

液晶可变延迟器的双折射色散研究

李克武^{1,2} 王志斌^{1,2} 张瑞^{1,2} 于慧²

¹中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

²中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051

摘要 为了实现液晶可变延迟器(LCVR)对不同波长入射光相位延迟的精确控制,发挥其在光信息和光学测量领域的应用优势,对其双折射色散特性进行了研究分析。根据折射率椭球理论分析了LCVR对入射光的双折射色散满足柯西色散关系;分别测量了LCVR对532、635、670 nm激光在不同驱动电压值下的延迟量;讨论和分析上述测量结果,求解出LCVR满足的柯西色散经验公式的系数,利用归一化的方式确立了色散定标方法,并用650 nm激光进行了实验验证。实验结果表明,LCVR对不同波长的入射光存在双折射色散;650 nm激光延迟量的实测值与双折射色散定标值偏差小于 0.007λ ,定标方法准确可行。

关键词 物理光学;液晶可变延迟器;双折射色散;延迟量定标

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0108001

Study of Birefringence Dispersion Based on Liquid Crystal Variable Retarder

Li Kewu^{1,2} Wang Zhibin^{1,2} Zhang Rui^{1,2} Yu hui²

¹Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

²Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract In order to realize a liquid crystal variable retarder (LCVR) to precisely control the phase delay for different wavelengths of the incident light and expand its application advantages in the field of optical information and optical measurements, its birefringence dispersion characteristics are studied and analyzed. Firstly, according to the index ellipsoid theory, LCVR birefringence dispersion of the incident light is matched with Cauchy dispersion; Secondly, retardance for 532, 635, 670 nm laser is measured, which changes with the value of drive voltage; Finally, the above three measurements are analyzed, the coefficients about empirical formula of Cauchy dispersion are solved, and a calibration method of dispersion used a normalizing way is established and verified with a 650 nm laser. Experimental results show that LCVR produces birefringence dispersion for different wavelength incident light. For 650 nm laser, the retardance deviation between experimental result and dispersion calibration is given not more than 0.007λ , which proves the calibration method is accurate and feasible.

Key words physical optics; liquid crystal variable retarder; birefringence dispersion; retardance calibration

OCIS codes 260.1440; 230.2035; 150.1488

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-08-08

基金项目: 国际科技合作项目(2012DFA10680)、国家自然科学基金仪器专项基金(61127015)

作者简介: 李克武(1990—),男,硕士研究生,主要从事偏振成像光谱技术方面的研究。E-mail: kewuli1990@gmail.com

导师简介: 王志斌(1966—),男,博士,教授,主要从事光谱成像技术及遥感遥测等方面的研究。

E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

1 引 言

液晶可变延迟器(LCVR)是利用液晶的光电双折射特性^[1]制成的偏振光学器件,通常可将其视为相位延迟不同的一系列晶体波片^[2]。通过调节 LCVR 驱动电压(电压值一般不超过 10 V),就可以实现相位延迟的连续调节^[3],且响应时间在毫秒量级^[4]。因此,LCVR 具有宽的通光范围、无需机械转动、低功耗、响应快等优点,在光的偏振态调制解调、分析测量等方面^[5-7]具有很好的应用前景。

国内外已有不少关于 LCVR 及其应用研究的报道^[8-10],但在其整个通光范围内,对不同波长入射光的相位延迟之间差异的精细研究仍很缺乏。实际上,由于 LCVR 中取向膜对液晶分子的锚定,使得 LCVR 中液晶分子在外电场作用下分布复杂而不均匀^[11],所以很难从理论上精确推导 LCVR 对入射光的相位延迟。然而,对于每一个制备好的 LCVR,环境条件不变的情况下,其对一定波长入射光的延迟量仅由驱动电压控制,并且能够精确测定。但是,要把 LCVR 通光范围内每一波长入射光的延迟量随驱动电压变化的关系曲线都通过实测得到,这是非常困难的。已有文献报道,通过对有限个波长的实测数据拟合得到 LCVR 通光范围内其他波长入射光的延迟量随电压变化关系曲线^[12],但该方法只是在某些延迟范围具有较高的精度。

