

铁电物理的近期发展*

钟 维 烈

(山东大学物理系, 济南 250100)

摘 要 介绍了铁电体物理学的基本概念、发展简史、近年来的主要进展以及当前的研究方向。指出铁电体物理学研究的核心是自发极化, 发展历史可分为四个阶段。近年来的主要进展有四方面, 即: 第一性原理的计算; 铁电相变的尺寸效应; 铁电液晶和铁电聚合物; 集成铁电体。当前的研究方向主要有两个, 一是低维系统, 二是调制结构。

关键词 铁电软模, 尺寸效应, 低维铁电体, 极化调制结构

Abstract A brief introduction is given to the physics of ferroelectrics, including its basic concepts, history, progress in recent years and present research trends. It is pointed out that the core of the ferroelectrics physics is spontaneous polarization. The history can be divided into four stages. Recent years have witnessed significant progress in four aspects, i. e., calculation from first principles, the size effect in ferroelectric phase transitions, ferroelectric liquid crystals and polymers and integrated ferroelectrics. The principal research trends today are low dimensional systems and modulated structures.

Key words ferroelectric soft mode, size effect, low dimensional ferroelectrics, polarization modulated structure

1 核心是自发极化

一般电介质只有在电场作用下才出现极化, 但有些电介质中存在自发极化, 而且自发极化可在电场作用下转向(不一定反向), 这类电介质就是铁电体。显然对物理学家来说, 最有趣的问题是自发极化的起源。几十年来, 围绕这个问题的研究形成了铁电体物理学。作者在即将由科学出版社出版的专著《铁电体物理学》中, 用图 1 概括了当前铁电体物理学的主要内容。它可分为两大部分: 第一部分是关于自发极化的产生机制, 这表现为铁电相变理论; 第二部分是极化状态在各种外界条件下的变化, 这表现为铁电体的各种功能效应, 即介电响应、极化反转、压电、热电、电光和非线性光学效应等。第一部分有深远的学术意义, 激起了凝聚态理论

工作者的浓厚兴趣。第二部分有重要的应用价值, 不但许多物理学家而且许多材料科学家都在这方面积极开展工作。

极化是一种极性矢量, 自发极化的出现在晶体中造成了一个特殊方向。每个晶胞中原子的构型使正负电荷重心沿该方向发生相对位移, 形成电偶极矩。整个晶体在该方向呈现极性, 一端为正, 一端为负。因此, 这个方向与晶体的其他任何方向都不是对称等效的, 称为特殊极性方向。换言之, 特殊极性方向是在晶体所属点群的任何对称操作下都保持不动的方向。显然这对晶体的点群对称性施加了限制。在 32 个晶体学点群中, 只有 10 个具有特殊极性方向, 它们是: $1(C_1)$, $2(C_2)$, $m(C_2)$, $mm2(C_{2v})$, $4(C_4)$, $4mm(C_{4v})$, $3(C_3)$, $3m(C_{3v})$, $6(C_6)$ 和

