

# 用 Stokes 参量法实现数字同轴偏振全息的研究

陈萍<sup>1)</sup> 唐志列<sup>1)2)†</sup> 王娟<sup>1)</sup> 付晓娣<sup>1)</sup> 陈飞虎<sup>1)</sup>

1) (华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006)

2) (华南师范大学物理与电信工程学院, 广东省高校量子信息技术重点实验室, 广州 510006)

(2011 年 7 月 28 日收到; 2011 年 10 月 18 日收到修改稿)

提出了一种基于 Stokes 参量的数字同轴偏振全息方法. 在实验中用一束线偏振光和一束椭圆偏振光作为参考光, 分别与物光进行干涉, 通过拍摄在两个相互垂直方向上的全息图, 计算出物光在这两个方向的振幅和相位信息, 从而得到物光的 Stokes 参量和物体的全偏振信息, 实现对各向异性物体偏振态空间分布的图像重建. 实验结果表明, 该方法可用于物体的全偏振特性的测量. 这种方法在求出物光 Stokes 参量的同时, 也可消除零级像和共轭像的干扰, 因此也可用于同轴或离轴全息.

**关键词:** 数字全息, 偏振特性, Stokes 参量, 各向异性

**PACS:** 42.40.Kw, 42.25.Ja

## 1 引言

偏振成像技术如偏光显微镜技术<sup>[1]</sup>、红外偏振成像技术<sup>[2]</sup>、偏振相干断层扫描技术<sup>[3-5]</sup>和偏振干涉成像光谱技术<sup>[6,7]</sup>在医学影像、表面测量、材料的结构性质和内部应力等领域都有重要的作用. 数字全息技术的出现<sup>[8,9]</sup>, 为利用数字全息实现偏振成像提供了可能. 数字全息中, 感光胶片被电荷耦合成像器件 CCD 所取代, 全息图通过 CCD 记录, 以数字方式再现, 由于记录和再现的整个过程都是数字化, 克服了传统全息处理过程复杂和无法进行量化分析的缺点. 利用数字全息来实现偏振成像, 可以实现偏振态分布的量化分析, 成像速度快, 有可能实现实时和活体成像. 数字全息可通过同轴和离轴两种方式来实现. 与数字离轴全息相比, 数字同轴全息系统放宽了对记录物体的尺寸和记录距离的要求, 系统结构灵活、散斑噪声较低、对 CCD 的空间带宽利用率较高<sup>[10]</sup>, 而且如果物光和参考光均为平面波, 将有可能实现远距离记录和再现. 因此, 利用数字全息来实现偏振成像, 同轴全息在系统性能方面要优于离轴全息系统.

数字偏振全息作为偏振成像领域的一个分支,

受到国外不少学者的关注. Beghuin 等<sup>[11]</sup>提出在离轴全息系统中分别用右旋和左旋圆偏振光作为两束参考光, 沿不同的光学路径与物光进行干涉, 只通过一次全息拍摄就可实现偏振成像. 日本科学家 Yokota<sup>[12-14]</sup>考虑到采用双参考光路较为复杂, 且两束参考光沿不同的路径到达 CCD, 两幅重构像之间位置的一致性需通过分析来进行调整, 提出了利用光纤 Faraday 旋转器来控制参考光的偏振方向, 实现了单参考光路离轴偏振全息. 然而, 在这些文献中, 利用右旋和左旋圆偏振光或相互垂直的线偏振光作为参考光, 分别与物光干涉, 通过数字化重构物光在这两个方向上的复振幅信息, 从而获得偏振态分布, 这种方法仅适用于离轴全息, 且需保证离轴角足够大, 才可实现原始像与零级像、共轭像在空间上的分离, 避免再现原始像受零级像和共轭像的干扰. 对于同轴全息系统, 利用这种方法, 将导致原始像与零级像和共轭像的严重重叠, 影响成像质量, 甚至直接导致无法获取物光在两个相互垂直方向上的复振幅信息.

