

计算傅里叶显微成像研究进展

钟金钢^{1*}, 姚曼虹², 彭军政¹

¹暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632;

²广东技术师范大学光电工程学院, 广东 广州 510665

摘要 随着微纳光电子学的兴起, 傅里叶显微术已成为一种表征微纳结构样品的重要技术。传统的傅里叶显微术又称为后焦面傅里叶谱显微术, 只能获取傅里叶谱分布信息, 无法获取和傅里叶谱对应的样品空间结构图像, 给表征微纳结构样品带来不便。由此, 发展了一种基于计算成像模式的计算傅里叶显微成像技术, 不仅能获取傅里叶谱分布信息, 还能获得一系列与不同傅里叶谱对应的样品空间结构图像, 甚至可以获取样品的三维空间结构图像, 有利于对样品的全面表征, 进一步拓宽傅里叶显微术的应用范围。本文将介绍计算傅里叶显微成像技术的基本概念、原理、研究进展、应用前景。

关键词 成像系统; 傅里叶显微术; 计算成像; 单像素成像; 多模式成像; 光场成像

中图分类号 O438.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811009

Progress in Computational Fourier Microscopy

Zhong Jingang^{1*}, Yao Manhong², Peng Junzheng¹

¹Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;

²School of Optoelectronic Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510665, China

Abstract With the rise of micro-/nano-photonics, Fourier microscopy has become an important technique for characterizing micro-/nano-structured samples. However, traditional Fourier microscopy, also known as back-focal plane Fourier microscopy, can only obtain Fourier spectral distribution information, but not the spatial structure of the sample corresponding to the Fourier spectrum, which is inconvenience for characterizing of micro-/nano-structured samples. Thus, we have developed a computational Fourier microscopy based on computational imaging mode. It can not only obtain the Fourier spectrum distribution information, but also obtain a series of spatial structure images corresponding to different Fourier spectra and three-dimensional spatial structure image of the sample, which is beneficial to characterize the sample comprehensively and broaden the application range of Fourier microscopy. This paper will introduce the basic concepts, principles, research progress, and application prospects of computational Fourier microscopy.

Key words imaging systems; Fourier microscopy; computational imaging; single-pixel imaging; multimode imaging; light-field imaging

OCIS codes 110.0180; 110.1758; 180.6900

1 引言

光学成像可以利用不同的光波参数表征样品的

不同物理量的空间分布。和振幅、波长、偏振、相位一样, 波矢也是光波的重要参数。光波与物质相互作用后, 其波矢的改变和物质的三维结构有关, 因此

收稿日期: 2021-06-23; 修回日期: 2021-08-10; 录用日期: 2021-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61875074)、广东省基础与应用基础研究项目(2019A1515011151, 2020A1515110392)、暨南大学科研创新与培育项目(21620443)、广东技术师范大学校级科研项目(2021SDKYA049)

通信作者: *tjzg@jnu.edu.cn

光波的波矢信息可以用来表征样品的空间特征结构。傅里叶显微术^[1-2],又称为后焦面傅里叶显微术^[3-4],其将面阵探测器放在物镜的后焦面记录样品光波的傅里叶谱图像,记录的傅里叶谱图像包含了光波的波矢信息。近年来,随着现代微纳加工技术的逐渐成熟和微纳光子学的兴起,各种性能优异的微纳结构器件(如超表面结构器件、光子晶体、表面等离子体器件等)不断涌现。傅里叶显微术已成为一种表征微纳结构样品的重要技术,利用傅里叶显微术表征微纳结构样品的空间特征结构已有许多的应用^[3-15],例如:研究玻璃和金属涂层表面附近的荧光发射模式^[3]、光子晶体的光子禁带快速测量^[4]、表征单层材料中单个分子取向^[7]、研究石墨烯的拉曼辐射角分布^[8]、量化单个等离子体和超材料纳米散射体散射光的角分布^[9]、研究纳米线光学天线量子发射器的多极辐射^[11]等。图 1 为一种典型的传统傅里叶显微镜示意图,由于物镜的后焦面非常靠近其外壳,需要利用延迟透镜组将物镜后焦面成像到面阵探测器的传感面上。在此基础上,还发展出了多种稍微复杂的变形装置^[1]。

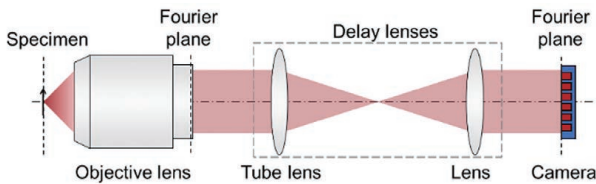


图 1 传统傅里叶显微镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a conventional Fourier microscope

传统的傅里叶显微术只能获取来自样品光波的傅里叶谱分布图,并不能直接在傅里叶面获取样品的空间结构图像。尽管将传统光学显微术和后焦面傅里叶谱探测技术进行组合,形成组合式显微成像系统^[2],可以同时获得反映样品空间特征的图像和傅里叶谱图像,但无法通过它们建立傅里叶谱与样品的特定空间结构之间的对应关系。因此,利用传统的傅里叶显微术表征微纳结构样品的空间特征结构存在许多局限,发展表征这些具有光波长尺度周期结构的微纳结构样品的新光学成像方法就显得非常迫切。

近年来,计算成像^[16-23]技术发展迅速,有别于传统直接成像的方式,该技术通过调制照明、光学系统或探测等方式,以突破传统直接成像的局限^[24-26],进一步利用成像系统的特点与性能获取传统直接成像无法获取的信息。为了克服传统的傅里叶显微术存

在的一些局限,基于计算成像模式的计算傅里叶显微成像技术^[27]被提出。该技术利用结构光照明样品,利用单像素成像^[28-32]原理计算重建样品图像,不仅能记录样品光波的傅里叶谱图像,还可以获取一系列与不同傅里叶谱对应的样品空间结构图像,甚至可以获得样品的三维空间结构图像。计算傅里叶显微成像技术可以实现在样品光波的傅里叶谱与样品空间结构图像之间建立一一对应的关系,这种对应关系有助于对微纳光子学样品进行更全面的表征,促进发展出表征微纳结构样品的新光学成像方法。本文将介绍计算傅里叶显微成像的基本概念、原理、研究进展、应用前景。

2 计算傅里叶显微镜的成像原理与成像系统

为了获取不同的傅里叶谱点对应的样品空间结构图像,计算傅里叶显微镜与如图 1 所示的传统傅里叶显微镜不同的是,采用时变结构光照明样品,面阵探测器的每个像素点(或多个像素点编码捆绑成一个宏像素点)作为一个单像素探测器,再根据单像素成像原理和单像素探测器记录到的一组一维(1D)时变谱信号,通过计算来重建样品的空间结构图像。由于每个单像素探测器记录到的傅里叶谱不同,通过每个单像素探测器重建的样品空间结构图像也各不同。

图 2 是一个透射式计算傅里叶显微镜的成像系统^[27],该成像系统通过数字微镜阵列器件(DMD)和 LED 光源产生的一组时变结构光照明样品。LED 光源发出的光束经准直透镜 CL、反射镜 RM 后照明数字微镜阵列 DMD。DMD 置于管镜 TL 的焦平面,经 TL 和照明物镜 O_i 成像到 O_i 的后焦面。样品放置在照明物镜 O_i 的后焦面(探测物镜 O_d 的前焦面)。二维面阵探测器放置在探测物镜的后焦面记录样品光波的傅里叶谱图像。LED 光源可以看成由很多点光源构成的扩展光源,不同点光源发出的光波是空间非相干的。根据阿贝相干成像理论,从 LED 每个点光源发出的光波经过数字微镜后,再经数字微镜衍射,在管镜的后焦面产生不同级次的衍射光,这些衍射光经过照明物镜 O_i 后在样品所在的平面干涉生成结构光图案。结构光照明样品后,会被样品进一步衍射,并且在探测物镜的后焦面相干叠加,形成傅里叶谱图像。

