

苏联A. И. 齐斯恰柯夫著

涂 象 初 译



人民邮电出版社

体及其应用



目 录

緒言.....	1
半导体的特性.....	3
电流流过半导体时的特点.....	7
半导体二极管.....	15
温差电现象.....	19
半导体光电池.....	23
核能的轉換.....	24
半导体的应用.....	25
现代的半导体二极管及其应用.....	33
晶体再生器.....	40
用半导体器件来代替电子管的合理性.....	43
晶体管的作用原理和类型.....	46
晶体管的发展途径.....	54
半导体放大器的应用.....	60
“旧的”和新的电子学.....	63

緒 言

許多技術工作者和工程師們近年來常跟半導體器件打交道，但他們過去在研究電工學時，並沒有碰到“半導體”這個概念。電工技術中所使用的固體電工材料分為導體和絕緣體兩類，導體能很好地傳導電流，而絕緣體則幾乎完全不能傳導直流電流。蘇聯科學家 А. Ф. 約飛、Б. И. 達維多夫、В. Е. 拉施卡列夫、Б. Т. 柯洛米耶茨、Б. М. 沃耳以及許多其他國家的物理學家們，長時期地研究了那些既不屬於導體類，又不屬於絕緣體類的大量材料的性質。從這些研究工作的結果中，我們可以預期半導體的應用將帶來卓越的技术成就。展開在眼前的遠景是如此宏偉，仿佛這倒象是一個遠離实际的科學幻想。然而在今天，研究工作者的科學預見正在變為現實，未來的電工學，特別是無線電電子學，在很大程度上跟半導體領域內的卓越發明和成就之實現有着緊密的關聯。

人們對於逐漸積累起來的知識的实际作用往往長期地估計不足，直到這知識由於某種重大的發明或創造而突然放出新的、明亮的光輝時，情況才突然扭轉。晶體管——可以代替電子管的半導體放大元件，它對於半導體研究工作，正是起了上述的使估計不足的情況發生突然扭轉的作用。

三十多年以來，技術的進展以及文化上的許多成就，都跟電子管的改進有關。自動化技術、遙控技術以及現代電信等方面的許多重大成就，主要是由於無線電電子學的發展而得到的。利用了電子管，我們就可以實現無線電通信、無線電廣播和電視，就可以製造出高質量的錄音設備和有聲電影，製造出大廳里和體育場上的擴音

系統，還可以製造電樂器、無線電導航系統、雷達、自動調節器，以及許多在國民經濟和日常生活中已必不可少的器件，機器和其他設備。

由於有電子管，複雜的計算機製成了。這些計算機在幾小時內所完成的任務，在以前即使由大批熟練的專家來作，也需要幾十年的時間。

已經製成了供自動翻譯用的電子機器，它可以把某一種文字翻譯成另一種文字，因而減輕了翻譯人員的勞動。能把人的講話用文字記錄下來的機器也正在創制中。所有上述的一切，將使得節省科學、技術和文化工作者的腦力成為可能。這儲備下來的腦力，將有效地用來更迅速地提高人民的文化和增進人民的福利。

近年來，無線電電子管的發展進入了一個重要的新階段，這個階段是跟半導體科學的成就有關聯的。電子器件在無線電發送機、無線電接收機、自動化設備等裝置中的最重要任務，是放大和產生快速的電振蕩。直到不久以前，最常用的解決這類任務的器件還是電子管。然而，幾年前出現的、基本性質跟電子管類似的晶體管，顯得在某些方面要比電子管好得多。

在過去常常有這樣的情況，科學上的成就在幾十年內僅僅是少數專家的所有物。電子學在現代生活中的特別意義，使得人們對它特別重視。現在，不僅是專家，而且千千萬萬的人都對半導體發生了興趣。新型放大器的發展成為最新的無線電電子學的根本問題之一，因而獲得了全國性的國民經濟上的意義。關於鎢這個半導體，我們可以在1936年出版的物理辭典第一卷中讀到下面這句話：它“在技術上至今還沒有任何的價值”，而現在，鎢已成為無線電電子學上最重要的、最有希望的材料了。

