

基于像面干涉的高光谱显微成像方法

李建欣 周 伟 孟 鑫 朱日宏

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 为了实现微小尺度目标的光谱成像分析,提出了一种基于像面干涉技术的高光谱显微成像方法。研究了由显微物镜、准直镜、横向剪切分束器、成像镜和探测器等组成的干涉成像光学系统。采用可调式实体横向剪切分束器,并通过旋转横向剪切分束器的方法获得目标的干涉信息。分析了该方法的成像原理、系统放大率、空间分辨率、光谱分辨率以及景深等。对蚕豆叶表皮切片进行了显微光谱成像实验,获得了可见光波段的光谱复原图像。实验结果表明,该方法具有光通量大、光谱分辨率高的优点,为显微光谱成像提供了一种新方法。

关键词 成像系统;光谱学;高光谱显微成像;二次成像;横向剪切分束器

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1211005

Hyperspectral Microscopic Imaging Based on Image Plane Interferometry

Li Jianxin Zhou Wei Meng Xin Zhu Rihong

(School of Electronic Engineering and Photo-Electronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract In order to obtain the spectral images of objects with small scale, a method of hyperspectral microscopic imaging based on the image plane interferometry is proposed. The interferometric imaging system with microscope objective, collimating lens, lateral shearing beam splitter, imaging lens and detector is researched. An adjustable solid structure of the lateral shearing beam splitter is adopted and rotated to achieve the interferogram of the object. The microscopic imaging principle, magnification, spatial resolution, spectral resolution and depth of field are analyzed. An experimental prototype is constructed to carry out experiments on the epidermis of broad bean leaves specimen, and the spectral images in visible band are recovered. Experimental results validate the good performance of the system with high throughput and high spectral resolution, and show that a new method for the microscopic spectral imaging is provided.

Key words imaging systems; spectroscopy; hyperspectral microscopic imaging; re-imaging; lateral shearing beam splitter

OCIS codes 110.4234; 110.3175; 110.0180; 300.6190

1 引 言

近年来随着成像光谱技术的日趋成熟,其在显微领域的应用逐渐成为研究热点,显微成像光谱技术^[1-4]应运而生。显微成像光谱技术是在显微成像技术的基础上引入光谱成像理论而得到的一种新型的光学探测技术,在生物医学、药学、病理学、材料科学等领域发挥着重要作用。一种简单的实现方法就

是利用光源通过若干个分立的滤光片产生窄带光,用产生的窄带光照射被测物体,再利用 CCD 得到被测物体在此频谱范围内的显微图像。虽然这种方法简单,但由于采用分立的滤光片,显微光谱图像获取速度慢,而且无法得到连续的光谱。为了解决这个问题,研究人员提出了采用可调谐滤光器作为分光手段的方法,常用的可调谐滤光器包括声光可调谐

收稿日期: 2013-06-03; **收到修改稿日期:** 2013-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(61205016, U1231112)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123219120021)、中国科学院天文光学技术重点实验室开放课题

作者简介: 李建欣(1977—),男,博士,副教授,主要从事干涉成像光谱技术和光学精密测试技术方面的研究。

E-mail: ljx@vip.163.com

滤光器(AOTF)^[5]和液晶可调谐滤光器(LCTF)^[6]。AOTF滤光具有相对较大的通光孔径、宽的光波工作范围和快速电调谐等优点,但在带宽调谐时存在空间像移,造成成像模糊,影响显微成像质量。LCTF滤光具有光谱分辨率高、易与现有的显微镜集成等优点,但存在透光效率低、光谱范围有限等问题。肖功海等^[7]成功研制了一种基于棱镜-光栅-棱镜组件进行光谱分光的显微高光谱成像系统,该系统具有结构简单无扫描元件的优点,但主要缺点是系统的信噪比和光谱分辨率受到狭缝宽度的限制,狭缝越窄,光谱分辨率越高,但系统接收到的能量也随之降低。为了提高光能利用率,研究人员提出了一种基于多通道编码孔径的高通量型高光谱显微成像方法^[8],但孔径编码和信号解码的速度慢。此外,近年来新兴的一种技术是计算层析式显微成像光谱仪(CTIS)^[9],这种技术将空间信息和光谱信息整体投射至探测器上,从而实现一次获取,再通过算法提取光谱信息。但其算法复杂,计算量大,目前仍处于原理研究和实验阶段。

为实现高光谱、高分辨率显微成像,本文提出了一种基于像面干涉的高光谱显微成像方法。该方法可同时获得目标的空间信息及光谱信息,反映目标的微观形貌及其光谱特征。采用旋转横向剪切分束器实现快速推扫成像的方式,获得高精度的高光谱显微图像,形成数据立方体。

