



用于偏振成像的液晶微偏振阵列研究进展

张士元, 孙子珺, 穆全全, 彭增辉, 刘华, 刘畅

引用本文:

张士元, 孙子珺, 穆全全, 彭增辉, 刘华, 刘畅. 用于偏振成像的液晶微偏振阵列研究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 37(3): 292–309.

ZHANG Shi-yuan, SUN Zi-jun, MU Quan-quan, PENG Zeng-hui, LIU Hua, LIU Chang. Review on liquid crystal micropolarizer array for polarization imaging[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(3): 292–309.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0330>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于琼斯矩阵的液晶偏振光栅扭曲角及厚度的测量方法

Method for measuring the twist angle and thickness of liquid crystal polarization grating based on Jones matrix

液晶与显示. 2021, 36(5): 656–662 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0336>

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>

非等光强正交圆偏振光对液晶偏振光栅衍射特性的影响

Diffraction properties of liquid crystal polarization gratings with orthogonal circular polarization and different intensities waves

液晶与显示. 2018, 33(2): 144–149 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20183302.0144>

液晶微透镜阵列研究进展

Research progress of liquid crystal microlens arrays

液晶与显示. 2020, 35(7): 749–761 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203507.0749>

垂直排列硅上液晶显示器件反射率的提升

Improvement of reflectivity of vertical alignment liquid crystal on silicon

液晶与显示. 2021, 36(7): 947–953 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0303>

文章编号:1007-2780(2022)03-0292-18

用于偏振成像的液晶微偏振阵列研究进展

张士元^{1,2}, 孙子珺^{1,2}, 穆全全^{1,2*}, 彭增辉^{1,2}, 刘 华³, 刘 畅³

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;

2.中国科学院大学 材料与光电研究中心,北京 100049;

3.东北师范大学 物理学院,吉林 长春 130033)

摘要:微偏振阵列是分焦平面偏振计的核心元件。相较于纳米线栅阵列,液晶偏振阵列有着设计灵活、工艺简便、性能稳定等独特优势,有望实现高性价比、高精度的偏振测量与成像。本文综述了近年来国内外科研团队针对液晶微偏振阵列展开的研究,系统阐述了基于宾主型、偏振旋转型和相位延迟型 3 大类液晶偏振阵列的器件结构和工作原理,不同的液晶排列结构可以实现从单一线偏振到全 Stokes 矢量的测量和成像,最后讨论了液晶微偏振阵列与偏振探测技术相结合的发展趋势和应用中面临的挑战。

关键词:液晶器件;微偏振阵列;光控取向;分焦平面偏振成像

中图分类号:O436;O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0330

Review on liquid crystal micropolarizer array for polarization imaging

ZHANG Shi-yuan^{1,2}, SUN Zi-jun^{1,2}, MU Quan-quan^{1,2*},PENG Zeng-hui^{1,2}, LIU Hua³, LIU Chang³

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, 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. *School of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130033, China)*

Abstract: Micropolarizer array (MPA) is the core component of division of focal plane polarimeter (DoFP). Compared with nano-wire-grid polarizer array, liquid crystal micropolarizer (LCMP) array has some unique advantages such as flexible design, simple process, good stability and show great

收稿日期:2021-12-17; **修订日期:**2022-01-05.

基金项目:国家重点研发计划 (No.2021YFB3600300); 国家自然科学基金 (No.11704378, No.11974345, No.61775212, No.61875036, No.61975202, No.11774342); 中国科学院国际人才计划 (No.2020VTA0004) Supported by National Key R&D Program of China (No.2021YFB3600300); National Natural Science Foundation of China (No.11704378, No.11974345, No.61775212, No.61875036, No.61975202, No.11774342); Chinese Academy of Sciences President's International Fellowship Initiative (No.2020VTA0004)

* 通信联系人, E-mail: muquanquan@ciomp.ac.cn

potential to achieve not only cost-effective but also high precision polarization measurement and imaging. In this paper, we summarize the researches on LCMP array domestic and oversea in recent years. Here, three working principle of LCMP arrays: guest-host effect, polarization rotation and phase retardation as well as their structure are systematically elaborated. Different alignment structures of LCMP can achieve not only linear but full Stokes polarimetry. Finally, future development trends and key challenges of liquid crystal micropolarizer arrays and DoFP imaging technology are discussed.

Key words: liquid crystal device; micropolarizer array; photoalignment; division of focal-plane polarization imaging

1 引言

传统光学成像系统通过对目标光强度的探测来获取信息。除强度信息外,不同物体在对光产生反射、折射或散射等过程中,其偏振特性是存在显著差异的。通过对目标偏振信息进行分析 and 成像,可以提高在复杂背景下识别目标的能力,这将使得在强度成像系统下“不可见”的目标成为“可见”^[1]。因此,偏振成像技术在大气遥感探测^[2-4]、干涉测量^[5-6]、生物医学^[7-8]、军事探测^[9-10]等领域都具有相当大的应用潜力。这激起了国内外科研人员对偏振成像技术的探索,尤其是近十余年来,对偏振成像系统、器件和设备的研究得到了迅速发展。

偏振成像系统通过探测目标 Stokes 矢量来获取目标全部的偏振特性。Stokes 矢量包含 4 个代表不同偏振态光强度的参数 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 。其中 S_0 表示总光强度; S_1 表示为 0° 、 90° 线偏振光强之差, S_2 表示 $\pm 45^\circ$ 线偏振光强之差,这两个分量代表了线偏振程度; S_3 表示为右旋与左旋圆偏振光强之差,代表圆偏振程度。需要对目标不同偏振态强度进行多次采集才能获取其完整的偏振信息。

按照偏振信息采集的方式可以将偏振成像系统的工作模式分为分时偏振成像和同时偏振成像^[11]。分时偏振型(Division of time polarimeter, DoTP)成像系统一般采用动态偏振元件,如旋转偏振片、电控液晶调制器等,这就需要目标场景处于静止状态且光照条件相同来避免成像模糊。同时偏振成像系统,则是在单次曝光下即可获得目标多幅不同偏振态的图像;按照成像系统结构可以分为分振幅型(Division of amplitude polarimeter, DoAmP)、分孔径型(Division of aperture

polarimeter, DoAP)和分焦平面型(Division of focal-plane polarimeter, DoFP)3种偏振成像装置。相比于体积庞大的 DoAmP 和光学结构复杂的 DoAP,分焦平面型偏振成像系统(DoFP)因其结构简单紧凑、性能稳定和适用于可移动基座的机载平台等优势,成为当下的研究热点。

DoFP 成像系统的工作原理是:在传感器焦平面上集成像素级尺度微偏振片,形成与探测器像元——对应的微偏振阵列(Micropolarizer array, MPA),分别提取目标光中的不同偏振方位的强度信息,反向解算出其 Stokes 矢量,进而重建出目标光场中偏振度、偏振角等偏振信息^[12-15]。可见,微偏振阵列是分焦平面型偏振成像系统的核心元件。

目前,工业级偏振相机中多采用索尼 IMX250MZR 型 CMOS 偏振传感器,其中应用的是纳米线栅阵列^[15]。该元件主要通过光刻或压印技术制备。这需要纳米量级的加工精度和繁复的化学处理工序,成本较高,且容易由于加工失准而造成消光比下降。用于可见光波段偏振成像的纳米线栅阵列,其典型参数,如 2014 年中科大 Zhang 等^[16-18]利用聚焦离子束刻蚀工艺,要求该阵列矩形栅格周期仅为 140 nm,占空比为 0.5。另外,该纳米线栅单元为一维栅格结构只对线偏振矢量敏感,因此利用该器件仅能求解得到 Stokes 矢量中前 3 个分量 S_0 、 S_1 和 S_2 ,实现对线偏振信息的探测与成像。

为了实现对目标全部偏振信息的探测,还需要拓展微偏振阵列器件对于圆偏振分量 S_3 的探测能力。目前市售的全 Stokes 偏振相机,如 Bossa - Nova - Vision (SALSA)^[19],其核心是液晶调制器,通过电压控制改变液晶元件的相位延迟量或光轴方向来实现不同椭圆度或旋向的偏振调制状态,其本质仍是分时型偏振成像系统。而

商用分焦平面型全 Stokes 偏振相机领域尚属空白。近年来,基于金属超表面激发表面等离子共振实现圆偏振光检测的原理,2012 年美国空军实验室 Bachman 等^[20],2019 年亚利桑那大学 Basiri 等^[21],2021 年中科院上海光机所 Zhang 等^[22],先后提出了多种可以实现红外波段圆偏振响应的超表面结构,并制得了可同时探测线偏振和圆偏振的阵列化器件,有潜力应用于新一代全 Stokes 分焦平面型偏振成像系统。但这些器件结构较为复杂,同样面临加工精度要求高和应用波段局限、消光比低等问题,造成偏振测量精度和成像质量下降,多数仍处于实验阶段。

综上所述,对微偏振阵列的精密微纳加工和优化设计严重制约了其发展。随着液晶光控取向技术^[23-25]的兴起,液晶器件由均一的摩擦取向方式逐渐向多畴化的复杂取向方式发展,以实现更复杂的光场调控功能^[25-27]。近年来,基于光控取向技术的液晶微偏振阵列(Liquid crystal micropolarizer array, LCMP array)被广泛研究^[28-38]。相较于纳米线栅阵列和金属超表面阵列,利用光控取向技术来制备阵列化液晶器件,将加工精度要求从纳米级降低至微米量级;器件加工工序大幅减少的同时还有着均匀度高、设计灵活、性能稳定、成本低廉等独特优势。本文综述了近 10 年来国内外科研团队针对液晶微偏振阵列器件展开的研究,系统性阐述了不同液晶微偏振阵列器件的结构和工作原理,最后结合偏振探测技术的发展趋势讨论了液晶微偏振阵列器件应用中面临的挑战,并展望了其发展方向。

2 液晶微偏振阵列基本原理

利用微偏振阵列对入射光偏振信息进行同时探测的原理是,阵列中数个微型的偏振片组成一个超像素,依据检出的光强信号反向解算出入射光的 Stokes 矢量,如公式(1)。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}. \quad (1)$$

