

文章编号:1007-2780(2015)05-0737-15

液晶光控取向技术进展

王骁乾^{1,2}, 沈冬^{1*}, 郑致刚¹, 郭海成²

(1. 华东理工大学理学院物理系, 上海 200237;

2. 香港科技大学先进显示与光电技术国家重点实验室合作伙伴, 香港)

摘要:液晶光控取向技术是一种通过偏振光照射来实现液晶取向的非接触式方法, 不同于摩擦取向法, 它具有无污染、无静电、易实现微区多畴取向等优点, 因此引起了世界各地科研工作者的广泛关注。本文综述了液晶光控取向技术的研究现状和最新进展, 简略地阐述了一些光控取向技术的基本原理以及液晶光控取向材料的工作机理。本文重点介绍了目前光控取向研究中比较新颖的一种光诱导偶氮染料取向的方法, 并且从液晶光控取向在曲面及柔性基底、光数据处理及高空间分辨率的光处理系统、具有复杂几何图形取向的液晶光学元器件、3D 光可擦写及铁电液晶显示器、光学滤光器和其他光控取向材料这六个方面列举了一些液晶光控取向技术的最新应用。

关键词:液晶; 光控取向; 各向异性; 偏振光; 偶氮染料

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20153005.0737

Review on liquid crystal photoalignment technologies

WANG Xiao-qian^{1,2}, SHEN Dong^{1*}, ZHENG Zhi-gang¹, KWOK Hoi-Sing²

(1. *Physics Department, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;*

2. *Partner State Key Laboratory on Advanced Displays and Optoelectronics Technologies, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)*

Abstract: Photoalignment technology is a kind of contactless method of aligning liquid crystal by using polarized light. It possesses many advantages, e. g., non-contamination, non-electrostatic charges, easy to realize multi-domain aligning even in a tiny fine area, and etc. Thus, it has attracted more and more attentions of the researchers all over the world. The review describes the status of the studies and the recent achievements in the field of photoalignment of liquid crystals, and it briefly illustrates the fundamental working principle of photoalignment technique and mechanisms of liquid crystal photoalignment materials. In particular, we concentrate on a recent approach of the photoinduced reorientation of azo-dyes, and some recent applications of photoalignment technology in aspects of (1) curved and flexible substrates, (2) optical data processing and high spatial resolution optical processing system, (3) liquid crystal optical elements with sophisticated geometric patterned alignment, (4) 3D ORW and ferroelectric liquid crystal displays, (5) optical filter and (6) other photoalignment materials, will be introduced.

收稿日期: 2015-08-01; **修订日期:** 2015-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 61435008); 中央高校基本科研业务费专项基金 (No. WM1514036)

* 通信联系人, E-mail: shen@ecust.edu.cn

Key words: liquid crystal; photoalignment; anisotropic; polarized light; azo-dye

1 液晶取向方法概述

液晶的力学、电学、磁学和光学性质都呈现与排列有关的类似于晶体的各向异性,又具有与普通液体类似的流动性。作为一种兼有液体和晶体两方面性质的独特的功能性材料,其最为人们所知的应用便是各类液晶显示器(LCD)。液晶显示器的生产已经非常成熟,尽管有 OLED、DLP、PDP 等其他类型的显示器加入竞争,液晶显示器(LCD)依然占据着市场的主导地位。随着市场需求的变化,液晶显示器的尺寸越做越大,分辨率也越做越高,由于其价格并不昂贵,普通家庭一般都能够承受得起,于是它正在使我们的社会加速变化,并引领人们进入到一个以显示为主导的信息世界。当然,液晶显示器自身还是存在着一些需要改进的地方,比如说光的有效利用率、生产成本、光学性能、响应时间、可视角度等等都有着进一步优化的空间^[1]。

在本文中,我们将围绕液晶取向方法中的光控取向法来进行综述讨论。众所周知,大多数构成液晶物质的分子都是长棒状的,它们可以是小分子,也可以是聚合物,并且在每种液晶相中形成特殊有序的排列。液晶分子的排列不如晶体结构那么牢固,在电场、磁场、温度、应力等外部刺激作用下,液晶从特定的初始态分子排列状态变成其它分子排列状态,随着分子排列变化,液晶的光学性质变化转换成视觉变化,这就是液晶显示的基础。而液晶分子在 LCD 内的有序排列,首先要通过液晶与基片所构成界面的取向效果来实现。液晶取向方法通常有四种:一种是摩擦取向法,也叫打磨法;一种是偏振紫外光诱发聚合所导致的光控取向法;一种是实验室用的斜向蒸镀膜;还有一种就是用等离子干法在平行取向材料上腐蚀形成格栅的方法^[2]。后两种方法并不是液晶取向的主流方向,且都有一定的局限性,也就不在本文中赘述了。

LCD 的取向材料需要满足几个要求,(1)对液晶有良好的取向效果;(2)易加工性,易于采用旋转涂布、滚动涂布、浸渍涂布、喷雾涂布等手段在基片表面均匀成膜;(3)与液晶分子不发生化学

反应;(4)与基材附着力大;(5)具有疏水性等^[3]。聚酰亚胺能较好地满足这些性能要求,在工业上和研究中被主要用于摩擦取向法的液晶取向材料。用一块特制的绒布在一块涂有均匀(平行)取向层的基板表面适当地摩擦,在取向层上产生了沿着摩擦方向排列的密密麻麻的沟槽,当液晶被灌入并且与取向层接触时,为了使自身的自由能处在最低最稳定状态,长棒状的液晶分子会倾向于让其分子长轴沿着沟槽方向排列,于是液晶指向矢平行于沟槽排列形成稳定状态。摩擦取向技术具有简单、方便、稳定性好等优点,但摩擦过程中会产生大量的粉尘和静电,对液晶显示器造成污染,从而降低了液晶显示器的成品率。另外,利用摩擦取向技术很难实现液晶器件的多畴显示,难以解决液晶显示器件视角过窄的问题。人们发现通过偏振紫外光照射,会引发聚合物薄膜的光致异构、光交联和光降解等现象,并产生表面各向异性,使得液晶分子在薄膜上发生取向排列,这就是液晶光控取向技术。第一个基于聚乙烯醇肉桂酸酯的光致图样化的光学器件出现于 1977 年^[4],而光控取向技术变成一个液晶显示器生产技术仅仅开始于 20 世纪 90 年代^[5-8]。科研人员对光控取向技术的材料和辐照处理方法投入了大量的时间和精力,该技术也得到了蓬勃发展,除了在液晶显示器的液晶取向方面的应用,该技术还被广泛应用于光信号处理和通信等光子学热点研究中。对比传统的摩擦取向技术,光控取向技术拥有明显的优势,包括:(1)无静电、无污染、对表面无机械性损害;(2)可控的预倾角和锚定能,耐热性、耐紫外性和离子纯度;(3)在微区中进行多畴取向;(4)对成品率的潜在增长性;(5)在光纤通信、光数据处理、全息等其它领域中的全新先进应用;(6)在曲面和柔性基底上的液晶取向;(7)新液晶光学元器件的制造,如:图样化的偏振片和相位延迟片,可调的光过滤器,对偏振不敏感的焦距可电调的光学透镜等等^[1]。

当然,液晶分子的光控取向技术也存在一些需要解决问题,如何提高预倾角、增强取向排列的稳定性等还有待进一步探索研究。无论是国际还是国内对这项技术的研究都处于一个发展阶段,对于液晶分子排列取向机理的研究还有许多值得

深究的地方,一些关于这项技术的综述性的论文在多个期刊中发表过^[9-14]。在本文中,我们将着重于介绍目前实验室中比较新颖的一种光诱导偶氮染料取向的方法^[15],这种光控取向技术不牵涉任何光化学或结构的分子变化,这些新的光控取向薄膜非常稳定,并且拥有非常好的取向特性(如:锚定能和电压保持率),它们可以用于新一代的液晶设备,也可以用在基于高有序度有机薄层的新光伏、光电子以及光子设备上。

2 液晶光控取向法

影响液晶光控取向的因素主要有光源、衬底材料和液晶材料。光源一般采用高压汞灯、氙灯、卤素灯等,然后通过滤光装置和偏振片获得单色偏振光,也有人采用偏振紫外激光或非偏振紫外光来研究光控取向材料。在光控取向的研究中,所用光源取决于所使用的取向材料的特性,亦即不同的材料特性对应于不同的光响应机理。接下来,我们将详细讨论光控取向法的分类及其工作机理。

