

皮秒激光制备偏振光栅阵列及其偏振成像应用

孙旭辉¹, 王志文^{1*}, 赵开春², 郑宏宇^{1**}¹山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255000;²清华大学精密仪器系, 北京 100084

摘要 为了克服典型分焦平面法偏振成像的工艺难度高、步骤复杂且所得偏振器消光比小的不足,提出了一种利用皮秒激光烧蚀单方向亚波长金属光栅偏振片制备规则的偏振阵列,再通过胶合来获得多方向偏振滤波器的制备工艺。对烧蚀偏振片的主要激光参数进行了实验优化,优化所得激光功率密度为 $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, 脉冲重合率为 82.17%, 扫描线间距为 0.008 mm, 激光扫描烧蚀速度可达 3000 mm/s。结果显示:偏振片被激光烧蚀后的区域偏振性基本消失,透光率提高到 0.96 以上。制备得到的偏振器保留了商用偏振片的高消光比,且在抗光学干扰以及像素配准方面具有优势。将该偏振滤波器贴覆在相机上进行了偏振成像的验证实验,结果表明:该偏振滤波器计算得到的偏振角误差小于 0.5° , 能准确识别偏振状态,在图像识别和偏振成像领域具有较好的应用价值。

关键词 激光技术; 皮秒激光; 多向偏振阵列; 偏振滤波器; 偏振成像

中图分类号 TG665 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221271

1 引言

偏振是光最重要的特性之一。不同于光谱信息和强度信息,人的肉眼无法识别光的偏振态。偏振信息包含了物体的形状及纹理等信息^[1],因此,偏振探测在物体识别^[2]、遥感导航^[3]以及医疗检测^[4]等领域有着诸多的应用。偏振成像^[5]是通过几个不同偏振角度的图像来求解目标场景的偏振信息,从而重建偏振图像。典型的偏振图像的获取方式有四种^[6],分别为分时成像、分振幅成像、分孔径成像和分焦平面成像^[7-9]。对比其他三种方式,分焦平面偏振成像(DoFP)可以实现偏振信息的实时获取,同时兼具光路简单、体积小的优点。随着微纳加工技术的发展,分焦平面成像也得到了越来越多的关注。

Zhou 等^[10]利用步进光刻和离子刻蚀等方法将偏振器集成在红外焦平面阵列上,探索了偏振片与焦平面阵列的集成技术。Feng 等^[11]利用电子束曝光技术将偏振片与红外传感器直接集成,实现了具有增强对比度的偏振成像。Yang 等^[12]根据现有的铝纳米线偏振成像装置,提出了一种基于像素化偏振器阵列空间布局的具有新的引导图像选择策略的残差插值方法,证明了偏振器阵列的空间布局对于提高 DoFP 偏振仪

插值方法的性能至关重要。褚金奎团队利用柔性纳米压印技术将光栅阵列集成到互补金属氧化物半导体(CMOS)表面并成功制备了室内校准精度为 $\pm 0.3^\circ$ 的仿生偏振导航传感器^[13]。以上偏振成像中提到的工艺方法为当前典型的分焦平面成像器件制备工艺,具有分辨率高,成像效果好等优点,但同时具有工艺难度高、步骤复杂、制造环境要求高并且制备得到的偏振器消光比小等缺点^[14]。

激光加工是利用激光在极小范围内集中极大的能量,使物质发生电离和相变进而移除材料的加工方法。相较于前述工艺,激光加工具有工艺简单、操作灵活、无需掩模等优点,并且在使用振镜扫描时拥有较高烧蚀速度与加工效率^[15]。目前还未有利用激光加工实现多方向偏振光栅阵列技术的研究。本文提出了一种新的偏振滤波器制备工艺,利用超短脉冲皮秒激光烧蚀商用的亚波长金属光栅偏振片,消除烧蚀区域的偏振并保留未烧蚀区的偏振性,使之形成规则的偏振阵列。最后通过胶合的方法将三个偏振方向的偏振阵列贴合到一起,得到具有三个方向偏振通道的滤波器。该工艺克服了前述工艺的缺点,具有制造速度快、步骤简单、环境要求低等优点,能够实现大面积制备。

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2022-11-01; 录用日期: 2022-11-15; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0199100)、山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC1169)、山东省自然科学基金(ZR2020ME047, ZR2020ME164)、山东省泰山学者工程(ts20190401)、淄博校城融合项目(2020SNPT0016)、山东省精密制造与特种加工重点实验室开放课题

通信作者: *wangzhiwen@sdut.edu.cn; **zhenghongyu@sdut.edu.cn

2 偏振成像原理及阵列制备方法

2.1 成像原理

Stokes 在 1852 年研究偏振光时提出偏振光的任何状态都可以用 4 个可测量的量来描述,即 Stokes 参量^[16]。根据 Stokes 提出的测量方法即可得到相应的偏振参数,其强度为

$$I(\theta, \phi) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \cos \phi \sin(2\theta) + S_3 \sin \phi \sin(2\theta)], \quad (1)$$

式中: I 是入射光强度; S_0 是光的总强度; S_1 描述线性水平或垂直的偏振量; S_2 描述线性 $+45^\circ$ 或 -45° 偏振量; S_3 描述光中包含的圆偏振量; ϕ 是相位延迟; θ 是入射光转角。可以看出 4 个 S 参数与入射光的强度建立了等式关系。常见场景中的圆偏振几乎可以忽略不计,研究中常常忽略 S_3 。因此当相位延迟为 0 时,通过测量一束光任意三个偏振角度的光强值即可计算得到前三个 S 参数。本研究采用了 0° 、 45° 及 90° 三个偏振角度作为求解角度,代入式(1)可得

$$\begin{cases} I(0^\circ, 0^\circ) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1) \\ I(45^\circ, 0^\circ) = \frac{1}{2} (S_0 + S_2) \\ I(90^\circ, 0^\circ) = \frac{1}{2} (S_0 - S_1) \end{cases} \quad (2)$$

整理可得

$$\begin{cases} S_0 = I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_1 = I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_2 = 2I(45^\circ, 0^\circ) - I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)求得的前三个 S 参数,即可求出所需要的偏振角(A_{olP})和线偏振度(D_{olP}):

$$\begin{cases} A_{\text{olP}} = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \\ D_{\text{olP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \end{cases} \quad (4)$$

