

基于单像素成像原理的多模式显微成像技术

李东哲¹, 周维帅¹, 黄素仪¹, 姚曼虹², 李仕萍^{1,3}, 彭军政^{1,3*}, 钟金钢^{1,3**}¹暨南大学理工学院光电工程系, 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;³暨南大学广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632

摘要 半导体芯片等微纳器件制造过程中,对其形貌进行表征有助于制造工艺评估和缺陷检测。为了获得待测样品完整的信息,通常需要使用明场显微镜、暗场显微镜等进行多种成像模式的联合表征。但目前实现多模式成像常须更改实验装置或使用不同的成像系统,导致获取的多模式图像的视场不同,不利于将多模式成像结果综合起来对待测样品进行全面分析。针对以上问题,提出基于单像素成像原理的多模式显微成像技术。该技术将宽场照明显微镜中的光源替换成结构照明光源,然后将相机每个像素点作为单像素探测器,并利用单像素重建算法得到艾里斑图像。艾里斑图像中不同位置的值代表不同物点发出的不同级次的衍射信号。通过从艾里斑图像中提取不同位置的值,按照相机像素坐标排列,可以重建不同模式的图像。与传统的多模式显微成像方法相比,所提基于单像素成像原理的多模式显微成像技术采用同一套装置和相同的实验数据,重建的多模式图像的视场相同。所提方法为显微成像技术的发展提供了一种全新的思路,有望在微纳器件的离线形貌表征中得到应用。

关键词 多模式显微成像; 单像素成像; 明场成像; 偏置成像; 暗场成像

中图分类号 TH742

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231001

1 引言

在半导体芯片等微纳器件制造过程中,对其进行表面形貌表征是必不可少的环节,通过形貌表征可以进行制造工艺评估、缺陷检测等。常用的表征方法是:利用传统的反射式光学显微镜进行表面形貌成像,再根据所获取的图像进行分析判断。为了获取待测样品完整的信息,提高物体识别、材料分析等应用的准确性和可靠性,通常需要使用明场显微镜、暗场显微镜^[1]等对样品进行多种成像模式的联合表征。但现有的方法实现多模式成像需要更改实验装置或使用不同的成像系统,导致获取的多模式图像的视场不同,不利于综合多模式成像结果,无法对待测样品进行全面分析。因此,需要发展多模式显微成像技术应对上述问题,例如,利用基于LED阵列光源的显微镜^[2]和空间光调制器在传统显微镜的频谱面进行不同滤波的多模式显微成像技术^[3]。

作为最新发展的计算成像技术^[4],单像素成像技术^[5-11]近年来受到国内外学者的广泛关注。单像素成像的早期研究目的是解决在非可见光波段,具有高空间采样率的二维探测器制造困难导致的高分辨率成像难题^[12-15]。随着研究的深入,近年来国内外研究学者

开始利用单像素成像机理发展出了一系列新的成像和探测技术,如基于单像素成像原理的光场成像^[16]、基于单像素成像原理的傅里叶显微镜^[17-18]、免图像定位技术^[19]、光伏器件表征技术^[20]、利用单像素成像原理解决半透明物体三维成像问题的技术^[21-22]、周期性高速运动物体的三维重建^[23]等。

本文提出一种基于单像素成像原理的多模式显微成像技术。利用空间光调制器产生结构照明光,对样品的图像进行编码,同时将相机每个像素点作为单像素探测器,采用单像素成像算法得到艾里斑图像,再从重建的艾里斑图像中抽取不同位置的值,即可重建不同模式的图像,实现明场成像、偏置成像及暗场成像。与传统的宽场照明显微术相比,所提基于单像素成像原理的多模式显微成像技术无须更改实验装置,或者更换不同的显微镜,只须采用同一套装置,利用相同的实验数据,通过设计不同的数字针孔从单像素重建图像中抽取不同位置的值,就可组建不同模式的图像,实现多模式成像。

2 方法内容

2.1 实验系统

图1(a)是所提基于单像素成像原理的多模式显

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-06-14; 录用日期: 2023-06-20; 网络首发日期: 2023-07-03

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金(2019A1515011151, 2020A1515110392, 2022A1515011560, 2023A1515011277)

通信作者: *junzpeng@jnu.edu.cn; **tzjg@jnu.edu.cn

微成像系统示意图。空间光调制器生成的调制图案将 LED 光源发出的光束调制成结构光, 结构光经照明管镜、分光镜和物镜投影到待测样品上, 空间光调制器的调制平面位于照明管镜的前焦面, 照明管镜的后焦面与物镜的后焦面重合, 样品放置在物镜的前焦面。结

构光与样品相互作用后再次返回物镜, 经分光镜和探测管镜成像到相机光敏面上, 探测管镜的前焦面和物镜的后焦面重合, 探测管镜的后焦面和相机的光敏面重合。照明管镜、分光镜和物镜组成照明光学系统, 探测管镜、分光镜和物镜组成成像光学系统。

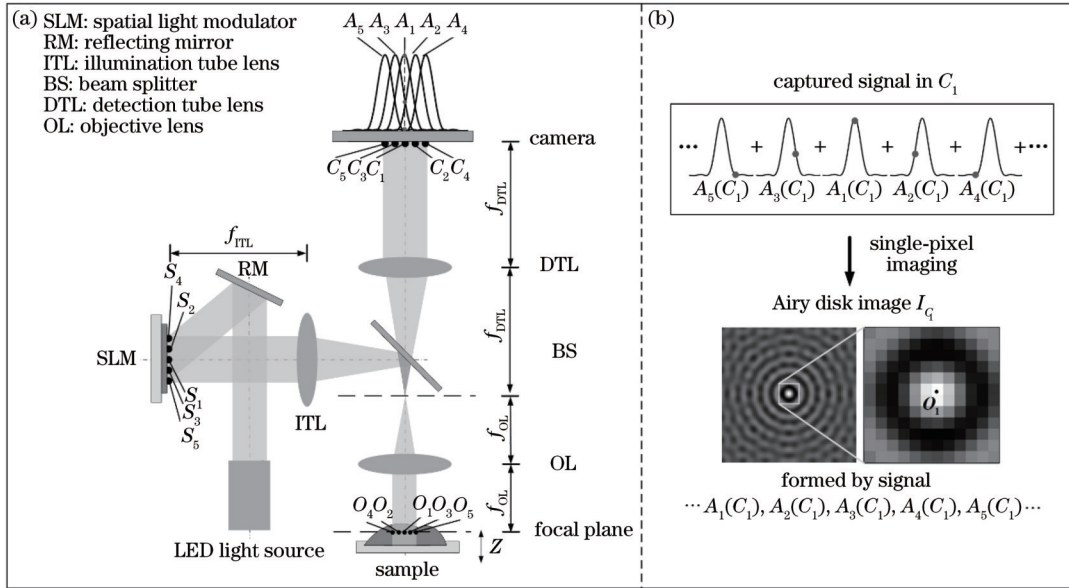


图 1 基于单像素成像原理的多模式显微成像系统示意图及对相机像素点所记录的信号进行区分的示意图。(a) 基于单像素成像原理的多模式显微成像系统的示意图; (b) 对相机像素点 C_1 记录的信号进行区分的示意图