2.1 光控取向法分类简介

光控取向法根据处理过程不同可分为两类:一类是复合体系,不需要表面预处理,直接用光对掺有感光高分子的液晶层进行取向;另一类是非复合体系,用偏振光预处理聚合物衬底,再使液晶分子在衬底上定向排列,这种方法目前采用比较多^[16]。此外,根据选用的取向材料不同,又可以分为以下几类:(1)顺反异构;(2)光交联;(3)光降解;(4)偶氮染料发色团分子或者偶氮染料分子溶剂合物的纯粹的重排列等等。

2.2 光控取向法工作机理

液晶光控取向效应产生的直接原因是在由具有吸收各向异性特性的分子单元所形成的非晶薄膜中出现了光诱导的光学各向异性和二向色性吸收^[4]。下面我们就以上几种光控取向方法的工作机理一一进行阐述:

2.2.1 光致顺反异构

在偏振光作用下,我们能够观察到一种可逆的偶氮染料分子的顺式一反式变化^[5]。Ichimura等人认为如果染料分子是直接附着在基底上的,那么所谓的“控制表面”就会形成(如图1)。

用紫外和可见非偏振光依次交替照射含偶

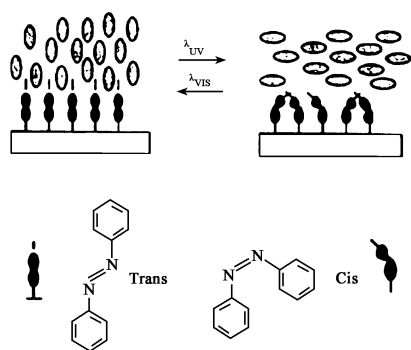


图1 由附着在液晶盒的玻璃基底上的偶氮苯单元的顺-反异构导致的平行取向到垂直取向的可逆转变。紫外光(波长为365 nm)把偶氮苯单元转变成顺式(液晶平行取向),而可见光(波长为440 nm)则把其还原成反式的构形。^[5]

Fig. 1 Reversible homogeneous to homeotropic transition in LC cell, caused by cis-trans isomerization of the azobenzene units, attached at the glass substrate ('command surface'). UV light ($\lambda = 365 \text{ nm}$) transforms the azobenzene units to the cis form (homogeneous LC alignment), while visible light ($\lambda = 440 \text{ nm}$) restores the trans form configuration. ^[5]

氮苯结构的染料分子,可以观察到可逆的顺一反异构变化,液晶分子会在垂直平面取向和平面内随机平行取向之间发生可逆地变换。一个表面染料分子可以导致大约一百万个液晶分子的再取向^[1],这个在紫外-可见光作用下发生可逆光致顺-反异构的表面就叫做“控制表面”。这种光控取向方法最早是作为光写入或存储元件应用的研究来进行的,然而它也存在一些劣势:(i)从垂直态到平行态结构是方位角退化的;(ii)顺式结构的暗态迟豫能够被观察到,从而同时还原了初始的垂直态液晶结构;(iii)可逆循环的次数受到了染料层的光化学稳定性的限制。

Shibaev等人发展了偶氮染料支链聚合物顺-反异构的概念^[13],该聚合物支链是由偶氮苯侧基构成的。在照射紫外光之后,发生了这样的变化^[17]:反式(平行于紫外光的偏振方向) $\Rightarrow$ 顺式 $\Rightarrow$ 反式(垂直于紫外光的偏振方向)(如图2)。关于偶氮苯液晶支链聚合物中的顺-反异构的理论解释,可以参见文献^[18-22]。

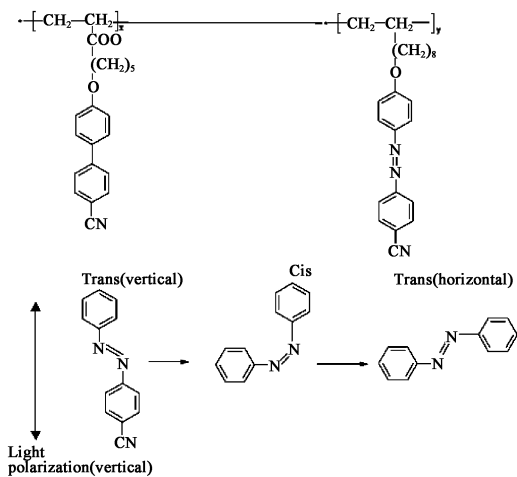


图 2 Shibaev 等人所用的能够在偏振紫外光照射下产生顺-反异构效果的支链聚合物^[13]。在偏振紫外光照射下,平行于紫外光偏振矢量的反式同分异构体转变成顺式同分异构体,然后再次转变成垂直于紫外光偏振矢量的反式同分异构体。这一变化导致的结果是所有偶氮苯支链分子的吸收振子垂直于紫外光的偏振方向排列。^[12]

Fig. 2 Side-chain polymers, used by Shibaev et al.^[13], which show the effect of cis-trans isomerization in a field of polarized UV light. The trans isomer, which is parallel to the UV light polarization vector, is transferred to the cis isomer and then again to the trans isomer, which is perpendicular to the initial one. As a result of this transformation, all the absorption oscillators of azobenzene side-chain molecules align perpendicular to the UV light polarization.^[12]

2.2.2 光交联

肉桂酰支链聚合物中的光交联最早被 Kvasnikov 等人观察到^[4], 聚乙烯基-4-甲氧基-肉桂酰类聚合物(PVMC), 在线性偏振光照射下, 支链上会发生生成环丁烷的轴选择性光交联反应, 因而在表面产生各向异性, 使得液晶分子沿平面单轴取向^[3]。然而, 第一次把 PVMC 薄膜作为液晶取向层的实验并且给予机理解释的文献出现在 1992 年^[7-8]。在线性偏振紫外光($\lambda = 320\text{ nm}$)作用下, 通过光聚合 PVMC 薄膜实现液晶取向见图 3, 平行于紫外光偏振方向的支链会产生光二聚反应, 导致了平行于偏振光方向的支链有所减少, 垂直于偏振光方向的支链对取向发挥更有效的作

用。液晶取向受此剩余支链所限制, 结果液晶在紫外光的偏振方向垂直的方向取向。香豆素支链聚合物也能够通过环丁烷反应实现光交联, 且顺-反异构在此过程中很显然是不可能发生的, 而光二聚反应在该过程中占主导作用, 于是液晶沿着平行于紫外光的偏振方向排列^[1,10,23] (如图 4)。1996 年, 这些材料的优异特性与肉桂酰支链聚合物的详细比较, 第一次在文献中报道过^[24]。

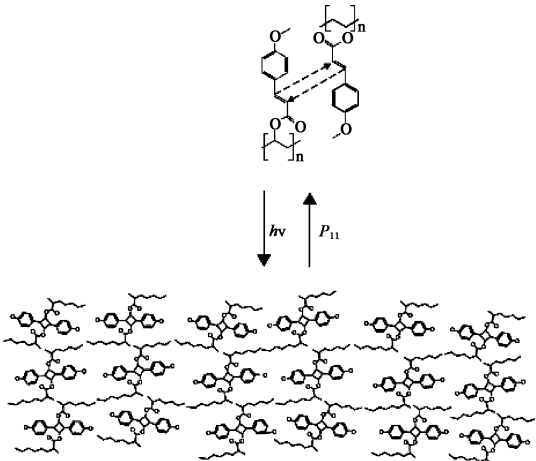


图 3 聚乙烯基-4-甲氧基-肉桂酰类聚合物(PVMC)中的光交联机理^[7]

Fig. 3 Mechanism of crosslinking in polyvinyl 4-methoxy-cinnamate^[7]

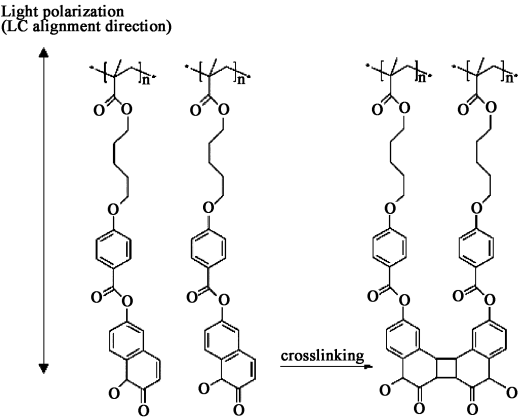


图 4 香豆素支链聚合物中的光交联^[10], 液晶沿着平行于光的偏振方向排列。

Fig. 4 Crosslinking in a coumarin side-chain polymer^[10]. The LC alignment is parallel to the polarization direction.

