

激光散射及光电子技术对液晶特性的测试*

屠美^{1,2} 黄耀熊^{2,†}

(1 中山医科大学物理教研室 广州 510089)

(2 暨南大学生物医学工程研究所 广州 510632)

摘要 激光散射和光电子技术是目前测试液晶特性最先进和可靠的手段.此技术通过静态光散射和动态光散射两种测试方法,测得液晶的分子量、浊度系数、相关长度、相变温度、展矩和扭矩等许多物理参数,因此可判断液晶的类型,了解液晶的结构、形态、相转移及动态变形的过程,为液晶在许多领域的应用提供可靠的理论依据.

关键词 激光散射 液晶 特性

MEASUREMENTS ON THE PROPERTIES OF LIQUID CRYSTALS BY LASER LIGHT SCATTERING AND OPTOELECTRONICS

TU Mei^{1,2} HUANG Yao-Xiong²

(1 Department of Physics, Sun Yat-sen University of Medical Sciences, Guangzhou 510089, China)

(2 Institute of Biomedical Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract Laser light scattering is the most advanced and reliable method for measuring both the static and dynamic properties of liquid crystals. Many parameters such as molecular weight, optical turbidity, correlation length, phase transition temperature, splay pitch and twist can be measured by this technique. These parameters are very significant in the theoretical analysis of liquid crystals and their applications in optoelectronics.

Key words laser light scattering, liquid crystal, static and dynamic properties

1 引言

人们发现液晶已经一个世纪了,但直到 20 世纪 70 年代,液晶的研究成果才逐渐从科学实验室进入到实际应用领域.

液晶是性质介于晶体和液体之间的低维有序的流体,它既有液体的流传性,又具有晶体的光学各向异性.液晶在外加电场、磁场和力场的作用下,其分子排列状态会发生变化,实现光调制作用,并呈现双折射性、旋光性、光干涉和光散射等特殊的光学性能^[1].当液晶的指向矢因外界条件变化而发生变化时,通过它的光散射强度亦发生变化;此外,液晶分子的热涨落、介电常数涨落、取向涨落等都能引起光散射.正是由于液晶具有这些特殊性能,它被广泛地应用到许多尖端新技术领域中.例如:化工的污染测定,高分子反应中的定向聚合,仪器分析、航空机械及冶金产品的无损探伤和微波测定,医学上的皮癌检查、体温测定等等.特别是在液晶显示中,液晶显

示器件以其功耗低、驱动电压低、明亮环境下可显示、可与集成电路相匹配、能实现全彩色化等许多优越的性能得到了广泛的应用.另外,改变液晶分子排列所需的驱动功率极低这一特性为研究袖珍计算机和全电子手表的数字显示提供了有利条件.目前,液晶图像显示和液晶快速电视显示的研制也日益引人注意.

为了使液晶在光电子方面得到更好的应用,尤其重要的一点是了解液晶的物理特性,即定量地测试液晶的物理参数,液晶的光散射和光电子测试技术应运而生,近年来得到迅速发展.其中,激光散射技术可对液晶的物理特性进行无扰、快速、准确地测定,这对于液晶产品的研究和开发具有重大的理论指导意义.

* 2001-06-14 收到初稿,2001-08-22 修回

† 通讯联系人

2 液晶的静态光散射测试

2.1 液晶分子的结构、形态

2.1.1 理论依据

在液晶溶液中,各向同性相并非全部各向同性,液晶分子的方向或多或少在各向同性相小区域内相互关联,这种取向波动会引起光散射.根据德拜理论^[2],散射光的瑞利散射系数 R_θ 与待测样品的重均分子量 \overline{M}_w 、回转半径 R_g 和浓度 C 之间有如下关系:

$$\frac{H_c}{R_\theta} = \frac{1}{\overline{M}_w} \left[1 + \frac{16\pi^2}{3\lambda^2} R_g^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + \dots \right] + 2A_2 C, \quad (1)$$

