

基于单偏振器的液晶相位延迟器光电特性

霍树春, 胡春光*, 沈万福, 李艳宁, 胡小唐

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:液晶相位延迟器(LCVR)是一种新型偏振器件,精确标定其光电特性是实现基于该器件的精密光学偏振测量的关键环节.通过建立探测光强与相位延迟值和器件方位角的数学模型,提出了一种基于单偏振器的测量新方法,可快速计算出不同电压作用下的 LCVR 本征轴方位角和相位延迟值.该方法具有测试结构简单、相位延迟测量过程无需机械旋转、全谱测量速度快的优点.此外,该测量结构便于集成在其它偏振测量结构中,实现 LCVR 的在线、实时标定.实验结果表明基于上述方法的测试系统,LCVR 的相位延迟测量重复性优于 5%,本征轴方位角的测量分辨率优于 0.1°.

关键词:液晶延迟器;相位测量;本征轴方位角;偏振光学

中图分类号:O433.1 **文献标识码:**A

Photoelectric characterization of liquid crystal variable retarder using single polarizer

HUO Shu-Chun, HU Chun-Guang*, SHEN Wan-Fu, LI Yan-Ning, HU Xiao-Tang

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Liquid crystal phase retarder (LCVR) is a new polarization state control device. Correct calibration of its photoelectric characteristics significantly effects the precise optical polarization measurements based on this device. A new testing method including only one polarizer was proposed by modeling light intensity, phase retardation and eigen-axis azimuth. Without rotating any component, multi-wavelength retardations can be rapidly acquired using this simply structured method. In addition, this new setup can be integrated into other polarization measuring instruments for on-line calibration of LCVR. Experimental results show that the repeatability of measured retardations is better than 5%, while the resolution of eigen-axis azimuth is better than 0.1°.

Key words: liquid crystal retarder, phase measurement, azimuth of eigen axis, polarization optics

PACS: 42.25.Ja

引言

光学偏振测量方法已被广泛应用于微纳米测试领域^[1-2].光束偏振态的可控调制是偏振方法实现测量的基础.因此,偏振调制器件的性能是保证高精度测量的关键因素之一.相位连续可控的液晶可变相位延迟器(LCVR)以其驱动电压低、无机械转动、响应快、体积小等特点成为波片、光弹调制器、Pockels

盒等之后又一重要偏振调制器件^[3-8].但由于工艺限制,LCVR 的性能普遍存在个体差异,且环境温度对其性能影响明显^[7,9],限制了其在精密光学偏振测量中的应用.为了突破这一局限,LCVR 的光电特性,特别是本征轴方位角^[10]和相位延迟谱的在线精确标定,始终是偏振测量方法研究的重要内容.

目前,LCVR 光电特性的测试方法可以分为两大类.第一类,借助偏振测试仪器,离线测试 LCVR

收稿日期:2015-03-13,修回日期:2015-05-26

Received date: 2015-03-13, revised date: 2015-05-26

基金项目:全国优秀博士学位论文作者专项基金(201140);国家自然科学基金(61008028);教育部留学回国人员科研启动基金

Foundation items: Supported by Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of PR China (201140); National Natural Science Foundation of China (61008028); Scientific Research Starting Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education of China

作者简介(Biography):霍树春(1983-),男,河北沧州人,博士生,主要领域为偏振光学测试及仪器开发. E-mail: schuo@tju.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: cghu@tju.edu.cn

的电光特性,如椭偏仪,偏光计等.这种方法依赖于测试仪器的性能,且测量误差会直接带入到应用 LCVR 的测试系统中;不仅如此,测试完成后需要重新把 LCVR 安装到其应用系统,不可避免地引入了二次装配误差,令误差分析更加复杂.第二类,利用集成 LCVR 的测试系统的部分结构构建 LCVR 的在线自检测系统^[7-12].通过分析电压驱动下 LCVR 对最终输出光强的调制规律,测算出 LCVR 的光电特性.这种以 LCVR 应用系统为基础的测试方法,完成测试后无需重新拆装 LCVR,避免了重复安装引入的装配误差,同时简化了 LCVR 在应用系统中的校准调试过程.但现有的该类测试方法通常涉及多个器件,甚至还需要在测试中进行机械旋转,此时,测量结果需考虑器件自身缺陷、旋转精度和装配误差等因素,误差分析较为复杂.

