

# 基于衍射重叠相位恢复术的平面偏振双折射测量

程北<sup>1,2,3</sup>, 张雪洁<sup>2</sup>, 刘诚<sup>2</sup>, 朱健强<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 基于衍射重叠相位恢复术(PIE),提出一种新的平面偏振双折射测量方法。利用 PIE 测量方法,对样品在两种不同偏振状态下形成的暗场探测光复振幅进行重建,并分别从探测光相位及复振幅之比中简单准确地提取相位延迟量及方位角,实现了双折射样品的二维定量测量。采用双折射分辨率靶对所提方法进行实验验证,所得结果与分辨率靶实际分布完全相符,相位延迟量最大误差不超过 23.9 nm,方位角误差为 0.49°。该方法结构简单,能解决传统平面偏光仪无法实现定量双折射测量的难题,同时减少了 PIE 扫描的次数,缩短数据采集时间及处理流程,为大口径光学器件的双折射检测提供了一种实用方法。

**关键词** 测量; 偏振检测; 双折射; 相位恢复

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1204003

## Birefringence Measurement Based on Ptychographic Iterative Engine in Planar Polarimeter

Cheng Bei<sup>1,2,3</sup>, Zhang Xuejie<sup>2</sup>, Liu Cheng<sup>2</sup>, Zhu Jianqiang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China;

<sup>2</sup>Joint Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A novel birefringence measurement method based on a ptychographic iterative engine (PIE) in a planar polarimeter is proposed in this paper. The complex amplitudes formed by a sample in a dark field under two different polarization states are reconstructed using the proposed PIE method. The phase retardation and azimuth angle are simply and accurately extracted from the probe phase and ratio of two complex amplitudes, respectively, and the two-dimensional quantitative measurement of birefringence samples is realized. A birefringence resolution target is used to verify the proposed method, and the obtained results are completely consistent with the resolution target's actual distributions. The maximum phase retardation error is no more than 23.9 nm, and the azimuth angle error is 0.49°. This method has a simple structure and enables a traditional planar polarimeter to quantitatively measure birefringence. The proposed method reduces the number of required PIE scans and shortens the data collection time and processing process, providing a practical method for the birefringence measurement of large-aperture optical devices.

**Key words** measurement; polarization detection; birefringence; phase retrieval

**OCIS codes** 120.5410; 260.1440; 100.5070

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2019-08-07; 录用日期: 2019-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092,31522056,11647144)、上海市自然科学基金(17ZR144820)

\* E-mail: jqzhu@siom.ac.cn

# 1 引 言

双折射样品因其可改变光束的偏振特性而被广泛应用于矢量光束调控<sup>[1]</sup>、生物偏振成像<sup>[2]</sup>、光纤通信<sup>[3]</sup>及应力检测<sup>[4]</sup>等领域。在双折射样品的使用中,研究人员最为关注的是双折射样品的相位延迟量和快轴方向(即方位角)。常用的二维双折射测量方法是相移光弹法<sup>[5-7]</sup>,该方法采用索累-巴比涅补偿器、1/4波片等偏振器件,通过多次旋转偏振器件记录不同相移下的强度图像,计算出样品的相位延迟量和方位角分布,这种方法测量及计算过程简单,得到了广泛的应用。但是相移光弹法需要高质量的补偿器和波片,测量精度极大地受波片补偿器等精度的影响。平面偏光仪结构简单,仅包含两个偏振片,因易于操作而被广泛用于双折射的定性观测。由于在平面偏光仪获得的强度图中,相位延迟量和快轴分布信息是耦合的,很难仅通过强度信息将它们分离开来,因此无法将平面偏光仪用于相位延迟量及方位角的定量测量。

衍射重叠相位恢复术(PIE)<sup>[8-10]</sup>是一种高精度的相位测量方法。PIE利用照明光阵列扫描衍射物体并保证相邻位置间有一定比例的重叠照明面积,同时在衍射物体远场处记录各个位置的衍射光斑,通过迭代的计算方式可以同时重建出探测光与衍射物体的复振幅分布。相邻位置照明区域的重叠使得记录信息存在一定的冗余,从而重建出的相位具有较高的信噪比及精度。将PIE与偏振测量相结合以检测各向异性介质的研究已有报道。现有方法主要分为两种思路,单偏振PIE测量<sup>[11-13]</sup>及混合偏振PIE测量<sup>[14]</sup>。在单偏振PIE测量中,Ferrand等<sup>[11]</sup>提出矢量型PIE,在不同线偏振状态下进行多次PIE测量,利用最速梯度下降法重建出待测物体琼斯矩阵的4个分量,从而提取出所需的各个物理参数;Anthony等<sup>[12]</sup>在不同圆偏振状态下进行5次PIE测量,结合相移干涉法实现了两个主应力分量的分离。关于混合偏振PIE测量,Zhang等<sup>[14]</sup>提出采用线偏振照明光阵列扫描待测双折射样品,得到一组包含两个正交偏振分量的衍射光斑,利用混合态重建算法恢复得到样品的偏振信息,进而求出其相位延迟量及快轴分布。目前,单偏振PIE测量已在实验中取得良好效果,由于其需要在不同偏振状态下进行多次扫描测量,整个数据采集及重建的时间非常长,而且现有研究尚未对双折射相位延迟量及方位角给出简单直接的测量方案。混合偏振PIE