2.2.3 光降解

由于聚酰亚胺(PI)材料拥有高温稳定性, 现

在通常用作商品液晶显示面板中的摩擦取向膜,人们非常希望通过修饰它们的分子结构使得它们能够在光控取向上有所应用。第一篇在该领域的报道是由 Hasegawa 等人完成的^[25],他们用波长为 257 nm 的偏振光实现了液晶沿着垂直于紫外光的偏振方向的排列,这种情况下的液晶取向被解释为由高分子的选择性光分解造成的,平行于光的偏振方向的聚酰亚胺链因光分解而遭到破损,而垂直于光的偏振方向的聚酰亚胺链没有遭到破损,结果导致液晶分子垂直于光的偏振方向进行排列。根据 West 等人的报道^[26],聚酰亚胺的光控取向方向还能够随着紫外光偏振方向的变化而改变。薄膜中的 PI 链在紫外光照射前是随机取向的,平行于紫外光偏振方向的 PI 链被选择性地光分解了,相应的光化产物随机地分布在 PI 薄膜中。剩余的垂直于紫外光偏振方向的 PI 链没有发生变化,并且引起了各向异性的范德华力,正是这些力使得液晶分子沿着它的光轴排列^[27]。利用光降解实现液晶光控取向的材料有几个缺点:(i)序参数的值很小,相应的诱导的光学各向异性和二向色性的值都很低^[28-29];(ii)序参数对于曝光时间和基底的化学特性非常敏感,因此需要非常精确地控制这些因素;(iii)在某些情况下,光降解副产物导致初始基底的污染,副产物会产生离子,也会引起影像残留效应和闪烁^[30],还会降低液晶取向的热稳定性^[31];(iv)PI 分解的敏感度低^[32]。

2.2.4 偶氮染料发色团分子或者偶氮染料分子溶剂合物的纯粹的重排列

还有一种光控取向的机理是和染料分子在偏振光照射作用下发生再取向相关的^[33-34],通常用近紫外-蓝色的偏振光对基板上的光化学稳定的偶氮分子层进行平面内的重排列(再取向),该取向方向随着入射光偏振方向的改变而发生变化,并且这种偶氮材料可以反复取向很多次。

Kozenkov 等人首次在 Langmuir-Blodgett (LB)薄膜中观察到偶氮染料分子的重排列(再取向)方向垂直于光的偏振方向这一现象^[35-36]。由偶氮染料构成的 LB 薄膜从水的表面被转移到打磨过的石英玻璃上。这个被光诱导的光学各向异性在波长为 632.8 nm 处的值大约是 $\Delta n = 0.23$ 。在染料的最大吸收波长($\lambda = 500$ nm)处的二向色性比是 $N = D_{\perp}/D_{\parallel} \geq 4.6$,对应于序参数 $S =$

$(1-N)/(1+2N) = -0.35$ (70% 的染料分子垂直于光偏振矢量排列^[37])。

除了化学反应之外,紫外光也可以诱导一个非对称的势场,在这个势场下,只有垂直于光的偏振方向的染料吸收振子才被视作稳定结构。有一种在偶氮薄膜中的光控取向机理的解释是偶氮染料分子的纯粹重排列^[12,15,33-34],可以用偶氮染料再取向的扩散模型(Diffusion model)来解释这一现象。

扩散模型的基本概念^[1]:当偶氮染料分子被一束偏振光光泵,吸收发生几率与 $\cos^2 \theta$ 成正比,其中 θ 是偶氮染料分子的吸收振子与光的偏振方向的夹角(如图 5)。如果偶氮染料分子的吸收振子(发色团)平行于光的偏振方向,那么它们将会在能量上得到增加,这就导致了它们偏离初始位置再取向。如图 5,棒状偶氮染料分子是成圆柱对称的酸性硫酸基偶氮染料 SD1^[38],可以用极角 θ (分子吸收振子与光偏振方向的夹角)来描述它的坐标方位,它的吸收振子(发色团)平行于偶氮染料的长分子轴,如果 θ 不等于 $\pi/2(90^\circ)$,那么偶氮染料分子的吸收振子将吸收偏振紫外光的一部分能量,这部分能量并没有耗费在改变分子构象或是导致分子发光,而是用来提供偶氮染料分子从一个初始位置的随机方向转动到垂直于光的偏振方向所需的能量^[15]。实验方面,对于偏振吸收光谱的研究表明 SD1 存在二向色性吸收^[15,38](如图 6)。曲线 1 代表在紫外照射之前的偏振吸收光谱,曲线 2 和 3 代表在紫外照射之后的偏振吸收光谱。从图上可以明显看出,紫外曝光前,偶氮染料层的吸收与光的偏振方向无关。而经过线偏振紫外曝光后,如果再用相同偏振方向的紫外光照射,那么 SD1 对其吸收 $D_{\parallel}$ 会减小(如图 6,曲线 2),此时 SD1 的吸收振子垂直于正在照射的光的偏振方向;如果用与原来偏振方向垂直的紫外光照射,那么 SD1 对其吸收 $D_{\perp}$ 会增大(如图 6,曲线 3),此时 SD1 的吸收振子平行于正在照射的光的偏振方向。由于平均吸收 $D_{\text{ave}} = (D_{\parallel} + 2D_{\perp})/3$ 在给定任意曝光时间后保持恒定,因此间接证明了光化学反应并没有参与到整个过程中。偶氮染料发色团的序参数可以表示为 $S = (D_{\parallel} - D_{\perp})/(D_{\parallel} + 2D_{\perp})$,在最大吸收 $\lambda_m = 372$ nm 处,序参数 $S = -0.4$,所能够达到的最大序参数 $S_m = -0.5$ 。

这种光控取向机理有别于光致顺反异构的机理,原因在于这类光化学反应稳定的有机物材料可以最大限度地避免一些如光交联、光降解甚至顺反异构的光反应的发生。人们也在实验中观察到了某些氨基偶氮苯分子膜的光控取向现象,认为某些有机物在光照射下的顺反异构在光控取向过程中的贡献是可以忽略的^[38]。

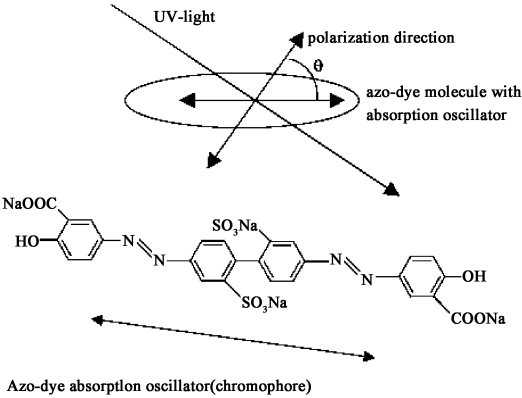


图5 光化学稳定的偶氮染料薄膜中光诱导序参数的定性解释:图上方,该效应的几何结构关系;图下方,拥有平行于长分子轴的吸收振子(发色团)的偶氮染料 SD1 分子^[12,15,38]

Fig. 5 Qualitative interpretation of the photoinduced order in photochemical stable azo-dye films: upper, the geometry of the effect; lower, the azo-dye SD1 molecule, having the absorption oscillator (chromophore) parallel to the long molecular axis^[12,15,38]

3 光控取向技术的应用

摩擦取向技术使得液晶在显示器中的应用成为了可能,通过工艺精简,把液晶显示器的量产变成了现实。随着液晶技术的发展,液晶取向技术发生了革新,光控取向技术很快引起了人们的关注,和传统的摩擦取向技术相比,光控取向技术有着明显的优势:取向过程不会引入杂质造成污染,不会产生静电从而提升良品率,可进行微区多畴取向,可用于曲面或柔性基底上等等。在一些应用上,传统的摩擦取向技术也只能望尘莫及,下面我们就这些光控取向的应用做一个简单的介绍。

3.1 液晶光控取向在曲面、柔性基底上的应用

2007 年, Muravsky 等人利用光控取向材料

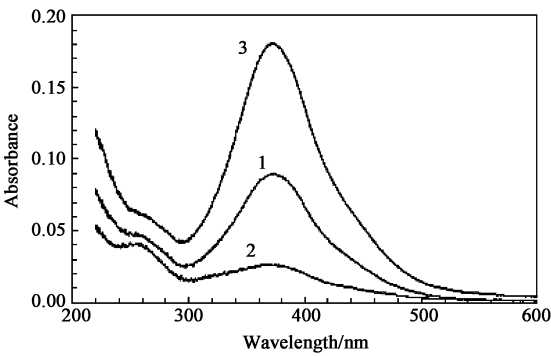


图6 SD1 层在偏振紫外光照射前的吸收光谱(曲线 1)。在偏振紫外光照射后,用平行($D_{//}$)于原来偏振方向的紫外光照射得到的吸收光谱(曲线 2),用垂直($D_{\perp}$)于原来偏着方向的紫外光照射得到的吸收光谱^[1](曲线 3)