Fig. 1 Schematic of a multi-mode microscopic imaging system based on the principle of single-pixel imaging and the differentiation of the signals recorded by camera pixels. (a) Schematic of a multi-mode microscopic imaging system based on the principle of single-pixel imaging; (b) schematic of distinguishing the signal recorded by the camera pixel point C_1

2.2 相机像素点记录的信号分析

受光学系统衍射效应的影响, 样品每个物点在相机光敏面不是形成一个像点, 而是形成一个衍射艾里斑, 因此相机每个像素点不仅记录了与该像素点共轭的物点发出的零频信号, 而且记录了共轭物点附近的非共轭物点发出的高阶衍射信号。如图 1(a) 所示, 假设 O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 为样品在焦面的物点, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 为相机光敏面上分别与 O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 共轭的像素点, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 是空间光调制器上分别与 O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 共轭的像素点, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 分别是物点 O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 在相机光敏面产生的衍射斑。相机像素点 C_1 不仅记录了与它共轭的物点 O_1 发出的零级衍射信号, 用 $A_1(C_1)$ 表示, 还记录了与它非共轭的物点 $O_1 O_2 O_3 O_4 O_5$ 发出的高阶衍射信号, 用 $A_2(C_1), A_3(C_1), A_4(C_1), A_5(C_1)$ 表示。相机像素点 C_1 所输出的光强值是这些信号 $A_1(C_1), A_2(C_1), A_3(C_1), A_4(C_1), A_5(C_1)$ 的强度叠加, 如图 1(b) 所示。

2.3 基于单像素成像原理的多模式显微成像方法

为了将像素点 C_1 记录的不同物点发出的不同衍射级次的信号分开, 将像素点 C_1 作为单像素探测器, 利用傅里叶单像素成像算法^[24]重建图像。傅里叶单像

素成像是以傅里叶变换为基础的, 它利用傅里叶基底图案对待测样品的图像进行编码, 同时通过单像素探测器获取被编码后的样品图像的积分光强值, 再根据单像素探测器得到的光强值计算傅里叶系数, 组建图像的二维傅里叶频谱, 最后对二维傅里叶频谱进行傅里叶逆变换, 得到图像。傅里叶基底图案可表示为

$$P_{\phi_k}(x, y; f_x, f_y) = a + b \cos[2\pi(f_x x + f_y y) + \phi_k], \quad (1)$$

式中: (x, y) 表示待测样品空间的坐标; (f_x, f_y) 表示空间频率; $\phi_k = \pi k/2$ 表示相移量, $k = 0, 1, 2, 3$ 表示相移序号; a 表示傅里叶基底图案的平均强度; b 表示对比度。

样品图像被傅里叶基底图案编码后, 单像素探测器记录的强度值可表示为

$$D_{\phi_k}(f_x, f_y) = \zeta \iint P_{\phi_k}(x, y; f_x, f_y) O(x, y) dx dy + D_n, \quad (2)$$

式中: ζ 表示与单像素探测器有关的系数; $O(x, y)$ 表示样品的反射率或透过率二维分布函数; D_n 表示环境背景噪声。

通过四步相移算法, 可计算出空间频率为 (f_x, f_y) 的傅里叶系数,

$$\tilde{O}(f_x, f_y) = \frac{1}{2b\zeta} \left\{ \left[D_0(f_x, f_y) - D_\pi(f_x, f_y) \right] + j \left[D_{\pi/2}(f_x, f_y) - D_{3\pi/2}(f_x, f_y) \right] \right\}, \quad (3)$$

式(3)是一种差分运算,这种差分运算能够有效抑制离焦背景噪声,因为离焦区域的结构光对比度低,可作为背景噪声利用差分算法减去。

获取所有傅里叶系数后,即可得到样品图像的二维傅里叶频谱,对二维傅里叶频谱进行傅里叶逆变换后,得到一幅图像,

$$O(x, y) = \text{FT}^{-1}[\tilde{O}(f_x, f_y)], \quad (4)$$

式中: $\text{FT}^{-1}[\cdot]$ 表示二维傅里叶逆变换运算。

如图1所示,将像素点 C_1 作为单像素探测器,通过单像素成像算法重建得到一幅图像 I_{C_1} ,该图像是由共轭物点 O_1 发出的零频信号 $A_1(C_1)$ 以及其他一系列非共轭物点 O_2, O_3, O_4, O_5 发出的不同级次的高阶衍射信号 $A_2(C_1), A_3(C_1), A_4(C_1), A_5(C_1)$ 组成的。根据单像素成像原理可知,单像素重建图像的视场和分辨率是由照明结构光决定的, O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 分别与空间光调制器的像素点 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 共轭, O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 将分别受到 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 产生的

结构光的调制,但由于 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 的空间位置不同,它们产生的结构光也不相同,因此 O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 发出的信号 $A_1(C_1), A_2(C_1), A_3(C_1), A_4(C_1), A_5(C_1)$ 在以相机像素点 C_1 为单像素探测器重建的图像 I_{C_1} 中的位置也不同。图像 I_{C_1} 是一个呈周期性变化的艾里斑图像,如图1(b)所示,共轭物点 O_1 发出的零频信号在艾里斑图像的中心,非共轭物点发出的不同级次的高阶衍射信号分布在零频信号的四周不同位置。

由上述分析可知,以相机每个像素点作为单像素探测器,采用单像素成像算法可以重建一幅艾里斑图像,该艾里斑图像中不同位置的值表示不同物点发出的不同级次的衍射信号,因此,当数字针孔位于共轭物点发出的零频信号形成的点 O_c ,可抽取共轭物点发出的零频信号,如图2(a1)~(c1)所示;将数字针孔相对 O_c 偏置一段距离 r ,可抽取非共轭物点发出的高阶衍射信号,如图2(a2)~(c2)所示。改变数字针孔的偏置距离,可以抽取不同非共轭物点发出的不同级次的衍射信号;将这些抽取的信号按照相机像素坐标排列,可以组建不同模式的图像。其中 P 表示设计的数字针孔。