根据上述分析可知,求解偏振角和偏振度至少需要三个不同偏振角度的图像且三个图像需要满足时间和空间上的同一性。对于分焦平面法,其同时性可以保证,但其在空间上对物体进行了分割,即分焦平面法的基本假设为一个超像元的不同像元满足空间同一性^[17]。因此,分焦平面法一般通过缩小像元尺寸来减小分焦平面法原理带来的误差。本文利用皮秒激光加工技术,主要探究激光与铝光栅的相互作用过程,提出一种高效率、低成本的高消光比偏振光栅阵列的制备技术,并探索其在偏振成像中的应用。研究中不追求过小的像元尺寸,而是通过较大的超像元,利用图像

处理算法获得较为准确的光强度信息,从而精确算出偏振角及偏振度,解决了偏振滤波器的制造工艺复杂问题以及滤波器像元与传感器像素的配准困难问题。

2.2 偏振阵列制备方法

实验中使用的皮秒光纤激光器的中心波长为 1035 nm,最小脉宽为 50 ps,重复频率为 25 kHz~5 MHz 可调,最大功率为 70 W。利用脉宽为 50 ps 的脉冲激光对现有的商用亚波长金属光栅偏振片进行烧蚀加工。加工过程中利用振镜调整激光方向,可获得较高的激光扫描速度,其焦距为 100 mm,光斑直径为 20 μm ,扫描速率大于 3000 mm/s。

图 1 展示了实验中使用的偏振片结构,分为两层。上层为亚波长金属光栅结构,其光栅周期为 100 nm,占空比为 0.4,光栅高度为 100 nm。下层为三醋酸纤维素(TAC)基底。



图 1 偏振片结构示意图

Fig. 1 Schematic of polarizer structure

本文利用激光烧蚀图 1 所示偏振片结构中的铝光栅层,使其不再具备偏振特性。在这个过程中,一方面保证 TAC 基底不被过度烧蚀,保留基底的高透光性;另一方面,尽可能减少激光烧蚀的残渣沉积,降低对非烧蚀区域的影响,保留非烧蚀区的偏振性。为验证烧蚀结果,本文使用光学显微镜和环境扫描电子显微镜(SEM)进行表面形貌表征,并使用分光光度计进行透射率测试。

图 2 以一个超像元为例展示了本文使用的激光烧蚀策略。图 2(a)中的箭头为激光扫描路线,即烧蚀区域。箭头未经过的部分为保留区域。激光扫描方向与光栅方向分别成 0° 、 45° 及 90° 。激光加工完成后,将每层偏振阵列烧蚀区域的边缘与另外两层偏振阵列烧蚀区域的边缘对准并贴合,保证每个像元由两层烧蚀透光层和一层偏振滤波层叠加而成,这样可得到具有三个偏振方向的滤波器,如图 2(b)所示。相比于光刻、离子刻蚀等工艺的复杂流程,此工艺将偏振滤波器的制备流程简化为两步,无需苛刻的超净间实验环境,降低了加工难度及成本。

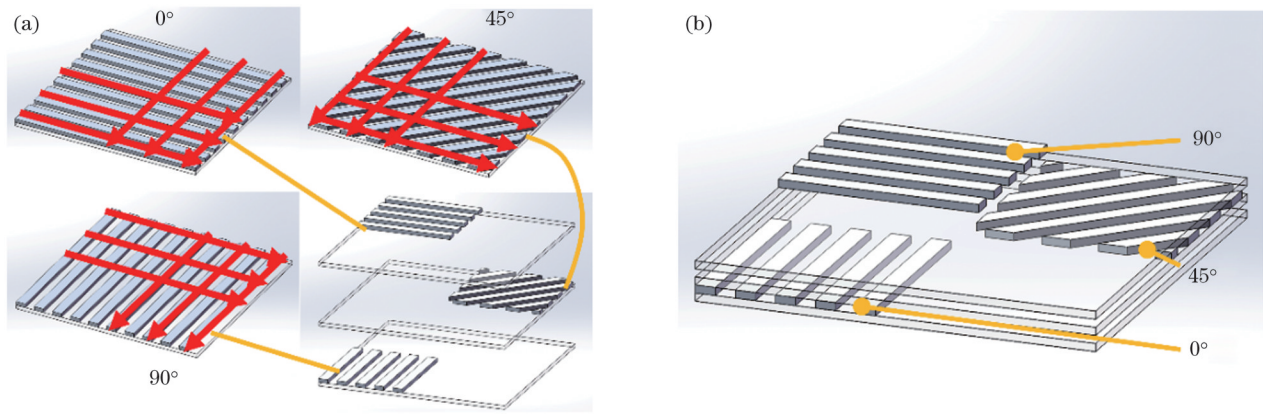


图 2 三方向偏振光栅阵列制备过程的示意图。(a)激光加工过程;(b)单个超像元

Fig. 2 Schematics of fabrication process of three-direction polarization grating array. (a) Laser processing; (b) single super pixel

3 偏振滤波器制备及分析

激光与材料的相互作用过程可分为两个阶段:

1) 激光吸收和材料加热;2) 材料去除。本研究中使用图 1 所示的亚波长金属铝光栅偏振片,其基底为三醋酸纤维素膜。作为常用的光学薄膜材料,三醋酸纤维素膜是透光率最高的高分子材料之一。对于 1035 nm 激光来说,亚波长金属光栅偏振片的铝光栅层为吸收材料,而 TAC 基底为透明材料。超短脉冲激光与透明材料的作用过程^[18]主要是非线性吸收^[19-20]。本文采用的激光器脉宽最小为 50 ps,由于透明材料束缚电子的电离势远大于激光光子能量,一般情况下透明材料不能吸收激光。

作为吸收材料的金属,其对超短脉冲激光能量的吸收与传导可通过双温模型^[21-22]来表征。该模型表达了光子与电子及电子与晶格两种不同的相互作用过程。激光脉宽在飞秒量级时,电子传热时间相比于脉冲时间显得十分漫长,可忽略不计;而当激光脉宽在皮秒量级时,由于脉冲时间与电子晶格耦合时间相当甚至更长,双温模型的传导项不能忽略,即必须考虑热传导对加工材料的影响。

为保证基底材料不会吸收激光脉冲能量,要求激光脉宽至少在数十皮秒量级。然而,在使用激光烧蚀去除铝光栅层的过程中,为避免激光烧蚀产热过多而影响基底的透光性能,又要求使用的激光脉宽尽量小。实验中使用的 50 ps 激光脉宽是既能保证不发生非线性吸收又能降低基底热损伤的合理数值。在该脉宽下需要严格控制激光烧蚀过程中的热传导,即控制激光投射到亚波长金属光栅偏振片表面的能量总量。