液晶微偏振阵列,最核心的设计思路是利用液晶多畴结构将大尺寸的均匀偏振片微型化、阵列化,转变为不同取向的微型偏振片的集合。液

晶多畴结构可利用阵列化光控取向技术获得,而每个微畴中的液晶分子依据其工作特性大致可分为两类:一类是液晶分子有序排列的特性;另一类则是液晶分子本身的双折射特性。由于向列相液晶在可见和近红外波段是不吸光的,因此前者可通过掺杂二向色染料来构成宾主型微偏振阵列;后者则是在液晶层对入射光进行偏振调制后,再附加偏振片进行偏振检出,来共同构成偏振阵列。这一类液晶微偏振阵列,根据液晶分子的排列方式,又可分为基于扭曲排列得到的偏振旋光型液晶微偏振阵列和基于平行排列得到的相位延迟型液晶微偏振阵列。下面将简单介绍这 3 种液晶微偏振阵列的工作原理。

2.1 二色性染料与液晶的宾主效应

二向色性染料同液晶分子一样可视为棒状各向异性分子。如图 1(a)所示,对于正二色性染料,当入射光电矢量 $\mathbf{E}$ 平行于其分子长轴时,光线基本上被吸收;当入射光电矢量 $\mathbf{E}$ 垂直于其分子长轴时,光线基本上通过^[38]。将二向色染料

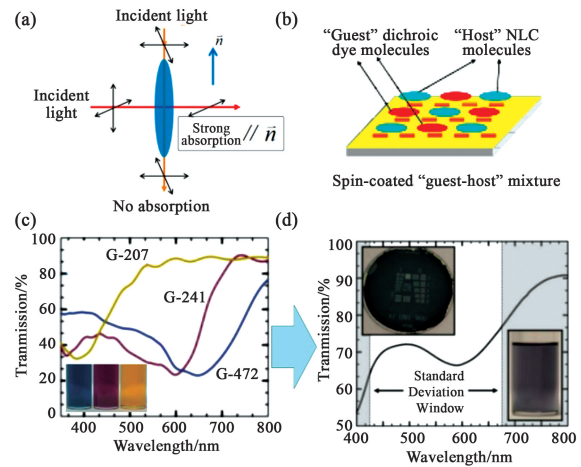


图 1 (a) 正二色性染料的二向色性示意图; (b) 液晶分子促使二色性染料分子协同排列^[31]; (c) 3 种单一的二色性染料的透射率光谱; (d) 3 种染料按比例混合后的二色性染料在氯仿中的透射率光谱($G-472 : G-207 : G-241 = 10 : 10 : 2$)^[30]。

Fig.1 (a) Dichromatic schematic diagram of positive dichroic dye; (b) LC molecules promote the uniform alignment of dichroic dye molecules^[31]; (c) Transmission of three single and (d) mixed dichroic dyes ($G-472 : G-207 : G-241 = 10 : 10 : 2$) in chloroform^[30].

(guest) 掺入液晶材料(host)中形成宾主效应(GH)器件,其工作原理类似于拉伸聚乙烯醇(polyvinyl-alcohol, PVA)的吸收型偏振片^[38-39],液晶分子只是起到促使染料分子与其指向矢协同排列的作用,如图1(b)所示^[31],而染料分子的二色性比、有序参数、吸收光谱和掺杂比例才是决定器件的整体性能的主要因素。二色性比 D 是染料分子对光线在与染料长轴平行和垂直两个方向上的吸收系数($A_{//}$ 和 $A_{\perp}$)之比,如式(2)所示;由于分子热运动,染料分子的排列同样存在与指向矢偏离的现象,有序参数 Q 如式(3)所示。同时,单一一种二色性染料的光谱透过范围一般是有限的,因而带有颜色。若希望对一个比较宽的波段都具有二色性吸收的能力,则需要多种不同颜色的染料进行混合^[30],如图1(c,d)所示,各掺杂的浓度和比例也将影响器件的透过率和消光比 EXR,如式(4)所示,其中 $T_{//}$ 和 $T_{\perp}$ 分别为与器件透振轴平行或垂直的线偏振光透过率。

$$D = \frac{A_{//}}{A_{\perp}}, \quad (2)$$

$$Q = \frac{A_{//} - A_{\perp}}{A_{//} + 2A_{\perp}}, \quad (3)$$

$$\text{EXR} = \frac{T_{//}}{T_{\perp}}. \quad (4)$$

基于二色性染料掺杂液晶的宾主效应,根据不同表面取向结构,可以制得多种吸光轴随空间变化的偏振器件,如吸光轴沿角向或径向分布的显偏器(Polarization axis finder, PAF)^[40],实现对线偏振的探测。

2.2 扭曲排列液晶的偏振旋光

扭曲向列相(Twist nematic, TN)液晶层的偏振旋光原理,如图2(a)所示,在满足摩根(Mauguin)条件^[41-42]时,当入射光电矢量 E 平行于入射面处的液晶指向矢 φ_{in} ,出射光的电矢量也将平行于出射面处的液晶指向矢 φ_{out} 。Mauguin 条件如公式(5)所示:

$$u = \frac{\Gamma}{2\Phi} = \frac{\pi \Delta n(\lambda) d}{\Phi \lambda} \gg 1, \quad (5)$$

其中: u 代表 Mauguin 参数, Γ 、 Φ 和 d 分别代表延迟量,扭曲角和液晶层厚度。 $\Delta n(\lambda)$ 代表液晶双折射, λ 是光波长。延迟量如式(6)所示:

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

在出射面处放置一与平行于液晶指向矢的线

偏振片,即可形成一个线偏振旋转器,假定该偏振片为理想偏振片,则根据琼斯矩阵推导得到其透过率公式表达为:

$$T = \cos^2 \varphi_{in} + \frac{\Phi}{2X} \sin 2X \sin 2\varphi_{in} - \frac{\Phi^2}{X^2} \sin^2 X \cos 2\varphi_{in}, \quad (7)$$

$$X = \sqrt{\Phi^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}, \quad (8)$$

当满足 Mauguin 条件时, $\Gamma \gg \Phi$, 可知 $\Phi/X \ll 1$, 透过率公式近似只保留第一项:

$$T \approx \cos^2 \varphi_{in}, \quad (9)$$

此时该器件相当于一个透振轴平行于入射指向矢 φ_{in} 的线偏振片,如图2(b)所示。对于任意偏振方向的入射光满足马吕斯定律(Malus's law)。可见,通过满足摩根条件的扭曲液晶层,可以改变偏振片的方位,这为线偏振片的阵列化提供了设计思路。选用合适的偏振片,并通过设计液晶层的扭曲角度 Φ , 液晶层厚度 d 以及使用不同双折射 Δn 的液晶材料,即可在相当宽的波段范围内都能很好地实现线偏振旋转功能。

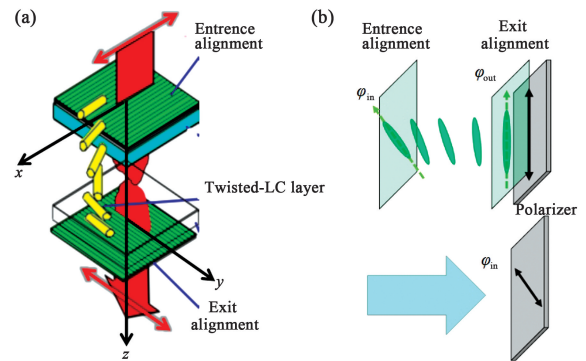


图2 (a) 90°扭曲 TN 液晶盒偏振旋光示意图; (b) 在满足 Mauguin 条件的扭曲液晶层出射面处放置一与平行于液晶指向矢的线偏振片,即可形成一个线偏振旋转器,相当于一个透振轴平行于入射指向矢 φ_{in} 的线偏振片。

Fig.2 (a) Schematic diagram of 90° TNLC device; (b) A polarization rotator can be formed by placing a linear polarizer parallel to the LC director at the exit plane. When the Mauguin condition is satisfied, the device is equivalent to a linear polarizer with axis parallel to director φ_{in} at the entrance plane.

2.3 平行排列液晶的相位延迟

平行排列(Planar alignment, PA)的液晶层

可以充当一个相位延迟片,延迟量如公式(6)所示。平行排列的液晶层与一个线偏振器组合,根据液晶层延迟量和指向矢(光轴)与偏振片夹角 θ 的不同,可以获得线偏振片或圆偏振片或椭圆偏振片^[33],如图3所示。它的优势在于不同于前两种模式只能实现线偏振探测,不同光轴方向相位延迟片可以拓展对于圆偏振分量 S_3 的探测能力,包括入射光的椭圆度、旋向。不过由于延迟量随波长的变化,单层平行排列液晶对偏振态的探测也是随波长变化的,因此在实际应用中还需考虑偏振色差的影响。

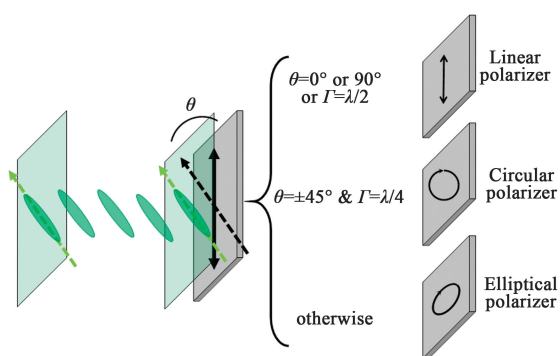


图3 平行排列的液晶层与一个线偏振器组合。当液晶层延迟量为 $\lambda/2$ 或液晶指向矢(光轴)与偏振片夹角 θ 为 0° 或 90° 时,该组合构成一个线偏振片;当液晶指向矢与偏振片夹角 θ 为 $\pm 45^\circ$ 且液晶层延迟量为 $\lambda/4$ 时,该组合构成一个圆偏振片;其他情况下,该组合构成一个椭圆偏振片。

Fig.3 Combination between the parallel aligned LC layer and a linear polarizer. When the retardation of the LC layer is $\lambda/2$ or the angle θ between the LC director (optical axis) and the polarizer is 0° or 90° the combination forms a linear polarizer. When the angle θ is $\pm 45^\circ$ and the retardation of the LC layer is $\lambda/4$, the combination forms a circular polarizer. In other cases, the combination forms an elliptic polarizer.

