中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于过压驱动的穆勒矩阵高速测量方法

巩忠轩 李子凡 龚君豪 韩琪锐 于壁君 毛红敏 樊丽娜 陆焕钧 曹召良

High-speed measurement of Mueller matrix based on overdriving technique

GONG Zhong-xuan, LI Zi-fan, GONG Jun-hao, HAN Qi-rui, YU Bi-jun, MAO Hong-min, FAN Li-na, LU Huan-jun, CAO Zhao-liang

引用本文:
巩忠轩, 李子凡, 龚君豪, 韩琪锐, 于壁君, 毛红敏, 樊丽娜, 陆焕钧, 曹召良. 基于过压驱动的穆勒矩阵高速测量方法[J]. 中国光学, 2025, 18(5): 1132-1142. doi: 10.37188/CO.2025-0055
GONG Zhong-xuan, LI Zi-fan, GONG Jun-hao, HAN Qi-rui, YU Bi-jun, MAO Hong-min, FAN Li-na, LU Huan-jun, CAO Zhao-liang. High-speed measurement of Mueller matrix based on overdriving technique[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1132-1142. doi: 10.37188/CO.2025-0055

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2025-0055

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

轴向位置可调的双中空环形光斑

Double doughnut-shaped focal spots with controllable position in axial direction

中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 329 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0036

基于液晶光波导的电控偏振旋转器

Electrically controlled polarization rotator based on liquid crystal optical waveguide

中国光学（中英文）. 2022, 15(3): 552 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0213

基于二氧化钒宽、窄带可切换的双功能超材料吸收器研究

Wide and narrow band switchable bi-functional metamaterial absorber based on vanadium dioxide

中国光学（中英文）. 2022, 15(2): 387 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0174

长春光机所高速垂直腔面发射激光器研究进展

Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 946 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0136

高倍汇聚辐射光斑能流分布测量方法研究

A flux measurement for high-magnification convergent radiation spots

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 620 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0139

二氧化钒辅助的可切换多功能超材料结构

A vanadium dioxide-assisted switchable multifunctional metamaterial structure

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 514 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0195

文章编号 2097-1842(2025)05-1132-11

基于过压驱动的穆勒矩阵高速测量方法

巩忠轩[1,2], 李子凡[1,2], 龚君豪[1,2], 韩琪锐[1,2], 于壁君[1,2], 毛红敏[1,2], 樊丽娜[1,2], 陆焕钧[1,2*], 曹召良[1,2*]
（1. 江苏高校智能光电子器件与芯片重点实验室, 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009;
2. 太湖光子中心前沿技术研究院 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009）

摘要: 为实现穆勒矩阵的高速测量, 本文提出一种基于过压驱动的穆勒矩阵高速测量方法。首先, 建立基于液晶的穆勒矩阵仿真模型, 仿真分析了待测物穆勒矩阵的测量可行性。其次, 给出了液晶可变相位延迟器的过压驱动方法, 并利用过压驱动技术缩短了偏振态的切换时间。最后, 实验测量了空气、偏振片及 1/4 波片的穆勒矩阵。实验结果表明: 6 个偏振态的生成频率从 71 Hz 提升到 417 Hz, 穆勒矩阵的测量频率从 10 Hz 提升到 60 Hz, 提升约 6 倍; 同时, 穆勒矩阵测量均方误差(MSE)优于 0.0004, 消光比优于 750∶1, 椭偏度低于 1.06%。上述结果表明: 过压驱动方法能够实现穆勒矩阵的高速测量, 从而为动态偏振分析、光学元件在线质检、生物医学成像等实时检测领域提供可行方案。

关 键 词: 穆勒矩阵; 过压驱动; 液晶可变相位延迟器; 偏振态切换; 相位调制
中图分类号: TP394.1;TH691.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2025-0055 **CSTR:** 32171.14.CO.2025-0055

High-speed measurement of Mueller matrix based on overdriving technique

GONG Zhong-xuan[1,2], LI Zi-fan[1,2], GONG Jun-hao[1,2], HAN Qi-rui[1,2], YU Bi-jun[1,2], MAO Hong-min[1,2], FAN Li-na[1,2], LU Huan-jun[1,2*], CAO Zhao-liang[1,2*]
(1. *Key Laboratory of Intelligent Optoelectronic Devices and Chips of Jiangsu Higher Education Institutions, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou* 215009, *China*;
2. *Advanced Technology Research Institute of Taihu Photon Center, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou* 215009, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: luhuanjun@usts.edu.cn; caozl@usts.edu.cn*

Abstract: This paper proposes a high-speed measurement method of Mueller matrix based on an overdriving

收稿日期: 2025-03-28; **修订日期:** 2025-04-23
基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(No. KYCX24_3425); “十四五”江苏省重点学科资助(No. 2021135); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 22205155); 江苏省自然科学基金青年基金项目(No. BK20220640); 江苏省高校基础科学(自然科学)研究面上项目(No. 22KJB150011)
Supported by Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. KYCX24_3425); Jiangsu Key Disciplines of the Fourteenth Five-Year Plan (No. 2021135); the National Natural Science Foundation of China (No. 22205155); the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20220640); the Natural Science Research of Jiangsu Higher Education Institutions of China (No. 22KJB150011)

technique exerted on a liquid crystal variable retarder. First, a liquid crystal-based simulation model of the Mueller matrix measurement system is established, which helps to confirm the feasibility of the system. Next, an overdriving scheme for the liquid crystal variable retarder is introduced to shorten the polarization-state switching time. Finally, the Mueller matrices of air, a polarizer, and a quarter-wave plate are measured experimentally. The results show that the generation frequency of six polarization states increases from 71 Hz to 417 Hz, and the measurement frequency of Mueller matrix increases from 10 Hz to 60 Hz, representing approximately a sixfold improvement. Furthermore, the mean squared error (MSE) of the measurements is below 0.000 4. The extinction ratio exceeds 750:1, and the ellipsometric error is below 1.06%. These results demonstrate that the overdriving method enables high-speed Mueller matrix measurements, thereby facilitating applications in real-time inspection fields such as dynamic polarization analysis, online quality inspection of optical components, and biomedical imaging.