* 1995年9月26日收到初稿, 1995年10月30日收到修改稿。

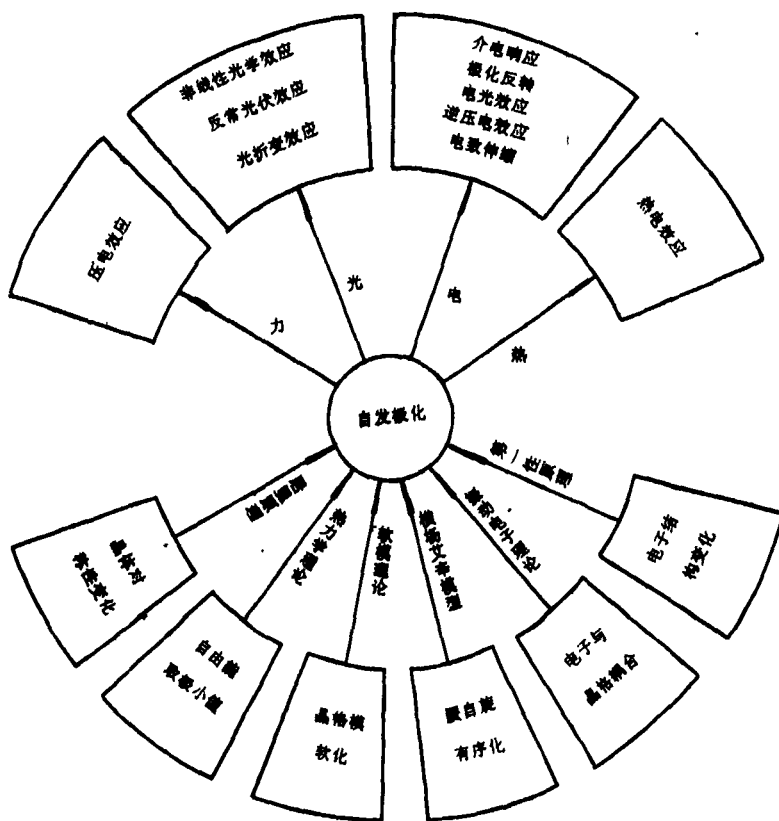


图1 铁电体物理学的主要内容及其相互关系示意图

6mm (C_{6v})。只有属于这些点群的晶体,才可能具有自发极化。这10个点群称为极性点群。

因为原子的构型是温度的函数,所以极化状态将随温度发生变化。这种性质称为热电性。热电性是所有呈现自发极化的晶体的共性。具有热电性的晶体称为热电体。但对于铁电性来说,存在自发极化并不是充分条件。铁电体是这样的晶体,其中存在自发极化,且自发极化有两个或多个可能的取向,在电场作用下,其取向可以改变。

压电性对晶体对称性的要求是没有对称中心。显然,极性点群都是非中心对称的,反之则不然。这表明,所有的铁电体都有压电性,但压电体不一定是铁电体。

晶体的铁电性通常只存在于一定的温度范围。当温度超过某一值时,自发极化消失,铁电体成为顺电体。铁电相与顺电相之间的转变通

常简称为铁电相变,该温度称为居里温度或居里点 T_c。在居里点附近自发极化连续变化的相变称为二级相变,自发极化不连续变化的相变称为一级相变。无论二级或一级相变,电容率都呈现反常变化。当 T > T_c 时,沿铁电相自发极化方向的低频相对电容率与温度的关系为

$$\epsilon_r(0) = \epsilon_r(\infty) + \frac{C}{T - T_0},$$

式中 ε_r(0) 和 ε_r(∞) 分别为低频和光频相对电容率, C 是居里常量, T₀ 叫居里-外斯温度。对于二级相变铁电体, T₀ = T_c, 对于一级相变铁电体, T₀ < T_c。ε_r(∞) 较 ε_r(0) 小得多,且与温度基本无关,在上式中可以忽略,于是

$$\epsilon_r(0) = \frac{C}{T - T_0}.$$

以上两式表示的关系叫居里-外斯定律。

铁电相变的实质是出现自发极化。自发极化是各晶胞中偶极子出现并平行排列的结果。

物理

不论自发极化起因于何种机制,自发极化的出现反映了系统内部有序化程度的提高.在相变理论中,引入序参量描写有序化程度.对铁电相变,自发极化就是序参量.序参量是表征相变的基本参量,它在一相中为零,另一相中不为零.有序化程度的变化是与晶体对称性的改变相联系的,所以序参量应能说明相变中对称性的改变.但在有些铁电体中,自发极化并不能完全说明对称性的变化,其自发极化的出现是与某个其他参量耦合的结果.在这种情况下,称自发极化为次级序参量,而把既能表征系统内部有序化程度,又能说明相变中对称性变化的物理量称为初级序参量.次级序参量是由于与初级序参量耦合才具有非零值.自发极化只是次级序参量的铁电体,叫非正规或非本征铁电体.

