

# 偏振态显微成像技术用于各向异性晶体生长的研究

刘超<sup>1</sup>, 袁伟丽<sup>1</sup>, 唐志列<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006;

<sup>2</sup>广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广东 广州 510006

**摘要** 将偏振态显微成像技术应用于各向异性晶体生长的成像研究。以物体的偏振态作为物理量进行成像, 将描述偏振态的3个Stokes参量转换成RGB三基色, 实现用RGB的偏振色度值来表征相应的偏振态。在此基础上, 利用共焦显微成像系统对物体进行逐点扫描, 获得各向异性物体Stokes参量的空间分布, 然后通过偏振色度值的分布来表征物体偏振态的空间分布。实验结果表明, 偏振态显微成像技术能够直观地反映物体的全部偏振信息, 有效地区分两种材料相同但内部结构排列不同的样品, 通过观察晶体生长过程中各向异性的变化, 为研究晶体的生长过程提供一种新的可视化方法。

**关键词** 成像系统; 偏振态成像; 偏振色度值; Stokes参量; 各向异性晶体

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031102

## Anisotropic Crystal Growth Investigation Based on Polarization State Microimaging Technology

Liu Chao<sup>1</sup>, Yuan Weili<sup>1</sup>, Tang Zhilie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

<sup>2</sup> Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** The polarization state microimaging technology is proposed to apply to the imaging research of anisotropic crystal growth. The polarization state of the object is used as the physical quantity for imaging. Three Stokes parameters describing the polarization state are converted to three basic colors RGB, then the polarized-chromatic value of the RGB can be used to describe the corresponding polarization state. On this basis, using the confocal microscopy imaging system, we scan the object point by point to obtain the spatial distribution of Stokes parameters of the anisotropic object. Then we characterize the space distribution of the polarization state of the object by the distribution of polarized-chromatic value. The experimental results show that using the polarization state microimaging technology, we can obtain intuitively all the polarization information of the substance, distinguish two samples with the same material but different internal structures effectively, and observe the changes of the anisotropic crystal growth. Thus, a new visualization method for the growth of crystals is presented.

**Key words** imaging systems; polarization state imaging; polarized-chromatic value; Stokes parameters; anisotropic crystal

**OCIS codes** 110.5405; 120.5410; 260.1180; 330.1720

## 1 引言

光束与物质发生相互作用后携带了物质的偏振

信息, 利用偏振光成像技术可以获得物体的偏振特性图像, 其比单纯的强度成像包含更多的信息。近年来, 偏振光成像技术广泛应用于生物医学、天文遥

收稿日期: 2017-09-10; 收到修改稿日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61575067)

作者简介: 刘超(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: 1434324514@qq.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@sncu.edu.cn(通信联系人)

感及矿物材料<sup>[1-7]</sup>等领域。为了获得目标物体的微观偏振图像,将偏振成像技术与显微成像技术相结合<sup>[8-9]</sup>,通过对生物组织和细胞内部结构等进行显微成像研究,提高成像图像分辨率,且无需对细胞进行标记和染色,实现对样品的无损研究。基于 Mueller 矩阵测量的偏振成像技术<sup>[10-11]</sup>虽然能够得到物体全部的偏振信息,但 Mueller 矩阵中的元素多且其物理意义并不清晰,很难对其偏振信息进行度量。基于 Stokes 参量测量的偏振成像技术<sup>[12-13]</sup>,虽然能获得物体的偏振图像,但是其获得的只是偏振态的某一个投影图像和物体表面的各向异性特性,包含的偏振信息并不完全,容易引起误判。

目前,各向异性晶体材料在光学、计算机、航天等领域的应用越来越广泛,研究各向异性晶体是一个相当有价值的课题。晶体是在物相转变的情况下形成的,物质由气相或液相转变成固相时便形成晶体,晶体生长即为一个相变的过程,而这个过程也是介质从各向同性转变为各向异性的过程。从气相或者液相生长为晶体的过程一般存在 3 个阶段:1) 介质溶液阶段,这一阶段的介质是各向同性的;2) 介质达到过饱和阶段,开始成核;3) 晶核慢慢长大,形成各向异性的晶体<sup>[14-16]</sup>。晶体形态是晶体自身的内部结构和结晶时外部环境的综合反映,取决于固-液界面结构。晶体的各向异性与其结构和形态有关,在一定程度上可以反映出其内部结构特征和生长历史。通过研究晶体的各向异性,可以进一步研究其结构和形态特征,进而为更深入地研究晶体的功能特性提供基础。

