

基于斯托克斯参量测量的偏振共焦显微成像技术的研究

程 怡¹ 唐志列^{1,2*}

(¹ 华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006
² 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 提出了一种基于斯托克斯(Stokes)参量测量的偏振共焦显微成像新方法。以斯托克斯参量、偏振度、相位差、方位角和椭圆率角等偏振参量作为成像物理量,通过系统集成方法将斯托克斯参量测量系统整合到共焦显微成像系统,通过共焦显微成像系统的显微物镜将激光聚焦到样品表面,而带有样品偏振信息的反射光进入斯托克斯参量测量系统进行偏振测量,把从斯托克斯参量测量系统中出射的 4 个斯托克斯光分别聚焦到 4 个点探测器进行光电探测,实现斯托克斯参量的共焦探测,同时获得同一物点的 4 个斯托克斯参量以及偏振度、相位差、方位角和椭圆率角等偏振参量。对样品进行二维扫描,获得不同物点的 4 个斯托克斯参量及其相关的偏振参量,利用计算机软件进行图像重建,从而获得样品的斯托克斯参量及其相关偏振参量的共焦显微图像。

关键词 斯托克斯参量;共焦显微成像;全偏振态成像

中图分类号 O436.3; TG115.21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0611005

Study of Confocal Microscopy Imaging System Based on Stokes Parameters Measurement

Cheng Yi¹ Tang Zhilie^{1,2}

(¹ School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China
² Laboratory of Quantum Control Engineering and Material of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract A new method based on Stokes parameters measurement of polarization imaging combined with the confocal microscopy is described. The Stokes parameters, degree of polarization, azimuth and ellipticity are used to be the imaging parameters. The confocal microscopy is combined with the Stokes parameters measurement technique by system integration. The light beam from the laser is focused on the surface of the sample by an objective lens of the confocal microscopy. The reflective light with the information of the sample is measured by the division-of-amplitude Stokes parameters measuring system. In the measuring system, the light is focused on the photosensitive area by a positive lens before detected by the point detector. It makes the system a confocal microscopy imaging system. The polarization parameters including four Stokes parameters, degree of polarization, azimuth and ellipticity of the same object point can be got at the same time. Associated with the two dimensional scanning, Stokes parameters and other polarization parameters of the different object points can be detected. By using the imaging processing software, the imaging of the Stokes parameters and other polarization parameters based on confocal microscopy is realized.

Key words Stokes parameters; confocal microscopy imaging; imaging of all the polarization parameters

OCIS codes 110.5405; 120.5410; 180.1790

收稿日期: 2014-01-12; **收到修改稿日期**: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61178086)、广东省自然科学基金重点项目(S2013020012810)

作者简介: 程 怡(1990—),女,硕士研究生,主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: sadahaloo@hotmail.com

导师简介: 唐志列(1963—),男,博士,教授,主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: tangzhl@senu.edu.cn

(通信联系人)

1 引 言

偏振光成像技术在生物医学、目标识别、地物遥感、材料性质研究、军事^[1-4]等方面都有重要的应用。特别是对各向异性样品(如晶体材料或者某些生物组织)进行显微分析与成像时,从单纯的强度成像中很难获得有用信息。而偏振光成像技术通过提取与物质发生相互作用后的光束的偏振信息,来获得物体的偏振特性图像,比单纯的强度成像记录了更多的信息,能够提供关于目标的各向异性特性,如表面取向、折射率分布、表面介电张量、表面粗糙度等,具有独特的辨别能力^[5-8]。然而,传统的偏振光成像技术只能获得物体表面的偏振信息,无法获得样品内部的各向异性信息。为实现物体内部偏振信息的获取与分析,国内外学者分别提出了各自的解决方案。由 Hee 等^[9-11]提出的将偏振光成像技术与光学层析成像技术结合起来,形成偏振相干层析技术(偏振 OCT),这种技术将偏振光成像引入光学相干层析成像技术当中,利用样品光中偏振态相互垂直的两个偏振态的数据求取斯托克斯(Stokes)参量,但偏振 OCT 的分辨率一般无法做到细胞内部偏振信息的获取。为了实现细胞内部的偏振层析成像,唐志列等^[12]提出将具有高分辨率和层析能力的共焦显微术与偏振成像技术结合起来,实现高分辨率的偏振层析成像。但该方法仅仅是在共焦显微镜的基础上,采用偏振检测方法,以光的偏振态的某个投影作为成像物理量进行成像。这两种方法都无法获得目标的全部偏振信息,因而无法获得样品各向异性特性。众所周知,物质的光学各向异性可以由其 Mueller 矩阵来描述,测量 Mueller 矩阵需要知道偏振光从样品出射后的全部偏振信息。为了实现光学各向异性材料的显微分析与成像,本文提出了基于斯托克斯参量测量的偏振共焦显微成像新方法,将分振幅测斯托克斯参量法和共焦扫描成像技术结合起来,利用四个通道同时测量获得全部斯托克斯参量,并计算得到其他的偏振参数,实现了全偏振参量同时成像。这个方法的优点是,不仅可以得到样品全部的偏振信息,还实现了反射式高分辨率成像。