本文提出基于 Stokes 参量的数字同轴偏振全息方法. 与上述方法的不同之处在于, 采用同轴全息系统, 利用一束线偏振光和一束椭圆偏振光作为

† E-mail: tangzhl@scnu.edu.cn

参考光, 分别与物光进行干涉, 并记录在相互垂直两个方向上的全息图. 采用此方法可以直接整合出物光在这两个方向上的振幅和相位分布, 从而得到物光的 Stokes 参量, 惟一地确定物体的全偏振信息, 在此基础上实现对物体的偏振特性研究, 为数字偏振全息提供了一种新的实验方案. 实验结果表明, 这种方法不仅可以实现物体的偏振成像, 研究物体的偏振特性, 而且可以实现远距离测量, 现在已经成功实现了 100 cm 的测量. 另外, 这种方法有效消除了零级像和共轭像的干扰, 可同时适用于同轴和离轴全息.

## 2 实验原理

全息技术是通过物光和参考光干涉, 将物光波前的复振幅信息调制到干涉全息图中来实现物光复振幅的记录. 利用全息技术实现偏振成像, 实际上就是利用全息记录物光在两个相互垂直方向上的复振幅.

物光与参考光干涉后, 在 CCD 处可得到全息图水平分量和垂直分量上的光强分布:

$$\begin{aligned} I_{Hx}(x, y) &= |O_x(x, y)|^2 + |R_x(x, y)|^2 \\ &\quad + O_x^*(x, y) \cdot R_x(x, y) \\ &\quad + O_x(x, y) \cdot R_x^*(x, y), \\ I_{Hy}(x, y) &= |O_y(x, y)|^2 + |R_y(x, y)|^2 \\ &\quad + O_y^*(x, y) \cdot R_y(x, y) \\ &\quad + O_y(x, y) \cdot R_y^*(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $I_{Hx}(x, y)$  表示全息图水平分量上的光强分布,  $I_{Hy}(x, y)$  表示全息图垂直分量上的光强分布,  $O_x(x, y)$  和  $O_y(x, y)$  分别表示物光在 CCD 处水平分量和垂直分量上的复振幅信息,  $R_x(x, y)$  和  $R_y(x, y)$  分别表示参考光水平分量和垂直分量上的复振幅信息.

由 (1) 式可知, 要消除零级像和共轭像的干扰, 惟一地确定物光在水平和垂直方向上的复振幅分布  $O_x$  和  $O_y$ , 需要两束不同的参考光分别与物光进行干涉. 实验利用偏振分束镜将入射光束分为水平线偏振光和垂直线偏振光, 分别沿参考光路径和物光路径. 在参考光路径, 水平线偏振光经过某一偏振光学元件后, 产生两束不同偏振态的参考光. 这

两束参考光波在 CCD 处的 Jones 矩阵为

$$\begin{aligned} U_{Ri}(x, y) &= \begin{bmatrix} R_{ix}(x, y) \\ R_{iy}(x, y) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(x, y) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_i \cdot R(x, y) \\ c_i \cdot R(x, y) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $R(x, y)$  为经偏振分束镜出射的水平线偏振光在 CCD 处的复振幅分布,  $\begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix}$  为偏振光学元件的 Jones 矩阵,  $i = 1, 2$  表示参考光束 1, 2.

由 (1) 和 (2) 式, 这两束参考光与物光干涉后的全息图在水平和垂直分量上的光强分布分别为

$$\begin{aligned} I_{ix}(x, y) &= |O_x(x, y)|^2 + |a_i|^2 |R(x, y)|^2 \\ &\quad + a_i \cdot O_x^*(x, y) \cdot R(x, y) \\ &\quad + a_i^* \cdot O_x(x, y) \cdot R^*(x, y), \\ I_{iy}(x, y) &= |O_y(x, y)|^2 + |c_i|^2 |R(x, y)|^2 \\ &\quad + c_i \cdot O_y^*(x, y) \cdot R(x, y) \\ &\quad + c_i^* \cdot O_y(x, y) \cdot R^*(x, y). \end{aligned} \quad (3)$$

