

文章编号: 1006-6268(2010)11-0005-05

基于相转换的蓝相液晶显示器

Hirotsugu Kikuchi

(九州大学材料化学与工程研究所, 日本福岡)

摘要: 快速响应且无需摩擦取向的新型 LCD 材料已经开发出来。聚合物稳定蓝相液晶具有电场诱导下从光学各向同性到各向异性转换的特性, 极大地提升了电光响应速度, 且无需表面处理。

关键词: 液晶显示器; 蓝相; 聚合物稳定

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** B

Blue Phases for LCDs Based on Isotropic-to-Anisotropic Transitions

Hirotsugu Kikuchi

(Institute for Materials Chemistry and Engineering, Kyushu University, Fukuoka Japan)

Abstract: Novel LCD materials with fast response times and no requirement for alignment by rubbing have recently been developed. The polymer-stabilized blue phases, which exhibit electric-field-induced transitions from an optically isotropic state to an anisotropic one, boost the response speed of electro-optic switching without surface treatment.

Keywords: LCD; blue phases; polymer-stabilized

引言

液晶显示器(LCD)已被广泛应用, 而且是平板显示器的主流产品。尽管近期 LCD 在运动图像显示上已经取得了显著的进步, 但相对于自发光的显示器, 例如等离子显示器, 它被认为具有明显的不足。使用改进液晶材料和驱动技术, 例如过压驱动和插黑技术, 来改进响应速度已经获得了成功, 但是距离完全解决还远没有实现。由于这些复杂的驱动方案增加了产品成本, 这推动了人们去研究一种改善液晶基本响应时间的方法。

一种新型的液晶材料已经被成功开发出来, 它的响应速度比传统的 LCD 材料高一个数量级, 而且, 对于这种材料而言摩擦取向处理工艺不是必需

的。本文将会讨论这种创新液晶材料的基本属性、显示机理、现有技术进展以及面临的挑战。

1 蓝相

我们已知有多种液晶相, 例如, 常见的向列相、近晶相、手征向列相。向列相材料被广泛应用(对于 TN 模式, 称为手征向列相更为确切), 有望实现高速响应的材料, 包括铁电、反铁电、香蕉形液晶, 它们都是近晶相的。而蓝相是另一种液晶相态, 与向列相和近晶相都不同, 它仅仅可以在手征向列相之间一个很窄的温度范围内观察到, 通常用短螺距结构和各向同性态来表征。蓝相具有以下特有属性^[1-3]:

- 仅仅存在于很窄的温度范围内(通常大约 1°C);

- 在不加电压时出现各向同性态；
- 具有光学活性的原因为：它具有布拉格反射特性；
- 通常具有三种状态，按照温度从低到高为蓝相 1、蓝相 2、蓝相 3；
- 蓝相 1、2、3 分别具有体心立方、简单立方和等方对称结构；
- 蓝相 1、2 晶胞的晶格常数通常为几百个纳米，所以该相态对紫外 - 可见区显示出布拉格衍射特性。“蓝相”这个词就来源于衍射光的颜色，许多蓝相液晶能显示出蓝色，而有些则不显示。

液晶蓝相具有很长的历史了，当液晶在 1888 年首次被发现时就开始出现了，但是对于这种特殊相态出现的内在原因在 20 世纪 80 年代才变得清晰。大概是因为它出现在非常窄的温度范围和它的光学各向同性特征（它在液晶相是均一的），蓝相已经被人们忽视了很长一段时间。20 世纪 80 年代 frustration 现象被人们发现，这是一个非常新的液晶科学概念，适时地解释了蓝相，让蓝相尽人皆知。因此，研究者开始在寻找对这种相态更好的解释上显示了更多的兴趣。蓝相一些重要的、基本的特性是它复杂的 3D 层状结构，在接下来的章节中将讨论这些内容。