2 基于斯托克斯参量测量的偏振共焦显微成像的原理

2.1 基于斯托克斯参量测量的偏振共焦显微成像系统

基于斯托克斯参量测量的偏振共焦显微成像系

统由共焦成像系统和斯托克斯参量测量系统组成,系统光路图如图 1 所示。共焦成像系统则由物镜 L 和四个聚光镜 L_0 、 L_1 、 L_2 、 L_3 及其相应的光电探测器 D_0 、 D_1 、 D_2 、 D_3 组成。为实现物点斯托克斯参数的共焦测量,应使得物点与探测点满足共轭关系。激光器发出的光束通过偏振片 P 得到线偏振光,经分束镜 BS_0 反射进入物镜 L,被物镜 L 聚焦到样品表面形成足够小的焦斑,使得成像的物点足够小。物点反射光返回显微物镜,以平行光透过分束镜及各偏振元件,最后被四个聚光镜 L_0 、 L_1 、 L_2 、 L_3 分别聚焦到相应的光电探测器 D_0 、 D_1 、 D_2 、 D_3 ,实现点探测,使得整个系统满足共焦系统的要求^[13-14]。斯托克斯参量测量系统由分束镜(BS_2 、 BS_3 、 BS_4)、偏振分析器(P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3)和四分之一波片 W 组成。从样品反射的待测偏振光返回物镜 L 后,以平行光进入分振幅斯托克斯参量测量系统^[15],被分束镜 BS_2 、 BS_3 、 BS_4 分为四束,其光强分别为 i_0 、 i_1 、 i_2 和 i_3 。这四束光分别通过各自的偏振分析器后被四个光电探测器探测。此外,为了实时监测激光器功率的起伏,由分束镜 BS_1 、透镜 L_4 和探测器 D_4 组成功率监测器,其探测得到的光强信号 i_4 作为定标时光强归一化的参考信号。

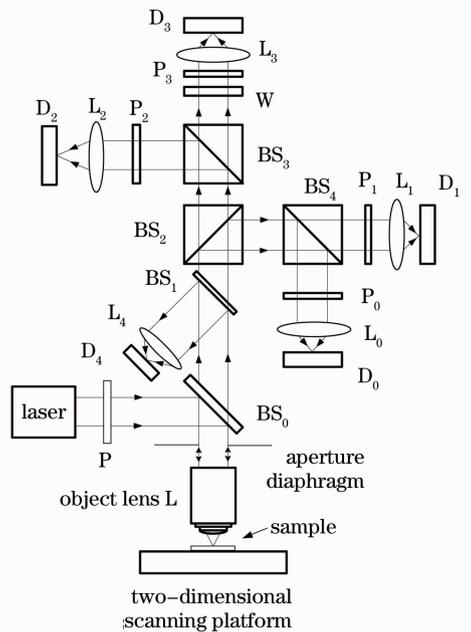


图 1 基于斯托克斯参量测量的反射式偏振共焦扫描显微成像系统

Fig. 1 Confocal microscopy imaging system based on Stokes parameters measurement

图 1 中 BS_0 为半透半反镜, BS_1 为一块载玻片做成的分束镜, P 、 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 为偏振片, L_0 、 L_1 、

L_2, L_3, L_4 为凸透镜, W 为四分之一波片, BS_2, BS_3, BS_4 为三个分束镜, 其分束比都是 1:1, 而 D_0, D_1, D_2, D_3, D_4 是 5 个相同的光电探测器。激光器为北京大学物理系研制的 JDW-3 型氦氖激光器, 波长 632.8 nm, 功率 2 mW。