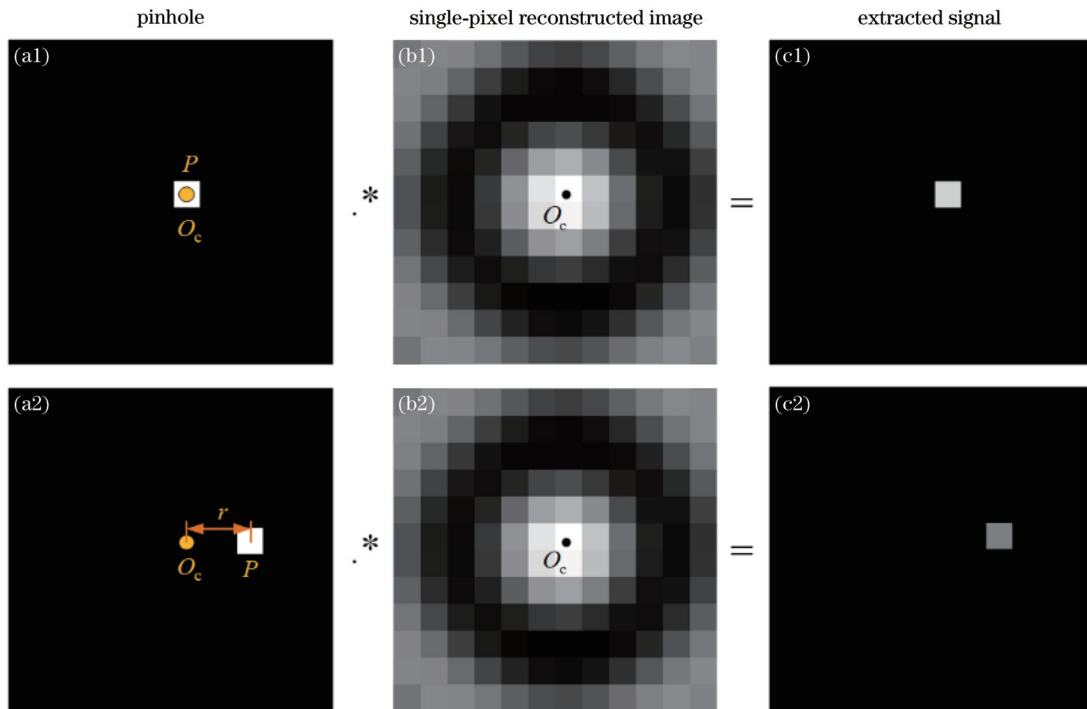


图2 设计数字针孔从单像素重建的艾里斑图像中抽取不同位置的值。(a1)~(c1)设计数字针孔抽取共轭物点发出的零频信号;(a2)~(c2)设计数字针孔抽取非共轭物点发出的高阶衍射信号

Fig. 2 Design digital pinholes to extract values at different positions from single pixel reconstructed Airy spot images. (a1)~(c1) Design digital pinholes to extract zero-order signals from the conjugated object point; (a2)~(c2) design digital pinholes to extract high-order diffraction signals from non-conjugated object points

为了验证上述方法,将一分辨率板图像(800×800 像素)作为对象,进行仿真模拟。模拟实验中物镜的放大率为20,数值孔径为0.4,照明波长为620 nm,

为了计算方便,空间光调制器和相机的像元尺寸均为 $6.9 \mu\text{m}$,两者的像元一一对齐。此外,为了减少测量次数,采用区域延拓方法^[25],首先生成一幅 80×80 像

素的傅里叶基底图案,然后将该傅里叶基底图案沿着水平和垂直方向周期性延拓 10×10 次,得到一幅 800×800 像素的傅里叶基底图案,对样品的图像进行编码。

如图 3(a1)所示,如果数字针孔的位置与共轭物点发出的零频信号形成的点 O_c 重合,那么通过数字针孔可抽取共轭物点发出的零频信号。将抽取的零频信号按照相机像素坐标排列,可以组建明场图像,如图 3(b1)所示。如果数字针孔的位置相对 O_c 偏置 2 个像

素,如图 3(a2)所示,那么通过数字针孔可抽取非共轭物点发出的高阶衍射信号。将这些高阶衍射信号按照相机像素坐标排列,可以组建一幅偏置的明场图像,如图 3(b2)所示。当偏置针孔位于艾里斑第一个暗环附近时,如图 3(a3)~(a5)所示,重建的图像特性由明场变成了暗场,如图 3(b3)~(b5)所示,重建图像中出现样品的边缘;当数字针孔的位置超过第一暗环后,如图 3(a6)所示,重建图像的特性又由暗场变成明场,如图 3(b6)所示。