2 蓝相结构

不管是在实验上还是理论上，大家都已知蓝相形成了一个巨大的立方晶体，它的晶格常数和光的波长（几百个纳米）是一个数量级的。通过简单计算就可知，有 107 个分子组成了一个巨大的立方晶胞结构。在 20 世纪 80 年代关于蓝相的研究中，遇到的最大问题就是检测到如此多的分子呈何种晶格排列。图 1 所示为目前公认的蓝相结构模型。

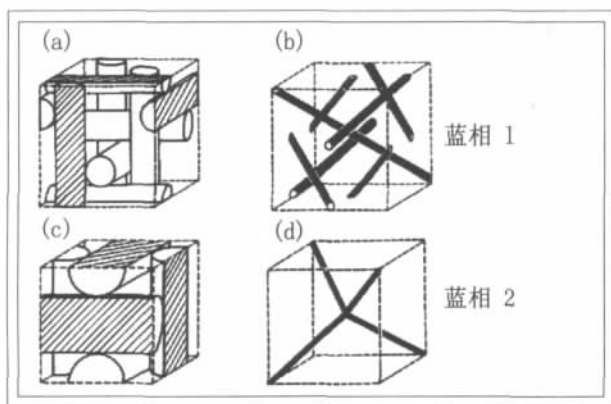


图 1 蓝相结构的示意图，图(a)和(b)描述蓝相 1；图(c)和(d)描述蓝相 2

图 1(a)~(d)分别给出了蓝相 1 和 2 的结构^[1,2]。蓝相 1 具有立方体心的晶格结构，蓝相 2 具有简单立方晶格结构。图 1(a)和(c)中的圆柱体是双扭曲圆柱，图 1(b)和(d)中加粗的黑线为向错线（缺陷线）。在每一个双扭曲圆柱中，分子从根本上扭曲了 90°，从圆柱体的中心分子轴向平行于圆柱体的轴线，到半径外围分子与圆柱轴线呈 45° 角，或者说，从一侧到另一侧分子被扭曲了 -45° 到 45°，这相当于四分之一螺距（360° 的扭曲是一个螺距单位）。双扭曲圆柱体的直径通常大约为 100nm，简单的计算就可得出，要是分子直径是 0.5nm 的话，大约有 200 个分子做了扭曲。蓝相 1 的晶格常数正好为螺旋的一个螺距，蓝相 2 的晶格常数为半个螺距。不同于软物质，一个复杂的分级结构形成于一种自组织方式，蓝相是分子重复扭曲排列的结果。很有趣的是，在空间拓扑结构之间连接了双扭曲的几何结构和 3D 空间（本文的参考文献中更多地解释了这种疑惑^[1-3]）。向错线的形成源于 frustration 现象，就像从三个双扭曲圆柱体正交的交角开始接近另一个角。蓝相 1 中在向错线几何结构的对称性上呈现立方体心，蓝相 2 中为简单立方结构。据估计向错线的中心大约为 10nm，内部的分子排列像各向同性相一样无序。虽然具体情况还不知道，蓝相 3 已经可以被识别出来，但它的结构是无定型的，仅仅具有很小范围内的双扭曲结构。

由于上面所述的这种非常大的周期结构，蓝相在 UV-VIS 范围内表现出布拉格衍射特性。蓝相 1 的衍射峰来自 100, 200, 211 面等；从长波开始，蓝相 2 的衍射来自 100, 110 面。下面是衍射公式：

$$\lambda = \frac{2na}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

这里 λ 、 n 、 a 分别是入射光的波长、折射率和晶格常数， h 、 k 、 l 是 Miller 因子。对于蓝相 1 来说， h 、 k 、 l 是偶数。图 2 给出了一个蓝相 1 反射光谱的例子，图中有几个反射峰，这与手征向列相的情形不同。蓝相 1 中从 110 和 200 面的衍射，蓝相 2 中从 100 面的衍射典型地呈蓝色，这也是“蓝相”这个词的由来。

