编者的话

科学和技术是相关的，科学解决理论问题，技术解决实际问题。科学要解决的问题，是发现自然界中各种具体物质运动形式及其相互关系；技术的任务则是把科学的成果应用到生产和生活中去。科学主要和未知的领域打交道；技术则是在相对成熟的领域里应用。回顾历史，物理学和现代技术的关系主要有两种模式。第一次工业革命以解决动力机械为主导，热机的发明和使用形成了第一种模式。这种模式是技术向物理提出问题，促使物理发展理论，反过来提高技术，即技术一物理一技术。电气化的进程属第二种模式，这种模式是物理一技术一物理。从 1785 年库仑定律的建立，历经伏打、奥斯特、安培等人的不懈努力,直至 1831 年法拉第发现电磁感应定律，基本上是隶属于物理学探索的范畴，没有应用研究。随后历经半个世纪，形形色色的直流、交流电动机和发电机的研究如雨后春笋般地发展起来。1862 年麦克斯韦电磁理论的建立和 1888 年赫兹的电磁波实验，才导致马可尼和波波夫无线电的发明。

20 世纪初以来，在物理和技术的相关性上，上述两种模式并存，相互交叉。但是,几乎所有的新技术领域,诸如材料技术、激光技术、能源技术、信息技术、网络技术、环境保护技术、海洋工程技术、大气探测技术、空间技术等的创立，都是在物理学中历经长期的酝酿，在实验上和理论上积累了大量知识以后，才突然萌发出来的。没有 1909 年卢瑟福的 α 粒子散射实验,就不可能有 1942 年第一个原子能

需要全本请访问 www.ertongbook.com

反应堆的诞生。有了 1917 年爱因斯坦提出的受激辐射理论，才可能有 1960 年第一台红宝石激光器的问世。信息革命被誉为第二次工业革命，而整个信息技术的发生、发展，其硬件部分都是以物理学成果为基础的。1947 年贝尔实验室的巴丁、布拉顿和肖克莱发明了晶体管，这标志着信息时代的开始。1958 年出现了集成电路，70 年代后期出现了大规模集成电路和超大规模集成电路。在此之前至少还有 20 年的信息革命准备期，在物理学中为孕育它的降生作了大量的实验上和理论上的准备： 1924 ~ 1926 年建立了量子力学；1926 年创立了费米-狄拉克统计法，得知固体中的电子服从 1925 年泡利发现的不相容原理；1927 年建立了布洛赫理论，得知在理想晶格中电子不发生散射；1929 年派尔斯提出晶带、空穴的概念；同年贝特提出了费米面的概念 直至 1957 年才由皮帕德测量了第一个费米面。总之，当前的第二次工业革命主要是按物理一技术—物理的模式运行的。

物理学的发展,为技术进步开辟了新的方向,导致了一系列现代高新技术的产生。新材料技术、新光源技术、新能源技术、信息技术、环境保护技术、海洋工程技术、大气探测技术、空间技术和遗传工程技术等的形成都在一定程度上与现代物理学相关。例如，信息技术是由现代通信、电子计算机及微电子技术结合而成的，这一领域需要大量使用半导体材料。以砷化镓为例，它既用作光纤通信的材料，又可做成半导体激光器，也能用来制造高速电子计算机的关键部件。而半导体材料的研究和开发则是以半导体物理学为基础的。因此，现代物理学与高新技术是密切相关的。

科学技术是第一生产力，是推动社会经济发展的第一位的变革力量。现代国际间的竞争，说到底是综合国力的竞争，关键是科学技术的竞争。江泽民同志在全国科技大会上的讲话指出：“科教兴国，是指全面落实科学技术是第一生产力的思想，坚持教育为本，把科技和教育摆在经济、社会发展的重要位置，增强国家的科技实力及向现

实生产力转化的能力,提高全民族的科技文化素质,把经济建设转移到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来，加速实现国家的繁荣强盛。"本书的编写就是本着这个精神,选择当代发展迅速、竞争激烈,并在生产、生活中产生着重大影响的高新技术学科,从物理学与高新技术的视角进行介绍，期望能对当前中学物理教育同行们的知识更新和教学内容的改革有所裨益。

