


图 1-8 硅原子中电子填充能级的情况

二、晶体中电子的共有化运动和能带

(1) 电子的共有化运动 绝大多数的半导体是由规则排列的大量原子组成的，原子与原子之间靠得非常紧密。如每立方厘米硅中就有 5×10^{23} 个原子，可见半导体中原子的排列是非常紧密的。

那么，半导体中的电子运动和单个原子时的情况有什么不同呢？

在半导体中，相邻原子之间的距离非常近，所以电子不仅受到自己所属的原子核的作用，同时还受到相邻原子的作用。相邻原子的电子轨道将互相交迭，电子可以由一个原子上转移到更远的原子上去，从而电子可以在整个晶体内运动。这时电子已不属于个别原子了，而为晶体内所有原子共有，电子的这种运动称为共有化运动，示意图如图1-9所示。

不过，电子在原子间的转移并不是任意的，它只能在能量相同的轨道之间转移。例如，电子只能从第一个原子的轨道1转移到第二个原子的轨道1，从第一个原子的轨道2转移到第二个原子的轨道2……，见图1-9。

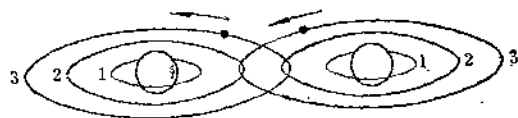


图 1-9 电子的共有化运动示意图

(2) 半导体中的能带 在晶体中即使是相同轨道的电子，由于作共有化运动的速度有快有慢，所以能量就有差别，这些电子在单个原子时是处于同一能级的，而在共有化运动时就处于不同的能级了。不过这些电子的能级量差甚少，所以用来表示电子能级的横线也靠得很密，就是说原子组成晶体之后，原来与电子轨道相对应的能级，分裂成为很多个非常靠近的能级，这些非常靠近的能级组成一个能带，

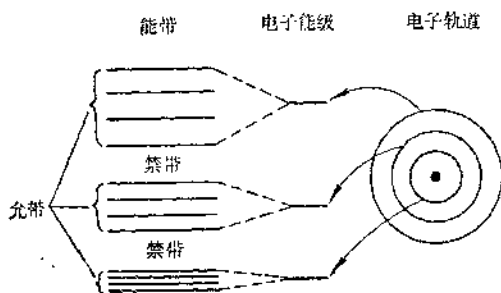


图 1-10 原子能级分裂为能带

亦即一个能级分裂成一个能带。

图1-10就是电子在原子中的轨道以及与其相对应的能级与能带示意图。

从图1-10中可以看到，最下面的一个能带是与第一层轨道上的电子能级相对应的，再上面的一个能带是与第二层轨道的电子能级相对应的，依此类推。

能带是描述晶体中电子能量的，是分析晶体中电子运动的重要手段。

三、导带、价带、禁带和禁带宽度

原子中的电子，按照一定的规则由低到高顺序填充能级，即先填充低能级后填充高能级。

晶体中，电子填充能带的顺序也是由低到高，先填能量较低的能带，后填能量较高的能带。原子最低能级上的电子，在组成晶体后就处于晶体最低的能带中，较高能级上的电子处于较高的相应能带中。

在能带中，那些被电子填满的能带即能带中每一个能级都被两个电子所占据，称为满带；那些没有电子填充的能带，即能带中每一个能级上都没有电子，称为空带；两相邻能带间的间隙称为禁带。

在硅、锗半导体中，能量最高的那个满带为价电子所填充，所以又称为价带，也可以说，价电子填充的那个满带称为价带。价带和原子中最外层轨道上的价电子能级相对应。可见，满带是泛指那些为电子所填满的那些带，而价带是满带之一。

空能带中能量最低的那个空带称为导带。

通常所说的半导体禁带宽度，是指价带顶和导带底之间的能量差，一般用 E_g 代表，即禁带宽度 E_g 等于导带最低能量与价带最高能量之差。

表1-1列出了在室温和正常气压下，锗、硅、砷化镓的禁带宽度 E_g 的数值。该表还给出了绝对零度(0K)时的禁带宽度。

表1-1 锗、硅、砷化镓的禁带宽度

元 素		Ge	Si	GaAs
E_g (电子伏特)	室温	0.80	1.12	1.43
	0K	0.89	1.16	1.52
$\Delta E_g/\Delta T$ (电子伏特/开)		-3.9×10^{-4}	-2.4×10^{-4}	-4.3×10^{-4}