对于显示应用来说，所有的衍射光波长应该移出可见光范围，有两种方法可以实现：改变晶格常数和分子排列。下面是一个例子，通过手征掺入物的浓度来控制降低晶格常数，图 3 所示为蓝相 1 的 110 面衍射峰位置与手征物掺入浓度的关系。

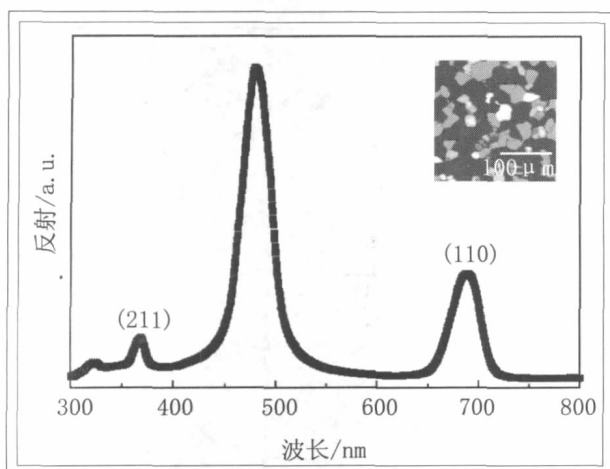


图2 蓝相1的反射谱图

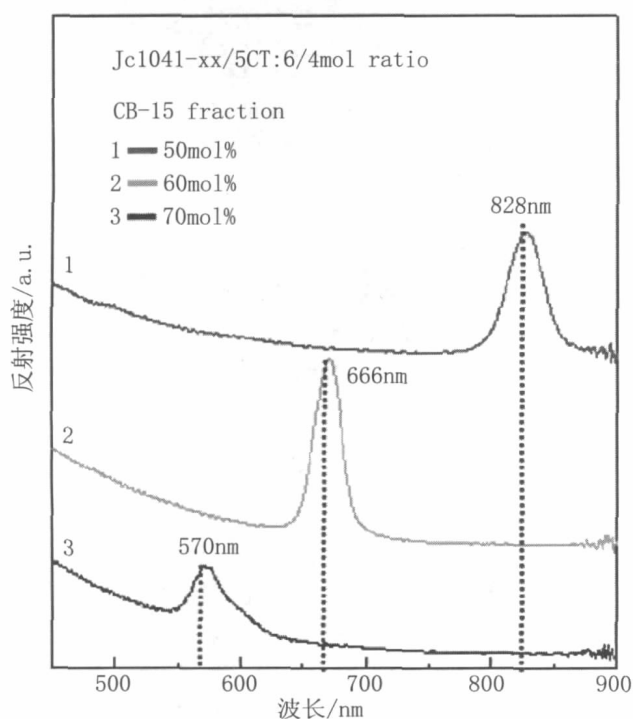


图3 蓝相1中110面的反射峰与手征剂掺入浓度的关系

当手征掺入物浓度增加时,晶格常数下降,衍射峰向短波方向位移。因为来自110面的衍射光具有最长的波长,位移到UV波段范围来除去可见光波段有颜色的背景,在正交的偏振片下复色光显示为黑色。

3 聚合物稳定蓝相

认为蓝相的温度范围太窄由来已久了,现在,仍然需要尝试解决这个问题。

1993年,Kitzerow等人使用可聚合的液晶单体形成蓝相。在蓝相条件下单体被聚合,这固定了液晶分子,在固体树脂中保持了蓝相结构^[4]。在这种类型的材料中,虽然蓝相的结构特征被保持,但液晶分子的动力学特性失去了,因为所有的分子都被聚合了。

