

# 第一章 概论

一部由石器时代开始的人类文明史，从某种意义上说，也可称之为世界材料发展史。材料发展史迸发着人类智慧的火花。电子材料是材料领域中的精华，它既普通又深奥。说“普通”是因为它与每一个人的衣食住行息息相关，说“深奥”是因为它包含着许多让人充满希望又颇具困惑的难解之谜，不断地吸引人们去追求、去探索。在信息时代，电子材料是信息装备的基石，在未来高技术战争中，电子材料是现代化电子装备系统的基础和先导，也是实现我国国防科技现代化的重要前提和保证。21世纪的电子材料将更加异彩纷呈，前景广阔。

## 1.1 电子材料家族成员及其特性

### 1.1.1 庞大的材料家族

#### 一、电子材料的含义

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，它是指能制成用于生活和生产的物品、器件、构件、机器和其它产品的那些物质。材料是物质，但不是所有物质都可以称为材料，如食品、药物和设备仪器等，它们是物质，但一般都不算是材料。电子材料是指电子工业所使用的具有功能特性、结构特性以及物理、化学性能等特定要求的材料，它广泛应用于国民经济和现代化国防建设两大领域。在未来电子战争中，能满足飞机、舰艇、潜艇和导弹等导航与制导系统，飞机、卫星、雷达等侦察、预警系统，军事通信和指挥控制系统，舰艇、潜艇水下探测和战场测距系统，以及电子对抗、火控系统等电子装备系统要求的新型电子材料称为军用电子材料，它是电子材料的重要组成部分。多数军用电子材料都具有军民两用性质，与普通电子材料相比，它是具有直接的或潜在的、未来的军事需求背景的新型电子材料。它的研制对我国国防科技和军事电子的发展具有举足轻重的作用。

#### 二、电子材料的分类

电子材料是一个庞大的家族，门类繁多，品种复杂，在分类方法上至今尚没有一个统一的标准。常见的分类方法是把它们分为功能材料和结构材料两大类。

功能材料的概念最初是由美国贝尔实验室的摩顿 Morton 博士在 1965 年提出来的，后来受到世界材料界的重视。在我国《辞海》中，把功能解释为“事功和能力，功效，作用”。根据功能材料的性能特征和用途，把功能材料定义为“具有优良的电学、磁学、光学、声学、力学、化学和生物功能及其互相转化的功能，被用于非结构目的之高技术材料。它犹如人体的‘五官’和神经系统，能对周围环境，如温度、压力、湿度、气体等的变化及时作出反应。功能材料以材质分类，可分为无机功能材料、有机功能材料和复合功能材料三大类，如表 1.1 所列；以功能分类，可分为磁功能材料、电功能材料、光功能材料、热功能材料、力功能材料和化学功能材料，如表 1.2 所列。

表 1.1 功能材料按材质分类

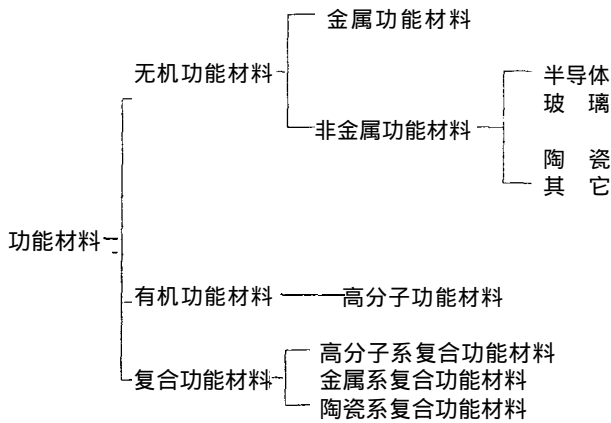
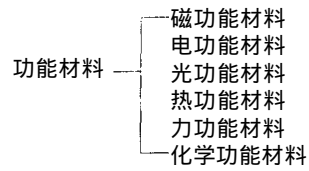


表 1.2 功能材料按功能分类



结构材料的定义是：用于制造力能机械或机械动力或结构件的材料。从这个定义不难看出，它是以材料的强度、刚度、韧性等力学性能为基础，用于制造以受力为主的构件，好像人体的骨骼，用来承受肌体和重量。它是实现军事电子装备的轻型化、耐腐蚀、长寿命的重要保证。这些材料主要有合金材料、特种陶瓷、新型塑料和复合材料等如用于雷达、通信、导航等设备的天线和支架的钛合金、铝合金 导弹、电动鱼雷、飞行器所用电池的镁基、多孔镍基电极合金材料；反导雷达、机载火控雷达所用真空电子器件的钨—钼合金、钨—铍合金 军用超高速计算机中 用于“包装”超高速集成电路芯片的陶瓷和塑料 称为封装材料 )对野战、海底光缆起“骨架”、“增强”、“筋”作用的特种塑料和钢丝 用于机载火控雷达裂缝天线、透镜天线的碳纤维复合材料和芳纶纤维复合材料等。在人类社会进入信息时代的今天 新型电子材料层出不穷 呈现出百花齐放的喜人形势 (如图 1.1 所示)。

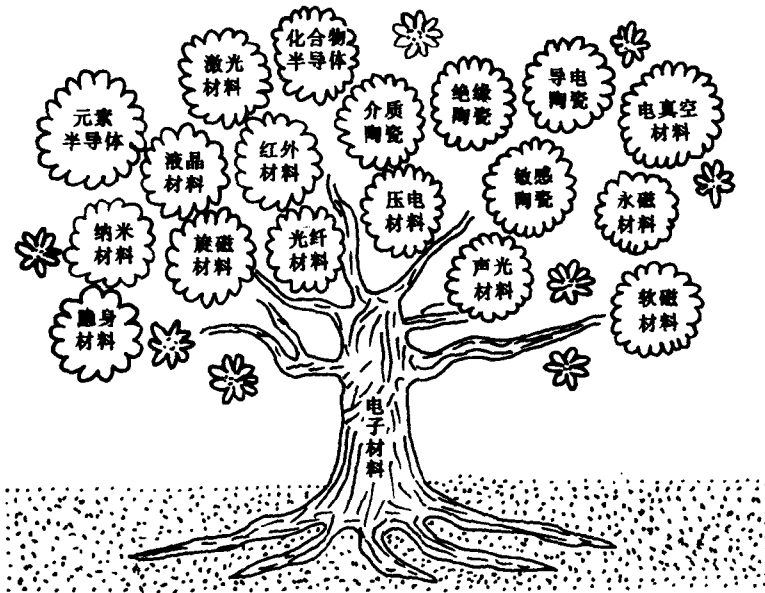


图 1.1 电子材料百花齐放

本分册将以功能材料为主体 重点介绍半导体材料、光电子材料、压电与声光晶体材料、磁性材料、电子陶瓷材料、真空电子器件用材料、纳米材料以及电子材料的基本结构、物理性能、制备技术等。

### 1.1.2 引人注目的特性

半个世纪以来 众多研究人员走出传统的思维定势 勇于探索 锲而不舍 使一代又一代充满生机的新材料如雨后春笋 脱颖而出。电子材料是它们之中的佼佼者 它们具有以下几个特点。