基于上述原理,通过阵列化光控取向实现一种或几种方式的组合,进而可以获得用于线偏振成像和全 Stokes 偏振成像的液晶微偏振阵列。下面将结合近年来国内外的研究进展进行分类描述,讨论不同液晶微偏振阵列的结构、制备工艺和工作原理。

3 应用于线偏振成像的液晶微偏振阵列研究进展

偏振成像最早是从利用旋转偏振片^[43]实现场景中线偏振的探测开始发展的。因此最初的分焦平面阵列的设计思路也是利用各种微纳加工手段将偏振片微型化,形成偏振方向不同的线偏振片阵列,如纳米线栅阵列、PVA 偏振阵列等。为了满足更高的信噪比,最优配置是偏振片角度均匀分布在 0° 和 180° 之间^[44]。现今,主流微偏振阵列中各个微偏振片的角度为 0° 、 90° 、 45° 和 135° ,这4个偏振探测态表示为邦加球(Poincaré Sphere)赤道上的4个点,且包围形成一个正方形,如图4所示。根据公式(1)可以计算得到 Stokes 矢量的前3个分量,用来计算入射光的线偏振度(Degree of linear polarization, DoLP)和偏振角(Angle of polarization, AoP)信息,如下公式所示:

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (10)$$

$$\text{AoP} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (11)$$

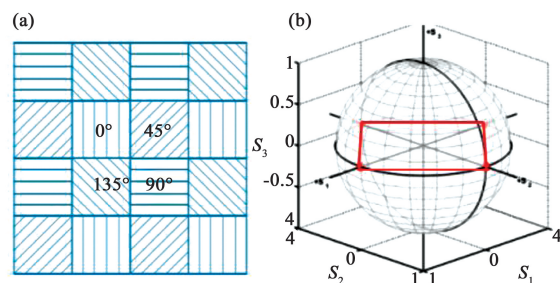


图4 (a) 目前主流的微偏振阵列结构,微偏振片的角度分别为 0° 、 90° 、 45° 和 135° ; (b) 4个探测偏振态在 Poincaré 球上表示为赤道上4个点,且这4点包围形成一个正方形。

Fig.4 (a) Mainstream structure of micropolarizer array. The angle of micropolarizer is 0° , 90° , 45° and 135° , respectively; (b) The four measurements are represented on the Poincaré sphere as four points on the equator and form a square.

3.1 基于二色性染料的宾主型线偏振片阵列

2009年,香港科技大学 Zhao 等提出一种基于光敏偶氮染料 AD-1 的微偏振阵列^[45]。该染料分子呈棒状,旋涂的 AD-1 薄膜在紫外偏振光

照射下,分子长轴取向垂直于紫外光偏振方向,表现出强烈的二色性。通过4次掩膜曝光得到了偏振方向为 0° 、 90° 、 45° 和 135° 的偏振薄膜阵列。虽然AD-1染料分子可以通过偏振紫外曝光取向的方式直接获得二向色性,但染料分子的有序度与曝光能量相关,且在长时间紫外照射后达到饱和,结果表明AD-1薄膜的偏振透过率、消光比等均受限制。

为提高微偏振阵列的光学性能,该课题组后续提出了基于宾主效应的可聚合薄膜液晶微偏振阵列^[31],制备方式如图5所示。该结构使用商用纳米线栅阵列作为掩膜,在紫外线偏光的照射下,对涂敷于基板上的磺酸偶氮材料SD1进行阵列化光控取向,对应每个 0° 、 90° 、 45° 和 -45° 的区域SD1分子长轴垂直于辐照紫外光的偏振方向,分别形成了 90° 、 0° 、 -45° 和 45° 的表面取向,单个像素尺寸为 $5\mu\text{m}$;然后旋涂掺有正二色性染料的液晶预聚物,在表面取向作用下,促使染料分子协同液晶分子沿其指向矢方向排列;最后再对宾主液晶预聚物进行光聚合,形成稳定的聚合物薄膜。由于染料分子的二向色吸收特性,使得微偏振阵列中每个区域分别对应 0° 、 90° 、 45° 和 -45° 的吸收型薄膜线偏振片。 -45° 线偏振光照明下显微照片如图6(a)所示。

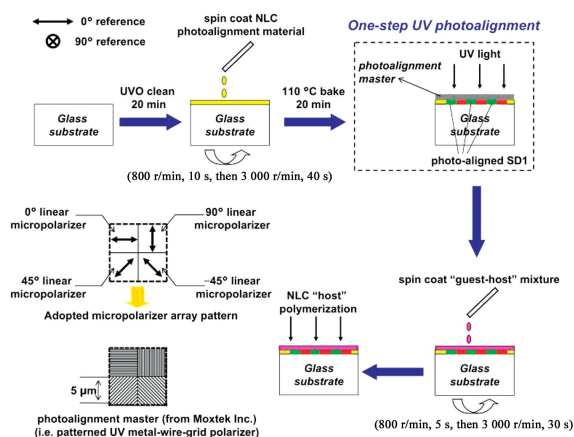


图5 宾主型微偏振阵列的工艺流程^[31]

Fig.5 Fabrication process of guest-host micropolarizer array^[31]

据报道,该薄膜微偏振阵列厚度仅 $0.95\mu\text{m}$,且具有较高的偏振透过率($T_{\parallel} > 70\%$)和较好的有序度($Q \approx 0.85$)。但相较纳米线栅偏振片偏振效率 $PE = 0.998$ ($EXR \approx 500$, @ 545 nm)或

吸收型偏振片($EXR > 1000$),该器件的偏振光学性能表现不佳,如图6(b)所示:在 $417 \sim 635\text{ nm}$ 波段 PE 大于 0.9 ($EXR \approx 10$),峰值处也仅有 0.996 ($EXR \approx 250$, @ 545 nm)。

$$PE = \sqrt{\frac{T_{\parallel} - T_{\perp}}{T_{\parallel} + T_{\perp}}} \times 100\% \quad (12)$$

$$EXR = \frac{T_{\parallel}}{T_{\perp}} = \frac{1 + PE^2}{1 - PE^2} \quad (13)$$

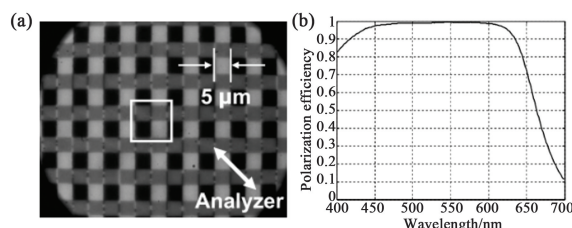


图6 (a) -45° 线偏振光照明下显微照片;(b) 偏振效率随波长变化曲线^[31]。

Fig.6 (a) Micrograph of the fabricated guest-host micropolarizer array, inspected by a linear polarization analyzer along -45° ; (b) Spectral measurement of polarization efficiency^[31].

宾主型液晶微偏振阵列,其本质工作原理与PVA偏振阵列无异,其突出的优点在于更轻薄,稳定性更佳。但由于二向色染料的限制,即便通过多种不同颜色的染料进行混合,它的消光比通常只有几十到100左右,透过率较低且能够覆盖的波段范围也十分局限。亚利桑那大学Hsu等利用多种红外二色性染料混合^[34],并制备了图案化宾主偏振片样品,但消光比峰值也仅有119 (@ 937 nm)。可见对于宾主型液晶微偏振阵列,发展重点在于宽波段尤其是偏向红光及红外波段的高二色比染料的发展。

3.2 基于满足Mauguin条件的扭曲排列液晶线偏振片阵列

2009年,香港科技大学Zhao的团队提出了基于线偏振片与阵列化液晶单元结合的一种高分辨率微偏振阵列的制造技术^[28],如图7所示,首先在两个玻璃基板上分别旋涂取向剂SD1;然后通过紫外偏振曝光,在上基板形成 0° 取向,下基板通过掩膜曝光形成阵列化的 $0^\circ \sim 90^\circ$ 取向;将两基板压制成盒(盒厚 $5\mu\text{m}$),使用E7液晶($\Delta n = 0.225$)来满足Mauguin条件;根据上下表面的取向状态形成液晶平行排列结构及 90° 扭曲结构;最后在下基板外贴附一 0° 方位薄膜线偏振片。根据上一节的分析,

这构成了一个 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的线偏振片阵列。如图 8(a) 所示,该器件单个像素尺寸可达到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。

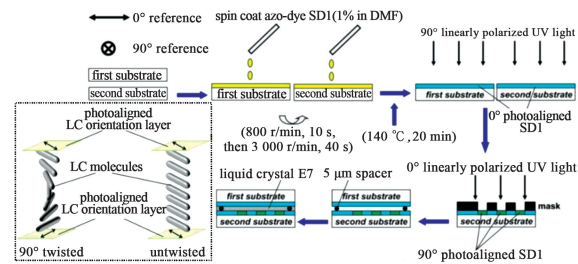


图 7 $0^\circ \sim 90^\circ$ 扭曲液晶微偏振阵列的制备工艺及取向结构^[28]

Fig.7 Fabrication process and alignment structure of $0^\circ \sim 90^\circ$ twisted LC micropolarizer array^[28]

据报道,该器件消光比最高可达约 3 200 (35 dB, @ 600 nm)。但通过测试可以发现不同波长,透过率及消光比存在一定差异,如图 8 (b) 及表 1 所示;且相比于平行排列的液晶结构而言, 90° 扭曲微区的偏振透过率和消光比略有降低,且波动更明显。

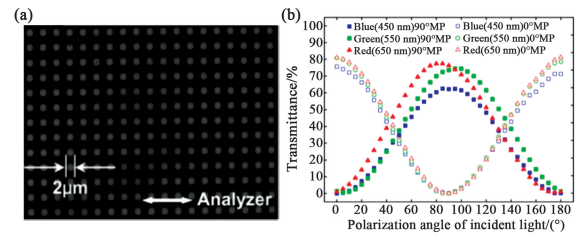


图 8 (a) $0^\circ \sim 90^\circ$ 扭曲液晶微偏振阵列的显微照片; (b) 不同方位的线偏振入射 0° 和 90° 扭曲液晶微偏振片的透过率曲线满足 Malus 定律^[28]。