2002年,有文章介绍了通过在蓝相中添加少量的聚合物(7~8wt%),蓝相的温度范围可以被增加到60℃,这种材料被称为聚合物稳定蓝相^[5],如图4所示。

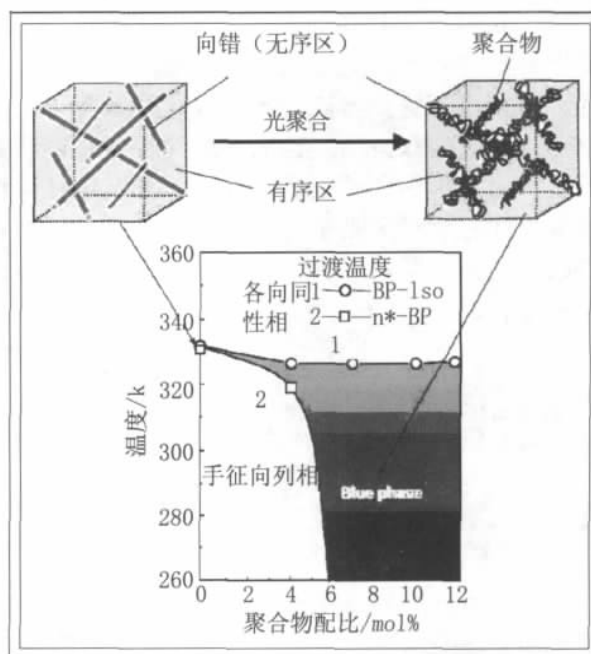


图4 聚合物稳定蓝相1和其中聚合物的聚集态示意图

在聚合物稳定蓝相中,分子的动力学性能没有损失,电光响应非常迅速。作者相信蓝相中的聚合物聚集在了向错线周围,所以当向错线是热稳定的话,蓝相也是稳定的。

2005年,Yoshizawa等人合成了一种T型的液晶分子,获得了13℃的蓝相温度范围^[6]。作者认为,双轴特性在蓝相中扮演了重要的角色。

2005年,Doles等人报道了一个降温时44℃的温度范围,这种二聚体液晶具有强的flexo电性^[7]。他们认为flexo电性稳定了向错线。有趣的是,从应用的观点看,这个系统中蓝相晶格衍射光的波长随着电场强度呈可逆变化。

就上述讨论而言,技术已经提前解决了蓝相温度带窄的问题,所以我们现在确信蓝相液晶的未来。

4 电光特性和驱动技术

由于蓝相是光学各向同性的,如果晶格造成的衍射偏移出可见光范围,在垂直偏振片下将得到一个暗场,这时折射率椭球形变成一个正球形。最初液晶的结构没有视角相关性,但是,当施加电场的时候,双折射出现了,光轴沿着电场的方向,折射率椭球变成了一个沿着电场方向拉长的椭球体(如果电学各向异性是正性的话)。相反的,如果母体液晶的电学各向异性是负性的,我们可以获得一个沿电场方向压平的椭圆。因此,蓝相的电控双折射类型为光学各向同性和各向异性之间切换,例如当施加电场的时候获得一个从零到特定值的双折射。当电场强度很小时,诱导双折射的大小正比于电场强度的平方。这种类型的电光效应明显区别于传统的液晶,传统液晶的初始态是光学各向异性的,当施加电场时光轴发生改变,如图 5 所示。

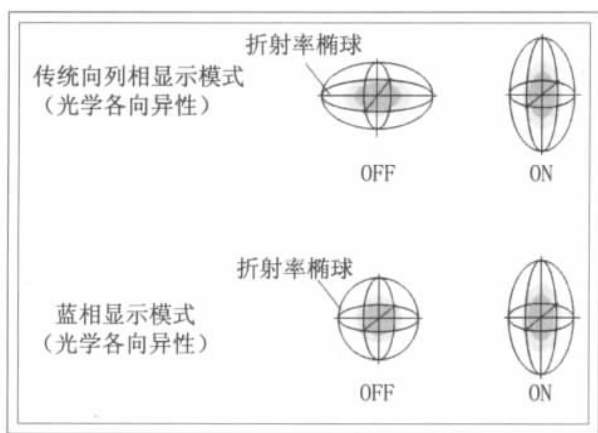


图 5 传统液晶与蓝相液晶的电光模式对比

电控双折射也存在于聚合物稳定蓝相液晶和聚合物稳定各向同性液晶(称为 pseudo-iso 相)。在纯的蓝相中——没有聚合物——当电场增加时,我们可以观察到液晶分子的重新排列、晶格扭曲和相转变。但在聚合物稳定蓝相中,后面的两种作用被抑制了,我们仅可以看到液晶分子的高速转向。