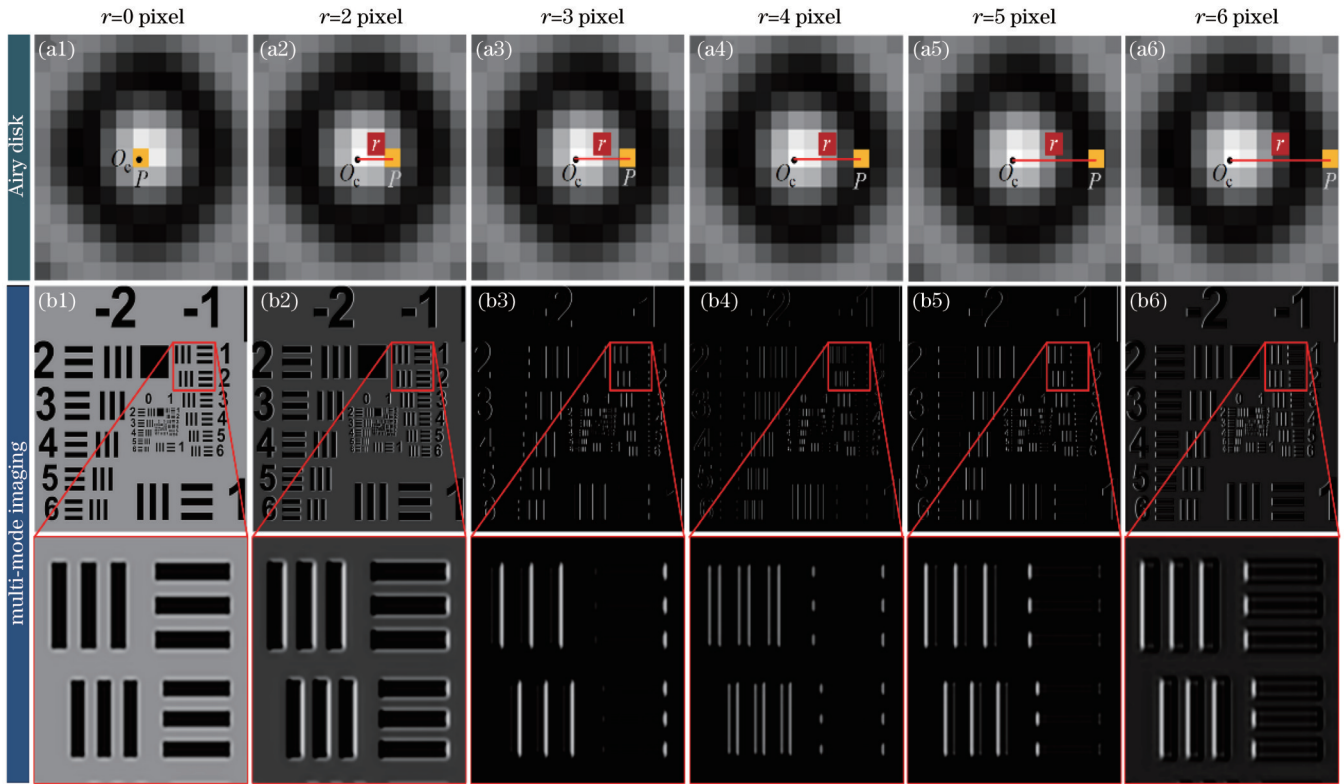


图 3 分辨率板的多模式显微成像模拟结果。(a1)~(a6)设计不同的数字针孔从单像素重建图像中抽取不同物点发出的不同级次的衍射信号;(b1)~(b6)利用抽取的不同级次的衍射信号重建的多模式图像

Fig. 3 Simulation results of multimodal microscopic imaging of resolution target. (a1)~(a6) Design different digital pinholes to extract different orders of diffraction signals from different object points in single-pixel reconstruction images; (b1)~(b6) multimodal images reconstructed using the extracted different orders of diffraction signals

与传统的多模式成像方法相比,所提方法无须更改实验装置或更换显微镜,只须设计不同的数字针孔,就可从单像素重建艾里斑图像中抽取样品不同物点发出的不同衍射级次信号,组建多模式图像。

2.4 空间光调制器和相机像素点之间的共轭关系标定方法

实际实验中,为了设计数字针孔从单像素重建图像中抽取样品不同衍射级次的信号,需要标定相机和空间光调制器像素点之间的共轭关系。由于空间光调制器的调制平面和相机光敏面都是平面,空间光调制器和相机像素点之间的共轭关系可用仿射矩阵表示。为了标定该仿射矩阵,在实验前利用空间光调制器产生一幅黑白棋盘格图案 $P_{\text{ChessBoard}}$,如图 4(a)所示;然后

将其投影到一块标定平板上,标定平板放置在物镜的焦平面,相机记录棋盘格图像 $I_{\text{ChessBoard}}$,如图 4(b)所示。利用角点提取算法^[26],可以提取棋盘格图像中的角点坐标,记为 $(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}})$,由于 $P_{\text{ChessBoard}}$ 是提前设计好的,那么在 $P_{\text{ChessBoard}}$ 中与 $I_{\text{ChessBoard}}$ 的角点对应的角点坐标是已知的,假设为 $(x_s^{\text{corner}}, y_s^{\text{corner}})$ 。角点 $(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}})$ 和 $(x_s^{\text{corner}}, y_s^{\text{corner}})$ 的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x_s^{\text{corner}} \\ y_s^{\text{corner}} \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_c^{\text{corner}} \\ y_c^{\text{corner}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c^{\text{corner}} \\ y_c^{\text{corner}} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: M 表示仿射矩阵。根据角点 $(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}})$ 和 $(x_s^{\text{corner}}, y_s^{\text{corner}})$,就可组建方程组,标定仿射矩阵 M 。

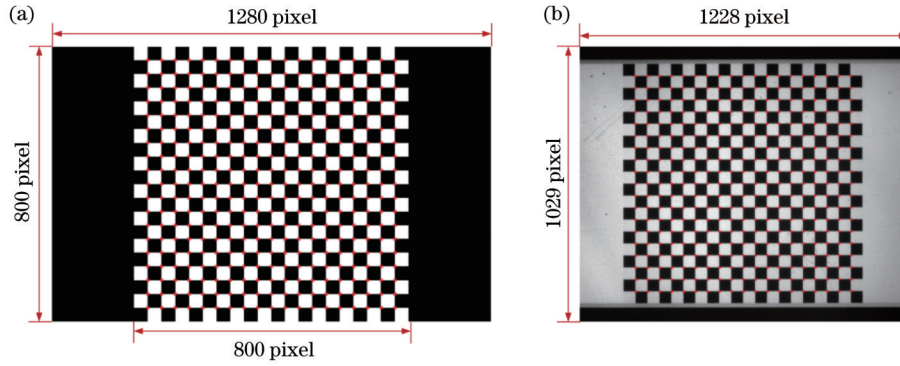


图 4 标定用的棋盘格图案和图像。(a)空间光调制器加载的棋盘格图案 $P_{\text{ChessBoard}}$; (b)相机拍摄的棋盘格图像 $I_{\text{ChessBoard}}$
 Fig. 4 Chessboard pattern and image for calibration. (a) Chessboard pattern $P_{\text{ChessBoard}}$ loaded on the spatial light modulation; (b) chessboard image $I_{\text{ChessBoard}}$ captured by the camera

标定了仿射矩阵 M 后, 就可以计算空间光调制器上与相机每个像素点 (x_c, y_c) 对应的像素点 $(x_s(x_c, y_c), y_s(x_c, y_c))$ 坐标,

$$\begin{bmatrix} x_s(x_c, y_c) \\ y_s(x_c, y_c) \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据单像素成像原理可知, 对应点 $(x_s(x_c, y_c), y_s(x_c, y_c))$ 的像素坐标就是与该像素点 (x_c, y_c) 共轭的物点发出的零频信号在重建艾里斑图像中形成的点的坐标。根据这些对应点的坐标, 就可为相机每个像素点重建的艾里斑图像设计数字针孔,

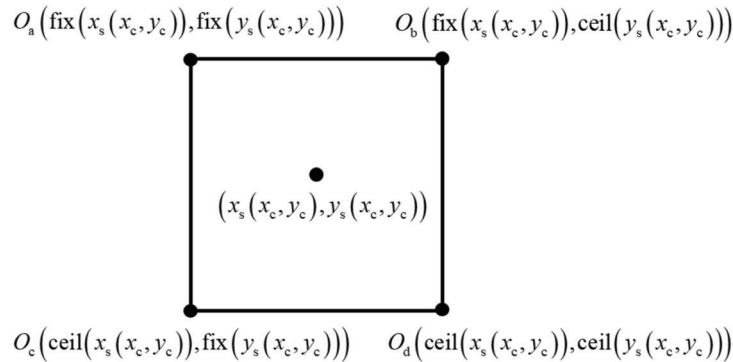


图 5 确定点 $(x_s(x_c, y_c), y_s(x_c, y_c))$ 周围最近的 4 个整数像素点 O_a, O_b, O_c, O_d 的方法

Fig. 5 Method of determining the four nearest integer pixels O_a, O_b, O_c, O_d around pixel $(x_s(x_c, y_c), y_s(x_c, y_c))$