2 高光谱显微成像原理和方法

2.1 像面干涉成像光谱原理

像面干涉成像光谱仪^[10-11]是在无限远成像系统中加入横向剪切分束器,由同一目标物点发出的光波经过前置透镜和分束片形成两束光波,这两束光波会聚到像面上同一点时,由于存在光程差(OPD)

而产生干涉,因此所成的像是经过光程差调制后的目标像,如图1所示。系统在推扫成像过程中,每个像点在不同时刻被不同的光程差调制,经过完整的推扫后该像点形成干涉条纹。对该干涉条纹数据进行傅里叶变换,即可得到所对应物点的光谱信息。整个系统中没有狭缝,采用前置准直透镜将从目标物点入射的光线变成平行光入射到分束器上,有效提高了进入系统的光通量和系统的信噪比。



图1 光程差调制的干涉图像

Fig.1 Interferogram modulated by OPD

2.2 基于像面干涉的高光谱显微成像方法

目前像面干涉成像光谱仪主要应用在航空、航天和遥感等领域对远距离探测目标进行光谱成像。基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法^[12-13]解决了像面干涉高光谱成像技术进行近距离探测时所面临的问题。在此基础上,本文将像面干涉成像光谱技术深入到微观领域,为研究或观测微小物体提供一种新的手段。基于像面干涉的高光谱显微成像系统结构如图2所示,由有限远共轭显微物镜 L_0 、准直镜 L_1 、横向剪切分束器和成像镜 L_2 等组成,像平面上由CCD探测器来接收图像。系统结构上不需要狭缝和用于产生单色光的滤光元件,保留了像面干涉成像光谱仪高光通量、高分辨率、高信噪比的性能优势。

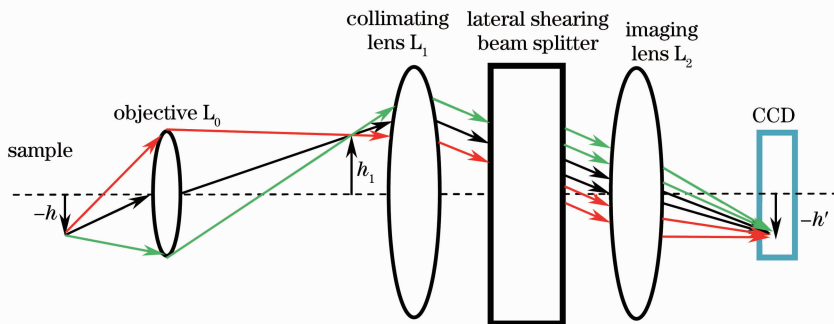


图2 高光谱显微成像原理图

Fig.2 Schematic of the hyperspectral microscopic imaging

如图 2 所示,样本切片经光源照射后由有限远共轭显微物镜 L_0 成像于准直镜 L_1 的前焦面上,经过准直镜 L_1 后,光束被准直成平行光束进入横向剪切分束器。分束器横向剪切每一束光线,得到两束相互平行的光线,再经过成像镜 L_2 后在像平面上形成清晰的目标像,但两束光线会聚到像面上同一点时存在着光程差,根据相干特性产生干涉图,因此,在像平面上得到的是经过光程差调制后的全视场目标像。不同视场的目标单元对应着不同的干涉光程差。

设横向剪切分束器的剪切量为 d ,则以视场角 θ 入射的两束平行光束之间的光程差 Δ 满足

$$\Delta = d \sin \theta. \quad (1)$$

若输入辐射为一具有无限窄线宽 $d\sigma$ 的谱元,则像面上得到的干涉光强分布为

$$dI(\Delta) = 2RTB(\sigma)[1 + \cos(2\pi\sigma\Delta)]d\sigma, \quad (2)$$

式中 R 和 T 分别表示横向剪切分束器的反射率和透射率, $B(\sigma)$ 为样品上物点的光谱 (σ 为波数, $\sigma = 1/\lambda$)。

(2)式对波数进行积分,得

$$I(\Delta) = 2RT \int_0^{+\infty} B(\sigma)[1 + \cos(2\pi\sigma\Delta)]d\sigma. \quad (3)$$

(3)式中包含直流成分 $I(\infty)$,在讨论干涉信息与光谱信息之间的对应关系时,应当省去。则(3)式可改写为

$$I(\Delta) = \int_0^{+\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma\Delta) d\sigma. \quad (4)$$