#### 一、材料王国里的新秀

材料的历史和人类历史同样悠久。新石器时代距今已有 1 万年。中国在公元前 17 世纪初即进入青铜器时代的鼎盛时期。铁器时代距今已有 3500 多年的历史。在材料世界里 以金属王国地盘最大 历史最久。翻开元素周期表 在人类已经发现的 109 种元素中 和金字“沾边”的竟多达 86 种 真可谓“五分天下有其四”。但是 进入 20 世纪以来 由于金属材料在性能和应用方面所存在的局限 使其“统治地位”受到了严重的挑战。20 世纪是旷古以来材料发展史中流光溢彩的辉煌历史时期。社会进步及军事电子技术发展的迫切需要 使人们意识到 未雨绸缪的时候到了。于是一大批新型电子材料应运而生 例如 :1910 年蒂埃尔 (Thiel) 等报道了磷化铟 (InP) 材料 ;1950 年 用直拉 (CZ) 法制备出第一颗锗 (Ge) 单晶 ;1952 年 制备出第一颗硅 (Si) 单晶 ;1954 年 用区熔 (FZ) 法、水平 (HB) 法制备出砷化镓 (GaAs) 单晶 ;1965 年 耐特 (Knight) 首次用气相外延 (VPE) 法成功地制备了砷化镓 (GaAs) 单晶薄膜 ;1960 年 , 第一台红宝石激光器问世 ;1970 年 美国康宁公司首次研制成功低损耗光纤 ;1946 年 发现钛酸钡 ( $BaTiO_3$ ) 陶瓷经极化处理具有压电效应 ;1954 年 , 发现了压电性能远比  $BaTiO_3$  优良的锆钛酸钪 ( $PbZrTiO_3$ ) 推动了压电陶瓷的广泛应用 ;1967 年 皮诺 (Pinnow) 等人首次报道了优质声光晶体钼酸钪 ( $PbMoO_4$ ) 单晶的熔体生长。从新材料家族中涌现出来的新秀 , 不但为材料王国的兴盛带来了曙光 , 也为新一代军事电子装备的发展带来了希望。图 1.2 表示人类社会历史发展和材料进步

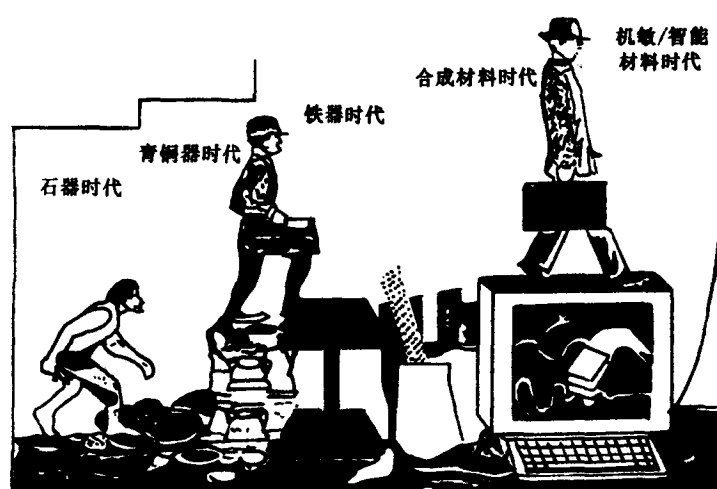


图 1.2 社会发展和材料进步

的密切关系。

## 二、巧妙奇特的功能

电子材料具有许多奥妙的特性 人们一旦运用高科技手段揭开它神秘的面纱 展现在人们面前的将是一个变化万千、多姿多彩的世界。

用化合物半导体材料砷化镓 (GaAs)、氮化镓 (GaN) 制作的发光二极管 LED 可分别发出红、黄和蓝光。用钇铝石榴石 YAG 晶体制成的激光器所发出的激光 可熔化金属, 穿透薄金属板 用于打孔、切割、焊接、划线和雕刻 功率不到普通照明灯泡功率万分之一 (1mW) 的激光 其亮度为太阳光的 100 倍。液晶是一种具有“液体”和“晶体”双重物质形态的特殊有机物 在加热融化过程中经历了一个不透明的混浊状态 继续加热成为透明的液体 这种混浊状态的液体具有液体的流动性 同时它又具有晶体的各向异性 (如光学各向异性、介电各向异性、介磁各向异性等) 故称为液晶。在一根头发丝般粗细的硅芯片面积上可制出成百上千个晶体管。用热释电材料制作的传感器配上适当光学系统, 能探测到 100m 处的人体 用于入侵报警。用锆钛酸铅压电陶瓷做成的打火机用的“火石”, 打火“次数”可达 100 万次以上。磁铁早已是人们所熟知的常见之物, 但是, 如果把某些磁性材料置于电磁场的作用下 将产生诸如磁光、磁热、磁吸收、磁弹性、磁致伸缩等多种物理效应和具有电、声、温度、位移、振动等多种能量和信息转换的奇异功能。陶瓷是人类社会文明进步的产物和特征之一 秦始皇陵出土的大批陶兵马俑 制作之逼真 气派之宏伟 被认为是世界奇迹。具有电磁、电声、电光、电热、电弹耦合效应的电子陶瓷登上人类文明舞台 意味着陶瓷材料已进入一个新的时代。人脑有 130 亿个细胞 人们所记忆的图像、文章、数字等一切信息 全靠它们存储 但是人的记忆功能会随着年龄的增长或者体质、外界条件的变化而逐渐减退 于是可代替人脑记忆功能的电脑“光脑”相继登台亮相。“光脑”的记忆“细胞”就汇聚在用钆钴 GdCo 合金等存储材料制作的光盘或光卡上, 一个菜碟大小的光盘能容纳相当于一个小型图书馆的信息量, 一张扑克牌大小的光卡可储存近百万字巨著 储存期可达 10 年以上。在阳光照射下的物体都会呈现出不同的颜色, 如果把它分割成犹如袅袅轻烟中飘浮的颗粒那样大小 将会出现什么景象 科学家们发现 当物质被分割到它的极限尺寸—— $10^{-9}$ m (1nm 或称 1 纳米) 的时候 就会出现一些鲜为人知的奇异现象 1g 具有这种尺寸的微粒, 它的表面积可高达几万平方米; 由于表面积增大, 活性就会增强, 很容易引起燃烧和爆炸; 当把五颜六色的金属分割成纳米级超微细粉末时 由于吸光能力急剧增加而一律变成黑体 它再也不能熠熠生辉了。但是这些超微粒子的奇妙效能并没有因此而减色。把本来不发光的纯氧化铝 ( $Al_2O_3$ ) 和纯三氧化二铁 ( $Fe_2O_3$ ) 纳米材料混合在一起 所获得的纳米粉体或细晶材料在蓝绿光波段出现一个较宽的光致发光带。在素以坚硬耐磨著称的结构陶瓷中加入纳米粒子会出现令人惊奇的超塑现象 延伸率可提高两倍 使它变得温顺、随和了。古代传说中的隐形人 在与对手争斗中忽隐忽现 来无影去无踪。如果说这种隐形术或隐形人是来自于神话般的传说 那么隐身材料的出现已使幻想变成了现实。这是因为探测技术所获取的人或各种武器等目标信息 实质上是具有不同波长和不同强度的波 而隐身材料却能吸收或减弱对方探测系统的回波能量 使这些目标的反射波偏离对方的探测范围 从而产生奇特的隐身效果。如果士兵穿上涂有隐身涂料的隐身服或将隐身罩覆盖在飞机、车辆等装备上 使对方即使采用先进的仪器也难以捕捉到这些目标。美国的 F-117A 隐形战斗轰炸机在海湾战争中承

最艰险的任务 但始终无一损伤 其主要原因是在机身和机翼等部位使用了隐身材料 如铁氧体吸波涂层 和改变飞机的外形与结构 增加了对电磁波的吸收和散射 使雷达难以发现它。上述的奇异功能给人们以启示, 这些材料正在显露出或潜伏着诱人的军用前景。当然 迄今为止 对某些‘巧妙神奇’现象产生的原因 不乏有令人困惑的难解之迷 有待人们今后去深入探索。