测量能很好地解决数据采集时间长的问题,但目前仍停留在理论阶段。另外,虽然PIE测量具有视场不受限的优点,但上述方法需要对双折射样品进行扫描,仍不适用于口径较大的样品,而且大多数具有双折射特性的光学样品没有精细结构,这样的弱衍射样品在扫描时会产生较大的重建误差。

本文提出一种基于PIE的平面偏振双折射测量方法。该方法在结构最为简单的平面偏光仪基础上,结合PIE相位测量方法,实现样品相位延迟量及方位角的二维定量检测。一方面它直接面向样品相位延迟量及方位角进行测量,减少了单偏振PIE扫描的次数,缩短数据采集时间及处理流程;另一方面将PIE复振幅测量与平面偏光仪相结合,解决了传统平面偏振无法实现二维定量测量的难题,同时将样品双折射信息加载至探测光复振幅中,实现了大口径样品的测量。

## 2 测量原理

### 2.1 双折射测量原理

图1为利用平面偏光仪测量双折射样品的原理示意图。偏振方向为 $3\pi/8$ 的激光垂直入射至起偏器 $L_1$ ,经过待测双折射样品和检偏器 $L_2$ 后,得到出射光 $P$ 。当起偏器 $L_1$ 和检偏器 $L_2$ 的偏振方向分别为 $\pi/2$ 和 $0$ 时(实线),出射光为 $P_1$ 。同时将 $L_1$ 和 $L_2$ 旋转 $-\pi/4$ ,两者的偏振方向分别为 $\pi/4$ 和 $3\pi/4$ 时(虚线),出射光为 $P_2$ 。根据琼斯算法,不同状态下的出射光分别为

$$P_1 = L_0 J_{\delta, \varphi} L_{\pi/2} E_{in}, \quad (1)$$

$$P_2 = L_{3\pi/4} J_{\delta, \varphi} L_{\pi/4} E_{in}, \quad (2)$$

式中: $E_{in}$ 为入射光; $L$ 为线偏振片的琼斯矩阵,下标代表偏振方向; $J_{\delta, \varphi}$ 为待测双折射样品的琼斯矩阵<sup>[15]</sup>,表示为

$$J_{\delta, \varphi} = \begin{bmatrix} e^{i\delta} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi & (e^{i\delta} - 1) \sin \varphi \cos \varphi \\ (e^{i\delta} - 1) \sin \varphi \cos \varphi & \cos^2 \varphi + e^{i\delta} \sin^2 \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

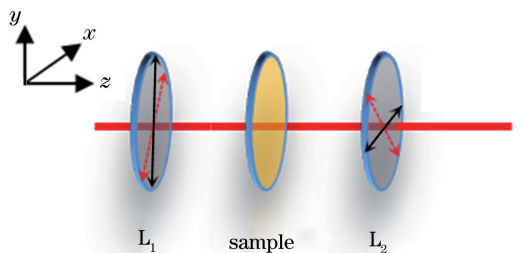


图1 双折射测量原理示意图

Fig. 1 Principle of birefringence measurement

式中: $\delta$ 为慢轴与快轴之间的相位延迟量; $\varphi$ 为快轴方向与 $x$ 轴之间的夹角。通过矩阵相乘,最终得到的出射光为

$$P_1 = a \sin \frac{\delta}{2} \cdot \sin 2\varphi \cdot \exp \left[ i \left( \frac{\delta}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \right] E, \quad (4)$$

$$P_2 = a \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos 2\varphi \cdot \exp \left[ i \left( \frac{\delta}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \right] E, \quad (5)$$