当整数点 O_a, O_b, O_c, O_d 的像素坐标超出单像素重建图像边界时, 它们的像素坐标的计算公式为

$$\begin{cases} x = x + m, & x \leq 0 \\ x = x - m, & x \geq m \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} y = y + n, & y \leq 0 \\ y = y - n, & y \geq n \end{cases} \quad (8)$$

式中: m 和 n 分别表示单像素重建图像在 x 和 y 方向的像素数。

将每个数字针孔相对对应点

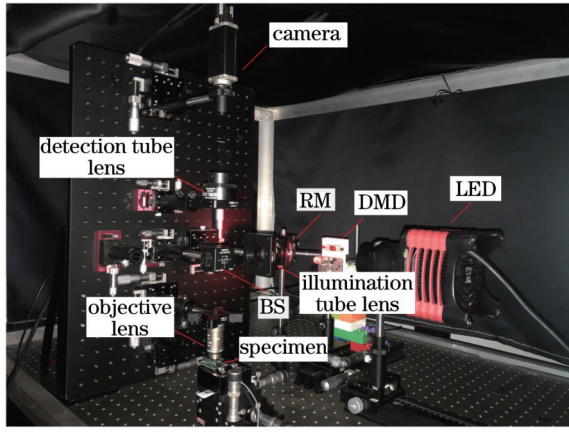
抽取共轭物点发出的零频信号。

在实际实验中, 由于相机和空间光调制的像元尺寸和像素总数通常不等, 相机和空间光调制器的像素点不是一一对应的, 通过标定得到的对应点 $(x_s(x_c, y_c), y_s(x_c, y_c))$ 的坐标一般不是整数, 而是亚像素。为了从单像素重建图像中抽取亚像素点的值, 首先采用向下取整和向上取整方法确定 4 个与它邻近的整数像素点 O_a, O_b, O_c, O_d , 如图 5 所示, 其中 $\text{fix}(\cdot)$ 表示向下取整, $\text{ceil}(\cdot)$ 表示向上取整; 然后根据这 4 个整数像素点在单像素重建图像中的值, 采用双线性插值的方法得到对应点 $(x_s(x_c, y_c), y_s(x_c, y_c))$ 的值。

$(x_s(x_c, y_c), y_s(x_c, y_c))$ 同时偏移相同的距离, 就可从单像素重建图像中抽取样品不同物点发出的相同级次的衍射信号; 改变偏置针孔的距离, 可从单像素重建图像中抽取样品上的不同物点发出的不同级次的衍射信号。

3 实 验

实验装置如图 6 所示, 实验使用功率为 3.8 W 的 LED 作为光源, 其型号为 Thorlabs SOLIS-623C, 中心



RM: reflecting mirror; DMD: digital micromirror device;
BS: beam splitter

图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setup

波长为 623 nm, 带宽为 17 nm。将数字微镜装置 (DMD) 作为空间光调制器, 其型号为 DLP VisionalFLY4500 BHGX, 像素数为 800×1280 , 像元尺寸为 $7.56 \mu\text{m}$, 实验中只使用 DMD 中央 800×800 像素加载图案。照明管镜和探测管镜的焦距均为 200 mm, 所使用物镜为平场消色差物镜, 放大倍数为 20, 数值孔径为 0.4, 相机的型号为 Basler PiA2400-17gm, 像素数为 2058×2456 , 像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ 。为了提高相机拍摄图像的信噪比, 将相机相邻的 2×2 像素捆绑作为一个宏像素使用, 因此实验中实际拍摄到的图像尺寸为 1029×1228 像素。

首先标定空间光调制器和相机像素点之间的共轭映射关系, 即仿射矩阵 M 。实验中空间光调制器加载的棋盘格图案中每个小方格为 40×40 像素, 棋盘格图案的大小为 800×800 像素。利用 2.4 节所述的标定方法, 得到仿射矩阵 M ,

$$M = \begin{bmatrix} -0.893 & -0.0798 & 119.2 \\ 0.0051 & -0.894 & 863.03 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

为了验证仿射矩阵的标定精度, 根据相机拍摄的

棋盘格图像中的角点坐标 $(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}})$ 和标定的仿射矩阵 M , 采用式 (5) 将 $(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}})$ 映射到空间光调制器上, 得到对应点 $(x_s(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}}), y_s(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}}))$, 再将 $(x_s(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}}), y_s(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}}))$ 与棋盘格图案上已知的角点坐标 $(x_s^{\text{corner}}, y_s^{\text{corner}})$ 相减, 得到重投影误差,

$$\begin{cases} \Delta x_{\text{Reprojection}} = x_s(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}}) - x_s^{\text{corner}} \\ \Delta y_{\text{Reprojection}} = y_s(x_c^{\text{corner}}, y_c^{\text{corner}}) - y_s^{\text{corner}} \end{cases} \quad (10)$$

图 7 是重投影误差, 其中横轴为 x 方向的重投影误差, 纵轴为 y 方向的重投影误差, 从图 7 可知, 重投影误差在 ± 0.25 pixel 范围内。根据标定的仿射矩阵 M , 就可以利用式 (6) 确定相机每个像素点在空间光调制器的调制平面上的对应点的坐标。根据对应点的坐标, 就可利用 2.3 节的方法生成不同的数字针孔, 重建不同模式的图像。

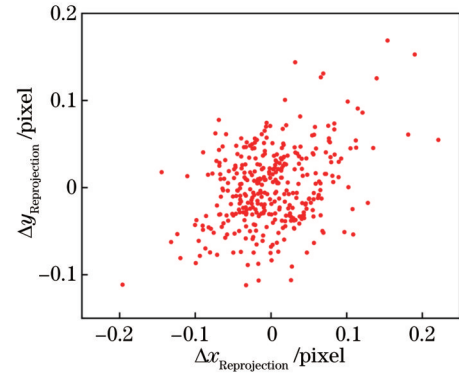


图 7 重投影误差

Fig. 7 Reprojection error

将一电路芯片作为待测样品。为了减少测量次数, 提高测量速度, 采用区域延拓方法^[25], 所投影的傅里叶基底图案是将一个像素数等于 80×80 的傅里叶基底图案在水平方向和竖直方向周期性延拓 10×10 次得到的。采用四步相移方法计算傅里叶系数, 每个