激光加工中投射到偏振片表面的能量总量主要与三个激光参数相关,分别为激光功率密度、脉冲重合率以及扫描线间距。由于纳米光栅特征尺寸极小,金属线条间距仅为 40 nm,原子力显微镜也无法测量烧蚀的深度,因此难以定量分析激光烧蚀的影响规律。采用文献中常采用的正交实验法等难以系统优化各个激

光加工参数。因此,本文定性分析了基于几个关键加工参数加工出的表面形貌,如图 3 所示,不同激光参数下烧蚀形貌的定性分析已经可以说明各个关键加工参数的影响规律。为控制文章篇幅并避免重复性工作,本文并未介绍实验优化过程,而是侧重说明激光参数的作用,介绍其影响规律及机理。

图 3 展示了不同激光参数下偏振片的烧蚀形貌。其中,图 3(a)、(d)的激光功率密度分别为 $2.99 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 和 $6.61 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,相应的脉冲重合率为 82.17%,扫描线间距为 0.008 mm;图 3(b)、(e)的扫描线间距分别为 0.004 mm 和 0.028 mm,相应的激光功率密度为 $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,脉冲重合率为 82.17%;图 3(c)、(f)的脉冲重合率分别为 72.62% 和 86.81%,相应的激光功率密度为 $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,扫描线间距为 0.008 mm。图 3(g)是偏振片未经激光烧蚀时的表面形貌。

如图 3(a)所示,在激光功率密度过低时偏振片的金属光栅层未有效烧蚀去除,在激光扫描区域中仅有部分出现了激光烧蚀痕迹,导致金属光栅偏振片的偏振性无法完全消除;图 3(d)则表明在高激光功率密度下激光不仅烧蚀了金属光栅层,还产生大量飞溅残渣,导致偏振片透光率下降并且污染了偏振片非烧蚀区域。图 3(b)和图 3(e)分别展示了在激光扫描线间距过密和过疏时的烧蚀形貌,可以看出:密集的激光扫描线同样会损伤偏振片基底并产生飞溅残渣,激光扫描线间距过小时会影响整体偏振阵列的加工速度,降低加工效率;而激光扫描线过疏则会导致烧蚀线分离,在应烧蚀区域产生未烧蚀区。图 3(c)和图 3(f)展示了脉冲重合率的影响,当重合率低时激光烧蚀线上会产生明显的鱼鳞状烧蚀痕迹,导致偏振片烧蚀不均匀,这会严重影响偏振片烧蚀区域的透光性;而重合率过高时,激光脉冲热量积累会将偏振片基底熔化并产生熔融点,熔融点的存在会影响所在区域的折射率,从而降低偏振片透光率。

根据图 3 所示的烧蚀形貌,可以看出烧蚀形貌的均匀性主要由激光脉冲重合率和扫描线间距决定,其

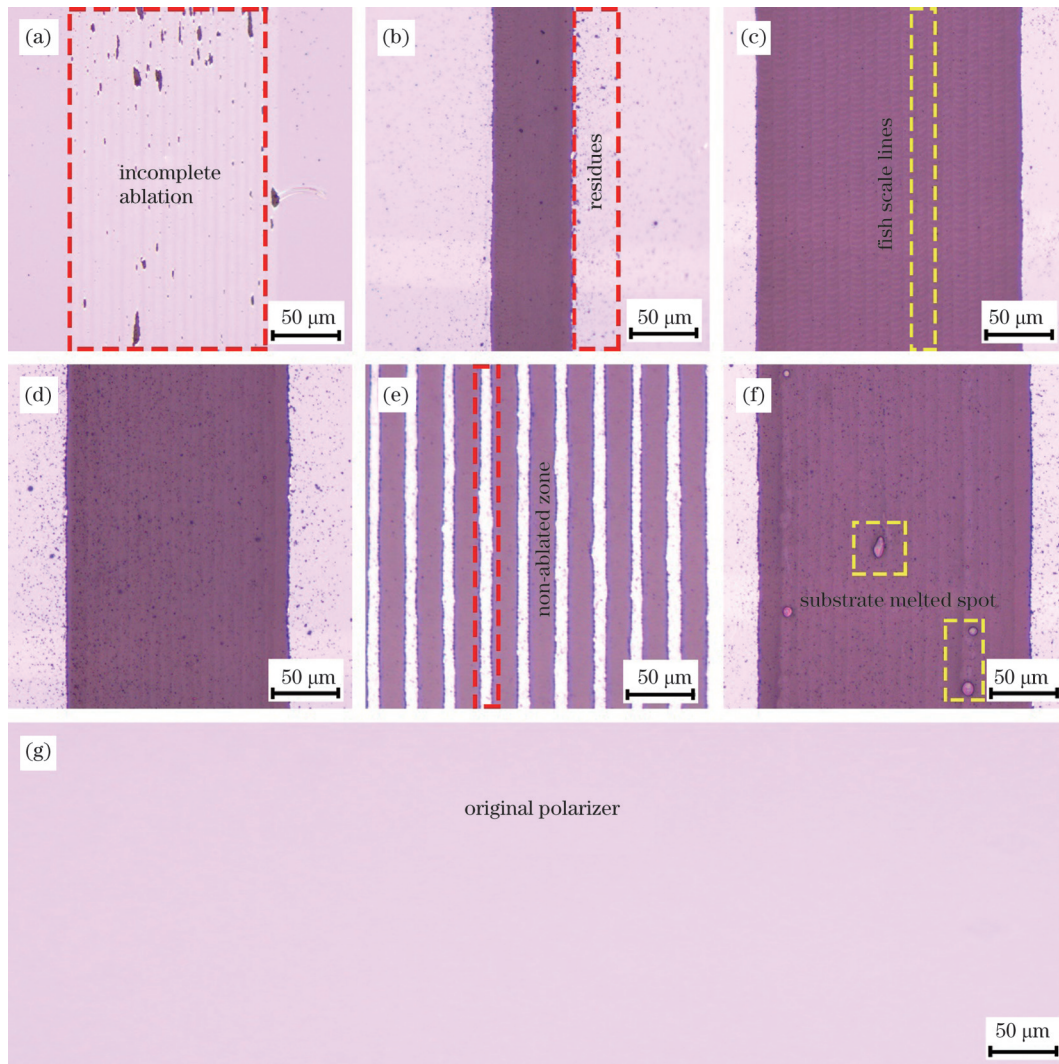


图3 激光烧蚀形貌对比。(a)激光功率密度 $2.99 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$; (b)扫描线间距 0.004 mm ; (c)脉冲重复率 72.62% ; (d)激光功率密度 $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$; (e)扫描线间距 0.028 mm ; (f)脉冲重复率 86.81% ; (g)亚波长金属光栅偏振片原貌