式中: $E$ 为入射光强度; $a = \sin(3\pi/8)$ 为常数。进一步将出射光 $P_1$ 和 $P_2$ 改写成复振幅形式,考虑到振幅只能为正,于是有

$$P_1 = aE \left| \sin \frac{\delta}{2} \cdot \sin 2\varphi \right| \cdot \exp \left\{ i \left[ \frac{\delta}{2} - \operatorname{sgn} \left( \sin \frac{\delta}{2} \cdot \sin 2\varphi \right) \frac{\pi}{2} \right] \right\}, \quad (6)$$

$$P_2 = aE \left| \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos 2\varphi \right| \cdot \exp \left\{ i \left[ \frac{\delta}{2} - \operatorname{sgn} \left( \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos 2\varphi \right) \frac{\pi}{2} \right] \right\}, \quad (7)$$

式中: $\operatorname{sgn}(x)$ 为符号函数,当 $x > 0$ 时, $\operatorname{sgn}(x) = 1$ ;当 $x < 0$ 时, $\operatorname{sgn}(x) = -1$ 。当振幅项中两个三角函数的乘积正负发生变化时,相位中将产生 $\pi$ 的跃变。将 $P_1$ 与 $P_2$ 相位中的跃变消除后,获得的相位分布是相同的,都为 $\delta/2$ ,取其中一项或两项的平均值均可得出相位延迟量的分布。将 $P_1$ 与 $P_2$ 两复振幅相除,可以得到

$$L = \tan 2\varphi =$$

$$\left| \tan 2\varphi \right| \exp \left\{ i \frac{\pi}{2} [1 - \operatorname{sgn}(\tan 2\varphi)] \right\}. \quad (8)$$

由于 $\varphi$ 的取值范围为 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ ,如果直接采用 $P_1$ 与 $P_2$ 的强度(或振幅)进行运算,从获得的信息 $|\tan 2\varphi|$ 中很难判断 $\varphi$ 的区间。而(8)式得到的结果为 $\tan 2\varphi$ ,其直接包含了正负信息在内,通过逆三角函数运算及解包裹运算便可获得 $\varphi$ 的连续分布。因此,通过出射光复振幅计算,可以将相位延迟量 $\delta$ 和方位角 $\varphi$ 解耦,解决平面偏光仪中两者难以分离的问题。

## 2.2 出射光复振幅 $P$ 重建

只要获得两种不同偏振状态 $N$ 下出射光 $P_N$ ( $N=1,2$ )的复振幅,便可计算出双折射样品的相位延迟量及方位角信息。由于PIE可以同时扫描物体及其照明光的复振幅信息进行重建,因此在出射光 $P_N$ 后构建PIE测量装置来获取出射光的复振幅。引入额外的衍射物体 $O$ ,将平面偏光仪的出射光 $P_N$ 作为衍射物体 $O$ 的照明光,按照PIE测量方法,在 $x$ - $y$ 二维平面内移动衍射物体,并确保相邻

位置照明的衍射物体间存在一定比例的重叠,同时在远场记录相应的衍射光斑。

计算时,利用记录的衍射光斑及对应的平移位置关系,通过扩展PIE(ePIE)算法可以实现衍射物体 $O$ 及其照明光 $P_{O,N}$ 的重建,具体的重建过程可参考文献[9]。整个迭代重建算法的核心是衍射光斑记录面上的强度约束及衍射物体面上的重叠位置约束,对每个状态的照明光进行迭代更新的公式为

$$P_{O,N}^{n+1}(r) = P_{O,N}^n(r) + \beta \frac{O_N^{n*}(r - R_j)}{|O_N^n(r - R_j)|_{\max}^2} (\phi_{c,n} - \phi_n), \quad (9)$$

式中: $n$ 为迭代次数; $r$ 为衍射物体面的坐标; $\beta$ 为更新步长,通常取1; $R_j$ 为第 $j$ 次平移的位置; $*$ 为复共轭; $\phi_n$ 和 $\phi_{c,n}$ 分别为更新前后的衍射物体出射波函数, $\phi_n = P_{O,N}^n(r)O_N(r - R_j)$ 。需要说明的是,更新完成获得的衍射物体照明光 $P_{O,N}$ 通常并不是所需的平面偏振仪出射光 $P_N$ ,需要利用菲涅耳衍射积分公式或角谱公式,将 $P_{O,N}$ 传输至待测双折射样品后表面以获得 $P_N$ 。为实现快速收敛,所选用的衍射物体 $O$ 应对照明光具有良好的调制作用。若提前将衍射物体 $O$ 的复振幅分布测量出来,并作为已知量代入重建过程,将会大大减少采集光斑数量,缩短整个重建时间。进一步,若采用随机相位板作为衍射物体,可结合编码调制成像算法<sup>[16-17]</sup>,实现单次采集及快速测量。整个测量方法的流程图如图2所示。