为了在现实应用中使用电控双折射方法,我们通过入射光双折射产生光延迟的方法来控制光的偏振态,与 IPS 模式中的光延迟控制类似。如图 6 所示,如果用一个简单的 IPS 梳状电极来驱动,入射光双折射的光轴将会平行于电场方向,而且光轴主要平躺在垂直于梳状电极的平面上。

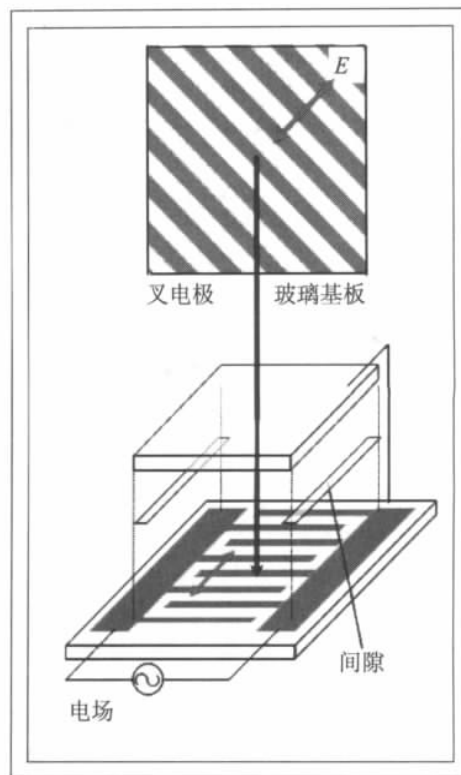


图 6 IPS 电极结构示意图。亮暗态通过电场的施加与否来实现,通常的使用配置为两个偏振片的偏振方向正交,且与梳状电极方向呈 45° 角^[8,9]

5 比同类技术的优越性

光学补偿弯曲(OCB)模式和铁电液晶(FLC)模式是非常知名的 LCD 快速响应模式。OCB 模式可以描述为弓形液晶排列,称作弯曲排列,由于开态和关态之间具有很小的排列形变,所以能达到小于 5ms 的响应时间。OCB 模式的显示器起初受限于从开始的展曲模式到弯曲模式时比较大的响应时间,但是这个问题现在已经被解决了,非常接近于实际应用。FLC 模式的切换时间小于 1ms,展示了巨大的潜力,它能够实现快速响应的秘密在于,FLC 分子中产生的自发极化反转引起的快速排列方向改变,但其应用障碍包括取向排列处理以及排列结构的稳定性。最近,来自 Tokyo Institute of Technology 的 Takezoe 教授提出了一种使用香蕉形液晶 SmA 相来实现快速响应的方案,它可以用 $100\mu s$ 完成一个快速的切换。

聚合物稳定蓝相和聚合物稳定各向同性相也显示了空前的潜力:小于 1ms 的快速响应时间,不需要取向排列处理,宽温度范围。

6 现有研究状态和遗留的挑战

聚合物稳定蓝相液晶最明显的问题是它需要高驱动电压。排列有序中短的相关长度是快速响应和高驱动电压的根源,实际上,当电极间隙为 $10\mu\text{m}$ 时就需要数十伏的驱动电压。虽然可以通过减小电极间隙来降低驱动电压,但这会限制微小电极的制造。聚合物稳定蓝相的驱动电压与母体液晶的电学各向异性、双折射性、弹性常数^[10]、聚合物的结构和配比以及螺距有关,虽然某些参数可以优化,但仅仅通过材料的改进而将驱动电压降低到通常向列相液晶的水平并不容易,很可能需要改变电极的结构来满足应用要求。