早在1954年，蘇聯工業就已實驗性地生產了19種類型的鎢晶體管；目前，科學家們正致力於改進這些晶體管的質量和增加晶

体管类型的数目。这个领域内的许多最新的成就使得我們可以斷言，在今天，半导体放大器技术的发展将使无线电电子学来一次真正的变革，这次变革的意义将超过約四十年前由于广泛使用电子管而发生的变革的意义。

党和政府的許多決議之中指示我們，必須更进一步地发展仪器制造工业，无线电工程和电子学，必須大量生产各种形式的无线电装置和电子装置，广泛使用电视和超短波的无线电广播，建立无线电接力通信，以及在我们国家的国民經济中使用无线电技术的方法；現在已經很明显，所有这一切都跟迅速掌握半导体放大器这个迫切的实际任务有着紧密的关系。苏联共产党第20次代表大会关于1956—1960年发展苏联国民經济的第六个五年計劃的指示中規定，要广泛地进行有关半导体器件的科学研究工作，并扩大它們的实际应用。

半导体的现代应用之中，有許多項几十年前就已經知道了。然而，只是在了解了晶体管这项发明的巨大意义以后，人們对于这些用途的兴趣以及对于整个半导体的兴趣才大大地增加。就在最近几年里，在全世界的科学技术文献中，平均每天都出現1—2篇以上有关半导体的論文，而且半数的論文是关于晶体管的。关于这个問題的文献早已有了好几千种了。

迅速发展着的科学研究工作，为在所有技术部門有效地应用半导体不断地开辟着新的可能性。其中的某些新应用，在不久的将来将对技术进展起着不亚于晶体管的作用。

半导体的特性

談到半导体，我們所指的主要是那些具有晶体結構以及在导电机构方面具有某种特点的各种固体物質。这种电导率的数值比导体

的要小很多，而且可以由于各种因素的影响而在一个非常宽广的范围内变化，这范围的两个端值分别相当于导体和绝缘体的电导率。

金属的氧化物、硫化物、硒化物、以及锗、硅、碲、硒等化学元素都是半导体。某些金属的合金也具有半导体的特性。

马依克尔·法拉第在 1883 年发现，当温度上升时，硫化银的电阻减少，这个现象的发现可算是比较系统地研究半导体特性的开始第一步。那时已经清楚地知道，金属导体当受热时电阻增加。因此，硫化银的这个反常特性的发现，自然而然地引起了注意，虽然对这个现象的物理解释是在很久以后才找到的。

受热时电阻减少而受冷时电阻增加——这是半导体的最重要的显著特性之一。在很多情形下，当温度降低到相当的程度时，金属的电阻将减少到极其微小的数值，减少到零，这相当于所谓超导电性的现象。相反地，半导体如果冷却得很厉害，它的电阻将差不多增加到无穷大，变成了电介质。

1839 年，伯克来尔观察到了一个现已应用在近代半导体器件中的现象——电极受到光照时会产生电动势。

B. 斯密特在 1873 年发现，硒的电阻在受到光照时将会减少。半导体所特有的这个被称为光电导的现象在近代技术上也有广泛的应用。

1874 年，Φ. 布朗在研究金属跟各种硫化物晶体（方铅矿，黄铁矿）之间的接触时，发现某些接有半导体的电路的电阻跟电流的方向有很显著的关系。这现象也引起了别的研究者的注意，他们也发现接有半导体的电路的电阻可能跟外加电压的极性和数值有显著的关系。

对某一方向的电流来说，电阻比较小，而对反方向的电流来说，电阻的数值要大很多倍。因此，这电路是具有“单向导电性”的，也就是说，沿某一方向容易传导电流，而沿另一方向不容易传导电

流。这个以前也曾某些情形下发现过的现象，几乎过了半个世纪后才得到解释，而这一现象现在则可以用来制造交流电流的半导体整流器，后来又被用来制造半导体放大器。不久以后，在1876年，人们又知道了，硒这个半导体也具有上述特性。亚当姆斯和戴依发现，含有硒的电路在受到光照时也会产生电动势。