## 3 实验与分析

为对所提方法进行验证,采用图3(a)所示的实验光路对样品进行二维双折射测量。同时为确定该方法的测量精度及分辨率,待测样品选用双折射分辨率靶,其靶线与背景区域之间存在 $(280 \pm 20)$  nm的相位延迟量,背景区域快轴方向与样品边缘平行,靶线快轴方向与样品边缘成 $45^\circ$ 。在一对分别与样品边缘平行及垂直的正交偏振片下对测试靶成像,得到的正像如图3(b)所示,分辨率靶线为亮线。

实验时,偏振方向为 $67.5^\circ$ 的激光垂直通过起偏器 $L_1$ ,经过滤波器、准直透镜后变为平行光,在平行光路中放置待测双折射分辨率靶,光束口径 $\Phi$ 为25.4 mm,选择分辨率靶中9~18 lp/mm部分进行测量。待测样品出射光经会聚透镜(焦距为175 mm)和检偏器 $L_2$ 后,入射到CCD记录面上。调整CCD的位置,使双折射分辨率靶清晰成像在CCD记录面上(CCD到焦点的距离为124 mm),并根据PIE测量方法,在焦点后放置夹持额外衍射物

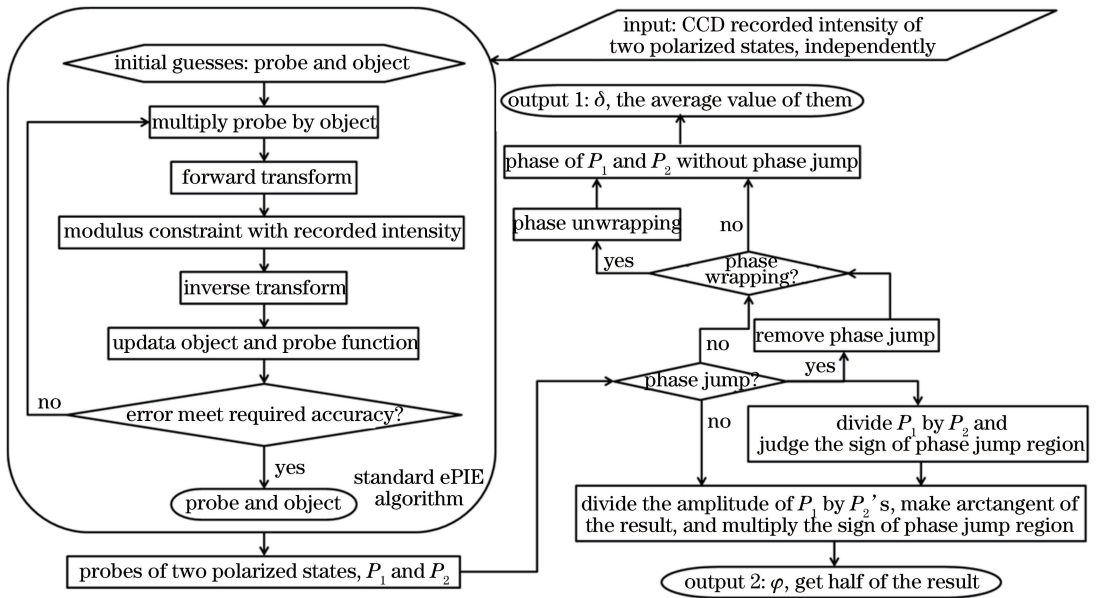


图 2 本文方法流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed method

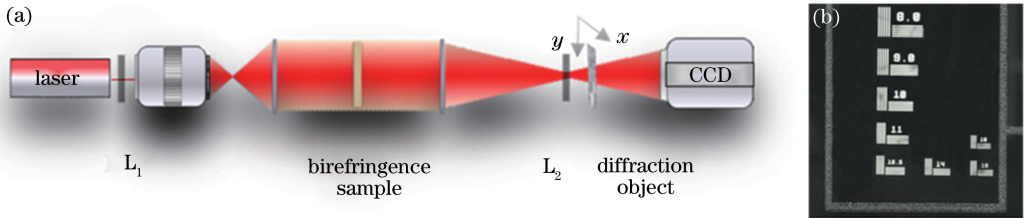


图 3 二维双折射测量实验与探测结果。(a) 双折射测量实验装置图;(b) 双折射分辨率靶的正像

Fig. 3 Experimental setup of two-dimensional birefringence measurement and detection results.