实验表明，大多数半导体的禁带宽度随温度增高而减小，即 $\Delta E_g/\Delta T$ 是负值。在室温附近，锗、硅、砷化镓的禁带宽度随温度近似线性变化， $\Delta E_g/\Delta T$ 的数值也列于表1-1。禁带宽度随温度增高而减小，可以粗略认为，由于温度增高，电子热运动加剧，共有化运动的电子能量差别增大，能带增宽，所以禁带宽度减小。

禁带宽度还与压力有关，在室温附近，硅的禁带宽度随压力增大而减小，锗和砷化镓的禁带宽度随压力增大而增大。

禁带宽度 E_g 的大小是由半导体材料本身性质所决定的。禁带宽度是半导体材料的主要参数，它对半导体器件的最高工作温度、工作频率等都起着决定性的影响。

四、能带中的电子和空穴

硅最外层有四个价电子，所以每个硅原子要分别和相邻的四个硅原子组成四个共价键。也就是说，每一个硅原子各自拿出一个价电子共同使用。这样，两个相邻的原子就有两个价电子相互作用，构成电子对。这对价电子为两个原子所共有，并且把两个原子紧紧地结合在一起，就象两个原子伸出两只手臂，互相拉紧一样。

人们把原子的这种结合叫做“共价键”。硅单晶原子排列平面示意图如图1-11所示。

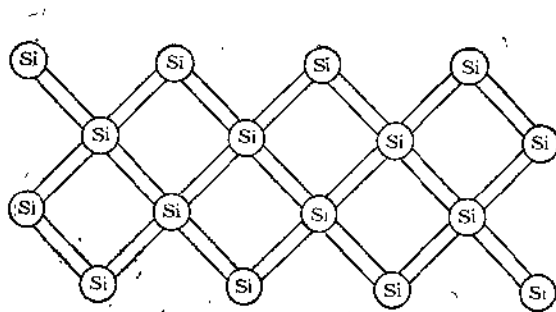


图 1-11 硅单晶原子排列平面示意图

这种共价结合并不是牢不可破的，当有外界作用（如光照、加热等）时，就会有一部分价电子因能量增加而摆脱了束缚，成为自由电子，与此同时，原来的键被破坏了，造成了电子的“空位”。由于原来原子核带的正电和电子所带的负电相等，不显电性，而在跑掉了一个电子以后，少了一个负的电子电荷，就如同电子空位带一个正的电子电荷一样。这个电子的空位叫做“空穴”，空穴带正电，其电量等于电子电量。

光照可使硅中价键上的束缚电子得到能量摆脱原子的束缚，产生自由电子和空穴，如图1-12所示，我们说光照产生了电子空穴对。空穴会因附近的共有电子来补充而消失，但在那个跑出的共有电子的原来位置上又出现一个空穴，依此类推，这个过程持续下去就形成了空穴的运动。空穴的运动可用下面的例子来类比：有许多

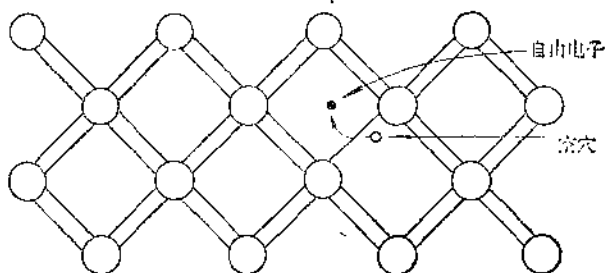


图 1-12 硅中电子和空穴

人在礼堂开会，每个人坐在各自的座位上。当一个人从自己的座位上离开，并在礼堂里自由走动时，就好比是自由电子。与此同时，他原来的座位也就空着了，他相当于空穴。若附近座位上的人移坐过来，而另一个座位的人再坐过来……，人们依次移位的结果，看起来就好像是空座位在礼堂移动，这就相当于空穴的运动。