如图 2(a)和(b)所示, S_1 和 S_2 分别表示 LED 光源上的轴上点和轴外点, A 、 B 、 C 、 D 和 E 分别表

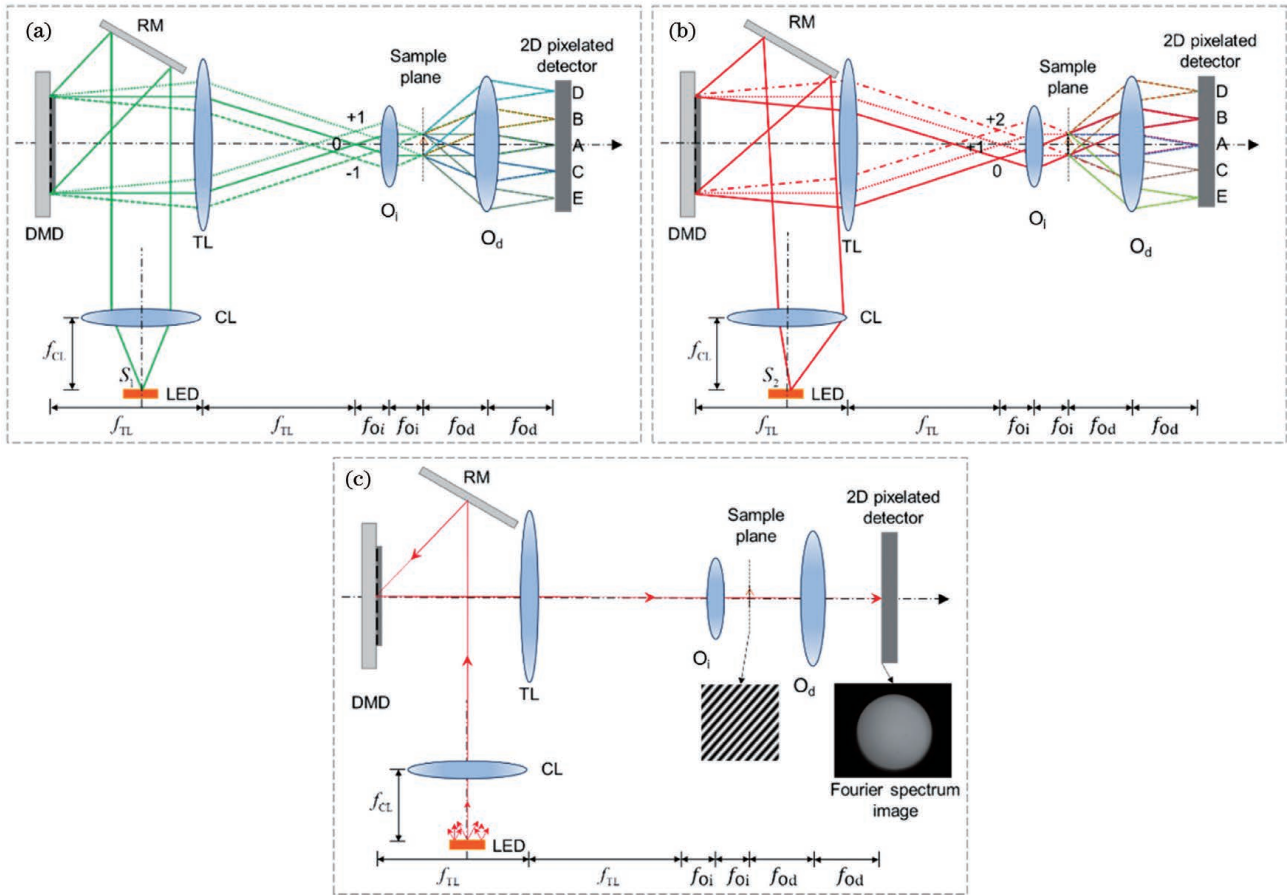


图 2 透射式计算傅里叶显微镜的成像光路示意图^[27]。(a)光线从轴上点发出;(b)光线从轴外点发出;(c)光线同时从 LED 所有点光源发出

Fig. 2 Light-path diagram of a transmission computational Fourier microscope^[27]. (a) Light wave is emitted from on-axis point; (b) light wave is emitted from off-axis point; (c) light waves are simultaneously emitted from all point sources on the LED

示二维面阵探测器上不同的五个像素点。当光波分别单独从 S_1 和 S_2 发出时,零级衍射谱分别出现在 A 点和 B 点。当 LED 光源上所有的点光源发出光波时,如图 2(c) 所示,二维面阵探测器会记录到一幅圆形亮斑状的傅里叶谱图像,它是由 LED 上不同点光源发出的光波衍射后非相干叠加形成的。

照明样品的结构光一般采用随机分布图案结构光和正交变换基底图案结构光两类^[31],不同的结构光照明时,单像素成像图像重建算法也不相同。正交变换基底有傅里叶变换基底、哈达玛变换基底、离散余弦变换基底、小波变换基底等,下面以傅里叶正交变换基底图案结构光照明样品的傅里叶单像素成像技术^[28]为例,进一步说明如何利用面阵探测器的每个像素点重建得到样品的一幅空间结构图像。傅里叶单像素成像技术是以图像的傅里叶变换为基础。根据傅里叶变换原理,二维图像信号可以分解成许多不同频率的余弦条纹图乘以不同的权值,每

个权值系数表示图像的一个二维傅里叶谱系数。二维傅里叶谱系数可利用一组四步相移傅里叶基底图案结构光分别照明样品后获得^[28]。四步相移傅里叶基底图案结构光可表示为

$$P_i(x, y, f_x, f_y) = a + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi_i), \quad (1)$$

式中: a 为平均强度; b 为对比度; (x, y) 是样品所在平面的空间直角坐标; (f_x, f_y) 是空间频率坐标; $\phi_i = \frac{2\pi}{4} \times i$ 是相移量, $i = 0, 1, 2, 3$ 表示相移序号。

将这组相移傅里叶基底图案结构光照明到样品后,单像素探测器探测到对应的光响应值可表示为 $D_i(f_x, f_y) = \iint S(x, y) P_i(x, y, f_x, f_y) dx dy$, (2) 式中: $S(x, y)$ 是样品的空间结构分布函数。傅里叶系数 $C(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{S(x, y)\}$ 可以通过下式计算得到。

$$C(f_x, f_y) = \frac{1}{2b} \left\{ [D_0(f_x, f_y) - D_2(f_x, f_y)] + j[D_1(f_x, f_y) - D_3(f_x, f_y)] \right\}, \quad (3)$$

式中: $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换; j 表示虚数单位。

将这些傅里叶系数 $C(f_x, f_y)$ 进行傅里叶逆变换 $\mathcal{F}^{-1}\{C(f_x, f_y)\}$, 即可获得样品的空间结构图像 $S(x, y)$, 其中, $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 表示傅里叶逆变换。

3 计算傅里叶显微镜实现多模式显微成像

基于单像素成像原理, 计算傅里叶显微镜的面阵探测器每个像素点可以作为一个单像素探测器重建样品一幅空间结构图像。同时, 将面阵探测器的不同像素点编码捆绑, 可以构建不同形状的单像素探测器, 不同形状的单像素探测器将探测得到不同的傅里叶谱, 那么利用单像素成像方法, 可以重建多种模式的样品空间结构图像, 每种模式的图像和单像素探测器探测得到的傅里叶谱相对应。下面以重建获取明场、暗场和差分相衬(DPC)等模式显微图像为例, 说明如何实现多模式显微成像。

3.1 明场、暗场和差分相衬显微成像方法

通过编码设计单像素探测器的形状, 可以重建同时获得明场、暗场和差分相衬等模式显微图像, 具体方法步骤如下:

1) 利用 DMD 和 LED 光源产生一组时变的结构光照明样品, 同时通过面阵探测器在探测器物镜的后焦面记录一组时变傅里叶谱图像, 记为 $A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_L$, 其中 $k=1, 2, \dots, L$ 是正整数, 表示结构光的序号。假设面阵探测器所记录的每幅傅里叶谱图像的大小 $M \times N$, 其中 M 和 N 表示面阵探测器水平方向和竖直方向的像素数。

2) 定义一个大小为 $M \times N$ 数字掩模矩阵 \mathbf{B} 。数字掩模矩阵 \mathbf{B} 由 0 和 1 组成, 其中 1 表示抽取这个像素点记录的傅里叶谱, 0 表示不会抽取这个像素点记录的傅里叶谱。利用掩模 \mathbf{B} , 可以编码面阵探测器记录的所有傅里叶谱图像, 获得一组编码的傅里叶谱图像, 记为 $E_1, E_2, \dots, E_k, \dots, E_L$ 。假设第 k 幅傅里叶谱图像 \mathbf{A}_k 的矩阵元素记为 $a_{k,mn}$, 数字掩模 \mathbf{B} 的矩阵元素记为 b_{mn} , 第 k 幅编码的傅里叶谱图像的矩阵元素记为 $e_{k,mn}$, 其中 $m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N$ 表示矩阵元素的编号。因此, 第 k 幅编码傅里叶谱图像的矩阵元素 $e_{k,mn} = a_{k,mn} b_{mn}$ 。

3) 将编码傅里叶谱图像的所有矩阵元素累加

求和, 可以获得 L 个傅里叶谱积分值 $I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_L$, 其中 $I_k = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e_{k,mn}$, 它等效于使用编码单像素探测器在第 k 幅结构光照明样品后记录的光强值。这里, 由于每个编码单像素探测器记录的傅里叶谱是计算探测获得的, 我们称这种方法为计算探测。

4) 根据计算探测到的傅里叶谱积分值, 利用单像素成像算法, 重建样品的空间结构图像。如果定义的数字掩模矩阵 \mathbf{B} 是一个圆形(圆心在图像中心), 圆内矩阵元的值为 1, 圆外矩阵元的值为 0, 那么重建得到的是一个明场显微图像。如果定义的数字掩模矩阵是一个环形, 环的外径小于面阵探测器记录到的傅里叶谱图像亮斑[图 2(c)]直径, 那么重建得到的是一个类似传统显微镜斜照明的明场显微图像; 当环的内径大于面阵探测器记录的傅里叶谱图像的亮斑直径, 那么重建得到的就是暗场显微图像。如果定义两个半圆形或半环形数字掩模, 且它们关于傅里叶谱图像的中心对称, 重复步骤 3 和 4, 可以重建两幅样品的图像 G_{cs1} 和 G_{cs2} 。最后利用

公式 $G_{cs12} = \frac{G_{cs1} - G_{cs2}}{G_{cs1} + G_{cs1}}$, 可以得到差分相衬显微图像 G_{cs12} 。

5) 如果连续改变数字掩模的大小, 然后重复步骤 2~4, 可以连续地改变编码单像素探测器, 从而计算探测得到不同的傅里叶谱。根据这些计算探测的傅里叶谱, 可以重建得到一组连续变化的明场、暗场和差分相衬图像, 利用这些连续变化的图像, 可以实现对静态样品的动态观察, 有助于对样品更全面深入观察、分析。