考虑到 LCVR 对入射光的相位延迟仅由驱动电压控制的特点。本文采用折射率椭球分析法^[13]来分析 LCVR 对入射光的双折射色散;分别测量了 LCVR 对 532、635、670 nm 激光在不同电压值下的延迟量,求解出该 LCVR 满足的柯西色散经验公式的系数;对上述三个波长激光的延迟量曲线作归一化处理,确定了 LCVR 在其通光范围内对所有波长入射光的延迟量随驱动电压变化关系的定标方法和定标曲线,并用 650 nm 的激光进行了相关的实验验证。

2 LCVR 双折射色散理论分析

现在常用的 LCVR 结构如图 1(a)所示,在两片平行的石英玻璃基板内侧电镀透明电极氧化锡(ITO),并涂覆取向膜聚酰亚胺(PI),摩擦取向处理后,再灌注液晶分子间隔封装制成。LCVR 的液晶分子为正性向列相液晶分子,该类型液晶分子呈细长棒状,在取向膜的锚定作用下,液晶分子平行于玻璃基板排列;其光学性质与单轴晶体类似,光轴方向沿分子的长轴方向,所以,本文采用折射率椭球分析法讨论光在 LCVR 中的传播。

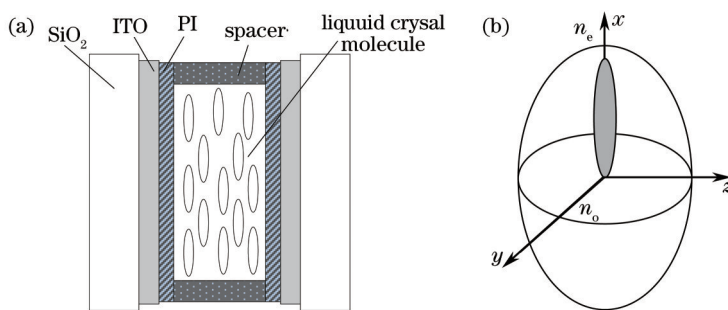


图1 $U \leq U_{th}$ 的 LCVR。(a) LCVR 示意图;(b) 折射率椭球

Fig.1 $U \leq U_{th}$ for LCVR. (a) Schematic diagram of LCVR; (b) index ellipsoid

对 LCVR 没有施加驱动或驱动电压 U 未超过阈值电压 U_{th} 时,LCVR 中液晶分子的折射率椭球如图 1(b)所示。驱动电压超过阈值电压后,液晶分子受到电场的的作用发生偏转,分子长轴倾斜角度为 θ ,如图 2(a)所

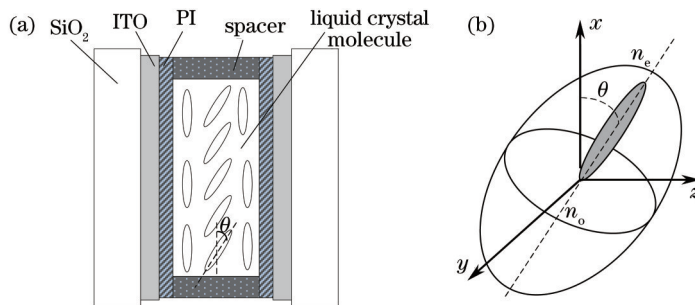


图2 $U > U_{th}$ 的 LCVR。(a) LCVR 示意图;(b) 折射率椭球

Fig.2 $U > U_{th}$ for LCVR. (a) Schematic diagram of LCVR; (b) index ellipsoid

示,此时,折射率椭球也倾斜 θ ,如图 2(b)所示。

线偏振光正入射通过 LCVR,被分解在以入射光波矢量 \mathbf{K} 为法向量在折射率椭球上截得的椭圆面上,e光和o光偏振方向分别沿截得椭圆面的长轴和短轴方向。在 $U \leq U_{th}$ 和 $U > U_{th}$ 两种情况下,e光和o光分量的折射率如图 3 所示。