Key words: Mueller matrix; overdriving; liquid crystal variable retarder; polarization state switch; phase modulation

1　引　言

穆勒矩阵可以描述光与物质相互作用后偏振状态的变化, 能够全面反应物体的偏振特性, 如双折射、二向色性、退偏效应等[1-2]。因此, 通过测量物体的穆勒矩阵, 就可以求解出物体的偏振特性。该方法广泛应用于偏振元件标定、生物组织诊断及材料各向异性分析等领域, 为偏振层面的光学性能评价提供完整解析[3-5]。

Soleillet 于 1929 年提出用 4×4 矩阵描述光学系统对入射光偏振态的影响, 实现了偏振变化的数学表征[6]。1948 年, Mueller 建立了以穆勒矩阵为核心的 Stokes-Mueller 理论体系[7]。后续研究集中在如何实现对穆勒矩阵的测量。Bickel 等基于穆勒矩阵测量系统推导出被测样品的完整穆勒矩阵[8]。Goldstein 和 Chipman 对双旋转延迟器型穆勒矩阵测量装置进行误差分析, 并实现了偏振测量系统的校准[9]。1996 年, Lu 与 Chipman 提出穆勒矩阵的分解算法, 将穆勒矩阵分解为衰减器、延迟器及退偏振器级联结构[10]。2007 年, Fujiwara 研究了利用光谱椭偏仪测量物体穆勒矩阵的方法, 构建了面向薄膜、纳米结构的穆勒矩阵测量系统[11]。Gu 等利用穆勒矩阵椭偏仪分析了双折射波片的斜入射特性[12]。2023 年, 赵鑫鑫等提出将双旋转延迟器法与、离散傅里叶变换和温度补偿模型相结合, 实现大口径反射物镜的穆勒矩阵测量[13]。

目前穆勒矩阵测量方法大都依赖于机械旋转系统, 其响应速度较慢, 调节精度较低。而液晶偏振态控制器由于具备无机械转动、结构紧凑等优势, 已得到越来越多的关注。目前, 虽然也有少数基于液晶的穆勒矩阵测量探索研究[14-16], 但是响应速度较慢、应用场景受限。针对上述问题, 本文提出一种基于过压驱动的穆勒矩阵高速测量方法, 以实现高速、高精度的穆勒矩阵测量。

2　穆勒矩阵的测量方法

2.1　测量光路

基于液晶可变相位延迟器(Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR)的穆勒矩阵测量光路如图 1 所示, 其由偏振态生成模块、待测样品和偏振态检测模块组成。其中, 偏振态生成模块用于产生不同偏振态, 由偏振片、LCVR1 和 LCVR2 组成, 且偏振方向为 90°, LCVR1 和 LCVR2 的液晶分子长轴分别位于 45°和 90°。偏振态生成模块生成不同偏振态的光照射到待测物上, 并进入偏振态检测模块, 以检测和记录经待测物后光束的偏振态变化, 从而实现待测物的穆勒矩阵测量。偏振态检测模块为偏振态生成模块镜像, 最后, 由功率计测量得到最终出射光强。

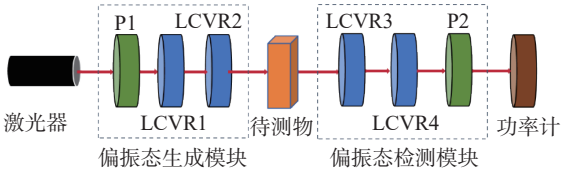

图 1　穆勒矩阵测量光路

Fig. 1　Mueller matrix measurement optical path

2.2 待测物穆勒矩阵的计算方法

在光学系统中，通常由 4×4 的穆勒矩阵来描述器件的偏振态，设 LCVR 的快轴与垂直方向的夹角为 θ，相位延迟量为 δ，则其穆勒矩阵可以表示为[17]：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc}}=\begin{pmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos^2 2\theta+\cos\delta\sin^2 2\theta & (1-\cos\delta)\sin 2\theta\cos 2\theta & -\sin\delta\sin 2\theta\\ 0 & (1-\cos\delta)\sin 2\theta\cos 2\theta & \sin^2 2\theta+\cos\delta\cos^2 2\theta & \sin\delta\cos 2\theta\\ 0 & \sin\delta\sin 2\theta & -\sin\delta\cos 2\theta & \cos\delta\end{pmatrix}, \tag{1}$$

90°偏振片的穆勒矩阵为：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{P}}=\begin{pmatrix}1 & -1 & 0 & 0\\ -1 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}, \tag{2}$$

则入射光经过偏振态生成模块后，出射光的斯托克斯矢量为：

$$\boldsymbol{S}_1=\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc2}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc1}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{P1}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{in}}, \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{in}}$ 是入射光的斯托克斯矢量，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{P1}}$ 为偏振片 P1 的穆勒矩阵，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc1}}$，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc2}}$ 为 LCVR-1 与 LCVR-2 的穆勒矩阵。根据式(1)~式(3)，可以计算得到出射光的斯托克斯矢量[18] 为：

$$\boldsymbol{S}_1=\begin{pmatrix}1\\ -\sin\delta_2\sin\delta_1\\ \cos\delta_1\\ \cos\delta_2\sin\delta_1\end{pmatrix}, \tag{4}$$

式中，δ_1 和 δ_2 分别代表 LCVR-1 与 LCVR-2 的相位延迟量。通过调节相位延迟量，可以得到不同的偏振态。为了求解待测物的穆勒矩阵，需要照射在待测物上的光具备 6 个偏振态：0°、45°、90°、135°线偏、左旋和右旋圆偏振光，其对应的液晶相位延迟量如表 1 所示。

表 1 偏振态与液晶可变相位延迟量对应关系

Tab. 1 Relation between polarization state and liquid crystal phase delay

δ_1/λ	δ_2/λ	Stokes矢量	偏振态
0.5	1	(1 1 0 0)	0°线偏振(H)
0.25	0.25	(1 0 1 0)	45°线偏振(P)
1	1	(1 −1 0 0)	90°线偏振(V)
0.25	0.75	(1 0 −1 0)	135°线偏振(M)
0.75	0.5	(1 0 0 1)	左旋圆偏振(L)
0.25	0.5	(1 0 0 −1)	右旋圆偏振(R)

待测物的穆勒矩阵可以表示为：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{sample}}=\begin{pmatrix}m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14}\\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24}\\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34}\\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44}\end{pmatrix}, \tag{5}$$