根据晶体结构测定和理论分析,可将铁电相变分为两种类型,即位移型和有序无序型.

由于原子的非谐振动,使其平衡位置相对于顺电相发生了偏移,这是产生自发极化的一种机制.因为这类相变是原子位移的结果,所以称为位移型相变.呈现这类相变的铁电体称为位移型铁电体, PbTiO_3 和 BaTiO_3 等属于这种类型.这类铁电体的特征之一是居里常量 C 大,约为 10^5 K .

在有些铁电体中,某种原子或原子团有两个或几个平衡位置.在顺电相,原子或原子团在这些位置的分布是无序的.在铁电相,它们的分布有序化,即择优地占据其中某个平衡位置.这是产生自发极化的另一种机制.因为相变是原子或原子团分布有序化的结果,所以称为有序无序相变.呈现这种相变的铁电体称为有序无序型铁电体, KH_2PO_4 (KDP) 是这类铁电体的代表.这类铁电体的特征之一是居里常量 C 小,约为 10^3 K .

必须指出,这种分类是近似的,许多铁电体兼具有序无序和位移型的特征.例如原来认为 BaTiO_3 可能是典型的位移型铁电体,随着实验手段的提高,现在已有许多迹象表明,顺电相中 Ti 原子有多个平衡位置, BaTiO_3 的铁电相变有明显的有序无序特征.

25 卷(1996 年)第 4 期

铁电相变理论的突破性进展是软模理论.该理论认为,铁电相变应该在晶格动力学范围内加以研究,具体来说,自发极化的出现联系于布里渊区中心某个光学横模的软化.这里“软化”指频率降低以致振动“冻结”.这个模称为软模.软化的原因可作如下直观的理解:振动着的离子受到短程力和长程库仑力的作用,对光学横模说,这两种力具有相反的符号.当温度适当时,二者的数值接近相等,使振动频率趋近于零.软模理论集中注意对相变负责的晶胞中少数离子,用单势阱中的非谐振子描述这些离子的振动,成功地解释了铁电相变的主要特征.

软模理论最初是用来处理位移型系统的,但后来人们认识到它也适用于有序无序系统,不过在有序无序系统中,相变时软化的集体激发不是晶格振动模而是赝自旋波.赝自旋波是从铁磁性理论中移植过来的一个概念,它描述了粒子在双势阱中的运动.自旋波理论和方法在铁磁学中早已成熟,这使赝自旋波在描述有序无序型铁电体中迅速取得很大的成功.

软模理论的重要意义在于,它揭示了铁电相变的共性,而且指出铁电相变只是结构相变的一种特殊情况.一般地说,由布里渊区中心晶格振动模导致的结构相变称为铁畸变性相变.铁电相变是铁畸变性相变的一种,它是布里渊区中心光学横模的软化产生自发极化的铁畸变性相变.由布里渊区中心以外某处模的软化导致的结构相变称为反畸变性或反铁畸变性相变,其中最重要的是软模波矢位于布里渊区边界.在这种情况下,低对称相晶胞尺寸是高对称相晶胞的整数倍,这种反畸变性相变称为晶胞体积倍增相变.光学横模软化导致的晶胞体积倍增相变将造成反铁电相,其中大小相等的相邻电偶极子反向排列,总的极化为零.

2 四个发展阶段

铁电体的研究始于 1920 年.那一年法国人 Valasek 发现了罗息盐(酒石酸钾钠, $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 的特异的介电性能,导致

了其“铁电性”概念的出现.关于铁电研究的历史,近年来在《Ferroelectrics》和《Condensed Matter News》等杂志上陆续发表了不少文章,其中有的是系统的论述,有的是对某个阶段或某一重大发展的回顾.这些文章读来饶有兴味,颇多启发.