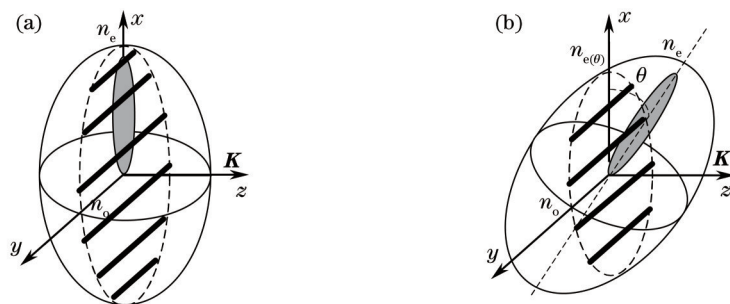


图 3 e光和o光分量。(a) $U \leq U_{th}$; (b) $U > U_{th}$

Fig.3 Extraordinary light and ordinary light. (a) $U \leq U_{th}$; (b) $U > U_{th}$

根据图 3 中对 e 光和 o 光的折射率分析可知,液晶光轴发生偏转过程中,o光折射率保持不变,e光折射率随倾斜角变化。当液晶光轴与竖直方向的夹角为 θ 时,光矢量 \mathbf{K} 与液晶光轴的夹角为 $\pi/2 - \theta$,此时,e光的折射率可表示为

$$\frac{1}{n_{e(\theta)}^2} = \frac{\cos^2 \theta}{n_c^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2}, \quad (1)$$

式中 n_c, n_o 为折射率椭球的两个本征值。将(1)式作如下变化:

$$\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_{e(\theta)}^2} = \frac{1}{n_o^2} - \left(\frac{\cos^2 \theta}{n_c^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2} \right), \quad (2)$$

因而,

$$\frac{[n_{e(\theta)} - n_o][n_{e(\theta)} + n_o]}{n_o^2 n_{e(\theta)}^2} = \frac{(n_c - n_o)(n_c + n_o)}{n_o^2 n_c^2} \cos^2 \theta. \quad (3)$$

由于 $|n_{e(\theta)} - n_o| \ll n_{e(\theta)}, n_o$, 所以(3)式可以近似为^[14]

$$n_{e(\theta)} - n_o = (n_c - n_o) \cos^2 \theta, \quad (4)$$

即入射光经过 LCVR 后,e光和o光的折射率差 $\Delta n = n_{e(\theta)} - n_o$ 。与正单轴晶体一样,LCVR 中 e 光和 o 光折射率是波长的函数^[15],并且满足柯西经验色散公式 $n_{c,o} = A_{c,o} + \frac{B_{c,o}}{\lambda^2} + \frac{C_{c,o}}{\lambda^4}$, $A_{c,o}, B_{c,o}, C_{c,o}$ 分别表示该液晶中 e 光与 o 光的色散系数。可以看出 e 光和 o 光的折射率差也是波长的函数,即 e 光与 o 光的双折射色散为

$$n_c - n_o = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4}, \quad (5)$$

式中 a, b, c 是与液晶有关的柯西色散系数。对于厚度为 d 的 LCVR,则 e 光和 o 光产生的相位延迟为

$$\delta = \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda}. \quad (6)$$

为了方便地描述 e 光与 o 光的相位延迟,将这两个分量通过 LCVR 的光程差定义为延迟量 R ,即

$$R = \frac{\lambda}{2\pi} \delta. \quad (7)$$

R 与波长 λ 具有相同的量纲,可直接与波长 λ 作比较,更形象直观地体现了 LCVR 作为可变波片的用途。将(4)式和(6)式代入(7)式求出 R 为

$$R = (n_c - n_o) d \cos^2 \theta, \quad (8)$$

式中光轴倾斜角 θ 是由驱动电压 U 决定的, U 与 θ 一一对应。当驱动电压未超过阈值电压时,液晶分子未发生偏转,此时延迟量为初始值 $R_0 = (n_c - n_o) d$,将(5)式代入 R_0 的表达式得到

$$R_0 = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (9)$$

式中 $A=a \times d, B=b \times d, C=c \times d$ 。(9)式与柯西色散经验公式有相同的形式。当驱动电压一定,对于不同波长的入射光延迟量 R 的色散遵从柯西色散关系。所以,对于每一个确定的 LCVR 延迟量 R 可以表示为入射光波长 λ 和驱动电压 U 的函数 $R(\lambda, U)$, 即

$$R(\lambda, U) = R(\lambda)R(U), \quad (10)$$

式中 $R(\lambda)$ 为色散项,只与入射光波长有关, $R(U)$ 只与驱动电压有关,且 $R(\lambda)$ 和 $R(U)$ 相互独立。实际上 $R(\lambda) = R_0$, 即延迟量的色散是在延迟量初始值 R_0 中被引入的。