本书涉及到材料、光源、能源、信息、环境、海洋、气象、空间等诸多领域的科学技术知识。第一章物理学与新材料。新材料现在已成为发展高新技术、实现物质文明的重要物质基础。在介绍固体的物质结构的基础上,着重分析半导体材料、超导材料和纳米材料。第二章物理学与新光源。激光技术正成为新技术革命的"带头技术"之一,在工业、通信、信息等极为广泛的领域中发挥着十分重要的作用。同步辐射光源的崛起,为物理学、化学、材料科学、地质科学、生命科学等众多学科领域中的基础研究和应用研究提供了一种先进的手段。第三章物理学与能源技术。裂变与核电站、聚变与可控热核反应、磁流体发电和太阳能,反映了新能源的开发利用。第四章物理学与信息技术。从信息的获取、传输、处理和应用诸方面介绍了传感与遥感、移动通信、互联网、卫星通信、光纤通信、多媒体技术、并行技术以及 GPS 系统等。第五章物理学与环境保护。这是一门新兴的综合性很强的学科,它在宏观上研究人类同环境之间的相互作用、相互制约的对立统一关系；在微观上研究环境中的物质和能量在有机体内迁移、转化和蓄积的过程及运动规律。在介绍环境系统中的地球环境的组成要素的基础上，对厄尔尼诺与拉尼娜现象进行较系统的阐述，最后讨论与物理学有关的环境的监测和污染的防护。第六章物理学与海洋技术。现代海洋技术主要包括海洋调查研究，海洋开发以及海洋环境监测、预报和保护等三个方面,它们的基础也是物理学。第七章物理学与气象科技。气象学的研究对象是大气层，如用热力学解释大气中的热过程、云雨过程,将流体力学扩展用于旋转着

的层次分明的大气等。因此，它的基础也是物理学。最后一章物理学与空间技术。这是一门利用火箭和空间飞行器进入太空中从事航天活动的综合性工程技术，其目的是探索、开发和利用太空以及地球以外的天体为人类服务。空间技术与其他科学技术相结合，开拓了众多新技术领域,诸如卫星气象学、空间电子学、空间物理学、空间地质学、航天医学等。由于掌握了空间技术，人类的活动范围拓展到太空，并使空间环境资源开发成为可能。

全书八章,其中第一章由王云珍编写,第二、第三、第四和第八章由宣桂鑫编写，第五章由方如康编写，第六章由李身铎编写，第七章由李朝颐编写。为了推进中学物理教学内容现代化，进一步改进中学物理教师职后培训工作，我们殷切期待着读者提出宝贵意见。

宣桂鑫
于华东师范大学
2000年 1月

第一章　物理学与新材料

【摘要】高新技术的发展离不开新材料的研制和开发。它们是各种尖端技术开发和新颖元器件制造的物质基础。20世纪40年代的锗、硅以及后来的砷化镓等半导体材料的研究，开创了微电子技术欣欣向荣、蓬勃发展的辉煌历程。与之相比，超导领域的开发至今尚未形成轰轰烈烈的势头，主要原因在于高温超导材料的研制还没有达到人们期望的应用要求。20世纪80年代开始迅速兴起的纳米技术，则是由于人们掌握了各种纳米颗粒（尺寸为1～100nm）的制备和合成方法，研制成功了各种纳米材料和纳米复合材料并获得广泛的应用，使纳米材料成为新材料研究的后起之秀。这标志着人们对物质世界的认识进入了一个新的层次。

但是，要对新材料进行开发和应用，首先必须对材料的物性有一个从感性到理性再回到实践的认识过程。只有这样，人们才能得心应手地开发新材料，并使它在服务于高新技术，造福于社会的过程中发挥出特别重要的作用。

在20世纪90年代，我国制订了重大基础科学研究的攀登计划，其中属于材料学科的有：对高温超导电性的基础研究，半导体超晶格物理、材料及新器件结构的探索，纳米材料科学以及深亚微米结构器件和介观物理等的研究。

本章将从固体的物质结构出发，分别介绍半导体材料、超导材料和纳米材料的特征以及它们在高新技术中的应用，并特别探讨了低维体系、太空半导体材料、半导体超晶格、量子阱以及纳米复合材料等当今材料科学的热点。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

§1.1 固体的物质结构

1. 凝聚态和凝聚态物理

在五光十色的物质世界里，物质具有固态、液态和气态三种形态。在固态和液态物质中，原子或分子之间的距离比较小，与它们本身线度的数量级大致相同，因而组成这些物质的粒子间有较强的相互作用。为此，人们把物质的固态和液态总称为“凝聚态”，以区别于物质粒子比较稀疏的气态。凝聚态物质具有一系列根本不同于气态物质的特点，形成了物质世界的一个重要领域。近年来，人们开始把固态和液态之间的中间物质状态，如液晶、玻璃、胶体、稠密的气体以及等离子状态和极低温下的超流状态都归入了凝聚态。