另外, 实验可得到物光波在水平和垂直方向上的光强分布以及水平线偏振参考光的光强分布:

$$\begin{aligned} I_{Ox} &= O_x^2(x, y), \\ I_{Oy} &= O_y^2(x, y), \\ I_R &= R^2(x, y), \end{aligned} \quad (4)$$

利用 (3) 和 (4) 式, 可以获得物光在水平和垂直方向上的复振幅分布:

$$\begin{aligned} O_x(x, y) &= \frac{a_2 t_1 - a_1 t_2}{(a_2 a_1^* - a_1 a_2^*) R^*(x, y)}, \\ O_y(x, y) &= \frac{c_2 t_3 - c_1 t_4}{(c_2 c_1^* - c_1 c_2^*) R^*(x, y)}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $t_1 = I_{1x} - I_{Ox} - |a_1|^2 I_R$ ,  $t_2 = I_{2x} - I_{Ox} - |a_2|^2 I_R$ ,  $t_3 = I_{1y} - I_{Oy} - |c_1|^2 I_R$ ,  $t_4 = I_{2y} - I_{Oy} - |c_2|^2 I_R$ .  $a_1, a_2, c_1, c_2$  的具体值由 (2) 式中偏振光学元件的 Jones 矩阵形式给出. 通过以上分析, 利用两束已知偏振态的参考光与物光分别进行干涉, 可以获得物光在两个相互垂直方向上的复振幅分布, 并达到消除零级像与共轭像的目的. 然而, 实验对这两束参考光的偏振态是有一定要求的,

从 (5) 式可以看出, 要获得物光在这两个方向上的复振幅分布, 所选偏振光学元件的 Jones 矩阵需满足  $b_2 b_1^* - b_1 b_2^* \neq 0$  和  $d_2 d_1^* - d_1 d_2^* \neq 0$ . 为满足这一条件, 本实验在参考光路径分别插入偏振片和 1/4 波片, 来产生一束线偏振光和一束椭圆偏振光作为参考光. 偏振片和 1/4 波片的 Jones 矩阵形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_P &= \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_P & \sin \theta_P \cos \theta_P \\ \sin \theta_P \cos \theta_P & \sin^2 \theta_P \end{bmatrix}, \\ \mathbf{M}_{\lambda/4} &= \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + j \cos 2\theta_C & j \sin 2\theta_C \\ j \sin 2\theta_C & 1 - j \cos 2\theta_C \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $\theta_P, \theta_C$  分别表示偏振片透光轴和 1/4 波片快轴与  $x$  轴的夹角.

由 (5) 式获得物光在 CCD 处的复振幅分布, 利用 Fresnel 衍射, 再现像面上的复振幅分布为

$$\begin{aligned} O'_x(X, Y, Z) &= \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda Z} (X^2 + Y^2) \right] \cdot \iint O_x(x, y) \\ &\quad \times \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda Z} (x^2 + y^2) \right] \\ &\quad \times \exp \left[ -\frac{i2\pi}{\lambda Z} (xX + yY) \right] dx dy, \\ O'_y(X, Y, Z) &= \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda Z} (X^2 + Y^2) \right] \cdot \iint O_y(x, y) \\ &\quad \times \exp \left[ \frac{i\pi}{\lambda Z} (x^2 + y^2) \right] \\ &\quad \times \exp \left[ -\frac{i2\pi}{\lambda Z} (xX + yY) \right] dx dy, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $Z$  为再现距离,  $(X, Y, Z)$  表示再现面的坐标. 由此, 重构的物光波在  $x, y$  两垂直方向上的复振幅分布可表示为

$$\begin{aligned} O'_x(X, Y) &= A_x(X, Y) \exp [i\phi_x(X, Y)], \\ O'_y(X, Y) &= A_y(X, Y) \exp [i\phi_y(X, Y)]. \end{aligned} \quad (8)$$