则不同偏振态的光照射到待测物后，经偏振态检测模块后，出射光束的斯托克斯矢量为：

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{out}}=\boldsymbol{M}_{\mathrm{P2}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc4}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc3}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{sample}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc2}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc1}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{P1}}\boldsymbol{S}_{\mathrm{in}}, \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{P2}}$ 为偏振片 P2 的穆勒矩阵，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc3}}$，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{lc4}}$ 为 LCVR-3 与 LCVR-4 穆勒矩阵。当表 1 中偏振态生成模块产生的 6 个偏振态分别入射到待测物上时，对于其中任一偏振态，偏振态检测模块都将产生 6 个偏振态，利用功率计分别测量该照射光经待测物、再分别经过 6 个偏振态后的出射光强。因此，当 6 个偏振态的光分别照射到待测物后，最终将得到 36 个光强值。然后，可根据公式(6)分别计算得到测量光强与被测物穆勒矩阵之间的关系。例如，当偏振态生成模块产生 0°线偏振光，偏振态检测模块也产生 0°线偏光检测时，可以根据公式(6)得到：

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{out}}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{S}_0\\ \boldsymbol{S}_1\\ \boldsymbol{S}_2\\ \boldsymbol{S}_3\end{pmatrix}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}m_{11}+m_{12}+m_{21}+m_{22}\\ m_{11}+m_{12}+m_{21}+m_{22}\\ 0\\ 0\end{pmatrix}, \tag{7}$$

其中在功率计上得到的光强为 $\boldsymbol{S}_0$(记为 HH)，因此有：

$$HH=\boldsymbol{S}_0=1/2(m_{11}+m_{21}+m_{12}+m_{22}). \tag{8}$$

同理，把测量光强和相应的检测偏振态分别代入公式(6)，便可以得到类似的 36 个方程。对 36 个方程联立求解，便可以得到待测物的穆勒矩阵。采用表 1 中不同偏振态的标记符号，同时，第一个字母代表偏振态生成模块产生的偏振态，第二个字母代表偏振态检测模块的偏振态。最终求解的待测物的穆勒矩阵为[19]：

$$\boldsymbol{M}_{\text{sample}}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix} HH+HV+VH+VV & HH+HV-VH-VV & PH+PV-MP-MM & RH+RV-LH-LV \\ HH-HV+VH-VV & HH-HV-VH+VV & PH+MV-PV-MH & RH+LV-RV-LH \\ HP-HM+VP-VM & HP-HM-VP+VM & PP+MM-PM-MP & RP+LM-RM-LP \\ HR-LL+VR-RL & HR+VL-HL-VR & PR+ML-PL-MR & RR+LL-RL-LR \end{pmatrix}. \tag{9}$$

由公式(5)的待测物穆勒矩阵可知, 原理上 16 个方程即可实现对其求解, 即只需要 4 个偏振态就可以实现穆勒矩阵测量。本文采用 6 个偏振态进行穆勒矩阵测量, 是为了减小实际测量过程中各种干扰和误差的影响。

2.3　仿真分析

为了验证上述方法的有效性, 通过仿真进行分析。首先仿真产生表 1 中的 6 个偏振态。为了验证输出的偏振态, 在偏振态生成模块后方放置一个偏振片作为检偏器, 并让其旋转一周, 即: 在公式(3)的基础上增加一个偏振片, 并分别计算旋转一周的光强变化。此外, 设工作波长为 635 nm, 并选取 n_o=1.5, n_e=1.886 1, 3 μm 盒厚的 LCVR 进行仿真。把表 1 数据代入变形的公式(3)进行仿真计算, 得到相应偏振态的光强变化, 归一化后如图 2(彩图见期刊电子版)所示。可以看出, 其光强变化符合 6 个对应偏振态经检偏器旋转一周的变化规律, 说明该结构可以产生所需的偏振态。

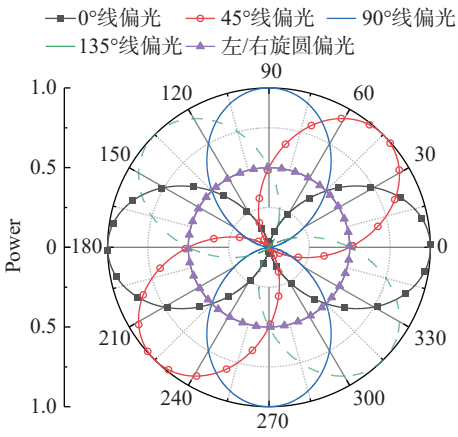

图 2　检偏器检测的各偏振态透过率仿真结果

Fig. 2　Simulation results of transmittance for various polarization states detected by the polarizer

以空气待测物为例, 按照图 1 所示光路, 对穆勒矩阵测量光路进行仿真。当被测物是空气时, 仿真分析 635 nm 入射光通过测量光路时, 功率计探测到的强度。采用表 1 中的 6 个偏振态分别入射到待测物进行仿真。对于入射的任一偏振态, 依据式(7)和式(8)计算出其经过偏振态检测模块 6 个偏振态后对应的出射光强, 即为仿真的探测光强。6 个偏振态依次循环入射后, 便可以仿真得到 36 个出射光强, 如表 2 所示。将表 2 中的数据代入公式(9)可以得到空气的穆勒矩阵, 如图 3(彩图见期刊电子版)所示。可以看出, 其和空气穆勒矩阵的理论值相同。

表 2　穆勒矩阵仿真测量的光强

Tab. 2　Simulated light intensity for Mueller matrix

	H	P	V	M	L	R
H	1	0.5	0	1	0.5	0.5
P	0.5	1	0.5	0	0.5	0.5
V	0	0.5	1	0.5	0.5	0.5
M	0.5	0	0.5	1	0.5	0.5
L	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0
R	0.5	0.5	0.5	0.5	0	1