式中 $H = 2\pi^2 n_0^2 (dn/dc) N \lambda^4$; R_θ 是通过测定比较已知瑞利系数 R_θ^0 的一些纯溶剂如苯、甲苯或水等的散射强度 I_0 , 以及被测样品的散射光强 I 来确定的,即 $R_\theta = (I/I_0) \cdot R_\theta^0$, R_θ 依赖于散射角度和溶质的浓度,通常取散射角为 90° ; A_2 为第二维利系数, $A_2 \ll 0$, 溶液产生相分离, $A_2 < 0$, 表示溶剂为劣溶剂, $A_2 > 0$, 表示为良溶剂; n_0 是溶剂的折射率; R_g 为回转半径,可判断粒子的大小,回转半径与流体力学半径之比可判断粒子的形状.通过测出瑞利散射比和折射率梯度 dn/dc , 利用(1)式给出齐姆图而得到液晶的粒子回转半径,重均分子量和第二维利系数.

2.1.2 实验装置

静态光散射装置使用美国布鲁海文公司 BI200SM 型激光散射仪,此装置通常由一电脑自动控制,步进电机无级调节的可在 5° 到 155° 范围内任意散射角度(步距 1° , 精确度 0.01°)引出散射光的精密光度台;一高灵敏度、低暗电流单光子记数系统,激光光源以及有关温度控制(精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 从 $4-96^\circ\text{C}$ 连续可调),和过滤装置等组成,如图 1 所示.激光光源有氩离子激光(输出功率 $10-200\text{mW}$)以及氦氖激光($2-20\text{mW}$),可分别根据实际需要提提供 488nm , 514nm , 及 633nm 波长的激光.入射激光通常是垂直偏振的.

2.1.3 测试方法

首先,配制 5—6 个不同浓度的液晶溶液,要求每种溶液混合均匀,且经过高速离心以除去杂质.然后在不同散射角下测量不同浓度溶液的 $H_c/R(\theta)$ 值,作齐姆图,把图中的直线外推得到

$$\text{斜率}_{c=0} = 16\pi^2 R_g^2 / 3\lambda^2 \overline{M}_w, \quad (2)$$

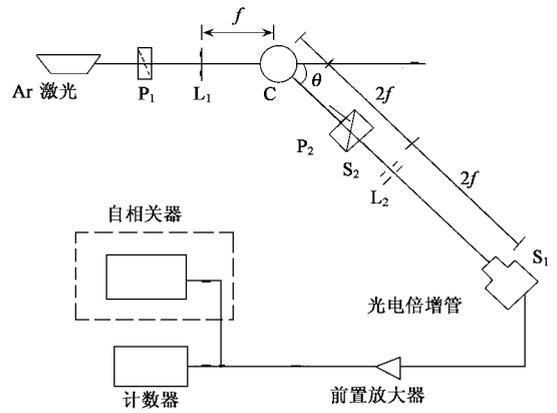


图 1 激光散射装置

(P: 偏振片, L: 透镜, C: 样品池, f: 焦距, S: 光阑, θ : 散射角)

$$\text{截距}_{c=0} = 1/\overline{M}_w, \quad (3)$$

均方回转半径的平方值为

$$R_g^2 = 3\lambda^2 / 16\pi^2 (\text{斜率} / \text{截距})_{c=0}, \quad (4)$$

由差示折射仪测出液晶的 dn/dc , 结合(2), (3)(4)式便可得出液晶的重均分子量 \overline{M}_w , 回转半径 R_g 及第二维利系数 A_2 .

对复杂的系统或第三维利系数明显的系统,还可进行 Berry 曲线分析.

2.2 静态小角光散射测试液晶的相变

2.2.1 原理

随着温度的升高,小分子液晶可呈现下列的相变过程:近晶相 \rightarrow 向列相 \rightarrow 胆甾相.由于分子有序程度的差别,近晶相和胆甾相液晶给出完全不同的小角光散射特征图形.因此,利用小角光散射法可研究液晶在升温过程中的相转移.