Fig.8 (a) Micrograph of $0^\circ \sim 90^\circ$ twisted LC micropolarizer array; (b) Transmittances of 0° and 90° twisted LC polarizers following Malus's law at different wavelength^[28]。

表 1 不同波长下的消光比^[28]

Tab.1 Extinction ratios at different wavelengths^[28]

Wavelength/nm	0° MP/dB	90° MP/dB
450	33.2	28.6
500	29.7	25.9
550	30.4	26.1
600	35.3	34.9
650	32.3	27.6

ER = 10 lg (EXR), (dB)

这是因为基于在 Mauguin 条件下的扭曲液晶器件只是近似满足线偏振传递,出射光仍有较小的椭圆度残留造成漏光。假设使用消光比为无穷大的理想偏振片,根据琼斯矩阵可以推得扭曲液晶层的真实的透过率公式^[42] :

$$T_{\parallel} = 1 - \Phi^2 \frac{\sin^2 X}{X^2} \quad (14)$$

$$T_{\perp} = \Phi^2 \frac{\sin^2 X}{X^2} \quad (15)$$

其中 $T_{\parallel}$ 和 $T_{\perp}$ 分别对应于入射偏振平行和垂直于入射面处指向矢时扭曲型液晶偏振片的透过率,他们的比值 ($T_{\parallel} / T_{\perp}$) 即为消光比 EXR。根据公式(6)和公式(8),可知扭曲液晶微偏振阵列的消光比与波长相关,还与扭曲角以及液晶层延迟量有关。根据公式(6)可知为满足 Mauguin 条件,一方面要尽量减小扭曲角度 Φ , 另一方面需要增大液晶的双折射 Δn 和液晶层厚度 d , 以此来尽力降低不同波长下消光比的差异。同时该器件作为一个初始的原型,只能实现对 Stokes 矢量中 S_0 及 S_1 分量的探测,存在线偏振信息丢失的问题。

2020 年,中物院流体物理研究所 Wang 等提出一种基于液晶微阵列器件的分焦平面型偏振成像装置的设计^[46],如图 9(a)所示。其中核心的液晶微偏振阵列采用扭曲结构,液晶分子扭曲方向如图 9(b)所示,一侧基板采用均一水平取向,另一侧基板通过数字掩膜或机械掩膜曝光形成阵列化的取向结构;在取向膜取向诱导下,每组内 4 个单元中液晶分子分别实现 $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$ 扭曲;入射光进入液晶单元模块时,相对应的偏振方

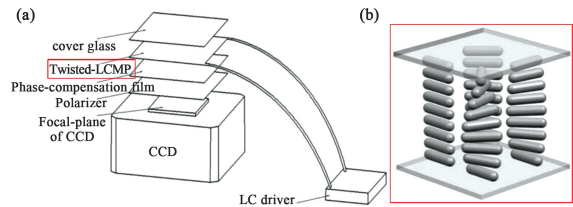


图 9 (a) 一种基于液晶微阵列器件的分焦平面型偏振成像装置;(b) 液晶分子排列方式基于两侧基板的取向^[46]。

Fig.9 (a) A division of focal-plane imaging polarimeter based on liquid crystal micropolarizer array; (b) Twist direction of the LC molecules is based on photoalignment of the two substrates^[46]。

向分别实现 0° 、 90° 、 45° 和 135° 的旋光;结合出射端偏振片即可得到 4 个方向的线偏振强度,进而可求解得到 Stokes 矢量前 3 个分量。但这种方式构成的扭曲液晶微偏振阵列,液晶层中同时存在非扭曲(0°)和高扭曲(135°)的液晶畴,这会带来一些问题:一方面出于对器件质量和寿命的考量,需解决如何进行手性剂掺杂以解决非扭曲和高扭曲液晶畴同时稳定共存的问题,以及畴间向错线可能造成器件质量下降的问题;另一方面出

于对器件偏振效率的考量,扭曲角度过大不易满足 Mauguin 条件,造成 135° 扭曲畴的偏振消光比下降,从而使器件中不同扭曲畴消光比产生较大差异,对实际偏振测量与成像产生影响。

为避免扭曲角度过大造成的偏振消光比下降,2021 年,中科院长春光机所 Zhang 等^[38]提出一种双向扭曲的四畴液晶微偏振阵列,适用于可见光波段的线偏振成像。为了满足摩根条件,扭曲角分别设计为 $\pm 22.5^\circ$ 和 $\pm 67.5^\circ$,采用了该课题组自制的大双折射液晶 LC-4k^[47],并确定了最佳厚度 $6.6 \mu\text{m}$ 。所提出的扭曲 LCMP 采用了摩擦-光控混合取向技术进行制备:沿基板边缘方向摩擦 PI 使 LC 分子沿水平(0°)方向平行排列;光控取向使用线性偏振紫外光(LPUV)辐照 SD1 来实现。利用 DMD 投影光刻系统^[48]制备得到的 LCMP 阵列均匀、缺陷少,取向角度准确,如图 10 所示。另外,使用不同倍率的投影物镜和 DMD 像素拼接,可以实现从几微米到百微米量级的 LCMP 像素结构。

经测试, $\pm 22.5^\circ$ 单扭曲 LCMP 的消光比约 6 000, $\pm 67.5^\circ$ 单扭曲 LCMP 的消光比约 1 500 (@ 632.8 nm, He-Ne laser)。利用双远心镜头的共轭光路结构,搭建了基于该偏振片阵列的模块化偏振测量系统进行偏振测量和成像实验,提出了像素对准与定位的方式,降低了 LCMP 与相

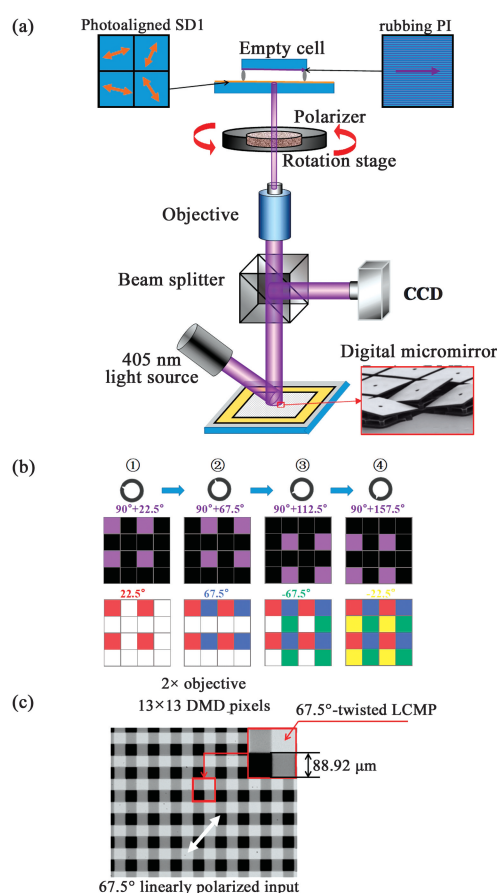
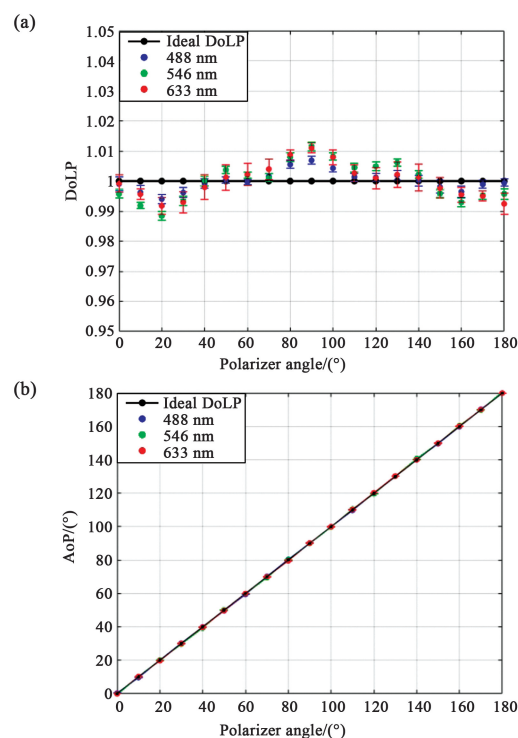


图 10 (a) DMD 投影光刻系统原理图及 LCMP 阵列空盒结构;(b) SD1 取向曝光过程示意图;(c) 使用 2 倍投影物镜, 13×13 个 DMD 像素拼接制备得到的 LCMP 阵列的显微镜照片。样品使用 67.5° 线偏振光照明^[38]。

Fig.10 (a) Schematic draw of the DMD lithography system and the structure of the empty cell for LCMP array; (b) Photoalignment process of SD1 layer; (c) Micrograph of the LCMP array prepared by stitching 13×13 DMD pixels using a $2 \times$ projection objective. The sample was illuminated by 67.5° linearly polarized light^[38].



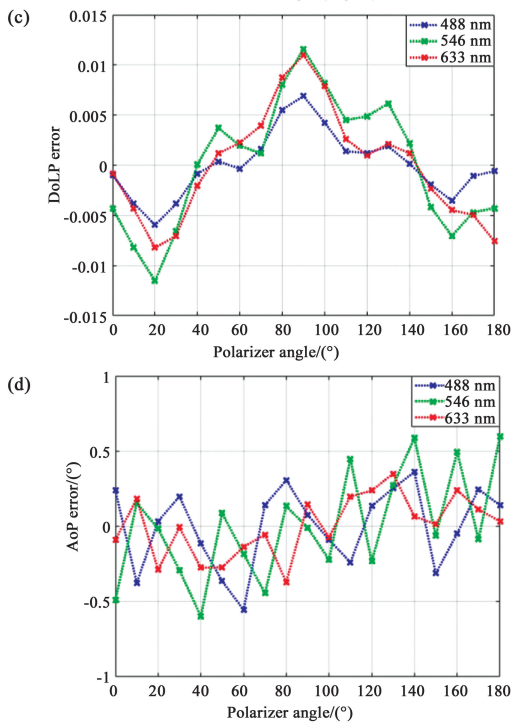


图 11 测量了 488, 546, 633 nm 三种单色偏振光的 (a) 线偏振度 (DoLP) 和 (b) 偏振角 (AoP)。黑色实线表示模拟值, 圆圈和误差条分别表示所有超像素的平均测量值和标准差。(c) 和 (d) 分别代表了 DoLP 和 AoP 理论值与平均测量值之间的差异 (Error)^[38]。

Fig.11 (a) Degree of linear polarization (DoLP) and (b) angle of polarization (AoP) of monochromatic polarized light at 488, 546, 633 nm were measured as a function of rotating a linear polarizer. The black solid lines represent simulated values. The circles and error bars respectively represent the mean measurements and standard deviations of all superpixels. (c) and (d) represent the difference between DoLP and AoP theoretical values and average measurements^[38].