研究凝聚态物质的宏观特性及其微观机制的科学就是凝聚态物理。它是从固体物理和晶态物理中衍生出来的。凝聚态物理研究的面较广，而应用性极强，是近代物理学重点研究和迅速发展的领域之一。凝聚态物理的内容除了晶体物理外，还包括非晶态物理、表面物理、高分子物理、界面(固-固或固-液)物理、低维系物理、半导体物理、介质晶体物理、超导和低温物理以及凝聚态共性体系等。

现代科学技术的进步为物理学的研究提供了许多先进的设备和优越的条件，使凝聚态物理的研究不断取得新的成果。如扫描隧道电子显微镜的诞生，使人们能够对固体表面各点进行扫描，从而描绘出一幅原子量级的表面几何图形和表面层组分图，使我们对固体表面的认识进入了一个新的层次。

凝聚态物理的研究内容在不断地深入，物质的奥秘也在不断地展示：①从研究体内性质深入到与表面、界面有关的性质；②从结构完整的理想晶体深入到晶体物质中的杂质、缺陷态；③从晶态深入到非晶态；④从平衡态深入到瞬态、亚稳态以及相变、临界状态；⑤从单一物质深入到共性体系；⑥从三维体系深入到低维（二维、一维、零

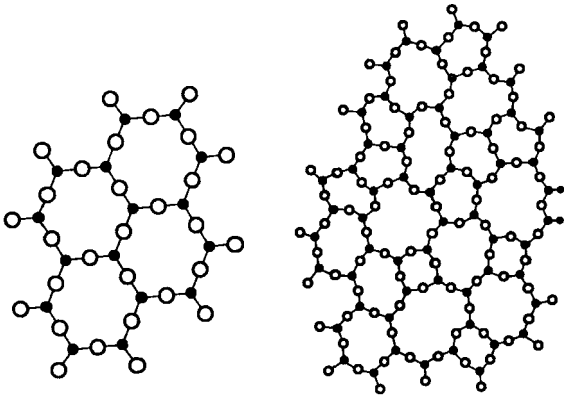
维)体系;⑦从一般晶格深入到人工晶格——超晶格。这些都构成了凝聚态物理研究的丰富内容，使凝聚态物理成为当前最吸引人们注意力和最充满活力的物理学研究的前沿领域。

2．晶体的内部结构—— 正格子和倒格子

晶体的长程有序　人们对晶体的认识，是从晶体的规则外形开始的,由表及里,逐步深入。晶体的大小不一,大的像粗粗的圆柱,小的如细细的尖针，也可薄到许多层叠在一起还没有一张纸厚。它们的结晶形状有立方体、柱体、角锥体以及其他各种复杂但规则的形状，琳琅满目。即使是同一种晶体在不同情况下，长成的大小和形状也各不相同。例如水晶，大的有上吨重，可长达 1 米多，而有些小水晶则成丛地聚在一起成为晶簇。

晶体的颜色,从无色透明到褐色、黑色、红色、蓝色、黄色、绿色、天蓝色、紫色、金色等,五光十色,绚丽多彩。

经过长期的观察和比较，人们认识到绝大多数固体都是晶体。晶体最具代表性的特点是它特有的规则外形。人们发现这种规则外形正是它内部的分子、原子有规则排列的反映。在单晶体物质中，每个原子就像建造房子的砖石一样，按照一定结构一行行、一层层向各方向堆砌,形成一幢幢“原子大厦”——单晶体。原子在空间周期性地重复排列堆砌，构成了叫作“空间点阵”的空间结构。原子的这种周期性重复排列叫“长程有序”。所以说,单晶体就是它的分子、原子作长程有序排列的物体。天然开采的矿石大多是多晶体。它们是由许多小的区域组成，每一个小区域内原子排列呈有序的单晶结构，但相邻区域之间原子排列的情况就不同。所以多晶体可以看成是由许多小的单晶体组成的。有些物体像玻璃、塑料、沥青等，它们不是晶体，而被称作“非晶体”。非晶体内部原子的排列在一个很小的距离内仍保持着一定的规则性,这叫作“短程有序”。但从大范围来看,非晶体是长程无序的。图 1.1 为 SiO_2 晶体和 SiO_2 玻璃体的结构图。



(*a*)　　(*b*)

图 1.1　SiO_2 晶体与 SiO_2 玻璃体结构图

(*a*) SiO_2 晶体；(*b*) SiO_2 玻璃体

1984年，人们还发现了一种介于晶态和非晶态之间的物质新形态，叫作“准晶态”。准晶态具有取向对称性，它的结构特点是在某些方向上长程有序，而且还具有单晶体周期性不允许的五度对称性①。

