

物性参数对液晶偏振光栅特性的影响

陈雨诺, 罗炜程, 鄢宏杰, 陈鹭剑

引用本文:

陈雨诺, 罗炜程, 鄢宏杰, 等. 物性参数对液晶偏振光栅特性的影响[J]. 液晶与显示, 2020, 35(12): 1222–1233.

CHEN Yu-nuo, LUO Wei-cheng, YAN Hong-jie, et al. Influence of physical parameters on the properties of liquid crystal polarization grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(12): 1222–1233.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203512.1222>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

负性液晶边缘场切换模式的性能分析及优化

Performance analysis and optimization of fringe field switching with negative dielectric liquid crystal

液晶与显示. 2020, 35(9): 914–920 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0914>

近红外光响应液晶纳米智能材料

Near-infrared light-responsive intelligent liquid crystal nanocomposites

液晶与显示. 2020, 35(7): 631–644 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0631>

液晶偏振变焦透镜组合设计

Design of liquid crystal polarization zoom lens

液晶与显示. 2020, 35(7): 741–748 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0741>

氧化石墨烯液晶的光电特性与显示应用

Electrical-optical properties of graphene oxide liquid crystal and its applications

液晶与显示. 2020, 35(7): 733–740 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0733>

多壁碳纳米管掺杂的聚合物分散液晶光栅的电光特性

Electro-optical characteristics of polymer-dispersed liquid crystal gratings doped with multi-walled carbon nanotubes

液晶与显示. 2020, 35(11): 1095–1102 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203511.1095>

文章编号:1007-2780(2020)12-1222-12

物性参数对液晶偏振光栅特性的影响

陈雨诺¹, 罗炜程¹, 鄢宏杰², 陈鹭剑^{1*}

(1. 厦门大学 电子科学与技术学院, 福建 厦门 361005;

2. 厦门城市职业学院, 福建 厦门 361008)

摘要:随着现代社会对数据存储容量和信息处理速度要求的不断提高,更加小型化、集成化的平面光学器件受到了广泛的关注。作为一种典型的可以进行几何相位调制的液晶器件,液晶偏振光栅具有衍射效率高、偏转角度大、响应时间短等优势,已经展现出了非常大的应用潜力。然而,目前液晶偏振光栅在设计制备过程中还存在许多与电光性能相关的问题,限制其走向实际应用。实现液晶偏振光栅衍射特性的调控需要满足一些先决条件。本文通过选取合适液晶偏振光栅的弹性连续体模型,主要研究改变液晶材料的物性参数如弹性常数、介电常数等在强、弱两种锚定条件下对临界盒厚和阈值电压的影响。并给出了针对不同应用要求的液晶偏振光栅的制备过程中,关于液晶材料物性参数选择的理论参考依据。

关键词:液晶偏振光栅;锚定条件;弹性连续体模型;物性参数

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203512.1222

Influence of physical parameters on the properties of liquid crystal polarization grating

CHEN Yu-nuo¹, LUO Wei-cheng¹, YAN Hong-jie², CHEN Lu-jian^{1*}

(1. School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen City University, Xiamen 361008, China)

Abstract: With the demand on increasing data storage capacity and information processing speed in the modern society, more compact and integrated planar optical devices have received widespread attention. As one of the typical liquid crystal (LC) devices to modulate geometric phase, LC polarization gratings have shown great application potential in optical systems due to the advantages such as high diffraction efficiency, large deflection angle, and short response time, etc. However, some of the problems related to electro-optical performances have not yet been overcome in the current manufacturing process of LC polarization gratings, limiting its practical application. The control of diffraction characteristics of LC polarization gratings is subject to certain preconditions. In this work, by optimizing the elastic continuum model used to analyze the LC polarization grating, the influence of LC physical parameters (elastic constant, dielectric constant, etc.) on the critical cell thickness and

收稿日期:2020-07-03;修订日期:2020-08-20.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61675172)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61675172)

* 通信联系人, E-mail: lujianchen@xmu.edu.cn

threshold voltage, under the strong and weak anchoring conditions were investigated, providing the theoretical support for the selection of LC materials with suitable physical parameters for LC polarization gratings toward different applications.

Key words: LC polarization grating; anchoring conditions; elastic continuum model; physical parameters

1 引 言

在过去的 10 年中,几何相位,也称为 PB 相位(Pancharatnam-Berry phase)方面的研究取得了令人瞩目的进展^[1],与由光程差造成的动态相位变化不同,几何相位变化源于光的自旋-轨道相互作用^[2](Spin-orbit interaction, SOI),描述的是当光通过各向异性介质时,相位变化和偏振态变化之间的关系。由于光波的几何相位仅取决于其通过某一各向异性介质时的几何路径及偏振态^[3],这就使得所选用的介质无需具有很大的尺寸来提供相位积累,且对制作过程中的瑕疵具有较好的鲁棒性^[4]。由于以上特点,几何相位调制为光学器件的小型化、集成化提供了更多的可能性。

液晶(Liquid crystal)作为一种可动态取向、电控技术成熟且在可见光波段透过率较高^[5]的各向异性材料,是制备几何相位调制器件的理想选择。目前,基于液晶的光电器件已经得到了非常广泛的应用,如空间光调制器^[6]、光开关^[7-8]、偏振控制器^[9]等,从本质上来说,都是利用液晶分子的上述特性,通过外场进行调控,改变光波的相位,从而实现对光强、偏振态等光学特性的调制。

液晶偏振光栅(LC polarization grating, LCPG)就是一种典型的可以实现几何相位调制的液晶器件。2004 年,美国布朗大学的 Crawford 等人首次利用两束正交圆偏振光的全息曝光得到液晶偏振光栅^[10]。但由于其使用的是单玻璃基底和取向完全固定的聚合物液晶,所以无法通过电压进行调制,这种无源的液晶偏振光栅,被称为被动式液晶偏振光栅^[11]。与之对应的是本文涉及的主动式液晶偏振光栅,其基本特征为:两块平板玻璃之间限定具有介电各向异性和光学各向异性的向列相液晶,并通过特定取向使液晶分子沿基板平面

进行周期性排布,在每个周期内液晶分子的指向矢旋转了 180° 的光栅^[11]。与被动式液晶偏振光栅不同,该光栅可以通过电压进行调制,对于本文接下来提到的液晶偏振光栅,若无特殊说明,统一指主动式液晶偏振光栅。

目前,液晶偏振光栅已经在高精度高偏转的光束偏转系统^[12-13]中展示出了广泛的应用前景,如激光扫描系统、红外凝视系统、偏振成像系统^[5]、激光雷达系统^[14]等,它也因此被称为第四代光学元件。但是,国内外对其的研究至今还比较有限,仍有一些技术难点未被攻克,以至于至今鲜有成熟的采用液晶偏振光栅为核心器件的光学系统。