当有外加电压时，电子和空穴都可做定向运动，形成电流。因此，为了处理问题方便起见，我们把空穴的运动等效于一个带正电粒子的运动。电子和空穴统称为“载流子”，因为它们都能运载电流。半导体的导电正是通过电子和空穴的运动来进行的。

正是由于半导体内存在一些束缚电子，这些束缚电子比较容易被激发出来，从而形成电子空穴对，所以在外界条件变化时，半导体导电能力才会发生显著变化。

在金属导体中，原来就存在着大量的自由电子，所以光照或温度变化对它的导电性能影响很小。而绝缘体中的电子被束缚很紧，外界作用很难使它们挣脱束缚而成为自由电子，所以绝缘体极难导电或不导电。

下面用能带的观点分析一下电子空穴对的产生。

首先应该知道，构成共价键的电子也就是填充价带的电子（组成共价键的是硅、锗原子最外层的四个价电子），它们能量最高，所以，在能带里它们填充的也是能量最高的满带——价带。可能会发生疑问，共价键不是一对对地把硅或锗原子连接起来的电子吗？它们怎么又是价带里的电子呢？实际上两者并不矛盾。能带不过是人们为了处理问题方便而提出的一种方法，能带图并不是实物图。它不是用来说明电子的空间位置的，而是着重讲电子能量的。共价电子的能量相差极小，所以在能带图中它们均处在价带中。

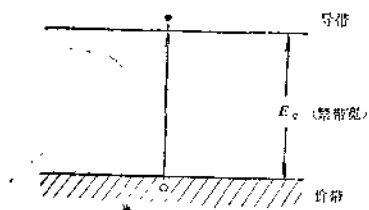


图 1-13 能带中激发的电子空穴对

从能带观点来看，电子摆脱共价键的过程就是电子离开了价带，从而在价带中留下了空的能级，就象图1-13所画的那样。一个电子从价带跳到导带，称作电子从价带激发到导带。其结果是在导带中增加了一个电子，而在价带中则出现了一个空的能级。这表明半导体中导电的电子就是处于导带中的电

子，而在原来填满电子的价带中出现的空能级则代表着导电的空穴。

值得说明的是，产生电子空穴的过程是电子从能量较低的价带激发到能量较高的导带的过程。从能带图上看，这种激发所需要的最小能量是禁带宽度 E_g 。禁带宽度 E_g 越大，所需要的激发能量也越大，激发也越困难。

五、杂质能级和电离能

在结构完整且不含杂质的半导体中，导带中的电子是从价带激发上来的，每激发一个电子，价带中就留下一个空穴。因此，导带中的电子数目永远与价带中的空穴数相等。导电机构仅由半导体本身能带结构所决定。实际上，绝对的纯是不可能的，而一般所说的本征半导体是指只含极微量杂质、导电机构主要由本征激发所决定的纯净半导体。在室温附近，许多半导体材料的本征激发载流子为数极少，所以纯净半导体导电能力很差。

半导体的许多特性都取决于所含杂质的类型和数量，可以说，制造晶体管的基本问题就是要控制半导体各部分所含的杂质。半导体中有两类杂质：一类是施主杂质和受主杂质，它们的作用主要是改变半导体的载流子的浓度，使半导体导电能力增强；另一类杂质称为复合中心杂质，主要是促进半导体中载流子的产生与复合。在本节我们讨论施主杂质和受主杂质，而把复合中心杂质放在另节讨论。

1. 施主杂质

施主杂质指硅中掺入的V族元素杂质，如磷、砷、锑、铋等。这些V族元素杂质替代了一部分硅原子的位置，但是，因为它们外层有五个价电子，其中四个与硅原子形成共价键，多余的一个电子因束缚很弱而极易成为可导电的自由电子，见图1-14。所以一个V族元素杂质原子，可以向硅提供一个自由电子而本身成为带正电的离子，通常把这种杂质叫施主杂质。

