文章编号：1007-2780(2026)08-1086-08

基于评估因子反演的扭曲液晶聚合物螺距与厚度的同步测量方法

查正桃[1,2,3]，勾正阳[1,2,3]，刘子豪[1,2,3]，穆全全[1,3]，彭增辉[1,3]，王启东[1,3*]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院大学 材料科学与光电工程中心，北京 100049；
3. 光学系统先进制造全国重点实验室，吉林 长春 130033)

摘要：针对传统测量方法无法准确反映固化后扭曲液晶聚合物(liquid crystal polymer，LCP)薄膜的真实螺距，且往往需要破坏样品或预先获知薄膜厚度的技术难题，本文开展了面向固化态扭曲LCP薄膜的螺距、厚度及手性剂螺旋扭曲力(Helical twisting power，HTP)的同步测量研究。通过搭建简易光学装置获取实验相对透过率曲线，并遍历器件参数获得理论相对透过率曲线簇，进而引入变化趋势、振荡程度的双评估因子，反演出与实验曲线重合度最高的螺距与厚度组合，据此计算HTP值。实验采用手性剂R5011(质量分数0.053 2%)和S5011(质量分数0.056 9%)分别掺杂同种LCP制备扭曲薄膜，反演得到螺距分别为12.4 μm和12.0 μm，厚度分别为4.4 μm和4.3 μm，HTP值分别为151.6 μm^{-1}和147.2 μm^{-1}，仿真与实验曲线在全反演波段内高度吻合，旋光仪法验证结果差异小于0.2 μm。该测量方法装置简单、非破坏、无需预先标定厚度，仅需单次光谱测量即可快速同步反演螺距和厚度，为扭曲LCP器件的精准设计、性能表征及手性剂HTP的准确测定提供了有效工具。

关　键　词：液晶；扭曲；螺距；聚合物薄膜
中图分类号：O753.2；O436.1　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3724/CJLCD.2026-0120　　**CSTR**：32172.14.CJLCD.2026-0120

收稿日期：2026-06-29；**修订日期**：2026-07-18.
基金项目：国家自然科学基金 (No. U2241224，No. U23A20355，No. 11974345)；中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新项目
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U2241224，No. U23A20355，No. 11974345)；Innovation Project of the Changchun Institute of Optics，Fine Mechanics and Physics，Chinese Academy of Sciences

*通信联系人，E-mail：qdwang@ciomp.ac.cn

Simultaneous measurement of pitch and thickness in twisted liquid crystal polymer based on evaluation factor inversion

ZHA Zhengtao[1,2,3], GOU Zhengyang[1,2,3], LIU Zihao[1,2,3], MU Quanquan[1,3], PENG Zenghui[1,3], WANG Qidong[1,3*]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Center of Material Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: Conventional methods cannot accurately determine the true pitch of cured twisted LCP films and often require sample destruction or prior thickness knowledge. To address this, we propose a method to simultaneously measure pitch and thickness of the LCP film, as well as helical twisting power(HTP) of its chiral dopant. First, we built a simple optical setup to obtain the experimental relative transmittance spectra, and generated theoretical curves by sweeping device parameters. Trend of variation and oscillation extent evaluation factors were introduced to retrieve the best-matching pitch-thickness combination via inversion and subsequently calculate the HTP. Twisted LCP films were prepared by doping the same LCP host with R5011(mass fraction 0.053 2%) and S5011(mass fraction 0.056 9%). The retrieved pitches were 12.4 and 12.0 μm, thicknesses were 4.4 and 4.3 μm, and HTPs were 151.6 and 147.2 μm^{-1}, respectively. Simulated and experimental transmittance curves exhibited excellently consistency over the full inversion range. Polarimetry verification gave a discrepancy in the pitch of <0.2 μm. This method features a simple, non-destructive setup and enables rapid simultaneous inversion of pitch and thickness from a single spectrum, without prior thickness calibration. Thus, our method offers an effective tool for precise design and characterization of twisted LCP devices and accurate determination of HTP for the chiral dopants.