机 CMOS 之间的错位和串扰的影响。系统经标定校正后^[33,49], 对于方向不同的线偏振光的 DoLP 和 AoP 的测量误差分别小于 1.15% 和 0.65°, 如图 11 所示。测量精度较高, 可以满足偏振探测需求。

综上, 对于实现线偏振成像的液晶微偏振阵列, 扭曲型相比于宾主型的优势在于其消光比和透射率主要由引入的线偏振片决定, 因此通过选

择合适的偏振片即可实现较高的消光比 (>1 000), 并能覆盖从可见光到红外的不同波段。但在器件设计时还需注意, 确保在同一液晶层厚度下每个扭曲单元均满足 Mauguin 条件来获得优异旋光特性; 此外在设计不同扭曲角度大小同时还需兼顾它们的排列方式^[50], 以确保器件的质量和寿命, 提升图像重建质量。

4 应用于全 Stokes 成像的液晶微偏振阵列研究进展

随着偏振成像技术的发展, 研究人员逐渐发现金属、碳颗粒和植物表面可以在特定的方向带有很强的圆偏振特性^[51]; 基于圆偏振光的旋向随每次反射变化的原理, 从目标物体反射的光可以很容易地与从介质反射的光区分开^[52]; 另外, 当平均粒径在波长量级或更大的散射介质时, 圆偏振光比线偏振光具有更好的保偏特性^[53]。利用圆偏振光的这些性质, 可以提高水下图像的对比度, 在雾、灰尘和水喷雾等浑浊模糊物中对物体进行成像, 利用散射光确定偏振状态并进行目标区分等, 这对推动去雾遥感、消防、水下潜艇探测、跟踪技术的发展具有重大意义^[54-57]。

相比于线偏振成像而言, 全 Stokes 偏振成像包含了前者没有的圆偏振信息, 补全了包括偏振度 (Degree of polarization, DoP) 和圆偏振度 (Degree of circular polarization, DoCP) 在内的全部入射光偏振信息, 如公式 (16) 和 (17) 所示。

$$\text{DoP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (16)$$

$$\text{DoCP} = \frac{S_3}{S_0}. \quad (17)$$

4.1 2×2 微偏振阵列实现全 Stokes 偏振成像的原理

根据公式 (1), 为了获得入射光完整的 Stokes 矢量, 需要对 0°、45°、90° 和 135° 方向的线偏振以及右旋和左旋圆偏振分别进行测量。而分焦平面偏振成像系统是以损失分辨率为代价来获取偏振信息的, 因此需要尽量减少测量次数, 即减少阵列中的偏振单元个数。

为了简便计算和图像处理, 当前主流偏振相机多采用 2×2 的微偏振阵列, 即对入射光进行 4 种线偏振方位的测量。这其实对求解线偏振信息

而言是冗余的,因为对线偏振的描述只需要 Stokes 矢量的前 3 个分量即可,因此通过矩阵计算的方法,最少需进行 3 次不同线偏振方位的测量^[44, 58]。同理,若想通过矩阵反演法获得 Stokes 矢量的全部 4 个分量,则需要进行 4 次的不同偏振态的测量,过程如下^[1]:

入射光的 Stokes 矢量 $\mathbf{S}_{in}$ 经过偏振元件 $\mathbf{M}$ 后,出射的 Stokes 矢量为 $\mathbf{S}_{out}$,偏振元件 $\mathbf{M}$ 可利用 4×4 的 Mueller 矩阵表示,如式(18)所示:

$$\mathbf{S}_{out} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{out,0} \\ \mathbf{S}_{out,1} \\ \mathbf{S}_{out,2} \\ \mathbf{S}_{out,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{in,0} \\ \mathbf{S}_{in,1} \\ \mathbf{S}_{in,2} \\ \mathbf{S}_{in,3} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{in}. \quad (18)$$

探测器只接受强度信号 I ,即 Stokes 矢量的第一个分量 $\mathbf{S}_{out,0}$, 2×2 微偏振阵列得到 4 个强度偏振元件对入射光强度的调制完全依赖于 $\mathbf{M}$ 矩阵的第一行 $[m_{00}, m_{01}, m_{02}, m_{03}]$,因此这一行 (1×4 矩阵)也被称为该偏振元件对入射光的分析矢量。对于 2×2 微偏振阵列,有 4 个不同的分析矢量;将这些矢量排成一列,即构成了该微偏振阵列的 4×4 测量矩阵 $\mathbf{W}$ 。则入射光经过 2×2 微偏振阵列后得到不同强度的过程具体表示为式(19):

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} I^1 \\ I^2 \\ I^3 \\ I^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00}^1 & m_{01}^1 & m_{02}^1 & m_{03}^1 \\ m_{00}^2 & m_{01}^2 & m_{02}^2 & m_{03}^2 \\ m_{00}^3 & m_{01}^3 & m_{02}^3 & m_{03}^3 \\ m_{00}^4 & m_{01}^4 & m_{02}^4 & m_{03}^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{in,0} \\ \mathbf{S}_{in,1} \\ \mathbf{S}_{in,2} \\ \mathbf{S}_{in,3} \end{pmatrix} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{S}_{in}, \quad (19)$$

其中,上角标 $i = 1, 2, 3, 4$ 分别代表 2×2 微偏振阵列中每个偏振元件。当测量矩阵 $\mathbf{W}$ 存在逆矩阵时,利用矩阵反演,如公式(20),即可求得入射光完整的 Stokes 矢量 $\mathbf{S}_{in}$ 。

$$\mathbf{S}_{in} = \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{I}. \quad (20)$$

根据对微偏振阵列中 4 个偏振测量元件的配置,可以将可实现全 Stokes 成像的微偏振阵列分为简单的全 Stokes (Simple full-Stokes) 微偏振阵列和优化的全 Stokes (Optimized full-Stokes) 微偏振阵列。

4.2 简单全 Stokes 微偏振阵列

最简单的方式就是将 2×2 线偏振阵列中的其中一个方位的线偏振片变为圆偏振片,用

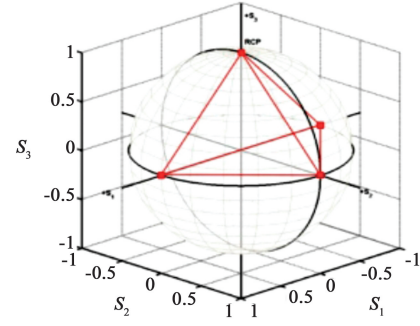


图 12 一种简单的全 Stokes 微偏振阵列设计方式的 Poincaré 球表示^[33]; 4 个偏振测量态为 0° , 45° , 90° 的线偏振和右旋圆偏振,并构成了一个四面体。

Fig.12 Simple full-Stokes polarimeter design is illustrated on the Poincaré sphere. The dots represent the measurement states of each polarimeter and form a tetrahedron. Simple full-Stokes polarimeter utilizes three linear and one circular micropolarizer (0° , 45° , 90° linear and right-handed circular polarizer here).

Poincaré 球表示为图 12。

2010 年,香港科技大学 Zhao 等的课题组提出了第一种可实现全 Stokes 探测的液晶微偏振阵列^[29],单像素尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 。其结构和制备方法如图 13 所示。首先,在偏振方向为 45° 的纳米线栅上沉积并刻蚀阵列化氧化锡锡 (Indium tin oxide, ITO) 电极,以此作为下基板;然后利用光

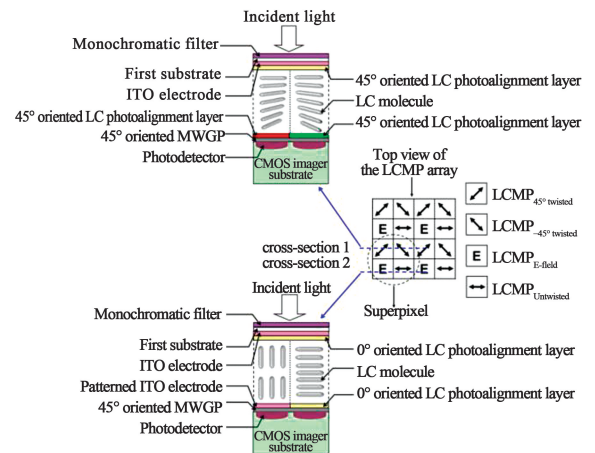


图 13 简单全 Stokes 微偏振阵列超像素的俯视图和截面图^[29]

Fig.13 Topview and cross-sections of the simple full-Stokes micropolarizer array superpixel^[29]

控材料 SD1 进行 45° 、 -45° 、 0° 和 90° 方向的阵列化取向;上侧基板采用 SD1 进行 0° 方位的均一取向;使用环氧热固胶将上下基板胶合为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的液晶盒,灌注 E7 液晶后施加电压。这样分别形成 45° 扭曲、 -45° 扭曲、垂直排列和 0° 平行排列的结构。

在不同偏振光照明下,该微偏振阵列的显微图片如图 14 表示。 $\pm 45^\circ$ 扭曲的液晶微畴,相当于线偏振旋转器,从而可以实现对 0° 及 90° 线偏振光的检测,如图 12 (a) 和 (b),在 0° 及 90° 线偏振光照明下,对应液晶微畴呈现亮态;对于电控垂直排列的液晶微畴,由于此时垂直排列液晶层对偏振效果不产生影响,相当于中性密度滤波器,直接利用纳米线栅完成对 45° 偏振光的检测,如图 14 (c),在 -45° 线偏振光照明下,对应液晶微畴呈现暗态;对于 0° 平行排列液晶微畴,相当于一个相位延迟片,经测试,这个区域在 500 nm 处满足四分之一波长延迟,则光轴为 0° 方向的 $\lambda/4$ 波片结合 45° 方向的检偏器,充当一个右旋圆偏振片,如图 14 (d) 和 (e),在右旋及左旋圆偏振光照明下,对应液晶微畴分别呈现亮态和暗态。