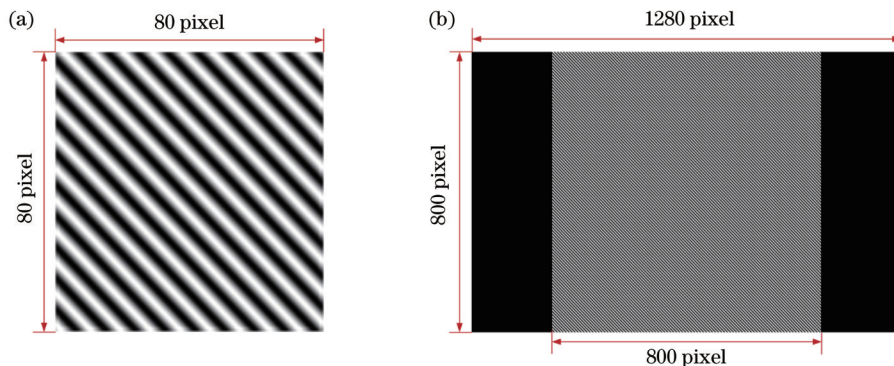


图 8 实验中使用的傅里叶基底图案。(a) 生成的 80×80 像素的傅里叶基底图; (b) 将图 8(a) 周期性延拓 10×10 次后, 再放置在 DMD 中央区域的效果

Fig. 8 Fourier basis pattern used in the experiment. (a) 80×80 pixels Fourier basis pattern generated in experiment; (b) effect after periodically extending the Fig. 8(a) 10×10 times, and then placing it in the central area of DMD

空间周期包含 4 幅相邻相位差为 $\pi/2$ 的图案。

图 8(a) 是计算机产生的一幅傅里叶基底图案, 它的尺寸为 80×80 像素, 空间频率为 $f_x = 0.1125, f_y = 0.8875$ 。图 8(b) 是采用区域延拓方法将图 8(a) 周期性延拓 10×10 次, 然后加载到 DMD 中央区域的效果。图 9(a) 是没有投影傅里叶基底图案时, 相机拍摄

的样品图像, 图 9(b) 是投影了傅里叶基底图案后, 相机拍摄的样品图像。实验中选取相机拍摄的图像中央 850×850 像素的数据进行处理。

图 10(a1) 是根据标定的结果设计数字针孔 (黄色标记点) 抽取共轭物点发出的零频信号, 图 10(b1) 是将抽取的共轭物点发出的零频信号按照相机像素坐标

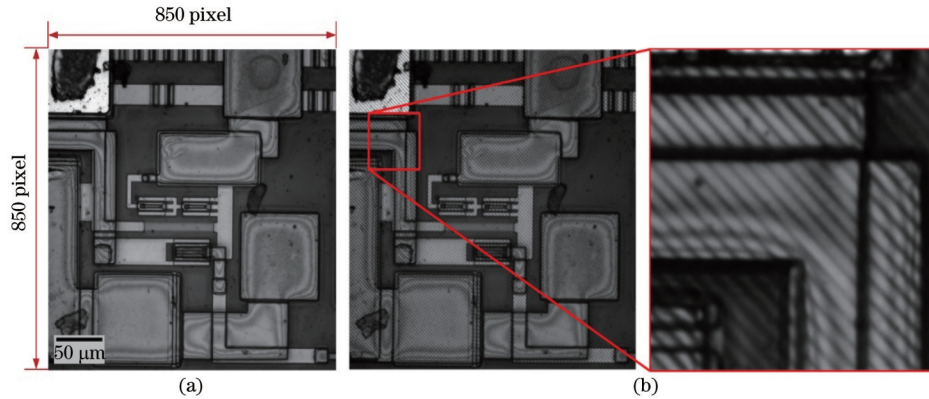


图 9 样品图像被结构照明光调制前和调制后的结果。(a) 没有投影傅里叶基底图案时相机拍摄的图像; (b) 投影傅里叶基底图案后相机拍摄的图像

Fig. 9 Result of the image of the sample before and after modulating by the structured illumination light. (a) Image captured by the camera when the image of the sample is not modulated by the Fourier basis pattern; (b) image captured by the camera when the image of the sample is modulated by the Fourier basis pattern