3.2 明场显微成像实验结果

图 3 给出了透射式计算傅里叶显微镜的实验装置示意图, 相机作为面阵探测器。为了采集样品光波的傅里叶谱图像, 在探测物镜和面阵相机之间加入了二个延迟透镜, 将物镜后焦面成像到相机传感面。被测样品为一洋葱切片, 图 4(a) 给出了面阵探测器记录的一幅傅里叶谱图像。为了重建明场图像, 利用一个圆形数字掩模[图 4(b1)]构建一个圆形单像素探测。利用圆形单像素探测器, 可以计算探测得到如图 4(c1) 所示的傅里叶谱; 根据计算探测得到的傅里叶谱, 通过单像素成像算法, 可以重建得到明场图像, 如图 4(d1) 所示。改变圆形数字掩模的尺寸, 可以构建不同尺寸的圆形单像素探测器。通过这些不同尺寸的圆形单像素探测器, 可以计算

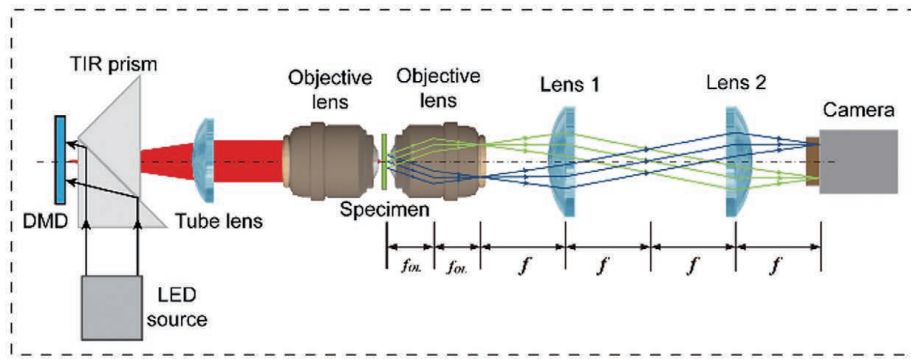


图 3 透射式计算傅里叶显微镜的实验装置示意图^[27]

Fig. 3 Experimental setup diagram of transmission computational Fourier microscope^[27]

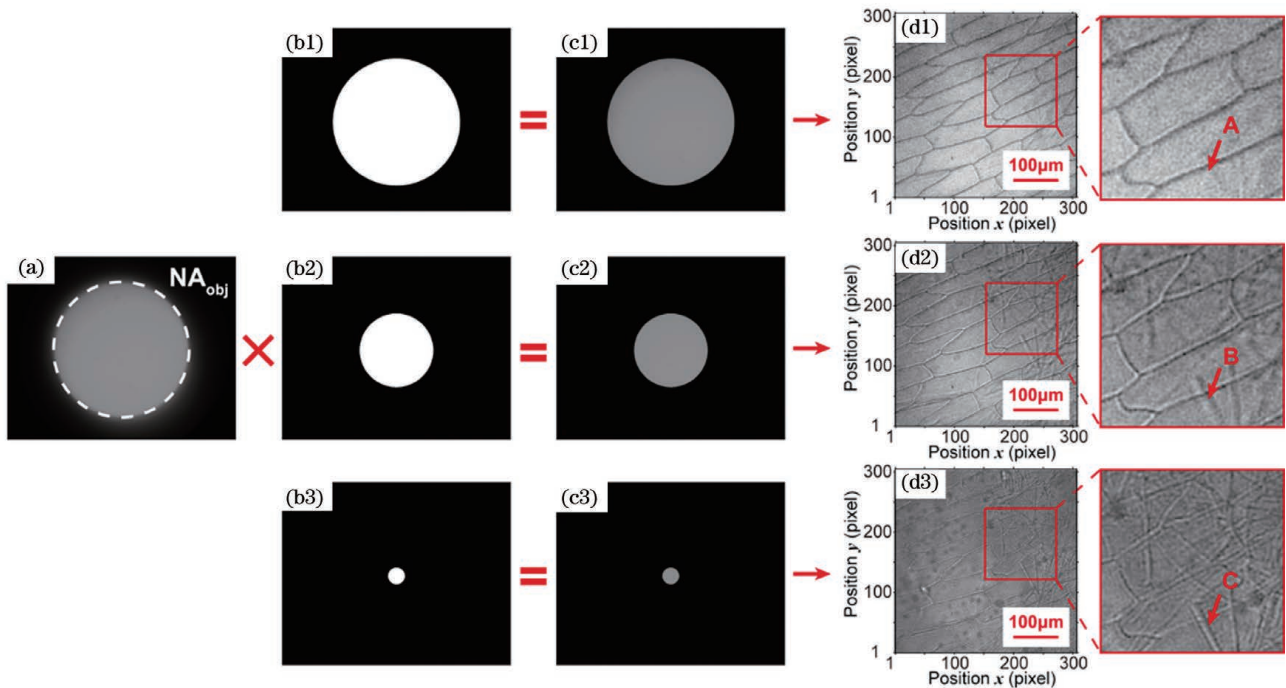


图 4 洋葱表皮细胞明场显微成像结果^[27]。(a) 相机拍摄到的傅里叶谱图像；(b1)~(b3) 不同半径的圆形数字掩模；(c1)~(c3) 计算探测的圆形傅里叶谱；(d1)~(d3) 根据计算探测的圆形傅里叶谱重建的明场图像

Fig. 4 Brightfield microscopic imaging results of onion epidermal cells^[27]. (a) Fourier spectrum image captured by the camera; (b1)–(b3) circular digital masks with different radii; (c1)–(c3) computationally detected circular Fourier spectra; (d1)–(d3) reconstructed brightfield images using computationally detected circular Fourier spectra

探测得到不同的傅里叶谱。根据这些计算探测的傅里叶谱,采用单像素成像算法,可以重建得到不同景深的明场图像,如图 4(d1)~(d4)所示。与传统的显微镜比较,计算傅里叶显微成像技术获取不同景深的明场图像不需要调节孔径光阑的大小。特别地,不同景深的明场图像和物体的傅里叶谱存在一一对应的关系,这种关系有助于对样品的结构进行定量分析。

3.3 暗场显微成像实验结果

通过设计环形数字掩模,环的内径稍大于面阵探测器记录的傅里叶谱图像的亮斑直径,如图 5(b1)

所示,构建环形单像素探测器。利用这些环形单像素探测器,可以计算探测得到样品的环形傅里叶谱,如图 5(c1)所示。根据计算探测得到的环形傅里叶谱,采用单像素成像算法,可以重建样品的暗场图像,如图 5(d1)所示。进一步地,通过数字化地改变环形单像素探测器的尺寸,采用相同的方法,可以数字化地调节暗场图像地景深,如图 5(d1)~(d4)所示。与明场结果比较,暗场结果能够提高洋葱细胞壁在重建图像中的对比度。与传统的显微镜比较,利用计算傅里叶显微镜,无需更换不同的光学元件,只需设计不同半径的圆环数字掩模构建不同的圆环

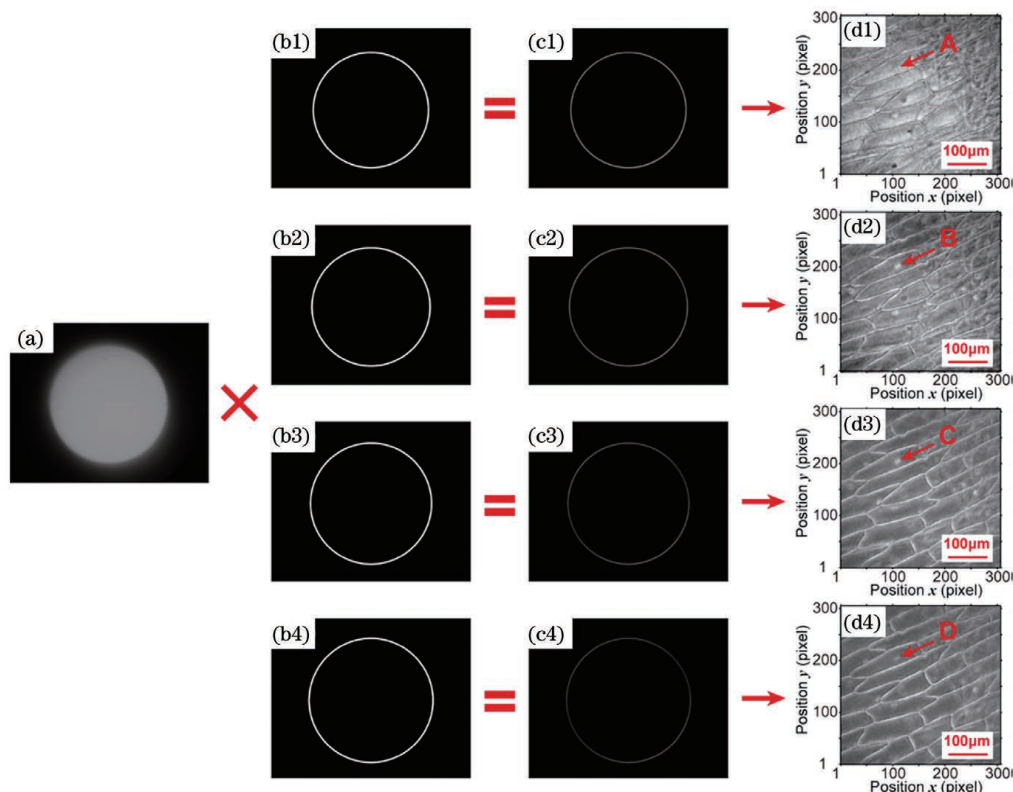


图 5 洋葱表皮细胞暗场显微成像结果^[27]。(a)相机拍摄到的傅里叶谱图像;(b1)~(b4)不同半径的形数字掩模;(c1)~(c4)计算探测到的环形傅里叶谱;(d1)~(d4)根据计算探测到的环形傅里叶谱重建的暗场图像