通过对探测目标进行推扫成像,获得目标干涉图像序列,然后提取同一物点在不同光程差下的干涉光强信息,进行傅里叶变换处理,可得到该物点的光谱信息

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\Delta) \exp(2\pi\sigma\Delta) d\Delta. \quad (5)$$

物点发出的光波经过干涉仪进行了一次自相关调制,因此光学系统及面阵探测器固定后,自相关调制也是稳定的。同时面阵探测器放置在光学系统后焦面上,它的一个单元对应目标空间的一块区域。由于干涉作用,探测器单元记录的不是通常意义下的像点强度,实际上是干涉波前的自相关函数,因此基于像面干涉的高光谱显微成像方法具有高的光学输出量。成像后将每一目标点的自相关函数值取出来进行傅里叶变换,即可得到每一目标点对应的光谱。同时,在由自相关函数的傅里叶变换得到光谱的过程中,噪声都分布在各个光谱通道上,而每个光

谱通道的信号能量不会因光谱通道的增加而减少,因此可以有效提高系统的信噪比^[14]。

2.2.1 显微成像理论分析

从成像角度来讲,上述系统可以看作一个二次成像系统。第一级成像系统为显微成像系统,用于将样本切片成像在一次像面上,且一次像面位于准直镜的前焦面上。准直镜和成像镜组成第二级成像系统,对有限远的目标(一次像)进行再次成像。

对于第一级成像系统,物高为 h 的样品切片经有限远共轭显微物镜成像,像高为 h_1 。有限远共轭显微物镜的共轭距 L (物平面到像平面的距离)为 195 mm,即

$$-l + l' = 195 \text{ mm}, \quad (6)$$

式中 l 、 l' 分别为样品切片的物距和像距。

共轭距一定的条件下,根据成像关系,可得物距、像距分别为

$$l = -\frac{1}{1-\beta} \cdot L, \quad (7)$$

$$l' = \frac{-\beta}{1-\beta} \cdot L. \quad (8)$$

根据垂轴放大率 β 的定义,可得

$$h_1 = \beta h. \quad (9)$$

对于第二级成像系统而言,显微物镜所成的一次像可看作第二级成像系统的目标物体。为了使 CCD 上获得清晰的目标像,须满足

$$\frac{h'}{h_1} = -\frac{f_2}{f_1}, \quad (10)$$

式中 f_1 、 f_2 分别为准直镜和成像镜的焦距, h' 为一次像在 CCD 上所成的二次像像高。

将(9)式代入(10)式,可得

$$h' = -\beta \cdot \frac{f_2}{f_1} \cdot h. \quad (11)$$

因此,整个系统的放大率可表示为

$$M = \frac{h'}{h} = M_1 \cdot M_2, \quad (12)$$

式中 $M_1 = \beta$ 、 $M_2 = -f_2/f_1$ 分别表示第一级成像系统和第二级成像系统的放大率。

显微系统观察近距离微小物体,其分辨率以能分辨开两点的最小线距离来表示。根据瑞利判据,若两个相邻像点之间的距离等于艾里斑的半径,则能被光学系统分辨开来。显微成像系统的理论分辨率为 $\sigma_0 = 0.61\lambda/NA$,与照明光的波长 λ 和物镜的数值孔径 NA 有关。基于像面干涉的高光谱显微成像系统,空间分辨率理论上是衍射受限的,但实际上是由有效的空间分辨率决定的。对于本系统,有效

空间分辨率主要与系统的放大倍数和 CCD 探测器的像素大小有关,可根据 CCD 的参量计算系统的空间分辨率。

待测目标经过光学系统放大后,成像在 CCD 探测器上,所以成像尺寸的大小乘以校正系数就能得到目标的实际尺寸^[15]。系统的空间分辨率为

$$\delta_y = \frac{2R_0}{M}, \quad (13)$$

式中 R_0 为 CCD 像素尺寸的大小。

由(12)式和(13)式可知,整个系统的空间分辨率主要取决于第一级成像系统的放大率。第二级成像系统仅把被第一级成像系统分辨的像再次放大,即使第二级成像系统的放大率再大,也不能把第一级成像系统不能分辨的细节看清。