当前,主要通过 X 射线衍射、透射电镜、偏光显微镜等方法对各向异性晶体进行研究。其中,X 射线衍射法得到的是宏观平均信息,对于细节结构的测量不是很准确;透射电镜造价昂贵,制样困难;偏光显微镜无法得到样品全部的偏振信息。本文采用偏振态显微成像技术对各向异性晶体的生长变化进行了研究。偏振态成像技术<sup>[17]</sup>是用光束的偏振态作为物理量进行成像,通过偏振色度值的空间分布来表征偏振态的空间分布。为了对物体进行微观成像,需要同时结合共焦显微技术,从而获得物体的偏振态显微图像。偏振态显微图像可以获得物体全部的偏振信息,弥补了传统偏振成像技术的不足,为研究物质的偏振特性提供了一种有效的新途径。

## 2 偏振态成像原理及显微成像系统

当光束通过具有光学各向异性的物体时,物体

出射光的 Stokes 参量  $\mathbf{S}' = [s'_0 \ s'_1 \ s'_2 \ s'_3]^T$  与对应入射光的 Stokes 参量  $\mathbf{S} = [s_0 \ s_1 \ s_2 \ s_3]^T$  和 Mueller 矩阵  $\mathbf{M}$  之间的关系为<sup>[18]</sup>

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}\mathbf{S}. \quad (1)$$

由(1)式可知,在入射光的偏振态完全确定的前提下,出射光的偏振态完全由物体的偏振特性决定,即出射光的偏振态完全表征物体的偏振特性,因而利用偏振态进行成像可以获得物体全部的偏振信息。在一幅图中,可以非常直观地观察到物体的偏振特性分布,从而可以实时地对偏振信息变化进行判断。

由文献<sup>[17]</sup>可知,需要 3 个实参数才能够完备地描述光束的偏振态。Stokes 参量  $s_0, s_1, s_2, s_3$  的取值范围都在  $[-1, 1]$  之间,如果把每个 Stokes 参量值分成 256 个灰阶,重新定义偏振态的 3 个 Stokes 参量与 RGB 三基色之间的关系,即可得到偏振色度值  $P$ ,即<sup>[14]</sup>

$$P(R, G, B) = (s_1, s_2, s_3). \quad (2)$$

通过偏振色度值不仅可以完全表征光束的偏振态,还解决了与像素点之间的对应问题,因此可以通过偏振色度值的空间分布来直观地表征偏振态的空间分布,从而实现以光束的偏振态作为成像参量进行成像的目的。

为了实现偏振态显微成像,需要采用 Stokes 参量-共焦显微成像系统(SPCM),在扫描成像的同时,实现 4 个 Stokes 参数  $s_0, s_1, s_2, s_3$  的同时测量,实验系统如图 1 所示。其中, $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4$  为偏振片, $BS_0, BS_1, BS_2$  为偏振无关分束镜, $L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  为凸透镜, $W_0, W_1$  为波片, $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  为 5 个完全相同的探测器。其中,20 倍显微物镜、 $L_1, L_2, L_3, L_4$  以及  $D_1, D_2, D_3, D_4$  组成了共焦显微成像系统。虚线方框内的偏振无关分束镜( $BS_0, BS_1, BS_2$ )、偏振片( $P_1, P_2, P_3, P_4$ )和  $\lambda/4$  波片  $W_1$  则组成了分振幅 Stokes 参量测量系统。

在进行 Stokes 参量测量和偏振态显微成像实验前,应先对分振幅 Stokes 参量测量系统进行校准。在图 1 所示实验系统中,先取下物镜、样品  $S$  和  $L_0$ ,使激光器出射的光束通过偏振态发生器( $P_0$  和  $W_0$ )后直接进入分振幅 Stokes 参量测量系统进行定标实验。利用 Equator-Poles 定标法<sup>[17]</sup>求出  $\mathbf{A}$ ,实验中测得的系统矩阵  $\mathbf{A}$  为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.0920 & 1.0825 & 0.0746 & -0.0176 \\ 1.2223 & 0.0798 & -1.2176 & -0.0950 \\ 1.0766 & -1.0727 & -0.0999 & -0.0187 \\ 1.1920 & -0.0456 & 0.3049 & 1.1233 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