3 LCVR 延迟量测量

本文选用光强法测量 LCVR 延迟量,原理如图 4 所示,入射光源使用不同波长的半导体激光;起偏器 P_1 和检偏器 P_2 为格兰泰勒方解石偏振器,偏振轴与 x 轴的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 ;所使用的 LCVR 为 Thorlabs 公司的 LCC1113-A 全波液晶延迟器,通光范围为 350~700 nm,令其快轴与 x 轴的夹角为 θ_3 ,控制器为 LCC25,提供 2 kHz 的驱动方波,电压 0~25 V 可由计算机控制输出;调制后的光信号用 Thorlabs 公司的硅基跨阻放大光电探测器 PDA10A-EC 探测转化为电信号,并用 Tektronix 公司示波器 DPO3054 显示并输出到计算机。

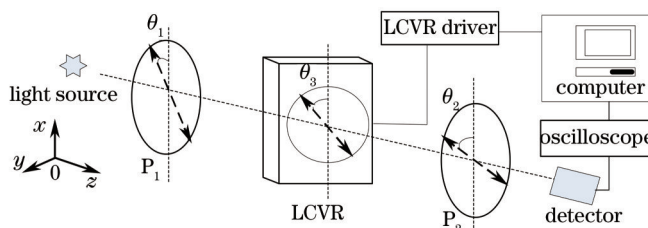


图 4 延迟量测量原理图

Fig.4 Retardation measurement schematic

为了能够比较精确地测量出 LCVR 的相位延迟,取 $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_3 = 45^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$ 或 $\theta_2 = 90^\circ$ 。 $\theta_2 = 0^\circ$ 或 $\theta_2 = 90^\circ$ 时,即 P_1 与 P_2 平行或垂直,根据文献[16],系统出射光强分别为 $I_{\parallel} = I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$ 和 $I_{\perp} = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}$,将两式比较可得到 LCVR 的相位延迟为

$$\delta = 2N\pi \pm 2 \arctan \sqrt{\frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}} \quad (N=0, 1, 2, \dots). \quad (11)$$

按上述方法,分别以 532、635、670 nm 的半导体激光器作为入射光源,在室温条件下,光源正入射,分别测量了 P_1 与 P_2 平行和垂直两种情况下,驱动电压 0~10 V 范围内不同电压下的出射光强,并绘制得到两种情况下透射率 T 随驱动电压 U 变化曲线,如图 5 所示。

将图 5 的数据点代入(11)式,得到相位延迟 δ ,如图 6(a)所示,再结合(7)式,便求出三个波长的入射光通过 LCVR 时各自的延迟量 R 随驱动电压 U 的关系,如图 6(b)所示。

4 LCVR 延迟量的色散分析

4.1 色散分析及延迟量定标

根据图 6(b)可知, R 最小值不等于 0,这是由于取向膜的锚定作用,使得靠近取向膜的液晶分子在足够大的驱动电压作用下也不会发生大角度偏转所导致的结果。实际上,取向膜的锚定使得 LCVR 中的液晶分子在外电场作用下的倾斜角是非均一的,LCVR 中部的液晶分子倾斜角最大,然后从中部向两侧逐渐减小,取向膜附近的液晶分子倾斜角最小。考虑到 LCVR 中液晶分子倾斜角在其厚度方向上的非均一性,将 LCVR 对入射光的双折射延迟量 R 的表达(8)式改写为