1883年，弗里特斯发表了硒制交流电流整流器的有关研究资料。在1886年得到了半导体锗。Д. И. 門捷列也夫在很早以前（1871年）就根据理論上的判断而预言了这个元素的存在和它的某些特性。然而，锗的巨大实际价值在很久以后，直到最近几年前才弄清楚。

过了几年，A. C. 波波夫发明了无綫电，这是促进半导体研究又一推动力，使得这研究有了明确的方向：需要得到能把极微弱的高频交流电流予以整流的灵敏整流器——无綫电信号检波器。

利用整流接触而借听筒来实现无綫电信号的远程收听的可能性，是П. H. 雷布金和Д. С. 特罗伊茨基在1899年发现的；随后，A. C. 波波夫又制成了第一个检波器，并进行了試驗。整流的物理实质在那时虽然尚未弄明白，但在1904—1907年期间，已经有某些科学家提出和研究了各种结构的半导体整流器——无綫电信号检波器。也正是在这个期间，肯定了众所周知的由半导体晶体（方鉛矿，硅，金刚砂等等）跟金属弹簧尖組成的检波器。随后很多年内，这个领域中的研究工作缓慢下来了，这主要是由于在改进和应用电子管方面取得了很多的成就。

由此可見，早在半个世纪以前就已发现了，含有某些属于半导体之类的物质的电路具有下列极重要的特点和性質：

- 甲) 当温度上升时电阻减小；
- 乙) 当受到光的作用时电导率增加（电阻减小）——光电导；
- 丙) 当受到光照时出现电动势和电流；
- 丁) 单向导电性和整流作用。

半导体的这些特性之中的最普遍的一个，是受热时电阻减小。出现光电导的情形也比较多。其他的两个特性只是对于个别的材料、在一定的条件下才表现得显著，而且在较长的一段时期内，出现这两个特性的普遍条件还没有弄得足够清楚。

对固体物质的电性质的进一步研究，大大地有助于将半导体的这些特殊性质应用到各种各样的电子仪器中。在这方面，物理学家

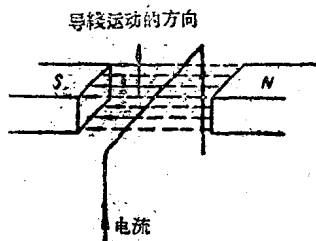


图1 导线在磁场中的运动

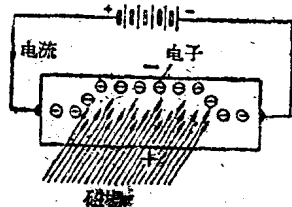


图2 在磁场作用下，导线内的电子的位移（霍尔效应）

霍尔在1879年所发现的一个现象，(从那时起便称作霍尔效应)，起了特别大的作用。这现象的实质如下：在磁场的作用下，金属中的电子将沿着跟电流和磁场垂直的方向偏移。

我们知道，由于磁场对载有电流的导线的作用，将使得这导线沿图1所示的方向运动。如果导线不动，那么，这导线里的电子——负的载流子就将沿着上述那个方向位移，而这些电子的运动便形成了电流。这过程的简图如图2所示。

沿着导线内的电子的偏移方向，也就是沿着横的方向，出现了电位差，这电位差的大小跟电流以及磁场强度有关。

后来，对半导体也进行了霍尔效应的测量。电位差的测量可以用来测定自由载流子的数目。这样就清楚了，半导体中的运动电荷的数目远远少于金属导体中的。观察霍尔效应而又同时测量电导，就可以使研究者很容易了解半导体内的电现象的特点。

下面这个情况是一个特别重要的发现：在电流方向和磁场方向

相同的情况下，半导体以及某些金属中由于霍尔效应而引起的横向电位差可能会具有不同的极性。这就使得我们有理由认为，运动着的载流子可能不仅是带负电的（电子），而且也可能是带正电的（图3）。

最后，还肯定了：载流子的数目在温度上升时将急剧增加；如果更换所试验的半导体样品，则载流子数也会变化，而且，载流子数是跟样品的化学成份有关的。在高温时，载流子数跟半导体内的外来化学杂质含量的依赖关系就显得弱多了。