Fig. 3 Comparison of laser ablation morphologies. (a) Laser power density is $2.99 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$; (b) scan line spacing is 0.004 mm ; (c) pulse repetition rate is 72.62% ; (d) laser power density is $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$; (e) scan line spacing is 0.028 mm ; (f) pulse repetition rate is 86.81% ; (g) original appearance of subwavelength metal grating polarizer

中激光脉冲重合率决定了激光烧蚀线的均匀性,而扫描线间距决定了烧蚀面的均匀性。激光功率密度则决定了单个激光脉冲投射到偏振片的能量,并且影响单个激光脉冲的烧蚀面积,进而影响烧蚀均匀性。综合考量激光投射到偏振片表面的能量总量对热传导的影响,可以看出三个激光参数在影响偏振片烧蚀形貌的同时还对烧蚀质量有耦合影响。如使用高的激光功率密度时,要达到相对好的烧蚀形貌,就需要相应增大扫描线间距并减小脉冲重合率,使激光投射到偏振片表面的总能量保持在相对稳定的值。为减少激光烧蚀过程中的热传导,防止TAC基底出现热损伤,同时在保证烧蚀区域偏振性被消除的前提下,降低偏振片烧蚀区域的不均匀性,在激光功率密度超过烧蚀阈值的前提下应选择较小的激光功率及适当的扫描线间距和脉冲重合率。经过实验优化,最终激光参数设定为:激光功率密度为 $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,脉冲重合率为

82.17% (激光频率为 1 MHz ,扫描速率为 3333 mm/s),扫描线间距为 0.008 mm 。同时,为减少激光加工中的飞溅残渣,降低其对偏振片透光率和偏振性能的影响,实验中使用等离子风枪加快空气流速并减少静电吸附,从而尽可能排除残渣。

图4为优化激光参数下烧蚀前后偏振片的SEM形貌对比,其中,图4(a)为激光烧蚀前的偏振片形貌,图4(b)为激光烧蚀后的偏振片形貌。

从图4可以看出烧蚀偏振片表面仍有栅格状结构以及熔融状铝球残留,这表明烧蚀后的偏振片表面的铝光栅层并未完全去除。当烧蚀后的金属光栅仅剩几纳米厚度时,其透光率大大提高,对激光的吸收降到很低,在这种情况下很难在不损伤基底的前提下去除残留的光栅条纹。因此,本文并不追求将金属光栅层完全去除,而是要求烧蚀后的区域偏振性消除、透光率得到提高。图5为偏振片在被激光烧蚀前后的透光率对

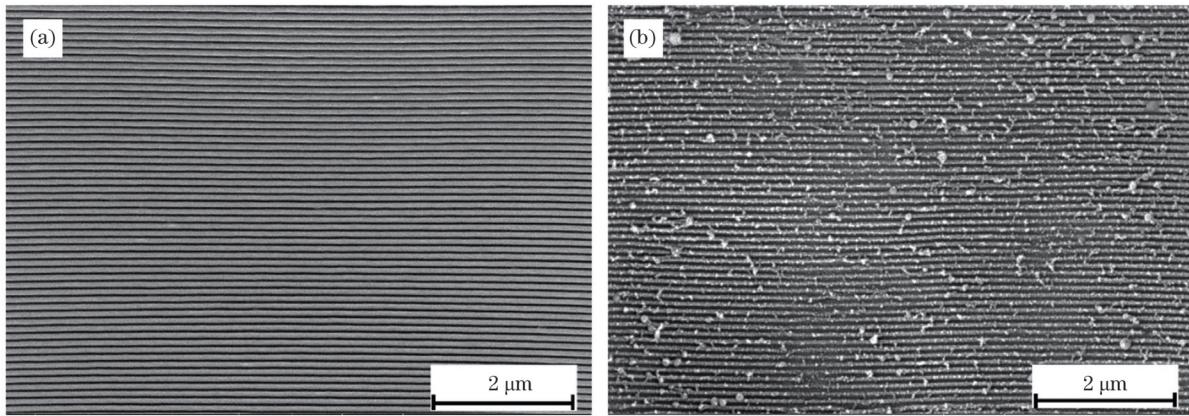


图 4 烧蚀前后偏振片形貌 SEM 图。(a)烧蚀前;(b)烧蚀后

Fig. 4 SEM images of morphologies of polarizer before and after ablation. (a) Before ablation; (b) after ablation

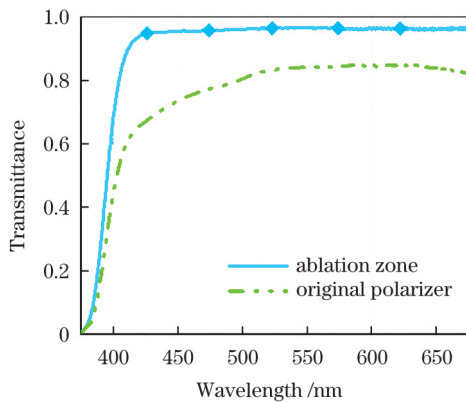


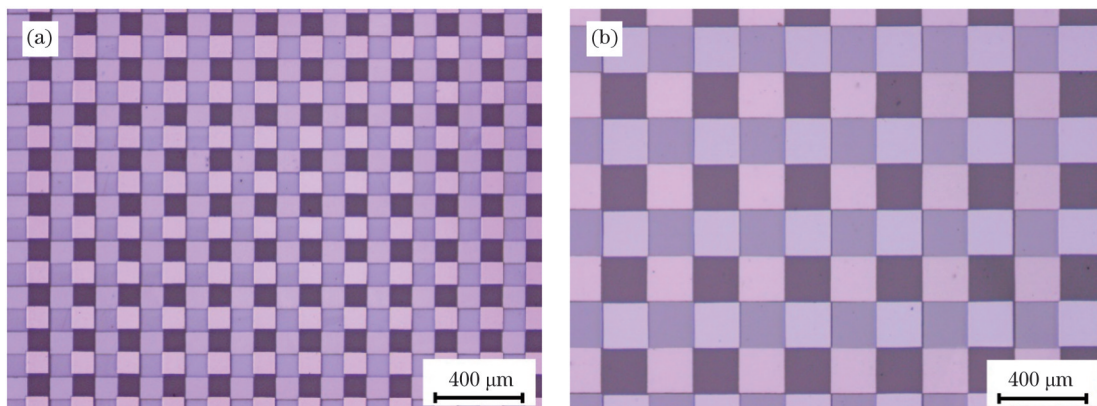
图 5 烧蚀前后偏振片的透光率

Fig. 5 Transmittances of polarizer before and after ablation

比,其中实线为烧蚀区域的透光率曲线,虚线为原始偏振片的透光率曲线。可以看出:经激光烧蚀后偏振片的透光率提高到了 0.96 以上,接近 TAC 基底的透光率;在可见光范围内烧蚀区的透光率基本没有波动,而原始偏振片的透光率相对较低,且在可见光范围内具