从液晶散射光的水平分量 H_V 、及垂直分量 V_V 的散射图形差异源于各向异性但排列有序性差的结构特征,其 H_V 及 V_V 图形在小角散射范围内都是围绕入射光的圆对称图形.实验证明,近晶型和向列型液晶有这种散射图形,再结合偏光镜观察,可将这两种液晶类型区分开.另外,若属于非无规取向相关,上述光轴平行的几率还与角度有关,由此得出 H_V 图形类似于球晶的四叶瓣状, V_V 图形为亚铃形,胆甾型液晶具有这种散射图形.液晶的光散射理论在 高分子液晶的表征中也同样适用^[3].

2.2.2 样品的制备及测试

选两片洁净的玻片,在其上涂覆聚酞亚胺溶液,作成沿面排列的液晶盒,液晶盒厚度为 $25\mu\text{m}$,然后在其中充满液晶,玻片四周用环氧树脂密封.把制好的样品进行小角光散射测试,观察其散射图形.由散

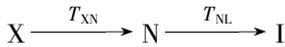
射图形的图案判断液晶的类型。

2.3 静态光散射测定存有无序粒子的液晶的相关长度

当向列型液晶和分散的小颗粒组成一个系统时,小颗粒会聚集,且导致向列结构的混乱。由于强烈的光浊度 τ ,光轴图案会变形。含有分散胶粒的向列液晶有时称之为“填充向列相(FN)”在软凝聚态物理学中逐渐引起人们的兴趣,且已成为多个实验室的研究课题^[4,5]。基础物理学对它感兴趣是为了研究当存在可构成一种新型热致向列相的可控阻尼无序成分时的相转移。从光学角度而言,向列液晶是一个单轴材料,有一随温度变化的双折射现象^[6],光轴取向的空间波动会产生强烈的散射光。测量光浊度是一种定量评价向列相液晶变形的方。根据描述变形单轴系统的光散射模型^[7],FN 浊度的测量作为温度的函数能精确导出向列相的相关长度值,而相关长度在理解无序态存在时的相转移是一个至关重要的量。因此,通过无序单轴系统的光散射测试可获得猝灭法得到的无序液晶中向列相的相关长度,从而研究相转移的过程。

2.3.1 理论依据

对于向列液晶,它的相图为结晶(X)→向列型(N)→各向同性(I)即



在向列液晶相中,分子展示了一个沿共同方向的长程取向有序,即向列指向矢。在光学性质上,向列相可作为一单轴材料,有一依赖温度的双折射。折射系数分别平行和垂直于指向矢 n ,双折射被定义为 $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ 。

向列相的光散射是由于光轴变形所致,故测量光浊度是评价向列液晶变形的一种方法。 τ 值可由下列方程求出:

$$I_{\tau} = I_0 \exp(-\tau d), \quad (5)$$

其中 I_0 和 I_{τ} 分别是入射光和透射光强, d 为液晶的厚度。

当向列液晶中含有不同体积分量的粒子时,光浊度作为温度的函数可用两种不同的近似法:弱散射近似[Bron近似法(BA),当 $\Delta n \ll 1$ 和 $\xi \Delta n \ll \lambda$ 时适用];不规则衍射近视(ADA,当 $\Delta n \ll 1$ 和相关长度 $\xi \gg \lambda$ 时适用)。这两个方法结合在一起包括了整个 ξ 轴。对于一般组分,这两个模式的形成通过两个主要的假设:液晶区域的双折射等于本体的 Δn ;向列指向矢的第四有序相关函数可依据第二有序相关

函数来表达。这些假设足以形成BA模式,在ADA的计算中必须进一步简化,假设系统是带有连续光学图形的独立各向异性散射的集合。这样,向列相关长度(ξ)和光浊度(τ)之间就有以下的关系式:

$$\tau = \frac{14K_0^2 \xi \Delta n^2}{45 n^2} \quad \xi K_0 \gg 1, \quad (6)$$

$$\tau = \frac{32K_0^4 \xi^3 \Delta n^2}{27 n^2} \quad \xi K_0 \ll 1, \quad (7)$$