Fig. 5 Darkfield microscopic imaging results of onion epidermal cells^[27]. (a) Fourier spectrum image captured by the camera; (b1)~(b4) annular digital masks with different radii; (c1)~(c4) computationally detected annular Fourier spectra; (d1)~(d4) reconstructed darkfield images using computationally detected annular Fourier spectra

单像素探测器,可以重建不同景深的暗场显微图像。此外,不同景深的暗场图像和物体的傅里叶谱存在一一对应的关系,这种关系有助于对样品的轮廓和边缘进行定量分析。

3.4 差分相衬显微成像实验结果

如果设计两个半圆形的数字掩模,如图 6(b1)和(b2)所示,可以构建两个半圆形的单像素探测器,利用半圆形的单像素探测器,可以计算探测得到半圆形的傅里叶谱,如图 6(c1)和(c2)所示。根据计算探测得到的半圆形傅里叶谱,采用 3.1 节所述的方法,可以重建样品的差分相衬图像,如图 6(d1)所示。与明场结果比较,差分相衬图像能够增强样品的边缘和细节在重建图像中的对比度。此外,通过改变半圆形数字掩模的方向,如图 6(b3)~(b8),采用相同的方法,可以重建样品不同角度的差分相衬图像,如图 6(d2)~(d4)所示。从这些结果中可以发现,样品不同角度的特征在图像中的对比度会随着数字掩模的方向的变化而变化。也就是说,无需更换光学元件,可以变化地重建样品上感兴趣信息的图像。更重要的是,不同角度的差分相衬图像和物体的

傅里叶谱存在一一对应的关系,这种关系有助于对样品的边缘细节进行定量分析。

进一步地,通过改变半圆形数字掩模的尺寸,采用相同的方法,可以改变差分相衬图像的对比度和景深,如图 7 所示。

除了设计半圆形掩模实现差分相衬成像,还可以设计半环形的数字掩模,构建半环形的单像素探测器。利用半环形的单像素探测器,计算探测得到半环形的傅里叶谱。根据计算探测得到的半环形傅里叶谱,采用单像素成像算法,也可以重建差分相衬图像。如图 8 所示,从图中箭头可知,样品不同特征在差分相衬图像中的对比度会随着差分角度的变化而变化。因此,可以通过设计不同的单像素探测器,计算探测感兴趣的特征对应的傅里叶谱,使得感兴趣的特征在差分相衬图像中的对比度最大,抑制不感兴趣的特征,有助于对样品进行定量分析。

进一步地,通过改变半环形数字掩模的尺寸,采用相同的方法,可以重建不同景深和对比度的差分相衬图像,如图 9 所示。与半圆形差分相衬结果比较,环形差分相衬结果具有更高的图像对比度。

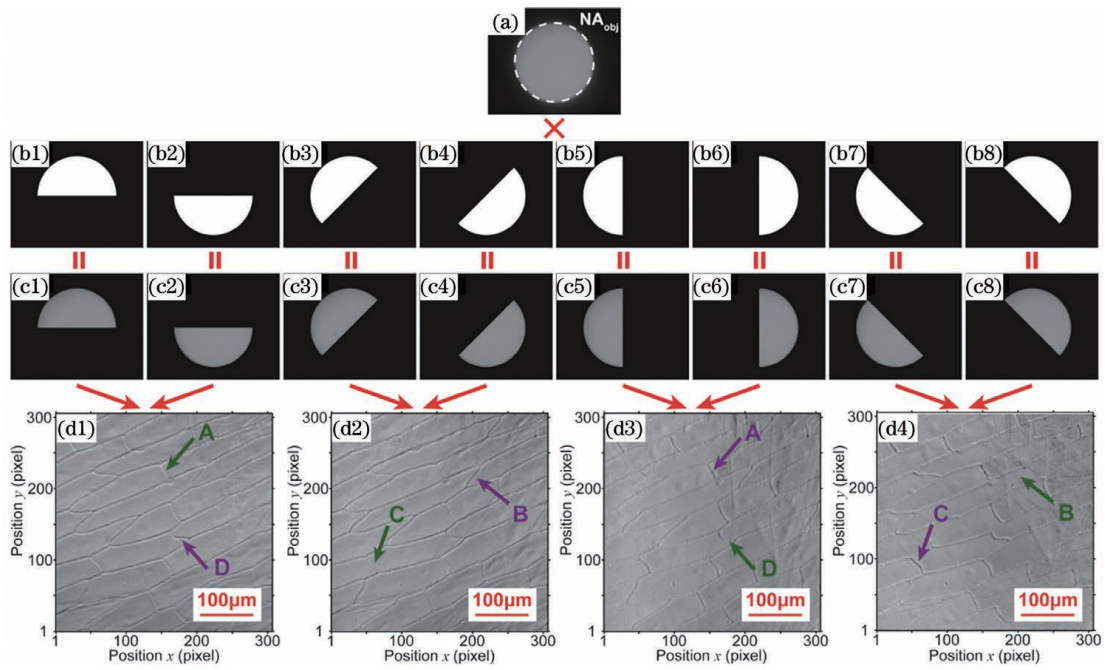


图 6 洋葱表皮细胞不同角度的半圆形差分相衬成像结果^[27]。(a)相机拍摄的傅里叶谱图像;(b1)~(b8)不同角度的半圆数字掩模;(c1)~(c8)计算探测到的半圆形傅里叶谱;(d1)~(d4)利用计算探测到的半圆形傅里叶谱重建的差分相衬图像

Fig. 6 Semicircular DPC imaging results of onion epidermal cells from different orientations^[27]. (a) Fourier spectrum image captured by the camera; (b1)–(b8) semicircular digital masks with different orientations; (c1)–(c8) computationally detected semicircular Fourier spectra; (d1)–(d4) reconstructed DPC images using computationally detected semicircular Fourier spectra

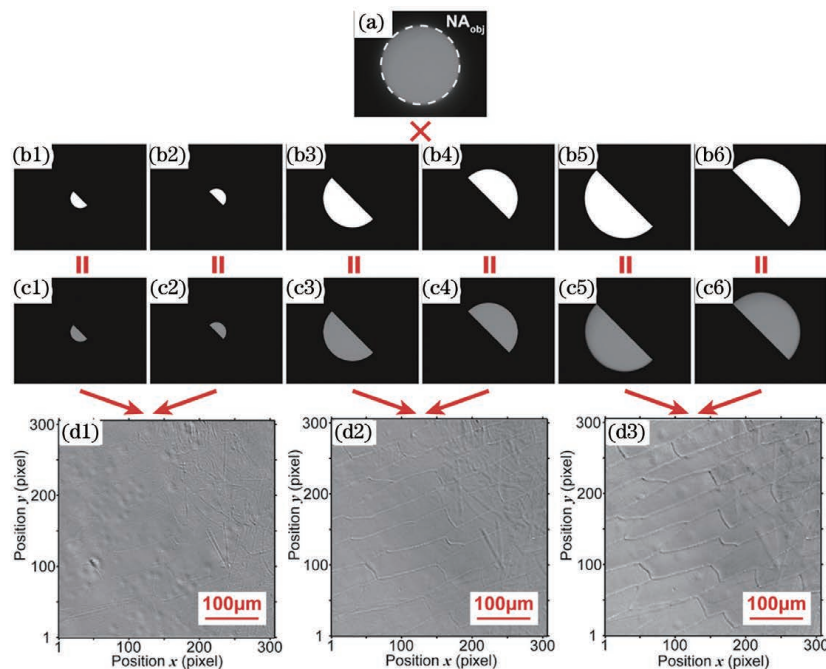


图 7 洋葱表皮细胞不同半径的半圆差分相衬显微成像结果^[27]。(a)相机拍摄傅里叶谱图像;(b1)~(b6)不同半径的半圆数字掩模;(c1)~(c6)计算探测的半圆形傅里叶谱;(d1)~(d3)根据计算探测到的半圆形傅里叶谱重建的差分相衬图像

Fig. 7 Semicircular DPC imaging results of onion epidermal cells from different radii^[27]. (a) Fourier spectrum image captured by the camera; (b1)–(b6) semicircular digital masks with different radii; (c1)–(c6) computationally detected semicircular Fourier spectra; (d1)–(d3) reconstructed DPC images using computationally detected semicircular Fourier spectra