提出一种基于单偏振器的测量新方法.利用穆勒矩阵建立数学模型,该方法可从光强变化规律中推导相关公式,快速计算出 LCVR 本征轴方位角和相位延迟值.为验证该方法的有效性,还建立了 LCVR 的光电特性测试系统,并进行了相关实验及分析.

1 测量原理

测量原理如图 1 所示,测量方法仅使用两个偏振器件,即线性偏振器和待测的 LCVR.卤钨灯光源射出的光线经过准直后进入分束器,分束器的反射光线入射线性偏振器和 LCVR 后,经过平面镜的反射后再次通过 LCVR 和线性偏振器,然后再次入射到分束器,分束器透射光的光强信号由光谱探测器采集并传送到计算机,计算机进行数据处理并控制 LCVR 的电压. LCVR 的旋转角度由旋转台控制.

对于每一波长,由斯托克斯矢量和穆勒矩阵,设线性偏振器透光轴和 LCVR 本征轴方位角的夹角为 θ , LCVR 的延迟值为 δ ,则光谱探测器上获得该波长的光强为:

$$I = A(\theta, \delta) I_0 = [1.5 + 0.5 \cos(4\theta) + 0.5 \cos(2\delta) - 0.5 \cos(4\theta) \cos(2\delta)] I_0, \quad (1)$$

其中 I_0 为包括各器件透光率在内的测试光强(常数), A 是以 θ, δ 为自变量的函数.由于 I_0 为常数, A 的变化规律即为光强 I 的变化规律,因而可由光强 I 的变化规律推导出 θ 和 δ . A 的仿真结果如图 2 所示.

本征轴方位角:由公式(1)及图 2 可知,当延迟值 δ 值固定时,光强受夹角 θ 调制,光强 I 的极小值

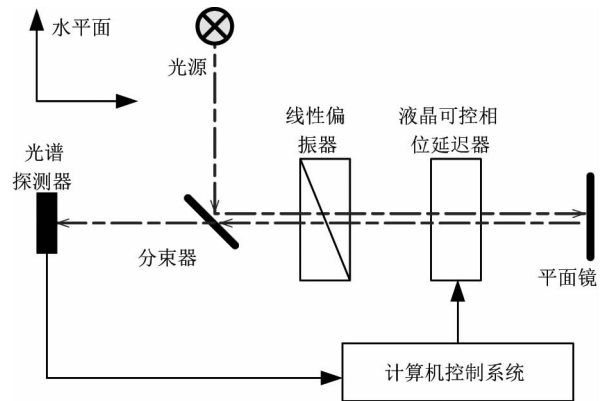


图 1 液晶相位延迟器光电特性测试系统示意图

Fig. 1 The testing system for liquid crystal variable retarder photoelectric characteristics

对应的 θ 为 $\pi/4$ 的奇数倍.旋转 LCVR 令光强最小,即可确定 LCVR 在对应波长和电压下的本征轴方位角.需要注意的是当 δ 为 π 的整数倍时,光强 I 为常数,因此无法利用 θ 对光强 I 的调制变化推导出 LCVR 本征轴方位角.

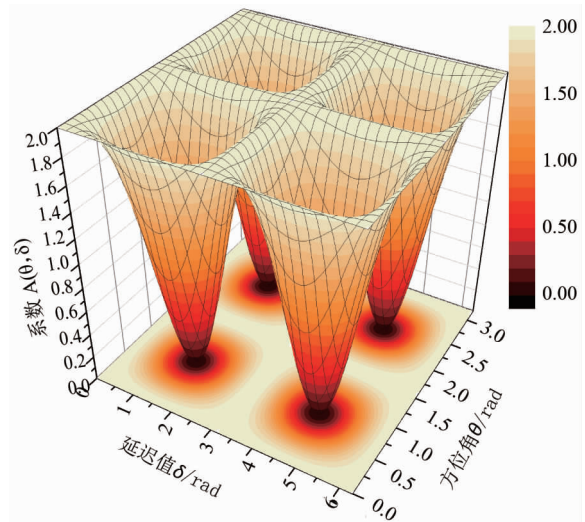


图 2 系数 A 随方位角 θ 和延迟值 δ 的变化趋势

Fig. 2 The variation of coefficient A vs. orientation θ and retardation δ

相位延迟:由公式(1)及图 2,当 θ 值固定时,光强 I 受 δ 调制, I 的极大值 I_{MAX} 对应的 δ 为 π 的整数倍,此时 $I_0 = 0.5 \cdot I_{\text{MAX}}$, 带入公式(1)可得

$$\delta = 0.5 \cos^{-1} \left(\frac{4I - 3I_{\text{MAX}} - \cos(4\theta) I_{\text{MAX}}}{(1 - \cos(4\theta)) I_{\text{MAX}}} \right), \quad (2)$$

由公式(2)即可计算不同电压对应的 δ 值.此时需注意, θ 为 $\pi/2$ 整数倍时,光强 I 为常数,因

此无法用公式(2)计算 δ .