其中 K_0 为入射光波矢。

2.3.2 样品的制备

含有小颗粒液晶样品用分散法制备。首先把样品分散在溶剂中,然后在 T_{NI} 以上的温度蒸发除去溶剂。小颗粒的体积含量范围为0.009—0.25(V/V)。制备好的样品放入液晶盒中。

液晶盒由两片半光学玻璃制成,在盒内表面作定向处理,使盒内的分子垂面排列。液晶盒的厚度 d 视 τ 值而定,一般选择20和50 μm 。

2.3.3 测试

测试装置如图2所示,它建立在一样品池有温度控制的倒置显微镜上。透射光强 I_{τ} 通过物镜后,由CCD摄像头组成的接收器测定。通过测定透射光强 I_{τ} ,由(5)式可得到不同温度(T)和不同小颗粒体积分量(Φ)时的 τ 值。作 $\tau - T$ 函数图,从中得出 $\tau(T)$ 曲线的形状,这是FN的一个有价值的特征,它可用作研究系统的内部结构。结合(6)(7)式可得到相关长度 ξ 值。作 $\tau - \xi$ 函数图,便可观察 τ 随相关长度的变化规律。

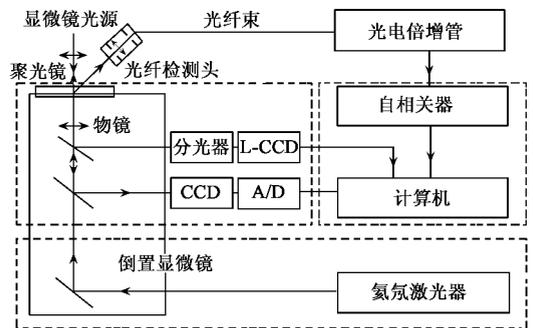


图2 显微激光散射测试装置

通过在一般有效范围内耦合前述两个模式(BA,ADA模式),得到一个复合的模式,可在整个 ξ 轴算出 $\tau(\xi, T)$,且不带待定系数。通过用理论的 $\tau(\xi, T)$ 拟合实验测得的 $\tau(\Phi, T)$,还可导出 ξ ,作为粒子体积分量 Φ 的函数。 $\xi(\Phi)$ 的测量,对于目前理解自由无序相出现时有序-无序之间的相转移是一个重要的实验测试。

3 液晶的动态光散射测试

3.1 用动态光散射确定向列液晶的展曲和扭曲弛豫模式

在各向同性液体中,光散射是由光学介电常数的波动 $\Delta\epsilon$ 引起的,这一波动是由于密度的起伏所致,其起伏大多数情况下也是由于热扰动造成的.但在向列相液晶的有序相中,光散射强度大约是普通各向同性液体的 6 倍^[8].其原因正如 Gennes 和 Post 所指出的那样^[9],是由于带缺陷的向列相中的指向矢所产生的自发扰动对 $\Delta\epsilon$ 作出了附加的贡献.向列型结构的这种动力学变形可用三种弹性变形即扭曲、展曲和弯曲来表征.动态光散射是一种非侵入性的无扰技术^[10],它为通过测定热扰动弛豫频率而确定这三种粘弹性变形的弛豫速率提供了一种有用的工具.

3.1.1 理论依据

尽管在向列液晶中各个分子有不同取向,它们的方向都趋于与指向矢 \mathbf{n} 平行,反过来,在某一给定的液晶微区内,指向矢也会不同于均衡取向 \mathbf{n}_0 ,而产生一小波动 $\Delta\mathbf{n} = \mathbf{n} - \mathbf{n}_0$.为简化,考虑一均衡取向 \mathbf{n}_0 平行于 z 轴的向列液晶,在任一点 r 的起伏可由 $n_x(\mathbf{r})$ 和 $n_y(\mathbf{r})$ 来描述,且其总的曲率弹性能是:

$$F_1 = \frac{1}{2} \int \left\{ K_{11} \left(\frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} \right)^2 + K_{22} \left(\frac{\partial n_x}{\partial y} - \frac{\partial n_y}{\partial x} \right)^2 + K_{33} \left[\left(\frac{\partial n_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial n_y}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} dV, \quad (8)$$

式中 V 是样品的体积,式中的三项分别代表展曲、扭曲和弯曲自由能密度,且 K_{11} 、 K_{22} 、 K_{33} 是“净” Frank 弹性常数^[11].

