

近代物理讲座

第十讲 半导体中的能带与能级

秦 国 刚

(北京大学物理系)

为什么金属与绝缘体起不到半导体的作用？为什么各种半导体材料的性能有这样大的差异？要回答这些问题就需要了解半导体的能带结构与金属及绝缘体有什么不同，也需要了解各种半导体的能带结构有什么特点。

不管用什么方法生长的半导体晶体，都不可能绝对纯净和完美无缺，总存在一些杂质与缺陷。杂质与缺陷会在半导体的禁带之中引入深浅不同的能级，浅能级与深能级都对半导体的性质有重要影响，但它们的性质与影响方面是很不一样的。本文扼要介绍半导体的能带结构与浅能级和深能级。

一、半导体能带结构的初步讨论

以硅为例来说明半导体能带结构的一些基本特点。硅原子有 14 个电子，其组态是 $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2$ 和 $3p^2$ 。当 N 个硅原子集聚而组成硅晶体时，它们内层电子的能级 $1s, 2s$ 与 $2p$ 分别转化为硅晶体的不同能带。这些能带是， N 个简并的原子能级在原子间的相互影响（作为简并微扰）下分裂的结果。对于原子的内层电子来说，上述相互影响相当微弱，分裂很小，所以能带就很窄。

对于硅原子的价电子来说，在原子组成晶体之际，电子状态发生了重大的变化。先是原子 $3s$ 与 $3p$ 能级的四个波函数 $\varphi_s, \varphi_{p_x}, \varphi_{p_y}$ 与 φ_{p_z} “杂化”成为四个新的波函数 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 与 φ_4 ，它们是 $\varphi_s, \varphi_{p_x}, \varphi_{p_y}$ 与 φ_{p_z} 的如下线性组合：

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= (1/2)(\varphi_s + \varphi_{p_x} + \varphi_{p_y} + \varphi_{p_z}), \\ \varphi_2 &= (1/2)(\varphi_s + \varphi_{p_x} - \varphi_{p_y} - \varphi_{p_z}), \\ \varphi_3 &= (1/2)(\varphi_s - \varphi_{p_x} + \varphi_{p_y} - \varphi_{p_z}), \\ \varphi_4 &= (1/2)(\varphi_s - \varphi_{p_x} - \varphi_{p_y} + \varphi_{p_z}). \end{aligned} \quad (1)$$

图 1 示出 φ_s 和 φ_{p_x} 的角度分布，可以看到， φ_s 的分布是球对称的，而 φ_{p_x} 的分布是哑铃状的。 φ_{p_y} 和 φ_{p_z} 的分布也是哑铃状的，其方向分别沿 y 轴和 z 轴。杂化的结果使哑铃的一头膨胀，另一头缩小。 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 与 φ_4 在空间的取向如图 2 所示，它们分别指向正四面体的四个顶角的方向。如(1)式所示的杂化称为 sp^3 杂化（一个 s 轨道，三个 p 轨道杂化）。设 a 与 b 是硅晶体中相邻的两个原子，它们的取向彼此正对着的两