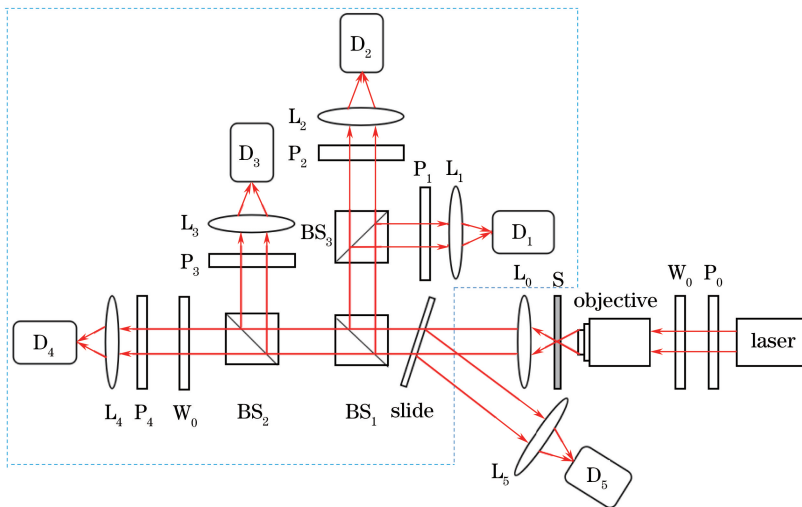


图 1 基于分振幅 Stokes 参量测量的偏振态显微成像系统的装置图

Fig. 1 Polarization state microimaging system setup diagram based on division-of-amplitude Stokes parameter measurement

(3)式行列式的值为 $-3.1747$ ,故系统矩阵 $\mathbf{A}$ 可逆。

### 3 偏振态显微成像实验结果及分析

为了将偏振态显微成像技术用于各向异性晶体的生长研究,利用图 1 所示实验系统,首先选用具有

各向异性的透明胶布(两块胶布分别沿不同的方向粘贴在一块载玻片上)作为偏振态显微成像的样品,探讨偏振态显微成像技术的独特优势。对同一样品分别进行传统的偏振光共焦显微成像和偏振态显微成像,以比较其优劣,如图 2 所示。

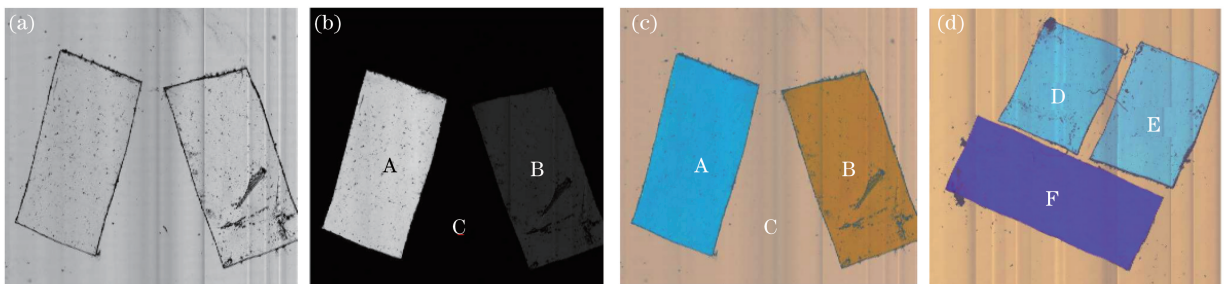


图 2 (a)共焦显微图像;(b)起偏器与检偏器相互正交的传统偏振光共焦显微图像;(c)两块沿不同方向粘贴的透明胶布的偏振态分布图像;(d)三块透明胶布的偏振态分布图像

Fig. 2 (a) Confocal microscopy image; (b) traditional polarized light confocal microscopy image with polarizer and analyzer orthogonal to each other; (c) polarization state distribution image of two transparent tapes in two different directions; (d) polarization state distribution image of three transparent tapes

为了证明所选用的样品具有光学各向异性,将两个偏振片相互正交后对样品的同一区域进行扫描成像。光束可以通过具有光学各向异性的区域,最后被探测器接收到,在图像上呈现出明亮的区域,如图 2(b)中的 A、B 两处;不具有各向异性的区域则没有光通过,在图像上显示为全黑,如图 2(b)中的 C 区域。显然,所选用的透明胶布具有很强的各向异性。

以 $0^\circ$ 线偏振光为入射偏振光,利用二维扫描平台对样品进行范围为 $6.25\text{ mm}\times 6.25\text{ mm}$ 的逐点扫描,测出样品每一点出射光的 Stokes 参量,根据(2)