(a) Experimental setup of birefringence measurement; (b) positive image of birefringent resolution target

体(南瓜茎切片)的二维平移装置。测量时,首先将  $L_1$  和  $L_2$  的偏振方向分别旋转至  $\pi/2$  和  $0$ , 移动南瓜茎切片同时利用 CCD 记录每个位置的衍射光斑, 其中一幅衍射光斑如图 4(a) 所示; 然后将  $L_1$  和  $L_2$  同时旋转  $-\pi/4$ , 记录下第二组衍射光斑, 如图 4(b) 所示。对于 PIE 算法, 理论上采集的衍射光斑越多, 信息冗余越多, 相位恢复精度越高, 重建的光场越

好。考虑到采集时间、数据恢复时间及相位恢复的精度, 在每个偏振状态下, 移动平移台记录  $10 \times 10$  幅衍射光斑, 且在标准平移位置上添加随机偏移量以避免网格现象的产生。从图 4 可以看出, 双折射分辨率靶是倾斜放置的, 这主要是使两种偏振状态下记录的衍射斑具有基本相同的强度。

### 3.1 双折射分辨率靶出射光重建

利用所采集的衍射光斑及 ePIE 重建算法, 对两组数据分别进行复振幅重建。图 5 为重建获得的南瓜茎切片及其照明光的振幅及相位分布。从图 5(a)、(b) 可以看出, 在两种状态下恢复出的南瓜茎  $O_1$  与  $O_2$  的细节均清晰可见。重建出的两束南瓜茎照明光的相位皆为球面分布, 如图 5(c)、(d) 所示, 这也与图 3 光路相吻合, 且由于双折射分辨率靶存在一些精细结构, 在重建的照明光外存在着部分高频信息。与记录强度相比, 两组数据迭代 300 次的重建误差分别为  $0.45\%$  和  $0.32\%$ , 这表明  $P_{O,1}$  及  $P_{O,2}$  均得到有效重建。

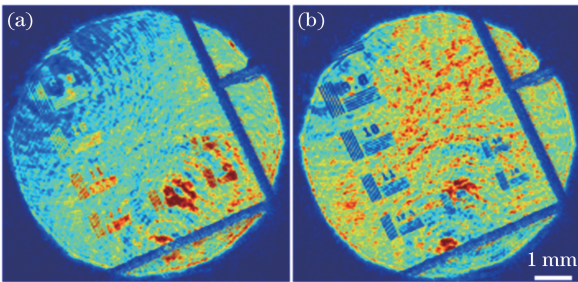


图 4 在不同偏振状态  $N$  下记录的衍射光斑。

(a)  $N=1$ ; (b)  $N=2$

Fig. 4 Diffraction patterns recorded in different polarization states  $N$ . (a)  $N=1$ ; (b)  $N=2$

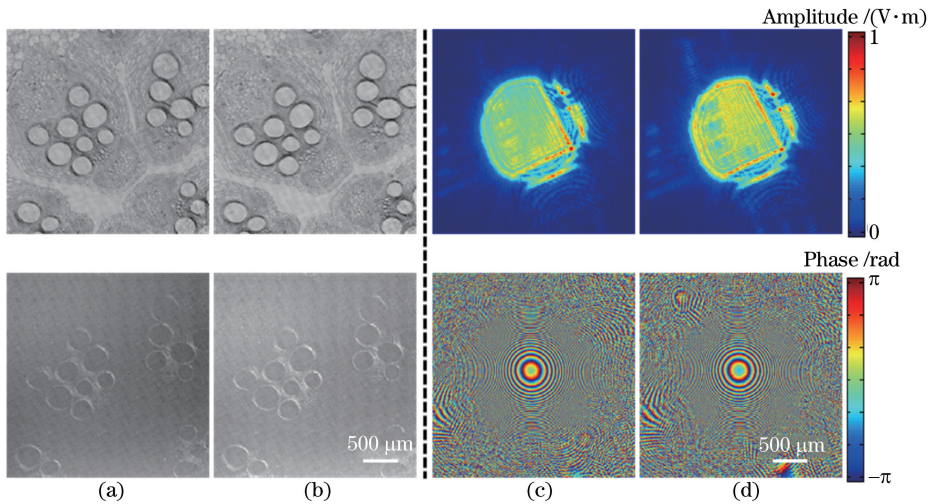


图 5 不同偏振状态  $N$  下的南瓜茎及其照明光重建结果。(a)  $O_1$ ; (b)  $O_2$ ; (c)  $P_{O,1}$ ; (d)  $P_{O,2}$ 。第一行为振幅,第二行为相位  
Fig. 5 Reconstructed results of pumpkin stems and probes in different polarization states  $N$ .