实验中,通过测定光散射的自相关函数,从其两个振幅 A_1 和 A_2 以及系数 $\Gamma_1(q)$ 和 $\Gamma_2(q)$ 来确定各有关动力学变形参数.光散射自相关函数 $G^{(2)}(q, t)$ 为

$$G^{(2)}(q, t) = B [1 + \alpha |S_1(q, t)|^2], \quad (9)$$

其中 B 是基线, α 是依赖于检测器几何形状的空间相干因子.且

$$S_1(q, t) = A_1(q) e^{-\Gamma_1(q)t} + A_2(q) e^{-\Gamma_2(q)t} \quad (10)$$

$A_1(q)$ 和 $A_2(q)$ 分别是具有 $\Gamma_1(q)$ 和 $\Gamma_2(q)$ 频率的归一模式的振幅.对于液晶来说,便是所谓的展曲-弯曲和扭曲-弯曲两种模式^[12-18].而 $\Gamma_1(q)$ 和 $\Gamma_2(q)$

分别为

$$\begin{aligned} \Gamma_1(q) &= \Gamma_{\text{展曲}}(q) = \frac{K_{11} q_{\perp}^2}{\gamma_1 - (\alpha_3^2 / \eta_b)} \\ &= \frac{K_{11} q_{\perp}^2}{\eta_{\text{展曲}}}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Gamma_2(q) = \Gamma_{\text{扭曲}}(q) = \frac{K_{22} q_{\perp}^2}{\gamma_1} = \frac{K_{22} q_{\perp}^2}{\eta_{\text{扭曲}}}, \quad (12)$$

这也就是反映这两种模式的粘弹比. α 表示 Leslie 粘滞系数; γ 为扭曲粘度; η 为 Miesowicz 粘度.

在液晶的展曲-扭曲几何构型中,入射光是垂直偏振的,而散射光的偏振则与指向矢平行且垂直于入射面和散射方向.单个液晶畴平面的方向与入射光偏振方向平行.在这种情况下,两个光散射模式的振幅与液晶的两个折射率有如下的关系:

$$\begin{aligned} A_1 &= \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_1} \right) = \left(\frac{\Delta\epsilon}{2\lambda_0} \right)^2 \\ &\cdot k_B T \frac{n_e \sin^2 \theta}{K_{11} [n_0^2 \sin^2 \theta + (n_e - n_0 \cos \theta)^2]}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_2} \right) = \left(\frac{\Delta\epsilon}{2\lambda_0} \right)^2 \\ &\cdot k_B T \frac{(n_0 - n_e \cos \theta)^2}{K_{22} [n_0^2 \sin^2 \theta + (n_e - n_0 \cos \theta)^2]}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$, 且 $q_{\perp} = (2\pi/\lambda_0) [n_0^2 \sin^2 \theta + (n_e - n_0 \cos \theta)^2]^{1/2}$. n_e 、 n_0 分别为与温度相关的寻常光和非常光的折射率. λ_0 是在真空(此时 $\lambda_0 = 488\text{nm}$)中入射光的波长, θ 是散射角.

3.1.2 样品的制备

选择两片适宜尺寸的洁净玻片,在其内表面涂覆聚酰亚胺(PI)溶液,待 PI 干燥和热固化后,用天鹅绒布摩擦玻片内表面,且两玻片摩擦方向平行.做成液晶盒后将液晶充满液晶盒,液晶盒的厚度为 $25\mu\text{m}$,四周用环氧树脂密封.