2 实验结果

2.1 本征轴方位角

本实验的测量目标是不同波长下的 LCVR 方位角 45° . 考虑到 LCVR 方位角在不同波长下存在差异^[7] 以及装配误差, 因此可用旋转台的角度读数来表示 LCVR 方位角 45° 在测试系统中的具体位置. 装配时, 令 LCVR 方位角(外壳刻线)、旋转台刻度 0° 和偏振器方位角近似平行, 且以偏振器方位角为系统的偏振 0° 基准. 测试中使用的阵列探测器型的全谱式光谱仪(海洋光学 QE65pro), 其波长分辨率为 $2 \sim 3 \text{ nm}$ ($50 \mu\text{m}$ 狭缝), 因此我们可以将探测像素与光谱波长一一对应, 从而获得该波长的光强信息.

测试过程以 650 nm 为例, 该过程实际为寻找该波长的光强最小值:

a. 令旋转台至其刻线 45° 位置, 考虑到装配误差, 那么 LCVR 方位角与偏振器方位角之间约为 45° , 从图 2 可知光强将随延迟值 δ 显著变化.

b. 调整 LCVR 电压(即改变 δ), 可获得该旋转台角度下的最小光强, 如图 3(a). 则最小光强处(波谷)的延迟值 δ 应为 $\pi/2$ 的奇数倍. 该图中横坐标为电压, 而电压与延迟值 δ 为非线性关系, 因此图中光强变化趋势与图 2 不一致. 考虑到电压较高时, LCVR 方位角随电压变化趋缓^[7], 这里取光强波谷处对应的最大电压值保持不变进行下一步, 例如图 3(a)中取 2.64 V , 而不是 1.36 V .

c. 改变旋转台角度, 可获得该电压下(2.64 V) 的最小光强, 如图 3(b). 该光强波谷处对应的旋转台角度, 令 LCVR 方位角和偏振器方位角的夹角为 45° . 实验所用旋转台的单向可重复增量运动最小为 0.03° , 测试中角度步进为 0.05° . 由图 3(b) 可知该系统对 LCVR 方位角的测试分辨率优于 0.1° .

分别对 600 nm 、 650 nm 、 700 nm 、 750 nm 和 800 nm 光在 4 个温度下对 LCVR 方位角 45° 进行测试, 对应的旋转台角度如图 3(c).

由图 3(c) 可知, 同一波长、温度基本稳定时, 本征轴方位角基本一致, 即温度的细微变化和旋转台引入的综合影响基本在 0.1° 之内. 然而, 不同波长下 LCVR 的本征轴方位角差异较明显. 这是由于测试中各波长最小光强对应的测试电压不同, 而液晶分子在不同电压下的本征轴方位角存在差异^[10].

2.2 相位延迟

在应用中, 通常认为 LCVR 是本征轴方位角恒

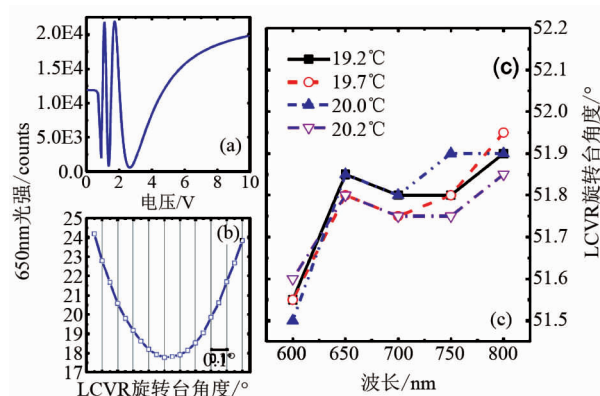


图3 LCVR 方位角 45° 在测试系统中的具体位置. (a) LCVR 方位角约 45° 时, 650 nm 光强随电压变化曲线; (b) 2.64 V 电压, 650 nm 光强随 LCVR 方位角(旋转台)变化曲线; (c) 5 波长、 4 温度测试 LCVR 方位角 45° 对应的旋转台角度