正格子和倒格子　对于单晶体，为了方便讨论，我们可以取周期结构中的一个基本单元，这个基本单元结构叫作“原胞”②。原胞的周期性重复排列构成整个晶体的晶格结构。这样我们只要研究原胞的结构就能见一斑而窥全豹了。图 1.2 画出了立方晶体的五种晶胞。图中 a 为晶格常数，表示晶体中原子间的距离。图 1.2(a)是一个简立方结构，这种结构的原胞有八个顶角，每个顶角有一个原子。每个顶角被近邻八个原胞所共有，因此原胞内只包含一个原子。实际上，除了钋（Po）晶体有简立方结构外，其他晶体很少呈现这种结构。图 1.2(b）表示体心立方结构的晶胞。体心立方结构指晶胞内除了八个顶角有原子外，在立方体的中心还有一个原子。钠（Na）、

①五度对称性就是物体绕轴转过 $2\pi/5$ 的角度后，能恢复原状的对称性。

②原胞是晶格结构中最小的基本单元结构，胞内只包含一个原子。

钼(Mo)、钨(W)等晶体就是这种结构。图 1.2(c)是面心立方结构的晶胞。这种结构除了八个顶角处的原子外，在立方体的六个面的中心位置又各加一个原子。许多晶体如铝(Al)、铜(Cu)、金(Au)、银(Ag)、镍(Ni)和铂(Pt)等，都是这种结构。金刚石结构的晶胞见图 1.2(d)。它可以看成是由两个互相交叠的面心立方晶胞构成，其中一个沿立方体的体对角线，相对另一个移开四分之一对角线距离。常见的半导体材料硅(Si)、锗(Ge)就是这种晶体结构。化合物半导体砷化镓(GaAs)是闪锌矿结构的晶体，如图 1.2(e)所示。不难发现，只要把镓原子(或砷原子)放在金刚石结构中的一个面心立方点阵上,如图中的白球,而砷原子(或镓原子)放在另一个面心立方点阵上，如图中的黑球，这样就构成闪锌矿结构。其他属于闪锌矿结构的材料还有磷化镓(GaP)、硫化锌(ZnS)和硫化镉(CdS)等。每个原胞还可以用三个基矢来表示。图 1.2 中画出了简立方结构、体心立方结构和面心立方结构三种原胞各自的三个基矢 $\boldsymbol{a}_1$、$\boldsymbol{a}_2$、$\boldsymbol{a}_3$。它们的

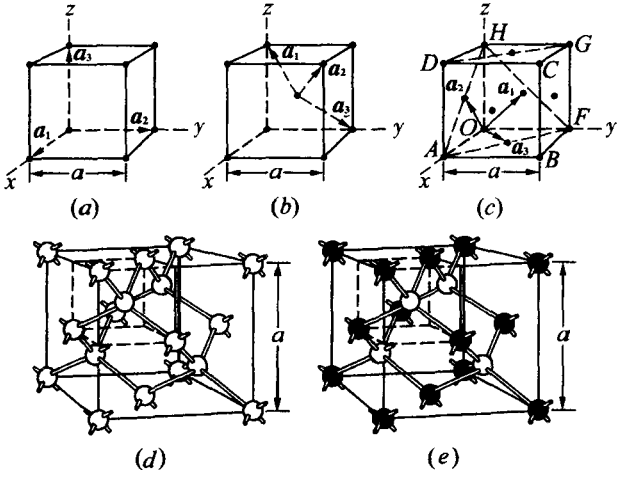


图 1.2 立方体的五种晶胞

(a)简立方结构;(b)体心立方结构;(c)面心立方结构;(d)金刚石结构;(e)闪锌矿结构

基矢分别为：

$$\text{简立方的三个基矢}\begin{cases}\boldsymbol{a}_1=a\boldsymbol{i},\\ \boldsymbol{a}_2=a\boldsymbol{j},\\ \boldsymbol{a}_3=a\boldsymbol{k}。\end{cases}\tag{1.1}$$

$$\text{面心立方的三个基矢：}\begin{cases}\boldsymbol{a}_1=\frac{a}{2}(\boldsymbol{j}+\boldsymbol{k}),\\ \boldsymbol{a}_2=\frac{a}{2}(\boldsymbol{k}+\boldsymbol{i}),\\ \boldsymbol{a}_3=\frac{a}{2}(\boldsymbol{i}+\boldsymbol{j})。\end{cases}\tag{1.2}$$

$$\text{体心立方的三个基矢：}\begin{cases}\boldsymbol{a}_1=\frac{a}{2}(-\boldsymbol{i}+\boldsymbol{j}+\boldsymbol{k}),\\ \boldsymbol{a}_2=\frac{a}{2}(\boldsymbol{i}-\boldsymbol{j}+\boldsymbol{k}),\\ \boldsymbol{a}_3=\frac{a}{2}(\boldsymbol{i}+\boldsymbol{j}-\boldsymbol{k})。\end{cases}\tag{1.3}$$