(a)  $O_1$ ; (b)  $O_2$ ; (c)  $P_{O,1}$ ; (d)  $P_{O,2}$ . First line is amplitude and second line is phase

实验时将双折射分辨率靶成像在 CCD 上,考虑到物像关系,将重建出的两照明光复振幅  $P_{O,1}$  及  $P_{O,2}$  用角谱衍射公式传输至像面(即 CCD 记录面),得到像面上照明光的复振幅  $P_{C,1}$  及  $P_{C,2}$ 。尽管像面强度与物面强度相同,即  $P_{C,N}$  与  $P_N$  具有相同的强度分布  $|P_{C,N}| = |P_N|$ ,但由于透镜成像的原因,两者相位并不相同, $P_{C,N}$  相较于双折射样品出射光  $P_N$  多了一个球面相位因子。为将球面相位因子去掉,同时也去除样品前平行入射光的波面不平整等

带来的影响,移除待测样品及  $L_2$  后同样采用 PIE 方法对背景光  $P_b$  进行测量, $P_{C,N}$  与  $P_b$  的相位差即为  $P_N$  的相位。最终计算得到的双折射分辨率靶出射光  $P_N$  的振幅及相位如图 6 所示,无论是在振幅还是相位分布中,靶线均能清晰分辨。由于双折射分辨率靶只存在靶线及背景两个区域,(6)式及(7)式中的振幅项变化范围不大,并未在  $P_N$  的相位中引起跃变,因此图 6(c)、(d) 的分布基本相同。另外,从图 6 中还可以看出, $P_2$  整体的强度略高于  $P_1$ ,所以

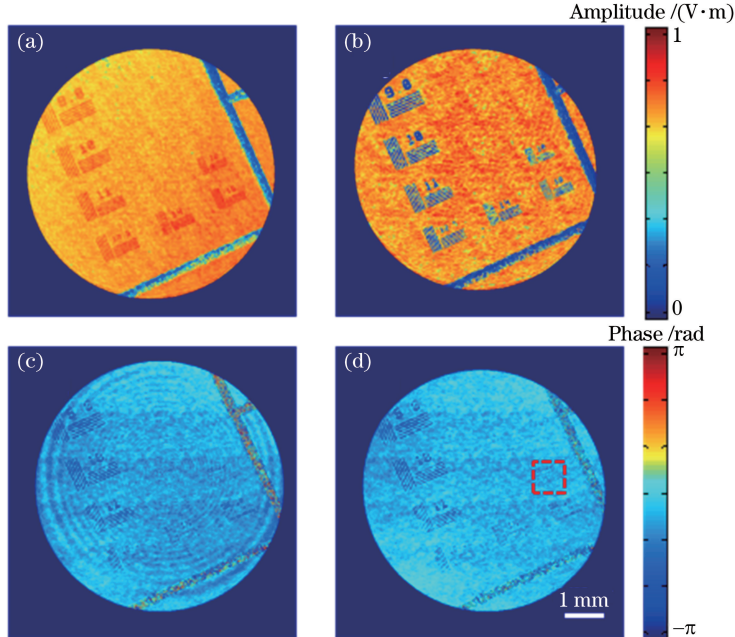


图 6 双折射分辨率靶出射光  $P_N$  的复振幅分布。(a)  $P_1$  振幅;(b)  $P_2$  振幅;(c)  $P_1$  相位;(d)  $P_2$  相位

Fig. 6 Complex amplitude distributions of exiting light  $P_N$  of birefringent resolution target.

(a) Amplitude of  $P_1$ ; (b) amplitude of  $P_2$ ; (c) phase of  $P_1$ ; (d) phase of  $P_2$

$P_2$  的重建效果更好,其振幅和相位中的靶线更清晰,这也是第二组数据重建误差(0.32%)更小的原因。

### 3.2 相位延迟量与方位角分布

获得双折射分辨率靶的出射光  $P_N$  复振幅分布后,根据(7)式和(8)式对相位延迟量  $\delta$  和方位角  $\varphi$  进行求解。由于  $P_N$  相位中不存在跃变,相位延迟量  $\delta$  可从  $P_N$  的相位中直接获得。为确认该方法的测量精度及分辨率,图 7 仅给出图 6(d)中虚线方框区域的相位延迟量  $\delta$  分布,并提供一根直线位置处的一维分布。该分辨率靶的最小线对为 18 lp/mm,