自 20 世纪 80 年代偏振光栅的概念首次被提出以来,液晶偏振光栅在衍射效率^[15]、工作波段^[16-19]等方面都有了长足的技术进展。2007 年, Komanduri 等人基于液晶的弹性连续体理论构建了液晶偏振光栅的弹性连续体模型,通过该模型,对液晶偏振光栅的部分结构、电光特性参数得以被计算并分析,这些分析的结果对于其制备过程是有很大的指导意义的^[20]。该工作主要关注液晶偏振光栅周期对两个基本的特性——临界盒厚和阈值电压的直接或间接的影响。液晶偏振光栅的结构特性很大程度上依赖于储存液晶光栅的液晶盒尺寸,当液晶盒厚超过对应临界盒厚时,所制备的液晶偏振光栅中会出现液晶分子的排列缺陷,即在无外加电场的情况下,液晶分子指向矢与液晶盒上下表面不严格平行,这对液晶偏振光栅的衍射效率和偏振调制特性有着严重的影响。阈值电压也称为液晶偏振光栅的弗雷德里克兹转变条件,当给液晶偏振光栅一个小于阈值电压的外加电压时,液晶盒内的液晶分子排列几乎不受到该外加电场的影响,而当外加电压大于阈值电压时,就可以通过它来控制液晶分子的倾角。鉴于对

液晶偏振光栅的各级能量分布、衍射效率、偏振态等的理论研究和实验验证已有不少^[5], 实验成果也已经较为完善, 且这些实验都需要建立在液晶盒厚小于临界盒厚、外加电压大于阈值电压的基础上, 所以本文以可以通过偏振或外加电压来控制液晶偏振光栅衍射光的先决条件: 临界盒厚和阈值电压为切入点开展分析和研究。

本文首先介绍液晶偏振光栅的弹性连续体模型的构建, 然后应用该模型分别在强锚定条件和弱锚定条件两种情况下, 针对具有不同盒厚与光栅周期的液晶偏振光栅进行理论计算和分析, 讨论液晶物性参数对关键特性参数即临界盒厚和阈值电压的影响规律, 并进行总结和展望。

2 模型介绍

2.1 液晶偏振光栅的弹性连续体模型

首先, 简单介绍 Komanduri 的工作中构建液晶偏振光栅弹性连续体模型的过程^[20], 本文的分析很大程度基于该模型。液晶偏振光栅的结构示意图如图 1 所示, 为方便计算分析, 在液晶盒子内部建立空间坐标系, 并如图 1 中所示设定 x 轴、 y 轴、 z 轴。 d 为液晶盒厚度, Λ 为液晶偏振光栅的光栅周期。定义一个单位矢量 $\vec{n}$ 来表示液晶分子指向矢:

$$\vec{n}(\theta, \varphi) = \cos\theta\cos\varphi\vec{x} + \cos\theta\sin\varphi\vec{y} + \sin\theta\vec{z}, \quad (1)$$

其中, θ 和 φ 分别为空间坐标系中的倾斜角、方位

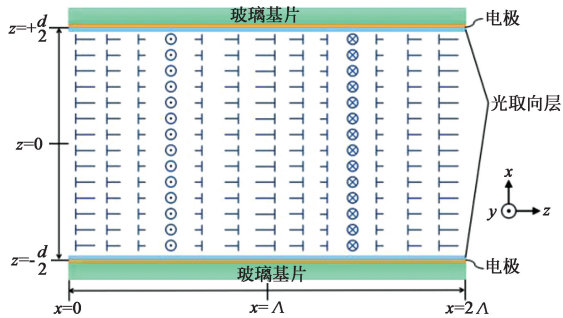


图 1 液晶偏振光栅结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of liquid crystal polarization grating structure

角。由于液晶盒空间边界条件的限制, θ 和 φ 都是关于 y 坐标独立的^[5], 因此研究中大多使用如图 1 的剖面来表征液晶偏振光栅的基本结构。

根据液晶的弹性连续体理论, 当盒内液晶受到外界作用力时, 将会发生微小形变。这种微小形变将引起液晶分子指向矢 $\vec{n}$ 随空间坐标的连续变化, 该过程可以看做是一种静态过程^[5]。盒内液晶受到外界作用力后又达到一个新的平衡态, 且这个新的平衡态也应符合能量最低的原则, 即液晶的弗兰克自由能密度 (Frank-Oseen elastic energy density) 应该要在该状态下取得最小值^[21-22]。没有外加电场作用时, 非手性向列相液晶的弗兰克自由能密度可表示为^[23]:

$$\omega_F = \frac{1}{2}K_1(\nabla \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_2(\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_3(\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_2 \nabla \cdot [(\vec{n} \cdot \nabla) \vec{n} - (\nabla \cdot \vec{n}) \vec{n}], \quad (2)$$

其中: K_1 、 K_2 、 K_3 分别为所使用液晶材料的展曲弹性常数、扭曲弹性常数和弯曲弹性常数。当给液晶偏振光栅外加一个电场时, 液晶盒内的电场能量密度可表示为:

$$\omega_{elec} = -\frac{1}{2}\epsilon_0\Delta\epsilon(\vec{n} \cdot \vec{E})^2, \quad (3)$$

其中: ϵ_0 为真空介电常数, $\Delta\epsilon$ 为所使用液晶材料的介电各向异性。

当给液晶偏振光栅外加一个大于阈值电压 V_{th} 的电压 V , 其液晶分子将会发生偏转, 与玻璃基片间形成一定的倾角。如图 2 所示, 在给定空间边界条件限制和外加电场时, 可以通过变分法计算总自

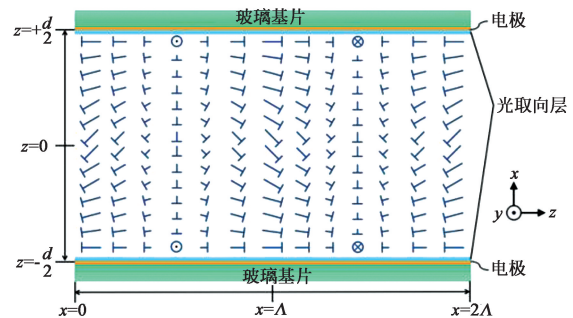


图 2 $V > V_{th}$ 时液晶偏振光栅结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of liquid crystal polarization grating structure when $V > V_{th}$

由能密度最小时的液晶分子指向矢分布^[24], 进而进行该平衡态下其他电光特性参数的计算。

求和得到液晶偏振光栅的总自由能密度为:

$$\begin{aligned} \omega = \omega_F + \omega_{\text{elec}} = & f(\theta, \varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \\ & g(\theta) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + h(\theta, \varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \\ & \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin^2 \theta, \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} f(\theta, \varphi) = & \frac{\cos^2 \theta}{2} [K_2 \sin^2 \theta + K_3 \cos^2 \theta + e(\theta, \varphi)], \\ e(\theta, \varphi) = & \sin^2 \varphi (K_1 - K_2 \sin^2 \theta - K_3 \cos^2 \theta), \\ g(\theta) = & \frac{1}{2} (K_1 \cos^2 \theta + K_3 \sin^2 \theta), \\ h(\theta, \varphi) = & (K_2 - K_1) \cos^2 \theta \sin \varphi. \end{aligned}$$