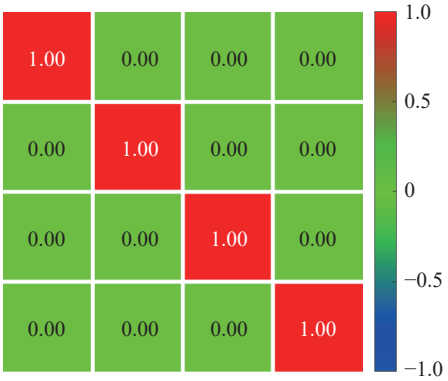

图 3　计算得到的空气穆勒矩阵

Fig. 3　Calculated Mueller matrix of air

采用上述方法, 还对 90°偏振片、90°1/4 波片的待测物进行仿真, 结果如图 4(彩图见期刊电子版)所示。

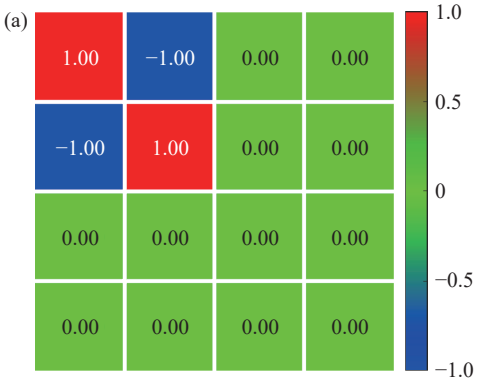

图 4 待测物穆勒矩阵仿真结果: (a) 90°偏振片; (b) 90° 1/4 波片

Fig. 4 Simulated Mueller matrix of sample: (a) 90° polarizer; (b) 90° quarter wave plate

可以看出, 仿真结果与偏振片和 1/4 波片的理论穆勒矩阵相同, 验证了穆勒矩阵测量光路的有效性。

3 液晶可变相位延迟器的过压驱动方法

3.1 过压驱动原理

液晶通常由长链分子组成, 施加电压时液晶分子会在电场的作用下发生偏转, 当撤去电压时, 液晶分子在弹性恢复力的作用下将会再次回到初始位置。施加电压时液晶的响应时间称为上升时间, 撤去电压后液晶的响应时间称为下降时间。一般情况下, 液晶的下降时间远远大于上升时间。因此, 以下降时间来定义液晶可变相位延迟器的响应速度[20]。

由穆勒矩阵的测量光路可知, LCVR 的响应速度决定了穆勒矩阵的测量速度。为了实现穆勒矩阵的快速测量, 本文采用过压驱动方法来提升 LCVR 的响应速度, 基本原理如图 5 所示。设液晶的初始电压为 V_1, 其下降到电压 V_3 以产生所需的相位延迟。传统方法是直接给液晶施加电压 V_3, 此时其响应时间为Δt_2。为了缩短液晶的响应时间, 首先给液晶施加一个时间为Δt_1 的 0 电压 V_2, 使液晶快速响应。当 LCVR 的相位延迟量到达目标值后, 立即将电压切换为 V_3, 以使液晶相位延迟量保持不变[21]。这样, 即可以缩短液晶的响应时间, 又提升了 LCVR 的响应速度。

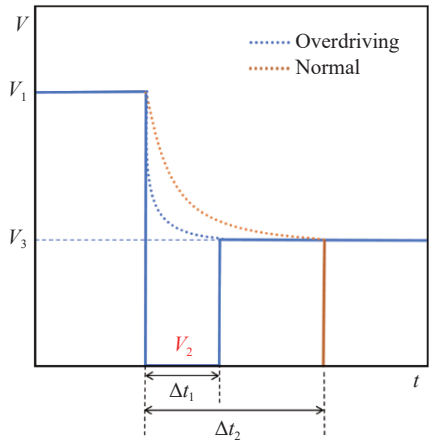

图 5 液晶的过压驱动原理

Fig. 5 Principle of overdriving for liquid crystal

3.2 相位延迟量与电压的关系

由过压驱动原理可知, 为了实现过压驱动, 须知道相位延迟量与电压的关系。因此, 首先进行液晶相位延迟量的测量, 其测量光路如图 6 所示。635 nm 激光器发出的光经过准直透镜 L 后变为平行光束, 该光束经过偏振片 P1、液晶可变相位延迟器和偏振片 P2 后, 被光电探测器接收。同时, 光电探测器连接到示波器上, 可获得待测的光强信号。光路中, 偏振片 P1 的偏振方向和液晶分子排列方向呈 45°放置, 同时, 偏振片 P2 和 P1 的偏振方向垂直。这样, 经过偏振片 P1 的线偏振光, 经过液晶相控阵列后, 形成 o 光和 e 光, 再经过偏振片 P2 后发生双光束干涉。其干涉强度的大小取决于 o 光和 e 光的相位差。因此, 通过测量干涉强度的变化, 可以测量液晶可变相位延迟器的电压响应特性。

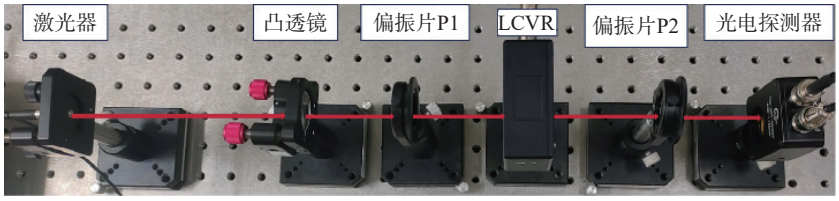

图 6 液晶相位延迟量测量光路

Fig. 6 Optical configuration for liquid crystal phase delay measurement

设 o 光和 e 光的光强相等, 则光的干涉强度可以表示为[22]:

$$I = 4I_0\cos^2\frac{\Delta\varphi}{2} \quad , \qquad (10)$$

其中 I_0 表示 o 光和 e 光的光强, $\Delta\varphi$表示相位差。则液晶的相位延迟量可用下式求解:

$$\Delta\varphi = 2\arccos\sqrt{I_2} \quad , \qquad (11)$$

式中 I_2 表示归一化光强, 将$\Delta\varphi$除以 2π 可以获得相位延迟量。

为了获得液晶相位延迟量与驱动电压的关系, 首先采用上述方法和测量光路, 给 LCVR 施加驱动电压, 得到该驱动电压下 LCVR 的相位延迟量。再依次施加不同的电压, 一一测量其对应的相位延迟量, 便可以获得如图 7 所示的相位延迟量与电压的关系。

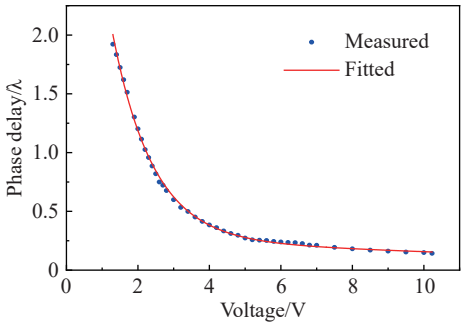

图 7　相位延迟量与驱动电压的关系

Fig. 7　Phase delay as a function of driving voltage

对测量数据进行曲线拟合, 可得 LCVR 的相位延迟量:

$$\Phi = A_1\cdot\exp\left(-\frac{V}{t_1}\right)+A_2\cdot\exp\left(-\frac{V}{t_2}\right)+y_0 \quad , \qquad (12)$$