$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 为坐标系的单位矢量。原子按基矢的长度在三个方向上重复出现，用三个基矢就可描述原子在三维空间中的周期性排列。

人们发现晶体在各个方向的性质不同，这被称作“晶体的各向异性”。为了区别晶体的不同方向，人们便采用密勒指数(三个整数)各加中括号‘[ ]’和小括号‘( )’来分别表示晶体的晶向和晶面。如图 1.2(c)中，OA 方向是[100]晶向，跟它垂直的面 $ABCD$ 是(100)晶面；而 OB 方向是[110]晶向，跟它垂直的面 $AFCD$ 是(110)晶面；OC 方向是[111]晶向，跟它垂直的面 AFH 是(111)晶面。这是三种最常用的晶向和晶面。对硅晶体来说，在(111)晶面上的原子面密度（即单位面积上的原子数）最大，而在(100)晶面上的原子面密度最小。所以在硅单晶体中，由于(111)晶面的原子面密度最大，因此该晶面之间的距离（即面间距）也最大，使晶面间结合力比较弱。这就造成硅片在这个面上最容易碎裂，这样的面叫‘解理面’。

单晶体内原子的这种空间点阵结构模型早在 20 世纪初已被 X 射线衍射实验所证实。因为 X 射线的波长为 0.1nm 左右，与晶体内原子 间的间距有相同的数量级，所以各原子的散射光互相干涉并在一定方向上构成衍射极大。这种衍射图样被称为“衍射斑点”。为了能使这些衍射斑点能反映晶体中原子的周期性排列情况，人们采用另外一组空间矢量 $\boldsymbol{b}_1、\boldsymbol{b}_2、\boldsymbol{b}_3$ 来表示这些衍射斑点的位置。它们与描述晶格中原子的空间点阵的三个基矢 $\boldsymbol{a}_1、\boldsymbol{a}_2、\boldsymbol{a}_3$ 之间有以下关系：

$$\begin{cases} \boldsymbol{b}_1 = 2\pi \dfrac{\boldsymbol{a}_2 \times \boldsymbol{a}_3}{\boldsymbol{a}_1 \cdot (\boldsymbol{a}_2 \times \boldsymbol{a}_3)}, \\ \boldsymbol{b}_2 = 2\pi \dfrac{\boldsymbol{a}_3 \times \boldsymbol{a}_1}{\boldsymbol{a}_1 \cdot (\boldsymbol{a}_2 \times \boldsymbol{a}_3)}, \\ \boldsymbol{b}_3 = 2\pi \dfrac{\boldsymbol{a}_1 \times \boldsymbol{a}_2}{\boldsymbol{a}_1 \cdot (\boldsymbol{a}_2 \times \boldsymbol{a}_3)}。 \end{cases} \tag{1.4}$$

因为 $|\boldsymbol{a}_1|、|\boldsymbol{a}_2|、|\boldsymbol{a}_3|$ 的量纲是(cm)，所以 $|\boldsymbol{b}_1|、|\boldsymbol{b}_2|、|\boldsymbol{b}_3|$ 的量纲是 (cm^{-1})。基矢 $\boldsymbol{a}_i、\boldsymbol{b}_j$ 满足以下关系：

$$\boldsymbol{a}_i \cdot \boldsymbol{b}_j = \begin{cases} 0 & (i \neq j) \\ 2\pi & (i = j) \end{cases} \qquad i,j = 1,2,3。 \tag{1.5}$$

因此 $\boldsymbol{a}_1、\boldsymbol{a}_2、\boldsymbol{a}_3$ 叫“正格基矢”，而 $\boldsymbol{b}_1、\boldsymbol{b}_2、\boldsymbol{b}_3$ 叫“倒格基矢”。由 $\boldsymbol{a}_1、\boldsymbol{a}_2、\boldsymbol{a}_3$ 三个基矢组成的表征原子晶格点阵的空间叫“正格子空间”，那么，由 $\boldsymbol{b}_1、\boldsymbol{b}_2、\boldsymbol{b}_3$ 三个基矢组成的空间就叫“倒格子空间”。X 射线衍射实验测出的晶体的衍射斑点的位置，完全可以用倒格子空间中的倒格子基矢来描述，正像晶体中原子的位置可由三个正格子基矢来描述一样。所以从 X 射线衍射实验中测得的晶体的衍射斑点，经正、倒格子间的转变关系式(1.4)、(1.5)就可以确定晶格中原子的位置。这就证实了晶体中原子的空间点阵学说的正确性。