迄今铁电研究可大体分为四个阶段.第一阶段是1920到1939年,这一阶段发现了两种铁电结构,即罗息盐和 KH_2PO_4 系列,后者包括 KH_2PO_4 , KD_2PO_4 , RbH_2PO_4 , CsH_2PO_4 以及反铁电体 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 等.第二阶段是1940到1958年,这一阶段的主要成果是铁电唯象理论得以建立并趋于成熟,同时许多现在广为应用的氧化物铁电体是在这个阶段发现的.第三阶段是1960年到70年代,这是铁电软模理论出现并基本完善的时期,称为软模阶段.第四阶段是80年代至今,主要研究各种非均匀系统.

50年代以来,铁电体的总数急剧增加,现在已知的铁电体已达200多种(每种化合物或固溶体只算一种,以掺杂或取代改变成份者不算新的种类).铁电研究的论文数目逐年呈指数增长,目前每年论文数都在3000篇以上.国际上定期召开的主要学术会议有国际铁电会议(IMF)、欧洲铁电会议(EMF)、铁电应用国际讨论会(ISAF)、集成铁电体国际讨论会(ISIF)、铁电液晶国际会议(FLC)以及1995年首次召开,由我国举办的亚洲铁电会议(AMF)等.专业杂志有《Ferroelectrics》,《Ferroelectrics Letters》,《Integrated Ferroelectrics》和《IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control》等.铁电体的应用在不断扩大.铁电体作为陶瓷电容器介质材料、压电材料(特别是压电陶瓷材料)和热电材料早已得到普遍应用,确立了不可替代的主导地位.铁电体的极化反转特性以及非线性光学效应、电光效应和光折变效应已部分得到应用,研究工作正在蓬勃展开,很有发展前途.

3 近年来的新进展

近年来最重要的进展有以下四方面.

3.1 第一性原理的计算

物理学家们最感兴趣的铁电性起源问题,现在还没有真正解决.人们还不能回答这样的问题:为什么 BaTiO_3 和 PbTiO_3 有铁电性而在晶体结构和化学方面看来都相同的 SrTiO_3 却没有铁电性?对固体这样一个由原子核和电子组成的多体系统,如果能从第一性原理出发进行计算,则有可能得到解答.现代能带结构方法和高速计算机的发展使这种计算有了可能.近年来,《Phys. Rev. B》等杂志发表了一系列关于铁电体第一性原理计算的论文^(1,2).1990,1992和1994年连续举行了三次铁电体第一性原理计算国际讨论会.对 BaTiO_3 , PbTiO_3 , KNbO_3 和 LiTaO_3 等铁电体都开展了第一性原理的计算,得到了电子密度分布、软模位移和自发极化等重要结果,对阐明铁电性的微观本质有重要的作用.

3.2 尺寸效应的研究

铁电薄膜和铁电超微粉的发展,使铁电体尺寸效应的研究成为一个有重要实用意义的课题.近年来在有限尺寸铁电体的相变研究方面有重要的进展⁽³⁻⁵⁾.理论上预言了自发极化、相变温度和介电极化率等随尺寸变化的规律,计算了典型铁电体的铁电临界尺寸.这些结果得到了实验的证实,它们不但对集成铁电器件和精细复合材料的设计有指导作用,而且是铁电理论在有限尺寸条件下的发展.

3.3 铁电液晶和铁电聚合物的基础与应用研究

在液晶中寻找铁电性的努力长期没有获得成功,因为大多数液晶结构对称性不够低,偶极相互作用小于热能,或者形成了偶极子反平行排列的二聚物,使有效偶极矩等于零.后来明确了由手性分子组成的倾斜的层状C相(SC*相)液晶可具有铁电性,并通过制备、结构和相变的研究,明确了它属于赝正规铁电体,在居里物理

点以上电容率符合居里-外斯定律,由光散射观测到软模.铁电液晶在电光显示和非线性光学性能方面很有吸引力.电光显示基于极化反转,其响应速度较普通丝状相液晶快几个数量级.在非线形光学方面,其二次谐波发生效率已不低于是常用的无机非线性光学晶体.