2.2.2 光谱分辨率分析

根据上文介绍,对干涉条纹进行傅里叶变换能够反演得到目标的光谱数据,其分辨率可表示为

$$\delta_\sigma = \frac{1}{2\Delta_{\max}}, \quad (14)$$

式中 δ_σ 为光谱分辨率的波数表达形式, Δ_{\max} 为最大光程差。

由于干涉数据采样宽度总是有限的,对其傅里叶变换得到的光谱数据边缘会出现振荡,对数据的准确性和可靠性带来影响,因此有必要对干涉数据进行切趾以消除其影响。切趾后得到的光谱数据的分辨率为

$$\delta_\sigma = \frac{C}{\Delta_{\max}}, \quad (15)$$

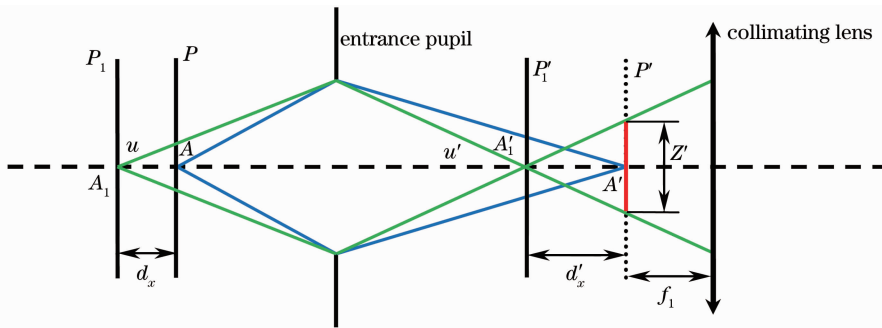


图3 实际显微成像示意图

Fig. 3 Schematic of actual microscope objective imaging

景像平面上的弥散斑经第二级成像系统在 CCD 靶面上所成弥散斑的半径小于 CCD 像素尺寸时,即

$$Z' \cdot M_2 = 2R_0, \quad (17)$$

仍可认为是一个清晰的像点。

利用轴向放大率和横向放大率的关系得到

式中 C 为由切趾函数决定的常数。可以看出,增大最大光程差可以提高光谱分辨率。结合(1)式可知,增大光程差可以通过增大剪切量和调整视角实现。

2.2.3 景深分析

景深是显微成像系统重要参数之一,因此,有必要对景深进行分析,以便在设计、生产中快捷地对有景深要求的光学系统的方案选择提供科学依据。

按照理想光学系统的物像共轭特性,物空间一个平面只能清晰成像于像空间的某一个特定平面上。然而实际物体都有一定的空间深度,实际光学系统是将一定空间深度范围内的物空间成像在一个平面上。这样景像平面上除了有与其共轭的对准平面的像之外,同时还映射了位于对准平面前后的空间点的像,但这些非共轭的像只能为一个弥散斑。如图3所示,与对准平面 P 相距 d_x 的物平面 P_1 上的点 A_1 发出的充满入瞳的光束和对准平面交为弥散斑,在景像平面上的共轭像也是一个弥散斑。这个弥散斑的大小可接受程度由系统像面分辨率决定,当弥散斑小于一定限度时,仍可认为是一个点。景深定义为在像面上获得清晰像的物空间深度。在几何光学中,目视光学仪器的景深是以人眼的分辨率且在物面为理想状态,即厚度为零的条件下给出的。但是在本系统中以 CCD 为光电检测器件,所以应在 CCD 的分辨率基础上确定该光学系统的景深。

景像平面上的弥散斑直径 Z' 可表示为

$$Z' = 2 \cdot d_x' \cdot u'. \quad (16)$$

$$d_x = \frac{n}{n'\beta^2} d_x' = \frac{n}{n'\beta^2} \cdot \frac{R_0}{M_2 \cdot u'}, \quad (18)$$