引入一个取值为 $[-1, 1]$ 的常数 α 来替代耦合项 $f(\theta, \varphi)$, 最终可以得到液晶分子指向矢倾斜角 θ 、空间坐标 z 、液晶盒厚度 d 以及外加电场场强 E 之间的关系^[23]:

$$\frac{\pi}{\Lambda} \left(z + \frac{d}{2} \right) = \int_0^{\beta(z)} G(\theta_m, \beta) d\beta, \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} G(\theta_m, \beta) = & [K_1 + (K_3 - K_1) \sin^2 \theta_m \sin^2 \beta]^{\frac{1}{2}} \times \\ & \left\{ \alpha K_1 + (1 - \alpha) \left[\frac{2K_3 - K_2 + \sin^2 \theta_m \times (1 + \sin^2 \beta) \times (K_2 - K_3)}{(1 - \sin^2 \theta_m \sin^2 \beta)^{-\frac{1}{2}}} + \epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \left(\frac{\Lambda}{\pi} \right)^2 \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \\ & (1 - \sin^2 \theta_m \sin^2 \beta)^{-\frac{1}{2}}, \\ \beta(z) = & \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta(z)}{\sin \theta_m} \right). \end{aligned}$$

以式(5)为基础推导出液晶偏振光栅一系列特性参数的表达式, 并且可以分析图 1 与图 2 之间的弗雷德里克兹转变过程, 特别地, 在模型中也使用了 $\alpha = 0.4$ 这一经验取值^[20]。

2.2 模型中的锚定条件

由于液晶的流动性, 所以一般应用时都将液晶装在液晶盒内, 这就使得我们不得不考虑液晶和包裹着它的液晶盒内表面间的相互作用, 即界面作用。在界面作用中, 锚定能(Anchoring energy)的大小决定了锚定条件的强弱, 强锚定条件描述的是锚定能足够大时液晶分子指向矢在表面处被固定且难以被改变的情况, 与之相对的, 液晶

分子指向矢在表面处容易被改变的情况, 被称为弱锚定条件^[25-26]。

光取向技术是制备基于液晶材料的几何相位元件所采用的最主要的取向技术之一^[27], 自 Ichimura 等^[28] 1988 年首次提出光取向技术以来, 该技术就得到了广泛研究和发展^[29-31]。2002 年, Chigrinov 等人^[32] 开发出了一种基于磺酸基偶氮染料及其衍生物的光控取向材料 SD1, 不仅很好地解决了偶氮类材料的光、热稳定性问题, 改良了偶氮类材料的电压保持率, 而且使得光取向技术可以提供与摩擦取向技术相比拟的锚定能($> 10^{-4} \text{ J/m}^2$)^[33]。

此外, 可以通过改变液晶原材料的平均分子长度^[34]、调整曝光方法^[35]、改变光取向材料^[36]等方法来改变锚定能。光取向的强锚定条件在目前的技术水平下已经是稳定可靠的, 但受限于实验条件, 有时不得不使用仅能提供弱锚定条件的光取向材料^[37]。弱锚定条件下, 液晶盒表面处的液晶分子指向矢更容易被改变, 对弱锚定条件进行研究有助于解决液晶偏振光栅制备过程中产生瑕疵的问题^[38-40]。

2.1 节中的推导过程是基于光取向的强锚定条件, 在此基础上, Komanduri 也对模型在弱锚定条件下进行了修正^[20], 在体系的总能量密度算式中加入液晶盒中的表面锚定能量密度项^[41]:

$$\omega_s = W_p \sin^2 \theta + W_a \cos^2 \theta \sin^2 \left(\varphi - \frac{\pi x}{\Lambda} \right), \quad (6)$$

其中: W_p 和 W_a 分别是液晶盒表面处液晶分子指向矢倾斜角 θ 和方位角 φ 方向上的锚定能。并引入关于液晶材料的单一弹性常数近似, 即可获得适用于弱锚定条件下的模型。使用该模型可以对强、弱两种锚定条件下液晶偏振光栅的特性参数进行计算与分析。

2.3 输入模型的物性参数

从式(5)可以看出, 影响液晶偏振光栅中液晶分子指向矢倾斜角 θ 、空间坐标 z 、液晶盒厚度 d 以及外加电场场强 E 之间关系的液晶材料物性参数有: 液晶的介电各向异性 $\Delta \epsilon$ 和分别对应展曲、扭曲、弯曲的弹性常数 K_1 、 K_2 、 K_3 。

液晶分子在多种性质上都呈现出各向异性, 而液晶材料在电场中的大部分物理学参数都是由介电各向异性所决定的^[42-43]。对于在光学波段

常用的正性液晶材料,其介电各向异性的取值范围一般为 $[5, 100]$ ^[44]。通过掺杂等方法可以对液晶的介电各向异性进行调整。例如,2004年,Thisayukta 等人提出的在向列相液晶中加入银纳米粒子的方法,可以实现对向列相液晶电光特性的改变^[45]。

弹性常数 K_i ($i=1,2,3$) 是一种用来描述液晶分子弹性形变的物理量。通常, K_i 的取值应在 pN 量级,且通过实验已经得到了一般液晶的 3 个弹性常数之间比值的大致范围^[46]为:

$$\begin{cases} 0.5 < \frac{K_2}{K_1} < 1.2 \\ 0.5 < \frac{K_3}{K_1} < 4.0 \end{cases} \quad (7)$$

在实验中,可以通过改变所使用液晶分子的尺寸、刚性或通过掺杂来实现 K_2/K_1 和 K_3/K_1 值的变化^[47]。例如,增大液晶分子的长度或提高液晶分子的刚性即可有效提高 K_3/K_1 值^[46]。

尽管在液晶体系中, $\Delta\epsilon$ 和 K_1, K_2, K_3 之间存在着一定的相互影响,但在大部分对向列相液晶物性特征的研究中,这些参数都被分开来讨论^[48]。因此,在本研究中也将对这两个输入的物性参数分别独立地在取值范围内取值。

3 强锚定条件下的计算

为了获得更高的计算效率和精度,本节把模型移植到 MATLAB 中进行计算,并做了部分改动和优化。考察一种常见的向列相液晶 MLC-6080,其介电各向异性为 $\Delta\epsilon = +7.2$,弹性常数 $[K_1, K_2, K_3] = [14.4, 7.1, 19.1]$ pN,且 α 取值为 0.4 保持不变,由于弹性常数在本节的计算中主要以 K_2/K_1 和 K_3/K_1 的形式出现,所以固定 K_1 的值不变,通过 K_2 和 K_3 值的改变来实现上述两个比值的变化。