聚合物的铁电性是 70 年代末才得到确证的^[6].虽然 PVDF (聚偏氟乙烯)的热电性和压电性早已发现,但它由晶态和非晶态组成且有多种晶形,压电性和热电性都是经直流电场处理后才出现的,人们难以确定其中的极化是由电场注入的电荷被俘获造成的亚稳极化,还是由晶体结构的非对称性决定的自发极化.这个问题现已确定无疑地解决了.现在人们不但确证了 PVDF 的铁电性,而且发现了一些新的铁电聚合物,如奇数尼龙(尼龙 11,尼龙 7 等)^[7].聚合物种类繁多,结构多样化,预期从中可发掘出更多的铁电体,从而扩展铁电体物理学的研究领域,并开发新的应用.

3.4 集成铁电体的发展

铁电薄膜与半导体的集成称为集成铁电体^[8].以铁电存储器等实际应用为目标,近年来广泛开展了铁电薄膜及其与半导体集成的研究.铁电存储器的基本形式是铁电随机存取存储器 (FRAM),其中铁电元件的 $\pm P_r$ (P_r 为剩余极化) 状态分别代表二进制数字系统中的“1”和“0”,所以是基于极化反转的一种应用.早在 50 年代,人们就以 $BaTiO_3$ 为主要对象进行过这方面的研究.当时由于三个原因未能实现:一是块体材料要求反转电压太高;二是电滞回线矩形度不好,使元件发生误写误读;三是疲劳显著,经多次反转后有效极化减小.80 年代以来,由于铁电薄膜制造技术的进步和材料的改进,铁电存储器的研究重新活跃起来,并在 1988 年出现了实用的 FRAM.

铁电体的本质特征是具有自发极化且自发极化可在电场作用下转向,因此狭义地说,只有基于极化转向的应用才真正属于铁电性的应用.多年以来,实现这种应用的只有透明铁电陶瓷光开关等极个别器件,形成了铁电研究工作

者很不愿接受的现实.现在看来,以铁电薄膜存储器为代表,这方面的重大应用有可能在铁电薄膜上最终实现,这反过来又将对铁电研究以新的推动和提出新的课题,其意义不可低估.铁电薄膜在存储器中的应用不限于 FRAM,还有铁电场效应晶体管 (FFET) 和铁电动态随机存取存储器.除存储器外,集成铁电体还可用于红外探测与成像器件、超声与声表面波器件,以及光电子器件等.正是在这些实际应用的推动下,集成铁电体的研究成为铁电研究中最重要热点和前沿.

4 当前的研究方向

在铁电体物理学内,当前的研究方向主要有两个:一是铁电体的低维特性;二是铁电体的调制结构.

铁电体低维特性的研究首先是薄膜铁电元件提出的课题.在薄膜中,尺寸和表面效应变得不可忽略.深入了解表面效应需要研究表面的晶体结构、电子结构和偶极相互作用.薄膜中还不可避免有界面效应,包括铁电膜与基底间的界面、铁电膜与电极间的界面以及晶粒间界.薄膜厚度变化时,自发极化、相变温度、矫顽场和电容率等都随之变化,需要探明其变化规律并从微观机制上加以解释,以指导材料和器件的设计.伴随着极化反转的疲劳的起因和改善方法,这些问题更是实用和理论上的重要问题.目前,铁电薄膜理论的宏观方法主要是在自由能中引入表面项,并用外推长度表示表面与体内的差别^[9-11].微观方法则在横场艾辛模型中引入不同于体内的表面层自旋作用系数和表面层隧道贯穿频率^[4].