利用二维平台扫描, 逐点测量出不同点的斯托克斯参量, 再以斯托克斯参量作为成像物理量, 利用计算机软件进行图像重建, 从而获得样品的斯托克斯参量共焦显微图像的共焦测量与成像。

2.2 分振幅斯托克斯参量测量原理

物质的光学各向异性可以由其 Mueller 矩阵来描述:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

当偏振光通过光学各向异性的样品时, 出射光的斯托克斯矢量 \mathbf{S}' 与入射光斯托克斯矢量 \mathbf{S} 之间存在以下关系^[16]:

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{MS}. \quad (2)$$

(2)式表明:对于已知偏振态的入射光, 其出射光的斯托克斯矢量 \mathbf{S}' 唯一地确定了样品的 Mueller 矩阵, 即出射光的斯托克斯矢量 \mathbf{S}' 能唯一地表征样品光学各向异性的分布特性。因此, 通过测量从样品反射或透射光的斯托克斯矢量 \mathbf{S}' , 就可以测量样品光学各向异性的分布。而采用分振幅斯托克斯参量测量方法, 则可以同时测量出从样品反射或透射光的斯托克斯矢量 \mathbf{S}' 。根据分振幅斯托克斯参量测量原理, 探测器探测得到的光强信号 $i_0 \sim i_3$ 和斯托克斯参量测量系统入射光的斯托克斯参量 $\mathbf{S}' = (S'_0, S'_1, S'_2, S'_3)'$ 可写成如下矩阵形式^[16]:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad \mathbf{i} = \mathbf{AS}', \quad (3)$$

式中 \mathbf{i} 为光强矩阵, \mathbf{A} 为系统矩阵, \mathbf{S}' 为入射光的斯托克斯矢量。由(3)式可知, 只要得到系统矩阵 \mathbf{A} , 且其行列式值不为零, 逆矩阵 \mathbf{A}^{-1} 存在, 由四个探测

器测到光强矩阵 \mathbf{i} , 便可由:

$$\mathbf{S}' = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{i}, \quad (4)$$

计算得到出射光的偏振态 \mathbf{S}' 。

2.3 斯托克斯参量测量系统的定标

为了证明斯托克斯参量测量系统的可靠性, 需要准确测量出系统矩阵 \mathbf{A} , 再对已知偏振态的斯托克斯参量进行测量, 通过实验值与理论值的比较来确定斯托克斯参量测量系统的准确性和可靠性。为此, 采用标准的 Equator-Poles 定标法(E-P)法^[17], 即利用线偏振光和圆偏振光实现系统定标。为减小由激光器光强跳变引起的定标误差, 利用参考光信号 i_4 进行归一化, 将已知偏振态的光束作为入射光, 使用归一化的光强矩阵 $\mathbf{i} = [i_0/i_4, i_1/i_4, i_2/i_4, i_3/i_4]$ 来确定系统矩阵^[15]。定标过程分为两步:1)使用线偏振光, 激光经过偏振态发生器后, 产生的线偏振光的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S} = [1 \ \cos 2\theta \ \sin 2\theta \ 0]^T$, (θ 为起偏器的方位角), 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的范围内, 每隔 10° 旋转起偏器, 记录 5 个探测器输出的电信号, 归一化后, 利用最小二乘法求得系统矩阵的前三列共 12 个矩阵元;2)使用圆偏振光, 偏振态发生器分别产生右旋和左旋圆偏振光, 它们的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}_R = [1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ 和 $\mathbf{S}_L = [1 \ 0 \ 0 \ -1]^T$, 通过运算求得系统矩阵的最后一列矩阵元。经过多次实验, 测量出系统矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.927 & 0.922 & 0.050 & 0.028 \\ 1.127 & 0.214 & -0.539 & -0.944 \\ 1.044 & -1.037 & -0.044 & -0.041 \\ 1.074 & -0.340 & -0.404 & 0.936 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其行列式的值为 -1.7367 , 所以系统的仪器矩阵是非奇异的, 存在逆矩阵, 且为

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.533 & 0.004 & 0.471 & 0.009 \\ 0.483 & 0.066 & -0.530 & 0.029 \\ 1.179 & -1.057 & 1.173 & -1.049 \\ 0.073 & -0.437 & -0.227 & 0.616 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