其中 V 表示施加电压, A_1=5.525, A_2=5 637.152, t_1=113.175, t_2=51 357 900, y_0=−5 636.886。这样, 便可以依据公式(12)求解任意相位延迟量对应的驱动电压, 以在过压驱动中保持对电压的精确控制[23]。

3.3　过压驱动实验

为了确认表 1 中偏振态切换时所需的时间, 首先利用公式(12)进行常规驱动, 测量可得依次产生 6 种偏振态时的切换时间如表 3 所示。可以看出, 当升压时, 液晶响应速度较快, 而降压过程中, 液晶响应速度较慢。当偏振态产生模块依次产生 6 个偏振态时, 根据表中的数据可以计算得到其所需的时间为 14.1 ms, 即产生频率为 71 Hz。测量待测物穆勒矩阵所需的总时间为 98.7 ms, 约 10 Hz。虽然实验中已经采用快速响应的液晶材料, 但是整体响应速度还是较慢, 无法满足实时测量的应用需求。因此, 需要采用过压驱动技术提升响应速度[24]。

表 3　偏振态切换时间

Tab. 3　Switch time of polarization state

偏振态	LCVR-1/λ	时间/ms	LCVR-2/λ	时间/ms
①H→P	0.5→0.25	0.6	1→0.25	0.6
②P→V	0.25→1	3.5	0.25→1	3.5
③V→M	1→0.25	0.6	1→0.75	0.8
④M→L	0.25→0.75	4.2	0.75→0.5	0.7
⑤L→R	0.75→0.25	0.7	0.5→0.5	0
⑥R→H	0.25→0.5	3.8	0.5→1	4.3

由图 5 可知, 为了实现过压驱动, 还需知道过压的施加时间Δt_1。本文以 0.25 λ 切换到 1 λ 为例, 给出过压施加时间的求解方法。由公式(12)计算得到, 切换前后对应的电压为 5.456 V 和 2.247 V。为此, 首先测量从 5.456 V 电压直接降到 0 V 时, LCVR 的相位变化量随时间的变化关系。采用图 6 的光路进行测量, 光电探测器将光信号转化为电信号, 并利用示波器记录电压切换时的强度变化情况, 结果如图 8 所示。对其进行归一化处理得到归一化光强 I_2。这样便可以利用公式(11)计算出切换电压时的相位变化量$\Delta\varphi$ 与时间的关系, 如图 9 所示。可以看出, 当相位延迟量变化 0.75 λ 时, 其对应的时间Δt_1 约为 1 ms。

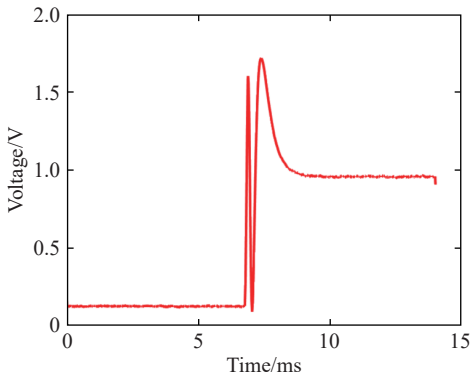

图 8　示波器存储的光强变化曲线

Fig. 8　Light intensity change curve stored on oscilloscope

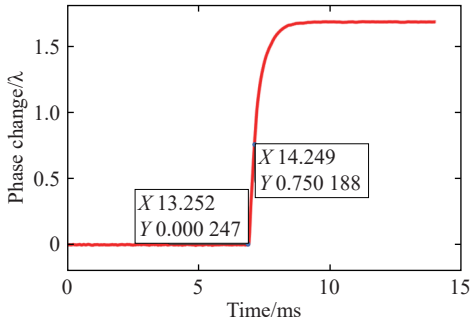

图 9 相位变化量与响应时间的关系

Fig. 9 Relation between phase change and response time

得到过压时间后，可以采用图 5 所示的过压驱动方法，进行 LCVR 的过压驱动，从而提升响应速度。为了同步记录施加电压与 LCVR 的响应，在电路板给液晶施加驱动电压的线路上，并联一条测试支路，用于测量施加电压的实时变化。采用双通道示波器，光电探测器的输出信号接入通道 1，并联支路接入通道 2，实现施加电压和液晶响应的同步显示。同时，图 10 给出了正常驱动和过压驱动的结果对比。

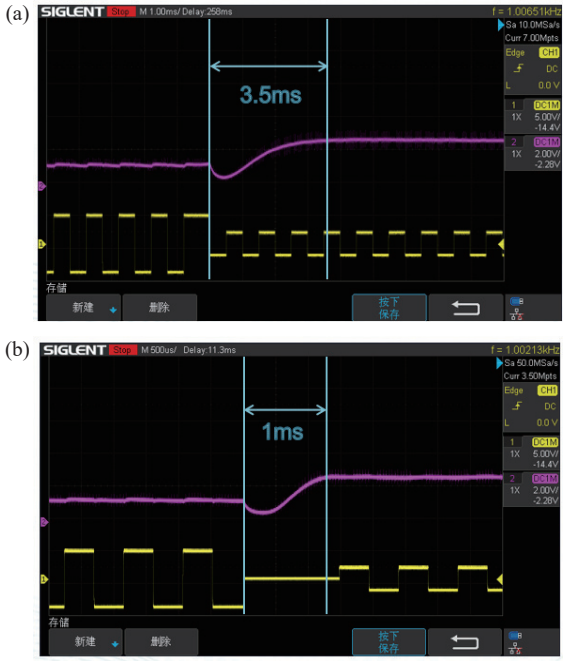

图 10 相位延迟量从 0.25 λ 切换到 1 λ 的对比结果。(a) 正常驱动; (b) 过压驱动

Fig. 10 Comparison results for the phase delay switched from 0.25 λ to 1 λ. (a) Normal driving; (b) overdriving