式转换成相应的偏振色度值,再利用各点的偏振色度值进行图像重建,从而获得样品的偏振态分布图像,如图 2(c)所示。

在图 2(b)中,只能看到样品双折射效应的强弱,获得的信息十分有限,即利用传统的偏振光成像技术很难得到样品的所有偏振特性分布信息。由图 2(c)可见,不同的颜色表示样品出射光的偏振态不相同,即样品的偏振特性不同,因此可以非常直观地观察样品的偏振特性分布。通过比较图 2(a)、(c)可知,两者所获得的信息并不相同。从图 2(a)中只能知道 A、B 两处胶布的形状轮廓,

看起来两块区域相同,无法从中获得样品的更多信息。虽然它们都具有光学双折射效应,但是 A、B 两块透明胶布是沿不同方向粘贴在载玻片上的,即它们的分子排列方向不同。图 2(c)中 A、B 两处呈现的颜色不同,说明它们的偏振色度值不同,即它们出射光的偏振态不同,反映了样品 A、B 处的偏振特性不同,也间接反映出两者内部的分子结构不同。根据图 2(d),D、E 两块胶布沿同一方向粘贴在载玻片上,说明它们内部的分子排列方向是一致的,所以它们的颜色是相同的,即它们的偏振信息是相同的;而 F 与 D、E 沿不同方向粘贴,其相应的分子排列是不同的,所以 F 的颜色与 D、E

不一样。这也说明偏振态成像技术能获得样品全部的偏振信息,能够有效区分两种材料相同但内部结构排列不同的样品,并且与背景一一区别开来,这为偏振态成像技术在晶体生长方面的应用研究提供了基础。

鉴于偏振态成像技术的优越性及其在材料结构特性研究方面的独特优势,同样可以将这种技术应用于晶体生长的研究。选取亚硫酸钠晶体,先将其配成溶液,再吸取少许溶液滴在载玻片上,自然晾干后析出晶体,做成实验所需的样品。以  $0^\circ$  线偏振光作为入射光,利用 SPCM 对样品进行扫描,扫描范围为  $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ , 所得图像如图 3 所示。

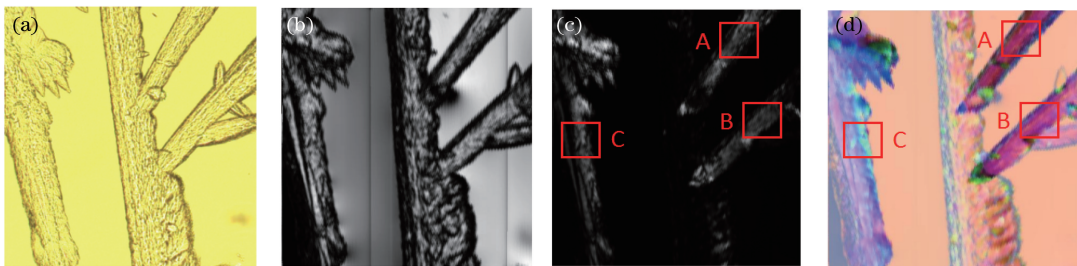


图 3 (a)光学显微镜图像;(b)传统的共焦显微图像;(c)起偏器与检偏器相互正交的传统偏振光共焦显微图像;(d)偏振态分布图像

Fig. 3 (a) Optical microscope image; (b) traditional confocal microscopy image; (c) traditional polarized light confocal microscopy image with polarizer and analyzer orthogonal to each other; (d) polarization state distribution image

通过对比图 3(a)中亚硫酸钠晶体的光学显微镜图像与图 3(b)所示共焦显微图像,可以发现它们的轮廓是一致的,说明系统成像是可靠的。从图 3(c)可以看出亚硫酸钠晶体具有各向异性,通过比较图 3(c)、(d)中 A、C 处的方框,可以看到 A、C 处晶体生长的方向是不同的,即它们晶胞的排列方向应该是不相同的。但是,从图 3(b)、(c)中只能看到晶体的外部轮廓,无法获取其他信息。无论是通过传统的偏振光共焦显微成像技术,还是通过起偏器与检偏器相互正交的偏振光显微成像技术,获得的样品信息都是有限的。利用偏振态成像技术和偏振色度值对亚硫酸钠晶体进行成像。从图 3(d)中可以看到 A、C 两处的颜色是不同的,即它们的偏振态是不同的;通过观察图 3(d)可以发现 A、B 两处晶体的生长方向相同,故其晶胞的排列应该也相同,所以它们呈现出相同的颜色,也就说明它们的偏振色度值相同,即具有相同的偏振态。因此,根据颜色对偏振态的表征可以非常直观地看到其结构的差异,有效地判断其生长过程中各向异性的变化,进而通过调节外部条件以调控其生长。故偏振态成像技术比传统的偏振成像法反映出关于样品更丰富的信息,