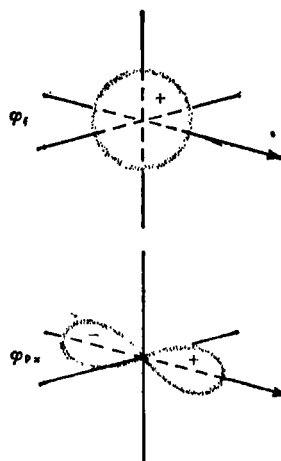


图 1 φ_s 和 φ_{p_x} 的角分布

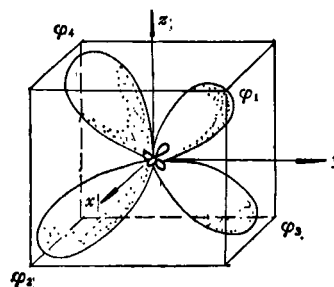


图 2 杂化轨道 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 和 φ_4

个杂化原子轨道若是 φ_a 与 φ_b ，则 φ_a 与 φ_b 可以组成两个不同的键轨道：成键态 $\varphi_a + \varphi_b$ 与反键态 $\varphi_a - \varphi_b$ ，前者的能级较低，而后者的能级较高；前者的电子云在 a, b 两原子之间有较高密度，而后者的电子云在 a, b 两原子之间有较低密度。图 3 表示当硅原子组成硅晶体时，价电子状态能量的变化^[1]。图 3(a) 表示自由硅原子的 $3s$ 与 $3p$ 能级。3(b) 表示 sp^3 杂化后原子轨道 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 和 φ_4 中任意一个的平均能量。3(c) 表示相邻杂化原子轨道构成键轨道后成键态与反键态的能量。3(d) 表示不同位置的成键态在相互影响的微扰作用下分裂成为价带，以及不同位置的反键态分裂成为导带。导带与价带之间没有量子状态的区域称为

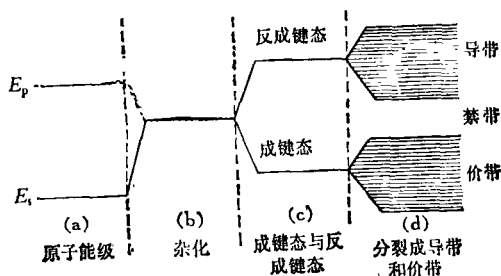


图3 硅原子组成晶体时价电子状态的变化

禁带。

设 \$N\$ 个硅原子组成硅晶体，如果考虑自旋的两种取向，则每个硅原子便有二个 \$3s\$ 状态与 6 个 \$3p\$ 状态，即每个硅原子都有八个价电子状态。当原子轨道组成键轨道时，状态数并未改变，因而 \$N\$ 个硅原子组成的硅晶体共有 \$4N\$ 个成键状态与 \$4N\$ 个反键状态，即价带与导带各有 \$4N\$ 个状态。至于价电子数，因每个硅原子有四个价电子，故 \$N\$ 个硅原子共有 \$4N\$ 个价电子。在绝对零度下，这 \$4N\$ 个价电子刚好充满了价带的 \$4N\$ 个状态，因而这时硅的价带是满的，导带是空的。

在绝对零度下导带是空带，价带是满带，因而半导体是不导电的。当温度上升时，价带的一些电子吸收热能跃迁到导带，这样导带有了电子，价带有了空穴，半导体便开始有导电能力。温度愈高，电子与空穴愈多，电导率就愈大。如果以 \$n\$ 与 \$p\$ 分别表示导带电子与价带空穴的密度，则有如下关系：

$$n \cdot p = A \exp(-E_g/kT), \quad (2)$$

式中 \$E_g\$ 是禁带宽度，\$k\$ 是玻耳兹曼常数，\$T\$ 是绝对温度，\$A\$ 虽然与 \$T\$ 有关，但是由于它随温度的变化远不如 \$\exp(-E_g/kT)\$ 为快，因此可以近似认为它与温度无关。对于一个杂质缺陷很少的半导体，导带电子几乎都是由价带热激发出来的，所以有 \$n \approx p\$，这时根据 (2) 式，得

$$n \approx p \approx \sqrt{A} \exp(-E_g/2kT). \quad (3)$$

对于不同的半导体，\$\sqrt{A}\$ 差别不很大，因而一定温度下的 \$n \approx p\$ 取决于 \$E_g\$。在一般情况下 \$E_g\$ 与 \$T\$ 决定的是 \$n\$ 与 \$p\$ 的乘积，我们把电子与空穴中浓度较大的称为多数载流子，浓度较小的称为少数载流子（下面会看到，多数载流子的浓度取决于半导体中的掺杂量）。由 (2) 式可见，当多数载流子浓度一定时，少数载流子的浓度取决于 \$E_g\$ 与 \$T\$。\$T\$ 愈小，\$E_g\$ 愈大，少数载流子的浓度愈小。少数载流子的浓度在半导体中是很重要的，它决定了 \$p-n\$ 结的反向漏电流等参数。

一般半导体的禁带宽度为 \$0-3\$ eV，而绝缘体的 \$E_g \ge 5\$ eV。至于金属，它的导带是部分地填充的，对电导有贡献的电子浓度很大，因而电导率远大于半导体。