经测试,在 500 nm 处测得该微偏振阵列各

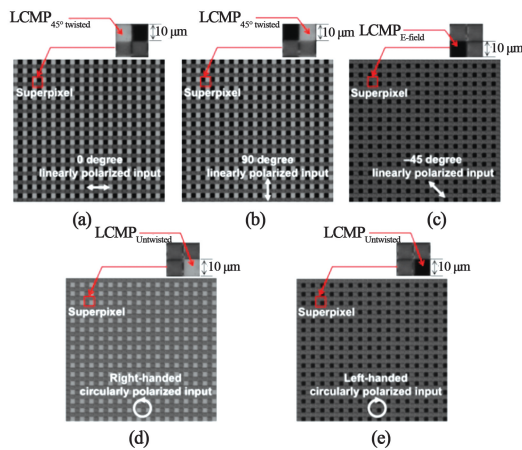


图 14 不同偏振光照明下的简单全 Stokes 微偏振阵列的显微照片^[29]。(a) 0° 线偏振光;(b) 90° 线偏振光;(c) -45° 线偏振光;(d) 右旋圆偏振光;(e) 左旋圆偏振光照明。

Fig.14 Microphotographs of a fabricated LCMP array illuminated by linearly or circularly polarized input. (a) 0° linearly polarized; (b) 90° linearly polarized; (c) -45° linearly polarized; (d) Right-handed circularly polarized; (e) Left-handed circularly polarized^[29].

单畴的偏振消光比约为 1 100,且偏振透过率可达到 75%;同时对 0° 、 45° 、 90° 和 135° 方向的线偏振以及右旋和左旋圆偏振的垂直入射光进行了 6 次 Stokes 矢量测量,实验值与理论值的误差在 2.3% 以内。

该微偏振阵列巧妙地结合了扭曲排列液晶的线偏振旋光、平行排列液晶的相位延迟以及垂面排列液晶层不改变偏振态的原理,结合均匀的偏振片,实现了对 Stokes 矢量全分量的测量。但由于该阵列使用时需要电控,因此需要刻蚀阵列化的 ITO 电极,并且在进行阵列化光控取向时还需进行像素对准,增加了制备难度;同时由于平行排列液晶微畴只对单一波长才满足 $\lambda/4$ 的延迟量,这对实际应用造成了不便。

2012 年,美国亚利桑那大学 Myhre 等提出了另一种简单全 Stokes 微偏振阵列并集成在了 CCD 相机中^[32]。其结构如图 15 所示,该方法是设计了两层图案化的液晶聚合物:一层 0° 、 45° 、 45° 和 90° 的阵列化取向的掺杂二色性染料宾主液晶聚合物膜起到检偏器的作用 ($\text{EXR} \sim 20$, @ 580 nm);一层 0° 、 45° 、 0° 和 0° 的阵列化取向的平行排列液晶聚合物膜实现相位延迟;利用两层液

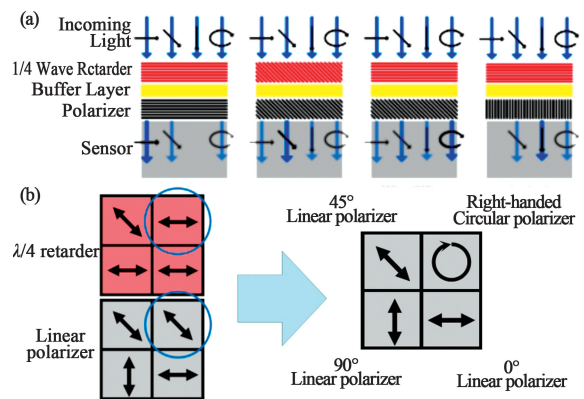


图 15 利用两层液晶聚合物层实现的简单全 Stokes 微偏振阵列结构^[32]。(a) 每个液晶延迟层和宾主偏振片组合透过不同的偏振态;(b) 超像素由 0° 、 45° 、右旋圆和 90° 偏振片组成。

Fig.15 Schematic diagram of a simple full-Stokes micropolarizer array with two LC polymer layers^[32]. (a) Each LC retarder and guest-host polarizer orientation combination transmits a differing polarization state; (b) Superpixel comprised of a 0° , 45° , right-hand circular, and 90° polarizers.

晶聚合物层,从而实现 0° 、 45° 、 90° 线偏振以及右旋圆偏振光的检测。

照明光源后使用一个中心波长为 580 nm、光谱宽度为 5 nm 的带通滤波片,通过在 0° 线偏振片前旋转近 $\lambda/4$ 波片 (89.1°) 来改变入射光偏振态进行 Stokes 矢量的测量。结果如图 16 所示,黑色和红色的圆圈分别表示对入射线偏振度 (DoLP) 和圆偏振度 (DoCP) 的平均测量值,其中标准差用误差条标记。实线显示了 0° 线偏光经过旋转 89.1° 的相位延迟的理想波片后得到的偏振态 DoLP 和 DoCP 的理论值。

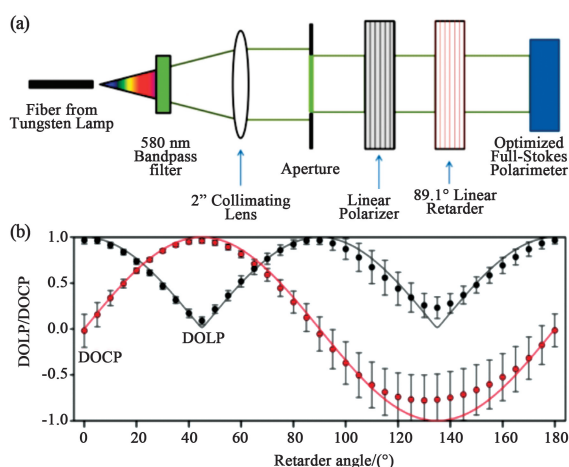


图 16 (a) 测试光路示意图^[33]; (b) 在 580 nm 处对不同偏振入射光的 DoLP 和 DoCP 的测量结果^[32]。

Fig.16 (a) Schematic diagram of the optical setup^[33]; (b) DoLP and DoCP are measured as a function of the fast axis orientation of an 89.1° retarder at 580 nm^[32].

该微偏振阵列将宾主液晶偏振片与平行排列液晶 $\lambda/4$ 波片阵列相结合,相比 Zhao 等提出的微偏振阵列,该结构无需电控,避免了对 ITO 的刻蚀,也更容易集成到相机中。但该微偏振阵列的两层液晶聚合物的取向不同,需要进行两次阵列化对准,同时还需要构建缓冲层 (NOA-81) 以避免层间取向干扰,这为制备操作带来一定难题;另外,平行排列液晶结构只对单一波长起到 $\lambda/4$ 的延迟量,探测波段宽度和液晶层厚度误差都将对圆偏振光的测量精度造成较大影响;并且,由于探测的 4 个偏振态在 Poincaré 球上分布不均匀且只在北半球内分布,导致 0° 到 90° 方位的右旋偏振态测量较为准确,而 90° 到 180° 方位的左旋

偏振光测量误差较大^[33],如图 16(b)所示,对不同方位的线、圆偏振度的测量最大误差约为 23%,标准差最大接近 30%。可见需要对微偏振阵列的探测偏振态进一步优化设计,来提高偏振测量精度。

4.3 优化的全 Stokes 微偏振阵列

2000 年 Sabatke 等^[59]基于对偏振片-旋转波片的 DoTP 测量矩阵 $\mathbf{W}$ 的奇异值分解来评价全 Stokes 偏振测量系统的抗噪性,提出利用最小化测量矩阵 $\mathbf{W}$ 的等权方差来求优化的波片的延迟量及方位角。从几何角度理解来说,测量的每一个偏振态对应 Poincaré 球上的一个点,它们围成的体积与器件的信噪比成正比,即体积越大信噪比越大;因此对于 2×2 微偏振阵列中的 4 个测量偏振态应该在 Poincaré 球中构成一个内接正四面体。最终确定了波片的延迟量为 132° 、快轴夹角为 $\pm 15.1^\circ$ 和 $\pm 51.7^\circ$ 时取得的 4 个测量偏振态为最优设计方案,如图 17 所示。

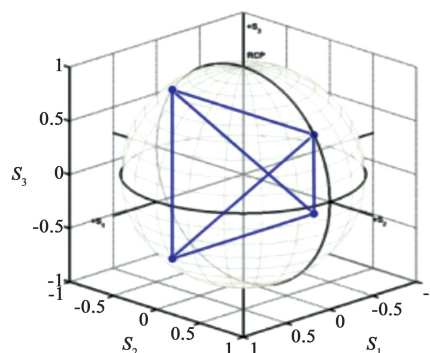


图 17 一种优化的全 Stokes 微偏振阵列设计的 Poincaré 球表示。4 个测量的椭圆偏振态在 Poincaré 球中构成一个内接正四面体^[33]。

Fig.17 Optimized full-Stokes polarimeter design is illustrated on the Poincaré sphere. It utilizes four elliptical micropolarizers. The dots represent the measurement states of each micropolarizer and form a regular tetrahedron^[33].

基于此优化方案,2014 年亚利桑那大学 Hsu 等在 Myhre 工作的基础上,又提出了一种优化的全 Stokes 微偏振阵列^[33],并集成到 CCD 相机中。该微偏振阵列的结构和原理如图 18 所示:利用平行排列液晶波片阵列与均匀的偏振片组合形成椭圆偏振片阵列,从而实现对 4 个优化椭圆偏振态

的检测。相较于简单的全 Stokes 微偏振阵列,由于只需要一个阵列化取向层,因此避免了制作过程中的像素级别的重复对准,降低了微偏振阵列的缺陷密度。

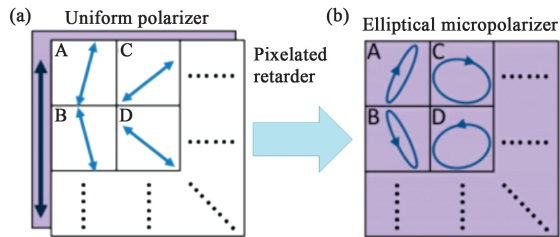


图 18 (a)一种优化的全 Stokes 微偏振阵列的结构示意图;(b)每个合成的椭圆微偏振片传输不同的椭圆偏振态。

Fig.18 (a) Schematic diagram of the structure of an optimized full-Stokes polarizer array; (b) Each resultant elliptical micropolarizer transmits a different elliptical polarization state.