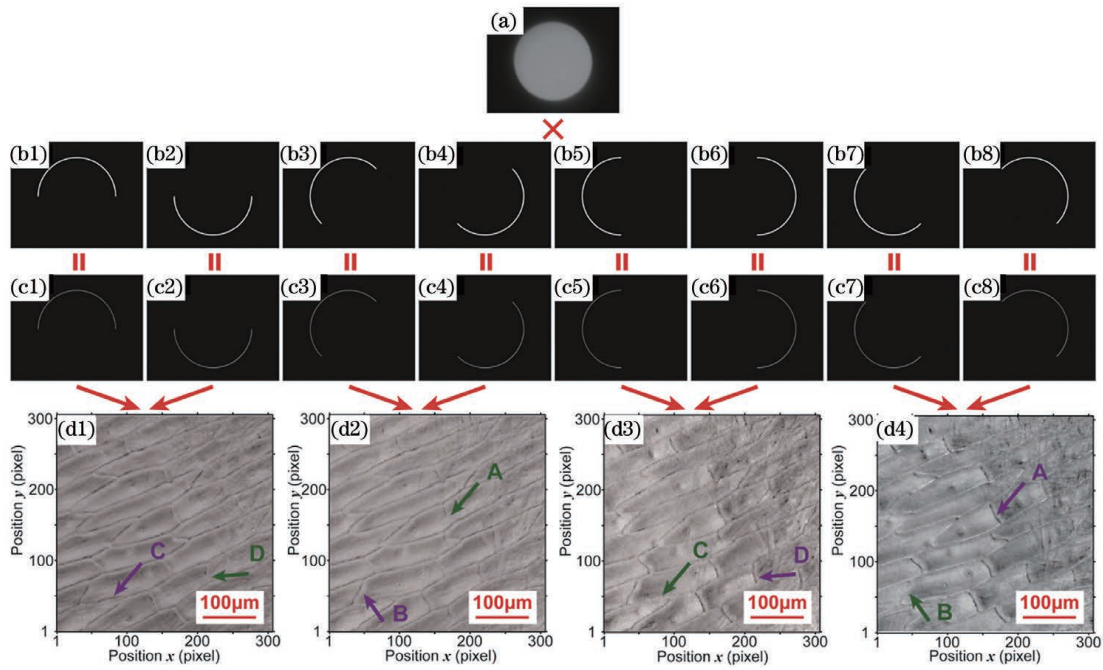


图 8 洋葱表皮细胞不同角度的半环形差分相衬显微成像结果^[27]。(a)相机拍摄的傅里叶谱图像;(b1)~(b8)不同角度的半环数字掩模;(c1)~(c8)计算探测的半环形傅里叶谱;(d1)~(d4)根据计算探测的半环形傅里叶谱重建的差分相衬图像
 Fig. 8 Semi-annular DPC imaging results of onion epidermal cells from different orientations^[27]. (a) Fourier spectrum image captured by the camera; (b1)–(b8) semi-annular digital masks with different orientations; (c1)–(c8) computationally detected semi-annular Fourier spectra; (d1)–(d4) reconstructed DPC images using computationally detected semi-annular Fourier spectra

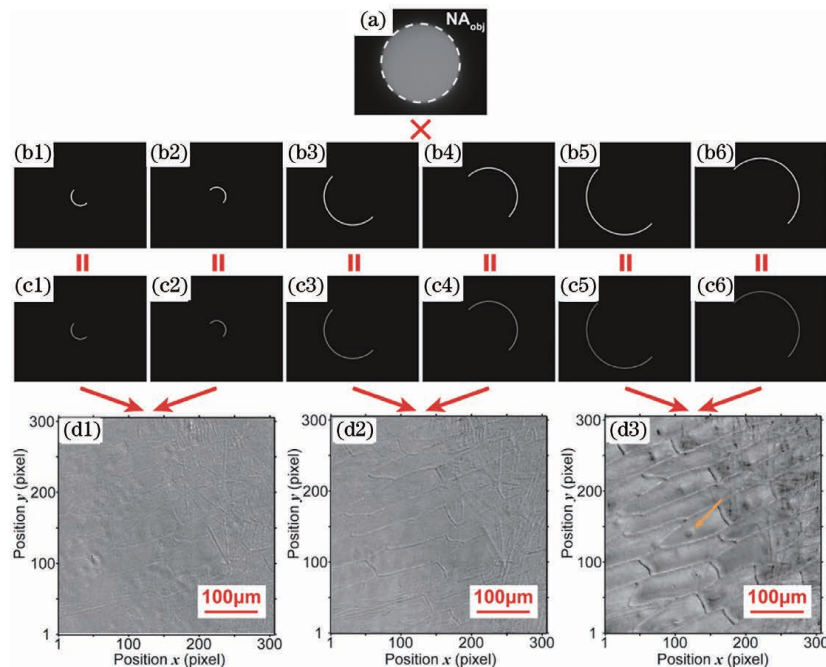


图 9 洋葱表皮细胞不同半径的环形差分相衬显微成像结果^[27]。(a)相机拍摄的傅里叶谱图像;(b1)~(b6)不同半径的半环数字掩模;(c1)~(c6)计算探测的半环形傅里叶谱;(d1)~(d3)根据计算探测的半环形傅里叶谱重建的差分相衬图像
 Fig. 9 Semi-annular DPC imaging results of onion epidermal cells from different radii^[27]. (a) Fourier spectrum image captured by the camera; (b1)–(b6) semi-annular digital masks with different radii; (c1)–(c6) computationally detected semi-annular Fourier spectra; (d1)–(d3) reconstructed DPC images using computationally detected semi-annular Fourier spectra

4 计算傅里叶显微镜实现光场成像

计算傅里叶显微镜不仅可以实现多模式显微成像,而且可以实现光场成像,重建样品的三维空间结构图像。传统光场显微镜^[33]需要使用微透镜阵列记录光线角度信息,在探测端的面阵探测器同时采样光线的角度信息和样品的空间信息,导致空间和角度分辨率相互制约,显微图像的空间分辨率下降。而计算傅里叶显微镜在照明端通过结构光采样样品的空间信息,在探测端通过面阵探测器的不同像素点采

样光线的角度信息,解除了空间和角度分辨率相互制约的关系,有望实现高空间分辨率的光场显微成像。

4.1 计算傅里叶显微镜光线角度信息记录原理

面阵探测器的每个像素点记录了不同的傅里叶频谱,每一个谱点对应一个角度的光线。如图 10 所示,A 和 B 点是面阵探测器上不同位置的两个像素点(A 点在光轴上)。将 A 和 B 点作为单像素探测器,采用单像素成像方法,都可以重建一幅样品的图像,但是,由于 A 和 B 点的空间位置不同,它们记录的光线角度不同,如图 10 所示。

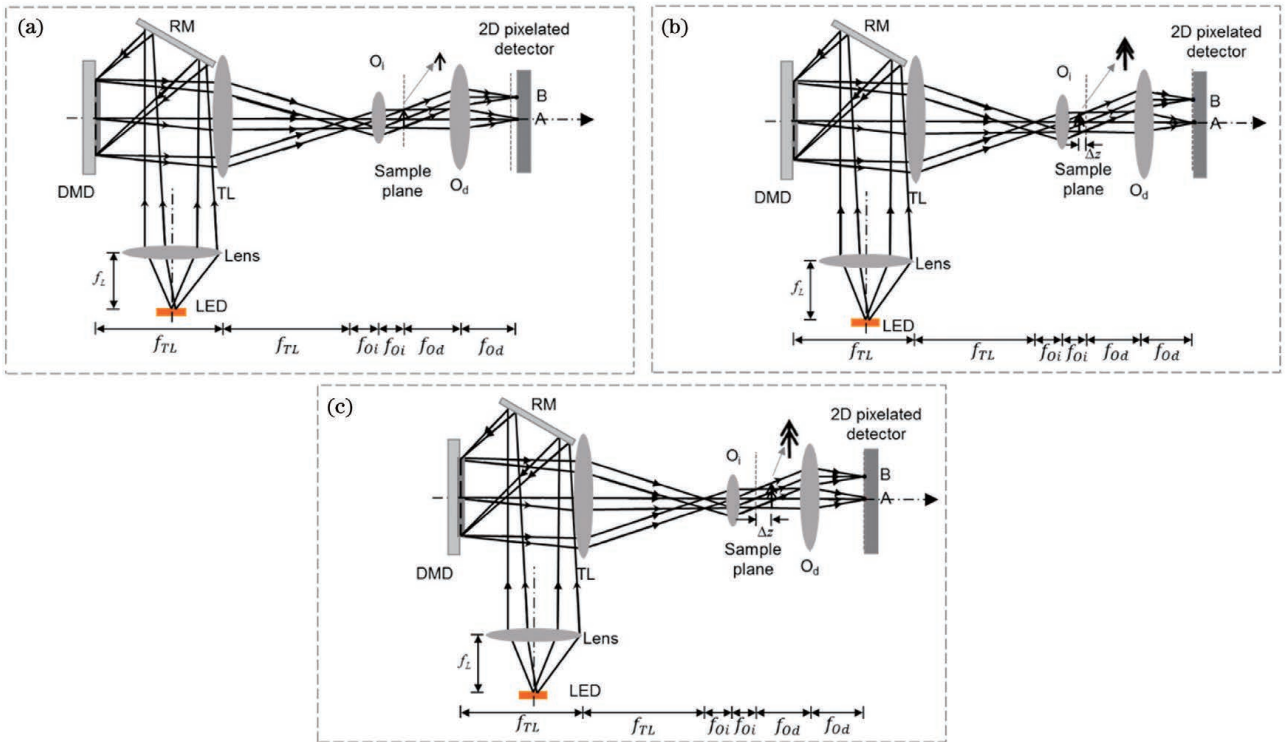


图 10 计算傅里叶显微镜实现角度采样原理图。(a)样品位于物镜焦平面;(b)(c)样品位于物镜离焦面

Fig. 10 Schematic diagram of computational Fourier microscope achieving angular sampling. (a) Specimen in the focal plane of objective lens; (b)(c) specimen in the de-focal plane of objective lens

为了便于分析,假设样品只有一层。

1) 当样品位于物镜焦平面时,如图 10(a)所示,A 和 B 两个单像素探测器记录的光线在样品区域重叠,因此,根据这两个单像素探测器记录的光信号重建的图像完全相同。

2) 当样品不在物镜焦平面时,如图 10(b)和(c)所示,A 和 B 两个单像素探测器记录的光线在样品区域稍有不同,存在横向错位,如图中小箭头所示,因此,根据这两个单像素探测器记录的光信号重建的图像相互之间有错位。