Fig. 6 Absorption spectra of SD1 layer before polarized UV exposure (curve 1). Curves 2 and 3 show the polarized absorption spectra after exposure to polarized UV light in the direction parallel ($D_{//}$) and perpendicular ($D_{\perp}$) to the activating light polarization accordingly^[1]

SD1 的特性发展了一种光可擦写(ORW)液晶显示技术^[39](如图 7),SD1 提供了最高达 $2 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ 的方位锚定能,和传统的取向材料相当。在这种 ORW 液晶盒中,上下两片基底可以是玻璃也可以是柔性材料(如:塑料薄膜),上、下基底的取向层材料不同,一片是固定取向的(PI),另一片则是可擦写的(SD1)。由于没有用到氧化铟锡(ITO)电极,所以塑料薄膜基底可以使得 ORW 变得更薄,还可以做到一定程度的弯曲。此外,这项技术还拥有连续可调的灰阶,在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 扭曲角度之间调节,可以达到的最大对比度超过 $64:1$ (反射模式)和 $8:1$ (透射模式),并且在撤去写入光之后,无需提供额外的能量以保持其液晶(扭曲)状态。

光子晶体光纤是拥有微小空气管道阵列的玻璃或者聚合物光纤,如果在某个或者某些空气管道中注入外加材料(如:液晶),那么其波导特性就变成可控的了^[40]。要想很好地控制液晶,取向技术成为了关键,特别是在那么细小的空气管道内要完成液晶的取向唯有利用光控取向技术能做到。2005 年, Presnyakov 等人发展了用光照法对玻璃微型管内以及光子晶体光纤

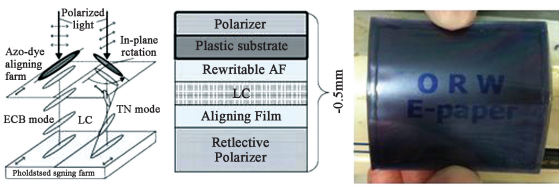


图 7 左边:光可擦写液晶盒工作原理,偶氮染料取向薄膜在平面内旋转它的排列方向并保持这个方向垂直于写入光的偏振方向。液晶跟着上方的取向方向排列,可以在平行取向和扭曲状态之间切换。中间:ORW 柔性基底(塑料)显示器结构(AF,取向薄膜)。右边:弯曲的柔性 ORW 显示器。^[39]

Fig. 7 Left: operating principle of ORW LC cell. The azo-dye aligning film rotates its aligning direction in-plane keeping perpendicular to the polarization of writing light. The LC follows the top aligning direction switching between homogeneous and twisted states. Middle: structure of ORW plastic displays (AF: aligning film). Right: Curved flexible ORW display. ^[39]

中的液晶进行取向的技术^[41](如图 8),玻璃管的内径 $4\text{ }\mu\text{m}$,用光控取向材料 SD1 处理过,灌入向列相液晶后取向一致,测得液晶的序参数 $S=0.63$ 。2014 年 Siarkowska 等人也利用光控取向法对附着在光纤内管壁的 SD1 取向层进行了图样化的曝光,得到了图样化的液晶取向^[42]。由于这项技术是非接触式液晶取向法,所以即便是在复杂的光子晶体结构中它可以得到应用。

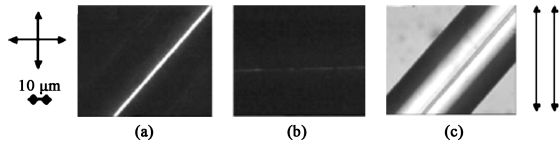


图 8 微型管内的光控取向^[41]。在正交偏振片下:(a)微型管与偏振片夹角 45° ;(b)微型管与偏振片夹角 0° 。在平行偏振片下:(c)微型管与偏振片夹角 45° 。

Fig. 8 Photoalignment in microtube^[41]. Crossed polarizers: (a) angle between polarizer and tube axis is 45° ; (b) angle between polarizer and tube axis is 0° . Parallel polarizers: (c) angle between polarizer and tube axis is 45° .

3.2 液晶光控取向在光数据处理、高空间分辨率的光处理系统领域的应用

2010 年,Xiaojin Zhao 等人提出了一种在可见光谱段适用于全 Stokes 偏振成像的液晶测微偏振计(LCMP)阵列^[43](如图 9)。任意偏振状态都可以用 Stokes 矢量 $S(S_0, S_1, S_2, S_3)$ 来描述,其中 S_0 是光束的总光强(I),而 S_1, S_2, S_3 是偏振态在球坐标下的表述,可以用 $(S_0, S_1, S_2, 0)$ 表示线偏振光, $(S_0, 0, 0, S_3)$ 表示圆偏振光。他们利用光控取向技术(材料为 SD1)设计制作放置于可见光波段金属线栅偏振器(MWGP)前方的具有图样化取向特性的液晶层,光通过该层特殊液晶后再通过金属线栅偏振器(MWGP)最后到达互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感阵列,阵列像素低至 $10\text{ }\mu\text{m}$,在 CMOS 探测到各个部分光强后,结合 Stokes 矢量公式进行推导,便可得到原来光的 S 矢量参数 (S_0, S_1, S_2, S_3) 。在实验中,得到的最大主透过率达到 75% ,消光比高达 $1\text{ }100$,如果能够将这些模块集成到 CMOS 图像传感器上还能够进行实时的全 Stokes 偏振成像。

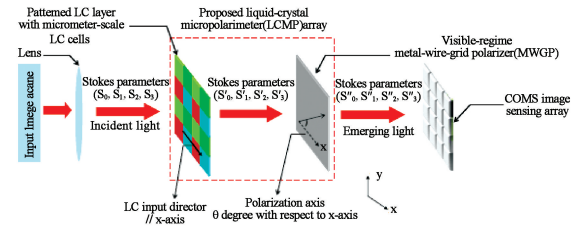


图 9 含有适用于全 Stokes 偏振成像集成 LCMP 阵列的 CMOS 偏振图像传感器架构。^[43]

Fig. 9 CMOS polarization image sensor architecture with integrated LCMP array for full Stokes polarization imaging. ^[43]

2014 年,Xiaojin Zhao 等人为主动式偏振成像系统设计了图样化的双层消色差的微型 $1/4$ 延迟片(MQWR)阵列^[44],具体的制作流程如图 10 所示,在这篇报道中他们依然用了光敏材料 SD1 来进行光控取向,用液晶聚合物(LCP)来实现相位延迟。这种高分辨率的消色差的 MQWR 结构可以用来提取波长在 $400\sim 700\text{ nm}$ 范围之间光的圆偏振信息,结合一些微偏振器件,在整个可见光波段的全 Stokes 偏振成像将得以实现。

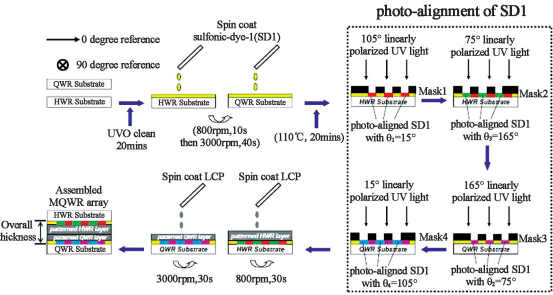


图 10 MQWR 阵列的制作流程^[44]

Fig. 10 Fabrication process flow of the MQWR array^[44]

3.3 液晶光控取向在具有复杂几何图形取向的液晶光学元器件中的应用

2012 年,Wei Hu 等人利用光控取向材料 SD1 研制了基于扭曲向列相(TN)和平行取向(PA)相互交错的液晶衍射光栅^[45],制作了低电压驱动 1D 和 2D 液晶光栅。同年,Xiaowen Lin 等人研制了快速响应的双稳态液晶光栅^[46]。2013 年,Jia-tong Sun 等人对 TN+PA 结构进一步研究,制作了光可调谐的、可擦写的(OTRW)液晶衍射光栅^[47](如图 11)。同年,Y. Ma 等人也发表了关于光可擦写铁电液晶光栅的研究工作^[48]。