除薄膜外,铁电超微粉也很有吸引力.实验和理论表明,尺寸在亚微米以下时,尺寸效应就逐步明显.在这种三维尺寸都有限的系统中,块体材料中那种导致铁电相变的布里渊区中心光学横模可能无法维持.长程库仑力显然将随尺寸减小而减弱,当它不能平衡短程恢复力时,铁电有序即不能建立.随着尺寸减小,预期将先后

出现铁电性、超顺电性和顺电性。目前铁电超微粉相变尺寸效应的实验和理论研究都在迅速取得进展^[12-14]。理论上的重要结果之一是证明外推长度是颗粒尺寸的函数,因而在任何铁电超微粉中都将发生尺寸驱动的铁电-顺电相变^[6]。这与薄膜不同,薄膜中外推长度与厚度无关,仅在外推长度为正时才发生这种相变。

铁电体的调制结构包括人工调制结构和相变形成的调制结构。

相变形成的调制结构有偶极玻璃和无公度相。偶极玻璃包括多种材料,其共同特点是:在一个基本上正规的晶格中,偶极矩的取向仅有短程有序而无长程有序。KTaO₃不是铁电体, LiTaO₃ 和 KNbO₃ 则是熟知的铁电体,因此 K_{1-x}Li_xTaO₃ 和 KTa_{1-x}Nb_xO₃ 的相变行为令人感兴趣。当 x 在一定范围时,得到的是偶极玻璃。铁电体KH₂PO₄ 和反铁电体(NH₄)H₂PO₄ 的混合晶体在一定的组分范围时也是偶极玻璃。这些材料在温度 T_m 呈现电容率极大值,而 T_m 本身随测试频率升高而升高。在 T_m 并不出现对称破缺。当晶体在电场中冷却时,在 T_m 以下可诱发与温度有关的极化。

相似的行为也发生于一些不同离子占相同晶格位置的化合物或固溶体中,例如 Pb(Nb_{2/3}Mg_{1/3})O₃ 和 BaTi_{1-x}Sn_xO₃。它们也在 T_m 呈现电容率极大,虽在 T_m 不出现对称破缺,但降温时可出现长程有序。它们很接近于普通的铁电体,只是相变发生于较宽的温区,通常称为弛豫铁电体^[15]。研究偶极玻璃和弛豫铁电体的意义在于,一方面它们有一些优良的实用性能(如大的电致伸缩),另一方面有助于揭示铁电有序的演化过程。

无公度相也是相变形成的调制结构。用软模的语言来说,相变前(高对称相)的晶格周期决定了布里渊区边界波矢的大小,而软模波矢则决定了相变后(低对称相)的晶格周期。为保持相变后晶体的平移对称性,软模波矢与边界波矢之比必须为有理数。如果该比为无理数,则相变后进入的是无公度相。具有无公度相的铁电体的自由能中包含序参量空间的各向异性

项,这可说明在无公度相的低温侧将发生锁定相变进入正规的或非正规的铁电相。在接近锁定相变时,在无公度相的这一部分内出现规则的织构,可看成是被“畴壁”分开的极化交替排列的一些铁电层。已发现不少铁电体有无公度相,如 NaNO₂, SC(NH₂)₂ 和 A₂BX₄ 系列化合物, Rb₂ZnCl₄ 是后者的代表。在该类化合物中,已确定了描述类似电畴的无公度织构的参量,以 Rb₂ZnCl₄ 为例,该织构中极化的大小接近非正规铁电相的值。很靠近锁定相变温度时,其周期约为 10 nm。

第二类调制结构是人工规则织构。如果在铁电体中设法形成周期性畴结构,且周期与介质中光或声过程的特征长度相适应,则在光或声过程中将出现有趣并有用的现象,例如在准相位匹配条件下实现激光倍频、在较厚的铁电体中获得超高频压电谐振等。近年来已在 LiNbO₃ 和 LiTaO₃ 等晶体中实现了周期性畴结构,并对其结构和性能进行了深入研究。这些畴结构的调制周期为微米量级,所以也称微米超晶格^[16]。调制周期更短(纳米量级)的铁电超晶格(如 BaTiO₃/SrTiO₃)也在研究中^[17-19]。值得注意的是,用于铁电存储器的疲劳特别小的材料 SrTi₂Ta₂O₉ 和 SrTi₂Nb₂O₉ 是一种天然超晶格,由铋层和类钙钛矿层交替组成,这必将激起人们对铁电超晶格的更大兴趣。