### 三、多学科理论的结晶

材料科学具有物理学、化学、冶金学、机械学、计算数学等多学科交叉与结合的特点, 属于高科技领域的电子材料技术也是多学科理论研究与实践的结晶, 它的重要特征之一是学科的横向渗透、纵向加深、合纵连横、综合交错 它所涉及的学科和理论主要有微电子学、光学、磁学、电磁学、磁光学、陶瓷学、材料力学、固体物理学以及晶体结构理论、量子理论、能带理论、超晶格理论等。科研人员依据这些学科、理论开展对电子材料的研制、物理和化学性能表征以及对其产生的某些奇异现象作出科学的解释。例如 半导体晶体、激光晶体和红外晶体等晶体生长要涉及晶体生长热力学和晶体生长动力学; 晶体的稳定性、完整性、对称性、解理性和各向异性要涉及晶体结构理论 材料的应力、应变、疲劳、断裂等性能涉及材料力学 磁性材料的磁各向异性、磁畴结构、强磁性、反铁磁性、磁化强度、磁致伸缩等性能要涉及磁学和电磁学 光纤材料的折射、反射、散射、色散等性能要涉及光学。超薄膜制备技术、固体能带结构的量子力学理论和材料设计理论相结合而出现的半导体超晶格材料, 是 20 多年来半导体物理学和材料科学中的一个重大突破。利用这种材料, 不仅可以显著提高雷达用场效应晶体管 (FET) 和光纤通信用半导体激光器等的性能, 也可以制备至今还没有的、功能更优异的新型军用元器件和发现更多的新物理现象。

### 四、当代高技术的热点

技术的生命力在于应用, 故有人把技术科学称之为应用科学。军事应用为电子材料技术注入了巨大活力, 使该技术从传统的“低、粗、陋”跃升到现代化的“高、精、尖”, 并成为当代高技术的热点, 突出地表现在以下两个方面。

#### 1. 要求原材料和辅助材料达到“三高”

用于制造电子材料的原材料和辅助材料主要有金属、化合物、石英玻璃及有机高分子和聚合物 要求它们要达到“高纯、高细、高效”。所谓“高纯”即杂质的含量要尽可能低, 诸如高纯试剂、高纯气体、高纯水、高纯金属及高纯元素等。用于制备 GaAs 晶体的原料 Ga 和 As、制备 InP 晶体所用的原材料 In 和 P 均需要达到 6 个“9”(6N) 以上的纯度。拉制 GaAs 晶体生长设备中用于形成“高压”的气体要求使用 5N 以上的高纯氩 (Ar) 气。所谓“高细”, 即制备某些材料时, 要求使用超微细粉末、超微粒子等, 例如, 在制作 Fe—Co (铁—钴) 微粉永磁时 所使用的 Fe—Co 微粉粒度要达到纳米级 ( $10^{-9}\text{m}$ ); 在制备磁记录与磁存储材料——包钴的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  磁粉时, 要采用  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  超微粒, 在其上面包敷一层氧化钴, 使矫顽力高达 143.2 千安培 / 米 (kA/m)。所谓“高效”, 即在制作材料时要优先选择能有效提高材料性能的原材料, 例如, 在制备 GaAs 单晶时选用热解氮化硼 (P—BN) 坩埚来代替石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 坩埚, 因为前者不但纯度高, 能避免 Si 对 GaAs 熔体的污染, 而且耐高温, 使其不易软化; 在镍锌 (NiZn) 铁氧体生产过程中, 选用高温时最稳定的氧化物——氧化镍 (NiO), 故可在空气或氧气中烧结, 简化了生产工艺。

## 2. 采用高级制造技术

作为高技术领域重要组成部分的电子材料技术是由原材料提纯、材料的制备与加工、材料的分析检测等一系列技术组合而成的技术群体，往往是一代制造技术产生一代材料。古代用炼丹炉升炼“丹药”据说“丹”字就是从炼丹炉的形象演变而来。这种俗称“银朱”的“丹药”是硫化汞（ $\text{HgS}$ ）的颗粒或粉末，这些历史的产物最终还是回归于历史。波澜壮阔的科技浪潮把材料的制备、加工推向一个崭新的境界。有时是在高压、超低温和超高真空等条件下合成新材料。例如，在采用高压原位合成的液封直拉（HP—LEC）法生长 GaAs 单晶时，要在充氩气的高压炉膛内，在 38kPa 压力下使 Ga、As 原料在 P—BN 坩埚内原位合成 GaAs 多晶，在 15kPa 压力下拉制 GaAs 单晶；用称重法对晶体进行精确地等径控制，如拉制  $\phi 50\text{mm}$  的 GaAs 单晶时，其直径偏差可控制在  $\pm 1\text{mm}$ 。传统的半导体薄膜生长技术，如液相外延、气相外延等的层厚度控制精度只能达到  $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ 。采用微机控制生长的分子束外延（MBE）、金属有机化合物气相沉积（MOCVD）和化学束外延等超薄层材料生长技术，能达到使生长层厚度误差控制在一个原子层以内的高精度水平，并且人们可以任意改变薄膜的厚度，控制它的周期长度。由于它的周期长度比各薄膜单晶的晶格常数大几倍或更长，因而取得“超晶格”的名称。超晶格的概念与先进的材料生长技术相结合，孕育了半导体微结构材料，它将成为制作新型器件用材料的增长点，现已制备出上百层、厚度小于 1nm 的超晶格材料。1976 年发现的调制掺杂结构的超晶格中电子迁移率很高的现象，为雷达用的高电子迁移率晶体管（HEMT）的研制奠定了基础。

## 1.2 未来战争与电子材料

追溯电子技术的发展，可见新材料的研制与开发所起的举足轻重的作用。特种金属及合金材料的出现导致 1906 年发明了电子管；锗材料的出现导致 1948 年诞生了半导体晶体管，使电子设备小型化、轻量化；硅单晶材料的出现导致集成电路的发明与发展，才出现了今天以电子技术为基础的包括计算机技术、通信技术在内的电子信息技术和产业，使人类文明发生了一个飞跃，使人类社会进入信息时代。光电子材料、电子陶瓷材料、磁性材料以及压电与声光晶体材料等的发展促进人类社会进步。纵观古代和近代材料及兵器发展的历史，可以看出，每一种兵器的出现都是在当时的一批起先导作用的新材料技术群的推动下完成的。青铜的冶炼、铸造与加工技术等造就了人类发展的青铜器时代，也造就了青铜兵器时代；铁渗碳制钢技术、钢铁加工技术等造就了刀、矛、剑、戟等冷兵器时代；以蒸汽机技术、电力技术、内燃机技术为代表的两次技术革命和一大批新材料的出现造就了大炮、坦克、飞机等热兵器时代。冷、热兵器并用的时期持续了近 900 年，由于当时包括材料在内的技术水平的限制，使传统兵器命中精度低、操纵不便、威力不大。例如：17 世纪滑膛枪的杀伤效能只相当于标枪，19 世纪的来复枪杀伤效能仅等于长弓。过去两次世界大战是以大炮、飞机、坦克等武器为主的拼搏，是“钢铁大战”。

现代战争是以军事电子技术为主的高技术战争。电子材料在军事上的直接应用对象是军用电子元器件，一代新型电子元器件会促进军事电子装备的更新换代。因此，军事电子武器装备的发展无不以一代新材料的研制成功作为先行。电子材料技术在现代化电子装备系统中的重要作用主要表现在以下几个方面：