图 10(a)和 10(b)中上方为相位响应曲线，下方为施加的驱动电压。图 10(a)给出正常驱动时，相位延迟量从 0.25 λ 切换到 1 λ 的切换时间，为 3.5 ms。图 10(b)为过压驱动的结果，可以看出，当施加 0 V 过压驱动 1 ms 并施加保持 2.247 V 电压后，LCVR 的相应延迟量保持稳定。由此可知，采用过压驱动技术后，LCVR 的响应时间从 3.5 ms 减小到 1 ms，使得其响应速度提升 3.5 倍[25]。

采用上述方法对表 3 中 6 种偏振态切换都进行过压驱动，过压前后的响应时间如图 11 所示。可以看出，过压驱动后，LCVR 的响应时间急剧缩短，最大响应时间为 1 ms，最小响应时间低至 0.1 ms。同时，依据图 11 中的过压响应时间可以计算得到，偏振态生成模块产生 6 个偏振态的时间为 2.4 ms。过压驱动后，6 个偏振态的生成频率从 71 Hz 提升到 417 Hz，待测物穆勒矩阵的测量频率从 10 Hz 提升到 60 Hz，测量频率提升约 6 倍，实现了穆勒矩阵的高速测量。

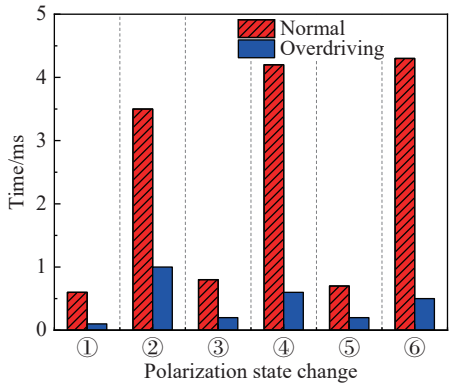

图 11 测量穆勒矩阵的偏振态切换时间

Fig. 11 Polarization state switching time for measuring the Mueller matrix

4 穆勒矩阵测量实验

4.1 多偏振态产生实验

为了实现穆勒矩阵的测量，首先需要产生 6 种偏振态。为此，设计如图 12 的实验验证光路，以验证偏振态生成模块产生偏振态的可行性和有效性。实验光路包括 635 nm 激光器、偏振态生成模块、偏振片、孔径光阑及功率计。其中，偏振态生成模块包括一个偏振片和两个 LCVR，且其相互关系如图 1 所示[26]。同时，为了实现对 LCVR 的精确控制，还设计了温控系统，能够把偏振态生成模块的内部温度恒定在 45 °C。光路中

的偏振片用于检测生成的偏振态, 孔径光阑用于限制光束口径。检测时, 偏振片旋转一周, 并利用功率计记录对应的光功率, 通过功率的变化分析出射光的偏振态[27]。

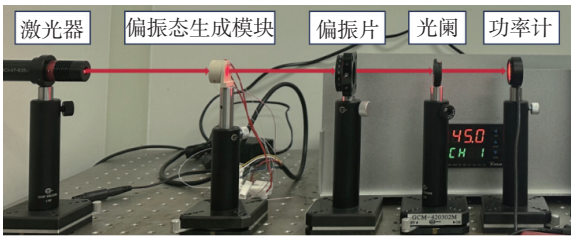

图 12　偏振态生成实验光路

Fig. 12　Experimental optical path for polarization state generation

首先, 结合表 1 与公式(12), 对 LCVR 施加电压, 产生 0°线偏光。然后, 使偏振片旋转一周, 功率计测量结果如图 13(彩图见期刊电子版)所示。同时, 为了分析偏振态产生的准确性, 也给出了理论仿真结果。可以看出, 在偏振片旋转一周的过程中, 在 0°和 180°偏振方向出现了极大值, 在为 90°和 270°偏振方向出现了极小值, 符合马吕斯定律对线偏振光的描述。实验数据和理论值几乎重合, 说明有效地产生了线偏振光。定量结果显示, 最大光强为 7.987 mW, 最小光强为 10.1 μW, 消光比达 790∶1。

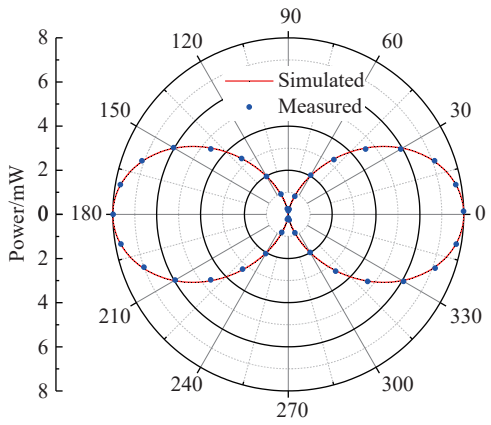

图 13　线偏振光的光强变化

Fig. 13　Intensity change of linearly polarized light

采用类似方法产生左旋圆偏光。接着, 使偏振片旋转一周, 光功率测量结果如图 14(彩图见期刊电子版)所示。可以看出, 在偏振片旋转过程中, 光强几乎不变, 且和理论曲线几乎重合。测量数据显示, 光强的最大值与最小值分别为 3.982 mW 与 3.941 mW, 椭偏度为 1.03%, 接近理想圆偏光。

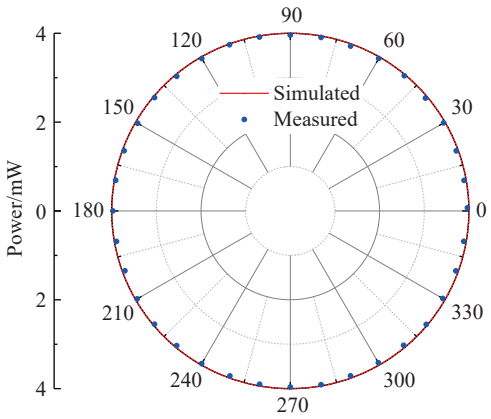

图 14　左旋圆偏振光的光强变化

Fig. 14　Intensity change of left-hand circularly polarized light

同理, 对其他 4 种偏振态进行验证, 其消光比和椭偏度结果如表 4 所示。实验结果表明, 利用偏振态生成模块可以产生所需的 6 种偏振态。

表 4　偏振态产生实验结果

Tab. 4　Experimental results for polarization state generation

偏振态	最小值/μW	最大值/mW	消光比	椭偏度
H	10.1	7.987	790∶1	
P	10.5	7.975	759∶1	
V	10.4	7.962	765∶1	
M	10.2	7.976	781∶1	
L	3.941	3.982		1.03%
R	3.936	3.978		1.06%