在研究晶体的生长过程时有非常独特的优势。

## 4 结 论

通过 SPCM 得到物体的 Stokes 参量,以物体的偏振态作为成像的物理量,得到物体偏振态的空间分布,再通过偏振色度值建立偏振态与像素点之间的对应关系,从而实现偏振态显微成像。通过比较晶体的偏振态图像,从而获取晶体的全部偏振信息,根据偏振信息分析其相关结构,可以为研究晶体生长的光学特性和结构特征提供更为丰富的信息。通过观察晶体生长过程中各向异性的变化,可为研究晶体的生长过程提供一种新的可视化方法。

## 参 考 文 献

- [1] Novikova T, Pierangelo A, Manhas S, *et al.* The origins of polarimetric image contrast between healthy and cancerous human colon tissue [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(24): 241103.
- [2] Pierangelo A, Nazac A, Benali A, *et al.* Polarimetric imaging of uterine cervix: A case study [J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14120-14130.

- [3] 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.
- [4] Han J F, Xia M, Sun L Y, *et al.* Influence of underwater targets with different polarization properties on the resolution of imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0311001.  
韩捷飞, 夏珉, 孙立颖, 等. 水下目标不同偏振特性对成像系统分辨率的影响 [J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0311001.
- [5] Kaminsky W, Claborn K, Kahr B. Polarimetric imaging of crystals [J]. *Chemical Society Reviews*, 2004, 33(8): 514-525.
- [6] Glazer A M, Lewis J G, Kaminsky W. An automatic optical imaging system for birefringent media [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1996, 452(1955): 2751-2765.
- [7] Liu Z, Guo J. Study on material classification based on the polarized imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1011002.  
刘喆, 郭俊. 基于偏振光成像的材质分类研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1011002.
- [8] Oldenbourg R. A new view on polarization microscopy [J]. *Nature*, 1996, 381(6585): 811-812.
- [9] Morimoto A, Matsunaga S, Kurihara D, *et al.* Visualization of mitotic HeLa cells by advanced polarized light microscopy [J]. *Micron*, 2008, 39(5): 635-638.
- [10] Pierangelo A, Benali A, Antonelli M, *et al.* Ex-vivo characterization of human colon cancer by Mueller polarimetric imaging [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1582-1593.
- [11] Alali S, Vitkin A. Polarized light imaging in biomedicine: Emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, 20(6): 061104.
- [12] Cheng Y, Tang Z L. Study of confocal microscopy imaging system based on Stokes parameters measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0611005.  
程怡, 唐志列. 基于斯托克斯参量测量的偏振共焦显微成像技术的研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0611005.
- [13] He Y W, Cheng Y, Tang Z L. Imaging investigation of polarization confocal microscopy based on Stokes parameters of weak anisotropic substances [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2016, 25(1): 21-26.  
何燕玫, 程怡, 唐志列. Stokes 参量共焦显微术用于弱各向异性物质的成像研究 [J]. *激光生物学报*, 2016, 25(1): 21-26.
- [14] Hao B H, Huang J H. Summary on the growth mechanism of crystal [J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology*, 2006, 14(2): 58-64.  
郝保红, 黄俊华. 晶体生长机理的研究综述 [J]. *北京石油化工学院学报*, 2006, 14(2): 58-64.
- [15] Sun S Q. Study on growth and properties of monoclinic Nd:LaVO<sub>4</sub> crystal [D]. Jinan: Shandong University, 2014.  
孙尚倩. 单斜 Nd:LaVO<sub>4</sub> 晶体的生长和特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [16] Fuertes M, Flores J, Siervo F J. The use of circularly polarized light for biometry, identification and estimation of mass of coccoliths [J]. *Marine Micropaleontology*, 2014, 113: 44-55.
- [17] Tang P J, Chen F H, Tang Z L. 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.
- [18] Brosseau C. Fundamentals of polarized light: A statistical optics approach [M]. New York: Wiley-Interscience, 1998.