### 1.2.1 现代军事电子装备的物质基础和技术先导

现代化军事电子装备的发展必须以新一代电子材料为依托。军用计算机犹如通信、指挥、控制和情报系统的“大脑”，机载、车载相控阵雷达犹如战场上的“千里眼”，它们要求迅速发展高速、宽频带的超高速集成电路(VHSIC)、高电子迁移率晶体管(HEMT)、异质结双极晶体管 HBT 等器件，而具有宽带、高迁移率、低位错密度的 GaAs、InP 等化合物半导体材料正是上述器件的最佳选择。多少世纪以来，五彩斑斓、玲珑剔透的宝石，一直作为昂贵的装饰品，为王公贵族、富贾豪门所拥有。如今，它们已在现代化战场上一展雄姿。在现代化的激光雷达和高精度激光测距中，将使用大功率激光晶体钕铝石榴石(YAG 和红宝石  $\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$  等激光晶体材料。掺钛蓝宝石  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  和金绿宝石能使激光波长在某一波段范围内可调谐，用于激光通信、激光侦察与监视等。全天候、多波段、多目标、高分辨能力红外探测系统和第四代空—空导弹需使用长波长红外探测器，要求发展碲镉汞(HgCdTe)、锑化铟(InSb)等红外材料。我国古代长城上施放的烟火，用以报道敌军来犯的信息，是无线通信中最原始的雏形。而快速、大容量、安全保密战术指挥通信网则需要通信光纤材料。飞机、潜艇用精密导航、精密制导导弹、舰艇水下探测等需要保偏光纤和高强度光纤材料。军用摄像机及计算机显示器需要液晶材料。作为当代基础科学领域——材料科学——三大分支之一的电子陶瓷材料，在区域综合电子信息系统中对实现信息传递、存储、记录和能量转换等起着重要作用。为解决雷达用大功率微波真空器件和大功率集成电路工作中热量的散发，对高导热介质陶瓷提出迫切要求。磁性材料如同磁石吸铁那样对人们具有极大的吸引力，高磁能积、高矫顽力、低温度系数的稀土永磁材料用于电子武器装备系统中的磁场源。在海湾战争中出尽风头的美制“爱国者”导弹上的移相器、环行器等使用了钐钴(SmCo)和钕铁硼(NdFeB)永磁体。用磁记录材料制作的磁记录装置可记录侦察机、卫星或宇宙飞船运行情况。均匀致密的高性能铁电陶瓷薄膜是制备非致冷常温操作的红外探测器和抗射线辐射、抗电磁干扰的非易失性随机存储器的基础材料。发送雷达、通信信号以及干扰信号，90%是由微波管器件来担负的，需要高性能真空电子器件用材料。

### 1.2.2 提高军事电子装备作战能力的关键

电子材料的研制成功与应用，极大地提高了电子武器装备系统的命中精度、分辨率、抗干扰能力、隐蔽性和夜战能力，充分发挥了武器装备系统的准确打击、远程杀伤、高速破坏、快速反应等效能。以 GaAs 材料为基础的微电子技术，在雷达中的应用，使 80 年代机载雷达的功能比 60 年代提高 6000 倍，故障间隔时间增长 230 倍，重量和功耗仅为原来的 1%。GaAsVHSIC 用于超高速计算机，促进了人工智能技术的发展，使电子武器装备系统具有逻辑判断、推理、自动攻击能力，并能使电子对抗系统的信号处理能力达到每秒执行几十亿条指令，能够在 100~200 万脉冲/s 的电磁环境中从容工作。YAG 激光器用于激光测距机，在战场上的作用距离可达 300~10000m。海湾战争中，多国部队共有 1200 辆 M1A1 型主战坦克，其中部分坦克采用了 Nd:YAG 激光测距机。采用 HgCdTe 材料制作的红外热像仪具有探测距离远、能识别伪装、穿透烟雾尘埃、昼夜工作等独特优点，可安装在作战飞机、舰艇、装甲车辆和步枪上，大大提高了它们的作战效能。海湾战争中的参战

双方部署了 17 种红外制导和红外成像制导导弹。美国的 F—111F 和 F—4 战斗机 装有 160 元 HgCdTe 前视红外传感器，使飞机具有能在昼夜和不良天气条件下进行空—地攻击的能力。夜视、监视、侦察、精密制导等红外系统的核心是红外探测器 而制作红外探测器的基础是红外材料 红外材料的性能决定了探测器的响应波长、探测率、响应率、工作温度、抗辐射能力等。高强度光纤在有线制导与传统的视线直接瞄准、用金属线靠红外或电磁信号制导等相比 具有无可比拟的优点 可同时双向传输导弹飞行、视频图像和弹体状态三路信号 能咬住目标不放 命中率极高。毫米波铁氧体材料用于雷达、通信、精密制导时具有波束窄、容量大、分辨率高、频带宽、抗干扰能力强等优点。用永磁材料制作的磁控管是地面、空中雷达的心脏部件。在 AV/MPQ 导弹系统中使用了 5161 个 X 波段铁氧体移相器 它可以同时监视 100 个目标 同时跟踪 8 个目标 同时制导 8 枚导弹。隐身技术与高能激光武器和巡航导弹被誉为军事科学上最新的三大技术成就。将吸收型涂层和结构型吸波材料用于飞机、导弹和驱逐舰等 可对付各种先进的探测器 提高它们的突防和生存能力。

### 1.2.3 促进军事电子装备小型化、轻量化的可靠保证

军事电子装备的小型化、轻量化是提高其作战效能、降低使用成本的重要条件。如远射程空—空导弹使用 GaAs 微波、毫米波单片集成电路 (MIMIC) 将 4 块电路板变成一块电路板 其组装大大简化 并使每台导引头成本节约一万美元 用它制作的微波引信 芯片面积仅有  $0.2\text{mm}^2$ 。采用 SmCo 合金构成周期永磁结构，不仅使行波管效率由原来的 10%~20% 提高到了 30%~50%，而且使体积和重量显著减小。利用微波陶瓷材料制作微波混合集成电路 (HMIC) 可使 HMIC 的体积大大缩小，广泛用于小体积轻量化的机载、弹载以及便携式微波设备。

## 1.3 走向未来的电子材料

冷战结束后世界局势趋于缓和 和平与发展已成为世界潮流的主旋律 但局部战争却一直没有停止过 世界并不平静。海湾战争后 电子战的威力震撼了世界 各国政府相继作出反应，不惜花费巨资研制先进的军事电子武器装备，从而推动电子材料技术迅速发展。

### 1.3.1 抢占“制高点”

鉴于电子材料对世界各国争夺军事电子技术优势、增强军事实力的重要作用 各国都将该材料研究开发置于特殊地位 竞相制定发展规划 采取各种措施 力争抢占新材料技术“制高点” 如美国国防部于 1991 年所提出的 20 项关键技术中 有 5 项以材料为主 在其它项目中有  $2/3$  都与材料有关。在海湾战争后仅三个星期，美国白宫发布了美国国家关键技术项目 共 6 个关键技术领域 22 个关键技术项目 而新材料技术位居 6 个关键技术领域之首 并把材料合成与加工、电子和光电子材料、陶瓷等 5 项列入关键技术之中。日本把发展新材料作为“技术立国”的基础 并把新材料的发展放在与微电子技术同等重要的地

位。在公元 2000 年以前 日本将以高性能陶瓷、用于苛刻环境中高性能材料、非线性光电子材料和超导材料等为重点。欧美各国对 HgCdTe 材料的投资仅次于 Si 和 GaAs。

由于世界各国都竞相把当代最先进的科学技术用于新型电子材料的研究开发，使该材料出现了日新月异的变化。新原理、新效应、新工艺和新材料不断涌现，技术水平不断提高。在功能晶体材料方面，采用先进的高压原位合成液封直拉法生长的  $\phi 100\text{mm}$  的半绝缘 GaAs 单晶、Si—GaAs 和  $\phi 75\text{mm}$  的 InP 单晶已达到实用化； $\phi(50\sim 75)\times 180\text{mm}$  的 Nd:YAG 激光晶体已商品化；用  $\phi 50\text{mm}$  的  $\text{PbMoO}_4$  单晶研制出抗紫外操作的声光 (AO) 器件。在电子陶瓷材料方面，用高压介电瓷料已制作出耐压 10kV 的多层陶瓷电容器、钛酸锶 ( $\text{SrTiO}_3$ ) 多功能压敏电阻已实用化。在磁性材料方面，铁氧体材料已广泛用于被誉为现代雷达之星的相控阵雷达的移相器、环行器、隔离器和旋磁振荡器等。纳米材料的研究已经不是仅局限在只有科学意义，而是具有与经济和社会发展紧密联系的国际高科技竞争的“桥头堡”之一。