Key words: liquid crystal; twist; pitch; polymer film

1　引　　言

液晶聚合物(liquid crystal polymer, LCP)兼具液晶的各向异性与聚合物的力学稳定性和化学耐受性。通过多层图案化设计，LCP能够实现对光传播方向及偏振态的空间调制，因而在光学薄膜、微纳光子器件等领域展现出显著的应用潜力[1-2]。例如，基于LCP制备的偏振光栅已用于激光雷达、空间通信等非机械式光束调控场景[3-7]；基于LCP的偏振体光栅在增强现实、虚拟现实等领域也崭露头角[8-13]。近年来，传统LCP器件逐渐难以满足大视场与宽波段的应用需求，引入特殊扭曲结构是目前最常用且有效的途径[14-16]。在该类技术中，LCP通过掺杂手性剂所获得的螺距显著影响器件的性能，其制备偏差直接决定器件拓宽波段及视角的能力。具体而言，螺距由手性剂的浓度、纯度及其螺旋扭曲力(helical twisting power, HTP)共同决定，即实际制备扭曲LCP器件时必须提供手性剂在当前宿主液晶中的HTP值。然而，同一种手性剂在不同宿主材料中的HTP可能存在明显差异[17-18]。例如，R5011在液晶E44中的HTP为107.5 μm^{-1}[19]，而在液晶BL038 (Merck)中的HTP为150 μm^{-1}[20]。这一现象表明，在扭曲LCP器件的实际制备中若更换宿主液晶则通常需要重新测定手性剂的HTP值。因此，如何通过单次测量螺距来获取手性剂

在该体系下的HTP值对其器件设计、制备及性能表征具有重要意义。

扭曲LCP薄膜的制备涉及溶液涂布、溶剂挥发、紫外固化等工艺步骤[14]。当手性剂掺入LCP时，其HTP值会受到溶剂极性、挥发性等因素的显著影响[21]。这意味着只有当溶剂完全挥发并完成固化后，聚合物网络的锚定效应、残余应力等对螺距的真实影响才能得以准确反映。传统基于液晶盒的测量方法（如Grandjean-Cano法[22-23]）测得的螺距与固化态扭曲LCP的实际螺距存在系统性偏差，原因在于其适用对象为液态或含溶剂的未固化液晶。椭偏仪法[24]通过测量LCP薄膜透射光或反射光的偏振度来反演螺距，但由于衬底的不均匀性和法布里-珀罗效应的影响，其结果准确性难以保证，而且还需进行复杂的光学模型拟合。旋光仪法[25]通过测量透射光偏振椭圆主轴与起偏器之间的夹角来反演螺距，然而该方法须预先获知扭曲LCP薄膜的厚度。扫描电子显微镜法[24]可直接测量扭曲LCP薄膜侧面的纹理间距，但其螺距测量通常需要破坏待测样品。陈琎[26]等人提出了一种基于琼斯矩阵的液晶偏振光栅扭曲角及厚度的测量方法，该方法需要配置不同浓度但厚度相等的一系列扭曲LCP薄膜，但受工艺的制约，薄膜的厚度难以保持一致。因此，本文提出一种能够直接面向扭曲LCP薄膜螺距与厚度的非破坏性测量方法，仅需单个薄膜、单次测量即能快速反演出螺距、厚度，同时能确定手性剂在当前宿主LCP中的HTP，从而解决传统测量方法无法有效适用于固化态扭曲LCP薄膜的技术难题。

本文首先基于光波在垂直入射条件下依次通过起偏器、扭曲LCP薄膜及检偏器的透过率公式进一步定义了依赖于器件参数的相对透过率，以尽可能规避光谱仪褪偏性、衬底折射率等因素对测量所带来的影响。随后，基于相对透过率随波长的变化趋势及其振荡程度均强烈依赖于螺距和厚度的事实，遍历参数得到理论上的相对透过率曲线簇，进而筛选出其中与实验采集到的相对透过率曲线重合度最高的一组螺距和厚度，也就是所需测量的扭曲LCP薄膜的器件参数。为此，这里引入了基于趋势评估因子、振荡评估因子的双重反演策略，以量化器件参数对透过率光谱曲线所产生的影响，进而准确地反演出扭曲LCP薄膜的螺距、厚度，同时确定手性剂在当前宿主LCP中的HTP值。最后，通过制备分别掺杂R5011和S5011的扭曲LCP薄膜并完成光谱曲线测量、数据处理及螺距反演等操作，验证了本文所提出的基于评估因子反演的方法在扭曲LCP薄膜螺距与厚度测量方面的有效性。