$$R = (n_e - n_o)d \frac{\int_0^d \cos^2 \theta(z) dz}{d}, \quad (12)$$

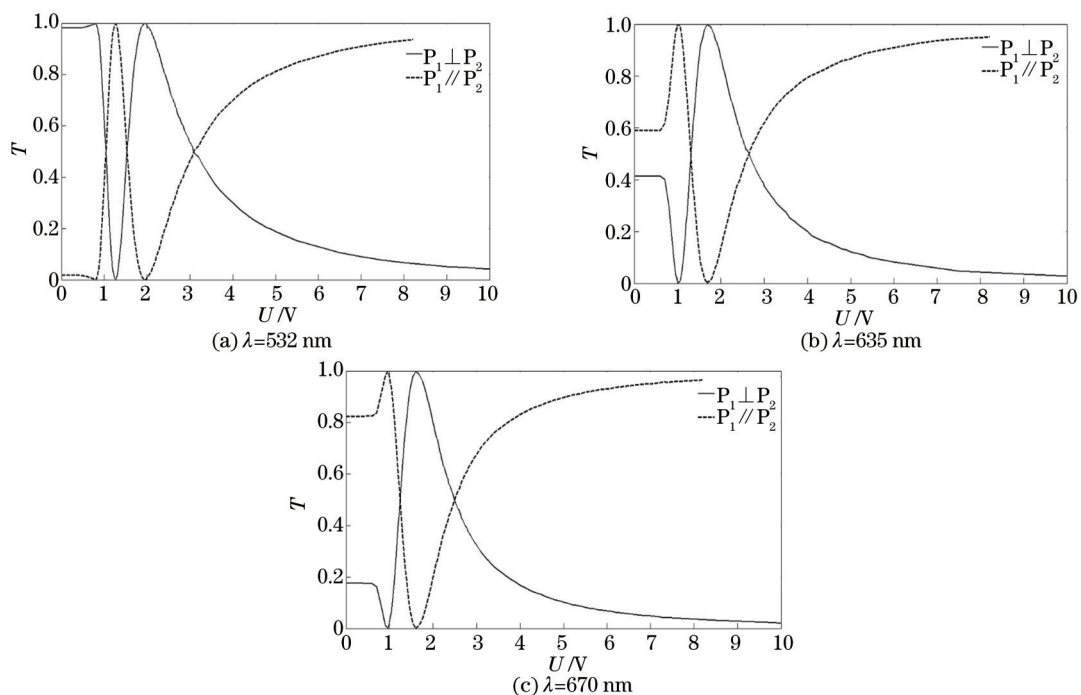


图5 不同波长入射光 $T-U$ 关系图

Fig.5 $T-U$ diagram of different wavelength light

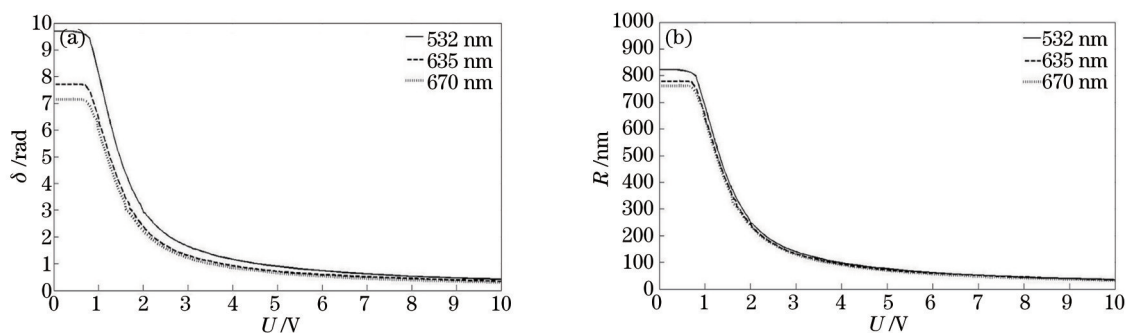


图6 (a) $\delta-U$ 关系图; (b) $R-U$ 关系图

Fig.6 (a) $\delta-U$ diagram; (b) $R-U$ diagram

式中 $\theta_{(z)}$ 为液晶分子倾角沿 LCVR 厚度的分布。将延迟量 R 作归一化处理, 可得到归一化延迟量为

$$R/R_0 = \int_0^d \cos^2 \theta_{(z)} dz/d \quad (13)$$

结合(10)式, $R/R_0 = \int_0^d \cos^2 \theta_{(z)} dz/d = R(U)$ 。所以, 归一化延迟量与入射光无关, 只由驱动电压决定。对于每一个特定的 LCVR, 归一化延迟量随驱动电压变化的关系曲线唯一。根据(13)式, 如果 R_0 和归一化延迟量随驱动电压变化的关系曲线已知, 那么延迟量 R 随驱动电压变化曲线可以确定。