3.1 临界盒厚

强锚定条件下,根据上述构建的模型,在无外加电场且不考虑液晶分子指向矢存在预倾角时,在液晶盒中心即空间坐标 $z=0$ 处应有 $\theta_m=0$,将此条件代入式(5)得到:

$$\frac{\pi d}{2\Lambda} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{K_1}{\alpha K_1 + (1-\alpha)(2K_3 - K_2)} \right]^{\frac{1}{2}} d\beta, \quad (8)$$

简化后得到液晶偏振光栅的临界盒厚 d_c 的表达式:

$$d_c = \Lambda \left[\alpha + (1-\alpha) \left(\frac{2K_3}{K_1} - \frac{K_2}{K_1} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

由此可见,液晶偏振光栅的临界盒厚是一个由光栅周期 Λ 和液晶材料弹性常数比值 $K_2/K_1, K_3/K_1$ 共同决定的参数。

在一组固定光栅周期 Λ 下,研究临界盒厚 d_c 与液晶材料物性参数 $K_2/K_1, K_3/K_1$ 的关系。由于在越小的光栅周期下,临界盒厚的确定就越有意义,因此本文在接下来的研究中结合液晶偏振光栅常见的设计光栅周期,在一个较小的微米量级对其进行取值。图 3 和图 4 分别展示了 Λ 分别为 2, 5, 10, 20 μm 时 d_c 与 $K_2/K_1, K_3/K_1$ 的关系,其中红色曲线反映的是 d_c 的变化规律,为了直观体现其与光栅周期的对比,用黑色曲线在纵坐标上标注出了 Λ 值。

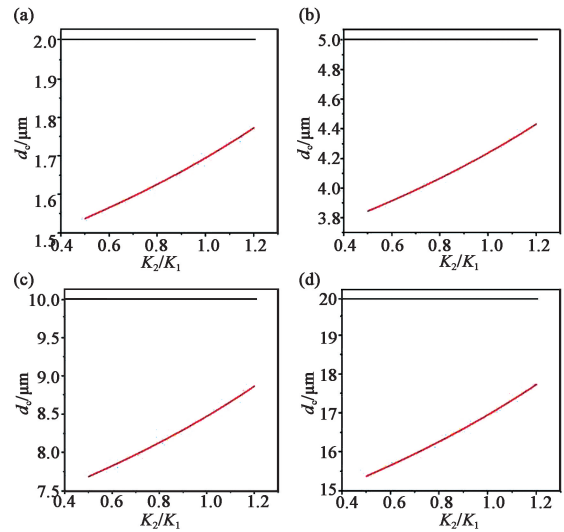


图 3 Λ 不同取值时 d_c 与 K_2/K_1 的关系。(a) $\Lambda = 2 \mu\text{m}$; (b) $\Lambda = 5 \mu\text{m}$; (c) $\Lambda = 10 \mu\text{m}$; (d) $\Lambda = 20 \mu\text{m}$ 。

Fig.3 Relationship between d_c and K_2/K_1 at different values of Λ . (a) $\Lambda = 2 \mu\text{m}$; (b) $\Lambda = 5 \mu\text{m}$; (c) $\Lambda = 10 \mu\text{m}$; (d) $\Lambda = 20 \mu\text{m}$.

可以看出,图中的黑色曲线和红色曲线在纵坐标取值上是相当接近的,且表现出与 $K_2/K_1, K_3/K_1$ 不同的相关性,这是由这两个参数在式(9)中所处的位置决定的,总结如下:在强锚定条件下,液晶偏振光栅的临界盒厚 d_c 分别表现出与

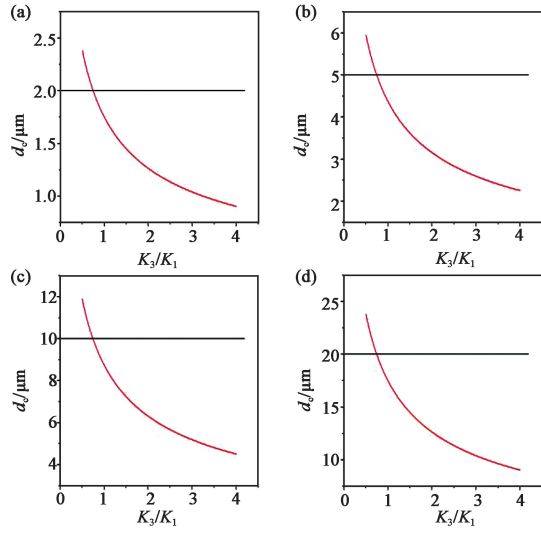


图 4 Δ 不同取值时 d_c 与 K_3/K_1 的关系。(a) $\Delta = 2 \mu\text{m}$; (b) $\Delta = 5 \mu\text{m}$; (c) $\Delta = 10 \mu\text{m}$; (d) $\Delta = 20 \mu\text{m}$ 。

Fig.4 Relationship between d_c and K_3/K_1 at different values of Δ . (a) $\Delta = 2 \mu\text{m}$; (b) $\Delta = 5 \mu\text{m}$; (c) $\Delta = 10 \mu\text{m}$; (d) $\Delta = 20 \mu\text{m}$ 。

K_2/K_1 值正相关,与 K_3/K_1 值负相关,且 d_c 的值总是与 Δ 相近的。

理论上,当液晶处在液晶盒中时,液晶分子同时存在展曲、扭曲和弯曲 3 种形变,扭曲弹性常数 K_2 描述的就是液晶材料形成扭曲结构难易程度的一个参数,较低的 K_2 值说明该液晶材料更容易产生扭曲结构,对于使用了 K_2 值较大的液晶材料的液晶偏振光栅,当液晶盒厚度 d 改变时,扭曲形变将会更容易克服另外两种形变的约束,造成液晶分子取向不再平行于液晶盒上下表面,容易引起液晶分子排布上的缺陷,进而对液晶偏振光栅的性能产生负面影响,这与本研究分析得出的结果是一致的。

3.2 阈值电压

强锚定条件下,当液晶盒厚度 d 小于液晶偏振光栅临界盒厚 d_c 时,对其施加一个电场使得液晶盒两端电压恰好为阈值电压,此时在液晶盒中心即空间坐标 $z=0$ 处应有 $\theta_m=0$,将此条件代入式(5)得到:

$$\frac{\pi d}{2\Delta} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{K_1}{\alpha K_1 + (1-\alpha)(2K_3 - K_2) + \epsilon_0 \Delta \epsilon \left(\frac{V_{th}}{d} \right)^2 \left(\frac{\pi}{\Delta} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} d\beta, \quad (10)$$