2 测量装置及原理

测量装置如图1所示。垂直入射光为白光宽谱光源，待测样品放置在两个正交的宽波段偏振片之间，其中扭曲LCP薄膜前表面液晶分子的主轴方向平行于起偏器的透光轴。当不存在待测样品时，宽波段检偏器没有光透过；而当放置待测样品后，因扭曲LCP薄膜所产生的偏振调制作用使得宽波段检偏器存在透射光，且具有色散特性。因此，可以基于透射光谱实现扭曲LCP薄膜螺距与厚度的测量。同时，为能更有效地利用螺距与手性剂的质量分数w成反比的特性[17]，这里考虑LCP中手性剂的掺杂浓度较低（即螺距P远大于波长λ）的情形[26]。基于此，宽波段检偏器的归一化透射率可以表达为[27]：

$$T=\sin^2\Phi+\frac{\Phi^2}{\chi^2}\cos(2\Phi)\sin^2\chi-\frac{\Phi}{2\chi}\sin(2\Phi)\sin 2\chi\,, \tag{1}$$

式中：$\chi=\sqrt{\Phi^2+\left[\pi\Delta n(\lambda)d/\lambda\right]^2}$为等效延迟角，$\Phi=2\pi d/P$表示扭曲角，$d$为扭曲LCP薄膜的厚度，$\Delta n(\lambda)$为扭曲LCP薄膜中液晶的双折射率色散。进一步地，为尽可能规避光谱仪褪偏性、衬底折射率等因素对测量所带来的影响，这里考虑使用相对透过率，其定义为当前器件参数下的透过率与其最大值之比，即

$$T_{\mathrm{r}}(\lambda)=\frac{T(\lambda)}{\max\left[T(\lambda)\right]}\,. \tag{2}$$

根据式(2)可知，扭曲LCP薄膜的厚度与螺距存在无法避免的耦合问题，即当厚度未知时，仅凭式(2)以及实验所获得的透过率曲线无法直接确定螺距。然而，根据式(1)和式(2)可知，相对透过率随工作波长的变化趋势强烈依赖于厚度与螺距参数，因此，可以根据式(1)和式(2)遍

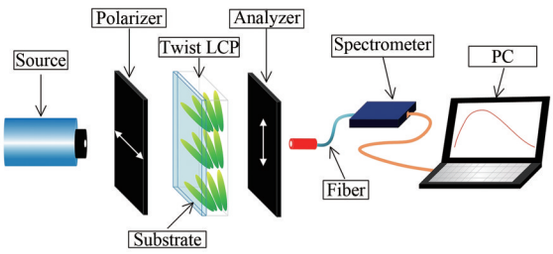


图 1　扭曲 LCP 薄膜螺距与厚度测量装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of measurement setup for pitch and thickness of twisted LCP film

历器件参数来得到一系列相对透过率仿真曲线。然后，逐一判定计算得到的相对透过率曲线与实验采集到的光谱曲线的重合程度。理论上，重合程度最高的那条仿真曲线所对应的螺距与厚度就是所需测量的扭曲 LCP 薄膜的器件参数。具体实现原理和方法如下：

为了快速得到真实器件参数所位于的反演范围，首先需要判定仿真相对透射率曲线与实验相对透过率曲线随波长变化趋势的相似程度，并设置合理的相似程度下限阈值，筛选出扭曲 LCP 薄膜的真实器件参数所位于的候选范围。鉴于相对透过率曲线可能存在非单调行为，本文基于皮尔逊相关系数[28]构建可评估仿真曲线与实验相对透过率曲线之间变化趋势相似程度的因子，即

$$F(P,d)=\max\left\{\frac{\mathrm{CoV}\left[T_{\mathrm{r}}(\lambda),T_{\mathrm{r}}^{\exp}(\lambda)\right]}{\sigma\left[T_{\mathrm{r}}(\lambda)\right]\cdot\sigma\left[T_{\mathrm{r}}^{\exp}(\lambda)\right]},0\right\},\tag{3}$$

式中，$T_r^{\exp}(\lambda)$为实验相对透过率曲线，均方差和协方差的表达式分别如式(4)和式(5)所示：

$$\sigma\left[y(x)\right]=\sqrt{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}}\left[y(x)-\bar{y}\right]^2\mathrm{d}x},\tag{4}$$

$$\mathrm{CoV}\left[y_1(x),y_2(x)\right]=\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}}\left[y_1(x)-\bar{y}_1\right]\left[y_2(x)-\bar{y}_2\right]\mathrm{d}x,\tag{5}$$