3.1.3 实验装置

与测量各向同性液体的装置有所不同的是,激光散射是通过一显微镜进行的.图 2 所示的是我们所发展起来的显微激光散射装置.其中激光(与散射面平行偏振)是通过物镜导入置于显微镜载物台上的样品玻片中,散射光则由一光纤探头取出.其余部分则与前述传统激光散射装置相同,只是散射光被送至光电倍增管后再送至一自相关器作自相关函数测定.此外,为了同时测定观察液晶畴的情况,装置中还设置了由 CCD 摄像头等组成的分析系统.

3.1.4 测试方法

在某一温度下,通过在不同的散射角测定其自相关函数而得到两个 Γ 值.图 3 和图 4 便是我们以动态激光散射测得的氰基联苯混合液晶(E7)的自相关曲线和 Γ 分布的情况.然后作 $\Gamma - q_{\perp}^2$ 的函数图(为一系列直线),从直线的斜率可得到 $K_{11}/\eta_{展曲}$ 和 $K_{22}/\eta_{扭曲}$ 这两个参数.

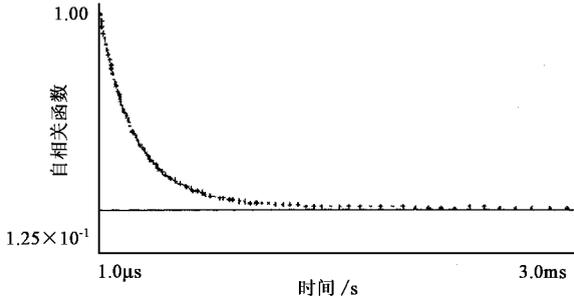


图 3 E7 液晶自相关函数

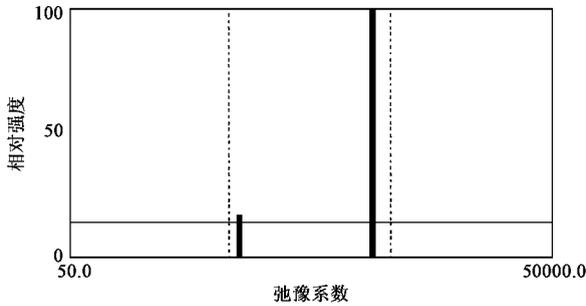


图 4 E7 液晶 Γ 分布

把展曲和扭曲模式归一成 $(\Delta\epsilon/2\lambda^0) k_B TK_{11}$ 和 $(\Delta\epsilon/2\lambda^0) k_B TK_{22}$ 作为某一温度下某散射角的函数,还可作出 $A(\Delta\epsilon/2\lambda^0) k_B TK_1 - \theta$ 函数图,从中观察到液晶展曲和扭曲变形两种模式随散射角变化的情况.然后,通过所得的两个弛豫模式的振幅作为散射角的函数,可作 $A - \theta$ 函数图,从而可判断那一种模式起的作用更大.

在通常情况下,液晶物理特性的表征往往分别用单个物理参数,如:取向有序参数、折射率、介电常数、磁化率、粘度等.而向列液晶动力学变形模式则是各参量综合作用的整体表现,如(13)(14)式中的 A_1, A_2 ,它同时关联到介电常数,寻常光、非常光折射率,弹性常数,温度这几个参量,因而振幅的变化综合体现了这些参数对液晶动力学变形的贡献;而(11)(12)式中两个弛豫系数 Γ_1, Γ_2 则反映了液晶的弹性系数和粘性系数之比,亦即体现了两种变形模式中液晶的粘弹性行为.所以向列液晶动力学弛

豫模式的研究有助于我们更加深入、全面地认识液晶各物理参数的含义,以至于更好地从理论上探索一种新的方法去了解和理解液晶所体现出来的光电特性,使液晶得到更广泛的应用.