红外技术要求对波长在 \$10 \mu\text{m}\$ 附近的红外线能够

物理

很好地检测（这时相应光子的能量为 \$0.12\$ eV），这就要求禁带宽度近似为 \$0.1\$ eV 的半导体材料。一种适用的红外材料是 \$\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}\$。由于 \$\text{HgTe}\$ 的禁带宽度为零，\$\text{CdTe}\$ 的禁带宽度为 \$1.5\$ eV，所以控制 \$x\$ 可以调节 \$\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}\$ 的禁带宽度为 \$0-1.5\$ eV 间的任意值。

二、半导体能带结构的进一步讨论

假设在晶体内，所有原子核及所有其它电子对某一给定电子的作用，可近似地用平均“有效”势场的作用来代替，这样一种近似称为单电子近似。在单电子近似下，晶体中电子的定态薛定谔方程为

$$[-(\hbar/2m)\nabla^2 + V(\mathbf{r})]\varphi_{n,\mathbf{k}} = E_n(\mathbf{k})\varphi_{n,\mathbf{k}}, \quad (4)$$

这里 \$V(\mathbf{r})\$ 是具有晶格周期性的平均“有效”势场，可以证明

$$\varphi_{n,\mathbf{k}} = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}u_{n,\mathbf{k}}(\mathbf{r}), \quad (5)$$

其中 \$u_{n,\mathbf{k}}(\mathbf{r})\$ 是周期函数，它的周期与晶格的周期相同，\$\varphi_{n,\mathbf{k}}\$ 称为布洛赫函数。(4) 式与 (5) 式中的 \$n\$ 与 \$\mathbf{k}\$ 起着量子数的作用，\$\mathbf{k}\$ 的分量为 \$k_x, k_y, k_z\$，也可以说，\$n\$ 和 \$k_x, k_y, k_z\$ 是标记晶体中单电子运动量子态

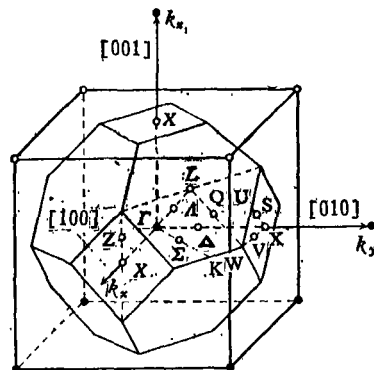


图4 面心立方格子的布里渊区

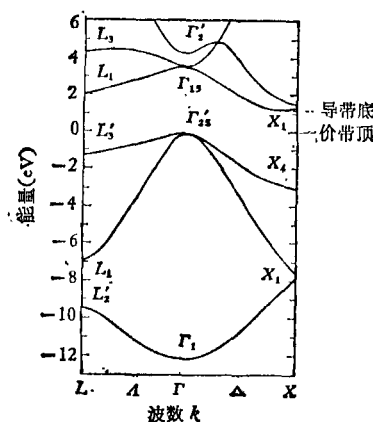


图5 硅的能带结构

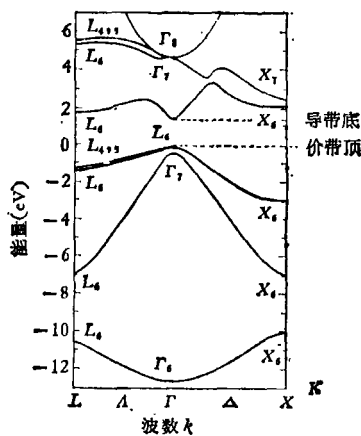


图6 砷化镓的能带结构

的四个量子数； n 表示属于哪一个能带； k 表示带中的哪一个态， $|k|$ 的量纲为长度的倒数， $\hbar k$ 的量纲是动量，它确有动量的许多特点，常称为电子的准动量。