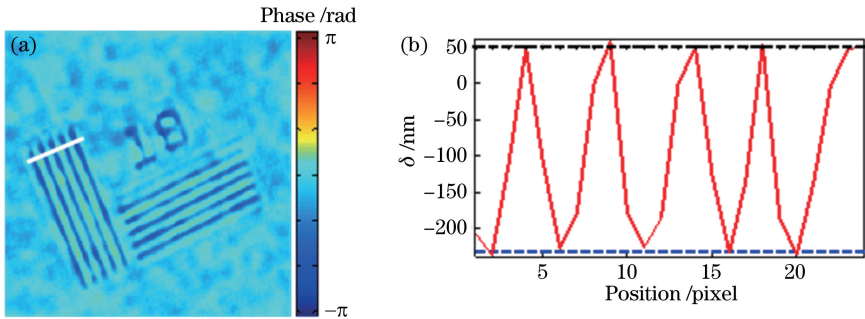


图 7 相位延迟量分布。(a)相位延迟量  $\delta$  分布;(b)  $\delta$  在图 7(a)中白色直线位置处的一维分布

Fig. 7 Distribution of phase retardation. (a) Distribution of phase retardation  $\delta$ ; (b) one-dimensional distribution of  $\delta$  at location indicated by white straight line in Fig. 7(a)

根据(8)式,对  $P_1$  与  $P_2$  两复振幅进行处理,得到的双折射分辨率靶的方位角分布如图 8(a)所示,这与样品实际分布相符,只存在背景区及靶线区两个快轴方向。同样对虚线方框区域进行放大,并提供一根直线位置处的一维分布,如图 8(b)、(c)所示。测量时样品倾斜  $23^\circ$  放置,因此背景区快轴方向为  $23^\circ$ ,靶线区快轴方向为  $68^\circ$ ,分

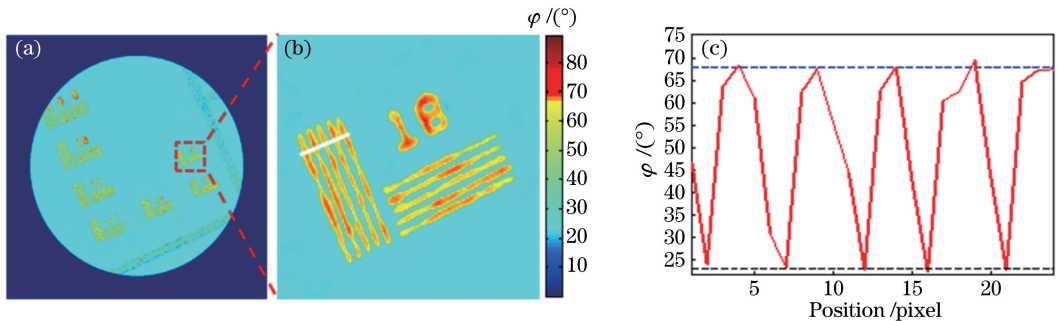


图 8 方位角分布。(a)方位角  $\varphi$  分布;(b)对图 8(a)中虚线方框区域放大;(c)  $\varphi$  在图 8(b)中白色直线位置处的一维分布

Fig. 8 Distribution of azimuth angle. (a) Distribution of azimuth angle  $\varphi$ ; (b) enlargement of dotted box area in Fig. 8(a); (c) one-dimensional distribution of  $\varphi$  at location indicated by white straight line in Fig. 8(b)

## 4 结 论

基于平面偏光仪,提出一种新的二维双折射定量测量方法。该方法将待测样品的双折射信息加载

测得的相位延迟量在靶线 18 lp/mm 处实现完全分辨,因此该测量系统的空间分辨率优于 0.055 mm。已知靶线与背景之间的相对相位延迟量为  $(280 \pm 20)$  nm,以此数据为标准验证测量方法的准确性及精度。图 7(b)中  $\delta$  曲线的峰值与谷值分别代表背景与靶线区域,虚线为平均值,对应的相对相位延迟量为 283.391 nm,与实际数据相差不大。取图 7(a)中 6 条靶线(水平与竖直方向各 3 条)所有点的相对相位延迟量进行平均,结果为 276.1 nm,最大误差不超过 23.9 nm。

别对应图 8(c)中上方和下方虚线,两者相差  $45^\circ$ 。图 8(c)中实验结果与样品参数非常吻合,误差不超过  $0.52^\circ$ 。同样取图 8(b)中 6 条靶线所有点相对背景区域的方位角进行平均,结果为  $44.51^\circ$ ,误差为  $0.49^\circ$ 。实验中误差的来源有重建误差、偏振片的角度误差等,但角度误差影响要小于重建误差<sup>[18]</sup>。