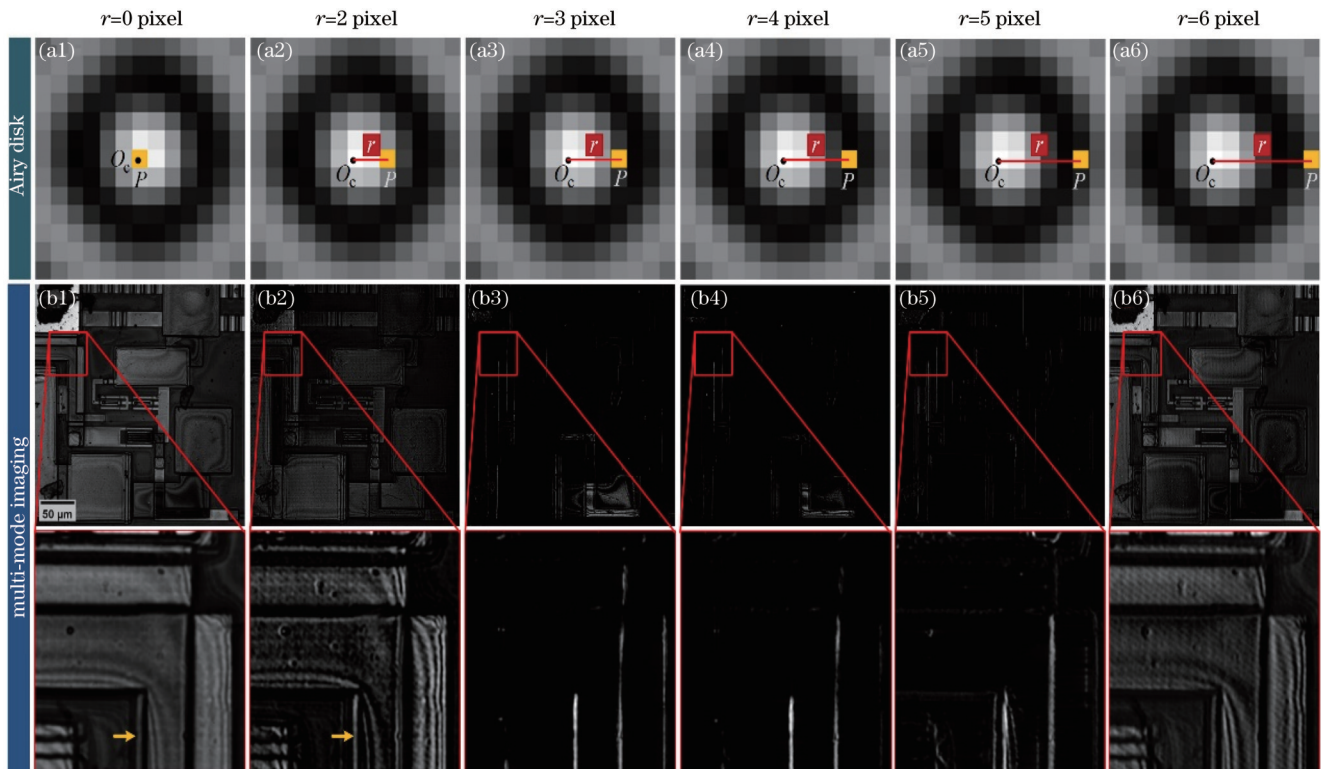


图 10 设计不同的数字针孔从单像素重建结果中抽取不同的信号组建多模式图像。(a1) 设计数字针孔抽取共轭物点发出的零频信号; (a2)~(a6) 设计偏置数字针孔抽取非共轭物点发出的高阶衍射信号, 每个数字针孔的偏置距离不等; (b1)~(b6) 根据抽取的信号重建的多模式图像

Fig. 10 Design different digital pinholes to extract different signals from single-pixel reconstruction results to form multi-mode images. (a1) Design digital pinhole to extract the zero-order signal from the conjugated object point; (a2)~(a6) design offset digital pinhole to extract the high-order diffraction signal from the non-conjugated object points; (b1)~(b6) multimodal images reconstructed using the extracted signals

排列得到的图像,与图 9 相比,条纹没有调制到的区域(即离焦区域)在重建结果[图 10(b1)]中都变暗了,表明所提方法能够抑制离焦背景噪声。图 10(a2)是将数字针孔(黄色标记点)相对标定的对应点坐标偏置 2 个像素抽取的高阶衍射信号,图 10(b2)为利用抽取的高阶衍射信号组建的图像。对比图 10(b1)和图 10(b2)可知,利用偏置针孔抽取的高阶衍射信号组建的明场图像比抽取零频信号组建的明场图像的对比度更高。当数字针孔位于艾里斑第一个暗环的位置,如图 10(a3)~(a5)所示,重建的是暗场图像,如图 10(b3)~(b5)所示。当数字针孔的位置超过艾里斑第一个暗环时,如图 10(a6)所示,重建的图像又变成明场图像,如

图 10(b6)所示。与图 10(b1)相比,图 10(b6)是高阶衍射信号组成的图像,因此它的对比度和分辨率更高。

尽管采用上述方法能够获得不同模式的图像,但重建的图像是各向异性的,如图 11 所示,在水平方向和垂直方向将数字针孔相对标定的对应点坐标偏置 2 个像素,得到的图像的对比度和分辨率是不同的。如图 11(b1)和图 11(b2)中的局部放大图所示,当数字针孔相对标定的对应点坐标往水平方向偏置时,样品的垂直方向的结构在重建图像的对比度和分辨率更高;当数字针孔相对标定的对应点坐标往垂直方向偏置时,样品的水平方向的结构在重建图像的对比度和分辨率更高。

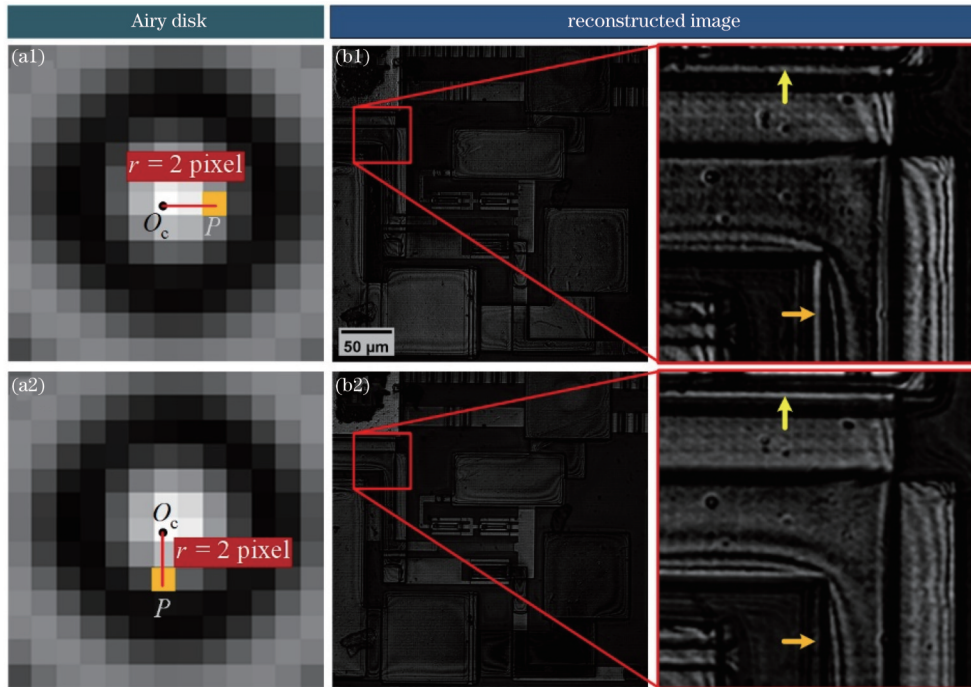


图 11 抽取不同方位的偏置信号重建的图像。(a1)设计水平方向偏置的针孔抽取高阶衍射的信号;(b1)利用水平方向偏置的针孔抽取的高阶衍射信号重建的图像;(a2)设计垂直方向偏置的针孔抽取高阶衍射信号;(b2)利用垂直方向偏置的针孔抽取的高阶衍射信号重建的图像

Fig. 11 Images reconstructed by using the offset signals extracted from different directions. (a1) Design horizontal offset pinholes to extract high-order diffraction signals; (b1) image reconstructed from higher-order diffraction signals extracted using a horizontally offset pinhole; (a2) design vertical offset pinholes to extract high-order diffraction signals; (b2) image reconstructed from higher-order diffraction signals extracted using a vertically offset pinhole

为了获得各向同性的结果,设计一组数字针孔,如图 12(a1)~(a3)所示,这些数字针孔与标定的对应点的距离相等,但方位角不同。利用这些数字针孔从重建的艾里斑图像中抽取同一半径、不同方位的信号,分别组建不同的图像,如图 12(b1)~(b3)所示。由 2.2 节内容可知,将相机每个像素点作为单像素探测器,采用单像素重建算法重建的图像是由不同物点发出的不同级次的衍射信号组成的,因此从单像素重建图像中抽取的同一半径、不同方位的信号代表不同物点发出的衍射信号。将这些抽取的信号按照相机像素坐标排列,组建的图像相互之间有错位,如图 12(b1)~(b3)所示。