该器件的阵列化波片层是针对 580 nm 波长进行优化的,因此同样使用如图 16 (a)的测试光路产生一系列不同偏振态的入射光对该优化的全 Stokes 微偏振阵列的偏振测量性能进行检测。测量结果如图 19 (a)所示,黑色和红色的圆圈分别表示对入射光 DoLP 和 DoCP 的平均测量值,标准差用误差条标记,实线代表线偏光经过旋转理想波片时得到的偏振态的理论预测值。图 19 (b)和(c)分别表示了对入射偏振态测量结果的误差和标准差,并与简单的全 Stokes 微偏振阵列测量的结果进行了对比。

相较于该课题组提出的简单全 Stokes 微偏振阵列,优化后的器件对不同入射偏振态的最大误差从 23%减小到 7%,标准差从接近 30%减小到小于 5%,这相当于测量信噪比提高了 1.5 倍。不过由于平行排列的液晶聚合物波片同样仅对单一波长满足相应的最优化延迟量,对这种优化的全 Stokes 微偏振阵列的宽波段应用造成了一定的困难。

4.4 对全 Stokes 微偏振阵列宽波段优化的探索

通过上述对全 Stokes 微偏振阵列的研究,我们不难发现,为了探测线偏振之外的圆偏振分量,需要器件引入对光的延迟量,这多数是由平行排列液晶结构(液晶波片)承担的。但由于液晶的色

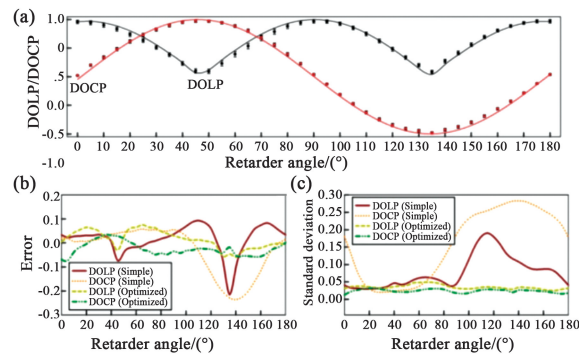


图 19 (a)在 580 nm 处不同偏振入射光的 DoLP 和 DoCP 的测量结果^[33]; (b) 优化后的椭圆偏振片阵列比简单的全 Stokes 设计^[32]具有更少的加工缺陷和更小的误差; (c) 简单的全 Stokes 微偏振阵列^[32]在测量空间中使用了不平衡设计,导致标准偏差有很大的方差;而优化后的全 Stokes 微偏振阵列的 DoLP 和 DoCP 标准差均小于 0.05。

Fig.19 Measurement results of DoLP and DoCP of incident light with different polarization input at 580 nm^[33]; (b) Optimized elliptical micropolarizer has fewer fabrication defects which results in less error than the simple full-Stokes design^[32]; (c) Simple full-Stokes polarimeter^[32] uses an imbalance design in the measurement space, causing large variance in the standard deviation. The standard deviations of DOLP and DOCP of the optimized full-Stokes polarimeter are less than 0.05.

散,一定厚度下的液晶波片对不同波长的光延迟量总是不同的,如公式(6)所示。这对微偏振阵列的宽波段应用造成了一定的困难。因此,国内外多个课题组利用多层延迟片堆叠来构成消色差波片^[60-62]的设计思路,对全 Stokes 微偏振阵列宽波段优化展开了一系列工作。

比较有代表性的有:2014 年,香港科技大学 Zhao 等利用中心波长为 550 nm 的半波延迟和 1/4 波延迟的双层平行排列的液晶层,制得了光轴方位为 45°和 135°的宽波段 $\lambda/4$ 波片阵列。据报道,其像素尺寸最小可达 8 μm ,可实现 400~700 nm 范围内对左旋和右旋圆偏振光的宽波段测量^[37]。2017 年,亚利桑那大学 Tu 等提出了一种利用多个双折射波片组合,通过在 Poincaré 球面上寻找重叠弧来设计消色差椭圆偏振片的方

法^[35]。设计并制备了包含双层平行液晶层和线偏振片的消色差椭圆偏振片,在450~650 nm波段宽下进行测试,测量值与理论值的误差小于4%,有望实现优化的全Stokes消色差椭圆微偏振阵列,其结构如图20所示。此外,还设计了3层和4层平行排列液晶层,在理论上实现了波段范围400 nm~1 μ m的超消色差椭圆偏振器。

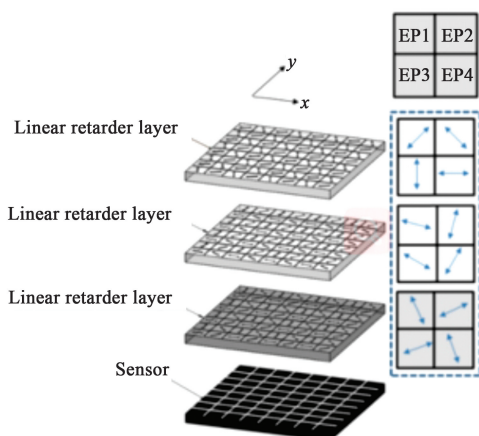


图20 一种DoFP宽带全Stokes相机的设计显示了4个椭圆偏振片。每个层的超像素示意图在右侧^[35]。

Fig. 20 Design of a DoFP broadband full-Stokes camera shows the array of four elliptical polarizers. The superpixel of each layer is showed on the right^[35].

以上两种方法都是基于多层平行液晶结构达到消色差的相位延迟作用。这在理论上完全可行,但多层结构面临需要多次进行像素级对准的曝光取向、构建多个缓冲层以避免层间取向干扰等问题,这将大幅提高由制备失准引入的缺陷密度,造成器件质量下降、甚至无法使用的情况。可见,对全Stokes微偏振阵列的宽波段优化还有待进一步探索。

参 考 文 献:

- [1] 牛国成,胡冬梅,吴勇.Stokes偏振成像技术的研究[M].北京:科学出版社,2020.
NIU G C, HU D M, WU Y. *Research on Stokes Polarization Imaging Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [2] GIAKOS G C. Multifusion, multispectral, optical polarimetric imaging sensing principles [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(5): 1628-1633.
- [3] TYO J S, ROWE M P, PUGH E N, *et al.* Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(11): 1855-1870.
- [4] 郭红,顾行发,谢东海,等.大气气溶胶偏振遥感研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(7): 1873-1880. (in Chi-

5 总结与展望

当前,偏振成像系统正朝向对动态目标的同时偏振成像方向发展,对成像系统的结构要求也逐步趋向于分焦平面式的小型化和模块化。因此,亟需高性能的微偏振阵列以满足对高精度、宽波段的线偏振或全Stokes测量及成像的需求。相比于纳米线栅和金属超表面的微偏振阵列,液晶微偏振阵列有着工艺简单、均匀度高、设计灵活、性能稳定、成本低廉等独特优势。本文首先介绍了液晶微偏振阵列中运用的二色性吸收、偏振旋光和相位延迟3种基本原理,然后对近些年来液晶微偏振阵列的发展做了简要的归纳总结,通过阵列化光控取向实现一种或几种液晶排列方式的组合,可用于实现线偏振或全Stokes测量及成像,极具发展潜力。

当然,液晶微偏振阵列也存在一些缺点并限制了其进一步应用,其中最棘手的便是应用波段范围的限制。可以预见,未来关于液晶微偏振阵列方面的研究将更多地集中于对其宽波段的优化设计。不止于多层平行液晶堆叠的消色差波片,还可应用其他原理,如胆甾相液晶的选择性圆反射^[63-64]等进行阵列化设计,力求降低加工精度要求和复杂程度,便于小型化集成。此外,还可以对高折射液晶、高二色性比染料等材料进行开发,有望在中、长波红外的偏振应用领域取得一些突破性进展。另一方面,针对不同应用场景中线偏振度和圆偏振度的成分占比,可以对液晶微偏振阵列进行订制优化,满足对特定场景的高精度偏振成像。在对物体空间与偏振信息同步探测方面,近晶相液晶的自组装微结构的相关研究^[65],也为分焦平面偏振成像的实现提供了新思路。

- nese)
- GUO H, GU H F, XIE D H, *et al.* A review of atmospheric aerosol research by using polarization remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7): 1873-1880.
- [5] NOVAK M, MILLERD J, BROCK N, *et al.* Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(32): 6861-6868.
- [6] BROCK N J, KIMBROUGH B T, MILLERD J E. A pixelated polarizer-based camera for instantaneous interferometric measurements [C]//*Proceedings of SPIE 8160, Polarization Science and Remote Sensing V*. San Diego: SPIE, 2011: 81600W.
- [7] GARCIA M, EDMISTON C, MARINOV R, *et al.* Bio-inspired color-polarization imager for real-time *in situ* imaging [J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1263-1271.
- [8] QI J, HE C, ELSON D S. Real time complete Stokes polarimetric imager based on a linear polarizer array camera for tissue polarimetric imaging [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(11): 4933-4946.
- [9] RATLIFF B M, LEMASTER D A, MACK R T, *et al.* Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data [C]//*Proceedings of SPIE 8160, Polarization Science and Remote Sensing V*. San Diego: SPIE, 2011: 816002.
- [10] 莫春和, 段锦, 付强, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(下) [J]. *红外技术*, 2014, 36(4): 265-270.
- MO C H, DUAN J, FU Q, *et al.* Review of polarization imaging technology for international military application (II) [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 265-270. (in Chinese)
- [11] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [12] GU N T, YAO B X, HUANG L H, *et al.* Design and analysis of a novel compact and simultaneous polarimeter for complete stokes polarization imaging with a piece of encoded birefringent crystal and a micropolarizer array [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 6801312.
- [13] KULKARNI M, GRUEV V. Integrated spectral-polarization imaging sensor with aluminum nanowire polarization filters [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 22997-23012.
- [14] 马宣. 高性能像素偏振相机的研制与相关应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- MA X. Development of high-performance Pixelated-polarization-camera and related application research [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [15] 孙翥. 纳米线栅偏振成像系统应用研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
- SUN H. Application research of nanowire polarization imaging system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [16] 张志刚. 基于微偏振片阵列的实时偏振和相位信息测量技术 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- ZHANG Z G. Measurements of polarization and phase based on pixelated micro-polarizer array [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [17] 张志刚, 董凤良, 张青川, 等. 像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用 [J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184204.
- ZHANG Z G, DONG F L, ZHANG Q C, *et al.* Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184204. (in Chinese)
- [18] ZHANG Z G, DONG F L, CHENG T, *et al.* Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(10): 105002.
- [19] 张玉鑫. 基于全偏振信息探测的海空背景图像去雾关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- ZHANG Y X. Research on key technologies of haze removal of sea-sky background image based on full polarization information detection [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [20] BACHMAN K A, PELTZER J J, FLAMMER P D, *et al.* Spiral plasmonic nanoantennas as circular polarization transmission filters [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1308-1319.