我国把电子材料的研究开发一直放在重要位置，形成了一支实力雄厚的研究队伍，为国防工业和国民经济的发展做出了重要贡献。十多年来，我国电子材料的发展取得了长足的进步，半导体材料和光电子材料在研究水平和应用方面取得很大进展。许多压电与声光晶体材料已能批量生产并满足军用元器件的需要。永磁材料、软磁材料和旋磁材料分别在军用永磁电机、电源变压器磁芯和移相器等获得广泛应用。介质陶瓷、传感陶瓷和结构陶瓷在关键技术方面均有重要突破，有些已达到或优于目前国外同类产品水平。纳米材料和真空电子器件用材料的研制亦取得显著成绩。上述材料为发展我国新一代电子武器装备起到了重要作用。

除本分册所阐述的材料之外，国内外在军用金属材料、先进复合材料、有机材料及生物电子材料等的研制开发方面也取得了很大进展。

### 1.3.2 踏上新的征程

在未来的高技术战争中，军事电子装备将呈现以下发展趋势：小型化、电磁频谱扩展化、高速度、高精度、高可靠性和生存性、全天候以及智能化。未来战争中，先进的指挥控制系统、情报侦察系统、预警探测系统、通信系统和电子对抗系统以及作为我国国民经济新的增长点的电子信息产业对电子材料的需求，不但为电子材料的发展提供了广阔的空间，而且促使它们雄姿勃勃地踏上新的征程。电子材料的发展趋势如下。

#### 一、晶体大尺寸化

当晶体尺寸加大、长度增加时，可提高芯片等产品的产出率，降低成本。如目前硅单晶以  $\phi(125\sim 200)\text{mm}$  为主，今后将开发制造下一代计算机芯片用  $\phi 400\text{mm}$  的硅单晶。硅片直径越大，其芯片的理论产出率（芯片/硅片）越高。如在制作动态存储器 (DRAM) 时，采用  $\phi 200\text{mm}$  的硅片，其芯片的理论产出率比采用  $\phi 125\text{mm}$  硅片约高 3 倍。

#### 二、晶体结构完美化

晶体结构完美化是指晶体做到高纯、高完整性、高均匀性。硅单晶片上的缺陷、杂质和几何精度是影响其质量的主要因素，其平均缺陷密度  $D$  与集成电路成品率  $Y$  的关系为： $Y = e^{-DA}$ ，其中  $A$  为管芯面积。从关系式可以看出， $D$  值越大， $Y$  值越小。而杂质或者淀积在缺陷上，或诱导产生缺陷，或降低少数载流子寿命，这些都会导致集成电路劣

化或失效。

### 三、多功能化

人们日常生活中所用的电视机、录音机、洗衣机等家电产品，不但要求它们外形美观，坚固耐用，而且希望功能齐全。电子材料在实际应用时，人们也是希望它们的功能越多越好。军事电子装备要求材料具备两种或两种以上功能，如光电、压电、磁光、声光、耐高温 / 抗辐射等。电子材料将由单一功能向多功能方向发展。

### 四、复合化

人类在远古时代就从实践中认识到，可根据需要来组合两种或多种材料，利用性能优势互补制成原始的复合材料。如 2000 多年前用于车战的长达 3m 多的戈戟，用木芯外包纵向竹丝，以漆作胶粘剂，丝线缠绕作增强体，寒光夺目、锋利无比的越王剑，经鉴定后发现，它不是由单一的锡青铜铸成，而是含不同金属成分的复合材料制品。随着科学技术的发展，某些单组分功能材料，硅、锗、钎后可能达到它们的使用极限，因而在材料研制方面需要另辟新径。把两种或多种材料、组分结合在一起制成的复合材料，会使其性能优于单一材料并能呈现新的功能。这种材料主要有树脂基、金属基、陶瓷基复合材料，铁磁—铁电材料，铁磁—透明材料等。复合材料由分散相和基质相组成，如果分散相的尺寸达到纳米级，则形成纳米复合材料。微复合材料将向纳米复合材料发展。

### 五、低维化

人们按通常习惯所称谓的材料，是指在空间向  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向均延展到一定宏观尺度的三维固体。若使材料在任一维度（设为  $z$  方向）的尺寸缩小到纳米量级，则此材料成为在  $x$ 、 $y$  方向延展的二维材料。若材料同时在  $z$ 、 $y$  方向缩小到纳米量级的尺度，即为一维材料，也称为量子线材料。若使材料从  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向缩小到纳米量级，便成了零维材料，也称为量子点材料。所谓低维材料，是指维数低于三维、二维、一维、零维的材料。科学家们发现，当材料超微粒或超薄膜的特征尺寸小到纳米量级时，量子效应十分显著，使其失去作为三维宏观状态物质所具有的特性，低维材料具有继物质的晶态、非晶态结构之后的一种新的物质结构形态——纳米态结构。低维材料的特征尺寸为  $1 \sim 100\text{nm}$ 。电子材料将向低维化方向发展。许多重要的发现，往往都是从“偶然”开始的。这种新的物质结构形态，是一位从事晶体物理研究的德国科学家，一次驱车在浩瀚无际的大沙漠旅行中构想出来的。空旷、寂寞的大自然环境，使他的思维十分活跃，从而萌发出一个大胆的设计：把晶体中的空位、间隙原子等晶体缺陷作为晶体材料的主体，而不是像常规那样，把完整的空间点阵的晶体作为晶体材料的主体。从逆方向思考出来的问题，形成了对物质新态的构想。几年后，研制出具有纳米尺寸黑色金属超微细粉末，纳米材料就这样诞生了，继而涌现出举世瞩目的半导体超晶格材料。用它们制作的微波器件和光电器件，广泛用于雷达、红外成像制导、卫星遥感等军事电子装备。纳米磁性材料、纳米电子陶瓷材料以及硅基纳米发光材料、纳米碳管材料、纳米巴基球材料  $C_{60}$  等纳米材料的出现，是现代电子技术中的一项重要变革，标志着微电子技术从微米技术进入纳米技术、微电子学向纳米电子学发展。材料科学的发展方向决定了材料设计的发展方向。材料科学将发展成为材料系统工程科学。随着 MBE、MOCVD 等技术日臻成熟，能以全新的概念改变器件的设计思想，使半导体器件的设计与制造由原来的“掺杂工程”向能对材料的电学和光学特性人为地施以剪裁的“能带工程”方向发展。纳米材料技术的目标是人类直接

操纵单个原子制作具有特定功能的产品。这样 人类将迎来一个崭新的高技术领域 并将对下一世纪军事电子装备微型化起重要作用。

## 六、智能化

人们习惯上常常把“智能”与生命现象联系在一起 自然生物体材料为人类材料研究带来很大启示。骨骼的重要功能之一就是在微观结构上适应环境的变化 例如 它可以在保证骨架动态平衡条件下 抵抗载荷 恢复和再生骨骼。动物或人的皮肤是智能生物材料的典型 它是可弯曲变形、自修复的复杂层状组织 它含有传感神经 因而具有防水、阻止细菌侵入体内、帮助调节体温等功能。随着科学技术的不断进步 人们可以模仿人体的生物材料来开展智能材料研究。目前 关于智能材料的定义并不一致 有人认为 如果多功能材料具有生命形式所持有的智能, 则把这类材料称之为智能材料 ( Intelligent Materials)。由于智能材料具有对信号感受、信号传递与加工和对信号做出适当反应等功能而受到人们的重视。普通的功能材料可以判断环境 (如电场、磁场、温度和压力等) 但不能顺应环境。智能材料不但可以判断环境 而且可以顺应环境的变化进行自己内部诊断、修复和预告寿命等。智能材料主要有金属系智能材料、无机非金属系智能材料和高分子智能材料。智能蒙皮和智能结构是近年来发展起来的尖端技术, 并成为智能材料研究中最活跃的领域。光纤智能结构和蒙皮受到各国军界的高度重视 该技术是把传感器、人工神经网络和执行器埋在飞机、火箭、坦克、潜艇、空间站等构件和外壳内 使其感知在使用的动态环境中所受的应力、变形、温度分布和载荷大小等 材料本身具有自动传输、自诊断、自修复等功能。光纤材料是信息传感及传输的理想载体。