当母体液晶的电学各向异性和双折射性变大的时候,残余双折射将变成一个严重的问题,当电压施加和撤去后双折射不会消失。通过改善液晶盒中聚合物网络的均匀性,这个问题被部分解决,但不是全部。

遮光性是控制显示器对比度的一个重要因素。在聚合物稳定蓝相和各向同性相中,短波长的光容易发生漏光,因为衍射和散射主要发生在 UV 波段,更长的峰尾可以到达可见光波段。如果晶格常数和有序度相关长度足够小的话,这个问题将不会发生,这需要驱动电压升高来交换获得。

7 目标应用

诸如聚合物稳定蓝相液晶等高速响应液晶的成功应用将促使 LCD 大幅进步,高频率的驱动将大大改善移动图像的显示性能,减小残像效应。

而且更高的速度可以降低能耗。场序 LCD,被认为是未来最有前途的显示系统,同步驱动三基色光源与液晶同步,这样就可以无需彩色滤光膜来实现全彩显示。结果,显示器的能耗相当可观地被降低了,因为原有彩色滤光膜大约会吸收 70% 的背光。通过减少 RGB 彩色滤光膜,无疑将获得更高分辨率的显示器,像素单元将会增加 3 倍,而且连线将变得简单。场序 LCD 的先决条件是响应速度提高 3 倍,这对于向列相液晶来说不可实现。聚合物稳定蓝相的响应速度比向列相液晶有一个数量级的提高,非常适合于场序 LCD 系统。

8 结论

虽然聚合物稳定蓝相与各向同性相相比具有真

正优异的性能,但它也有先天的缺陷,这些问题来自它的自身结构和驱动机制,以及一些至今也不太确定的因素。在平板显示行业中,由于现有产品的优秀和热门的竞争对手,引入一种全新显示模式的障碍相当高。在这种境况下,我们非常感谢三星公司完成了蓝相液晶原型面板的演示,虽然在图像质量上还有改进的余地,但在特定尺寸上实现蓝相 TFT-LCD 是一个重要的进步。为了把这项技术实用化,从根本上需要许多组织多方面的合作,包括材料、制作过程、器件设计、驱动电路等等。

(致谢——本工作受到了日本科学技术社与日本科学促进会的支持。同时感谢 Chisso 公司提供的向列相液晶混合物)

参考文献

- [1] D. C. Wright, N. D. Mermin. Rev. Modern Phys. 61, 385 (1989).
- [2] P. P. Crooker, H. S. Kitzerow, C. Bahr (eds.). Chirality in Liquid Crystals[M]. Springer-Verlag, New York, 2001.
- [3] H. Kikuchi. Structure and Bonding [M]. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008. Vol. 128, pp. 99-117.
- [4] H. S. Kitzerow, H. Schmid, A. Ranft, G. Heppke, R. A. M. Hikmet, J. Lub. Liq. Cryst. 14, 911-916 (1993).
- [5] H. Kikuchi, M. Yokota, Y. Hisakado, H. Yang, T. Kajiyama. Nature Materials 1, 64 (2002).
- [6] A. Yoshizawa, M. Sato, J. Rokunohe. J. Mater. Chem. 15, 3285-3290 (2005).
- [7] H. J. Coles, M. N. Pivnenko. Nature 436, 997-1000 (2005).
- [8] Y. Hisakado, H. Kikuchi, T. Nagamura. Adv. Mater. 17, 96 (2005).
- [9] Y. Haseba, H. Kikuchi, T. Nagamura. Adv. Mater. 17, 2311-2315 (2005).
- [10] S.-W. Choi, S. Yamamoto, Y. Haseba, H. Higuchi, H. Kikuchi. Appl. Phys. Lett. 92, 043119 (2008).

作者简介: Hirotsugu Kikuchi, 就职于九州大学材料化学与工程研究所, E-mail: kikuchi@cm.kyushu-u.ac.jp。

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

彭增辉

译自《Information Display》11/09)