3.2 动态光散射技术测试铁电液晶的相转移

在铁电液晶中,近晶 C 相(SmC^*)有长轴分子作一致倾斜于层法线的层状结构,其倾斜角 θ 和指向矢方位角 ϕ 在 SmC^* 相中分别是有序参数的幅值和相位角.倾角的波动表现为一弱模,而方位角的波动则呈现为一 Goldstone 模^[19-20],因此,在 $SmC^* - SmA$ 过渡区附近可观察到弱模,远离过渡区,弱模被 Goldstone 模所抑制.因而通过光散射测定模式的变化可确定该液晶的相跃迁.动态光散射对于研究 $SmC^* - SmA$ 过渡区及 SmC^* 相中的波动是一个极为有用的技术.

3.2.1 理论依据

对于铁电液晶,随温度的升高,一般有如下的相转移:



当光束垂直入射于样品上,光散射自相关函数表现为一单指数函数:

$$G(t) = a + b \exp(-t/\tau), \quad (15)$$

其中 $\tau = 1/\Gamma_1$ 是弛豫时间, a 是背景噪声, b 依赖于实验条件.

根据简约弹性理论^[19,21],对于铁电液晶,Goldstone 模式的弛豫时间可写为

$$\frac{1}{\tau_G} = \frac{K_2}{\gamma} (q_z - q_0)^2 + \frac{K_+}{\gamma} q_x^2, \quad (16)$$

其中 q_0 是螺旋轴的波矢,且由 $q_0 = 2\pi/p$ 得出(p 是 Sm^*C 相的螺距), q_x 和 q_z 分别是沿着 x 和 z 方向的散射波矢, γ 是粘性系数, K_+ 由 $K_+ = (K_1 + K_2)/2$ 得出, K_1, K_2 和 K_3 分别是类似于展曲、扭曲和弯曲常数参数.

在热致液晶的几何形态中,对于小的散射角 θ_s ,有

$$q_z = |q| \sin(\theta_s/2), \quad q_x = |q| \cos(\theta_s/2), \quad (17)$$

其中 $|q| = 2K_1 \sin(\theta_s/2)$, $K_1 = 2\pi/\lambda$. 这里 q 是散射波矢, K_1 是入射波矢, λ 是波长. 在给定的温度下,通过(16)式可得出不同散射角的弛豫时间,从而可求出 K_+/γ 和 K_2/γ .

3.2.2 样品的制备

试验中用垂面(近晶层平行于玻璃基质)和沿面排列(近晶层垂直于玻璃基质)的样品.垂面排列的

制作方法是在洁净的玻璃片上涂覆 ODSE,且在 150℃ 下处理.液晶腔用 50 μm 的聚氨酯薄膜固定厚度.盒中先充满各向异性的液晶,然后慢慢冷却至 SmC* 相.沿面排列的制法是在洁净的玻片上涂覆聚酰亚胺,且在 300℃ 下处理.然后在玻片上沿一个方向摩擦.液晶盒用 50 μm 的聚氨酯薄膜固定厚度,盒中先充满各向异性的液晶,然后在沿着摩擦方向 2.4T 的磁场下冷却.

3.2.3 光散射测试

采用图 2 的装置,在一定的散射角(小角)下,测定不同温度下的自相关函数,而给出各 τ^{-1} 值(也就是 Γ 值)然后作 $\tau^{-1} - T$ 函数图.从图中根据弛豫时间随温度的变化的拐点所对应的温度,便可确定 SmA - SmC* 的相变温度.

对于横面排列的 SmC*,根据 Goldstone 模式的弛豫时间之倒数(τ^{-1})和散射角的函数关系,作 $\tau^{-1} - \theta$ 函数图,从(16)(17)式便可得出不同温度下 $K_+/l\gamma$ 和 $K_2/l\gamma$ 的值.

4 结束语

近几年,液晶在光电子方面的应用发展非常迅速,特别是液晶显示器广泛应用于彩电、计算机、钟表等许多方面.某些胆甾相液晶还可用于记忆显示和电子显相术.欲使液晶充分发挥其特有的性能,尽其所用,应深入研究液晶本身固有的物理特性.激光散射可谓是目前测试液晶性能较为先进可靠的方法,用此技术可测得液晶的多个物理参量,从而为开发新的液晶产品提供可靠的理论依据.