当我们知道了物光在两个相互垂直方向上的复振幅分布, 物光波的偏振特性就可以惟一地确定了. 利用这两个方向上的复振幅信息, 物光

波的 Stokes 参量也可以得到. 设  $A_x = I \cos \gamma$ ,  $A_y = I \sin \gamma$ , 其中  $I$  表示物光波的总光强. 其偏振态用归一化的 Stokes 参量表示为

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\gamma \\ \sin 2\gamma \cos \phi \\ \sin 2\gamma \sin \phi \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中  $\phi$  为两振动方向上的相位差,  $\phi = \phi_y - \phi_x$ . 由 Stokes 参量即可惟一地确定物光波的偏振特性. 相关的偏振参量, 如振幅比、相位差、方位角以及椭率角可通过 Stokes 参量来求得:

$$\begin{aligned} \tan \gamma(X, Y) &= \frac{A_y(X, Y)}{A_x(X, Y)} \\ &= \tan \left( \frac{1}{2} \cos^{-1} S_1 \right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\phi(X, Y) = \tan^{-1} \frac{S_3}{S_2}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \theta(X, Y) &= \frac{1}{2} \tan^{-1} [\tan (2\gamma(X, Y)) \\ &\quad \times \cos(\phi(X, Y))], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(X, Y) &= \frac{1}{2} \sin^{-1} [\sin (2\gamma(X, Y)) \\ &\quad \times \sin(\phi(X, Y))]. \end{aligned} \quad (13)$$

实验中, 利用 (10)—(13) 式, 获得了物光振幅比、相位差、方位角和椭率角的空间分布图.

### 3 实验装置

数字偏振全息记录的装置基于 Mach-Zehnder 干涉仪的同轴全息实验光路, 如图 1 所示. 由 He-Ne 激光器发出的光, 经过由显微镜头和凸透镜组成的准直扩束系统后, 被偏振分束镜 (PBS) 分成两束偏振方向互相垂直的线偏振光, 其中水平线偏振光沿参考光路径, 垂直线偏振光沿物光路径.

实验所用 CCD 为卸去镜头的加拿大 Lumenera 公司生产的 INFINITY2-1M 型相机, 它的有效像素为  $1392 \times 1024$ , 像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ , 有效接收面积  $6.473 \text{ mm} \times 4.836 \text{ mm}$ . 数据由 CCD 采集并传输到电脑中进行数字重构和分析.

实验时, 首先在参考光部分加入偏振片 P1, 该偏振片透光轴与  $x$  轴夹角为  $60^\circ$ , 调节偏振片 P2, 获得该条件下全息图在水平分量和垂直分量的光强分布图  $I_{1x}$  和  $I_{1y}$ ; 第二, 在参考光部分加入 1/4

波片 Q1, 该波片快轴方向与  $x$  轴的夹角同样选择  $60^\circ$ , 调节 P2, 获得这种条件下全息图在水平和垂直分量的光强分布图  $I_{2x}$  和  $I_{2y}$ ; 第三, 挡住参考光, 调节 P2, 获得物光在两相互垂直分量的光强信息  $I_{ox}$  和  $I_{oy}$ ; 最后, 移开 P2, 挡住物光, 获得参考光的光强分布  $I_R$ . 将获得的光强分布图在电脑中量化存储, 结合实验原理进行编程再现, 即可实现对偏振物体复振幅信息的重构及偏振特性的分析.

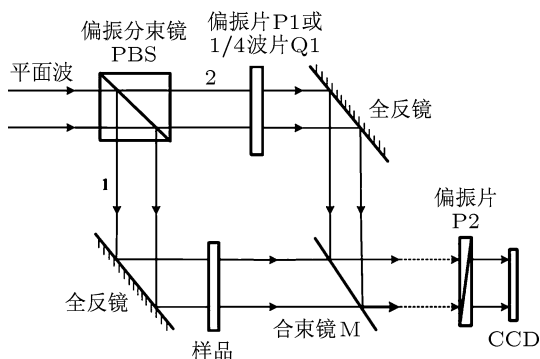


图1 基于 Stokes 参量法的数字同轴偏振全息实验装置图

域 B 为椭圆偏振光. 实验中使用同轴装置, 利用该方法再现得到二维物体  $x$  和  $y$  方向的振幅分布和相位分布, 并同时消除了零级像和共轭像的干扰.