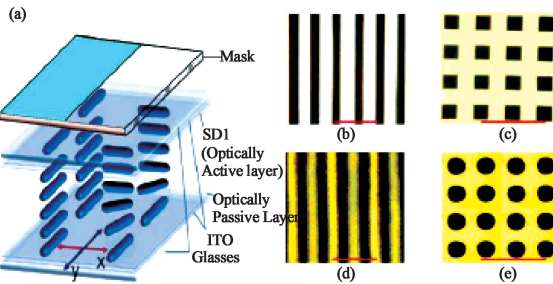


图 11 (a)OTRW 液晶光栅的原理性结构图;(b)和(c)分别是一维和二维光栅的光学掩模版;(d)和(e)是偏振显微镜下的液晶光栅结构图。红色标记的尺寸是 100 μm 。^[47]

Fig. 11 (a) Principle structure of OTRW LC grating cell; (b), (c) the optical 1D and 2D grating masks; (d), (e) the micrographs for the LC grating cell. The marker size is 100 μm .^[47]

2013 年,Xiaoqian Wang 等人利用 SD1 的光控取向性对基于扭曲向列相(TN)和平行取向(PA)相互交错的液晶菲涅耳透镜进行了研究^[49](如图 12),其衍射效率的理论值是 20.3%。随后,该实验小组于 2014 年对基于单侧图样化取向

层的液晶菲涅耳透镜进行报道^[50](如图 13),由于其属于二元相位型菲涅耳透镜,所以衍射效率的理论值达到 40.5%。接着,他们利用类似制作方法研制了快速响应的铁电液晶菲涅耳透镜^[51],并对其性能优化展开了讨论。

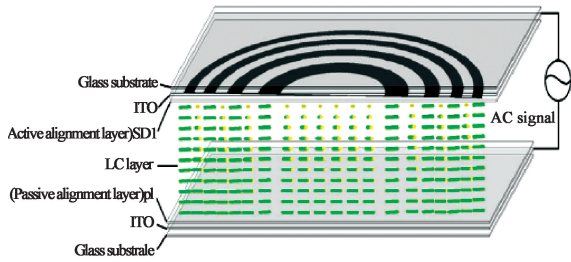


图 12 液晶菲涅耳透镜剖面结构图。一片带有 ITO 的玻璃基底内侧涂覆 PI 取向层,另一片则涂覆 SD1 取向层。白色和黑色部位分别代表了 TN 和 PA 的区域。^[49]

Fig. 12 Configuration of the designed LCFZL. One ITO coated glass substrate has its inner surface coated with a PI layer, while the other substrate is coated with an SD1 layer. White and black regions represent the TN and PA domains, respectively.^[49]

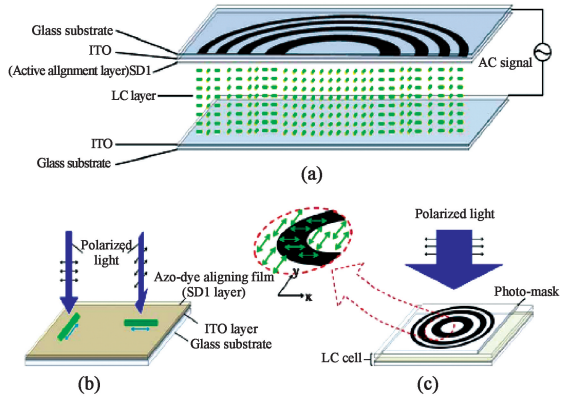


图 13 液晶菲涅耳透镜的剖面结构图 and 制作方法。(a)液晶菲涅耳透镜的剖面结构图;(b)光控取向的原理图;(c)图样化光控取向方法。红色虚线圆圈内的放大区域展示了在不同区域内的取向分布。^[50]

Fig. 13 Configuration and fabrication of FZL. (a) Configuration of FZL. (b) Schematics of photoalignment. (c) Patterned photoalignment process. The zoomed area in the red dotted circle shows the easy axis distribution in the two alignment domains.^[50]

从周期性光栅到准周期性菲涅耳透镜,液晶取向变得更加复杂,但制作方法并没有随之发生变化。2011 年 Slussarenko 等人运用光控取向技术制作了液晶取向图样更为复杂的 Q-plate(QP)(如图 14),这些 Q-plate 的拓扑荷数是 0.5、1.5 和 3,可以用来产生轨道角动量(OAM)分别为 1、3 和 6 每个光子的涡旋光束^[52]。当然,该制作方法相比于之前几个液晶光学元器件也更为复杂,为了简化 QP 大批量制作的流程,Fan Fan 等人于 2012 年提出了由图样化液晶四分之一波片(QWP)构成的轴对称偏振转换装置,用左旋和右旋偏振紫外光照射该特制的 QWP 会分别形成辐射状和首尾相接(环绕)状的偏振分布^[53](如图 15)。

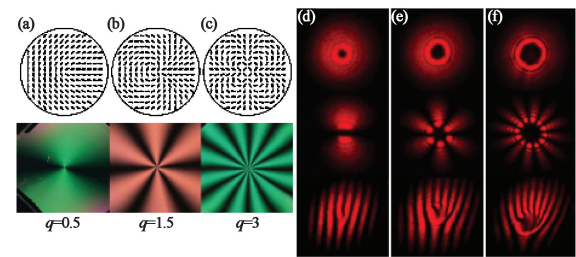


图 14 (a-c)不同拓扑荷数 QP 的液晶取向图样以及对应的在正交偏振片下的图片。(d-f)图(a-c)中的液晶 QP 在调节时产生的光束光强轮廓 CCD 图片,上方的入射光束是圆偏振的,中间的是线偏振的,底部是各自的平面波干涉图案。^[52]

Fig. 14 (a-c) Examples of the LC patterns with different topological charges and photos of the corresponding samples under crossed polarizers. (d-f) CCD pictures of the intensity beam profiles generated by the QPs shown in (a-c) when they are tuned. The input beam polarization was circularly polarized (top) or linearly polarized (middle). The respective interference patterns with a plane wave are also shown (bottom).^[52]

2006 年,Presnyakov 等人发表了用光控取向技术制作液晶偏振光栅的工作,他们用了两束偏振相反的圆偏振光干涉曝光 SD1 取向层,得到高衍射效率的偏振光栅^[54](如图 16)。

2015 年,Chenxiang Zhao 等人利用偏振光栅(PG)的性质开发了一种只需一次曝光就能得到

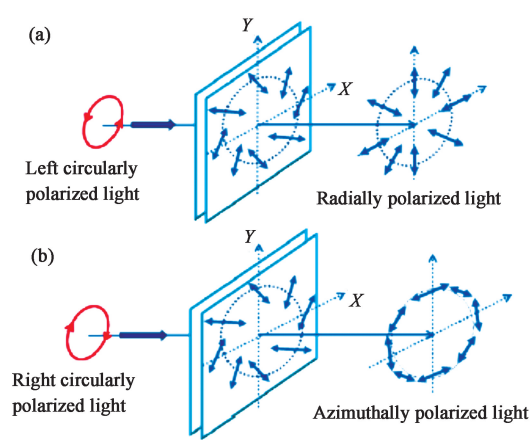


图 15 图样化的 QWP, $q=1$, $\alpha_0=\pi/4$,产生(a)辐射状的偏振分布以及(b)首尾相接状的偏振分布。^[53]

Fig. 15 Patterned QWP with property of $q=1$, $\alpha_0=\pi/4$ working as (a) radial polarization converter and (b) azimuthal polarization converter.^[53]

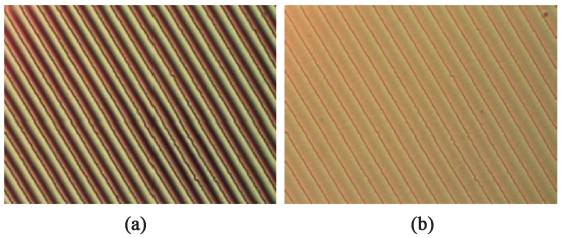


图 16 显微镜下的液晶偏振光栅图片:a)在正交偏振片下,b)没有检偏器。^[54]

Fig. 16 Microscope photos of LC polarization grating; a) between crossed polarizers, b) without analyzer.^[54]