4.2　穆勒矩阵测量实验

搭建如图 15 所示光路图进行待测物的穆勒矩阵测量与验证。其中, 偏振态检测模块用于检测经待测物后, 光束的偏振态。功率计用于记录输出光的功率。

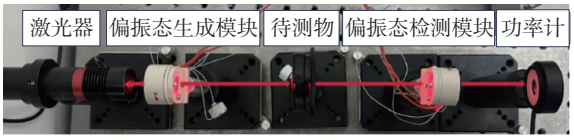

图 15　穆勒矩阵实验测量装置

Fig. 15　Experimental configuration for Mueller matrix measurement

实验中，分别将空气、偏振片、1/4 波片作为待测样本，进行穆勒矩阵测量。首先，对空气进行穆勒矩阵测量。利用偏振态生成模块产生一种偏振态，然后利用偏振态检测模块依次产生 6 种偏振态，并分别记录出射光强。接着，偏振态生成模块依次产生其他 5 种偏振态，并分别利用偏振态检测模块进行测量，最终可以得到 36 个光强值如表 5 所示。把表 5 的数据代入公式(9)，可以求出归一化后的穆勒矩阵如图 16(彩图见期刊电子版)所示。可以看出，该结果与理论仿真结果非常接近，均方误差(MSE)为 0.0004。

表 5　穆勒矩阵的测量光强

Tab. 5　Measured light intensity for Mueller matrix

	H	P	V	M	L	R
H	5.52	2.55	0.055	2.68	2.65	2.78
P	2.66	5.49	2.53	0.063	2.62	2.74
V	0.056	2.58	5.51	2.45	2.62	2.73
M	2.54	0.058	2.61	5.57	2.79	2.65
L	2.75	2.83	2.94	2.64	5.48	0.069
R	2.69	2.65	2.72	2.74	0.058	5.51

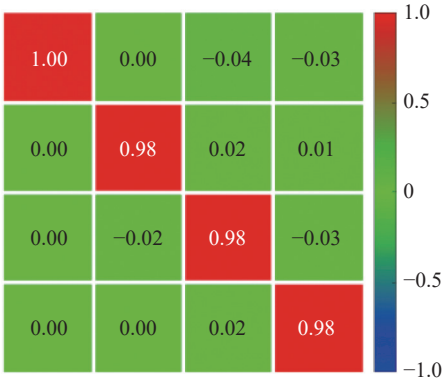

图 16　测量的空气穆勒矩阵

Fig. 16　Measured Mueller Matrix of air

同理，对于 90°偏振片与 90°1/4 波片进行穆勒矩阵测量，结果如图 17(彩图见期刊电子版)所示。结果显示，90°偏振片和 90°1/4 波片的穆勒矩阵测量结果与理论仿真结果非常接近，其 MSE 分别为 0.0003 和 0.0002。实验和仿真结果均证明本文的测量装置能够准确测量物体的穆勒矩阵。

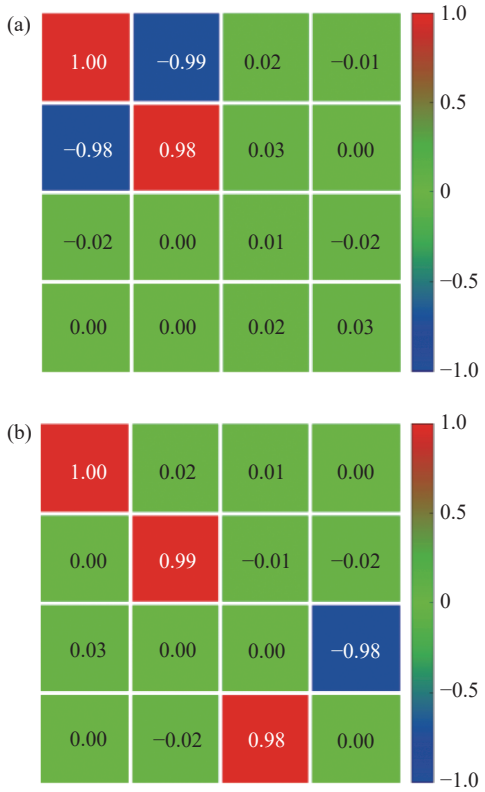

图 17　待测物穆勒矩阵。(a) 90°偏振片；(b) 90° 1/4 波片

Fig. 17　Measured Mueller matrix of sample. (a) 90° polarizer; (b) 90° 1/4 waveplate

5　结　论

本文重点研究了穆勒矩阵的高速测量方法。首先，基于液晶的偏振态控制方法，仿真偏振态的生成及穆勒矩阵的测量。结果显示，偏振态生成模块可以产生 6 种偏振态并实现待测物的穆勒矩阵测量。然后，提出基于液晶可变相位延迟器的过压驱动方法。利用该方法将 6 个偏振态的生成频率从 71 Hz 提升到 417 Hz，穆勒矩阵的测量频率从 10 Hz 提升到 60 Hz，提升了约 6 倍。最后，搭建穆勒矩阵测量实验光路，进行实验验证。利用偏振态生成模块产生 6 种偏振态，该模块产生的线偏光消光比优于 750∶1，圆偏光椭偏度低于 1.06%，6 种偏振态的透过率与仿真得到的曲线基本一致，验证了偏振态生成模块的有效性。对物体穆勒矩阵测量的有效性进行验证。结果显示，对空气、偏振片与 1/4 波片，穆勒矩阵测量的均方误差(MES)均优于 0.0004，实现了穆勒矩阵的有效测量。

总之, 本文提出的基于过压驱动的穆勒矩阵高速测量方法, 可以实现高速、高精度的穆勒矩阵测量, 为光学材料动态特性分析、生物组织实时成像及工业在线检测等领域提供技术途径。

参考文献:

[1] SI L, HUANG T Y, WANG X J. Deep learning Mueller matrix feature retrieval from a snapshot Stokes image[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 8676-8689.

[2] DONG H, ZHANG H L, HU D J J. Polar decomposition of Jones matrix and Mueller matrix of coherent Rayleigh backscattering in single-mode fibers[J]. *Sensors*, 2024, 24(6): 1760.