各类材料在发展趋势上又都有其各自的特点。激光晶体向大尺寸、高功率、低阈值、连续宽带可调方向发展  $\text{HgCdTe}$  红外焦平面探测器材料向大面积、均匀、高性能方向发展 声表面波和体声波晶体向高耦合、低声损耗、高温度稳定性方向发展 声光晶体向高折射、大光弹性系数、宽透光范围、低声速和低声损耗方向发展 多层陶瓷电容器用电子陶瓷材料向高频热稳定、低频高介、高比容方向发展 稀土永磁材料向高矫顽力、高剩磁能积方向发展 铁氧体软磁材料向高频、高磁导率、低损耗方向发展 真空电子器件用材料向高真空空气密性、高热导率和良好的加工性能方向发展; 隐身材料的发展趋势是展宽有效频带, 发展能同时抑制雷达波、红外和激光信号的多功能超宽频隐身材料, 吸收涂层材料将向“薄、轻、宽”方向发展。

电子材料的发展和突破, 不断地把人类文明推向更高的层次。21 世纪电子信息技术舞台 将是电子材料技术的春天。

## 参 考 文 献

- 1 《材料科学技术百科全书》编委会, 材料科学技术百科全书, 第一版, 北京: 中国大百科全书出版社, 1995

## 第二章 晶体材料的结构、物性和制备技术

### 2.1 概 述

晶体是结晶状态的固体，自然界中的固体物质绝大多数是晶体物质。地壳上部的矿物和岩石都是晶体物质；人们制造的金属、合金、耐火材料、陶瓷制品也都是晶体；人们吃的糖、盐等也是晶体。不仅是在地球上，在其它天体上也不断地在进行着晶体的形成作用和破坏作用。陨石基本上是由晶体组成的，土星的光环是由冰的结晶构成的，在组成彗星的物质中，就包含有冰和干冰的晶体。

可是一提到晶体，人们就会想到那些五颜六色、闪闪发光、透明的宝石。人们在接触天然晶体过程中，对晶体得到这样一个概念，即具有整齐的多面体外形的固体就是晶体。这样给晶体下定义是很不严格的，这是人们从晶体的外观得到的感性认识，并没有反映出晶体的内部构造的规律性。如果我们把有规则外形的天然水晶敲碎，它就失去了规则的外形，但我们说它仍是晶体。何况自然界中的晶体在成长过程中，往往受到外界条件的限制，以至并不是所有晶体都有机会能呈现出规则多面体的外形来，而一些非晶体在某些情况下也能呈现出规则的多面体外形。

1912年劳埃 Laue 和弗里德里希 Friedrich 利用 X 射线衍射技术对晶体进行了理论和实验研究，揭示了晶体内部结构的特征，对晶体的认识，才从感性到理性，从宏观到微观，从现象到本质。原来，无论晶体的外形如何，构成晶体的分子、原子或离子（统称质点）在空间的排列是周期性的，有规律的。换言之，晶体是由许多质点，严格地说是无穷多个质点，在三维空间作周期性排列的固体物质，晶体中质点的排列是远程有序的。

同一晶体结构的固体物质，有多晶体和单晶体之分，虽然它们在微观的晶体结构上都相同，但对于单晶体，质点的周期性排列贯穿在整个物质之中，而多晶体是由若干个单晶体杂乱无章聚合形成的集体。因此，同一物质的单晶体和多晶体，其物理性质是不完全相同的。区分单晶体和多晶体不是根据其体积的大小和几何形状，而是根据其内部质点的周期性排列是否贯穿整个物体。有些物质，如玻璃、石蜡、沥青等，其内部构造只具有短程有序的排列，这类物质称为非晶体，或称玻璃体。

1957年出现的液晶材料，其性质介于液体和晶体之间，它们表现出液体的流动性，但又不像真正的液体那样是各向同性的。液晶具有一维或大部分情况下具有二维有序，而真正的晶体则呈现三维有序。

晶体中质点排列的周期性，使晶体具有某些共性，如自限性和晶面角守恒定律、均匀性和各向异性、解理性、对称性等。

在自然界中，晶体形成需要经过漫长的历史时期，而且在品种、数量、质量、尺寸等方面都不能满足现代科学技术对晶体材料的要求，于是，人们开始用人工生长晶体。晶体生长的理论和实践研究起始于 19 世纪 80 年代，但直到 20 世纪 70 年代建立了描述晶体生

长的一套完整的数学形式之后，才形成了一门独立的学科。

电子材料中有许多材料是晶体材料，常用的包括有半导体晶体、压电晶体、热释电晶体、铁电晶体、电光晶体、非线性光学晶体、激光晶体、声光晶体、磁光晶体等。由于晶体材料具有许多优异的性能 因此在电子技术、光学技术、声表面波技术、信息处理技术、红外技术、原子能技术、通信、国防、地质勘探、交通运输、基础科学研究、医疗卫生等各个领域得到广泛的应用。例如，半导体晶体促进了微电子技术的迅速发展；激光晶体不仅用来解决通信、测距、定位等问题 而且在材料加工、医学、生物工程等领域发挥了重大的作用 压电、热释电、铁电、电光、声光、光电和光敏晶体以及液晶的实际应用正在不断扩展 金刚石和其它超硬晶体已被材料加工技术广泛采用。

晶体的物理性质与其内部结构是密切相关的。阅读本章有助于理解本书后续章节中关于晶体材料的论述。本章主要阐述晶体材料的结构、缺陷、物理性质和制备加工技术。

## 2.2 晶体材料的结构和物性

### 2.2.1 晶体的结构

#### 一、晶体的点阵结构

一切晶体不论其外形和大小如何 其内部质点总是作完全规则有序排列的 即晶体中的质点的排列是按照一定的方式不断地重复的。这种性质称为晶体结构的周期性。

空间点阵是用来描述晶体物质中质点的排列方式的。点阵按其阵点分布的情况分为直线点阵（一维点阵）（见图 2.1(a)）、平面点阵（二维点阵）（见图 2.1(b)）和空间点阵（三维点阵）（见图 2.1(c)）。

各阵点分布在三维空间的点阵，称为空间点阵。在任何晶体的空间点阵中都可以划出一个平行六面体单元，整个晶体可以看作是由这种单元在三维空间紧密堆积而成，如图 2.1(c) 所示。平行六面体单元是对抽象的空间点阵而言的，在具体的晶体结构中引入相应的划分单元时，则这样的单元又称为晶胞。晶胞是能反映晶体对称性的最小构造单位，如图 2.2 所示 棱长  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示三个轴方向上的基矢（重复周期）， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别表示基矢间夹角。这六个参数是决定晶胞形状和 sizes 的主要参数，称为晶胞常数（或晶格常数）。