多畴有规则取向的方法^[55](如图 17),该方法适用于为增加视角而采用的多畴配向技术,例如:多畴垂直配向 MVA。这种方法需要设计制作一个多层结构,并把该多层结构整体作为光学掩模版来使用,所用到的液晶聚合物(LCP)层的厚度取决于旋涂仪的转速,由于多层结构总体厚度非常小,在多层薄膜内的光学衍射被抑制了,所以对光控取向的取向精度影响不大。

为了优化光控取向的曝光工艺,Hao Wu 等人于 2012 年在南京大学设计并搭建了一套带有数字微镜器件(DMD)的微型曝光系统^[56-57](如图 18)。DMD($1\,024\,\text{pixel}\times 768\,\text{pixel}$,单个微镜尺寸 $13.68\,\mu\text{m}\times 13.68\,\mu\text{m}$)通过控制每一个微镜的

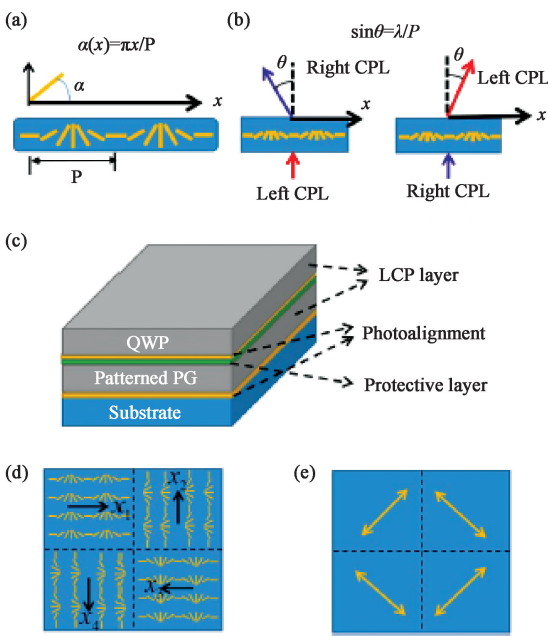


图 17 (a)偏振光栅的取向结构, x 轴代表光栅矢量方向, 黄线代表光轴方向。 (b)光束控制效应, 左旋偏振光和右旋偏振光穿过偏振光栅。 (c)带有一个图样化偏振光栅层(PG)和一个四分之一波片(QWP)层的光学掩模版的多层结构。 (d)图样化 PG 的四畴结构。 (e)图样化 QWP 具有四畴结构。^[55]

Fig. 17 (a) Alignment structure of the polarization grating. x axis denotes the grating vector direction; the yellow lines represent the optical axes' direction. (b) Beam steering effect with left and right CP light passing through the PG. (c) Multilayer structure of the designed photomask with a patterned PG layer and a QWP layer. (d) An example for four-domain structure of the patterned PG. (e) An example for four-domain structure for the patterned QWP. ^[55]

开/关状态可以将任意微小图像精确投影到光控取向层上,其作用有点类似一个投影式的动态光学掩模版,再配合一个带有微精步进电机的线偏振片的旋转定位,可以精确控制每一个曝光像素单元的线偏振方向。通过多步曝光(根据设计图案内的偏振态的数目决定)可以得到任意复杂的偏振分布图样,从而获得相应指向矢分布的液晶器件。于是,在 2015 年 Peng Chen 等人利用这套系统完成了能够产生光学涡旋并且衍射效率高达 99% 的液晶叉形光栅的研究工作^[58](如图 19)。

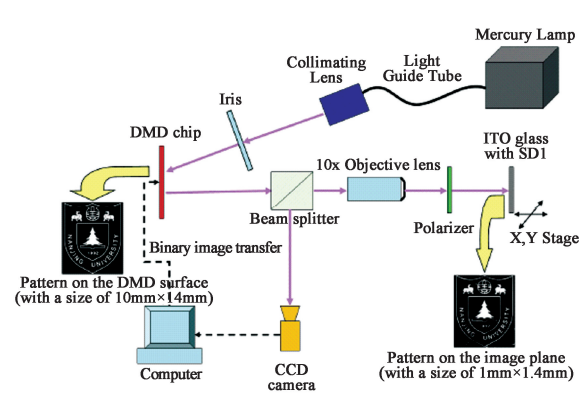


图 18 基于 DMD 的微型曝光系统的结构示意图^[56]
Fig. 18 Schematic illustration of DMD based micro-lithography system. ^[56]

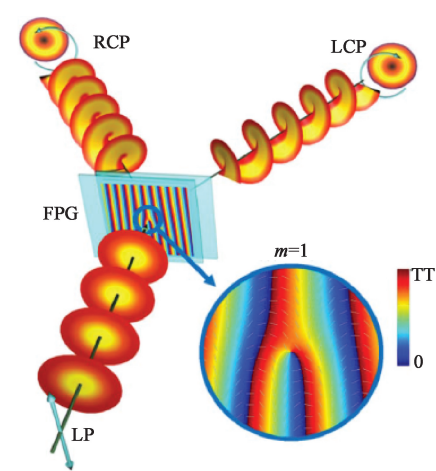


图 19 指向矢渐变的液晶叉形光栅(m 指数为 1)的示意图及衍射特性。从蓝到红的颜色意味着指向矢从 0 到 π 连续变化。沿光传播方向观测到偏振矢量用箭头来标记。LCP, 左旋圆偏振; LP, 线偏振; RCP, 右旋圆偏振。^[58]

Fig. 19 Schematic diagram and diffraction property of a director-varying LC fork grating with $m=1$. The color variation from blue to red indicates the director varying from 0 to π continuously. The polarization vectors observed along the light propagation direction are marked with arrows. LCP, left circularly polarized; LP, linearly polarized; RCP, right circularly polarized. ^[58]

3.4 液晶光控取向在 3D 光可擦写、铁电液晶显示器中的应用

光控取向技术在显示方面的应用是目前研究

的热点,SHARP 公司已经引入了光控取向技术,将其加入到液晶面板的生产工艺并开始量产,由此说明光控取向技术在显示方面的潜力是巨大的。

2013 年,Xiaoqian Wang 等人利用了柱状棱镜阵列的光学特性设计制作了光可擦写(ORW)的裸眼 3D 显示器^[59],写入 ORW 显示器的图像通过特殊的电脑处理以贴合柱状棱镜的尺寸,左右眼的串扰度小于 10%(如图 20)。

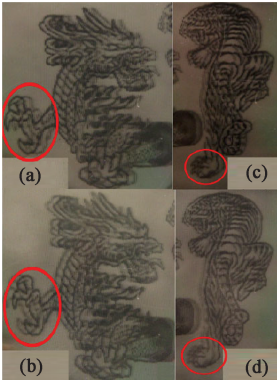


图 20 裸眼 3D 图(a)左眼所看到的龙的图像;(b)右眼所看到的龙的图像。(c)左眼所看到的老虎的图像;(d)右眼所看到的老虎的图像。^[59]

Fig. 20 Autostereoscopic three-dimensional image. (a) The image of a dragon for the left eye. (b) The image of a dragon for the right eye. (c) The image of a tiger for the left eye. (d) The image of a tiger for the right eye. ^[59]

2014 年,Jiatong Sun 等人利用一个栅格化光学掩模版设计制作了光可擦写 3D 液晶显示器^[60],配合一个四分之一波片和 3D 眼镜(左右眼可看到不同的圆偏振态),观测者可以观察到图像 3D 立体效果(如图 21)。

2015 年,Qi Guo 等人对铁电液晶(FLC-595)进行研究,发现了该材料的反向双稳态效应(如图 22),于是提出用偶氮染料材料 SD1 对铁电液晶光控取向,并将其应用到铁电液晶显示领域中^[61]。在实验中,针对反射式显示器设计的液晶盒厚为 0.8 μm ,在两端电极加上一个低电压 11 V 后测得响应时间约为 160 μs ,同时测得对比度高达 1 000 : 1。

光控取向技术在铁电液晶显示器生产中的作用非常关键,SD1 提供了适当的锚定能,使得在电

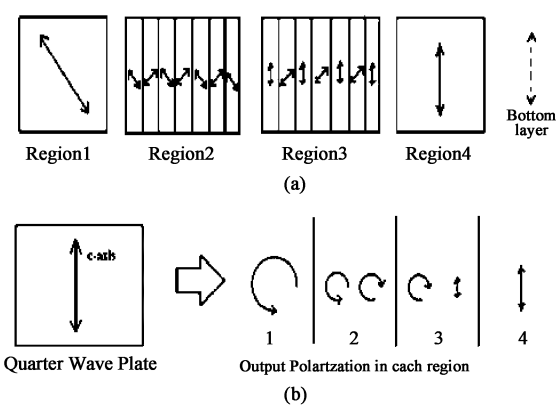


图 21 (a)光从三个区域出射后的偏振方位角指向。(b)光从三个区域出射,再经过一个置于 ORWLCD 上方的四分之一波片后的偏振状态。^[60]