Fig. 3 Azimuth 45° of LCVR in the testing system. (a) Intensity vs. voltage of 650 nm at azimuth $\sim 45^\circ$ of LCVR; (b) Intensity vs. azimuth of LCVR (rotation stage) of 650 nm at 2.64 V ; (c) Angle of rotation stage corresponding to 5 wavelengths and 4 temperatures, respectively

定、相位延迟随电压变化的理想偏振器件^[13]. 并且考虑到快速测试的目的, 我们令 LCVR 方位角固定, 即取 650 nm 、 700 nm 、 750 nm 和 800 nm 对应旋转台角度的均值为 LCVR 方位角 45° . 由公式(2), 当 θ 为 $\pi/4$, LCVR 对于单波长的相位延迟可由式(3)计算.

$$\delta = 0.5 \cos^{-1} \left(\frac{2I - I_{\max}}{I_{\max}} \right) \quad (3)$$

这里, 对 LCVR 施加一系列电压, 采集对应电压下 $500 \sim 800 \text{ nm}$ 波段的光强谱, 利用公式(3) 计算每个波长下延迟值. 由于公式(3) 使用了反三角函数, 计算结果需要进行解折叠处理, 解折叠后的测试结果如图 4. 电压小于阈值电压时(约 1 V), 液晶分子基本处于无偏转状态, 因此每个波长相位延迟值无变化. 当电压大于阈值电压时, 相位延迟值开始随电压的升高而减小: 电压 $1 \sim 3 \text{ V}$ 范围, 相位延迟值随电压升高而快速减小; 电压大于 3 V , 电压产生的电场力与液晶分子的复位力趋于平衡, 因此相位延迟值变化趋于缓慢. 相同电压, 波长越短则相位延迟值越大. 由于测试的 LCVR 未安装补偿波片, 各波长相位延迟值均大于零.

为验证本方法的正确性, 对同一个 LCVR 使用文献^[7] 提供的测试方法: LCVR 放在两个平行放置的线性偏振器中间, 保持电压不变, 旋转 LCVR 并采集各波长下不同角度对应的光强, 然后用测得的这组光强拟合出该电压下各波长的相位延迟. 图 5

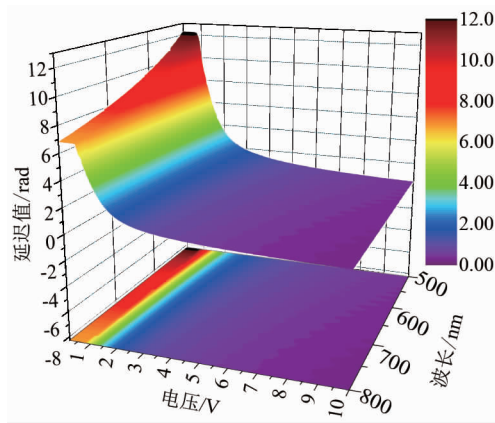


图4 不同电压、波长对应的延迟值
Fig.4 Retardations vs. voltage & wavelength

所示为 635 nm 波长下,文献[7]方法和本文方法测得的相位延迟与电压关系曲线,两种方法的测量结果一致性好,微小差异主要由于不同的测试温度^[9]和测试系统结构引起。

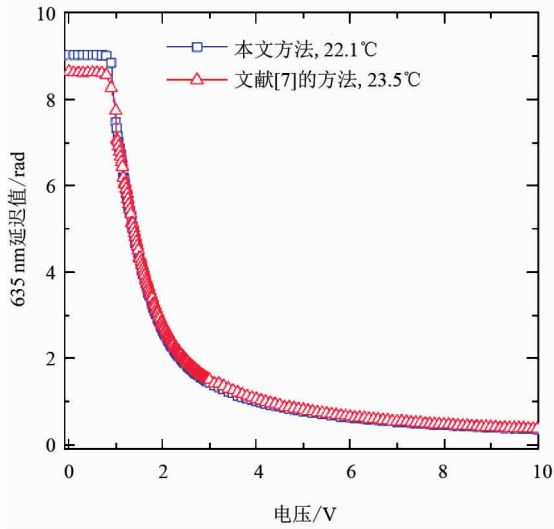


图5 本文方法与文献[7]方法的测试结果对比
Fig.5 Results comparison of different methods from this paper and Ref. [7]