3. 非晶凝聚态物质

非晶固体　有些物体，如玻璃、塑料、沥青、琥珀等，从外表看虽

需要全本请访问 www.ertongbook.com

然有一定的体积，但无一定规则的外形，既无物理上各向异性的特征，没有解理面，也没有确切的熔点。如打碎的玻璃，其外形无一定规则 而加热玻璃、塑料或沥青，它们会逐渐变成熔体，却没有确定的熔点。人们把这类有别于晶体的固体叫作“非晶固体”。许多非晶固体在一定温度下可以自动转化为结晶状态，这种现象被称为“晶化”。在古老建筑中有些窗玻璃也出现局部的结晶状态，这说明非晶态结构比晶态结构的稳定性要差些。所以人们通常把物质的结晶态叫作“稳定态”，而把非晶态叫作“亚稳态”。但是亚稳态也并不一定会自动转变为稳定态。如在几千万年以前形成的琥珀，却长期保持着非晶状态。

同样，非晶固体的宏观性质也由它的内部结构所决定。人们用X射线衍射或电子衍射、中子衍射等方法观察了非晶固体的内部，大致弄清楚了每个原子的平均环境状况。原来非晶固体是短程有序而长程无序的。在图 1.1 所示的 SiO_2 晶体(晶态)和玻璃体(非晶态)结构图中，从局部看，非晶固体结构与晶体结构一样是一个个四面体，是有序的，但整体看却是无序、无定形的。可见非晶固体是晶格被破坏了的固体，有时就叫作“无定形固体”。又因为玻璃是典型的非晶固体，所以非晶固体又名“玻璃体”。

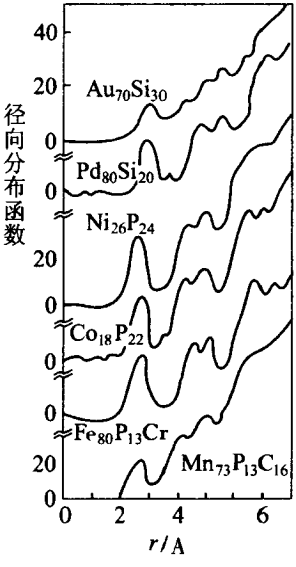


图 1.3 非晶态金属的径向分布

由于非晶态与液态类似，因此人们也用径向分布函数研究非晶固体中每个粒子的平均环境。图 1.3 为非晶态金属的径向分布图。从图中可见，在非晶态的 Au、Pd、Ni、Co、Fe、Mn 等金属内部，一般粒子出现在某一选定粒子周围

大约 3～4 个粒子半径处的概率最大，这与液体非常相似。因此，我们可以把非晶固态看成是过度冷却而凝结的液态。不同的是非晶固态已经冷凝，不能随时解体或随时组合。这也说明了自动晶化是比较困难的。

有人提出非晶固体的主要结构是四面体结构，其平面图如图 1.4 所示。因为这种结构能使空间缝隙较小，密度较大，也比较稳定。但这仅是些理想化的模型。因为无定形结构本身就意味着几乎不可能有完全相同的结构，而仅仅是有较大的概率呈现某种结构而已。而且不同的物质和不同的冷凝条件都会使非晶态结构有很大的差别。因此，我们可以肯定的是：非晶固态类似于真液态，而它们的共同特征是短程有序、亚稳态。

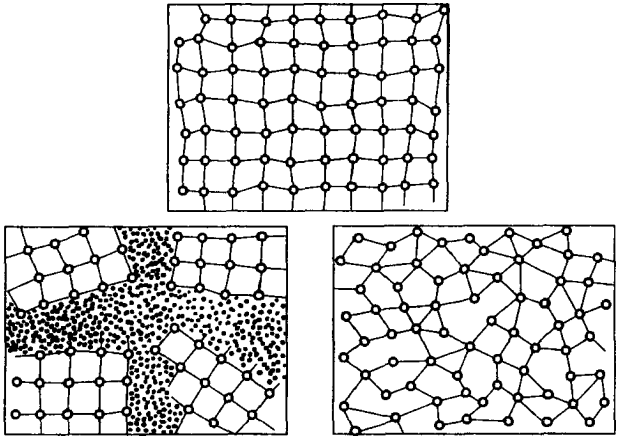


图 1.4　非晶固态的几种可能结构

液晶　液晶既非液体，又非晶体，而是介于液态和晶态之间的一种各向异性凝聚流体，故而得名。1888 年澳大利亚学者莱尼茨尔首先发现了液晶。他将苯甲酸胆固醇加热至 145℃，其结晶便开始熔解并变成混浊状态，到 179℃才变成各向同性的真液态。在 145～