将式(9)代入化简即可得到阈值电压 V_{th} 的表达式:

$$V_{th} = \pi \left(\frac{K_1}{\epsilon_0 \Delta \epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{d}{d_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

显然,液晶偏振光栅的阈值电压是一个由光栅周期 Δ 、弹性常数 K_1 、 K_2 、 K_3 、介电各向异性 $\Delta \epsilon$ 共同决定的参数,由于 V_{th} 的计算同时涉及液晶盒厚度和设计光栅周期的选取,在液晶偏振光栅的设计中,这两个参数都十分重要,为了同时将二者都纳入变量考虑,结合它们在式(11)中的位置,本文将固定一组液晶盒厚度与光栅周期的比值 d/Δ 来分别研究 V_{th} 与 K_2/K_1 、 K_3/K_1 以及 $\Delta \epsilon$ 的关系,由式(11)可知,这一比值的最大值只能为 1,否则会产生小于 0 的阈值电压。

图 5 和图 6 分别展示了 d/Δ 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 时 V_{th} 与 K_2/K_1 、 K_3/K_1 的关系。

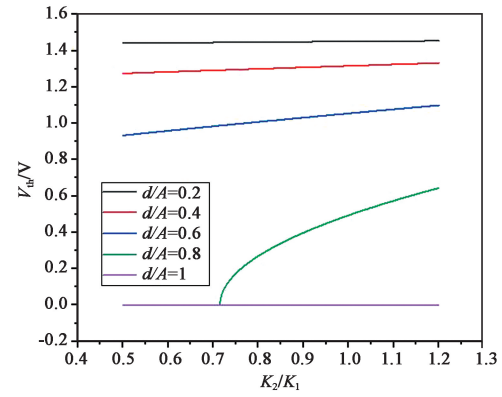


图 5 d/Δ 不同取值时 V_{th} 与 K_2/K_1 的关系

Fig.5 Relationship between V_{th} and K_2/K_1 when d/Δ is different

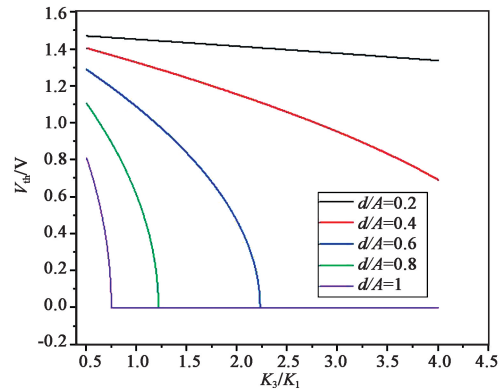


图 6 d/Δ 不同取值时 V_{th} 与 K_3/K_1 的关系

Fig.6 Relationship between V_{th} and K_3/K_1 when d/Δ is different

可以看出,在强锚定条件下,液晶偏振光栅的阈值电压 V_{th} 分别表现出与 K_2/K_1 正相关、与 K_3/K_1 负相关,这与 d_c 在 V_{th} 的表达式中所处的位置相符,同时,随着 d/Δ 越来越接近 1,这种相关性逐渐变强, V_{th} 的值也越来越趋于 0,这与随着液晶盒厚度增大,液晶分子越发地容易产生相对于液晶盒上下表面的倾斜角是相符的。

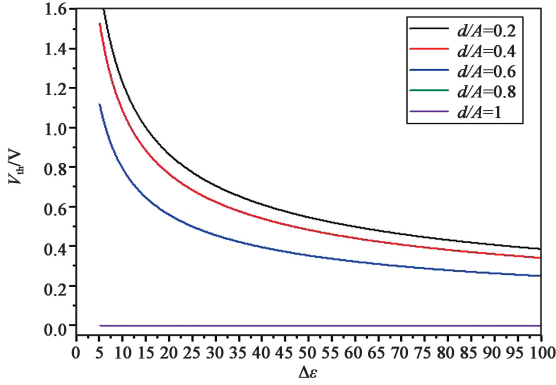


图 7 d/Δ 不同取值时 V_{th} 与 $\Delta\epsilon$ 的关系

Fig.7 Relationship between V_{th} and $\Delta\epsilon$ when d/Δ is different

图 7 展示了 d/Δ 为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 时, V_{th} 与 $\Delta\epsilon$ 的关系。其中, d/Δ 为 0.8 和 1 的曲线几乎在 0 处重合,可以看出,在强锚定条件下,液晶偏振光栅的阈值电压 V_{th} 表现出与 $\Delta\epsilon$ 的负相关性,且使得 V_{th} 有一个较大的可调范围。同样,随着液晶 d/Δ 的增大, V_{th} 的值也越来越趋于 0。

4 弱锚定条件下的计算

前文已经提到,在弱锚定条件下需要引入液晶材料的单一弹性常数近似,即将所使用液晶材料的展曲弹性常数 K_1 、扭曲弹性常数 K_2 和弯曲弹性常数 K_3 视为相等,在本节的计算中,同样考察 MLC-6080,当改变其中的某一项物性参数时,以 $K=K_1$ 作为单一弹性常数的值,且 α 取值为 0.4 保持不变。

4.1 临界盒厚

弱锚定条件下,把液晶偏振光栅的临界盒厚记作 d'_c ,使用与 3.1.1 小节中类似的化简过程即可得到其表达式:

$$d'_c = \Delta \left[1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K\pi}{W_p\Delta} \right) \right], \quad (12)$$

显然,液晶偏振光栅在弱锚定条件下的临界盒厚是一个由光栅周期 Δ 、弹性常数 K 和表面处液晶分子指向矢倾斜角上的锚定能 W_p 共同决定的参数。接下来,本文将固定一组光栅周期来研究此时临界盒厚与弹性常数的关系,这里令 $W_p = 10^{-5} \text{ J/m}^2$,这是一个弱锚定条件下的锚定能 ($< 10^{-4} \text{ J/m}^2$)。

图 8 展示了 Δ 分别为 2, 5, 10, 20 μm 时, d'_c 与 K 的关系,这里对 K 按照常见弹性常数值取值 [5, 50] pN,图中红色曲线体现的是 d'_c 的变化,并用黑色曲线在纵坐标上标注出了 Δ 值。

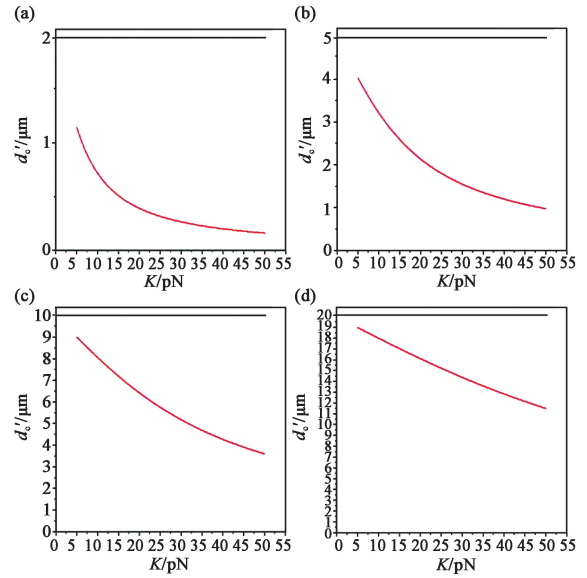


图 8 Δ 不同取值时 d'_c 与 K 的关系。(a) $\Delta = 2 \mu\text{m}$; (b) $\Delta = 5 \mu\text{m}$; (c) $\Delta = 10 \mu\text{m}$; (d) $\Delta = 20 \mu\text{m}$ 。

Fig.8 Relationship between d'_c and K at different values of Δ . (a) $\Delta = 2 \mu\text{m}$; (b) $\Delta = 5 \mu\text{m}$; (c) $\Delta = 10 \mu\text{m}$; (d) $\Delta = 20 \mu\text{m}$.