从图 6(b) 还可以看出, 532、635、670 nm 的 R 随电压的变化关系曲线是不重合的, 即相同驱动电压下, 不同波长的入射光的 R 不相等, 确实存在双折射色散。根据测量结果, 把上述三个波长的延迟量初始值记入表 1。

表 1 延迟量初始值 R_0

Table 1 Initial value of retardance R_0

| λ /nm | 532 | 635 | 670 |
|---------------|-------|-------|-------|
| R_0 /nm | 821.4 | 779.6 | 762.6 |

将表 1 中三个波长及对应的 R_0 分别代入(9)式, 联立方程组解出 A 、 B 和 C 三个系数, 得到 LCVR 延迟量初始值 R_0 的色散表达式为

$$R_0 = 4.9538 \times 10^2 + 1.6719 \times 10^8 / \lambda^2 - 2.1204 \times 10^{13} / \lambda^4 \quad (14)$$

(14)式给出了LCVR在其通光范围内的延迟量初始值满足的色散关系。

将 $R-U$ 关系图 6(b) 按 (14) 式作归一化处理得到如图 7 所示的归一化曲线。从图 7 可知, 532、635、670 nm 各自的归一化曲线均重合得很好, 进一步证明本文对双折射色散分析正确, 该归一化曲线可作为不同波长入射光延迟量的定标曲线。对于不同波长的入射光, 具体定标方法如下: 把波长代入 (14) 式求出 R_0 , 将 R_0 乘以定标曲线上各归一化值, 便可得到延迟量 R 随驱动电压的变化曲线。

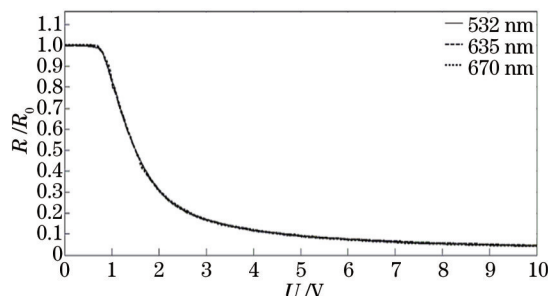


图 7 归一化曲线

Fig.7 Normalized curve

4.2 实验验证

为进一步验证色散分析及定标方法的真实可行性, 选用波长为 650 nm 的激光作为入射光来验证 LCVR 的延迟量定标。按 (14) 式求得 $R_0=772.4$ nm, 将 $R_0=772.4$ nm 代入图 7 的定标曲线得到延迟量的变化曲线, 如图 8 中实线所示。图 8 中的小圆圈离散点是以 650 nm 的激光作为入射光的实测值。

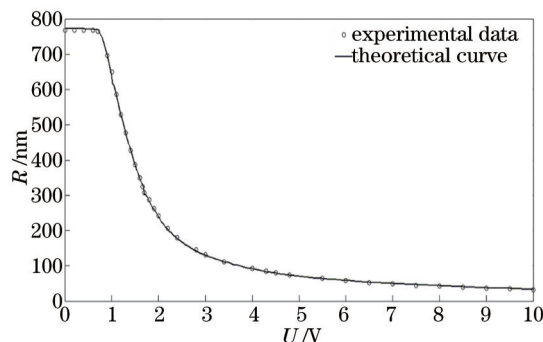


图 8 650 nm 验证图

Fig.8 Verification by 650 nm

由图 8 可明显看出, 测量值与通过定标方法求出的曲线重合, 当驱动电压 $U=1.005$ V 时, 测量值与定标值存在最大偏差, 偏差值为 4.5 nm, 约为 0.007λ 。