其中，$\lambda_{\min}$、$\lambda_{\max}$分别表示反演波长的下限以及上限。这里趋势评估因子F的范围介于0～1，值越大代表两条曲线的变化趋势越相似。由于相对透过率曲线的固有属性，不同的器件参数下可能具有高度相似的变化趋势，这意味着仅凭趋势评估因子难以唯一确定扭曲 LCP 薄膜的器件参数。因此，可以考虑设定曲线相似程度的下限阈值F_0来筛选出所有满足$F\geqslant F_0$的器件参数组合，从而得到扭曲 LCP 薄膜实际器件参数的候选范围Ω。应当说明的是，F_0的值并不唯一，可根据实际情况调整，但通常不低于0.9。

对于由趋势评估因子筛选出的那些对应于不同器件参数的仿真相对透过率曲线而言，即使它们随工作波长的变化趋势具有较高的相似度，但它们随波长的起伏程度却存在明显的差异。这意味着基于由趋势评估因子筛选出的器件参数候选范围Ω，可以通过判定仿真相对透过率曲线与实验相对透过率曲线随波长起伏的差异性来准确反演出扭曲 LCP 薄膜的器件参数。因此，这里定义振荡程度评估因子来量化仿真相对透过率曲线与实验相对透过率曲线随光波长起伏程度的匹配度，即

$$O(P,d)=1-\min\left[\frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}}\left|T_{\mathrm{r}}(\lambda)-T_{\mathrm{r}}^{\exp}(\lambda)\right|\mathrm{d}\lambda}{\lambda_{\max}-\lambda_{\min}},1\right],(P,d)\in\Omega.\tag{6}$$

这里，振荡评估因子的范围介于0～1，其值越接近于1表示两条曲线重合程度越高。因此，所要测量的扭曲 LCP 的器件参数可以由式(7)确定：

$$\left(P_{\mathrm{optimal}},d_{\mathrm{optimal}}\right)=\left\{\max\left[O(P,d)\right]\right\}^{-1},\tag{7}$$

式中，$\{\cdot\}^{-1}$表示求反函数操作。此时，可得到手性剂在当前 LCP 中的 HTP 值为：

$$\mathrm{HTP}=\frac{1}{P_{\mathrm{optimal}}\cdot w\cdot r},\tag{8}$$

式中，r表示手性剂的纯度。因此，只要给定由实验采集到的相对透过率曲线，根据式(2)～式(8)即可准确地反演出扭曲 LCP 薄膜的螺距、厚度，同时确定手性剂在当前宿主 LCP 中的 HTP 值。

3　实验与讨论

扭曲 LCP 聚合物薄膜螺距与厚度的测量光路如图 2 所示。

宽谱光源为长寿命卤钨灯，输出波长覆盖范围 360～2 400 nm；光纤光谱仪的有效波长覆盖范围 190～1 100 nm；宽波段起偏器和检偏器均为线栅偏振片，有效工作波长范围为 420～900 nm（消光比接近 1 000∶1）；待测扭曲 LCP 薄膜中液晶的双折射率色散曲线采用柯西模型[29]预先测定，其表达式为$\Delta n(\lambda)=0.098\,9+7\,032/\lambda^2$，这里$\lambda$

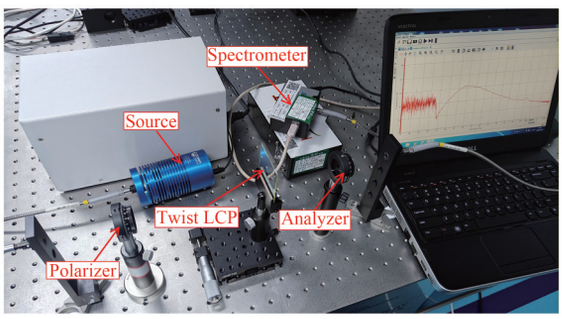


图 2 扭曲 LCP 薄膜螺距与厚度的测量光路

Fig. 2 Measurement optical path for pitch and thickness of twisted LCP polymer film