式中 n, n' 分别表示物空间和像空间的折射率。再根据

$$\beta = nu / (n'u'), \quad (19)$$

可得

$$2d_x = \frac{n \cdot 2R_0}{M \cdot NA}, \quad (20)$$

即该基于像面干涉的高光谱显微成像系统的景深 F 为

$$F = 2d_x = \frac{2nR_0}{M \cdot NA}. \quad (21)$$

把被观测平面调焦到位于景深之内才可以看清楚,所以(21)式为成像系统微动调焦范围提出了理论要求。同时可根据(21)式来选择合适的光学器件,实现快速实时测量。

2.3 可调式实体横向剪切分束器

横向剪切分束器作为基于像面干涉的高光谱显微成像系统的关键部件,直接影响到整个系统的性能、结构的复杂度、重量和体积等。它的作用是将一束入射光沿垂直于光轴的方向(横向)剪切成两束相互平行的相干光,这两束光之间的横向距离称为横向剪切量。目前常用的横向剪切分束器有 Sagnac 型^[16]和双折射偏振干涉型^[17]等。Sagnac 分束器采用三角共光路结构,具有性能稳定、坚固耐用等优点;主要缺点是两束相干光中,一束经过分束面时是两次反射,另一束则是两次透射,因此分束膜的光强分束比直接影响着条纹的对比度。为了获得高精度的干涉图,必须对分束膜的分束比进行严格要求,而高精度的镀膜会大大增加仪器的制造成本。双折射偏振干涉型分束器利用光束的双折射现象进行分束。由于这种原理需引入起偏器、检偏器、特殊双折射晶体材料等,并且为了保证分束器的一致性,对双折射晶体的均匀性和波长响应以及主轴方向都有十分严格的要求,从而不仅提高了制作成本,而且使得制作更加复杂。上述两种横向剪切分束器系统一旦固定,其横向剪切量等参数便不能改变。为了实现剪切量连续可调,本系统采用可调式实体横向剪切分束器,由两个相同的直角棱镜和一个分光棱镜组成,如图 4 所示。直角棱镜的两个直角面镀制高反膜,分光棱镜的分束面镀制分束膜,它们的有效波段范围为 450~700 nm。图中虚线表示直角棱镜 1 关于分束面对称时的位置。当直角棱镜 2 沿着垂直于光轴方向平移一段距离 l_0 后,经它们反射回来到达分束面的两束相干光不再重合,而是沿着垂直于光轴方向产生了一定的距离,称这一距离为横向剪切量 d 。由几何关系可知,两束相干光在分束器内部不产生光程差,并且分束器对任意两束相干光产生同样大小的横向剪切量,与入射角无关。横向剪切量与平移量之间的关系可表示为

$$d = 2l_0. \quad (22)$$

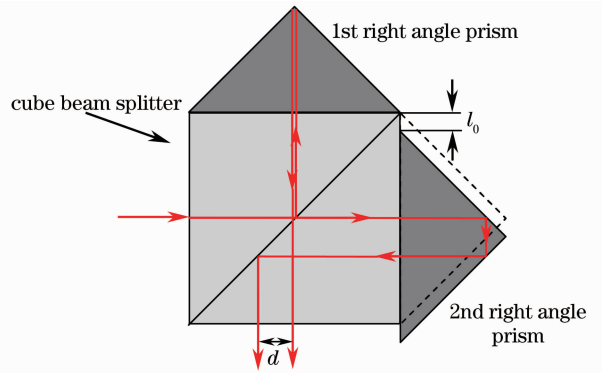


图 4 可调式实体横向剪切分束器

Fig. 4 Adjustable solid lateral shearing beam splitter

从图 4 可以看出,可调式实体横向剪切分束器的两束相干光中,每一束光在经过分束面时都是一次反射一次透射,所以干涉图的调制度不再受到分束膜反射率和透射率不一致的影响,从而大大降低了分束器的工艺难度和制作成本。进一步分析可知,横向剪切量的大小与直角棱镜 2 的偏移量有关,而与入射角度及入射点的位置没有关系。因而可以根据实际需要,调整直角棱镜 2 偏移量的大小,产生不同的横向剪切量,实现光谱分辨率的可调。

设分光棱镜的边长为 a ,则入射光束投影到横向剪切分束器上的口径 D ($D=20$ mm) 一定时,产生相同的横向剪切量 d ($d=2$ mm),可调式实体横向剪切分束器的分光棱镜的边长与实体 Sagnac 横向剪切分束器的直角边长随视场角 θ 变化的关系曲线如图 5 所示。

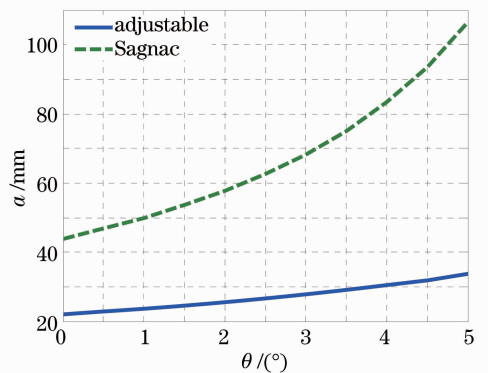


图 5 分光棱镜边长 a 随 θ 的变化曲线

Fig. 5 Length of the beam splitter a changing with θ

从图 5 可以看出,Sagnac 横向剪切分束器的直角边长随视场角的变化曲线的斜率随着视场角的增大而逐渐增大,也就是说,在大视场要求的横向剪切分束器中,视场角的增大将会引起 Sagnac 横向剪切分束器尺寸的快速增长。相对而言,可调式实体横向剪切分束器尺寸的增长则比较缓慢。此外,对于