参 考 文 献

[1] 立花太郎等著,谈漫琪,丁学泉译.液晶知识.北京:科学普及出版社,1984.16[立花太郎 *et al.* Tan M Q, Ding X Q trans. Knowledge of Liquid Crystals. Beijing: Science Popularization Pub-

lishing Company, 1984. 16(in Chinese)]

[2] Paul C Hiemenz 等.周祖康,马季铭译.胶体与表面化学原理.北京:北京大学出版社,1986.218[Paul C Hiemenz *et al.* Zhou Z K, Ma J M trans. Principles of the Colloid and Surface Chemistry. Beijing: Publishing Company of Peking University, 1986. 218(in Chinese)]

[3] 左集等编.激光散射原理及在高分子科学中的应用.郑州:河南科学技术出版社,1994.162[Zuo J *et al.* Principles of the Laser Scattering and Applications in the Polymer Science Zhengzhou: Science and Technology Publishing Company, 1994. 162(in Chinese)]

[4] Kreuzer M, Eidenschink R. In Liquid Crystals in Complex Geometries. Crawford, G P, Zumer S eds. London: Taylor & Francis, 1996. 423

[5] Zhou B, Iannacchione G S, Garland C W *et al.* Phys. Rev., 1997, E55 2962

[6] De Gennes P G, Prost J. The Physics of Liquid Crystal. Oxford U K: Oxford University Press, 1993. 225

[7] Clark T B, Noela A, Degiorgio V. Phys. Rev., 1998, 58 2996

[8] Borsali R, Yoon D, Pecora R. J. Phys. Chem., 1998, B102 6337

[9] De Gennes P-G, Prost J. The Physics of Liquid Crystals. Oxford U K: Oxford University Press, 1993. 164

[10] Berne B J, Pecora R. Biology and Physics. New York: Wiley, 1976. 221

[11] Frank F C. Discuss. Faraday Soc., 1958, 25: 19

[12] Landau L D, Lifshitz E M. Statistical Physics. Moscow: Nauka, 1976. 213

[13] Sefton M S, Bowdler A R, Coles H. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1985, 129: 1

[14] Da X, Paul G L. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1985, 124 287

[15] Gu D, Jamieson A M, Rosenblatt C *et al.* Macromolecules, 1991, 24 2385

[16] Gu D, Jamieson A M, Kawasumi M. Macromolecules, 1992, 25: 2155

[17] Chen F L, Jamieson A M. Macromolecules, 1994, 27 4691

[18] Zink H, De Jeu W H. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1987, 177 1506

[19] Mušević I, Blinc R, Žekš B *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 60 1530

[20] Carlsson T, Žekš B, Filipič C *et al.* Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1988, 163 11

[21] Dervnšek I, Mušević I, Čopić M. Phys. Rev., 1990, A41 923

封 面 说 明

要提高实用高温超导带材的无阻载流特性,开发它在超导电缆和超导磁体方面的应用,必须深入研究限制实用高温超导带材无阻载流性能的机制.用磁光图像技术可以直接观测超导体表面的磁感应强度分布,并根据一定的物理模型可以推算出相应的超导电流分布,了解决定其无阻载流能力的因素.图中给出了从 $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ 多芯超导带材磁光图像中推算到的在一根超导芯表面的超导电流分布.两边深蓝色部分对应这根超导芯外的银基质区,无超导电流;向中心的两个红色纵向连通的区域表示超导芯两边有高超导电流分布;中心区域超导电流分布不均匀;孤立分布区域中的高超导电流,在长带中会被背景区域低超导电流限制.超导电流分布的不均匀,直接反映了超导芯中超导电性的不均匀,反映了超导材料的不均匀性,为改进材料制备工艺提供了科学的依据.

(北京大学物理系 鲁立 高政祥)