为了检验系统矩阵的准确性, 采用已知偏振态的检测光, 通过已经标定过的斯托克斯参量测量系统, 测量出检测光的斯托克斯参量值, 然后与已知的斯托克斯参量值进行对比, 即可知道系统矩阵的准确程度。实验中, 由起偏器和四分之一波片组成的偏振态发生器产生偏振态已知的检测光, 其斯托克斯参量可以由起偏器和四分之一波片的方位角可以准确知道。为简化计算和操作, 选取起偏器的方位角

β 为 45° 进行验证, 此时, 偏振态发生器输出光的归一化斯托克斯参量为^[18]

$$S(\beta = 45^\circ) = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \sin 2\theta \cos 2\theta \\ \sin^2 2\theta \\ -\cos 2\theta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 θ 为四分之一波片的方位角。

实验操作时, 将偏振态发生器中起偏器的方位

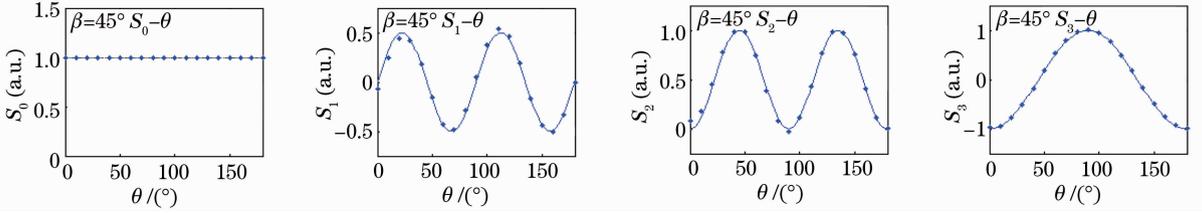


图 2 验证实验结果分析图

Fig. 2 Result analysis of the confirmatory experiment

3 实验与结果分析

为了验证该系统的成像性能, 实验中选用国家标准分辨率板(JJG 827-1993, RTA-07, 最小间距为 $1.25 \mu\text{m}$) 进行显微成像实验, 并选用了该分辨率板中大小适中的刻线作为实验目标。将分辨率板固定在扫描平台上, 调节样品位置, 使焦点对准样品。设置扫描参数, 扫描像素为 $160 \text{ pixel} \times 80 \text{ pixel}$, 步

角 β 固定为 45° , 将四分之一波片从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 旋转, 以 10° 为步长, 产生 19 个不同偏振态的入射光, 用斯托克斯参量测量系统测量这些偏振态下的斯托克斯参量, 测量结果分别如图 2 所示。图中的实线为 4 个斯托克斯参量的理论值, 点为斯托克斯参量测量值。由图 2 可见, 斯托克斯参量测量系统的测量值与理论值基本一致, 说明本实验测量得到的系统矩阵是准确的。

进电机每运行一步采集一次数据, 扫描范围为 $200 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。扫描前采用 E-P 定标法确定系统矩阵 \mathbf{A} , 将得到的光强数据代入(4)式就可以获得各点的 4 个斯托克斯参量, 实验系统如图 3 所示。