的单位为 nm；待测样品中手性剂采用 R5011，其质量分数为 0.053 2%，纯度为 99.92%。

首先，采集原始透过率光谱数据并结合正交偏振片、光谱仪的有效工作波段进行截取从而得到反演波段（420～850 nm）内的透射率数据，然后经去噪、平滑处理得到可用于反演的实验相对透过率曲线。此外，依据上述较低的质量分数以及经验可以推测此时的螺距应满足远大于反演波段上限（0.85 μm）的条件，因此，扭曲 LCP 薄膜螺距的反演范围可设置为 5～30 μm（该反演区间可依据不同手性剂及浓度等进行调整）。然后，根据经验设定 LCP 薄膜的反演厚度范围为 1～6 μm。应当补充的是，正如前文所述，本方法适用于螺距 P 远大于波长 λ 的情形，若手性剂浓度进一步降低，则进一步拓宽螺距反演区间的上限即可。此外，为确保评估因子具有更高的准确性，需要足够大的相位延迟使透过率光谱曲线出现峰值波长，而对于实验中的绝大多数螺距而言，要达到这一要求至少需要 2～3 μm 的薄膜厚度。因此，实际中可以根据实验透过率曲线的光谱特性来初步推测 LCP 薄膜厚度可能位于的区间，但无需进行任何精确标定，因为其作为未知参数参与螺距反演。反演结果如图 3 所示。

从图 3(a)可以看到，正如前述分析，趋势评估因子的高数值区域呈现出非常明显的带状，即不同器件参数所对应的相对透过率曲线之间可能存在相同的变化趋势，这意味着此时仅依赖变化趋势难以唯一确定扭曲 LCP 薄膜所具有的器件参数。但从图 3(b)可以看到，经过振荡评估因子的进一步过滤后，仿真相对透过率曲线与实验相对透过率曲线重合度高的器件参数范围变得

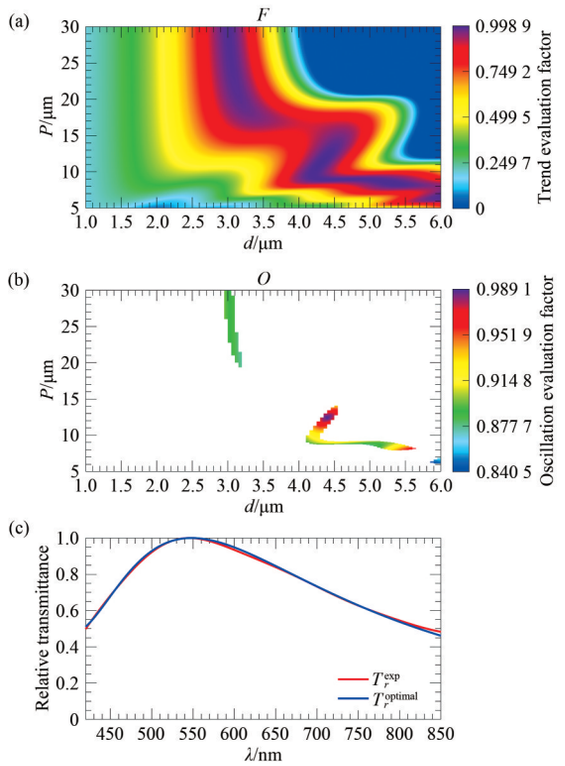


图 3 基于 R5011 手性剂的反演结果。(a)趋势评估因子和(b)振荡评估因子随反演器件参数的变化；(c)最佳反演参数所对应的仿真相对透过率曲线与实验相对透过率曲线的对比。

Fig. 3 Inversion results for the chiral dopant R5011. (a) Variation of the trend evaluation factor and (b) oscillation evaluation factor with the inverted device parameters; (c) Comparison between the simulated curve corresponding to the optimal inversion parameter and the experimental relative transmittance curve.

非常集中。图 3(a,b)的结果表明，所采集到的实验相对透过率光谱响应曲线的细节信息是较为正确和充分的，特别是 LCP 薄膜的厚度均匀性能满足测量要求。这是因为若制备的扭曲 LCP 薄膜的均匀性很差，则其透过率响应曲线中必定会含有明显不同厚度的信息，此时任何涉及厚度的手段都难以准确地反演其器件参数。当然，对于均匀性一般的扭曲 LCP 薄膜，可以在宽波段检偏器和耦合光纤之间添加光阑后再采集透过率曲线，从而有效提高反演结果的准确性。

进一步地，根据式(7)所确定的最佳器件参数为 $d_{optimal}$=4.4 μm，$P_{optimal}$=12.4 μm；根据式(8)可得 R5011 在当前这种 LCP 中的 HTP 值为

151.6 μm^{-1}。从图 3(c)可以看到，在整个反演波段内，最佳器件参数所对应的仿真相对透过率曲线随光波长的变化趋势、振荡程度以及峰值波长等信息均与实验相对透过率曲线具有非常好的一致性，表明上述反演得到的螺距、厚度具有较高的准确性。