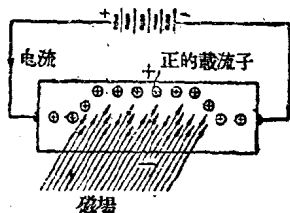


图3 正载流子的位移

关于半导体物理性质的现代科学概念，由于1930—1950年期间世界各国所进行的积极研究而得到了最广泛而又完全的证明。例如，在B.И. 拉施卡列夫，Я.И. 弗兰克尔，B.И. 达维多夫（以上是苏联人），Г. 韦莫伯尔（德国人）等人的工作中，研究并说明了光线对半导体的作用。A. Ф. 约飞，B.И. 达维多夫，И. Е. 塔姆以及其他的苏联物理学家，还有A. 威尔逊，B. 萧克莱，H. 摩特以及各国的许多研究工作者，研究了电流流过含有各种半导体触点的电路时的情况（包括半导体的整流作用）。这些研究促成了晶体管的发明。

电流流过半导体时的特点

发生在半导体中的电现象有一个最重要的特点：存在有两种形式的导电性，这个特点可以解释许多半导体器件的特性。

在由金属导体组成的闭合电路中，载流子是数量很多的自由电子，它们的运动形成了电流。这就是所谓的价电子，它们构成原子的外层电子壳层，并使得物质中的各个原子相互结合起来。

在电性方面呈中性的金屬原子是由带正电荷的微粒——离子（一个带正电的核和許多个电子）以及环绕着离子的許多价电子所构成的（价电子的负电荷总数等于正离子的正电荷）。金屬物体中的电子仿佛形成一种均匀分布的电荷云，其中悬挂着一些正离子。

如果没有这种电子“气”，带同名电荷的許多离子将彼此排斥，这排斥力将使得物体分崩离析。由于物体中有許多的电子，它們跟正离子相互作用，这才保证了物質結構的稳定性。当电子要逸出到金屬之外时，它們将受到阻碍——受到正离子的吸力。

金屬的离子排列得彼此相距同样的距离，形成空間晶体格子。电子的运动就在这格子内进行着。

如果把电动势加在导体上，那么沿着导体将出现电場的作用，这电場是以光速传播的。在这电場的作用下，闭合的电子流沿着导体慢慢地移动。物質的原子是不动的，每一个原子給出一个或几个自由电子。而且，当这些电子走开时，便有另一些电子走来更替，因而使得电流能够无限长时期地流着。

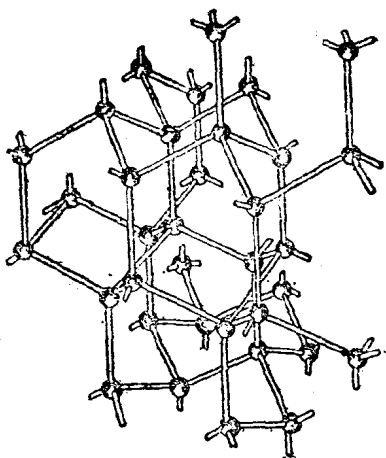
在半导体中，也可能有电子导电性，不过半导体中的自由电子数很少，比金屬中的要少很多倍。

在半导体中，价电子相互作用，形成一个稳定的体系。半导体晶体的原子彼此間相距一定的距离，仿佛是处在格子的节点上，而实际上最重要的一种情形是：这些原子間是借电子对的方式彼此连系着。下面便是这种結合的一个例子。

对于每一个电子对來說，由相邻的两个原子各給出一个电子。这两个电子都不是繞某一个原子的核运动，而是繞着这两个原子的两个核运动。每一个电子对的两个电子都被两个核吸引着，因而形成了牢固的力学結合。

原子通常都具有若干个价电子，而且这些价电子是借相应数量的电子对的方式来形成彼此間的結合的。例如，应用于許多种器件

之中的半导体锗，它属于化学元素周期表的第四族，这就是说，锗具有四个价电子。因此，每一个锗原子都是跟四个邻近的原子相结合。为了和某一个相邻原子相结合，这个原子给出自己的四个价电子中的一个，并从一个相邻的原子那儿再得一个作为结合键用的电子；它的其余三个价电子，将用来跟别的原子形成结合键。