Fig. 21 (a) The output polarization azimuth of the light from the three regions. (b) The polarization azimuth of the light from the three regions after placing a QWP on the top of the ORWLCD cell. ^[60]

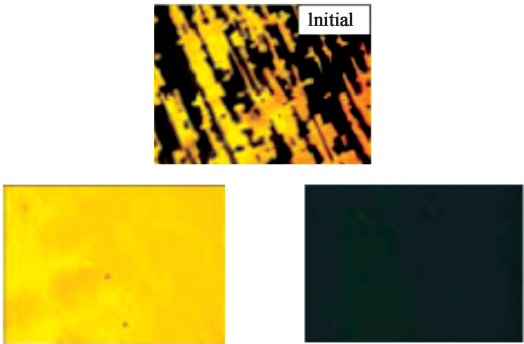


图 22 在正交偏振显微镜下反向双稳态 FLC 样品的结构(上方:灌入液晶后的初始结构;下方:施加正/反电压后的亮态和暗态结构)^[61]

Fig. 22 Textures (top: Initial texture after liquid crystal filling; bottom: Textures of bright and dark states after positive/negative treatment) of reverse bistable FLC samples under polarized microscope. ^[61]

控抑制螺旋(ESH)模式下的铁电液晶显示器得以高品质呈现(尚未发表)。当然,对于 SD1 的光稳定性也一直是人们所关注的问题,相关研究正在进行中,在此只能简单地提及一下。

3.5 液晶光控取向在光学滤光器中的应用

2014 年,A. M. W. Tam 等人报道了用多层

异型螺旋铁电 (DHF) 液晶盒结构制作连续可调的 Lyot 滤光器^[62] (如图 23)。在实验中用光敏材料 SD1 对 FLC 分子光控取向, 得到了稳定的很好的取向效果。

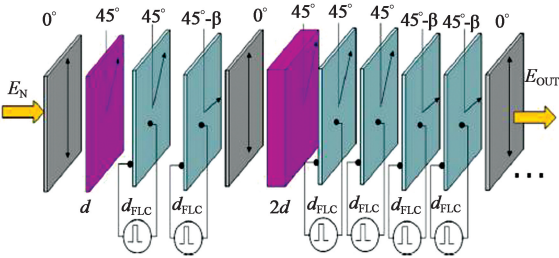


图 23 夹在两片平行偏振片中的含有被动式的延迟片和 DHFLC 延迟片的连续可调的 DHFLC Lyot 滤光器结构。^[62]

Fig. 23 Continuous tunable DHFLC Lyot filter configuration with passive retarder and DHFLC retarder sandwiched between two parallel polarizers. ^[62]

3.6 其他光控取向材料的应用

以上介绍的所有应用都用到了光控取向材料 SD1, SD1 预倾角非常小, 通常人们把它当作平行取向材料。在工业和实验室中还存在着许多其他的光控取向材料, 比如可以通过控制偏振紫外光曝光剂量改变预倾角的光控取向材料 CPL024 (日本 DIC 公司) 材料。2013 年, Fan Fan 等人利用了光控取向材料 CPL024 随空间变化的预倾角 (1°~89°) 制作了一个焦距可调的液晶透镜^[63] (如图 24), 制作方法简单是其一大优势。当然, 还有该种材料的其他应用, 以及其他光控取向材料的更多应用, 由于篇幅限制就不再一一介绍了。

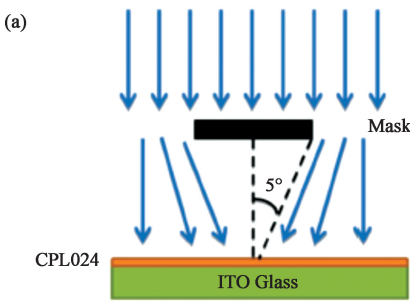


图 24 (a) 用来实现在曝光平面上随空间变化的光强的曝光装置 (b) 液晶透镜的剖面结构。^[63]

Fig. 24 (a) Exposure setup to achieve spatially variable light intensity on the exposing plane. (b) The fabricated LC lens structure. ^[63]

4 总 结

在发展了超过 20 年的时间后, 由于光控取向技术的卓越性能, 无论在实验室研究还是在工业生产中都得到了广泛应用, 其已然成为了生产高均匀度或者复杂指向矢分布结构液晶器件的不可或缺的工具。它可以应用在微观的、曲面和柔性基底上以及密闭空间内, 在显示领域、光电子学等领域它也有着巨大的潜在应用价值。

本文简单介绍了几种液晶取向的方法, 阐述了几种光控取向方法的工作机理, 列举了光控取向技术在多个领域的一些最新应用, 其中主要是平行取向材料 SD1 的应用。光控取向技术发展迅速, 要想涵盖液晶光控取向的所有方面几乎是很难做到的, 很多光控取向材料的特性及其应用在本文中尚未提及, 只能留待他人再作综述了。

参 考 文 献:

[1] Chigrinov G V, Kozenkov M V, Kwok H S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications* [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

[2] 黄子强. 液晶显示原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

Huang Z Q. *Principle of Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)

[3] 李梅, 路庆华, 王宗光. 液晶光取向技术[J]. 高分子通报, 2000, 4: 20-26.

Li M, Lu Q H, Wang Z G. Liquid crystal photoalignment technology [J]. *Polymer Bulletin*, 2000, 4: 20-26. (in Chinese)

[4] Kvasnikov E D, Kozenkov V M, Barachevskii V A. Birefringence in polyvinyl cinnamate films, induced by polarized light [J]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1977, 237(3): USSR 633-636. (in Russian)

[5] Ichimura K, Suzuki Y, Seki T, et al. Reversible change in alignment mode of nematic liquid crystals regulated pho-

- tochemically by ‘command surfaces’ modified with an azobenzene monolayer [J]. *Langmuir*, 1988, 4(5): 1214-1216.
- [6] Gibbons W M, Shannon P J, Sun S T, *et al.* Surface mediated alignment of nematic liquid crystals with polarized laser light [J]. *Nature*, 1991, 351: 49-50.
- [7] Schadt M, Schmitt K, Kozenkov V, *et al.* Surface-induced parallel alignment of liquid crystals by linearly polymerized photopolymers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31: 2155-2158.
- [8] Dyadyusha A G, Marusii T Y, Reznikov Y A, *et al.* Orientational effect due to a change in the anisotropy of the interaction between a liquid crystal and a bounding surface [J]. *JETP Letters*, 1992, 56(1): 17-21.
- [9] Blinov L M. Photoinduced molecular reorientation in polymers, Langmuir Blodgett films and liquid crystals [J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*, 1996, 5(2): 165-187.
- [10] O’Neill M, Kelly S M. Photoinduced surface alignment for liquid crystal displays [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, 33(10): R67-R84(18).
- [11] Schadt M. Liquid crystal displays and novel optical thin films enabled by photoalignment [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2001, 364(1): 151-169.
- [12] Chigrinov V G, Kozenkov V M, Kwok H S. New developments in photoaligning and photo-patterning technologies: physics and applications. In *Optical Applications of Liquid Crystals* [M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2003.
- [13] Shibaev V P, Kostromin S A, Ivanov S A. *Polymers as Electrooptical and Photooptical Active Media* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [14] Shibaev V, Bobrovsky A, Boiko N. Photoactive liquid crystalline polymer systems with light-controllable structure and optical properties [J]. *Progress in Polymer Science*, 2003, 28(5): 729-734.
- [15] Chigrinov V, Pikin S, Verevochnikov A, *et al.* Diffusion model of photoaligning in azo-dye layers [J]. *Physical Review E*, 2004, 69: 061713.
- [16] Yaroshchuk O, Reznikov Y. Photoalignment of liquid crystals: basics and current trends [J]. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(2): 286-300.
- [17] Jones C, Day S. Shedding light on alignment [J]. *Nature*, 1991, 351: 15.
- [18] Pedersen T G, Ramanujam P S, Johansen P M, *et al.* Quantum theory and experimental studies of absorption spectra and photoisomerization of azobenzene polymers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1998, 15(11): 2721-2730.
- [19] Pedersen T G, Johansen P M, Holme N C R, *et al.* Theoretical model of photoinduced anisotropy in liquid crystalline azobenzene side-chain polyesters [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1998, 15(3): 1120-1129.
- [20] Pedersen T G, Johansen P M. Mean-field theory of photoinduced molecular reorientation in azobenzene liquid crystalline side-chain polymers [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(13): 2470-2473.
- [21] Gaididei Y B, Christiansen P L, Ramanujam P S. Theory of photoinduced deformation of molecular films [J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(2): 139-146.
- [22] Yaroshchuk O V, Kiselev A D, Zakrevskyy Y, *et al.* Photo-induced three dimensional orientational order in side chain liquid crystalline azopolymers [J]. *Physical Review E*, 2003, 68: 011803.
- [23] Kawatsuki N, Goto K, Yamamoto T. Photoinduced anisotropy and photoalignment of nematic liquid crystals by a novel polymer liquid crystal with a coumarin-containing side group [J]. *Liquid Crystals*, 2001, 28(8): 1171-1176.
- [24] Schadt M, Seiberle H, Schuster A. Optical patterning of multidomain liquid-crystal displays with wide viewing angles [J]. *Nature*, 1996, 381(6579): 212-215.
- [25] Hasegawa M, Taira Y. Nematic homogeneous photoalignment by polyimide exposure to linearly polarized UV [J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 1995, 8(2): 241-248.
- [26] West J L, Wang X, Li Y, *et al.* Polarized UV-exposed polyimide films for liquid-crystal alignment [C]. *SID’95 Digest*, 1995, 703.
- [27] Nishikawa M, Taheri B, West J L. Mechanism of unidirectional liquid-crystal alignment on polyimides with linear-