可以看出,在弱锚定条件下,液晶偏振光栅的临界盒厚 d'_c 在与光栅周期相近的基础上表现出与 K 的负相关性,且在相同条件下,临界盒厚要比强锚定时的小。

4.2 阈值电压

弱锚定条件下,把液晶偏振光栅的阈值电压记作 V'_{th} ,使用与 3.1.1 小节中类似的化简过程即可得到其表达式:

$$V'_{th} = \pi \sqrt{\frac{K}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \left[\left(1 - \frac{2}{\pi} \beta_0 \right)^2 - \left(\frac{d}{\Delta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

其中:

$$\tan\beta_0 = \frac{K}{W_p} \left[\frac{(V'_{th})^2 \epsilon_0 \Delta\epsilon}{d^2 K} + \left(\frac{\pi}{\Lambda} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

因为 β_0 的取值与强锚定条件下的阈值电压 V_{th} 有关,需要将以上两式以强锚定为初始条件迭代求解才可以得到在特定 W_p 时的阈值电压。

显然, V_{th}' 是一个由 Λ 、 K 和 W_p 共同决定的参数,图 9 展示了 d/Λ 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 时, V_{th}' 与 K 的关系,这里同样令 $W_p = 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 。其中 d/Λ 为 0.8 和 1 的曲线几乎在 0 处重合,可以看出,在弱锚定条件下,液晶偏振光栅的阈值电压 V_{th}' 仅在 d/Λ 较大时表现出与 K 有较强的负相关性,同时,随着 d/Λ 的增大, V_{th}' 的值也越来越趋于 0,这与强锚定时情况是相似的。

图 10 展示了 d/Λ 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 时, V_{th}' 与 $\Delta\epsilon$ 的关系。其中, d/Λ 为 0.6、0.8 和

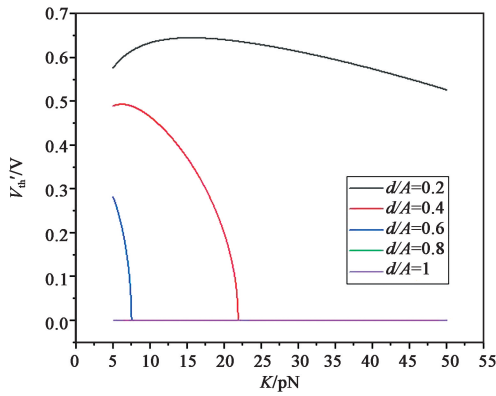


图 9 d/Λ 不同取值时 V_{th}' 与 K 的关系

Fig.9 Relationship between V_{th}' and K when d/Λ is different

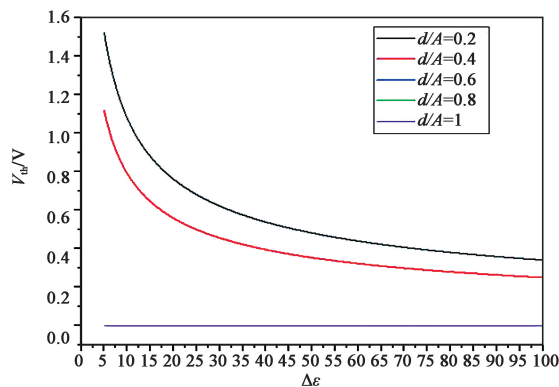


图 10 d/Λ 不同取值时 V_{th}' 与 $\Delta\epsilon$ 的关系

Fig.10 Relationship between V_{th}' and $\Delta\epsilon$ when d/Λ is different

1 的曲线几乎完全重合,可以看出,在弱锚定条件下, V_{th}' 表现出与 $\Delta\epsilon$ 负相关,与强锚定时的趋势是相似的。同样,随着液晶盒厚度、光栅周期比值的增大, V_{th}' 的值也越来越趋于 0。总体来看,在相同条件下无论改变任意一个物性参数,弱锚定时的阈值电压都要比强锚定时的要小。

4.3 弱锚定条件与强锚定条件的对比

将 4.1 节和 4.2 节的结果与强锚定条件下的结果进行对比可见,液晶偏振光栅的临界盒厚和阈值电压在强、弱锚定下受到物性参数的影响存在相似性,在这一小节,以 W_p 为自变量,研究锚定能增大的过程中,强、弱两种锚定条件下推导出的表达式的关系。

保持其他条件不变,固定液晶盒厚度 $d = 2 \mu\text{m}$,使强锚定下的液晶偏振光栅临界盒厚和阈值电压为定值,而弱锚定下的液晶偏振光栅临界盒厚和阈值电压为 W_p 的函数,随着 W_p 取值从一个几乎无法提供锚定作用的锚定能 (10^{-7} J/m^2) 到可以提供强锚定作用的锚定能 (10^{-3} J/m^2),对于 d/Λ 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 时, d'_c/d_c 关于 W_p 的规律如图 11 所示。

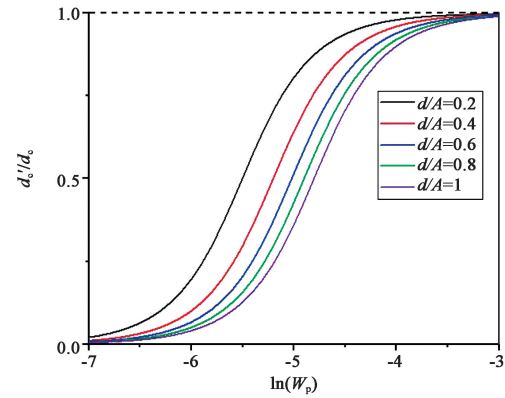


图 11 d/Λ 不同取值时 d'_c/d_c 与 W_p 的关系

Fig.11 Relationship between d'_c/d_c and W_p when d/Λ is different

由于当 d/Λ 为 1 时 $V_{th} = 0$, V_{th}'/V_{th} 没有意义,所以对于 d/Λ 分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 做出 V_{th}'/V_{th} 关于 W_p 的图像如图 12 所示。可以看出,随着 W_p 的增加, d'_c/d_c 和 V_{th}'/V_{th} 逐渐增大,且 d/Λ 越小,增大速度越快,并在锚定强度接近强锚定条件后都趋于 1,即当锚定能足够大时,这两个表达式与强锚定条件下的表达式是接近等价的,该结论进一步证明了模型在两种