图 3 为利用 (5) 和 (7) 式重构并数字再现的虚像的振幅和相位信息. 本实验可以直接获得原始像信息, 消除了零级像和共轭像成分, 在再现像中仅有原始像成分, 即使是在同轴系统中, 也可以得到较清晰的像. 图中区域 B 为经过偏振片 P3 和 1/4 波片 Q2 后的椭圆偏振光区域, A 是经过偏振片 P3 的参考区域. 可以发现, 区域 A 和 B 的振幅分布和相位分布是均匀的.

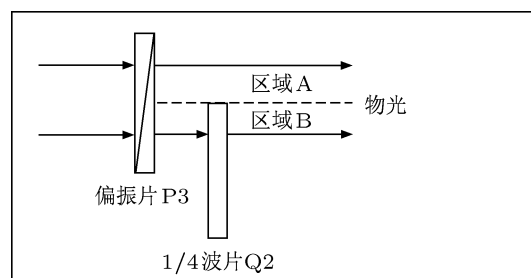


图2 实验所用样品的结构图

### 4 实验结果及分析

为了确定这种偏振测量的原理, 实验中把一个  $\lambda/4$  波片 Q2 和偏振方向与  $x$  轴成  $45^\circ$  角的偏振片 P3 的组合作为物体, 位置关系如图 2 所示,  $\lambda/4$  波片只有一部分位于光路中, 因此, 偏振物体光束分为了两个区域: 区域 A 和区域 B. 当波片的快轴方向为任意角时, 区域 A 为  $45^\circ$  线偏振光; 区

从图 3 可以看出, 波片边缘处的振幅分布和相位分布是不均匀的. 因为实验所用的 1/4 波片在边缘处有一定的厚度变化, 根据双折射介质的相位差公式  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}d(n_o - n_e)$ , 1/4 波片边缘处的相位延迟量  $\varphi$  不再是确定的值  $\frac{\pi}{2}$ , 而是与边缘实际的厚度有关. 当一束  $45^\circ$  的水平线偏振光经过该波片边缘时, 将该波片看作一双折射介质, 其快轴与  $x$  轴夹角为  $\theta$ , 出射光用 Jones 矩阵可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} &= \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} + j \sin \frac{\varphi}{2} \cos 2\theta & j \sin \frac{\varphi}{2} \sin 2\theta \\ j \sin \frac{\varphi}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\varphi}{2} - j \sin \frac{\varphi}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{1 + \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin 4\theta} \exp i \left\{ \arctan \left[ \tan \frac{\varphi}{2} \cdot (\cos 2\theta + \sin 2\theta) \right] \right\} \\ \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin 4\theta} \exp i \left\{ \arctan \left[ \tan \frac{\varphi}{2} \cdot (\cos 2\theta - \sin 2\theta) \right] \right\} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

从上式可以发现, 1/4 波片边缘处的振幅和相位分布均与 1/4 波片的相位延迟量  $\varphi$  有关, 波片厚度不同,  $\varphi$  不同, 振幅分布和相位分布也不同, 因此图中边缘处出现分布不均的情况.

当  $x$  轴和  $y$  轴方向的振幅分布以及相位分布确定后, 根据 (10)—(13) 式可得到的偏振物体的偏振参量 (振幅比、相位差、方位角、椭率角) 的空

间分布情况, 如图 4(a)—(d) 所示.