实际上 k 被限制在一定形状与大小的范围之内，这范围称为布里渊区，它取决于晶体的布拉伐格子。硅与锗这两个半导体取金刚石结构，III-V族化合物半导体取闪锌矿结构，它们的布拉伐格子都是面心立方，布里渊区的形状如图4所示^[2]。其中 Γ 、 X 和 L 等是布里渊区中的对称点， Δ 、 Λ 和 Σ 等是布里渊区中的对称线。图5及图6分别表示理论计算所得的硅与砷化镓的能带结构。在这两张图的右半侧给出，当 k 由布里渊区中心点 Γ 点出发，沿着 Δ 线（即沿着 $\langle 001 \rangle$ 方向），最后到达 X 点时，各能带能量作为 k 的函数图；而左半侧给出，当 k 由 Γ 点出发，沿着 Λ 线（即沿着 $\langle 111 \rangle$ 方向），最后到达 L 点时，各能带能量作为 k 的函数图。图上还标出了导带能量极小（导带底）与价带能量极大（价带顶）的在布里渊区中的位置。由图6可知，砷化镓的导带底位于 Γ 点，价带顶也非常接近于 Γ 点，即导带底与价带顶位于布里渊区同一点的附近。由图5，硅的导带底位于 Δ 线上，即导带底处于布里渊区 $[1, 0, 0]$ ， $[-1, 0, 0]$ ， $[0, 1, 0]$ ， $[0, -1, 0]$ ， $[0, 0, 1]$ 和 $[0, 0, -1]$ 六个方向上^[3]，共有六个能量极小点，也叫做六个能谷。硅的价带顶处于 Γ 点，也就是说硅的导带底与价带顶位于布里渊区的不同点。通常把导带底与价带顶处于布里渊区同一点的半导体，叫做直接禁带半导体，而把导带底与价带顶处于布里渊区不同点的半导体，叫做间接禁带半导体。

现在来看在这两类半导体中发生的光吸收和光发射过程。光吸收就是光照射半导体时，价带电子吸收光子跃迁到导带的过程。在这过程中，能量与准动量都要守恒。准动量守恒要求，跃迁后电子的准动量等于跃前电子的准动量与光子动量之和。由于光子的动量很小，单纯吸收光子的过程中，电子的准动量或 k 基

本上保持不变，这种跃迁称为竖直跃迁，因为跃迁前后的状态基本上处于布里渊区的同一点。对于直接禁带半导体来说，由于导带底与价带顶处于布里渊区同一位置，单纯吸收能量足够的光子，电子就可由价带跃迁到导带。对于间接禁带半导体，导带底与价带顶在布里渊区的位置不同，单纯吸收光子时，电子不能由价带顶跃迁到导带底。这是因为光子动量小，不足以提供导带底与价带顶电子准动量的差额，因此电子由价带顶跃迁到导带底，必须在吸收光子的同时，吸收或发射一个声子。在这里光子主要提供跃迁所需能量，而声子则主要提供跃迁所需的准动量。由于与单纯吸收光子的过程相比，这是一个二级过程，所以发生的几率就要小很多。这就是说，在间接禁带半导体（例如硅）中，当光子能量略大于禁带宽度时，光吸收系数远比直接禁带半导体（例如砷化镓）小得多。

半导体发光二极管就是利用在 $p-n$ 结上施加正向偏压，通过注入电子和空穴，形成非平衡的电子和空穴，使它们在复合时发出光子，这正是上述光吸收过程的逆过程。由于与光吸收情况下的同样原因，在直接禁带半导体中这种发光的几率远大于间接禁带半导体，因此制作发光二极管，一般要用直接禁带半导体。发光的颜色（即所发光子的能量）取决于半导体的禁带宽度。例如，若要求发出可见光，则禁带宽应在 $1.8 \sim 3.0$ eV之间。砷化镓在室温下的禁带宽度只有 1.35 eV；磷化镓在室温下的禁带宽度为 2.24 eV，可惜是间接禁带半导体。 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 的禁带宽大于砷化镓，而且当 $x < 0.49$ 时，它是直接禁带半导体，因而是制作发红光的发光二极管的重要材料。