利用图像处理技术分别对这些参量进行二维排布。实验结果如图 4 所示。

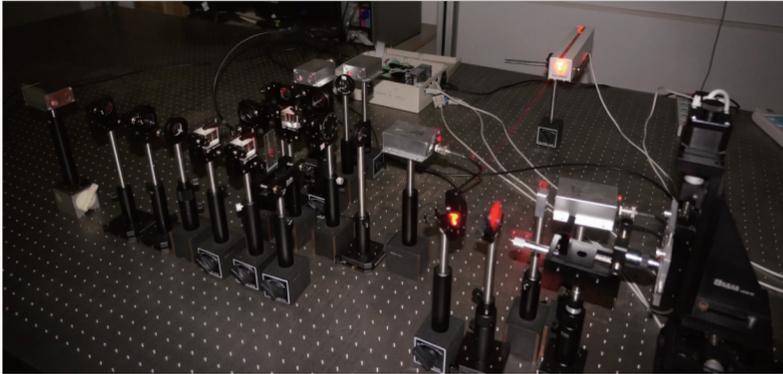


图 3 实验系统图

Fig. 3 Picture of the experimental system

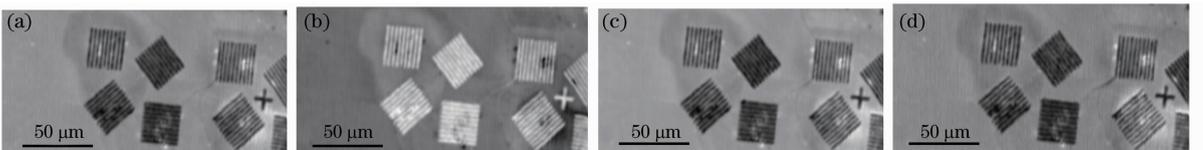


图 4 分辨率板斯托克斯参量的分布图

Fig. 4 Stokes parameters distribution of resolution testing board

其中图 4(a)~(d)分别表示斯托克斯参量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 的空间二维分布图,从图片结果可以看出,该成像系统能成功分辨标准分辨率板的最小间隔的刻线,即该系统的分辨率为 $1.25 \mu\text{m}$,实现了斯托克斯参量的偏振共焦显微成像。并且从这四幅图可以清晰地看出个参量间的区别,也就实现了样品偏振特性信息的记录,验证了该系统的可行性。

为了验证该系统可以用于各向异性物体的成像,采用不同矿物作为样品进行扫描成像。采用方



解石作为成像样品,图 5 为实验所用方解石图片,其中图 5(a)为方解石实物图,扫描区域在圆圈标出的面上,图 5(b)是将实验所用方解石放置在反射式显微镜下拍摄的图片,物镜放大倍率为 5 倍,扫描区域与黑色方框中的区域相对应。

扫描像素为 $80 \text{ pixel} \times 80 \text{ pixel}$,得到反映方解石表面信息的斯托克斯参量图像,如图 6 所示,其中图 6(a)~(d)分别表示以方解石为样品时斯托克斯参量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 的分布。

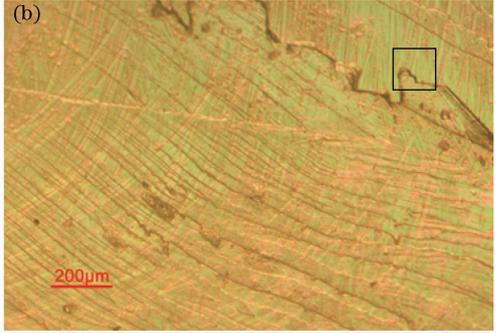


图 5 方解石实物图

Fig. 5 Pictures of the calcite

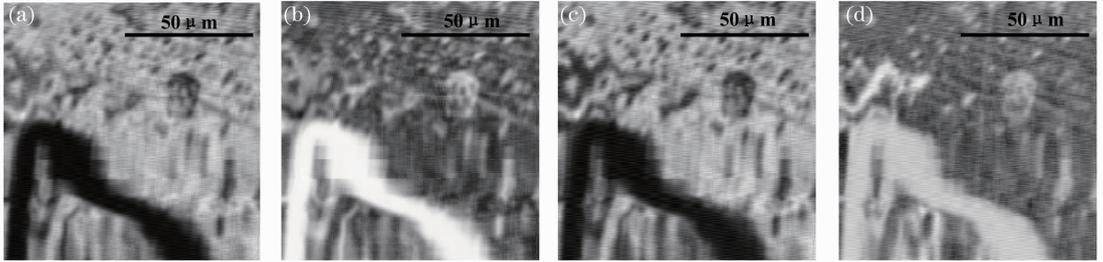


图 6 方解石表面斯托克斯参数二维空间分布图

Fig. 6 Stokes parameters distribution of calcite

在测量斯托克斯参数的基础上,为了获得更多的信息,分析计算得到样品偏振度 P 、相位差 ϕ 、方位角 θ 和椭率角 ϵ 的二维空间分布图。偏振度 P 是样品反射光中所包含的完全偏振光的比例,偏振度成像主要表征了样品表面粗糙程度的分布^[8]。方位角 θ 表示椭圆偏振光主轴与 X 轴正方向间的夹角,表征了样品表面取向的分布^[5]。相位差 ϕ 表示样品反射光在 Y 轴和 X 轴方向上相位差,相位差成像主要表征了样品在 Y 轴和 X 轴方向折射率差的分布^[19]。椭率角 ϵ 表征了椭圆半短轴与半长轴之比,因此,椭率角成像反映了样品在短轴与长轴方向折射率差的分布,对透明样品的分析具有重要意义^[20]。