有较大波动,这是由于金属纳米光栅本身具有偏振滤波性能^[23]。图 5 中烧蚀后的偏振片透光曲线在 350 ~ 400 nm 波段仍有截止波长存在,这是由于残留光栅层的影响,根据课题组之前的研究^[24],残留的几个纳米厚度的铝光栅层已不再具有偏振特性。当不同偏振角度的线偏振光入射时,测量激光烧蚀后的偏振片的透光率变化,结果显示:烧蚀后的样品透光率没有变化,原始偏振片透射率曲线是规则的周期性正弦变化曲线。这进一步验证了偏振片经激光烧蚀后的区域已消除了偏振性能。因此,激光烧蚀产生的熔凝残渣及残留栅格结构对偏振片透光率无明显影响。

根据以上分析,在不过度烧蚀原始偏振片的前提下,采用激光功率密度为 $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,脉冲重合率为 82.17%,扫描线间距为 0.008 mm,制备的偏振光栅阵列在烧蚀区域消除了偏振性能并保持了较高的透射率,可以较好满足偏振探测的要求。研究制备了的像元尺寸分别为 100 μm 和 200 μm 的光栅阵列式偏振滤波器,如图 6 所示,图中不同颜色表示不同偏振方向。

图 6 偏振滤波器实物图。(a)像元尺寸 100 μm ; (b)像元尺寸 200 μm Fig. 6 Physical images of polarization filter. (a) Pixel size is 100 μm ; (b) pixel size is 200 μm

4 成像研究及分析

分焦平面法成像的误差因素除原理误差外,还包括偏振器消光比和光学串扰等因素^[25]。由式(3)

可知,在计算各 S 参数时使用的各个偏振角度的光强值为完全消光所得的强度值。因此,大消光比的偏振器能提高偏振成像计算时的精度。而实际上基于各种复杂工艺直接集成在感光元件上的偏振

器件很难实现大的消光比,目前公开报道测试的消光比一般为几十到数百^[26]。本文制备的偏振滤波器使用了商用的亚波长金属光栅偏振片,其消光比在波长为 550 nm 时为 4250,远高于文献报道的数值。

光学串扰^[27]同样对偏振成像精度的影响很大。在分焦平面法中光学串扰表现为不同偏振角度的光强相互影响。如图 7 所示,在使用相机拍摄时,通光量同时影响着串扰和偏振计算的精度,而通光量的多少由相机的光圈控制。

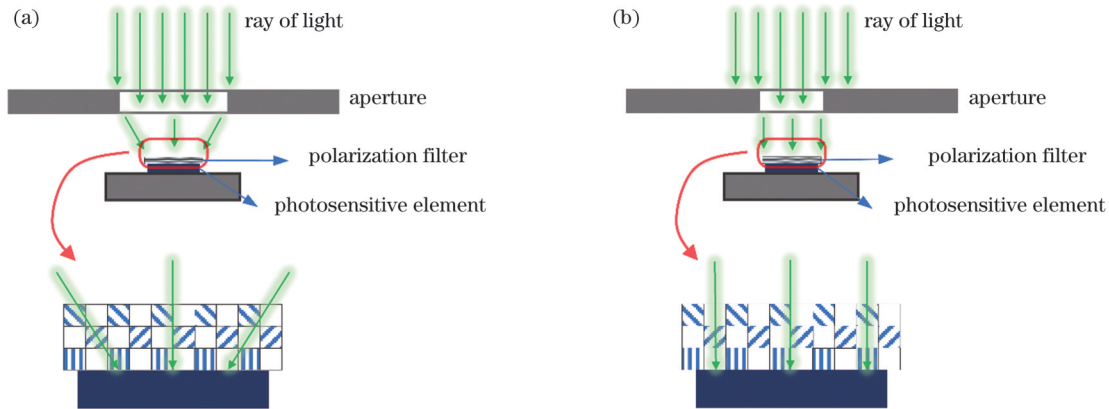


图 7 光学串扰示意图。(a)大光圈;(b)小光圈

Fig. 7 Schematic diagrams of optical crosstalk. (a) Large aperture; (b) small aperture.

图 7(a)和图 7(b)分别展示了大光圈和小光圈对光学串扰的影响。如图 7(a)所示,大光圈的通光量更大但其串扰也更严重。而图 7(b)所示的小光圈串扰较小,但小通光量降低了所需的偏振方向与其他方向的亮度差,从而影响了偏振计算的精确度。本偏振滤波器采取的三层偏振片叠加的制备工艺导致滤波器厚度增大,带来的光学串扰比一般的单层滤波器更大,所以本文采取了大的像元尺寸,这样每个像元在与相机匹配时能包括较多的相机像素,在计算取值时可以排除像元周围被串扰影响的边缘像素数据,从而降低串扰的影响。因此在拍摄图像时可以采取较大通光量。此外,该取值方式在偏振器像元与相机像素匹配方面具有优势,由于每个像元包括的相机像素较多,无需将像元与相机像素一一对准,因此该偏振器只需贴覆在相机成像单元表面,通过程序设定相机像素单元与制备的像元的对应关系即可满足偏振计算的精确度,从而避免了偏振器像元与相机像素配准困难的问题。总体而言,本研究制备得到的偏振滤波器在消光比、抗光学干扰以及像素配准方面具有优势。