- [21] BASIRI A, CHEN X H, BAI J, *et al.* Nature-inspired chiral metasurfaces for circular polarization detection and full-Stokes polarimetric measurements [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 78.
- [22] ZHANG C, HU J P, DONG Y G, *et al.* High efficiency all-dielectric pixelated metasurface for near-infrared full-Stokes polarization detection [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 583-589.
- [23] CHIGRINOV V, KWOK H S, TAKADA H, *et al.* Photo-aligning by azo-dyes: Physics and applications [J]. *Liquid Crystals Today*, 2005, 14(4): 1-15.
- [24] CHIGRINOV V G. *Liquid Crystal Photonics (Engineering Tools, Techniques and Tables)* [M]. New York: Nova Science Publishers, 2014.
- [25] 王骁乾,沈冬,郑致刚,等.液晶光控取向技术进展[J].液晶与显示,2015,30(5):737-751.
WANG X Q, SHEN D, ZHENG Z G, *et al.* Review on liquid crystal photoalignment technologies [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 737-751. (in Chinese)
- [26] 邹鹏飞,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)
- [27] 陈鹏,徐然,胡伟,等.基于光取向液晶的光场调控技术[J].光学学报,2016,36(10):1026005.
CHEN P, XU R, HU W, *et al.* Beam shaping based on photopatterned liquid crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026005. (in Chinese)
- [28] ZHAO X J, BERMAK A, BOUSSAID F, *et al.* High-resolution photoaligned liquid-crystal micropolarizer array for polarization imaging in visible spectrum [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3619-3621.
- [29] ZHAO X J, BERMAK A, BOUSSAID F, *et al.* Liquid-crystal micropolarimeter array for full Stokes polarization imaging in visible spectrum [J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17776-17787.
- [30] MYHRE G, SAYYAD A, PAU S. Patterned color liquid crystal polymer polarizers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27777-27786.
- [31] ZHAO X J, BOUSSAID F, BERMAK A, *et al.* High-resolution thin "guest-host" micropolarizer arrays for visible imaging polarimetry [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5565-5573.
- [32] MYHRE G, HSU W L, PEINADO A, *et al.* Liquid crystal polymer full-stokes division of focal plane polarimeter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27393-27409.
- [33] HSU W L, MYHRE G, BALAKRISHNAN K, *et al.* Full-Stokes imaging polarimeter using an array of elliptical polarizer [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3063-3074.
- [34] HSU W L, DAVIS J, BALAKRISHNAN K, *et al.* Polarization microscope using a near infrared full-Stokes imaging polarimeter [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4357-4368.
- [35] TU X Z, JIANG L N, IBN-ELHAJ M, *et al.* Design, fabrication and testing of achromatic elliptical polarizer [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10355-10367.
- [36] TU X Z, MCELDOWNEY S, ZOU Y, *et al.* Division of focal plane red-green-blue full-Stokes imaging polarimeter [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(22): G33-G40.
- [37] ZHAO X J, PAN X F, FAN X L, *et al.* Patterned dual-layer achromatic micro-quarter-wave-retarder array for active polarization imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8024-8034.
- [38] ZHANG S Y, LIU C, SUN Z J, *et al.* 4-domain twisted liquid crystal micropolarizer array for visible linear polarization imaging [J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43226-43240.
- [39] 日本学术振兴会第142委员会.液晶器件手册[M].黄锡珉,黄辉光,李之榕,译.北京:航空工业出版社,1992.
142nd Committee of Japan Academic Revitalization Association. *Manual of Liquid Crystal Devices* [M]. HUANG X M, HUANG H G, LI Z R, trans. Beijing: Aviation Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [40] LEI B, LIU S G. Efficient polarization direction measurement by utilizing the polarization axis finder and digital image processing [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2969-2972.
- [41] 杨登科,吴诗聪.液晶器件基础[M].郭太良,周雄图,译.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. Beijing:

- Science Press, 2016. (in Chinese)
- [42] YE H P, GU C. *Optics of liquid crystal displays* [M]. New York: Wiley, 1999.
- [43] MATCHKO R M, GERHART G R. High-speed imaging chopper polarimetry [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(1): 016001.
- [44] TYO J S. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(4): 619-630.
- [45] ZHAO X J, BOUSSAID F, BERMAK A, *et al.* Thin photo-patterned micropolarizer array for CMOS image sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(12): 805-807.
- [46] 中国工程物理研究院流体物理研究所.一种基于液晶微阵列器件的分焦平面型偏振成像装置:中国,112129704A [P].2020-12-25.
Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics. A division of focal-plane imaging polarimeter based on liquid crystal micropolarizer array: CN, 112129704A [P]. 2020-12-25. (in Chinese)
- [47] 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所.用于液晶波前校正器的快速响应液晶材料及制备方法:中国,201210046752.2[P].2012-07-25.
Changchun Institute of Optics, Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences. The preparation method of liquid crystal materials used in the liquid crystal wavefront corrector: CN, 201210046752.2 [P]. 2012-07-25. (in Chinese)
- [48] GUO S P, LU Z F, XIONG Z, *et al.* Lithographic pattern quality enhancement of DMD lithography with spatio-temporal modulated technology [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1377-1380.
- [49] POWELL S B, GRUEV V. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21039-21055.
- [50] 郝佳,王燕,周奎,等.基于改进模型的新型对角微偏振阵列设计[J].光学精密工程,2021,29(10):2363-2374.
HAO J, WANG Y, ZHOU K, *et al.* Optimized design model of novel diagonal micropolarizer arrays [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(10): 2363-2374. (in Chinese)
- [51] 吴安安.基于圆偏振光的偏光全息理论基础研究[D].北京:北京理工大学,2015.
WU A A. Essential research of the theory of polarization holography based on the circularly polarized wave [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [52] GILBERT G D, PERNICKA J C. Improvement of underwater visibility by reduction of backscatter with a circular polarization technique [J]. *Applied Optics*, 1967, 6(4): 741-746.
- [53] LIU F, SHAO X P, XU J, *et al.* Design of a circular polarization imager for contrast enhancement in rainy conditions [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9242-9249.
- [54] ALOUINI M, GOUDAIL F, REFREGIER P, *et al.* Multispectral polarimetric imaging with coherent illumination: towards higher image contrast [C]//*Proceedings of SPIE* 5432, *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing* VI. Orlando: SPIE, 2004: 133-144.
- [55] BUENO J M, HUNTER J J, COOKSON C J, *et al.* Improved scanning laser fundus imaging using polarimetry [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(5): 1337-1348.
- [56] LAUDE-BOULESTEIX B, NAZAC A, LE NAOUR G, *et al.* Polarized images of the cervix [C]//*Proceedings of SPIE* 5312, *Lasers in Surgery: Advanced Characterization, Therapeutics, and Systems* XI V. San Jose: SPIE, 2004: 243-246.
- [57] DING Y T, PAU S. Circularly and elliptically polarized light under water and the Umov effect [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 32.
- [58] 陈立刚,洪津,乔延利,等.一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析[J].光谱学与光谱分析,2008,28(10): 2384-2387.
CHEN L G, HONG J, QIAO Y L, *et al.* Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2384-2387. (in Chinese)
- [59] SABATKE D S, DESCOUR M R, DERENIAK E L, *et al.* Optimization of retardance for a complete Stokes polarimeter [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 802-804.

- [60] DESTRIAU G, PROUTEAU J. Réalisation d'un quart d'onde quasi achromatique par juxtaposition de deux lames cristallines de même nature [J]. *Journal de Physique et le Radium*, 1949, 10(2): 53-55.
- [61] PANCHARATNAM S. Achromatic combinations of birefringent plates. Part I. An achromatic circular polarizer [J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, 1955, 41(4): 130-136.
- [62] KOMANDURI R K, LAWLER K F, ESCUTI M J. Multi-twist retarders: broadband retardation control using self-aligning reactive liquid crystal layers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 404-420.
- [63] HSU W L, MA J, MYHRE G, *et al.* Patterned cholesteric liquid crystal polymer film [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, 30(2): 252-258.
- [64] HSU W L, BALAKRISHNAN K, IBN-ELHAJ M, *et al.* Infrared liquid crystal polymer micropolarizer [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(23): 5252-5258.
- [65] MA L L, WU S B, HU W, *et al.* Self-assembled asymmetric microlenses for four-dimensional visual imaging [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(12): 13709-13715.

作者简介:



张士元(1995—),男,吉林省吉林市人,博士研究生,2017年于河北工业大学获得理学学士学位,主要从事液晶偏振光学与光控取向液晶器件的研究。E-mail: zhangshiyuan17@mails.ucas.ac.cn



穆全全(1980—),男,山西吕梁人,博士,研究员,2010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,主要从事液晶光学调控技术、自适应光学技术和智能光学成像等领域的研究。E-mail: muquanquan@ciomp.ac