采用本文方法可以较清晰地再现各个偏振特性参量的空间分布, 图像边缘较清楚, 从图像可以直观地看出不同的偏振态区域 A 和 B 的偏振参量是不同的. 为了进一步进行偏振特性的研究, 我们对图 4 中区域 B 的振幅比和相位差做了理论值和实验值的比较. 区域 A 作为参考部分, 在区域 A 偏

振态为  $45^\circ$  的线偏振光, 其振幅比和相位差的理论值分别为 1 和  $0^\circ$ , 因此, 可将区域 A 中振幅比和相位差分布图的虚线方块区域做平均得到的值作为参考值, 来获得区域 B 的实验测量值. 对于区域 B,  $1/4$  波片快轴方向与  $x$  轴夹角为  $45^\circ$ , 其振幅比和相位差的理论值为 0.583 和  $-47.606^\circ$ , 实验测得的值为 0.435 和  $-43.692^\circ$ . 这说明本系统用于测量待测光偏振信息时仍存在一定误差. 造成误差的主要原因有两个: 一是在确定本系统中  $1/4$  波片的光轴方向和偏振片的透光轴方向时存在误差, 从而导致 (5) 式中的参数  $a_1, a_2, c_1, c_2$  的实际值和理论值存在偏差, 在利用 (5) 式进行复振幅信息的重构时出现零级像和共轭像无法完全消除的情况, 从而直

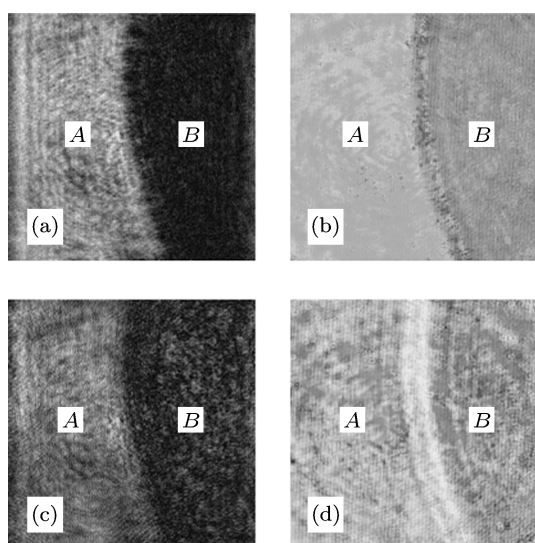


图3 数值重构的振幅和相位分布 (a)  $x$  轴方向的振幅分布图; (b)  $x$  轴方向的相位分布图; (c)  $y$  轴方向的振幅分布图; (d)  $y$  轴方向的相位分布图

$$\begin{aligned}
 \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \varphi & (1 - \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin 2\theta \sin \varphi \\ 0 & (1 - \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \varphi & \cos 2\theta \sin \varphi \\ 0 & \sin 2\theta \sin \varphi & -\cos 2\theta \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 \\ (1 - \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta \\ \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \varphi \\ -\cos 2\theta \sin \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

代入 (10)—(13) 式将会发现, 物光的各个偏振参量, 包括振幅比、相位差、方位角和椭率角, 均为与波

片的影响 (10)—(13) 式中偏振信息重构的准确性; 二是受激光散斑效应的影响, 使得区域 A 和区域 B 的光强分布不均匀, 这种不均匀会导致对图 4 中的虚线区域做平均值时, 其测量值不可避免地包括了这些散斑噪声信息, 从而造成测量结果的偏差.