5 结 论

在折射率椭球理论上分析入射光在 LCVR 中的传播, 发现不同波长入射光延迟量的双折射色散满足柯西色散关系; 分别测量了 532、635、670 nm 激光的延迟量, 求解得到 LCVR 满足柯西经验公式的系数; 对上述三个波长的激光的延迟量进行归一化处理, 确立了 LCVR 对其通光范围内所有波长入射光的延迟量随驱动电压变化关系的定标方法, 并得到定标曲线; 以 650 nm 激光进行的验证实验, 测量值与定标值的偏差不大于 0.007λ 。实验结果表明, 对 LCVR 双折射色散的理论分析及延迟量定标方法正确、定标精度较高, 能够实现 LCVR 对不同波长入射光相位延迟的精确控制, 有望扩大 LCVR 在光信息和光学测量领域的应用。

参 考 文 献

1 Wang Wei, Li Guohua, Xue Dong. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 970-972.

王 伟, 李国华, 薛 冬. 液晶电控双折射率与电压关系的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(7): 970-972.

- 2 Gu Yaohui, Zhang Yan, Jiao Xiang, *et al.*. Measurement for retardation of wave plates using the relative angle method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908002.
 谷耀辉, 张 燕, 焦 翔, 等. 相对角度法测量波片相位延迟量[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908002.
- 3 Wang Ning, Li Guohua, Yun Maojin. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(12): 1064-1066.
 王 宁, 李国华, 云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1064-1066.
- 4 Zhang Ying, Zhao Huijie, Zhou Pengwei, *et al.*. Photoelectric characteristics of liquid crystal variable retarder[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(3): 17-20.
 张 颖, 赵慧洁, 周鹏威, 等. 液晶相位可变延迟器的光电特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(3): 17-20.
- 5 Zhang Shenfei, Wang Chunhua, Yu Qingyang, *et al.*. Multiple mueller matrices measurement by polarization state modulators[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0412003.
 张申飞, 王春华, 于清洋, 等. 基于偏振态调制器的三级米勒矩阵测量[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0412003.
- 6 Tang Peijun, Chen Feihu, Tang Zhilie. Visualization of polarization state and its imaging method[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0826002.
 唐珮珺, 陈飞虎, 唐志列. 偏振态的可视化及其成像技术的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0826002.
- 7 Liu Qi, Chu Jinqi, Wang Jing, *et al.*. Research and simulation analysis of atmospheric polarization properties under water cloud condition[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0301004.
 刘 琦, 褚金奎, 王 兢, 等. 水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301004.
- 8 Jiang Jijun, Zhang Dayong, Li Jianfeng. Liquid crystal variable retarder development and electric-control retardation measurement [J]. Laser Technology, 2011, 35(5): 652-655.
 江继军, 张大勇, 李剑峰. 液晶可变延迟器研制及其电控相位延迟测量[J]. 激光技术, 2011, 35(5): 652-655.
- 9 W A Wozniak, P Kurzynowski, S Drobczyński. Adjustment method of an imaging Stokes polarimeter based on liquid crystal variable retarders[J]. Applied Optics, 2011, 50(2): 203-212.
- 10 Ying Zhang, Huijie Zhao, Ping Song, *et al.*. Ground-based full-sky imaging polarimeter based on liquid crystal variable retarders[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8750-8764.
- 11 Néstor Uribe-Patarroyo, Alberto Alvarez-Herrero. Determination of the molecular tilt profile of a liquid crystal under applied electric field by generalized transmission ellipsometry[J]. J Opt Soc Am B, 2009, 26(6): 1188-1195.
- 12 Zhang Ying, Zhao Haibo. Liquid crystal variable retarder attached with compensator[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1798-1803.
 张 颖, 赵海博. 带有补偿器的液晶相位可变延迟器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1798-1803.
- 13 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. 80-91.
 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 80-91.
- 14 Xiao Dingquan, Wang Min. Crystal Physics[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1989. 146-147.
 肖定全, 王 民. 晶体物理学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1989. 146-147.
- 15 Wang Xinjiu. Liquid Crystal Optic and Liquid Crystal Display[M]. Beijing: Science Press, 2006. 148-149.
 王新久. 液晶光学和液晶显示[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 148-149.
- 16 Bai Linling. Research of the Phase Delay Based on Liquid Crystal Wave Plate Under Applied Electric Field[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. 40-43.
 白林灵. 外场下液晶波片相位延迟量的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012. 40-43.

栏目编辑: 史 敏