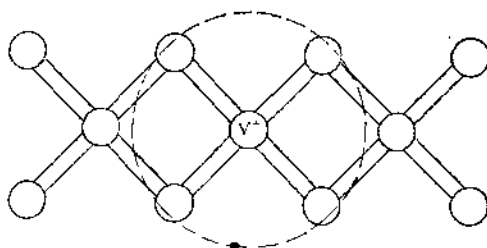


图 1-14 硅晶体中的施主杂质

当硅中掺有施主杂质时，硅主要靠施主提供的电子导电，这种主要依靠电子导电的半导体叫做N型半导体。

使电子摆脱原子束缚的过程称为电离，需要的能量称为电离能。硅中V族施主的电离能见表1-2。

表1-2 V族施主的电离能

施 主	磷	砷	锑	铋
电离能 (电子伏特)	0.044	0.049	0.039	0.069

从表1-2可看出，V族施主电离能是很小的，在普通的半导体器件的工作温度下，施主上的电子几乎全部电离，成为导电的电子（导带中的电子）。

把施主的能级和硅的能带图画在一起，就如图1-15所示。施主能级的位置在导带的下面，它和导带底（一般用 E_c 表示导带底能量）的距离就是电离能。在较低的温度下，比如液氮温度（-196℃），多余的那个价电子就束缚在这个能级上。这个电子如果获得大于电离能的附加能量，就能摆脱施主的束缚，跳到导带上去。图1-15中箭头表示电子从施主能级激

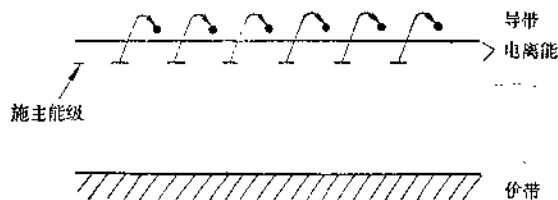


图 1-15 施主能级

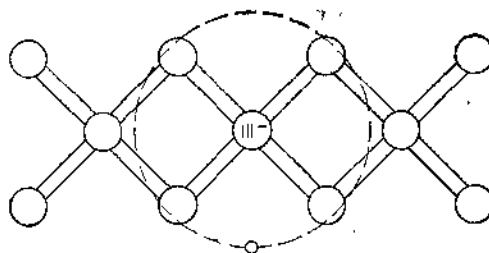


图 1-16 硅晶体中的受主杂质

发到导带的电离过程。从能级图上可看出，由于施主能级离导带底很近，在室温下，施主基本都已电离。因此在只含有施主杂质的半导体中，导带中的电子主要来自施主能级。电子的浓度主要是由施主的浓度决定。

2. 受主杂质

当把Ⅲ族元素杂质（硼、铝、镓、铟）掺入硅中时，它们在硅晶体中也替代了一部分硅原子的位置。但是，因为Ⅲ族元素的原子仅有三个价电子，在与周围硅原子形成共价键时，产生一个缺位，这个缺位就要接受一个电子而向晶体提供一个空穴，见图1-16。所以，一个Ⅲ族杂质原子可以向硅提供一个空穴，而本身接受了一个电子成为带负电的离子，这种杂质叫受主杂质。当掺入受主杂质时，硅主要靠受主提供的空穴导电，这种主要靠空穴导电的半导体叫做P型半导体。

在一定的温度下，价带电子由于热激发的作用会从价带跳到受主上，这个过程叫做受主电离，所需要的能量叫做受主的电离能。硅中Ⅲ族受主的电离能见表1-3。

表1-3 Ⅲ族受主的电离能

受 主	硼	铝	镓	铟
电离能（电子伏特）	0.045	0.057	0.065	0.016

受主束缚空穴的能量也可以用能级图来表示。实验测定，受主能级在价带的上面，见图1-17，它与价带顶（一般用 E_V 表示价带顶能量）的距离就是受主的电离能。电子从价带跳到受主能级上也可以说是空穴摆脱受主束缚，而从受主能级上回到价带里。

图1-17中的箭头表示电子跃迁到受主能级的电离过程。由于一般受主的电离能都很小（即受主能级离价带顶很近），在室温下受主杂质基本上都已

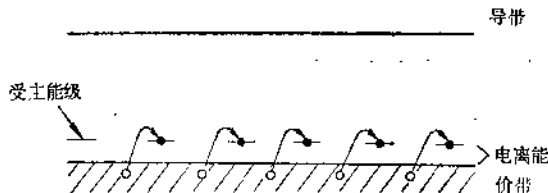


图 1-17 受主能级

电离。所以，在普通半导体器件的工作温度范围，受主基本上全部电离，空穴成为导电的空穴。因此，在只有受主的半导体中，价带中的空穴主要来自受主能级，空穴的浓度基本上等于受主浓度。