一定的入射辐射通量,与 Sagnac 型相比,可调式实体横向剪切分束器的结构可以更加紧凑,从而使整个系统的尺寸大大缩小,易于实现仪器轻量化的目标。

2.4 推扫方式

根据可调分束角棱镜在光源以固定方向入射时,通过旋转镜体改变入射角从而得到较大的分束角获得大光程差的原理^[18],本文采用旋转横向剪切分束器改变入射角 θ 的方法获得较大的光程差,在与被测目标相对静止的情况下实现对目标的推扫成像。在这种情况下,探测器同一单元始终对应于目标同一物元,随着横向剪切分束器的旋转,获得完整干涉图。最终探测器所得到的被剪切开的两束光之间的 OPD 可表示为

$$D_{OP} = d\sin(\theta - \theta_0), \quad (23)$$

式中 θ_0 为初始位置时的视场角。显然这是用横向剪切分束器转过的角度来调制光程差。因此系统所能达到的最大光程差与横向剪切分束器转过的最大角度有关,不再受到探测器尺寸大小的限制。

虽然旋转横向剪切分束器使得准直光线入射点发生变化,但是横向剪切分束器剪切前后光束对光学系统光轴的倾角(视场角)不变,因此在推扫过程中,探测器上获得的目标像不变,只是零光程差的位置不同,同一物元不同光程差的干涉强度只由探测器同一单元接收,不是在探测器某一空间方向分布,干涉条纹随着横向剪切分束器的旋转而发生横向平移。若在此条件下连续采样获取目标在一定光程差范围内的干涉数据,适当处理即可获得光谱信息。另外,在提取某点的用于光谱复原的干涉信息的环节中,只需提取每幅图像中该点对应的像素数值即可,不需要图像配准,简化了光谱复原过程。

3 高光谱显微成像实验与结果

3.1 实验装置

为了验证基于像面干涉的高光谱显微成像系统的可行性,按照上述的二次成像系统模型,搭建了实验装置对生物组织切片进行显微成像实验,装置示意图如图 6 所示。准直镜和成像镜都采用焦距为 75 mm 的镜头,这样探测器上所成的像和显微物镜所成的一次像大小相同。当显微物镜采用 10 倍有限远共轭物镜时,整个系统的放大倍数为 10,空间分辨率为 $1.49 \mu\text{m}$,景深为 $2.98 \mu\text{m}$,满足实验要求。

横向剪切分束器固定在电控转台上,由电机控制旋转,实现对目标的推扫成像。

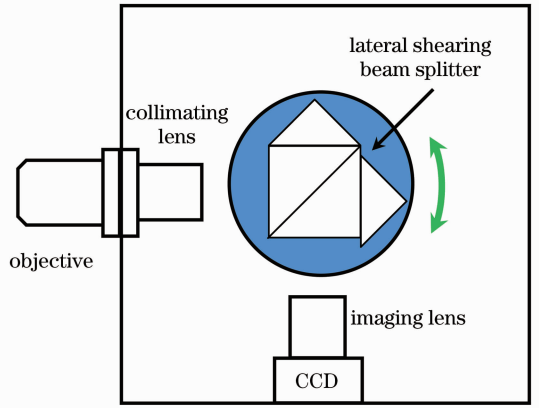


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental device

3.2 实验图像与结果

采用搭建的实验装置对蚕豆叶表皮切片进行显微成像实验。实验中采用 LED 环形灯进行透射式照明。通过推扫共获得 830 幅干涉图像,图 7 为其中的 4 幅不同时刻采集的干涉图像。从图中可以看出,图像纹理清晰,干涉条纹具有很好的对比度。

从采集的干涉图序列中提取某物点在不同光程差下的干涉信息,再重新组合后得到该物点的干涉曲线图像,如图 8(a)所示。对重新组合后的干涉曲线进行去趋势项处理和相位校正处理后,再利用傅里叶变换计算即可得到该物点的光谱信息^[19-20]。图 8(b)所示为经过光谱复原处理后得到的目标光谱信息。实验中复原出 463.3~616.6 nm 谱段范围内共 26 幅光谱图像,在 $\lambda = 463.3 \text{ nm}$ 时,光谱分辨率为 4.17 nm;在 $\lambda = 616.6 \text{ nm}$ 时,光谱分辨率为 7.39 nm。在整个谱段范围内,平均光谱分辨率为 5.89 nm,优于 10 nm。图 9 为 4 幅不同波长处的重构光谱图像。

初步实验结果表明,基于像面干涉的高光谱显微成像能够对生物样本切片进行显微高光谱成像,为显微光谱成像技术提供了一种新的技术方案。由于初步搭建的实验系统的空间分辨率和光谱范围的限制,所获得的高光谱显微图像不论是从图像上还是从光谱上都只能进行比较粗略的分析。如果要达到真正的实践应用,还有待进一步研究。