根据前述偏振成像原理,对图 6 中像元尺寸为 200 μm 的偏振滤波器进行了成像测试。将偏振滤波器贴覆在相机图像传感器上,使用镜头进行聚焦,并在相机镜头前覆盖/半覆盖一张倾斜 40° 的偏振片。相机镜头对准光学积分球内部的背光板,入射到相机镜头的光相对均匀且无偏振,通过拍摄有偏振/无偏振区域图像来验证制备的偏振滤波器在偏振特征分辨方面的性能。拍摄得到的图像及偏振重建图像如图 8 所示。

图 8(a)、(b)为在相机镜头前覆盖一张单向的偏振片时拍得的图像,其中,图 8(a)为偏振片全覆盖的图像,图 8(b)为半覆盖图像。图 8(c)、(d)分别为通过

图 8(a)、(b)计算并重建得到的偏振度伪彩图,图像右侧的颜色条代表了偏振度的数值。图 8(e)、(f)分别为通过图 8(a)、(b)计算并重建得到的偏振角伪彩图,图像右侧的颜色条代表了偏振角的数值。图 8(a)、(b)中每四个黑白小色块为一组像元,对应重建伪彩图中的一个色块。每个黑白小色块对应相机图像传感器中 80 pixel \times 80 pixel 的区域,在计算偏振数值时,排除了小色块边缘受到干扰的像素,对中心 60 pixel \times 60 pixel 区域的光强度取均值并以此值作为该小块区域的光强度值,从而尽量去除光学串扰的影响。伪彩图中解算出的每一色块的偏振度和偏振角对应着图 8(a)、(b)中相应区域的偏振值。

从原相机图像图 8(a)、(b)可以看出:图像中部方框标出的部分有几个干扰点,并且重建得到的伪彩图中中部方框区域均有几个略带偏差的色块,这些干扰点是偏振片贴合过程中产生的气泡。从图 8(c)、(d)可以看出:覆盖偏振片的部分为比较明亮的黄色,对比右侧的颜色条可知该偏振度为 0.91~0.93;而未覆盖偏振片的部分为深蓝色,其偏振度接近 0,这说明通过本偏振滤波器计算得到的偏振数值较为精准。从图 8(e)、(f)可以看出:覆盖偏振片的部分为比较均匀的深蓝色,对比颜色条,其偏振角在 $-40.1^\circ \sim -39.6^\circ$ 之间,计算所得偏振角与测量用偏振片的倾斜角度误差小于 0.5° ,这说明本偏振滤波器能较准确识别偏振状态。图 8(d)、(f)中覆盖偏振片部分与未覆盖偏振片部分的交界处有一条明显的锯齿状分隔带,对应于图 8(b)中的明暗交界。锯齿状分隔带的产生是由于偏振器的超像元跨越了明暗交界的两边,因此单个超像元内的光强度发生了突变,此为前述分焦平面成像原理误差。当同一超像元三个不同偏振角度的像元所

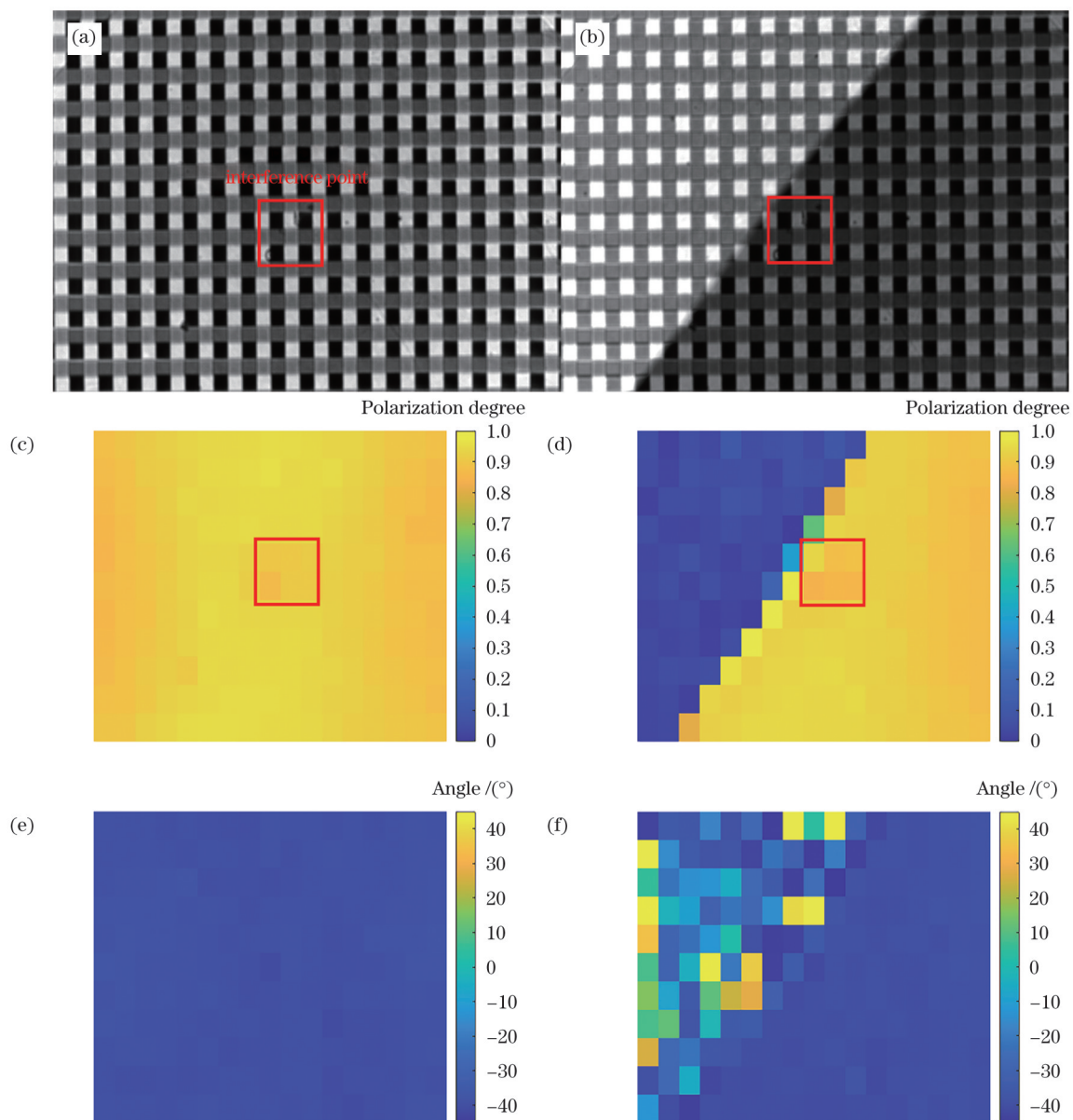


图8 偏振图像。(a)全覆盖偏振片原图;(b)半覆盖偏振片原图;(c)全覆盖偏振片偏振度重建图;(d)半覆盖偏振片偏振度重建图;(e)全覆盖偏振片偏振角重建图;(f)半覆盖偏振片偏振角重建图