现在来看，布里渊区在导带底与价带顶所对应的 k 值的附近，能量相等的各点所联结成的曲面——等能面的形状。对于砷化镓，导带底位于布里渊区中心的 Γ 点，由于对称性，等能面是球面。如果以导带底的能量作为能量零点，则导带底附近 k 状态的能量可以写作

$$E_c(\mathbf{k}) = \hbar^2 k^2 / 2m^*, \quad (6)$$

下标 c 标志导带，与自由电子的能量公式 $\hbar^2 k^2 / 2m$ 对比， m^* 称为导带电子的有效质量。对于硅来说，导带底处于六条 Δ 线上与 Γ 点距离相同的六个点上，这些点的对称程度显然不如 Γ 点高。在这六个点的附近，等能面不是球面而是长轴平行于 Δ 线的旋转椭球。如果以处于 $[0, 0, 1]$ 方向的能谷为例，设该导带底的 x 坐标为 k_0 ，则该能谷底附近 k 状态的能量可以写成

$$E_c(\mathbf{k}) = (\hbar^2 / 2m_l)(k_z^2 + k_y^2) + (\hbar^2 / 2m_t)(k_x - k_0)^2, \quad (7)$$

这里 m_l 与 m_t 分别称为纵有效质量与横有效质量。其它能谷底附近的能量也有类似公式。

三、半导体中的类氢杂质能级

前面讨论过 $n \approx p$ 的半导体——本征半导体。实际应用的绝大部分是在纯度高晶格完整的单晶中掺以一定杂质的半导体。这里分成两种情况：(i) $n \gg p$ ，这样的半导体称为 n 型半导体；(ii) $p \gg n$ ，称为 p 型半导体。实际半导体器件往往利用各种工艺手段，在半导体样品的各个部位掺以不同数量与种类的杂质，以获得所要求的导电类型与电阻率。如何才能做到对半导体实现分区地、精确地掺入所要求的数量和品种的杂质，这是半导体工业与科研中头等重要的问题。掺入一定杂质为什么可以控制导电类型与电阻率？今以砷化镓中掺硫系元素硫、硒、碲等为例来说明。硫系原子有六个价电子，原子实内有六个正电荷，以硫系原子代替砷原子的结果是多出一个价电子及原子实内多出一个正电荷，前者在后者的库仑势场中运动，与氢原子的情况相似，而差别在于现在研究的价电子与核内正电荷都处于砷化镓晶体之中。对于氢原子有如下定态薛定谔方程：

$$(-\hbar^2/2m)\nabla^2\psi(r) - (e^2/r)\psi(r) = E\psi(r), \quad (8)$$

这里 $\psi(r)$ 是电子的波函数， m 是电子的质量。解(8)式，得出能量本征值为

$$E_n = -me^4/2\hbar^2n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

对于基态 ($n = 1$)， $E_1 = -me^4/2\hbar^2 = -13.6\text{eV}$ ，相应的波函数为

$$\psi_1(r) = C \exp(-r/a_0), \quad (10)$$

其中 C 是常数，

$$a_0 = \hbar^2/me^2 = 0.529 \text{ \AA}. \quad (11)$$

考虑到砷化镓中硫系原子代替砷位与氢原子的相似性及不同点，可以证明，硫系杂质的电子波函数为

$$\psi_d(r) = F(r) \cdot \varphi_0(r), \quad (12)$$

其中 $\varphi_0(r)$ 是砷化镓导带底处的布洛赫函数，而 $F(r)$ 满足如下被称为有效质量方程的方程式^[4,11]：

$$[(-\hbar^2/2m^*)\nabla^2 - (e^2/\epsilon r)]F(r) = E_d F(r), \quad (13)$$

其中 m^* 是砷化镓导带底的有效质量， ϵ 是砷化镓的相对介电常数。可以看到(13)式与(8)式的相似之处和相差之处。差别在于：在(13)式中电子质量 m 要换以砷化镓导带底的有效质量；由于介电屏蔽，库仑势能 $-e^2/r$ 要降低为原来的 $1/\epsilon$ ，即 e^2 要换以 e^2/ϵ ；另外在(13)式的情况下，能量零点是取在导带底的，因而

$$E_{dn} = -m^*(e^2/\epsilon)^2/2\hbar^2n^2 \quad n = 1, 2, 3. \quad (14)$$

也可改写成

$$E_{dn} = (m^*/m)(1/\epsilon^2)E_n. \quad (15)$$

对于砷化镓， $m^* = 0.0665m$ ， $\epsilon = 12.58$ 。由(15)式求得 $E_{dn} = 4.20 \times 10^{-4}E_n$ ，这就是说，由于 m^* 远小于 m 及 ϵ 远大于 1，因此 E_{dn} 要比 E_n 小得多。对于基态，