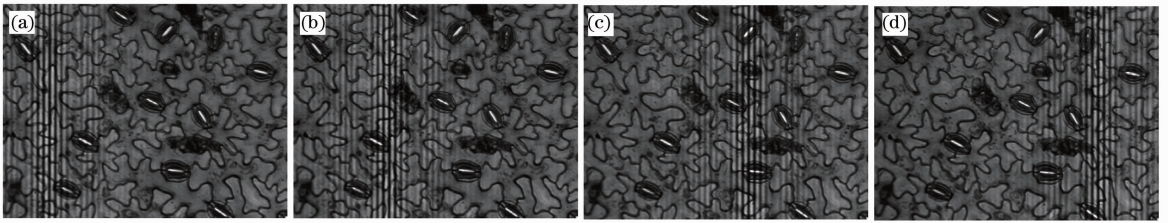


图 7 干涉图序列

Fig. 7 Sequence of interferograms

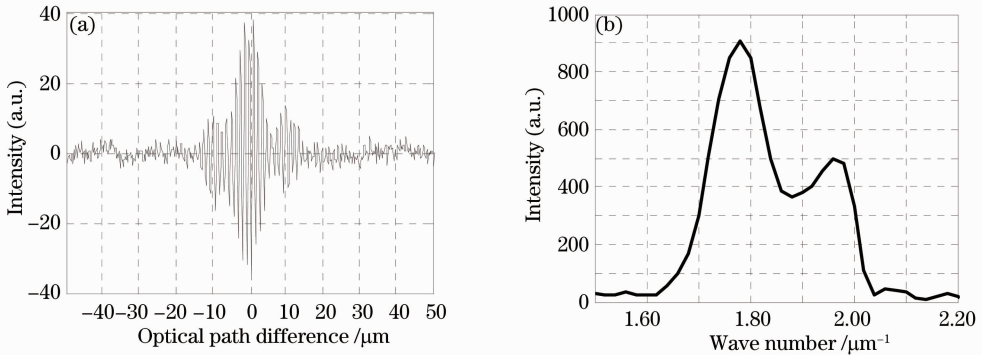


图 8 (a)干涉图；(b)光谱图

Fig. 8 (a) Interferogram; (b) spectrogram

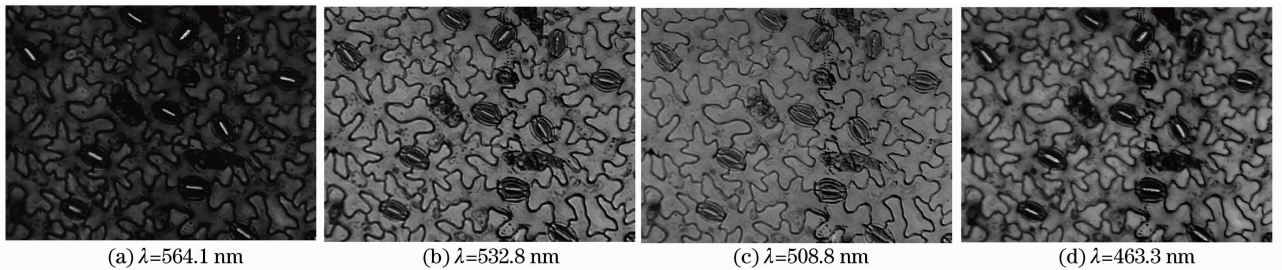


图 9 不同波长处的重构光谱图像

Fig. 9 Reconstructed spectral images at various wavelengths

4 结 论

根据遥感中推扫式成像光谱仪的工作原理,提出了一种基于像面干涉的高光谱显微成像方法。整个系统由显微物镜、准直镜、横向剪切分束器、成像镜和 CCD 等组成。在分析成像原理的基础上,推导了系统的放大率、空间分辨率、光谱分辨率以及景深的表达式。采用可调式实体横向剪切分束器的结构,具有辐射通量高、结构简单紧凑、制作成本低等优点,适宜作为高光谱显微成像仪的高效横向剪切分束器。为了获得目标上某点全部的干涉信号,通过旋转横向剪切分束器实现推扫成像,系统所能达到的最大光程差与横向剪切分束器转过的最大角度有关,不再受到探测器尺寸大小的限制。为了验证系统原理的可行性,搭建了实验装置并对蚕豆叶表皮切片进行了显微光谱成像实验,获得了有意义的