从上面讨论可以知道，半导体中的杂质原子用来束缚电子或空穴的能级叫做杂质能级。许多杂质都可以在硅、锗的禁带中形成杂质能级。V族杂质形成施主能级，Ⅲ族杂质形成受主能级。当施主杂质（或缺陷）能级上有电子占据时，杂质原子（或缺陷）是电中性的，而

失去电子后则成为带正电的中心。当受主杂质（或缺陷）能级上没有电子占据时，杂质原子（或缺陷）是电中性的，而能级有电子时是带负电的中心。Ⅴ族施主能级和Ⅱ族受主能级一般都在禁带中，分别靠近导带底和价带顶，它们的电离能很小，这样的能级称为浅能级。在室温下，施主浅能级向导带提供电子，受主浅能级接受从价带激发上来的电子，从而在价带

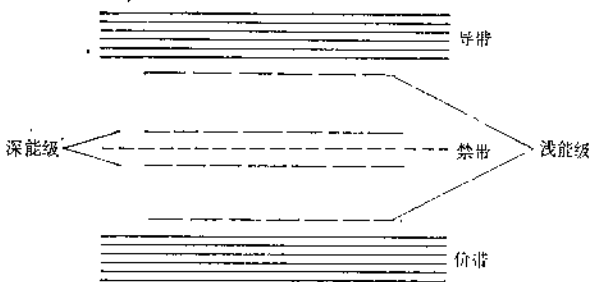


图 1-18 浅能级和深能级的示意图

形成空穴。在禁带中部附近，离开导带底或价带顶边缘较远的杂质能级（或缺陷能级）叫做深能级，见图1-8。束缚在深能级上的电子不易激发。深能级主要起复合中心或陷阱的作用。

§1-3 半导体中的载流子

一、P型半导体和N型半导体

前面讲过，在纯净的本征半导体中掺入施主杂质，施主电离后就放出大量能导电的电子，使这种半导体中的电子浓度 n 大于空穴浓度 p ，这种半导体称为电子型半导体或N型半导体。在纯净的本征半导体中掺入受主杂质，受主电离后就放出大量能导电的空穴，使这种半导体中的空穴浓度 p 大于电子浓度 n ，这种半导体称为空穴型半导体或P型半导体。

对于杂质半导体来说，电子与空穴的浓度是不相等的。在半导体中，占多数的载流子，称为多数载流子，简称为多子；占少数的载流子，称为少数载流子，简称为少子。

在P型半导体中，空穴的数目多于电子，参与导电的主要是空穴，空穴是多数载流子（多子），电子则是少数载流子（少子）；在N型半导体中，电子的数目多于空穴，参与导电的主要是电子，电子是多数载流子，空穴则是少数载流子。

二、电子—空穴对的产生和复合

半导体中除去多子还有少子，根本原因在于热运动。半导体中的原子，可以说经常处于十分“激动”的状态，它们不停地进行热运动。晶体中的原子，虽然不象气体分子那样能自由地跑来跑去，但实际上它们在其它原子包围之中不断振动。这种热运动是无规则的，就一个原子来说，运动有时强，有时弱。所以，在这里或那里经常会有一些原子热运动特别激烈，以致能把一个共价键上电子甩出去，摆脱共价键的束缚，产生了一个导电的电子，同时，在共价键处形成了一个空穴。这就是说，半导体由于其本身的热运动，会经常产生电子—空穴对。图1-19表示这种电子—空穴对的产生。