至探测光中,通过两次不同偏振状态下的暗场 PIE 测量,重建出两个探测光的复振幅分布,实现相位延迟量及快轴方向的简单准确提取。该方法充分利用平面偏光仪结构简单的优点,结合 PIE 复振幅测

量,解决了平面偏光仪纯强度测量时相位延迟量与方位角无法解耦的问题。计算时直接从探测光相位中提取相位延迟量,通过两个探测光复振幅之比获得方位角,避免了复杂的取值区间判断问题。该方法适用于大口径样品的全场双折射参数测量,若结合单次编码调制成像方法,可实现快速检测。采用双折射分辨率靶对所提方法进行实验验证,实验结果与样品实际分布完全相符。相位延迟量最大误差不超过 23.9 nm,方位角误差为 0.49°,在 13 mm 口径下系统测量分辨率优于 0.055 mm。测量精度的提升将是下一步研究的主要内容。

## 参 考 文 献

- [1] Wang T, Lu J F, Huang Y P, *et al.* Generation and research progress of all-fiber ultrafast vector optical fields[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508010.  
王腾, 陆佳峰, 黄译平, 等. 全光纤超快矢量光场的产生与研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508010.
- [2] Camacho R, Täuber D, Hansen C, *et al.* 2D polarization imaging as a low-cost fluorescence method to detect  $\alpha$ -synuclein aggregation *ex vivo* in models of Parkinson's disease[J]. Communications Biology, 2018, 1: 157.
- [3] Feng M Q, Sun Q, Deng Y Q, *et al.* Influence of laser polarization on fiber-type terahertz time-domain spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614019.  
冯美琦, 孙青, 邓玉强, 等. 激光偏振态对光纤型太赫兹时域光谱仪的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614019.
- [4] Lei Z K, Yun H, Yun D Z, *et al.* Numerical analysis of phase-stepping interferometric photoelasticity for plane stress separation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(1): 77-82.
- [5] Yoneyama S, Morimoto Y, Kawamura M. Two-dimensional stress separation using phase-stepping interferometric photoelasticity [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(6): 1329-1334.
- [6] Solaguren-Beascoa Fernández M, Alegre Calderón M, Bravo Díez M, *et al.* Stress-separation techniques in photoelasticity: a review[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2010, 45(1): 1-17.
- [7] Asundi A, Tong L, Boay C G. Phase-shifting method with a normal polariscope [J]. Applied Optics, 1999, 38(28): 5931-5935.
- [8] Rodenburg J M. Ptychography and related diffractive imaging methods[M]//Hawkes P W. Advances in imaging and electron physics. USA: Academic Press, 2008, 150: 87-184.
- [9] Maiden A M, Rodenburg J M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging[J]. Ultramicroscopy, 2009, 109(10): 1256-1262.
- [10] Pan X C, Liu C, Zhu J Q. Single shot ptychographical iterative engine based on multi-beam illumination[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(17): 171105.
- [11] Ferrand P, Baroni A, Allain M, *et al.* Quantitative imaging of anisotropic material properties with vectorial ptychography[J]. Optics Letters, 2018, 43(4): 763-766.
- [12] Anthony N, Cadenazzi G, Kirkwood H, *et al.* A direct approach to in-plane stress separation using photoelastic ptychography [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 30541.
- [13] Bei C, Zhang X J, Cheng L, *et al.* Full-field stress measurement based on polarization ptychography[J]. Journal of Optics, 2019, 21(6): 065602.
- [14] Zhang X J, Cheng B, Liu C, *et al.* Quantitative birefringence distribution measurement using mixed-state ptychography [J]. Optics Express, 2017, 25(25): 30851-30861.
- [15] Theocaris P S, Gdoutos E E. Matrix theory of photoelasticity [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1979.
- [16] Dong X, Pan X C, Liu C, *et al.* Single shot multi-wavelength phase retrieval with coherent modulation imaging[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1762-1765.
- [17] Zhang F C, Chen B, Morrison G R, *et al.* Phase retrieval by coherent modulation imaging[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13367.
- [18] Wang Z P, Li Q B, Tan Q, *et al.* Method of measuring practical retardance value and judging the fast or slow axis of quarter-wave plate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 523-528.  
王政平, 李庆波, 谭巧, 等. 测量  $\lambda/4$  波片实际相移量并判定快慢轴的方法 [J]. 中国激光, 2005, 32(4): 523-528.