[3] SINGH M D, GHOSH N, VITKIN I A. Mueller matrix polarimetry in biomedicine: enabling technology, biomedical applications, and future prospects[M]//RAMELLA-ROMAN J C, NOVIKOVA T. Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing: Clinical and Preclinical Applications. Cham: Springer, 2022: 61-103.

[4] ZHANG Y N, WU J Y, JIA L N, *et al*.. Advanced optical polarizers based on 2D materials[J]. *npj Nanophotonics*, 2024, 1(1): 28.

[5] GE J G, YUAN B, CHEN H J, *et al*.. Anisotropy in microstructural features and tensile performance of laser powder bed fusion NiTi alloys[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 8656-8668.

[6] SOLEILLET P. Sur les paramètres caractérisant la polarisation partielle de la lumière dans les phénomènes de fluorescence[J]. *Annales De Physique*, 1929, 10(12): 23-97.

[7] MUELLER H. The foundation of optics[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, 38(7): 661-669.

[8] BICKEL W S, BAILEY W M. Stokes vectors, Mueller matrices, and polarized scattered light[J]. *American Journal of Physics*, 1985, 53(5): 468-478.

[9] GOLDSTEIN D H, CHIPMAN R A. Error analysis of a Mueller matrix polarimeter[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(4): 693-700.

[10] LU S Y, CHIPMAN R A. Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(5): 1106-1113.

[11] FUJIWARA H. *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.

[12] GU H G, CHEN X G, ZHANG CH W, *et al*.. Study of the retardance of a birefringent waveplate at tilt incidence by Mueller matrix ellipsometer[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(1): 015401.

[13] 赵鑫鑫, 宋茂新, 许智龙, 等. 离轴三反望远物镜的穆勒矩阵测量[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1212004.
ZHAO X X, SONG M X, XU ZH L, *et al*.. Mueller matrix measurement of off-axis three-mirror telescope objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 1212004. (in Chinese).

[14] 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.

[15] AAS L M S, ELLINGSEN P G, KILDEMO M. Near infra-red Mueller matrix imaging system and application to retardance imaging of strain[J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(9): 2737-2741.

[16] SHENG SH, CHEN X G, CHEN CH, *et al*.. Design and calibration of a Mueller matrix microscope based on liquid crystal variable retarders[J]. *Thin Solid Films*, 2023, 770: 139779.

[17] 陈冬静, 崔宏青, 冯亚云, 等. 一种新的测量扭曲向列相液晶盒盒厚和扭曲角的 Stokes 矢量法[J]. 液晶与显示, 2007, 22(6): 662-667.
CHEN D J, CUI H Q, FENG Y Y, *et al*.. Novel Stokes parameter method for determination of cell thickness and twist angle of twisted nematic liquid crystal cells[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(6): 662-667. (in Chinese).

[18] 李作恩, 鞠学平, 胡春晖, 等. 通道型偏振光谱仪望远镜组偏振效应分析与优化[J]. 液晶与显示, 2023, 38(12): 1728-1735.
LI Z E, JU X P, HU CH H, *et al*.. Analysis and optimization of polarization effect of telescope group of channel polarization spectrometer[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(12): 1728-1735. (in Chinese).

[19] 杨志勇, 张志伟, 蔡伟, 等. 基于 Mueller 矩阵的目标偏振特性分析[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 0112005.
YANG ZH Y, ZHANG ZH W, CAI W, *et al*.. Analysis of polarization characteristics of targets based on Mueller matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0112005. (in Chinese).

[20] 史文雄, 卢绮涵, 梁如标, 等. 用于液晶调控器件的过压驱动技术进展[J]. 液晶与显示, 2024, 39(3): 384-392.
SHI W X, LU Q H, LIANG R B, *et al*.. Development of overdriving technology for liquid crystal modulatory devices[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 384-392. (in Chinese).

[21] GUO H Y, LI Q, XU Y J, *et al*.. Line of sight correction of high-speed liquid crystal using overdriving technology[J]. *Electronics*, 2020, 9(9): 1477.

[22] 芦永军, 曹召良, 曲艳玲, 等. 液晶波前校正器动态位相响应特性研究[J]. 液晶与显示, 2012, 27(6): 730-735.
LU Y J, CAO ZH L, QU Y L, *et al*.. Dynamic phase response of liquid crystal wavefront corrector[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6): 730-735. (in Chinese).

[23] 杜莹, 陈梅蕊, 刘禹彤, 等. 基于掩模光刻的液晶波前校正器设计与制备[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(2): 324-333.
DU Y, CHEN M R, LIU Y T, *et al*.. Design and fabrication of liquid crystal wavefront corrector based on mask lithography[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 324-333. (in Chinese).

[24] GAMEL O, JAMES D F V. Measures of quantum state purity and classical degree of polarization[J]. *Physical Review A*, 2012, 86(3): 033830.

[25] 张郁文, 刘丙才, 王红军, 等. 同步相移横向剪切干涉中偏振器件的误差建模[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(3): 640-647.
ZHANG Y W, LIU B C, WANG H J, *et al*.. Error modeling of polarization devices in simultaneous phase-shifted lateral shearing interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 640-647. (in Chinese).

[26] 王启东, 穆全全, 刘璐璐, 等. 宽波段大视角液晶偏振转换器研究进展[J]. 液晶与显示, 2024, 39(5): 683-696.
WANG Q D, MU Q Q, LIU L L, *et al*.. Research progress on liquid crystal polarization converter with a large field of view and broadband[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 683-696. (in Chinese).

[27] 史浩东, 卢琦, 赵义武, 等. 基于阵列光学的快速多维度成像制导光学系统设计[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(6): 1418-1430.
SHI H D, LU Q, ZHAO Y W, *et al*.. Design of a fast multi-dimensional imaging guidance optical system based on array optics[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1418-1430. (in Chinese).

作者简介：

陆焕钧(1989—)，女，江苏南通人，博士研究生，2010 年及 2013 年于南京大学获得学士及硕士学位，2018 年于英国谢菲尔德大学获得博士学位。主要从事液晶自组装结构以及 X 射线晶体学研究。E-mail: luhuanjun@usts.edu.cn

曹召良(1974—)，男，河南济源人，博士，教授，博士研究生导师，2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事液晶自适应光学系统的光学设计、光学实验以及理论分析和模拟工作。E-mail: caozl@usts.edu.cn