- ly polarized ultraviolet light exposure [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(19): 2403-2405.
- [28] Park B, Jung Y, Choi H, *et al.* Thermal and optical stabilities of photoisomerizable polyimide layers for nematic liquid crystal alignment [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, 37(10): 5663-5668.
- [29] Sakamoto K, Usami K, Watanabe M, *et al.* Surface anisotropy of polyimide film irradiated with linearly polarized ultraviolet light [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(15): 1832-1834.
- [30] Yang K H, Tajima K, Takenaka A, *et al.* Charge trapping properties of UV-exposed polyimide films for the alignment of liquid crystals [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, 35(5A): L561-L563.
- [31] Wang Y, Xu C, Kanazawa A, *et al.* Thermal stability of alignment of a nematic liquid crystal induced by polyimides exposed to linearly polarized light [J]. *Liquid Crystals*, 2001, 28(3): 473-475.
- [32] Zhong Z X, Li X D, Lee S H, *et al.* Liquid crystal photoalignment material based on chloromethylated polyimide [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(13): 2520-2522.
- [33] Umanskii B, Novoseletskii N, Torgova S, *et al.* Azo-dyes as photoalignment materials for liquid crystals [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, 412(1): 313-319.
- [34] West J L, Su L, Reznikov Y. Photoalignment using adsorbed dichroic molecules [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2001, 364(1): 199-210.
- [35] Kozenkov V M, Yudin S G, Katyshev E G, *et al.* Photoinduced optical anisotropy in multilayer Langmuir films [J]. *Pisma V Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1986, 12: 1267-1272.
- [36] Barnik M I, Kozenkov V M, Shtykov N M, *et al.* Photoinduced optical anisotropy in Langmuir-Blodgett films [J]. *Journal of Molecular Electronics*, 1989, 5(1): 53-56.
- [37] Chigrinov V G. *Liquid Crystal Devices: Physics and Applications* [M]. London: Artech House, 1999.
- [38] Chigrinov V, Prudnikova E, Kozenkov V, *et al.* Synthesis and properties of azo dye aligning layers for liquid crystal cells [J]. *Liquid Crystals*, 2002, 29(10): 1321-1327.
- [39] Muravsky A, Murauski A, Li X, *et al.* Optical rewritable liquid-crystal-alignment technology [J]. *Journal of the SID*, 2007, 15(4): 267-273.
- [40] Chigrinov V, Kwok H S, Takada H, *et al.* Photoaligning by azo-dyes: physics and applications [J]. *Liquid Crystals Today*, 2005, 14(4): 1-15.
- [41] Presnyakov V, Liu Z, Chigrinov V. Infiltration of photonic crystal fiber with liquid crystals [C]. *Proceedings of the SPIE*, 2005, 6017: 102.
- [42] Siarkowska A, Jó wik M, Ertman S, *et al.* Photo-alignment of liquid crystals in micro capillaries with point-by-point irradiation [J]. *Opto-Electronics Review*, 2014, 22(3): 178-182.
- [43] Zhao X J, Bermak A, Boussaid F, *et al.* Liquid-crystal micropolarimeter array for full Stokes polarization imaging invisible spectrum [J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17776-17787.
- [44] Zhao X J, Pan X F, Fan X L, *et al.* Patterned dual-layer achromatic micro-quarter-wave-retarder array for active polarization imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8024-8034.
- [45] Hu W, Srivastava A, Xu F, *et al.* Liquid crystal gratings based on alternate TN and PA photoalignment [J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5384-5391.
- [46] Lin X W, Hu W, Hu X K, *et al.* Fast response dual-frequency liquid crystal switch with photo-patterned alignments [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3627-3629.
- [47] Sun J T, Srivastava A K, Wang L, *et al.* Optically tunable and rewritable diffraction grating with photoaligned liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2342-2344.
- [48] Ma Y, Sun J T, Srivastava A K, *et al.* Optically rewritable ferroelectric liquid-crystal grating [J]. *EPL*, 2013, 102(2): 24005.
- [49] Wang X Q, Srivastava A K, Chigrinov V G, *et al.* Switchable Fresnel lens based on micropatterned alignment [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1775-1777.
- [50] Wang X Q, Fan F, Du T, *et al.* Liquid crystal Fresnel zone lens based on single-side-patterned photoalignment layer [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2026-2029.
- [51] Srivastava A K, Wang X Q, Gong S Q, *et al.* Micro-patterned photo-aligned ferroelectric liquid crystal Fresnel

- zone lens [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1643-1646.
- [52] Slussarenko S, Murauski A, Du T, *et al.* Tunable liquid crystal q-plates with arbitrary topological charge [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4085-4090.
- [53] Fan F, Du T, Srivastava A K, *et al.* Axially symmetric polarization converter made of patterned liquid crystal quarter wave plate [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23036-23043.
- [54] Presnyakov V, Asatryan K, Galstian T, *et al.* Optical polarization grating induced liquid crystal micro-structure using azo-dye command layer [J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10558-10564.
- [55] Zhao C X, Fan F, Du T, *et al.* Multilayer photo-aligned thin-film structure for polarizing photonics [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 2993-2996.
- [56] Wu H, Hu W, Hu H C, *et al.* Arbitrary photo-patterning in liquid crystal alignments using DMD based lithography system [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16684-16689.
- [57] 胡华超,魏冰妍,胡伟,等. 动态掩膜光刻在液晶取向中的应用[J]. 液晶与显示, 2013, 28(2): 199-203.
Hu H C, Wei B Y, Hu W, *et al.* Applications of dynamic mask based photolithography in liquid crystal alignment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 199-203. (in Chinese)
- [58] Chen P, Wei B Y, Ji W, *et al.* Arbitrary and reconfigurable optical vortex generation: a high-efficiency technique using director-varying liquid crystal fork gratings [J]. *Photon. Res.*, 2015, 3(4): 133-139.
- [59] Wang X Q, Wang L, Sun J T, *et al.* Autostereoscopic 3D pictures on optically rewritable electronic paper [J]. *Journal of the SID*, 2013, 21(2): 103-107.
- [60] Sun J T, Srivastava A K, Zhang W L, *et al.* Optically rewritable 3D liquid crystal displays [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6209-6212.
- [61] Guo Q, Zhao X J, Zhao H J, *et al.* Reverse bistable effect in ferroelectric liquid crystal devices with ultra-fast switching at low driving voltage [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2413-2416.
- [62] Tam A M W, Guo Q, Srivastava A K, *et al.* Enhanced performance configuration for fast-switching deformed helix ferroelectric liquid crystal continuous tunable Lyot filter [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(17): 3787-3795.
- [63] Fan F, Srivastava A K, Du T, *et al.* Low voltage tunable liquid crystal lens [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4116-4119.

作者简介:王骁乾(1984—),男,上海人,博士,讲师,主要从事液晶光学器件的研究。E-mail:xqwang@ecust.edu.cn