为验证本方法的可靠性,进行了约 3 小时的重复测量,每次测量约 45 秒,共 256 次,环境温度为 $21.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 。测试过程中无任何器件转动,即偏振方位角固定,且无人员扰动。550 nm、600 nm、650 nm、700 nm 和 750 nm 波长下的相位延迟平均值、标准差 (SD) 和相对标准差 (RSD)^[14] 绘制于图 6。

图 6(b)、(c) 的标准差和相对标准差曲线中,电压在 1 V (阈值电压) 附近时的测试结果含有较大

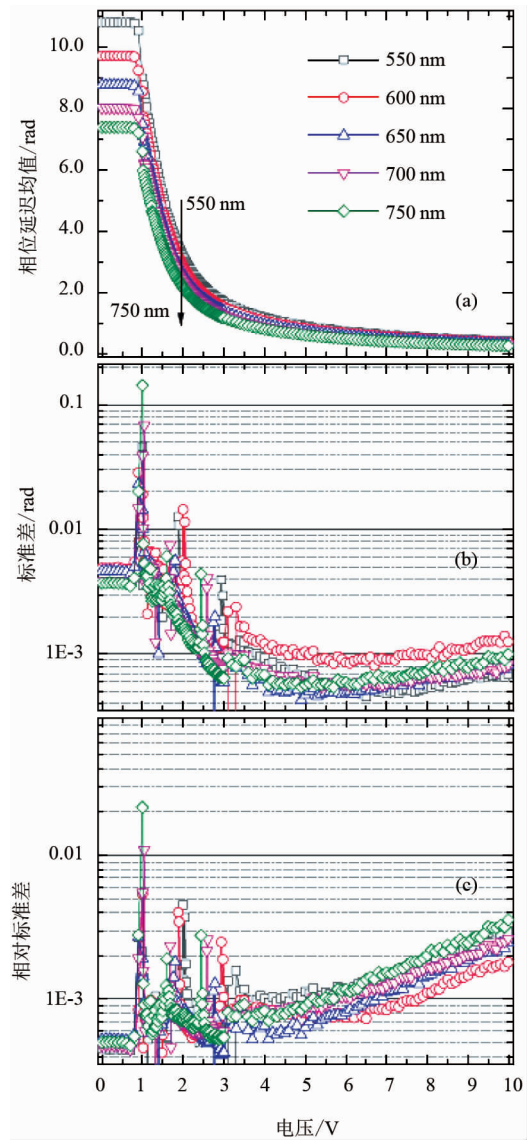


图6 相位延迟均值(a)、标准差(b)、相对标准差(c);各图中曲线的图例统一显示在图(a)中
Fig.6 Mean Retardations (a), standard deviations (b), and relative standard deviations (c) of 5 wavelengths; curve legends are shown in (a)

误差,这是因为 LCVR 中的液晶分子在电压作用下即将发生偏转,电场作用力相对较小,分子偏转状态不稳定。当电压在 2 V、3 V 附近时,测试光强分别达到极大、极小值,但电压步进的分辨力不足 (0.02 V) 导致不同测试的光强极值点对应电压变化,从而令极值点附近的相位延迟测量质量降低。除 1 V、2 V、3 V 附近几个电压点的数据之外,其它测试结果的标准差均小于 0.01 rad,相对标准差也优于 5%,体现了上述方法具有良好的测量重复性。

更关注某电压下的 δ 值和方位角时,可用方法:
(下转第 77 页)

- [23] LI Yang, LU Ping, BASET F, *et al.* Narrow linewidth low frequency noise Er-doped fiber ring laser based on femto-second laser induced random feedback [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(10): 101105.
- [24] YAMADA M, SAKUDA K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach [J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(16): 3474–3478.
- [25] CAPMANY J, MURIEL M A, SALES S, *et al.* Microwave VI transmission matrix formalism for the analysis of photonic circuits: application to fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(12): 3125–3134.
- [26] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(4): 219–225.