上述的原子之间的结合键的

空间结构，简示于图4。在图4 图4 晶体中的原子间结合键的示意图中，小圆球代表正离子，而把这些正离子连接起来的小杆，则象征着成电子对形式的结合键。由图4可知，每一个原子都借着四个电子对，也就是借着8个电子而跟四个相邻的原子结合着。如果换一个更简单、更明显的方式来表示，则可以用图5那样的平面简图来表示

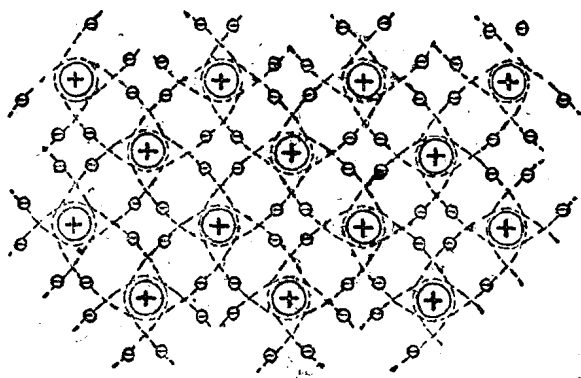


图5 简化了的原子间结合键的示意图

这些結合鍵。

固体的物理性質取决于晶体格子的离子之間的电子結合鍵的牢固程度。这类結合鍵的力量愈强，晶体就愈难于溶化、溶解或被破坏掉。

如果所有的价电子都象图 4 和图 5 那样，处在稳定的原子間結合鍵上，那么物質中就不会含有可以沿某一方向移动、因而能形成电流的自由电子。因此，上述这类物質就不能传导电流，也就是說，它象电介質一样。

在很多情形下，如果借加热的方式来增加电子的动能，即加剧它們的热运动，就很容易改变上述情况。这时，可以使价电子跟物質的离子之間的結合鍵破裂。这些价电子变成了自由电子，它們可以在晶体格子內移动，就象金屬的电子那样。如果对半导体加一个电动势因而造成电場，那么，这些电子将被电动势源的負极所排斥，并吸向正极。这些电子沿着电場的方向移动，因而造成电流。

所以，在热作用下，物体能得到导电性。

光綫对物体的作用也会引起类似的后果。光綫的能量传递給电子以后，将使得这些电子脫离开它們跟原子之間的結合鍵，因此跟上述的情况一样，可以发生电荷沿外加电場方向移动的现象，也就是說，会有电流流过。

半导体跟电介質不同，即使在室温时，半导体中的自由电子数也相当多。自由电子数随着温度的上升而迅速增加，因而电流增加，而半导体的电阻則相应地减少。

金屬中的自由电子多到了实际上可以認為是无穷多。当受热时，自由电子在晶体格子中作快速的乱运动，同时，原子(离子)也在作热振动，这两个因素所引起的后果只会是阻碍自由电子沿着外加电場的方向运动。因此，当温度上升时，金屬导体的情形跟半导体的情形正好相反，这时，金屬的电阻不是减少，而是增加。半导

体还有一个特点：当温度变化时，半导体电阻的变化比导体电阻的变化要厉害得多。这是因为在半导体中，运动着的载流子的数量比较少，在这种情形下，电流和电阻的数值就直接取决于自由电子的数量。即使载流子的数量增加不大，而就百分比的增加来说，却已经非常可观了，因而大大地影响了电导率。跟金属中的情形一样，半导体中的原子的热振动也会阻碍载流子的移动，但由此而引起的电导减少如果跟由于自由载流子数目显著增大而引起的电导增加比较起来，前者就微不足道了。

用类似的道理也可以说明电阻跟光照的关系：光的能量使电子大量地脱离它们跟原子之间的结合键，因而当有外加电动势时，半导体中的电流就增加了。

晶体格子的基元如果处于失掉电子的状态，它就称为空穴。

空穴的形成相当于出现了正电荷。因此，当中性原子失掉电子时，将出现两类电荷——负电荷和正电荷。当它们合并（复合）时，电子又跟原子结合在一起，这些原子遂重新变成中性。当没有电场存在时，自由电子作乱运动，直到它跟失去了一个电子的那对互相结合的原子之一重新又合并时为止。