另一种人工规则织构是以铁电体为活性组元的精细复合材料^[20]。铁电体可以是层状的(二维)、纤维状的(一维)或超微粉(零维),当其特征尺寸在亚微米以下时,极化调制的复合材料中将出现新颖的电光和非线性光学现象。

参 考 文 献

- [1] R. D. King-Smith et al., *Phys. Rev. B*, **49** (1994), 5828.
- [2] R. Resta et al., *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993), 1010.
- [3] D. R. Tilley et al., *Solid State Commun.*, **49** (1984), 823.
- [4] C. L. Wang et al., *J. Phys.: Condens. Matter*, **3** (1992), 4743.
- [5] W. L. Zhong et al., *Phys. Rev. B*, **50** (1994), 698.

- [6] R. G. Kepler, *Adv. Phys.*, **41**(1992), 1.
- [7] B. A. Newman et al., *Ferroelectrics*, **127**(1992), 229.
- [8] C. A. Araujo et al., *Ferroelectrics*, **116**(1991), 215.
- [9] J. F. Scott et al., *Physica B*, **150**(1988), 160.
- [10] W. L. Zhong et al., *Phys. Rev. B*, **50**(1994), 12375.
- [11] W. L. Zhong et al., *Phys. Lett. A*, **189**(1994), 121.
- [12] W. L. Zhong et al., *J. Phys.: Condens. Matter*, **5**(1993), 2619.
- [13] S. Schlag et al., *Solid State Commun.*, **91**(1994), 883.
- [14] W. L. Zhong et al., *Ferroelectrics*, **160**(1994), 55.
- [15] L. E. Cross, *Ferroelectrics*, **151**(1994), 305.
- [16] 闵乃本, *物理学进展*, **13**(1993), 26.
- [17] T. Tsurumi et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**(1994), 5192.
- [18] B. D. Qu et al., *Phys. Lett. A*, **189**(1994), 419.
- [19] D. Schwenk et al., *Ferroelectrics*, **104**(1990), 349.
- [20] 姚熹, *高技术新材料要览*(曾汉民主编), 中国科学技术出版社, (1993), 552.

高压物理研究在地球科学中的应用*

熊大和

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘要 高压物理是研究高压下物质状态、结构、特性及变化规律的学科。地球本身是一个巨大的高压实验室, 其内部物质无不经受高压作用。应用高压物理研究的新成就来探讨地球内部物质的相变和物性, 是一项重要课题。该文从地球层圈结构、地球内部物性分析入手, 重点阐明高压物理与地球科学的密切联系和发展交叉学科的重大意义。

关键词 高压物理, 地球科学, 地球层圈结构, 相变

Abstract High pressure physics investigates the state, structure, characteristics and changes of matter under high pressure. The Earth itself is a giant high pressure laboratory, since all matter in its interior is under high pressure. This article describes the application of the latest research results of high pressure physics to the study of phase transformations and characteristics of materials in the Earth's interior based on analysis of the Earth's layer structure and physical characteristics of its interior.

The close relationship between high pressure physics and earth sciences is stressed, as well as the current significance of developing border-line science.

Key words high pressure physics, earth science, earth layer structure, phase transformation

自公元前 600—200 年科学家确认地球是球形以来, 经历过地心说和日心说阶段以后, 在漫长岁月里, 人们竭力在探索宇宙和地球的真实模型。迄今浩瀚的太空和深沉的大地仍旧吸引着众多研究者的兴趣。

回顾地球科学的发展历程, 由于物理学、化学、数学、力学的应用, 学科之间的交叉促使地学迅速进入深层次的研究。采用地震波探测、地

磁地电反演等方法以后, 地球内部结构及其形成演化的历史才从大多数的臆测假说, 迈入以科学数据为基础建立各种模式的阶段。此外, 天体物理、天体化学的最新成就, 也从另一侧面拓宽了地学的研究领域。本世纪以来高压物理研究成果逐步应用于地球科学, 使原有模式逐渐

* 1994年11月17日收到初稿, 1995年4月24日收到修改稿。