Fig. 8 Polarization images. (a) Original image for polarizer full-covering; (b) original image for polarizer semi-covering; (c) polarization degree reconstruction map for polarizer full-covering; (d) polarization degree reconstruction map for polarizer semi-covering; (e) polarization angle reconstruction map for polarizer full-covering; (f) polarization angle reconstruction map for polarizer semi-covering

拍摄的物体有明显区别,或者拍摄到物体的边界时就会产生一条锯齿状分隔带。由于此时超像元得到的图像不满足偏振成像要求的空间上的同一性,据此计算得到的偏振度和偏振角也不准确,需要忽略这条锯齿带上的偏振数值。因此,本偏振滤波器不适用于拍摄复杂结构物体。综上所述,本研究制备得到的偏振滤波器在偏振的识别和偏振数值的计算上具有较好的应用价值。

5 结 论

提出了一种应用于分焦平面法偏振成像的新的偏

振滤波器制备工艺。利用超短脉冲激光烧蚀亚波长金属光栅偏振片,在消除烧蚀区域偏振性的同时保留未烧蚀区的偏振性,使之形成规则的偏振阵列。然后通过胶合的方法将 0° 、 45° 及 90° 偏振方向的偏振阵列贴合到一起,得到具有三个方向偏振通道的偏振滤波器。对三个主要激光参数进行了实验优化,采用了激光功率密度为 $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 、脉冲重合率为82.17%、扫描线间距为0.008 mm的激光参数烧蚀偏振片,激光扫描烧蚀速度可达3000 mm/s。制备得到的偏振器保留了商用偏振片的高消光比,偏振片被激光烧蚀后的区域的偏振性基本消失,透光率提高到0.96以上。本制

备工艺相比于典型的分焦平面制备工艺具有制造速度快、步骤简单、环境要求低等优点,能够实现大面积制备。制备了像元尺寸分别为 $100\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 的偏振滤波器,论证了其在消光比、抗光学干扰以及像素配准上具有优势。将该偏振滤波器贴覆在相机上进行了偏振成像的验证实验。实验结果表明:该偏振滤波器计算得到的偏振度较为精准,偏振角误差小于 0.5° ,能准确识别偏振状态。综上所述,本研究制备得到的偏振滤波器在偏振的识别和偏振数值的计算上具有应用价值,为分焦平面成像的广泛应用提供了一种可能方案。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 褚金奎, 张培奇, 成昊远, 等. 基于特定偏振态成像的水下图像去散射方法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(5): 1207-1215.
Chu J K, Zhang P Q, Cheng H Y, et al. De-scattering method of underwater image based on imaging of specific polarization state[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1207-1215.
- [3] Yadav P, Shein-Idelson M. Polarization vision in invertebrates: beyond the boundaries of navigation[J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2021, 48: 50-56.
- [4] 沈元星, 姚悦, 何宏辉, 等. 非标记、量化穆勒矩阵偏振成像在辅助临床诊断中的应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207001.
Shen Y X, Yao Y, He H H, et al. Mueller matrix polarimetry: a label-free, quantitative optical method for clinical diagnosis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207001.
- [5] Kruse A W, Alenin A S, Tyo J S. Review of visualization methods for passive polarization imaging[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(8): 082414.
- [6] Wang Y, Su Y Q, Sun X Y, et al. Principle and implementation of Stokes vector polarization imaging technology[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6613.
- [7] 李岩松, 赵慧洁, 李娜, 等. 基于中红外偏振的海面太阳耀光背景下的目标探测[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1910004.
Li Y S, Zhao H J, Li N, et al. Detection of marine targets covered in sun glint based on mid-infrared polarization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1910004.
- [8] 罗海波, 曹军峰, 盖兴琴, 等. 基于偏振成像的工业视觉及其关键技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(14): 1415003.
Luo H B, Cao J F, Gai X Q, et al. Industrial vision based on polarization imaging and its key technologies[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 1415003.
- [9] 张紫杨, 叶松, 熊伟, 等. 基于空间调制偏振成像的 Savart 棱镜参数标定[J]. *光学学报*, 2022, 42(21): 2111001.
Zhang Z Y, Ye S, Xiong W, et al. Parameter calibration of Savart prism based on spatially modulated polarization imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(21): 2111001.
- [10] Zhou J, Zhou Y, Shi Y, et al. A compact polarization-integrated long wavelength infrared focal plane array based on InAs/GaSb superlattice[J]. *Science China Information Sciences*, 2022, 65(2): 122407.
- [11] Feng B, Chen Y F, Sun D, et al. Precision integration of grating-based polarizers onto focal plane arrays of near-infrared photovoltaic detectors for enhanced contrast polarimetric imaging[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3(3): 035201.
- [12] Yang J, Jin W Q, Qiu S, et al. Residual interpolation integrated pixel-by-pixel adaptive iterative process for division of focal plane polarimeters[J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1529.
- [13] Liu J, Zhang R, Li Y, et al. A bio-inspired polarization navigation sensor based on artificial compound eyes[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2022, 17(4): 046017.
- [14] 王德江, 孙嵩, 孙雪倩. 消光比与探测器噪声对基于纳米线栅偏振成像系统偏振精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2371-2379.
Wang D J, Sun H, Sun X Q. Effect of extinction ratio and detector noise on polarization accuracy of nanometer wire grid polarization imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2371-2379.
- [15] Kim B, Nam H K, Watanabe S, et al. Selective laser ablation of metal thin films using ultrashort pulses[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2021, 8(3): 771-782.
- [16] Zhao Y Q, Yi C, Kong S G, et al. Object detection with multi-band polarization imaging[M]//Zhao Y Q, Yi C, Kong S G, et al. Multi-band polarization imaging and applications. Advances in computer vision and pattern recognition. Heidelberg: Springer, 2016: 111-153.
- [17] Hao J L, Zhao Y Q, Liu W T, et al. A micro-polarizer array configuration design method for division of focal plane imaging polarimeter[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 2828-2838.
- [18] 姜玺阳, 王飞飞, 周伟, 等. 飞秒激光与材料相互作用中的超快动力学[J]. *中国激光*, 2022, 49(22): 2200002.
Jiang X Y, Wang F F, Zhou W, et al. Ultrafast dynamics in the interaction of femtosecond laser with materials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(22): 2200002.
- [19] Sopena P, Garcia-Lechuga M, Wang A D, et al. Ultrafast laser stabilization by nonlinear absorption for enhanced-precision material processing[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 993-996.
- [20] Savastru D, Savastru R, Miclos S, et al. Simulation of laser induced absorption phenomena in transparent materials[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 110: 288-295.
- [21] Nicarel A, Oane M, Mihailescu I N, et al. Fourier two-temperature model to describe ultrafast laser pulses interaction with metals: a novel mathematical technique[J]. *Physics Letters A*, 2021, 392: 127155.
- [22] Qiu T Q, Tien C L. Heat transfer mechanisms during short-pulse laser heating of metals[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1993, 115(4): 835-841.
- [23] 王志文, 褚金奎, 王倩怡. 单层亚波长金属光栅偏振器透射机理研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0705002.
Wang Z W, Chu J K, Wang Q Y. Transmission analysis of single layer sub-wavelength metal gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0705002.
- [24] Sun X H, Wang Z W, Tian W T, et al. An approach for fabrication of multi-directional polarizer array by picosecond laser micro-processing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107903.
- [25] Chen Y K, Zhu Z M, Liang Z D, et al. Analysis of signal-to-noise ratio of angle of polarization and degree of polarization[J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(5): 1461.
- [26] 杨洁, 金伟其, 裘溯, 等. 考虑偏振片非理想性的可见光偏振成像修正模型[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 334-339.
Yang J, Jin W Q, Qiu S, et al. Correction model for visible light polarization imaging considering non-ideality of polarizers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 334-339.
- [27] Gruev V, Perkins R, York T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19087-19094.