物理

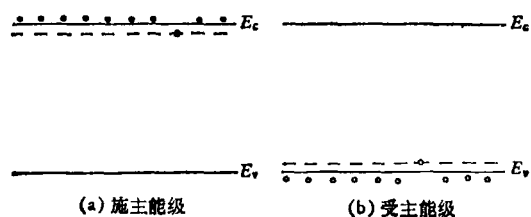


图7 类氢施主与受主能级

得到的基态能级 $E_{d1} = -5.72 \text{ meV}^{[6]}$ 。如果把这个能级画在禁带中，如图7(a)所示，能级离导带底很近，就是“浅”能级。由于 ϵ 远大于 1 及 m^* 小于或远小于 m 是半导体的普遍特点，所以类氢杂质的能级一般是浅的。在绝对零度的条件下，电子处于上述类氢杂质能级上。温度升高时，这些浅杂质能级上的电子很容易热激发到导带去，使导带电子密度远远大于价带空穴密度。这种能给出导带电子的杂质称为施主，相应的能级称为施主能级。

如果以锌、镉、汞等 II B 族元素取代砷化镓中的镓，则构成受主，受主能级图示于图7(b)。受主能级上的空穴易于热激发到价带，使空穴密度远大于电子密度。价带结构比导带复杂，类氢受主能级的理论比施主能级的也要复杂些。

由于(13)式与(8)式的类似性，方程(13)的基态波函数可以写成

$$F(r) = C' \exp(-r/a), \quad (16)$$

其中

$$a = \hbar^2/(m^* \cdot e^2/\epsilon). \quad (17)$$

也可以改写成

$$a = (m/m^*)\epsilon a_0. \quad (18)$$

由于通常 m^* 小于 m ，而 ϵ 远大于 1，因此 a 远大于 a_0 （在砷化镓中硫系原子代替砷位时， $a = 189 a_0 = 100 \text{ \AA}$ ）。这简单的计算还说明，类氢施主波函数是相当扩展的。

对于硅的情况，由于它是 IVA 族元素，如以 VA 族的磷、砷、锑等原子代替硅原子，便构成类氢施主；如果以 IIIA 族的硼、铝、镓、铟等原子代替硅原子，便构成类氢受主。由于硅的导带有 6 个能谷，有效质量不是各向同性的，有纵质量与横质量之分，因此硅中类氢施主比砷化镓中要复杂一些。对于硅中的类氢施主来说，其电子波函数为

$$\psi_d(r) = \sum_{j=1}^6 \alpha_j F_j(r) \varphi_{j0}(r), \quad (19)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$ 等都是常系数； $\varphi_{10}, \varphi_{20}, \dots, \varphi_{60}$ 分别是位于布里渊区 $[0, 0, -1], [0, 1, 0], [0, -1, 0], [1, 0, 0], [-1, 0, 0]$ 六个方向上导带底的布洛赫函数。如果在考虑第 j 个能谷时，将 x 轴选得平行于该导带底的波矢，则 $F_j(r)$ 满足的有效质量方程便

为

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_1} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\hbar^2}{2m_2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right] F_j(\mathbf{r}) = E_d F_j(\mathbf{r}). \quad (20)$$

(20)式与(13)式的差别在于在 x 与 y 方向的有效质量相等,而与 z 方向的有效质量不等.对于 $1s$ 能级,有六个量子态,在有效质量近似中,这六个状态对应于相同的能量,实际上它分裂为三个能级: $1s(A_1)$, $1s(T_2)$ 与 $1s(E)$ 分别是非简并,三重简并与二重简并态¹⁾.