电子和空穴能够自由存在而尚未复合的时间是几个微秒到几百个微秒。当自由电子和空穴由于复合而消失时，经常会有新的自由电子和空穴出来更替，因此应当认为，物质中总有一定数量的自由电子和空穴存在。

跟自由电子一样，缺少电子的地点——即空穴，也是可以移动的。由于热运动的缘故，中性原子的价电子容易走到正在吸引它的、带正电的、具有空穴的那个邻近原子上，在那儿，这价电子将使原先失掉了一个电子的那个结合键得到补充。与此相应，空穴就转移到失去了这个价电子的那个原子上，而原先带正电的原子则变成中性的了。

空穴的出現就这样地增加了电子在物質中移动的可能性。这种移动的情形可以用一个有名的兒童难题——跳棋子在方格子中的移动來說明。棋子的移动情况如图 6 所示。

如果方格子都占滿了 (图 6, 甲), 那么, 棋子不可能作相互間

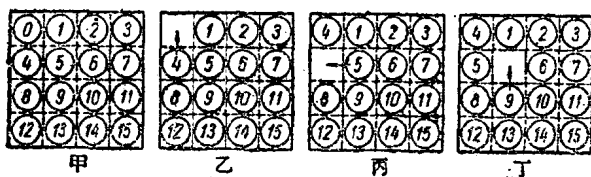


图 6 当有空格子时, 跳棋子的移动情形

的移动。这相当于在半导体中沒有空穴。如果拿走一个棋子, 那么剩下的全部棋子就可以依次地沿着方格子移动了 (图 6, 乙, 丙, 丁)。空的格子跟半导体中的空穴类似, 它这时就相应地从这个地点移到了另一个地点。

如果没有电场存在, 空穴将在物質內作乱运动, 就象电子那样。

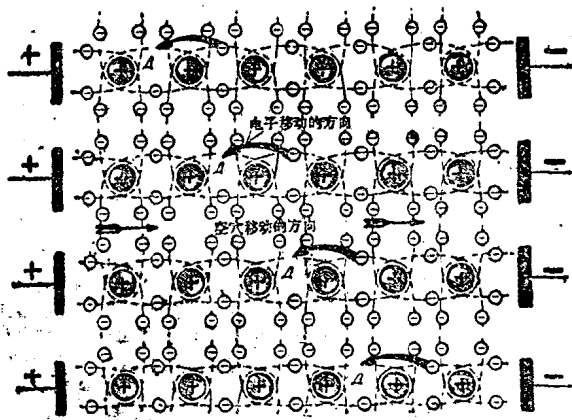


图 7 当空穴导电性时, 半导体中的正电荷的移动情形

这相当于正电荷的乱运动。如果有了电场的作用，空穴的移动会具有有秩序的、有方向的特征：电子沿着外加电场的电力的方向移动，而空穴——沿相反的方向移动。图 7 所示的，是空穴 μ 在連續的某几个瞬間的移动过程。由此可見，除了电子导电性以外，半导体中还有空穴导电性——由于正电荷（空穴）的移动而形成的导电性。

在純淨的半导体中，释放出来的电子的数目等于空穴的数目。这时的导电性——所謂本征导电性是比较小的。如果引入少量的其他物質的原子作为杂质，就可以破坏这种均衡状态，而使得电子导电性或空穴导电性占优势。正是在这些情况下，我們在观察霍尔效应时才会发现不同符号的横向电极化——象图 2 和图 3 所示的那样。

例如，如果在晶体格子中有一个原子被杂质原子所更替，而且假設这杂质原子比邻近的、半导体主体的原子多一个价电子，那么就会有一个电子不加入跟邻近原子之間的价鍵，因而它就比較容易脱离自己的原子。下面这一点具有重大的意义：在上述情况下，杂质原子是很容易给出电子的，而在原先的情况下，当每一个原子的周围都是同类的原子而且它們又彼此結合在一起时，要给出电子就难得多了。

所以，在热、光、或者其他因素的作用下，杂质原子将会离子化，因而产生出参与电子导电性的自由电子。

反之，如果杂质原子比主体物質的原子少一个价电子，那么当离子化时，杂质原子将从邻近的原子那儿捕获一个电子，并跟这电子形成較牢固的結合，这就造成了空穴。在这种情形下，半导体中的电流主要不是由于过剩电子的移动，而是由于空穴的移动。