锚定条件下的一致性。

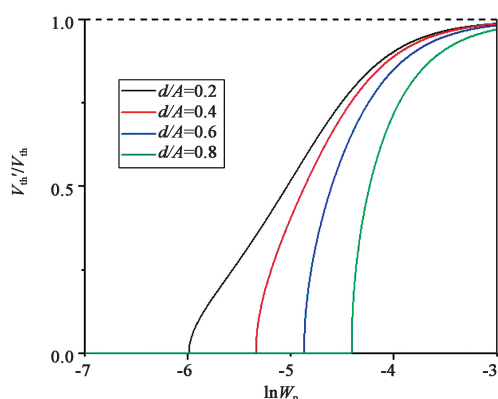


图 12 d/Λ 不同取值时 V_{th}'/V_{th} 与 W_p 的关系

Fig.12 Relationship between V_{th}'/V_{th} and W_p when d/Λ is different

5 结 论

本研究借助 Komanduri 所构建的液晶偏振光栅弹性连续体模型^[20],对强锚定、弱锚定两种条件具有不同盒厚与光栅周期的液晶偏振光栅的两个基础性能,即临界盒厚和阈值电压与液晶材料物性参数如弹性常数、介电常数等的关系进行分析和对比。以下是对上文分析结果的一个小结,希望对液晶偏振光栅制备过程中的液晶物性参数选择给出一定的理论参考依据。

临界盒厚:在制备液晶偏振光栅时,尤其是小周期的液晶偏振光栅,一般期望其有足够大的临界盒厚,若使用的是可以提供强锚定条件的光取

向材料,则选取值 K_2/K_1 较大、 K_3/K_1 值较小的液晶材料,可以在相同条件下获得更大临界盒厚;若使用的是仅能提供弱锚定条件的光取向材料,则应选取 K 较小的液晶材料可以在相同条件下获得更大临界盒厚;在其他条件都相同的情况下,使用能提供强锚定条件的光取向材料可以获得更大的临界盒厚。

阈值电压:与临界盒厚不同,不同的应用场景对阈值电压有不同的要求,若使用的是可以提供强锚定条件的光取向材料,当需要液晶偏振光栅有一个较大的阈值电压时,可以考虑使用 K_2/K_1 值较大、 K_3/K_1 、 $\Delta\epsilon$ 值较小的液晶材料,而当需要液晶偏振光栅有一个较小的阈值电压时,可以考虑使用 K_2/K_1 值较小、 K_3/K_1 、 $\Delta\epsilon$ 值较大的液晶材料,且当液晶盒厚度与光栅周期比值越接近 1,对阈值电压的调整效果越好;若使用的是仅能提供弱锚定条件的光取向材料,当需要液晶偏振光栅有一个较大的阈值电压时,可以考虑使用 $\Delta\epsilon$ 值较小的液晶材料,而当需要液晶偏振光栅有一个较小的阈值电压时,可以考虑使用 $\Delta\epsilon$ 值较大的液晶材料,特别是当弱锚定条件下液晶盒厚度、光栅周期比值较大时,阈值电压和 K 有较强的负相关性。

虽然以上分析解释了液晶偏振光栅的两个基础性能参数与液晶材料物性参数的关系,但是液晶偏振光栅还有许多其他的性能参数尚存在未解决的问题,如光栅响应时间等。在未来的研究中若要对其进行分析,则要将更多的液晶物性参数纳入模型中进行考虑,并对液晶偏振光栅的弹性连续体模型做进一步的优化。

参 考 文 献:

- [1] WAGH A G, RAKHECHA V C. Density operator description of geometric phenomena in the ray space [J]. *Pramana*, 2001, 56(2/3): 305-319.
- [2] BLIOKH K Y, RODRIGUEZ-FORTUÑO F J, Nori F, *et al.* Spin-orbit interactions of light [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(12): 796-808.
- [3] CHEN P, WEI B Y, HU W, *et al.* Liquid-crystal-mediated geometric phase: from transmissive to broadband reflective planar optics [J]. *Advanced Materials*, 2019, 32(27): 1903665.
- [4] 翟冬. 基板表面材料与液晶分子相互作用关系的量子化学定量研究[D]. 天津:河北工业大学,2011.
ZHAI D. The quantum chemical study on intermolecular interaction of liquid crystal and surface material [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [5] 李松振. 液晶偏振光栅的设计及其光偏转特性研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2019.
LI S Z. Design of liquid crystal polarization grating and study of its beam deflection characteristics [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

- [6] YAMAGUCHI M, YAMAMOTO T, YUKIMATSU K, *et al.* Digital free-space photonic switch structure using exciton absorption reflection switch (EARS) arrays [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(10): 1203-1206.
- [7] KOMANDURI R K, LAWLER K F, ESCUTI M J. A high throughput liquid crystal light shutter for unpolarized light using polymer polarization gratings [C]//*Proceedings of the SPIE 8052, Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXV*. Orlando: SPIE, 2011.
- [8] IKEDA T, TSUTSUMI O. Optical switching and image storage by means of azobenzene liquid-crystal films [J]. *Science*, 1995, 268(5219): 1873-1875.
- [9] BROER D J. Molecular architectures in thin plastic films by *in-situ* photopolymerization of reactive liquid crystals [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 1995, 3(4): 185-189.
- [10] CRAWFORD G P, EAKIN J N, RADCLIFFE M D, *et al.* Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(12): 123102.
- [11] 刘春杰. 主动式液晶偏振光栅的制备研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
LIU C J. The study on the fabrication of active liquid crystal polarization grating [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [12] BUCK J, SERATI S, HOSTING L, *et al.* Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications [C]//*Proceedings of the SPIE 8395, Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXVI*. Baltimore: SPIE, 2012.
- [13] 王佳, 俞信. 自由空间光通信技术的研究现状和发展方向综述[J]. *光学技术*, 2005, 31(2): 259-262, 265.
WANG J, YU X. Free-space optical communication's current situation and development trend [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 259-262, 265. (in Chinese)
- [14] 刘春杰, 彭增辉, 李松振, 等. 非等光强正交圆偏振光对液晶偏振光栅衍射特性的影响[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(2): 144-149.
LIU C J, PENG Z H, LI S Z, *et al.* Diffraction properties of liquid crystal polarization gratings with orthogonal circular polarization and different intensities waves [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2018, 33(2): 144-149. (in Chinese)
- [15] PROVENZANO C, PAGLIUSI P, CIPPARRONE G. Highly efficient liquid crystal based diffraction grating induced by polarization holograms at the aligning surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(12): 121105.
- [16] OH C, ESCUTI M J. Achromatic diffraction from polarization gratings with high efficiency [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(20): 2287-2289.
- [17] OH C, ESCUTI M J. Achromatic polarization gratings as highly efficient thin-film polarizing beamsplitters for broadband light [C]//*Proceedings of the SPIE 6682, Polarization Science and Remote Sensing III*. San Diego: SPIE, 2007.
- [18] OH C, ESCUTI M J. Time-domain analysis of periodic anisotropic media at oblique incidence; an efficient FDTD implementation [J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11870-11884.
- [19] OH C, ESCUTI M J. Numerical analysis of polarization gratings using the finite-difference time-domain method [J]. *Physical Review A*, 2007, 76(4): 043815.
- [20] KOMANDURI R K, ESCUTI M J. Elastic continuum analysis of the liquid crystal polarization grating [J]. *Physical Review E*, 2007, 76(2): 021701.
- [21] 谢毓章. 液晶物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
XIE Y Z. *Liquid Crystal Physics* [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)
- [22] YEH P. Optics of liquid crystal displays [C]//*Proceedings of 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim*. Seoul: IEEE, 2007.
- [23] STEWART I W. *The Static and Dynamic Continuum Theory of Liquid Crystals: A Mathematical Introduction* [M]. London: Taylor & Francis, 2004.
- [24] SLUSSARENKO S, ALBERUCCI A, JISHA C P, *et al.* Guiding light via geometric phases [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(9): 571-575.