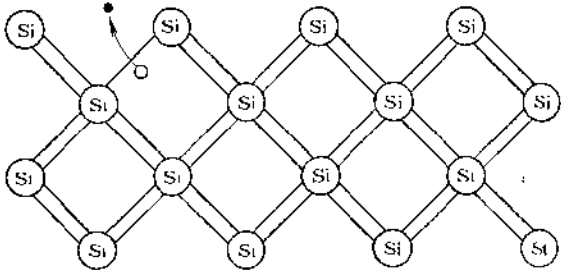


图 1-19 电子—空穴对的产生（共价键）

从能带图上看，这个过程就是一个价电子从热运动得到足够的能量，使它跳到导带上去，结果使导带中增加一个电子，同时在价带

中产生一个空穴。这个空穴可以看作是一个带正电的粒子，它可以在价带中移动。当价带中的电子移动到空穴处时，空穴就消失了，而电子则占据了空穴的位置。这个过程可以看作是空穴在价带中的移动。空穴的移动实际上是价带中电子的集体运动的结果。在P型半导体中，空穴的浓度远大于电子的浓度，因此空穴是多数载流子，而电子是少数载流子。在N型半导体中，电子的浓度远大于空穴的浓度，因此电子是多数载流子，而空穴是少数载流子。

中出现一个空穴，如图1-20所示。

以N型半导体为例，一旦由于产生过程，在价带出现了空穴，导带中的电子也会从导带落进价带的空穴级，多余的能量转为热运动，这种过程叫复合，如图1-21所示。复合和产生相反，它使电子—空穴对消失。

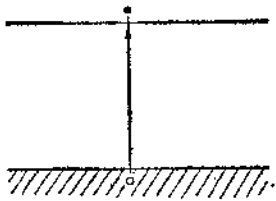


图 1-20 电子—空穴对的产生（能带中）

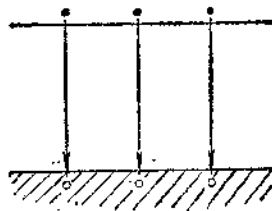


图 1-21 电子—空穴对的复合

在半导体中，既有产生，又有复合，将会形成一种什么情况呢？

假如开始时，N型半导体中没有空穴，即只有施主提供的电子，这时，空穴将因产生而出现，但最开始数目极少。虽然会发生复合，但开始还是很少的，产生是超过复合的，电子和空穴的数目将不断增加。当温度不变时，原子热运动情况不变，所以电子—空穴的产生是稳定不变的，每秒钟总是产生那么多对电子和空穴。随着空穴数目的增加，电子和空穴碰头的机会就增加起来，复合的几率随着增多。但是，只要复合还没有赶上产生，电子和空穴还要增多，使复合继续增加。这样发展下去直到复合完全赶上了产生，每秒钟复合掉的电子—空穴和产生的相等，半导体中电子和空穴浓度就不再变化，此时叫达到了热平衡。

在热平衡时，半导体的载流子浓度有一个恒定的数值，即电子和空穴浓度是不变的。但是产生和复合仍在持续不断发生，只不过是单位时间内复合的电子—空穴对等于产生的而已。

三、电子和空穴浓度的热平衡关系

当用 n 和 p 分别表示半导体中的电子和空穴浓度时，则单位体积、单位时间内的复合率可以写成：

$$\text{复合率} = \nu np \quad (1-1)$$

所谓复合率是指单位时间内（例如1秒钟）复合消失的电子—空穴对数。1-1式表明，复合率是和电子、空穴的浓度成正比的，这是因为电子、空穴的浓度越大，它们碰在一起的机会就越多。例如，电子增加一倍，空穴和它相遇的机会也会增加一倍。 ν 是一个表示电子与空穴复合作用强弱的常数，称为复合系数。

单位体积内的产生率是温度的函数，但是与 n 、 p 无关。所谓产生率是指在单位时间内，由于热运动而产生的电子空穴对数，温度越高，热运动越强，产生就越多。产生率与温度的关系可以写成：

$$\text{产生率} \propto e^{-E_g/kT}$$

式中 E_g ——半导体禁带宽度；

k ——玻尔兹曼常数。

从这个指数因子还可以看出，产生率还与禁带宽度 E_g 有关， E_g 越大，产生率越小。这是因为 E_g 代表产生电子—空穴对所需要的最低能量。从能带图看，价带电子最少需要 E_g 的能量才能跳到导带上去。因为原子热运动的平均能量用 kT 来衡量，在室温下 kT 只有0.026电子伏