例如，四价的鍺如果以五价的磷、銻或砷作为杂质便具有电子导电性，如果以三价的硼、鋁、銦、鎵等等作为杂质便具有空穴导电性。头一种情形下，載流子是負的，而第二种情形下，是正的。

与此相应，可以区分为n型（负导电性的）锗和P型（正导电性的）锗。

举个例子，如果在锗晶体中有一个主要原子被五价的镓原子所替换，那末，后者也会跟晶体格子的其他原子一样，以自己的五个价电子之中的四个，跟邻近的原子牢固地结合起来。在这时，这个原子的外电子壳层中的第五个电子并没有跟别的原子形成结合键。由于热运动的缘故，即使在室温条件下，这个电子也很容易脱离原子，在原子之间的空间内自由地运动。

给出了一个电子的镓原子带正电，即变成了正离子。跟金属中的离子一样，这个镓的离子在晶体格子中占有固定的位置，也就是说，它不能移动，因而不能形成电流。

相反地，如果有一个锗原子被三价的铟原子所替换，那么，后者可以从晶体中的另外一个原子那里取得所缺少的第四个电子，因此，对所讨论类型的晶体格子来说，这个铟原子跟相邻原子之间的结合键就是完全的、正常的，因而就和主体物质（锗）的原子的情形一模一样了。而这时，这个铟原子带了负电，在电性方面不再是中性的了，也就是说，变成了负离子。由于电子转移到了杂质原子之中，在晶体格子内，这个电子原先所在的地方就变成了一个空穴。

自由载流子的数目取决于杂质的含量。如果加进了足够多的杂质原子，便可以使导电性大大地增加，增加到比该半导体的本征导电性大几十万倍甚至几百万倍。把杂质加进金属之中时，金属的导电性不是增加，而是减少，这特性是半导体和金属根本不相同的一个地方。

使半导体得到自由电子的杂质——即可以产生电子导电性的杂质，称为施主杂质。从主体半导体拿走电子、从而产生空穴和空穴导电性的杂质，称为受主杂质。

由于杂质的类型不同，可以使同样一个半导体或具有电子导电

性，或具有空穴导电性。这个情况被广泛地应用在半导体的器件的制造上。把一定数量的几种不同的杂质加入一个晶体，就可以在这晶体的相邻几个区域内造成不同数值和不同类型的导电性。

半导体二极管

电工和无綫电电子学上最重要的电流变换过程之一，是把交流电整流。为了这个目的，可以采用二极管（二极管，充气二极管）、热阴极充气整流器、水银整流器、以及其他的整流元件。“干的”、“固体的”、没有真空的半导体二极管也可以完成上述任务，这种半导体二极管所根据的现象是：当某些不同类型导电性的半导体薄层彼此接触时，接触处具有单向导电性。已有的各种晶体检波器，以及应用得很广泛的氧化铜整流器和硒整流器，也都是基于这个原理。

在不同类型导电性的两块半导体的交界层内，当电流沿某一方向流动时，空穴和电子将彼此相向运动，并在会面时合而为一。这是所谓的正向电流状态。两类电荷的运动情形如（图 8，甲）所示。在图中，用带“负号”的小圆圈代表电子，用带“正号”的小圆圈代表空穴。电子和空穴的复合不仅发生在两个薄层的交界面上，而且发生在这些薄层内。

现在所常采用的制备 $P-n$ 结（空穴——电子结）

的工艺，可以使得某一薄层

（通常是空穴型薄层）的导电性比另一薄层的大很多很多。这时，载流子将由浓度大的区域进入浓度小的区域，减少后者的电阻，从

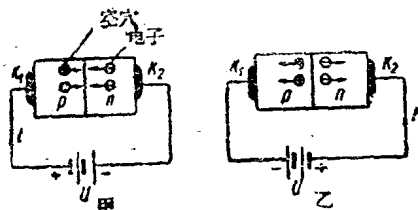


图 8 半导体二极管的原理