此外，从图 3(b)还可以看到，只有当器件参数位于（($d_{optimal}$±0.1) μm，($P_{optimal}$±0.2) μm）区域内时，振荡评估因子才具有非常高且接近的值，这意味着基于趋势评估因子、振荡评估因子的双重验证策略，可以将扭曲 LCP 薄膜的厚度候选范围压缩至以 $d_{optimal}$ 为中心的一个相当窄（<0.2 μm）的区间。此时，还可以使用对菲涅耳效应并不敏感的旋光仪法[25]来锁定螺距，这是因为对于螺距值为 10 μm 左右的扭曲 LCP 薄膜而言，当利用旋光角度来反向确定螺距时，其对薄膜厚度在中心值附近的较小范围内（<0.2 μm）变化的敏感性并不高。当然，其适用前提是预先获知扭曲 LCP 薄膜的中心厚度。此外，对于该扭曲 LCP 薄膜还利用旋光仪法[25]多次测量取平均得到旋光角为 58.5°，此时基于上述所得到的器件厚度 $d_{optimal}$ 反演得到的螺距值为 12.55 μm，这与 $P_{optimal}$ 的偏差为 0.15 μm。上述结果验证了本文所提出的基于评估因子反演的扭曲 LCP 薄膜螺距、厚度的测量方法的有效性与准确性。

鉴于实际用于视角性能补偿的扭曲结构中通常涉及两种旋向相反的手性剂[14]，本文还对 S5011 在同种 LCP 中的螺距、厚度以及 HTP 进行了测量，其在所制备薄膜中的质量分数仍然低至 0.056 9%，纯度为 99.9%。因为手性剂的质量分数与 R5011 情形几乎相等，因此，完全可以遵循与 R5011 相同的测量以及反演步骤，结果如图 4 所示。

从图 4(a～c)的结果可以看到，对基于掺杂 S5011 的 LCP 薄膜，趋势评估因子、振荡评估因子随反演器件参数的分布情况与掺杂 R5011 情形非常类似，表明评估因子反演法对具有不同手性剂的 LCP 薄膜都是适用的。此时，反演确定的最佳器件参数为 $d_{optimal}$=4.3 μm，$P_{optimal}$=12.0 μm，以及计算得到 S5011 在该 LCP 中的 HTP 值为 147.2 μm^{-1}。从图 4(c)可以看到，在整个反演波段范围内最佳器件参数所对应的仿真相对透过率曲线随光波长的变化趋势、振荡程度以及峰值波长等信息均与实验相对透过率曲线具有很好的一致性，这意味着上述反演得到的螺距、厚度以及 HTP 是比较准确的。同时，利用旋光仪法对该扭曲 LCP 薄膜进行多次测量并取平均，得到旋光角为 56.5°，此时基于上述所得到的器件厚度 $d_{optimal}$ 反演得到的螺距值为 12.17 μm，这与 $P_{optimal}$ 的差距<0.2 μm。该对比结果再次证明，本文所提出的基于评估因子反演的扭曲 LCP 薄膜螺距、厚度的测量方法是有效的。

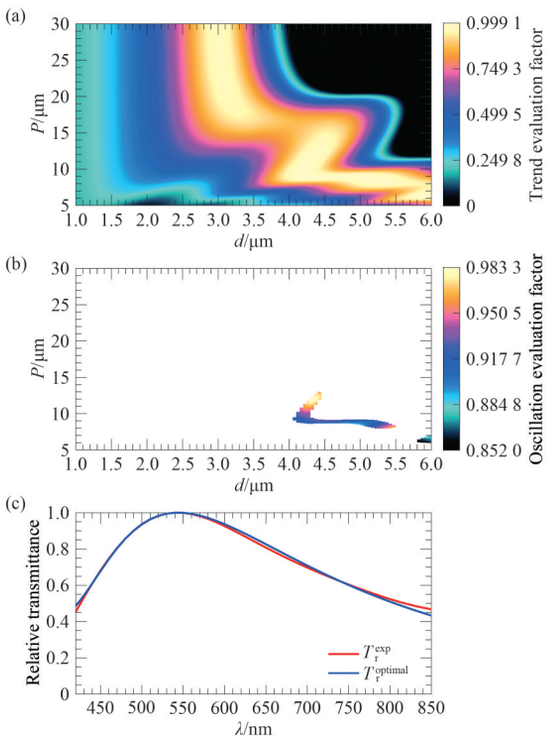


图 4　基于 S5011 手性剂的反演结果。(a)趋势评估因子和(b)振荡评估因子随反演器件参数的变化情况；(c)最佳反演参数所对应的仿真相对透过率曲线与实验相对透过率曲线的对比。