实验结果。基于像面干涉的高光谱显微成像技术作为一种新的技术手段,在生物医学、材料学以及法医病理学等领域具有重要应用价值。

参 考 文 献

- 1 E Schrock, S du Manoir, T Veldman, *et al.*. Multicolor spectral karyotyping of human chromosomes [J]. *Science*, 1996, 273 (5274): 494-497.
- 2 Y Garini, M Macville, S du Manoir, *et al.*. Spectral karyotyping [J]. *Bioimaging*, 1996, 4(2): 65-72.
- 3 D Cabib, R A Buckwald, Y Garini, *et al.*. Spatially resolved Fourier transform spectroscopy (spectral imaging): a powerful tool for quantitative analytical microscopy [C]. *SPIE*, 1996, 2678: 278-291.
- 4 L H Michael, A S Roger, R G Harold. Characteristics and capabilities of the hyperspectral imaging microscope [J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 2002, 21(4): 104-117.
- 5 T Vo-dinh, D L Stokes, M B Wabuyele, *et al.*. A hyperspectral imaging system for *in vivo* optical diagnostics [J]. *IEEE*

- Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2004, 23(5): 40–49.
- 6 M L Richard, J C Paul, R H Neal. Spectral imaging and biomedicine: new devices, new approaches [C]. Proceedings of the 31st Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2002. 105–111.
- 7 Xiao Gonghai, Shu Rong, Xue Yongqi. Design of microscopic hyperspectral imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(4): 367–372.
肖功海, 舒嵘, 薛永琪. 显微高光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 367–372.
- 8 M E Gehm, M S Kim, C Fernandez, *et al.*. High-throughput, multiplexed pushbroom hyperspectral microscopy [J]. Opt Express, 2008, 16(15): 11032–11043.
- 9 W R Johnson, D W Wilson, W Fink, *et al.*. Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology [J]. J Biomed Opt, 2007, 12(1): 014036.
- 10 R F Horton. Optical design for a high etendue imaging Fourier transform spectrometer [C]. SPIE, 1996, 2819: 300–314.
- 11 R F Horton, C C Conger, L S Pellegrino. High etendue imaging Fourier transform spectrometer: initial results [C]. SPIE, 1997, 3118: 380–390.
- 12 Li Jianxin, Meng Xin, Zhou Wei, *et al.*. Image plane interferometric hyperspectral imaging based on re-imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1230001.
李建欣, 孟鑫, 周伟, 等. 基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1230001.
- 13 Meng Xin, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.*. Near-field mechanism research on hyperspectral imaging plane interferometric imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0230001.
孟鑫, 李建欣, 朱日宏, 等. 高光谱像面干涉的近场成像机理研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0230001.
- 14 R G Sellar, G D Boreman. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometer [J]. Appl Opt, 2005, 44(9): 1614–1624.
- 15 Peng Zhihong, Zhang Chunmin. Influence of depth of field on resolution of a microscope polarization interference imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 239–243.
彭志红, 张淳民. 显微偏振干涉成像光谱仪中景深对系统分辨率的影响[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 239–243.
- 16 Zhou Zhiliang, Fu Qiang, Xiang Libin. Calculation of geometric parameters of Sagnac interferometers [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 689–693.
周志良, 付强, 相里斌. Sagnac干涉仪的几何参量计算[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 689–693.
- 17 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiang Libin, *et al.*. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(2): 192–197.
张淳民, 赵葆常, 相里斌, 等. 偏振干涉成像光谱仪通量的分析与计算[J]. 光学学报, 2001, 21(2): 192–197.
- 18 Guo Zhuanyun, Wang Yongjing, Zhang Tiequn. A novel adjustable cross angle beam splitter [J]. Optical Instruments, 1995, 17(6): 27–30.
郭转运, 王勇竞, 张铁群. 一种新型分束元件——可调交角分束棱镜[J]. 光学仪器, 1995, 17(6): 27–30.
- 19 Li Suning, Zhu Rihong, Li Jianxin, *et al.*. Method of reconstruction on Fourier-transform spectroscopy [J]. J Applied Optics, 2009, 30(2): 268–272.
李苏宁, 朱日宏, 李建欣, 等. 傅里叶干涉成像光谱技术中的重构方法[J]. 应用光学, 2009, 30(2): 268–272.
- 20 Li Suning, Zhu Rihong, Gao Zhishan, *et al.*. Fourier conjugate correction spectral reconstruction for Fourier-transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412010.
李苏宁, 朱日宏, 高志山, 等. 共轭傅里叶变换校正成像光谱重构[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412010.

栏目编辑: 史敏