四、半导体中的深能级

假设杂质原子的价为 x_i ,它所代替的基质半导体的价为 x_0 ,它们之差的绝对值 $|x_i - x_0| = 1$ 时,就是前面讨论的类氢杂质的情况.如果 $x_i - x_0 = +1$,杂质是施主;如果 $x_i - x_0 = -1$,杂质是受主.类氢杂质的基态离化能通常明显小于 100 meV ,而电子(空穴)的轨道半径远大于晶格常数.那些 $|x_i - x_0| > 1$ 的杂质与晶格缺陷(例如空位、自间隙及各种杂质与点缺陷的复合物等)在半导体禁带中引入的能级往往较深,离化能大于 100 meV .如果考察这些杂质与缺陷的势能,它们不是象类氢杂质的介电屏蔽库仑势那样的长程势,而是作用距离仅为一两个原子间距的短程势.至于其波函数则是由一个相当局域的核心部分与一个相当扩展的拖尾所组成.可以把这些杂质缺陷称作深能级杂质缺陷.图8示出硅中金的深能级.硅中金在导带以下 0.54 eV 处有一个受主能级,在价带以上 0.35 eV 处有一个施主能级.在这两个能级中都没有电子填充的情况下,金杂质是带正电的;当施主能级上有一个电子而受主能级空着的情况,金杂质是中性的;当金施主能级与受主能级上都有一个电子的情况下,金中心带电为 $-e$ (e 是质子的电荷).双空位是晶格中两个空位连接在一起构成的点缺陷.对于硅中的双空位 V_2 ,它在禁带中有三个能级,两个是受主能级,分

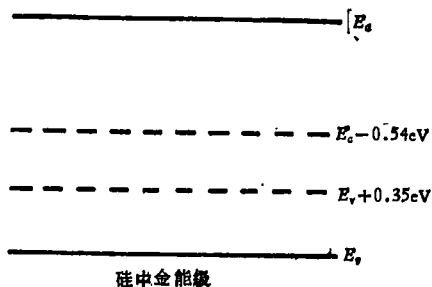


图8 硅中金的深能级

别位于导带以下 0.23 及 0.41 eV 处,一个是施受能级,位于价带以上 0.21 eV 处.

深能级在半导体中起着多方面的作用,这里仅仅指出它的三个重要作用.

1. 起复合中心的作用

深能级的存在往往使非平衡电子空穴的复合速率大大增加,也就是使得载流子的寿命大大降低.

2. 影响发光效率

在半导体中引入有害杂质缺陷会使发光二极管的发光效率明显下降,这是因为,这些杂质与缺陷在禁带中引入特定深能级,非平衡电子与空穴通过这些深能级复合时,多余的能量不是以发光的形式而是以放出许多声子的形式传播出去的.通常把这样的杂质缺陷称为非辐射中心,在实际工作中要尽量避免沾染这些非辐射中心.但杂质对于发光二极管来说并不总是有害的,例如磷化镓是一种间接半导体,导带底在 Δ 线上,而价带顶接近于 Γ 点,发光效率低,但是如在磷化镓中掺氮,氮取代磷原子成为代位式杂质,可以明显地提高发光效率.

3. 补偿作用

把砷化镓,磷化铟用于制作场效应晶体管及高速集成电路,要求用电阻率尽量高的上述材料作为衬底,例如对于砷化镓,衬底材料的电阻率达 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$,实际是半绝缘材料.如何才能实现这样的高阻呢?通常是在砷化镓中掺铬,铬的能级位于价带以上 0.79 eV 处,以 n 型砷化镓为例,绝大部分浅施主电子掉落到铬的深能级中去,离化到导带去的电子数极少,因而半导体是半绝缘的.

总之,深能级的研究是半导体物理中发展迅速和值得重视的一个领域¹⁷⁾.

参 考 文 献

- [1] W. A. Harrison, *Electronic Structure and the Properties of Solids*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, (1980), 64.
- [2] 黄 昆, 固体物理学, 人民教育出版社 (1966), 146.
- [3] 方俊鑫、陆 栋, 固体物理学(下册), 上海科学技术出版社, (1981), 27.
- [4] W. Kohn, *Solid State Physics*, Vol. 5, ed. by F. Seitz and D. Turabull, New York, Academic, (1957), 257-320.
- [5] A. K. Ramdas and S. Rodriguez, *Reports Prog. Phys.*, **44** (1981), 1297.
- [6] G. E. Stillman et al., *Solid State Commun.*, **9** (1971), 2245.
- [7] 秦国刚、林昭炯, 发光与显示, 3(1983), 1.

1) A_1, E, T_2 是正四面体群 T_d 的三个不可约表示.