综上所述,采用计算傅里叶显微成像技术,二维面阵探测器放置在探测物镜的焦面采集样品光波的

傅里叶谱信息,二维阵列探测器的每个像素点作为单像素探测器使用,不同单像素探测器由于空间位置不同,将记录不同角度的光线。这些不同角度的光线经过样品时,在样品区域相互之间有错位,导致不同深度的信息所成的像会随着单像素探测器位置的变化而发生横向移动,存在视差,即通过不同单像素探测器可以重建样品的不同视角图像。

4.2 数字重聚焦算法

根据每个单像素探测器重建的视角图像,并利用平移和叠加算法,就可以重建样品在不同深度的图像。具体步骤如下。

1) 利用圆检测和拟合算法确定二维面阵探测

器记录的傅里叶谱图像中圆斑的半径 R 和中心坐标 (x_{center}, y_{center}) 。

2) 确定每个单像素探测器的像素坐标 (x_i, y_i) , 其中 i 表示单像素探测器的编号。

3) 利用如下公式计算第 i 个单像素探测器到圆斑中心的距离:

$$\begin{cases} \Delta x_i = x_i - x_{center} \\ \Delta y_i = y_i - y_{center} \end{cases} \quad (4)$$

4) 根据重聚焦距离 Δz , 确定每个单像素探测器重建图像需要平移的位移量 $(\Delta s_{x,i}, \Delta s_{y,i})$,

$$\begin{cases} \Delta s_{x,i} = \frac{\beta \Delta z \Delta x_i \tan[\arcsin(NA/n)]}{s_{DMD} R} \\ \Delta s_{y,i} = \frac{\beta \Delta z \Delta y_i \tan[\arcsin(NA/n)]}{s_{DMD} R} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: β 表示照明物镜的放大率; s_{DMD} 表示数字显微镜 DMD 的像元大小; NA 表示照明物镜的数值孔径; n 表示照明物镜和样品之间的介质的折射率。

5) 将每个单像素探测器重建的图像平移

$(\Delta s_{x,i}, \Delta s_{y,i})$ 并叠加, 就可获得样品在 Δz 处的重聚焦图像。

4.3 计算傅里叶显微镜实现光场成像结果

图 11 给出了利用图 3 所示的透射式计算傅里叶显微镜实现光场成像的结果。被测对象为一只蚂蚁样品。由于相机的像元尺寸只有几微米, 每个像素点记录的光信号很弱, 为了提高信噪比, 保证单像素重建图像的质量, 将半径为 50 pixel 的圆所包含的像素点捆绑成一个单像素探测器。图 11(a1)~(a4) 分别为最右的、最上的、最左的以及最下的单像素探测器, 图 11(b1)~(b4) 分别为利用这四个单像素探测器重建的四幅视角图像。从图中箭头可以看出, 最上和最下两个单像素探测器, 重建的结果中不同层的样品会在竖直方向上发生平移, 而利用最左和最右两个单像素探测器重建的结果, 可以看出样品不同深度的信息所成的像在水平方向上会发生平移, 证实了不同单像素探测器可以记录光线的角度信息。

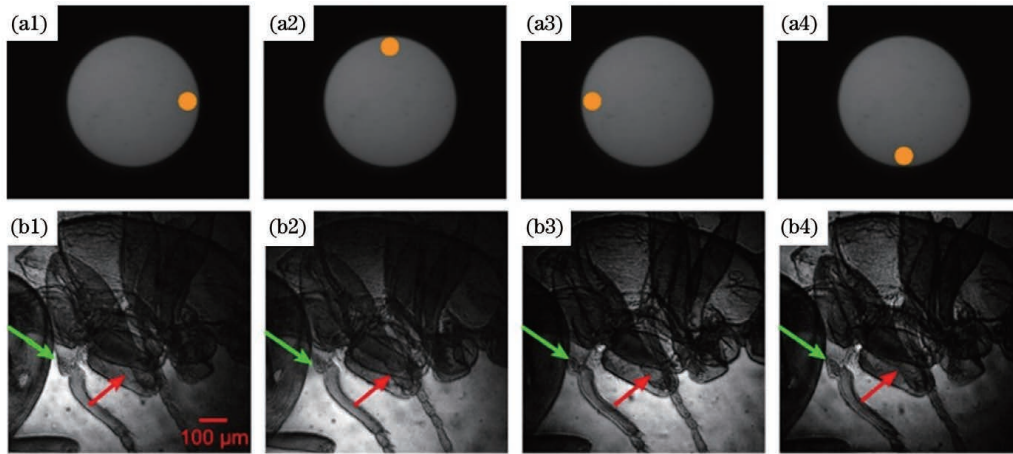


图 11 利用不同位置的单像素探测器重建的视角图。(a1)~(a4)最右、最上、最左和最下的单像素探测器;(b1)~(b4)利用最右、最上、最左和最下的单像素探测器重建的样品视角图

Fig. 11 Perspective images recovered from different locations of single-pixel detectors. (a1)–(a4) Rightmost, topmost, leftmost, and bottommost single-pixel detectors, respectively; (b1)–(b4) perspective images retrieved from the rightmost, topmost, leftmost, and bottommost single-pixel detectors, respectively

根据所有单像素探测器重建的视角图, 采用上文所述的数字重聚焦算法, 就可重建样品不同深度的图像, 图 12 给出了样品在 $z = -77 \mu\text{m}$, $z = -10 \mu\text{m}$ 以及 $z = 37 \mu\text{m}$ 处的结果。从图中的结果可以看出, 利用计算傅里叶显微镜能够重建样品不同深度的图像。

4.4 计算傅里叶显微镜实现反射式光场成像结果

根据相同的成像原理, 构建反射式计算傅里叶显微镜, 如图 13 所示, LED 光源发出的光束经数字

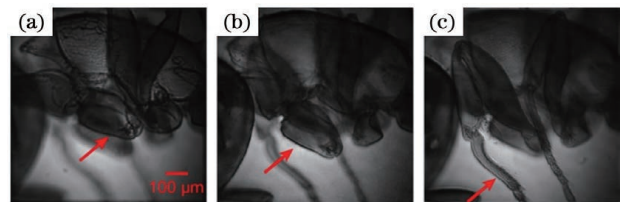


图 12 数字重聚焦结果。(a) $z = -77 \mu\text{m}$; (b) $z = -10 \mu\text{m}$; (c) $z = 37 \mu\text{m}$

Fig. 12 Digitally refocused images. (a) $z = -77 \mu\text{m}$; (b) $z = -10 \mu\text{m}$; (c) $z = 37 \mu\text{m}$

里叶谱面同时对光线的角度信息和样品的颜色信息进行采样。彩色相机感光面前有一片拜尔滤色片,拍摄到的图像通过解码可以得到红、绿、蓝三个通道的图像,因此,将彩色相机每个像素作为一个单像素探测器,每个像素点可以同时获得一组红、绿、蓝一

维光强序列,如图 16(a1)~(a3)所示,分别对应红、绿、蓝三个通道。根据这三组一维光强序列,采用单像素成像算法,可以同时重建出样品的红、绿、蓝色图像,如图 16(b1)~(b3)所示。将这三幅图像合成,即可获得样品的彩色图像,如图 16(c)所示。

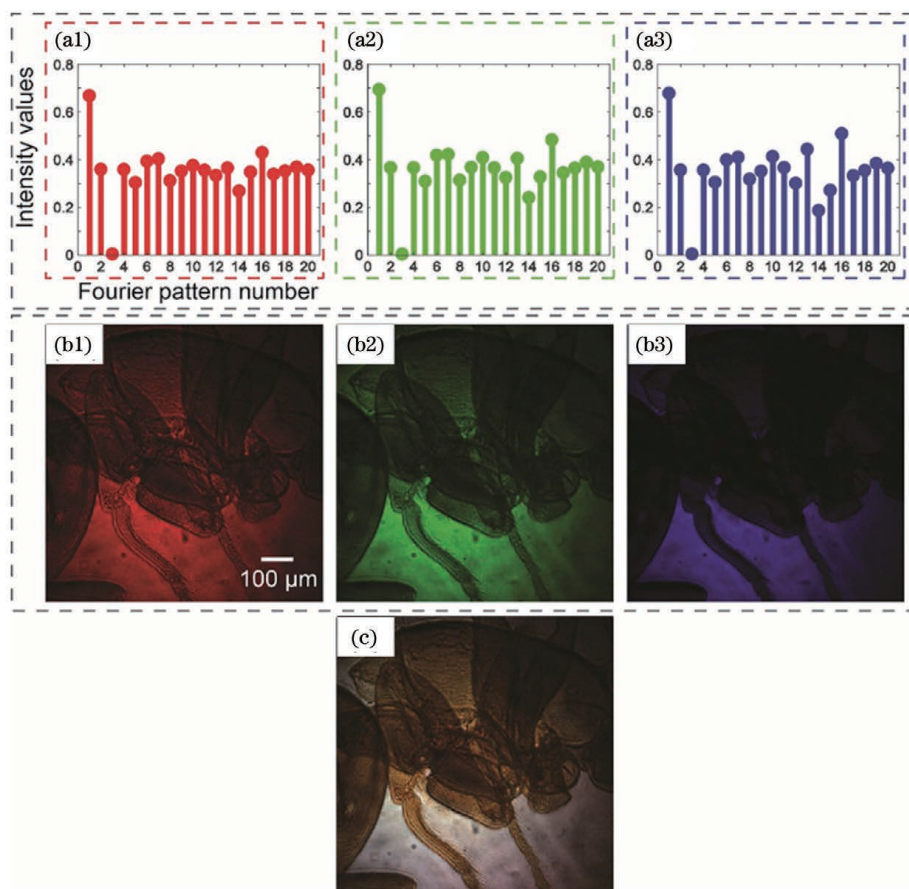


图 16 基于在探测端采样样品颜色信息的方案重建得到的彩色图像^[35]。(a1)~(a3)从相机拍摄到的图像中分离出来的三通道的信号;(b1)~(b3)根据三通道信号重建的对应三通道的样品图像;(c)由图 16 (b1)~(b3)合成的彩色透视图