179℃之间，这种物质既具有流动性像液体，又具有光学上的各向异性而像晶体。

液晶并非稀有物质，目前已有许多种液晶。它们的共同特征是：①分子一般呈棒状，其典型长度为 1.5～4nm，也有板状或圆盘状，故分子本身具有各向异性；②每个分子都有极性；③每个分子都包含有活泼的“基团”，这是有机化合物不可缺少的成分。按其分子排列，液晶可分为向列型（Nematic）、近晶型（Smectic）、胆甾型（Cholesteric）和多角型（Hexagonal）四种结构，见图 1.5。向列型液晶分子呈棒状，分子彼此平行排列，分子的长轴与 Y 方向近似平行，故沿 Y 轴方向显示出有序性。其分子的空间分布像液体那样是混乱的，分子可像液体那样从一个区域运动到另一区域，还可绕其长轴转动。这种液晶

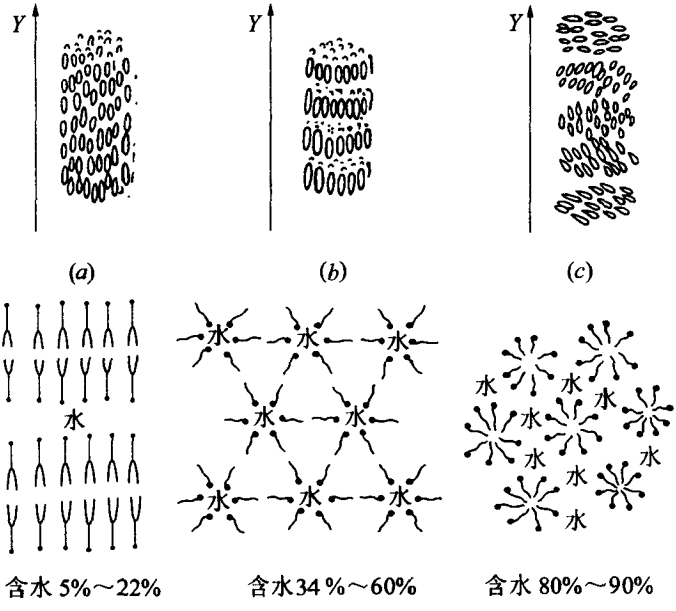


图 1.5　四种液晶结构

(a)向列型；(b)近晶型；(c)胆甾型；(d)多角型

的一个例子就是对氧化偶氮甲氧苯，它存在的温度范围是 116～136℃。近晶型液晶，它与向列型液晶的主要差别在于其分子的排列具有分层结构。各层中的分子都彼此平行排列，并垂直于层平面，分子的长轴与 y 轴方向平行。层与层之间只有微弱的相互作用，彼此间能容易地滑动。皂类溶液均有这类特性。由于其排列结构与晶体相近，故取名为“近晶型液晶”。胆甾型液晶的分子排列也彼此平行且组成层状，但其排列方向逐渐扭转形成一种螺旋型结构。由于具有这种螺旋型结构，所以胆甾型液晶可显示出旋光性。当光线沿螺旋方向传播时，光的偏振面要旋转，在某些情况下，旋光性非常大。像胆甾醇肉桂酸盐就是一种胆甾型液晶，它存在的温度范围是 156～197℃ 。多角型液晶比以上几种更复杂，由两种或两种以上的化合物组成。肥皂水就是多角型结构，生物体内这种液晶组织更多。

由于液晶结构比较“娇嫩”，外界给以微弱的作用就会引起它的内部结构的某种变化。如胆甾型液晶，当外界作用使其结构发生变化时，对入射光也会选择性地吸收一部分、反射一部分，即选择性散射。通过选择性散射不同的光波，它就显示出不同的色彩。液晶所显示的色彩随电场的强弱变化而变化，利用这种特性，便可用来显示数字或图象，这在工业上已得到广泛的应用。

4. 低维体系 —— 从三维到零维

人们生活在三维空间中，而且任何一个物体都具有三维的空间结构。因此对维数低于三的物质世界——低维体系，人们还了解甚微,研究不多。

低维体系　低维体系包括二维体系、一维体系和零维体系。随着人们对物质世界研究的深入，对物体表面的认识也逐渐深化。物体的表面属于二维体系。二维体系还包括两种材料的界面或附着在衬底基片上的薄膜，界面的深度和膜层的厚度一般都在纳米量级。固体表面上的单分子膜是近年来研究得非常广泛的对象。衬底可以