Fig. 4　Inversion results for the chiral dopant S5011. (a) Variation of the trend evaluation factor and (b) oscillation evaluation factor with the inverted device parameters; (c) Comparison between the simulated curve corresponding to the optimal inversion parameter and the experimental relative transmittance curve.

4　结　　论

针对传统测量方法无法有效适用于固化态

扭曲LCP薄膜的技术难题，本文提出一种基于评估因子反演的螺距与厚度新型测量方法。该方法通过仿真遍历器件参数实现理论透射谱与实验相对透过率曲线的最佳匹配，因此，该方法具有测量装置简单、快速以及非破坏性等优势，仅需要通过构建变化趋势和振荡程度的双评估因子即可反演确定与实验采集到的相对透过率曲线重合度最高的一组螺距和厚度，从而获取固化扭曲LCP薄膜的器件参数。实验选用两种常见手性剂R5011（质量分数0.053 2%，纯度为99.92%）和S5011（质量分数0.056 9%，纯度为99.9%）分别掺杂在同种LCP中制备扭曲薄膜。通过采集透过率曲线并执行上述反演步骤得到R5011样品的螺距、厚度以及HTP分别为12.4 μm、4.4 μm以及151.6 μm^{-1}；S5011样品的螺距、厚度以及HTP分别为12.0 μm、4.3 μm以及147.2 μm^{-1}。研究结果显示，以上由双评估因子确定的器件参数所对应的仿真曲线与实验曲线在整个反演波段内的变化趋势、振荡程度以及峰值波长均具有良好的一致性。同时，本文采用旋光仪法对S5011样品进行测量得到其旋光角为56.5°，并基于上述厚度参数反演得到螺距值为12.17 μm。测试结果充分证实了本文所提出的基于评估因子反演的方法在固化态扭曲LCP薄膜螺距与厚度测量方面的有效性，可为扭曲LCP器件的精准设计与制备提供有力工具。

参 考 文 献：

[1] XU Y Y, JIN M S, WANG J Y, *et al*. Modulating the macroscopic anisotropy of liquid crystalline polymers by polarized light [J]. *Responsive Materials*, 2024, 2(4): e20240020.

[2] GRIDYAKINA A, KASIAN N, CHYCHŁOWSKI M S, *et al*. Advances in multicomponent systems: liquid crystal/nanoparticles/polymer [J]. *Materials Today Physics*, 2023, 38: 101258.

[3] HOY C, STOCKLEY J, SHANE J, *et al*. Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review [J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 361.

[4] ZHA Z T, GOU Z Y, PENG Z H, *et al*. Research on energy transfer characteristics for liquid crystal polarization gratings under conical incidence [J]. *Optics Express*, 2025, 33(15): 32479-32489.

[5] ZHA Z T, GOU Z Y, PENG Z H, *et al*. Research on energy compensation characteristics of beam deflection structure based on liquid crystal polarization grating [J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 127(20): 201102.

[6] 陈琎，杨程亮，穆全全，等. 基于琼斯矩阵的液晶偏振光栅扭曲角及厚度的测量方法[J]. 液晶与显示，2021，36(5)：656-662.
CHEN J, YANG C L, MU Q Q, *et al*. Method for measuring the twist angle and thickness of liquid crystal polarization grating based on Jones matrix [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(5): 656-662. (in Chinese)

[7] SEARCY P, MATSUMORI B A. MOCA technology and product update with analytical results [C]//*Proceedings of SPIE* 11993, *Free-Space Laser Communications* XXXIV. San Francisco: SPIE, 2022: 1199303.

[8] WENG Y S, ZHANG Y N, WANG W, *et al*. Liquid-crystal polarization volume gratings technology and its applications in diffractive optical waveguides systems for augmented reality [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2024, 30(2): 6200115.