其中:

$$P(x, y) = \sqrt{\frac{S_1^2(x, y) + S_2^2(x, y) + S_3^2(x, y)}{S_0^2(x, y)}}, \quad (8)$$

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{S_2(x, y)}{S_1(x, y)} \right], \quad (9)$$

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{S_3(x, y)}{S_2(x, y)} \right], \quad (10)$$

$$\epsilon(x, y) = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{S_3(x, y)}{\sqrt{S_1^2(x, y) + S_2^2(x, y) + S_3^2(x, y)}} \right]. \quad (11)$$

得到的其他偏振参数图像如图 7 所示。

由图 7 可以看出,对于各向异性样品的同一块区域,利用不同的参数成像,各图在大体结构上相同,但是细节信息有明显的差异。如图中黑色圆圈中的区域,在偏振度图中基本没有结构而其他三幅图中则有明显的轮廓,而且互不相同,而各向同性的分辨率板则没有表现出这样的特性。这一现象说明,该成像系统突显了各向异性样品的特性,确实可

以用于对各向异性物体成像。对比相位差和椭率角的图像,两图非常相似但并不是完全相同。而相位差和椭率角都是表征样品折射率分布的偏振参数,得到相似图像是符合实验预期的,这也证明了系统

的有效性。不同的偏振参数代表了样品不同的特性,通过进一步分析偏振参数图像可以得到对样品更加清晰和直观的了解,便于接下来的样品分析。

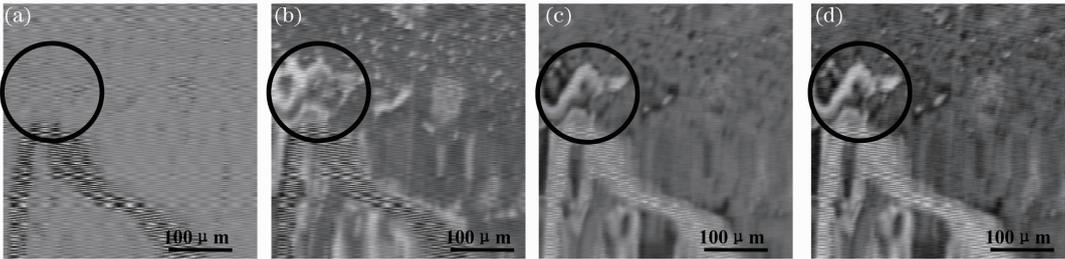


图7 方解石表面偏振参数图。(a)偏振度 P ; (b)方位角 θ ; (c)相位差 ϕ ; (d)椭率角 ϵ

Fig. 7 Polarization parameters distribution of calcite. (a) Degree of polarization P ; (b) azimuth θ ; (c) phase difference ϕ ; (d) ellipticity angle ϵ

6 结 论

通过系统集成方法将斯托克斯参量测量系统整合到共焦显微成像系统,可以实现斯托克斯参量的全偏振共焦显微成像。这种基于斯托克斯参量测量的全偏振共焦显微成像技术不仅可以实现各向异性物质的斯托克斯参量测量,还可以实现各向异性物质的共焦显微成像。通过斯托克斯参量分布图像以及偏振度、相位差、方位角、椭率角的分布图像,可以获得物质的各向异性分布及其显微结构。