是石墨、玻璃或聚合物等材料，被吸附的物质有氦、氖、氩、氪等惰性气体。单分子膜本身可能处于气、液、固三相中的一相。另外，像层状化合物、水上的油脂膜、极薄的超导膜等都属于二维体系。总之，二维体系并不是头脑中虚构的东西，而是广泛存在的客观对象。在器件结构中最典型的二维体系是半导体 MOS 场效应晶体管中薄的反型层和半导体异质结界面。

在 p 型硅衬底上用半导体平面工艺做成的 MOS 场效应晶体管如图 1.6 所示。当栅极偏置电压为正时，由于半导体的表面场效应，可以在 p 型硅表面出现反型层，形成 n 型沟道①。这个在 p 型硅表面出现的很薄的电子层就是一个二维体系，也称“二维电子气”。在这个体系内的电子只能在二维沟道内自由运动，它在垂直于表面方向上的运动受到限制。就像势阱中的电子在界面处的运动受到限制一样，一维量子限制效应就使这个方向上电子的能量量子化。因此人们又把二维体系叫作“量子阱”。在由砷化镓（GaAs）和镓铝砷（GaAlAs）两种半导体材料形成的异质结（指不同类型的半导体材料制成的 pn 结，以区别由同种材料制成的 pn 结）界面上，在镓铝砷导带上的电子将转移到导带较低的砷化镓上去，并积累在靠近边界的区域内，而在镓铝砷一侧留下带正电荷的电离施主，从而使界面能带弯曲，见图 1.7。这样就在砷化镓一侧产生一个电子势阱，而在镓铝砷一侧产生一个电子势垒。势阱很薄，电子在这个势阱中运动受到边界的约束，从而使

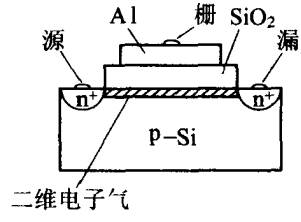


图 1.6　MOS场效应晶体管中的二维电子气

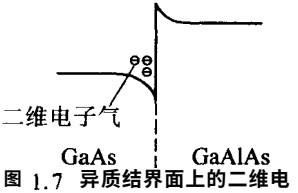


图 1.7　异质结界面上的二维电子气

①电子导电通道。

得在运动方向上的能量量子化。而电子在其他二维方向的运动是自由的，具有二维电子气的特征。这样在异质结界面上便形成了一个二维电子气。对于二维空穴气，情况完全相似，这里不再讨论了。

一维体系的载流子只有在一维方向上的运动是自由的，载流子具有二维量子限制效应，所以一维体系又称“量子线”。线的粗细为纳米量级。在已经生长的二维晶体薄膜上，使用光束、电子束或离子束刻蚀的方法可以获得所需的量子线。即把束线当作刀子，刻出纳米量级的量子线。

对于零维体系，其载流子具有三维量子限制效应，故又称为“量子点”。它由少数原子或分子堆积而成，微粒的大小也是纳米量级。上述的束线刻蚀技术既能刻出量子线，又能刻出边长只有原子直径10倍左右的半导体小颗粒作为量子点。另外，也可采用硫化镉、硫化锌经过适当的化学处理和工艺过程，得到颗粒直径在纳米到微米大小的溶胶，再经某种方式处理(如加热脱水)使溶胶变成凝胶，干燥后就可以获得稳定的、尺寸均匀的半导体量子点。

低维体系不是三维物质的数学近似。它具有三维体系不具备的特性。对于二维电子(空穴)气的深入研究，产生了一些新器件，如高电子迁移率晶体管(HEMT)等，并发现了一些新的重要物理现象。量子霍尔效应就是二维体系重要特性的一个反映，它跟三维体系的霍尔效应是不同的。

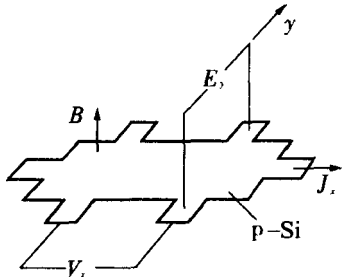


图 1.8　p型硅做成的霍尔样品

量子霍尔效应　在一块 p型硅做成的霍尔样品中，使其在 x 方向通电流 J_x，在 z 方向加磁场 B_z'(见图 1.8)，那么，就会在样品的 $+y$ 方向产生一个横向电场 E_y，这个现象被称作“霍尔效应”。横向电场为：

$$E_y = R_H J_x B_z 。 \tag{1.6}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com