[9] 钟梁志煌，陈全明，罗丹. 基于单层基板双面液晶偏振体光栅的大视场角光波导AR显示[J]. 液晶与显示，2026，41(2)：188-196.
ZHONG L Z H, CHEN Q M, LUO D. Wide-field-of-view AR waveguide display enabled by one substrate coated with double-sided polarization volume gratings [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2026, 41(2): 188-196. (in Chinese)

[10] FENG X Y. Liquid crystal polarization volume hologram for augmented reality applications [D]. Kent: Kent State University, 2021.

[11] ZHANG X Y, WANG J R, HAN Z Y, *et al*. Development of polarization volume hologram waveguide for augmented reality smart glasses [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2024, 55(1): 1163-1166.

[12] 韩彤彤，穆全全，彭增辉，等. 基于扭矩平衡的分时锚定能测量方法[J]. 液晶与显示，2024，39(5)：561-568.

HAN T T, MU Q Q, PENG Z H, *et al*. Measurement method of time-sharing anchoring energy based on torque balance [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 561-568. (in Chinese)

[13] HUANG Y G, LU L, DIORIO N, *et al*. Liquid crystal optics for AR/VR/MR near eye displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2023, 54(1): 857-860.

[14] HORNBURG K J, KOMANDURI R K, ESCUTI M J. Highly chromatic retardation via multi-twist liquid crystal films [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(5): D28-D33.

[15] TAN L, HO J Y, SRIVASTAVA A K, *et al*. A simplified model for the optimization of LC photonic elements [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(11): 1096-1099.

[16] XIANG X, KIM J, KOMANDURI R, *et al*. Nanoscale liquid crystal polymer Bragg polarization gratings [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19298-19308.

[17] SOHN H R O, LIU C D, SMALYUKH I I. Schools of skyrmions with electrically tunable elastic interactions [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4744.

[18] KASYANYUK D, SLYUSARENKO K, WEST J, *et al*. Formation of liquid-crystal cholesteric pitch in the centimeter range [J]. *Physical Review E*, 2014, 89(2): 022503.

[19] SHABAN H, WU P C, JIA Y F, *et al*. Overlooked ionic contribution of a chiral dopant in cholesteric liquid crystals [J]. *Materials*, 2024, 17(20): 5080.

[20] YU M N, JIANG Y F, SHIN Y, *et al*. Effect of biaxiality on chirality in chiral nematic liquid crystals [J]. *Soft Matter*, 2018, 14(31): 6530-6536.

[21] CELEBRE G, DE LUCA G, MAIORINO M, *et al*. Solute-solvent interactions and chiral induction in liquid crystals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(33): 11736-11744.

[22] AKAGI K. Helical polyacetylene: asymmetric polymerization in a chiral liquid-crystal field [J]. *Chemical Reviews*, 2009, 109(11): 5354-5401.

[23] WANG X, HE J L, WEI Q M, *et al*. Influence of molecular weight on helical twisting power of oligomer chiral dopants [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 339: 116816.

[24] KULKARNI C, DI NUZZO D, MEIJER E W, *et al*. Pitch and handedness of the cholesteric order in films of a chiral alternating fluorene copolymer [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2017, 121(51): 11520-11527.

[25] 李君，黄子强. 短螺距手性液晶热敏旋光特性的研究[J]. 液晶与显示，2015，30(1)：10-15.
LI J, HUANG Z Q. Thermal sensing optical rotatory characteristics of short pitch cholesteric liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 10-15. (in Chinese)

[26] HU W, ZHAO H Y, SONG L, *et al*. Electrically controllable selective reflection of chiral nematic liquid crystal/chiral ionic liquid composites [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(4): 468-472.

[27] 杨登科，吴诗聪. 液晶器件基础[M]. 郭太良，周雄图，译. 2版. 北京：科学出版社，2016.
YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. GUO T L, ZHOU X T, trans. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)

[28] LIU Y Q, MU Y, CHEN K Y, *et al*. Daily activity feature selection in smart homes based on pearson correlation coefficient [J]. *Neural Processing Letters*, 2020, 51(2): 1771-1787.

[29] LI J, WU S T, BRUGIONI S, *et al*. Infrared refractive indices of liquid crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(7): 073501.

作者简介：



查正桃，男，博士研究生，2023年于西华师范大学获得硕士学位，主要从事液晶光学器件的理论与制备技术的研究。E-mail: zhazhengtao24@mails.ucas.ac.cn



王启东，男，博士，副研究员，2015年于中国科学院大学获得博士学位，主要从事液晶光学、几何相位液晶器件、液晶系统应用等方面的研究。E-mail: qdwang@ciomp.ac.cn