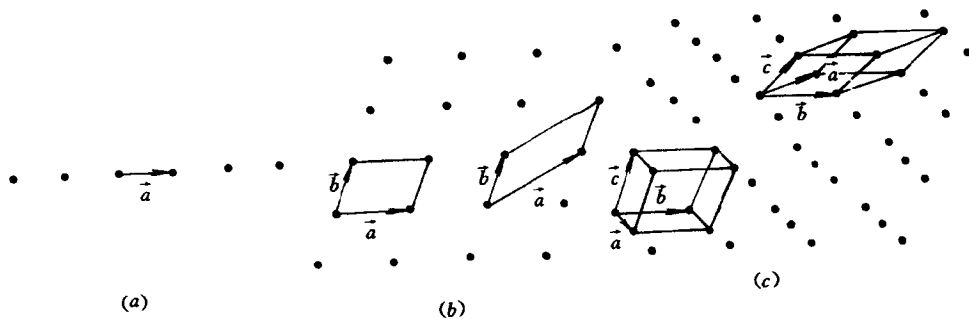


图 2.1 点阵示意图

(a) 直线点阵；(b) 平面点阵；(c) 空间点阵。

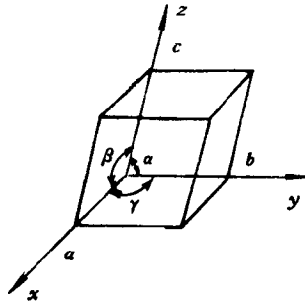


图 2.2 单位晶胞和晶胞常数

## 二、7 个晶系和 14 个空间格子

空间点阵的晶胞有 7 种类型。晶胞形状是晶体分类的依据，这样就把晶体分为 7 类称为晶体的 7 个晶系。图 2.3 示出了这 7 个晶系及其晶胞常数。

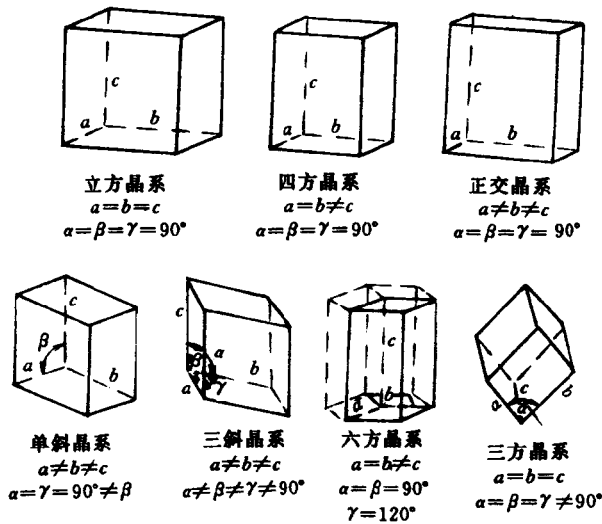


图 2.3 7 个晶系及晶胞常数

1855 年，法国结晶学家布拉维 Bravais 用数学方法证实所有晶体的空间点阵都是由 14 种具有特征的平行六面体单胞重复组成，这种单胞称为布拉维原胞，也称布拉维空间格子。图 2.4 示出了 14 个布拉维空间格子。其中六方晶系和三方晶系的单胞轴之间有相同的关系因此三方晶系也可以表示为六方晶系晶胞常数与六方晶系相同。

## 三、晶体的对称性

晶体的外形及其它宏观观察中所表现的对称性称为宏观对称性，晶体的宏观对称性是由其点阵结构决定的，它严格受晶体内部点阵的规律性和特有的布拉维原胞所约束。欲使晶体对称图形中各等同部分重合，必须通过一定的操作来实现。对称操作指不改变等同部分内部任何两点间的距离，而使晶体中各等同部分调换位置且能够恢复原状的动作。表明对称操作的几何要素点、线、面称为宏观对称要素，有对称中心、对称面、对称轴、旋转倒反轴。晶体具有什么样的对称要素由晶体本身的性质决定因此依据晶体所

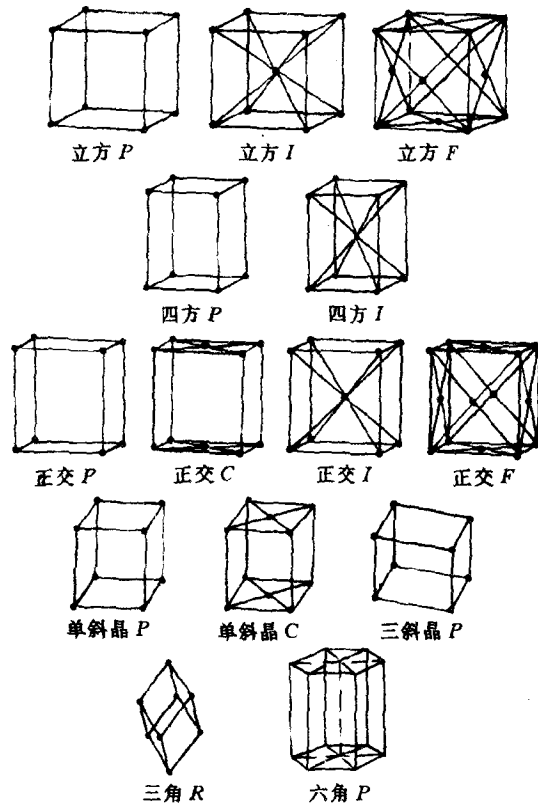


图 2.4 14 个布拉维格子

$P$ —简单结构； $C$ —底心结构； $F$ —面心结构； $I$ —体心。

具有的对称要素 可以对晶体分类。

晶体中的这些对称要素可以单独存在，也可以相互组合形成各种不同的对称类型。从数学的角度，各种对称要素可以产生无穷多的组合方式。但从结晶学的角度，只有 32 种不同的组合 这就是晶体的 32 种对称类型——32 种点群。表 2.1 列出了 32 种点群的类型及其标记符号。

在晶体结构中还存在着与平移操作相联系的对称要素 即螺旋轴和滑移面 通常把这类对称要素称为微观对称要素。在晶体结构中所有对称要素构成了 230 种组合的情况，称为 230 种微观对称类型 或称 230 个空间群。

#### 四、晶体的晶面符号

通常用密勒指数来表示晶面符号，它是由英国学者密勒 ( Miller ) 在 1839 年发明的。密勒指数是取晶面在三个晶轴上截距系数的倒数，然后化简，将三个数字按  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的次序连写在一起 用括号括起来，一般形式为  $(hkl)$ 。例如一晶面在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的截距分别为  $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/6$  则密勒晶面符号为  $(321)$ 。如果该晶面与  $-y$  轴相截，则表示为  $(\bar{3}21)$ 。如果该平面平行于  $y$  轴 则表示为  $(301)$ 。晶面符号仅表述晶面的方向，而不表述晶面的位置。晶面符号除了用  $(321)$  这种形式表示外 还有下列几种。

表 2.1 32 种点群类型及符号

序号	晶系	国际符号	熊夫利符号	序号	晶系	国际符号	熊夫利符号	序号	晶系	国际符号	熊夫利符号
1	三	1	C <sub>1</sub>	12	三	32	D <sub>3</sub>	23	六	$\bar{6}$	C <sub>3h</sub>
2	斜	$\bar{1}$	C <sub>i</sub>	13	方	$\bar{3}^2/m$	D <sub>3d</sub>	24	六	$\bar{6}m2$	D <sub>3h</sub>
3	单斜	2	C <sub>2</sub>	14	四方	4	C <sub>4</sub>	25	方	6mm	C <sub>6v</sub>
4		m	C <sub>s</sub>	15		$\bar{4}$	C <sub>4</sub>	26		622(62)	D <sub>6</sub>
5		2/m	C <sub>2h</sub>	16		$\bar{4}2m$	D <sub>2d</sub>	27		6/mmm	D <sub>6h</sub>
6	正交	2mm	C <sub>2v</sub>	17		4/m	C <sub>4h</sub>	28	立方	23	T
7		222	D <sub>2</sub>	18	4mm	C <sub>4v</sub>	29	m3		T <sub>h</sub>	
8		mmm	D <sub>2h</sub>	19	422(42)	D <sub>4</sub>	30	$\bar{4}32$		T <sub>d</sub>	
9	3	C <sub>3</sub>	20	4/mmm	D <sub>4h</sub>	31	432(43)	O			
10	三方	$\bar{3}$	C <sub>3i</sub>	21	六	6	C <sub>6</sub>	32	m3m	O <sub>h</sub>	
11		3m	C <sub>3v</sub>	22	方	6/m	C <sub>6h</sub>				