Fig. 16 Color image is reconstructed based on the scheme of sampling the color information of the specimen in the detection side^[35]. (a1)–(a3) Three-channel light intensity signal separated from the image captured by the camera; (b1)–(b3) sample image corresponding to the three channels reconstructed from the three-channel light intensity signal; (c) color-perspective image synthesized by Fig. 16 (b1)–(b3)

同时,由于相机不同像素点的空间位置坐标不同,利用不同像素点构建的单像探测器记录的光线角度信息也不同。因此,通过不同的单像素探测器重建的图像包含不同的角度信息。图 17 给出了利用四个不同位置的单像素探测器重建的彩色视角图像,从图中箭头处可知,每幅彩色视角图的信息会随着单像素探测器位置的改变而发生变化。

根据所有单像素探测器重建的彩色视角图像,采用平移叠加方法,就可以重建样品在不同深度的彩色图像。图 18 给出了其中三个不同深度的彩色重聚焦结果。

4.5.2 在照明端采集样品的颜色信息

与方案 1 不同,该方案在照明端利用投影仪产生彩色编码傅里叶结构光,如图 19 所示,它是将傅里叶基底图案与拜尔滤色掩模相乘得到的,而在探测端使用一个单色相机在探测物镜后焦面采集样品光波的傅里叶谱图像,相应地,相机的每个像素点都记录了一组一维光强序列[图 20(a)]。根据记录的光信号,采用单像素成像算法,可以重建出一幅马赛克效果的样品图像,如图 20(b)所示,图 20(c)是局部放大图,最后对这幅马赛克效果的图像进行解马赛克操作,得到样品的彩色图像,如图 20(d)所示。

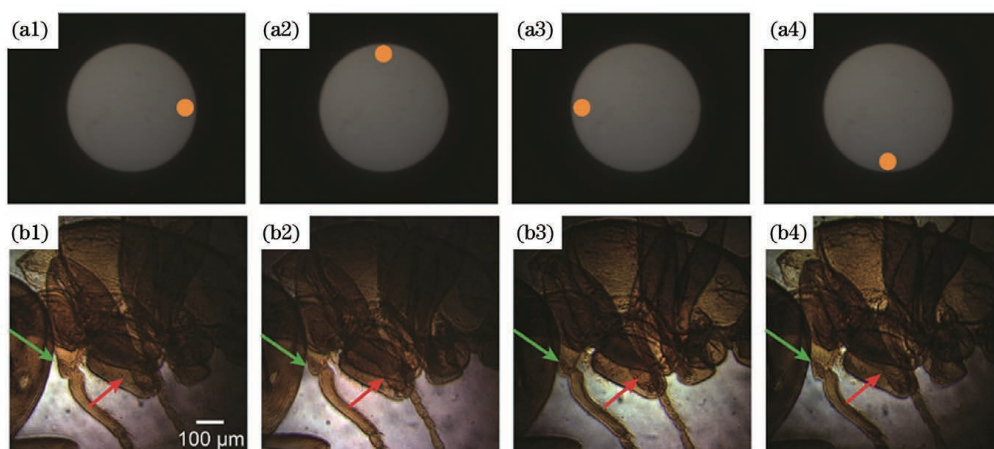


图 17 利用不同位置的单像素探测器重建的视角图^[35]。(a1)~(a4)利用最右、最上、最左和最下的单像素探测器重建的视角图像;(b1)~(b4)最右、最上、最左和最下的单像素探测器

Fig. 17 Perspective images recovered from different locations of single-pixel detectors^[35]. (a1)–(a4) Perspective images retrieved from rightmost, topmost, leftmost, and bottommost single-pixel detectors, respectively; (b1)–(b4) rightmost, topmost, leftmost, and bottommost single-pixel detectors, respectively

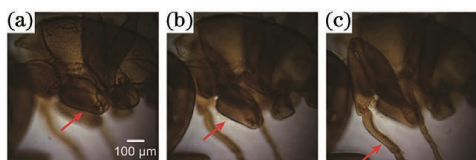


图 18 彩色数字重聚焦结果^[35](a) $z = -77 \mu\text{m}$;
(b) $z = -10 \mu\text{m}$;(c) $z = 37 \mu\text{m}$

Fig. 18 Digitally refocused color images^[35].

(a) $z = -77 \mu\text{m}$; (b) $z = -10 \mu\text{m}$; (c) $z = 37 \mu\text{m}$

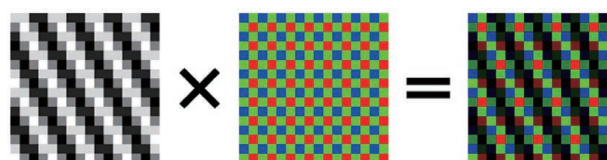


图 19 产生彩色编码的结构光图案的原理^[36]

Fig. 19 Principle of generating color-coded structured light patterns^[36]

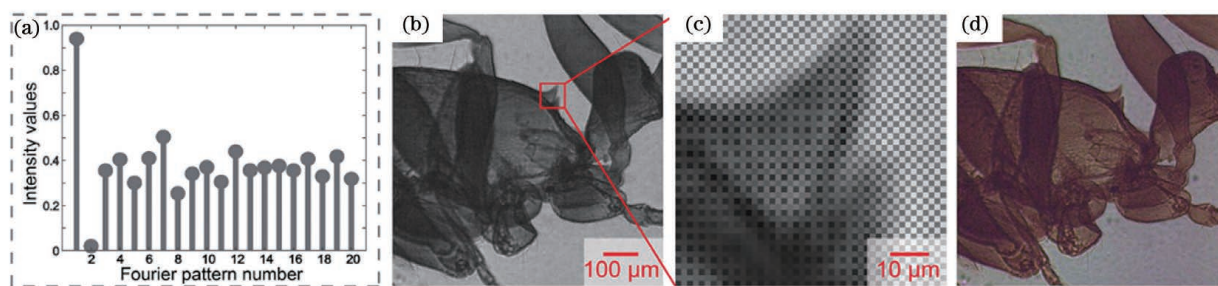


图 20 基于在照明端采样样品颜色信息的方案重建得到的彩色图像^[35]。(a)单像素探测器记录的一维光强信号;(b)根据记录到的一维光强信号重建的样品图像;(c)图(b)方框的局部放大图;(d)将图(b)进行解马赛克操作后得到的彩色图像

Fig. 20 Color images reconstructed based on the scheme of sampling the color information of the specimen at the illumination side^[35]. (a) 1D light intensity sequence recorded by a single-pixel detector; (b) image of specimen recovered from the 1D light intensity sequence; (c) partially enlarged view of Fig. 20 (b); (d) color image recovered by demosaicing from Fig. 20 (b)

将相机上不同的像素点捆绑为不同的单像素探测器,根据单像素探测器记录的光信号,采用相同的方法,可以重建出样品的彩色视角图,图 21 给出了四个单像素探测器重建的样品的彩色视角图。利用这些视角图,再通过数字重聚焦算法,能够实现彩色光场显微成像。图 22 给出了样品三幅不同深度的

彩色图像。实验结果表明,在照明端采集样品颜色信息的方案也可以实现彩色光场显微成像。

与方案 1 在探测端采集颜色信息的结果(图 18)比较,由于方案 2 同时在照明端采样颜色和样品的空间信息,原来全部用于采样样品空间信息的结构光需要分出一部分用于采样颜色信息,因此,

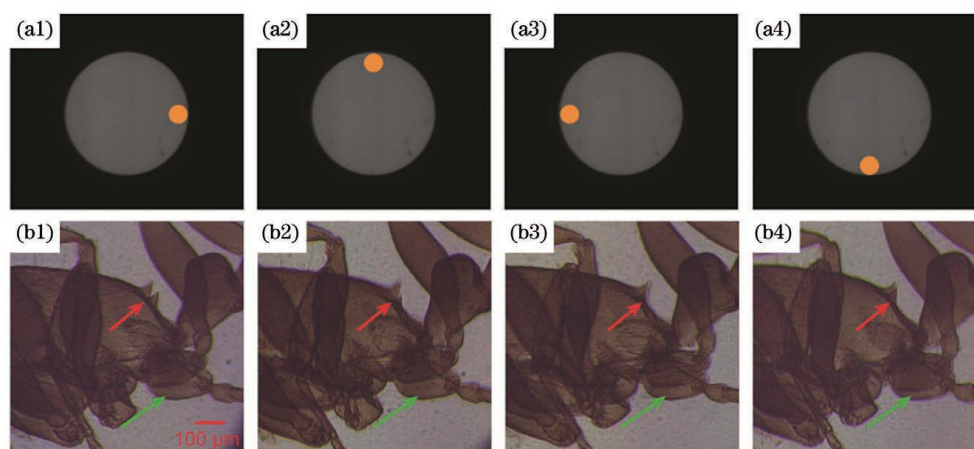


图 21 利用不同位置的单像素探测器重建的视角图^[35]。(a1)~(a4)最右、最上、最左和最下的单像素探测器；(b1)~(b4)利用最右、最上、最左和最下的单像素探测器重建的视角图

Fig. 21 Perspective images recovered from different locations of single-pixel detectors^[35]. (a1)–(a4) Rightmost, topmost, leftmost, and bottommost single-pixel detectors, respectively; (b1)–(b4) perspective images retrieved from rightmost, topmost, leftmost, and bottommost single-pixel detectors, respectively

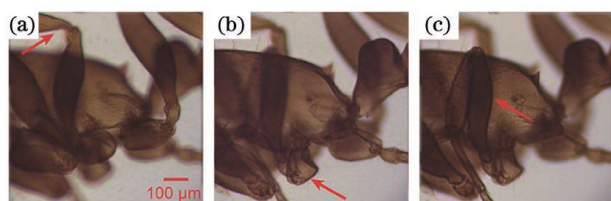


图 22 彩色数字重聚焦结果^[35]。(a) $z = -53 \mu\text{m}$;
(b) $z = 22 \mu\text{m}$; (c) $z = -59 \mu\text{m}$

Fig. 22 Digitally refocused color images^[35].