参 考 文 献

- 1 Akihiro Morimoto, Sachihiko Matsunaga, Daisuke Kurihara, *et al.*. Visualization of mitotic Hela cells by advanced polarized light microscopy [J]. *Micron*, 2008, 39(5): 635–638.
- 2 Yang Zhiwen, Gao Shenggang, Wang Peigang. Polarization of reflected light by earth objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 241–245.
杨之文, 高胜钢, 王培纲. 几种地物反射光的偏振特性 [J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 241–245.
- 3 Werner Kaminsky, Kacey Claborn, Bart Kahr. Polarimetric imaging of crystals [J]. *Chem Soc Rev*, 2004, 33(8): 514–525.
- 4 J S Tyo, D L Goldstein, D B Chenault, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(22): 5353–5469.
- 5 Zhang Peng. Key Problem Research of Imaging Polarimeter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. 27–30, 32–33.
张 鹏. 成像式偏振测量的关键问题研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 27–30, 32–33.
- 6 Mu Quanquan, Liu Yongjun, Hu Lifa, *et al.*. Determination of anisotropic liquid crystal layer parameters by spectroscopic ellipsometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(3): 1055–1060.
穆全全, 刘永军, 胡立发, 等. 光谱型椭圆仪对各向异性液晶层的测量 [J]. *物理学报*, 2006, 55(3): 1055–1060.
- 7 N A Beaudry, Yanming Zhao, Russell Chipman. Dielectric tensor measurement from a single mueller matrix image [J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(3): 814–824.
- 8 Li Quan, Liu Zejin, Shu Bohong, *et al.*. Application of polarization diversity in active imaging [J]. *High Power Laser &*

Particle Beams, 2005, 3(8): 351–354

黎 全, 刘泽金, 舒柏宏, 等. 利用表面散射光偏振差异的目标识别技术 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, 3(8): 351–354.

- 9 M R Hee, D Huang, E A Swanson, *et al.*. Polarization-sensitive low-coherence reflectometer for birefringence characterization and ranging [J]. *J Opt Soc Am B*, 1992, 9(6): 903–908.
- 10 Johannes F de Boer, Thomas E Milner. Review of polarization sensitive optical coherence tomography and Stokes vector determination [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2002, 7(3): 359–371.
- 11 Arnaud Dubois. Spectroscopic polarization-sensitive full-field optical coherence tomography [J]. *Opt Express*, 2012, 20(9): 9962–9977.
- 12 Tang Zhilie, Liang Ruisheng, Zhu Xiaosong, *et al.*. Image property of polarized confocal scanning microscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(8): 1118–1122.
唐志列, 梁瑞生, 朱小松, 等. 偏振共焦扫描激光显微镜的成像特性研究 [J]. *光学学报*, 1999, 19(8): 1118–1122.
- 13 Hu Maohai, Tao Chunkan, Gao Wanrong, *et al.*. 3D Reconstruction of data field of laser confocal scanning microscope [J]. *Chinese J Lasers*, 2002, A29(6): 573–575.
胡茂海, 陶纯堪, 高万荣, 等. 激光共焦扫描显微镜数据场的三维重建 [J]. *中国激光*, 2002, A29(6): 573–575.
- 14 Huang Ling, Tao Chunkan, Hu Maohai. A image restoration method for laser confocal scanning microscopy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(4): 642–644.
黄 琳, 陶纯堪, 胡茂海. 激光共焦扫描显微镜中的图像复原方法 [J]. *光子学报*, 2007, 36(4): 642–644.
- 15 Li Zhicheng, Tang Zhilie, Chen Ping, *et al.*. Study of photoelastic stress distribution and imaging method based on Stokes parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512005.
李志诚, 唐志列, 陈 萍, 等. 基于斯托克斯参量的光弹性应力分布及成像方法研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512005.
- 16 Liao Yanbiao. Polarization Optics [M]. Beijing: Science Express, 2003. 52–61, 243–244.
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 52–61, 243–244.
- 17 R M A Azzam, A G Lopez. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarizing optical elements [J]. *J Opt Soc Am A*, 1989, 6(10): 1513–1521.
- 18 Tang Peijun, Chen Feihu, Tang Zhilie. Visualization of polarization state and its imaging method [J]. *Acta Optica Sinica*,

2013, 33(8): 0826002.

唐珮珺, 陈飞虎, 唐志列. 偏振态的可视化及其成像技术的研究 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0826002.

- 19 Chen Qianghua, Luo Huifu, Wang Sumei, *et al.*. Gas refractive index measurement system based on a surface plasmon resonance sensor with self-adaptive structure for angle shift and phase detection [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212004.

陈强华, 罗会甫, 王素梅, 等. 基于相位测量的角漂移自适应结构表面等离子体共振气体折射率测量系统 [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1212004.

- 20 V A Makara, V A Odarych, O V Vakulenko, *et al.*. Ellipsometric studies of porous silicon [J]. Thin Solid Films, 1999, 342(1-2): 230-237.

栏目编辑：张浩佳