1. 32 个点群国际符号的含义

m——镜像对称。

n——数字 n 为旋转轴轴次,可以是 1、2、3、4、6。

$\bar{n}$ ——数字  $\bar{n}$  为旋转倒反轴轴次。可以是  $\bar{1}$ 、 $\bar{2}$ 、 $\bar{3}$ 、 $\bar{4}$ 、 $\bar{6}$ 。

数字和字母 m 以及由数字和字母组成的分数分别表示晶体某三个(对三方晶系为两个,对单斜和三斜晶系为一个)方向上的对称要素。数字表示该方向上的旋转轴轴次;m 表示与该方向垂直的对称面;分数表示该方向同时存在旋转轴和垂直于该方向的对称面,并将轴的符号写为分子,面的符号写为分母。

三斜晶系:只有一次旋转轴,无其它对称要素。

单斜晶系:只表示 y 方向,如 2/m,表示 y 方向有一个二次旋转轴和与该方向垂直的对称面。

正交晶系:表示三个互相垂直的方向,顺序为 x、y、z,如 mm2,表示在 x、y 两个方向均有垂直的对称面,在 z 方向有一个二次旋转轴。

三方晶系:第一项表示 z 方向,第二项表示 x、y、U 方向,如 32,表示 z 方向有一个三次旋转轴,在 x、y、U 方向都有一个二次旋转轴。

六方晶系:第一项表示 z 方向,第二项表示 x、y 或 U 方向,第三项表示 x、y、U 轴之间夹角的平分线方向。如 6mm,表示 z 方向有一个六次旋转轴,垂直于 x、y 或 U 轴有对称面,垂直于 x、y、U 轴之间夹角平分线有对称面。

四方晶系:第一项表示 z 方向,第二项表示 x、y 方向,第三项表示 x、y 轴夹角的平分线方向。如 4mm,表示 z 方向有一个四次旋转轴,在垂直于 x 或 y 方向有对称面,在垂直于 x、y 轴夹角平分线方向有对称面。

立方晶系:第一项表示 x、y、z 方向,第二项表示立方体对角线方向。如 23,表示 x、y、z 方向有一个二次旋转轴,在立方体对角线方向有一个三次旋转轴。

2. 32 个点群中熊夫利符号的含义

C<sub>n</sub>——旋转对称轴, n=1、2、3、4、6。

C<sub>nh</sub>——一个 n 阶旋转轴加上一个与之正交的对称面。

C<sub>ni</sub>——一个 n 阶旋转轴加上一个对称中心。

C<sub>nv</sub>——一个 n 阶旋转轴加上包含此轴(即与此轴平行)的几个对称面。

C<sub>i</sub>(=S<sub>2</sub>)——晶体有一个对称中心或甚至没有对称中心。

C<sub>4i</sub>(=S<sub>4</sub>)——一个四阶旋转倒反轴,没有对称中心。

D<sub>2</sub>(=V)——三个垂直相交的二次旋转轴。

D<sub>2h</sub>(=V<sub>h</sub>)——对称性 V,外加分别对三个二次旋转轴垂直的对称面。

D<sub>2d</sub>(=V<sub>d</sub>)——对称性 V,外加包含主晶轴在内的两个对称面,此两对称面与另外两轴成 45°角。

D<sub>n</sub>——有 C<sub>n</sub> 的轴(主晶轴),以及 n 个与此轴垂直的二次旋转轴(次晶轴)。n=3、4 或 6。

D<sub>nd</sub>——对称性 D<sub>n</sub>,外加包含 C<sub>n</sub> 轴且等分另外两个二次旋转轴的夹角的 n 个对称面。

D<sub>nh</sub>——对称性 D<sub>n</sub>,外加一个垂直于 C<sub>n</sub>(主晶轴)的对称面,因而 n 个对称面每个都包含一个次晶。

T——三个正交的二次旋转轴及四个三次旋转轴(正四面体点群)。

T<sub>h</sub>——对称性 T,加上垂直于每个二次旋转轴的对称面。

T<sub>d</sub>——对称性 T,加上六个对称面,每个面包含两个三次旋转轴。

O——三个正交的四次旋转轴,六个二次旋转轴和四个三次旋转轴(正八面体点群)。

O<sub>h</sub>——对称性 O,加上 T<sub>d</sub> 及 T<sub>h</sub> 的对称面(立方体点群)。

{321} 表示晶体中与 (321) 等同的所有晶面。

[321] 表示平行于一条从原点出发到某个点的直线的方向，该点的坐标可以表示成一个小的整数 并且等于 3,2,1。

<321> 表示晶体中与 321 等同的所有方向。

## 五、晶体结构

对于一个晶体来说 其性质并不单纯表现在几何观念上 在化学和物理方面的特征都随时可以显示出来。分布于空间格子状结构中的质点有离子、原子、原子团及分子 质点之间相互维系的引力 是影响晶体性质的重要因素之一 通常把这种引力称为键 它是相互作用着的原子中的电子发生配置而产生的作用力。典型的键分为以下四种。

### 1. 离子键

这种键的特点是分布于晶格结点上的 是单独的离子，每一个离子被带有相反符号的离子直接围绕着。离子键是很强的键，许多离子固体很坚硬且具有很高的熔点，不导电，透明或半透明 无金属光泽。

### 2. 共价键或原子键

这种键的特点是分布于晶格结点上的质点是单个的原子，各原子以自己的电子和相邻的原子共有的方式结合。由共价键形成的最重要的晶体结构是金刚石结构，最重要的半导体硅和锗是以这种方式结晶的。共价键通常是强键，共价晶体往往很硬且具有很高的熔点。

### 3. 范德瓦尔斯 (Van der Waals) 键或分子键

这种键的特点是分子占据着晶格上结点的位置，相互间仅以分子引力相联结，这一类结构通常是一些在低温时转变为晶体的惰性气体。分子型晶体熔点低，压缩性大，热膨胀系数大 导热系数小 硬度低 不导电。

### 4. 金属键

这是一些金属所特有的质点结合方式，这类结构中同时包含着中性的和离子化了的原子，其特性介于离子键和共价键之间。每个原子被离子化的机会是均等的，即电子可以自由移动并不断地由各原子彼此交换着，并且总有着一些自由电子，也就是在一瞬间不受一定的原子束缚的电子。由于晶体中自由电子的存在，表现出高的导电性、导热性、不透明和金属光泽等特性。

## 2.2.2 单晶材料的物性

### 一、晶体的通性

各种晶体由于其成分和具体结构不同，不但在外形上各不相同，而且在性质上也有很大差异。但是由于一切晶体都具有质点排列有周期性这一共同点，因此晶体之间必然存在着一些通性。

#### 1. 晶体的自限性和晶面角守恒定律

晶体具有自发地形成封闭的凸多面体外形的性质，晶体的外表由晶面、晶棱和晶顶等要素所包围 如图 2.5 所示，这称为晶体的自限性。晶体的自限性是晶体内部格子构造的外在反映，它常因生长时外界条件的影响不能充分地或完全不能体现出来，但同一晶体在相同的温度和压力下 其相应晶面 或晶棱 之间的夹角却不受外界条件的影响 始终保持