(a) $z = -53 \mu\text{m}$; (b) $z = 22 \mu\text{m}$; (c) $z = -59 \mu\text{m}$

重建图像(图 22)的空间分辨率会低于方案 1 重建图像(图 18)。但方案 2 只需要在探测端采用单色相机记录灰度图像,对比方案 1,方案 2 对存储空间的要求更低,数据处理所需时间也更少,速度更快。综上,如果对成像分辨率有更高要求,可以采用在探测端采集颜色信息的方案;如果对成像速度有更高要求,可以采用在照明端采集颜色信息的方案。

5 结束语

计算傅里叶显微成像技术,不仅能记录样品光波的傅里叶谱图像,还可以利用探测到的傅里叶谱信号,重建对应不同傅里叶谱的样品空间结构图像,在傅里叶谱与重建图像之间可以建立一一对应的关系。这种对应关系有助于对微纳光子学等领域的微纳结构样品更全面的表征,促进发展出表征微纳结构样品的新光学成像方法。最近,有科学家根据傅里叶谱和波矢、动量之间的关系,提出基于傅里叶显微镜的动量空间成像技术研究纳米光学材料^[37-38],

那么有望发展出基于计算傅里叶显微镜的动量空间成像技术研究纳米光学材料。总之,计算傅里叶显微成像技术,将突破传统傅里叶显微成像技术的应用局限,在超表面材料、光子晶体等微纳光子学材料方面具有潜在应用前景。

计算傅里叶显微镜采用单像素成像方法重建图像,图像的分辨率是由照明端结构光的最高空间频率决定。结构光的最高空间频率由照明物镜的数值孔径、DMD 空间光调制器的像元尺寸和照明光的波长共同决定。因此,可以通过减少 DMD 空间光调制器的像元尺寸和照明波长,增加照明透镜的数值孔径来提高计算傅里叶显微镜的成像分辨率。

计算傅里叶显微镜需要多次测量重建样品空间结构图像,测量的次数与重建图像的像素数成正比,因此,它的成像时间比传统像面采样光学显微镜的成像时间长。尽管计算傅里叶显微镜的成像时间比传统的光学显微镜和传统傅里叶显微镜的成像时间更长,但对于静态样品来说,时间上的代价可以换来更多的有用信息,有利于对样品进行更全面、更准确的表征,因此在成像时间和信息量之间有一个权衡。使用高速空间光调制器和高速相机,可以提高测量速度,缩短计算傅里叶显微镜的成像时间。此外,自然图像在频域具有稀疏特性,还可以利用压缩感知技术^[39]缩短成像时间。

参 考 文 献

- [1] Kurvits J A, Jiang M, Zia R. Comparative analysis

- of imaging configurations and objectives for Fourier microscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2015, 32(11): 2082-2092.
- [2] Dominguez D, Alharbi N, Alhusain M, et al. Fourier plane imaging microscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(10): 103102.
- [3] Mattheyses A L, Axelrod D. Fluorescence emission patterns near glass and metal-coated surfaces investigated with back focal plane imaging[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2005, 10(5): 054007.
- [4] Wagner R, Cichos F. Fast measurement of photonic stop bands by back focal plane imaging[J]. *Physical Review. B, Condensed Matter*, 2013, 87(16): 165438.
- [5] Giavazzi F, Cerbino R. Digital Fourier microscopy for soft matter dynamics[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(8): 083001.
- [6] Shi R, Janunts N, Hellmann C, et al. Vectorial physical-optics modeling of Fourier microscopy systems in nanooptics [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(7): 1193-1205.
- [7] Lieb M A, Zavislan J M, Novotny L. Single-molecule orientations determined by direct emission pattern imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(6): 1210-1215.
- [8] Budde H, Coca-López N, Shi X, et al. Raman radiation patterns of graphene[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(2): 1756-1763.
- [9] Sersic I, Tuambilangana C, Koenderink A F. Fourier microscopy of single plasmonic scatterers [J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(8): 083019.
- [10] Shegai T, Miljković V D, Bao K, et al. Unidirectional broadband light emission from supported plasmonic nanowires [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(2): 706-711.
- [11] Curto A G, Taminiau T H, Volpe G, et al. Multipolar radiation of quantum emitters with nanowire optical antennas[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1750.
- [12] Tripathi R P N, Vasista A B, Chikkaraddy R, et al. Radiative channeling of nanowire Frenkel exciton polaritons through surface plasmons [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(4): 1600873.
- [13] Sharma D K, Chaubey S K, Vasista A B, et al. Directional second-harmonic generation controlled by sub-wavelength facets of an organic mesowire [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(21): 5914-5922.
- [14] Wolf D, Schumacher T, Lippitz M. Shaping the nonlinear near field [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-6.
- [15] Kim J, Zhao H N, Hou S C, et al. Using Fourier-plane imaging microscopy for determining transition-dipole-moment orientations in organic light-emitting devices[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(3): 034048.
- [16] Mait J N, Euliss G W, Athale R A. Computational imaging [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(2): 409-483.
- [17] Lukac R. Computational photography: methods and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [18] Dai Q H, Wu J M, Fan J T, et al. Recent advances in computational photography[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2019, 28(1): 1-5.
- [19] Fang L, Dai Q H. Computational light field imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111001. 方璐, 戴琼海. 计算光场成像[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111001.
- [20] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 020001. 邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 020001.
- [21] Wang F, Wang H, Bian Y M, et al. Applications of deep learning in computational imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111002. 王飞, 王昊, 卞耀明, 等. 深度学习在计算成像中的应用 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111002.
- [22] Zuo C, Feng S J, Zhang X Y, et al. Deep learning based computational imaging: status, challenges, and future [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111003. 左超, 冯世杰, 张翔宇, 等. 深度学习下的计算成像: 现状、挑战与未来 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111003.
- [23] Shao X P, Su Y, Liu J P, et al. Connotation and system of computational imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0511001. 邵晓鹏, 苏云, 刘金鹏, 等. 计算成像内涵与体系 (特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(5): 0511001.
- [24] Zhao T Y, Wang Z J, Feng K, et al. High-speed structured illumination microscopy and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 240001. 赵天宇, 汪召军, 冯坤, 等. 高速超分辨结构光照明显微的关键技术及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(24): 240001.
- [25] Chen Y C, Li C K, Hao X, et al. Progress of point scanning super-resolution microscopy based on frequency shifting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 180001.

- 陈宇宸, 李传康, 郝翔, 等. 点扫描移频超分辨显微成像进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 180001.
- [26] Yang J Y, Dong H, Xing F L, et al. Single-molecule localization super-resolution microscopy and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1200001.
- 杨建宇, 董浩, 邢福临, 等. 单分子定位超分辨成像技术进展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 1200001.
- [27] Peng J Z, Yao M H, Huang Z B, et al. Fourier microscopy based on single-pixel imaging for multi-mode dynamic observations of samples [J]. *APL Photonics*, 2021, 6(4): 046102.
- [28] Zhang Z B, Ma X, Zhong J G. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [29] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619-19639.
- [30] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13-20.
- [31] Lu T A, Qiu Z H, Zhang Z B, et al. Comprehensive comparison of single-pixel imaging methods [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106301.
- [32] Zhang Z B, Lu T A, Peng J Z, et al. Fourier single-pixel imaging techniques and applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603002.
- 张子邦, 陆天傲, 彭军政, 等. 傅里叶单像素成像技术与应用 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 0603002.
- [33] Levoy M, Ng R, Adams A, et al. Light field microscopy [J]. *ACM Transactions on Graphic*, 2006, 25(3): 924-934.
- [34] Yao M H, Cheng J J, Huang Z B, et al. Reflection light-field microscope with a digitally tunable aperture by single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33040-33050.
- [35] Yao M H, Cai Z X, Qiu X, et al. Full-color light-field microscopy via single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6521-6536.
- [36] Zhang Z B, Liu S J, Peng J Z, et al. Simultaneous spatial, spectral, and 3D compressive imaging via efficient Fourier single-pixel measurements [J]. *Optica*, 2018, 5(3): 315-319.
- [37] Zhang Y W, Chen A, Liu W Z, et al. Observation of polarization vortices in momentum space [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(18): 186103.
- [38] Zhang Y W, Zhao M X, Wang J J, et al. Momentum-space imaging spectroscopy for the study of nanophotonic materials [J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(8): 824-838.
- [39] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83-91.