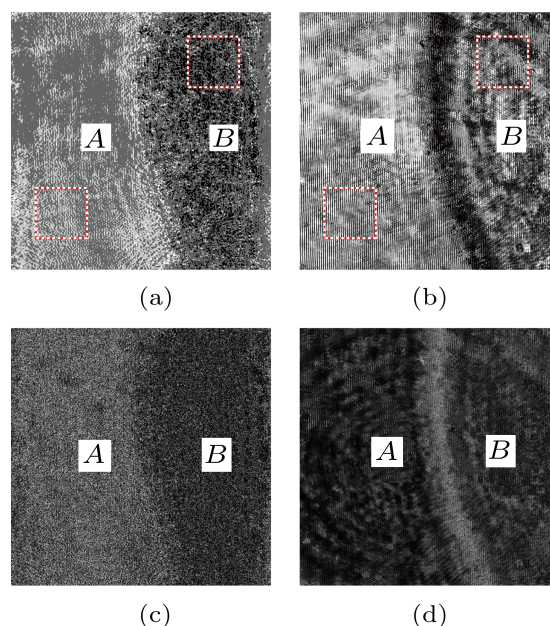


图4 物光各偏振参量的空间分布 (a) 振幅比空间分布图; (b) 相位差空间分布图; (c) 方位角空间分布图; (d) 椭率角空间分布图

另外, 也可以清楚地看到波片边缘处的偏振参量是不均匀分布的, 同样将该波片看作一双折射介质, 快轴与  $x$  轴夹角为  $\theta$ , 相位延迟量为  $\varphi$ , 根据双折射介质的 Muller 矩阵,  $45^\circ$  线偏振光经过波片后, 出射光的归一化 Stokes 参量可表示为

片的相位延迟量有关的参量. 因此, 边缘的厚度变化, 也引起了这些偏振参量空间分布的不均匀.

数字同轴全息系统与离轴系统相比,其优势之一在于同轴全息系统中物参光的夹角为 $0^\circ$ ,无须考虑受 CCD 有限的分辨力限制的物参光的最大夹角,在系统上为实现远距离记录和再现物体信息提供了可能.实验中,同样采用偏振片和 $1/4$ 波片组合成的物体作为样品,物面到 CCD 面的记录距离为 $100\text{ cm}$ ,实验所得的两垂直分量的振幅和相位分布如图 5 所示.

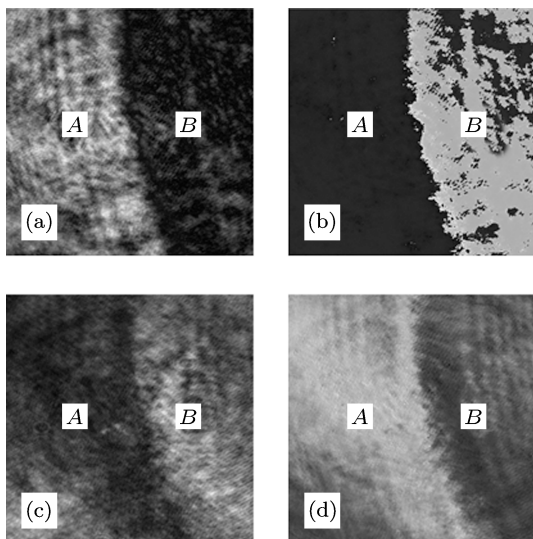


图 5 记录距离为 $100\text{ cm}$ 数值重构的振幅和相位分布 (a)  $x$ 轴方向的振幅分布图; (b)  $x$ 轴方向的相位分布图; (c)  $y$ 轴方向的振幅分布图; (d)  $y$ 轴方向的相位分布图

从图中仍可以清楚看到 A 和 B 两个区域振幅和相位的分布情况,但波片的边缘较近距离测量时要模糊一些.根据光学衍射理论,数字全息系统可相当于一衍射受限的相干成像系统,再现像的质量不可避免地受该系统传递函数带宽的制约.对于给

定的实验系统,记录距离越大,该系统的脉冲响应函数的宽度增大,而传递函数的谱宽减小,这种内在的低通滤波器阻碍了物光高频信息的通过,从而影响了图像的细节再现.因此,在采用同轴全息系统实现远距离记录再现时,还需同时考虑系统本身传递函数带宽对像质的影响,从而选择较优的记录距离.从实验结果可以看出,本实验在算法上克服了同轴全息零级像和共轭像的严重重叠这一缺陷,在实验系统上发挥了同轴数字全息在系统性能方面的灵活性和可操作性,有效地实现了 $100\text{ cm}$ 远距离物体的偏振成像.