- [25] 孙睿鹏, 黄锡珉. 向列液晶的表面锚定能[J]. 液晶通讯, 1993, 1(2): 1-13.
SUN R P, Huang X M. Surface anchoring energy of nematic liquid crystals [J]. *Chinese Letter of Liquid Crystal*, 1993, 1(2): 1-13. (in Chinese)
- [26] 王新久. 液晶光学和液晶显示[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
WANG X J. *Liquid Crystal Optics and Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [27] 邹朋飞, 魏冰妍, 杨淑蕾, 等. 光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展[J]. 液晶与显示, 2017, 32(6): 411-423.
ZOU P F, WEI B Y, YANG S L, *et al.* Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal nondisplay field [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 411-423. (in Chinese)
- [28] ICHIMURA K, SUZUKI Y, SEKI T, *et al.* Reversible change in alignment mode of nematic liquid crystals regulated photochemically by command surfaces modified with an azobenzene monolayer [J]. *Langmuir*, 1988, 4(5): 1214-1216.
- [29] ICHIMURA K. Photoalignment of liquid-crystal systems [J]. *Chemical Reviews*, 2000, 100(5): 1847-1873.
- [30] SCHADT M, SCHMITT K, KOZINKOV V, *et al.* Surface-induced parallel alignment of liquid crystals by linearly polymerized photopolymers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31(7): 2155-2164.
- [31] YAROSHCHUK O, REZNIKOV Y. Photoalignment of liquid crystals: basics and current trends [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(2): 286-300.
- [32] AKIYAMA H, KAWARA T, TAKADA H, *et al.* Synthesis and properties of azo dye aligning layers for liquid crystal cells [J]. *Liquid Crystals*, 2002, 29(10): 1321-1327.
- [33] 陈鹏. 基于光控液晶畴结构产生和检测涡旋光[D]. 南京: 南京大学, 2019.
CHEN P. Photo-induced liquid crystal domains for the generation and detection of optical vortex [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese)
- [34] 张俊瑞. 向列相液晶光控取向技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006.
ZHANG J R. The studies of photoalignment technology for nematic liquid crystal [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [35] LEE Y J, BAEK J H, KIM Y, *et al.* Enhanced surface anchoring energy for the photo-alignment layer with reactive mesogens for fast response time of liquid crystal displays [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(14): 145305.
- [36] KIMURA M, NAKATA S, MAKITA Y, *et al.* Strong liquid crystal anchoring on photo-alignment copolymer films containing ω -(4-chalconyloxy)alkyl side groups [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(4A): L352-L354.
- [37] SAKAMOTO M J P R D. Alignment technology and applications of liquid crystal devices [J]. *Physical Review D*, 2005, 74(1): 251-255.
- [38] ESCUTI M J, JONES W M. A polarization-independent liquid crystal spatial light modulator [C]//*Proceedings of the SPIE* 6332, *Liquid Crystals X*. San Diego: SPIE, 2006.
- [39] ESCUTI M J, JONES W M. Polarization-independent switching with high contrast from a liquid crystal polarization grating [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2006, 37(1): 1443-1446.
- [40] KOMANDURI R K, JONES W M, OH C, *et al.* Polarization-independent modulation for projection displays using small-period LC polarization gratings [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15(8): 589-594.
- [41] ZHAO W, WU C X, IWAMOTO M. Weak boundary anchoring, twisted nematic effect, and homeotropic to twisted-planar transition [J]. *Physical Review E*, 2002, 65(3): 031709.
- [42] CARR E F, HOAR E A, MacDonald W T. Influence of electric fields on the NMR spectra of the liquid crystal *p*-(Anisalamino)-phenyl acetate [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1968, 48(6): 2822-2823.
- [43] KLASSEN M, BREMER M, GÖTZ A, *et al.* Calculation of optical and dielectric anisotropy of nematic liquid crystals [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, 37(8A): L945-L948.
- [44] 赵哲彦. 基于液晶材料的电磁超材料机理及功能性器件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

- ZHAO Y Z. Research on mechanism of electromagnetic metamaterials and functional devices based on liquid crystals [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [45] THISAYUKTA J, SHIRAKI H, SAKAI Y, *et al.* Dielectric properties of frequency modulation twisted nematic LCDs doped with silver nanoparticles [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(8A): 5430-5434.
- [46] 范志新. 液晶器件工艺基础[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2000.
FAN Z X. *Liquid Crystal Device Process Foundation* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2000. (in Chinese)
- [47] 张慧敏. 液晶分子结构对聚合物分散液晶电光性能影响规律的研究[D]. 北京:北京科技大学,2019.
ZHANG H M. Study on effects of the mesogenic structures on the electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystal films [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019. (in Chinese)
- [48] 费运丰. 向列相液晶中强非局域空间光孤子[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
FEI Y F. Strong nonlocal spatial optical solitons in nematic liquid crystals [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

作者简介:



陈雨诺(1998—),男,福建福州人,硕士研究生,2020 年于厦门大学获得学士学位,主要从事液晶光栅器件的研究。
E-mail: ynchen@stu.xmu.edu.cn



陈鹭剑(1980—),男,福建厦门人,博士,教授,2007 年于浙江大学获得博士学位,主要从事液晶光子学、微流控技术和有机无机杂化光学材料方面的研究。E-mail: lujianchen@xmu.edu.cn