Polarization Grating Array Fabricated by Picosecond Laser and Its Application in Polarization Imaging

Sun Xuhui¹, Wang Zhiwen^{1*}, Zhao Kaichun², Zheng Hongyu^{1**}

¹*School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China;*

²*Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Abstract

Objective The focal plane polarimeter (DoFP) polarization imaging is one of the most popular polarization imaging methods. It works in real time, has a simple optical path, and can be easily integrated. The polarization filter is an important part of the DoFP. Typical polarization filter fabrication methods include photolithography, focused ion-beam etching, and nanoimprint lithography. A filter prepared using these methods has the advantages of high resolution and favorable imaging effects. However, these methods have significant fabrication difficulties, complex processing steps, and strict requirements for the operating environment. Moreover, the prepared polarizer exhibits a low extinction ratio. Compared to the above fabrication processes, laser processing has the advantages of a simple process and flexible operation and does not require a mask. In this study, a fabrication process for a multi-directional polarization filter is proposed. This process employs a picosecond laser to ablate the unidirectional subwavelength metal grating polarizer to form a regular polarization array and then obtain a multi-directional polarization filter by cementation. This method can achieve large-area fabrication of polarization grating arrays with a high extinction ratio.

Methods Commercial subwavelength metal grating polarizers are ablated by a picosecond laser to remove the polarization effects in the ablation zone and obtain regular three-directional polarization arrays. A polarization filter is obtained by alignment and cementation in their respective directions. During the fabrication process, the laser power is strictly controlled to avoid excessive ablation on the TAC substrate and retain the high transmittance of the substrate. Meanwhile, residue deposition during laser ablation should be minimized to reduce the influence of the non-ablation area on polarization. The influence of the main laser parameters on ablation morphology is investigated. To verify the ablation results, optical microscopy and environmental scanning electron microscopy are used to characterize the surface morphology, and a spectrophotometer is used to test the transmittance. The polarization filter is affixed to a camera for the verification of polarization imaging. The influence of optical crosstalk is analyzed using the camera aperture. The performance of the polarizer is verified by the polarizing film covering or semi-converging camera lens.

Results and Discussions The total laser energy projected onto the surface of the polarizer must be strictly controlled during laser processing. Three main laser processing parameters are identified: the laser power density, pulse overlapping ratio, and scan line spacing. During the experiments (Fig. 3), the uniformity of the ablation morphology is mainly determined by the laser pulse overlapping ratio and scanning line spacing. The laser power density determines the energy that a single laser pulse projects onto the polarizer and affects the ablation area, thereby affecting the ablation uniformity. Simultaneously, these three parameters also have coupling effects on the laser ablation process. The main laser ablation parameters are experimentally optimized with an optimized laser power density of $5.89 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, a pulse overlapping ratio of 82.17 %, a scanning line spacing of 0.008 mm, and a laser scanning ablation speed of 3000 mm/s. The morphological characterization (Fig. 4) of the laser-ablated polarizers shows that there are still some grid structures and residues in the ablated area. Removing these residues without damaging the substrate is difficult. According to experimental observations and light transmission tests (Fig. 5), these residues show almost no influence on the transmittance and polarization properties. There are no polarization properties in the ablation area, and the light transmission of the ablation area is 0.96, which is high enough to meet the requirements of the polarization array.

In this study, grating array polarization filters with pixel sizes of 100 μm and 200 μm are fabricated (Fig. 6). An imaging test is performed for the prepared polarizer, and the negative effects of the extinction ratio and optical crosstalk are analyzed and discussed (Fig. 7). The test results demonstrate that the polarization calculated by this polarization filter is accurate, and the angle error between the calculation and actual value is less than 0.5° (Fig. 8).

Conclusions In the present study, a novel fabrication process for polarization filters is proposed for polarization imaging using the DoFP method. A picosecond laser is used to ablate the subwavelength metal grating polarizer, which eliminates polarization in the ablated area while retaining polarization in the non-ablated area to form a regular polarization array. The 0° , 45° , and 90° polarization arrays are fitted together by cementation to obtain a polarization filter with three-directional polarization channels. In the laser ablation area, the polarization properties diminish, and the light transmittance becomes greater than 0.96. The prepared polarizer retains the high extinction ratio of commercial polarizers and reduces optical interference and pixel registration. The polarization imaging results show that the polarization angle error calculated using the polarization filter is less than 0.5° , and the polarization state can be accurately identified. In summary, the polarization filter has good application prospects in the field of image recognition and polarization imaging.

Key words laser technique; picosecond laser; multidirectional polarization array; polarization filter; polarization imaging