(上接 71 页)

a. 固定某电压不变,转动 LCVR 并采集光强. b. 根据光强极值确定 LCVR 方位角,例如极小值对应 45° 或 135° 可作为方位角基准. 但是当光强不随 LCVR 转动变化时,对应 δ 值应为 $0, \pi, 2\pi \dots$. 这时无法确认方位角,需由相邻电压来近似确认. c. 对光强和对应 LCVR 方位角进行最小二乘拟合,可以获得该电压下的 δ 值. 这样,该电压下的 LCVR 方位角和 δ 即可测得,但测得的 δ 值同样需要进行解摺叠运算. 这种方法需要的测量时间较长,对光源稳定性、器件的旋转精度、旋转引入的光束偏转角等有更高的要求,不适于快速测量的目的.

3 结论

本文提出了一种基于单偏振器的液晶可变相位延迟器(LCVR)光电特性测量方法并建立了相关测试系统. 该方法将 LCVR 置于线性偏振器和平面反射镜之间,线性偏振器同时作为起偏器和检偏器,平面反射镜起光束反射作用,利用光强的变化推导出 LCVR 本征轴方位角和相位延迟值计算方法. 因此,具有测试结构简单、相位延迟测量过程无需旋转器件、可快速获得宽波段相位延迟谱的优点. 实验结果表明,基于该方法的测试系统可准确测量 LCVR 的本征轴方位角和相位延迟值,其相位延迟测量结果的相对标准差优于 5% ,本征轴方位角测试分辨率优于 0.1° . 另外,该测试结构可集成于基于 LCVR 的测试系统中,实现 LCVR 的快速、在线标定.

References

- [1] TOMPKINS H, IRENE E A. *Handbook of ellipsometry* [M]. William Andrew, 2005.
- [2] GOLDSTEIN D. *Polarized Light* [J]. 2003.
- [3] DE Martino A, KIM Y K, GARCIA-CAUREL E, *et al.* Optimized Mueller polarimeter with liquid crystals [J]. *Optics letters*, 2003, **28**(8): 616–618.
- [4] LAUDE-BOULESTEIX B, DE Martino A, DRÉVILLON B, *et al.* Mueller polarimetric imaging system with liquid crystals [J]. *Applied optics*, 2004, **43**(14): 2824–2832.
- [5] BUENO J M. Polarimetry using liquid-crystal variable retarders; theory and calibration [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2000, **2**(3): 216.
- [6] ABDULHALIM I, MOSES R, SHARON R. Biomedical optical applications of liquid crystal devices [J]. *ACTA PHYSICA POLONICA SERIES A*, 2007, **112**(5): 715.
- [7] HU C, XIE P, HUO S, *et al.* A liquid crystal variable retarder-based reflectance difference spectrometer for fast, high precision spectroscopic measurements [J]. *Thin Solid Films*, 2013.
- [8] HUO S, HU C, LI Y, *et al.* Optimization for liquid crystal variable retarder-based spectroscopic polarization measurements [J]. *Applied optics*, 2014, **53**(30): 7081–7086.
- [9] BABA J S, BOUDREAUX P R. Wavelength, temperature, and voltage dependent calibration of a nematic liquid crystal multispectral polarization generating device [J]. *Applied optics*, 2007, **46**(22): 5539–5544.
- [10] TERRIER P, CHARBOIS J M, DEVLAMINCK V. Fast-axis orientation dependence on driving voltage for a Stokes polarimeter based on concrete liquid-crystal variable retarders [J]. *Appl. Opt.* 49, 4278–4283 (2010) 12.
- [11] LÓPEZ-TÉLLEZ J M, BRUCE N C. Experimental method to characterize a liquid-crystal variable retarder and its application in a Stokes polarimeter [C]. *8th Ibero American Optics Meeting/11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications. International Society for Optics and Photonics*, 2013: 87852J-87852J-9.
- [12] ZHANG Ying, ZHAO Hui-Jie, ZHOU Peng-Cheng, *et al.* Photoelectric characteristics of liquid crystal variable retarder [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology* (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. *国外电子测量技术*), 2009, (3): 17–20.
- [13] VARGAS A, DONOSO R, RAMO REZ M, *et al.* Liquid crystal retarder spectral retardance characterization based on a Cauchy dispersion relation and a voltage transfer function [J]. *Optical Review*, 2013, **20**(5): 378–384.
- [14] FEI Ye-Tai. *Error theory and data processing* [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press. (费业泰. *误差理论与数据处理* [M]. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社), 2004.