## 5 结论

基于 Stokes 参量法,提出一种新的数字偏振全息实验方法.实验利用一束线偏振光和一束椭圆偏振光作为参考光分别与物光进行干涉,对偏振片和 $1/4$ 波片组合成的各向异性物体进行分析,获得物光的 Stokes 参量,得到物光在两个垂直方向上的复振幅分布,以及在这两个方向上的振幅比、相位差、方位角、椭圆率角的空间分布信息,实现对偏振物体的偏振特性研究.本系统采用同轴光路,且物光和参考光都是平面波,可以实现远距离测量,已经成功实现了 $100\text{ cm}$ 的测量;该方法在进行数字重构时,消除零级衍射像和共轭像的干扰,成像质量较好,可适用于同轴全息.与离轴数字偏振全息技术相比,该技术可充分利用同轴全息系统高分辨率、低散斑噪声、大视场的优点,实现数字同轴全息的偏振成像研究.

- [1] Inoué S 1981 *J. Cell Biology* **89** 346
- [2] Barnes H B, Jones M W, Bishop P K 1999 *Proc. SPIE* **3710** 189
- [3] Boer J F D, Milner T E, Gemert M J C V, Nelson J S 1997 *Opt. Lett.* **22** 934
- [4] Moreau J, Loriette V, Boccara A C 2003 *Appl. Opt.* **42** 3811
- [5] Hee M R, Huang D, Swanson E A, Fujimoto J G 1992 *J. Optic. Soc. Amer. B* **9** 903
- [6] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林, 张淳民, 赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [7] Jian X H, Zhang C M, Zhu B H, Zhao B C, Du J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7565 (in Chinese) [简小华, 张淳民, 祝宝辉, 赵葆常, 杜娟 2008 物理学报 **57** 7565]
- [8] Schnars U 1994 *J. Optic. Soc. Amer. A* **11** 2011
- [9] Cucho E, Bevilacqua F, Depeursinge C 1999 *Opt. Lett.* **24** 291
- [10] Lü Q N, Ge B Z, Zhang Y M 2005 *Opto-Electronic Engineering* **32** 15 (in Chinese) [吕且妮, 葛宝臻, 张以谟 2005 光电工程 **32** 15]
- [11] Beghuin D, Cucho E, Dahlgren P, Depeursinge C, Delacretaz G, Salathe R P 1999 *Electron. Lett.* **35** 2053
- [12] Yokota M, Terui Y, Yamaguchi I 2006 *Opt. Rev.* **13** 405
- [13] Yokota M, Terui Y, Yamaguchi I 2006 *Proc. SPIE* **6293** 62930M-1
- [14] Yokota M, Terui Y, Yamaguchi I 2006 *Proc. SPIE* **6027** 602726-1

# Analysis of digital in-line polarization holography by Stokes parameters

Chen Ping<sup>1)</sup> Tang Zhi-Lie<sup>1)2)†</sup> Wang Juan<sup>1)</sup> Fu Xiao-Di<sup>1)</sup> Chen Fei-Hu<sup>1)</sup>

1) (*School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

2) (*Laboratory of Quantum Information Technology, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

(Received 28 July 2011; revised manuscript received 18 October 2011)

## Abstract

A new method of polarization imaging, based on Stokes parameter, is proposed by digital in-line holography. The idea is to reconstruct the spatial distribution of polarization state of light transmitted through anisotropic objects using a linearly polarized beam and an elliptically polarized reference beam. Stokes parameters of object wave are obtained and the distribution of polarization can be determined uniquely by obtaining digital holograms in both orthogonal orientations and measuring the information about amplitude and phase of object wave in these two directions. The results show that the method can be used to measure the polarized properties of objects. In addition, it is applicable to both in-line and off-axis holography, because it can remove a zero-order and conjugate image components while acquiring Stokes parameters of object wave.

**Keywords:** digital holography, polarization, Stokes parameters, anisotropy

**PACS:** 42.40.Kw, 42.25.Ja

---

† E-mail: tangzhl@scnu.edu.cn