为了将这些相互错位的图像融合,获得各向同性的图像,选择由抽取的零频信号组建的图像作为基准,计算从同一半径、不同方位抽取的信号组建的图像相对基准图像的平移量,根据平移量将图像平移,再将平移后的图像叠加,即可获得各向同性的图像,如图 12(c)所示。为了比较,图 12(d)给出了没有经过平移,直接将同一半径、不同方位抽取的信号组建的图像[如图 12(b1)~(b3)所示]相加得到的结果。比较图 12(c)和图 12(d)可知,经过平移后再叠加得到的结果对比度更高。

图 13 给出了上述方法重建各向同性的多模式像结果,其中图 13(a1)是根据标定的对应点坐标设计

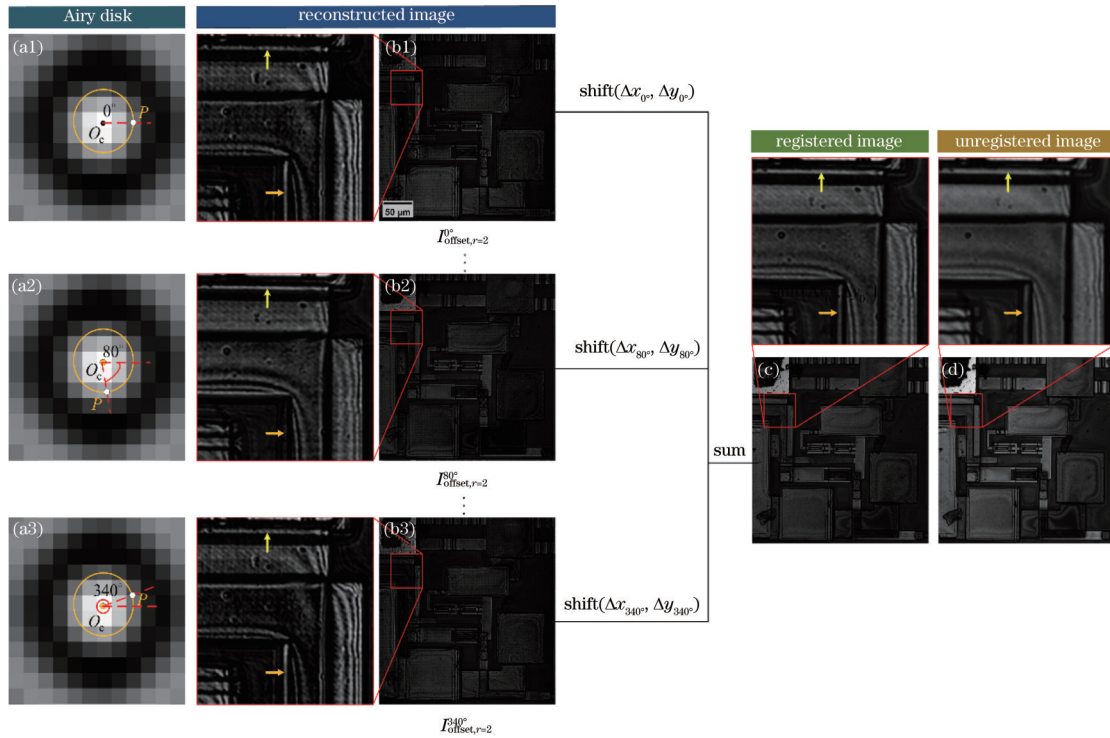


图 12 获取各向同性的偏置图像的方法。(a1)~(a3)设计不同方向的数字针孔,抽取不同方向的偏置信号;(b1)~(b3)从不同方向抽取的偏置信号组建的图像;(c)将图 12(b1)~(b3)先配准再相加得到的结果;(d)将图 12(b1)~(b3)直接相加得到的结果
 Fig. 12 Method of reconstructing isotropic offset images. (a1)~(a3) Design digital pinholes in different directions to extract bias signals in different directions; (b1)~(b3) image constructed using bias signals extracted in different directions; (c) result obtained by first registering Figs. 12 (b1)~(b3) and then sum; (d) result obtained by directly sum Figs. 12(b1)~(b3)



图 13 设计不同的数字针孔重建各向同性的多模式图像。(a1)设计数字针孔抽取共轭物点发出的零频信号;(a2)~(a4)设计偏置的数字针孔从不同方向抽取非共轭物点发出的高阶衍射信号;(b1)~(b4)利用从不同方向抽取的信号重建的各向同性的多模式图像
 Fig. 13 Reconstruction of isotropic multimodal images using differently designed digital pinholes. (a1) Design digital pinhole to extract the zero-order signal from the conjugated object point; (a2)~(a4) design offset pinholes to extract high-order diffraction signals from non-conjugated object points in different directions; (b1)~(b4) isotropic multimodal images reconstructed using signals extracted from different directions

数字针孔抽取共轭物点发出的零频信号,图 13(a2)~(a4)是将数字针孔相对标定的对应点分别偏置 2 个像素、3 个像素和 4 个像素,设计圆形数字针孔(黄色圆)抽取的不同物点衍射的不同级次的信号,图 13(b1)~(b4)是将抽取的信号按照相机像素坐标排列重建的各向同性的多模式图像。与图 10(b2)~(b4)相比,图 13(b2)~(b4)给出的多模式图像在不同方向上的分辨率相同,具有各向同性。

为了进一步定量比较重建的多模式图像,采用所提方法对分辨率板(Extreme Microscope Resolution Target-USAF)进行多模式成像,实验参数和前面实验中所使用的参数相同,重建的多模式结果如图 14 所

示。其中图 14(a1)是设计数字针孔抽取共轭物点发出的零频信号,图 14(a2)~(a4)是将数字针孔相对标定的对应点分别偏置 2 个像素、3 个像素和 4 个像素,设计圆形数字针孔(黄色圆)抽取的不同物点衍射的不同级次信号,图 14(b1)~(b4)是将抽取的信号按照相机像素坐标排列重建的各向同性的多模式图像,图 14(c)是多模式图像[图 14(b1)~(b4)]在第 9 组第 4 级(橙色虚线处)的强度分布图。与利用零频信号组建的明场图像相比,利用偏置的针孔抽取的高阶衍射信号组建的明场图像的对比度更高。当数字针孔的位置接近艾里斑第一暗环附近时,重建的结果变成暗场图像,出现待测样品的边缘信息。

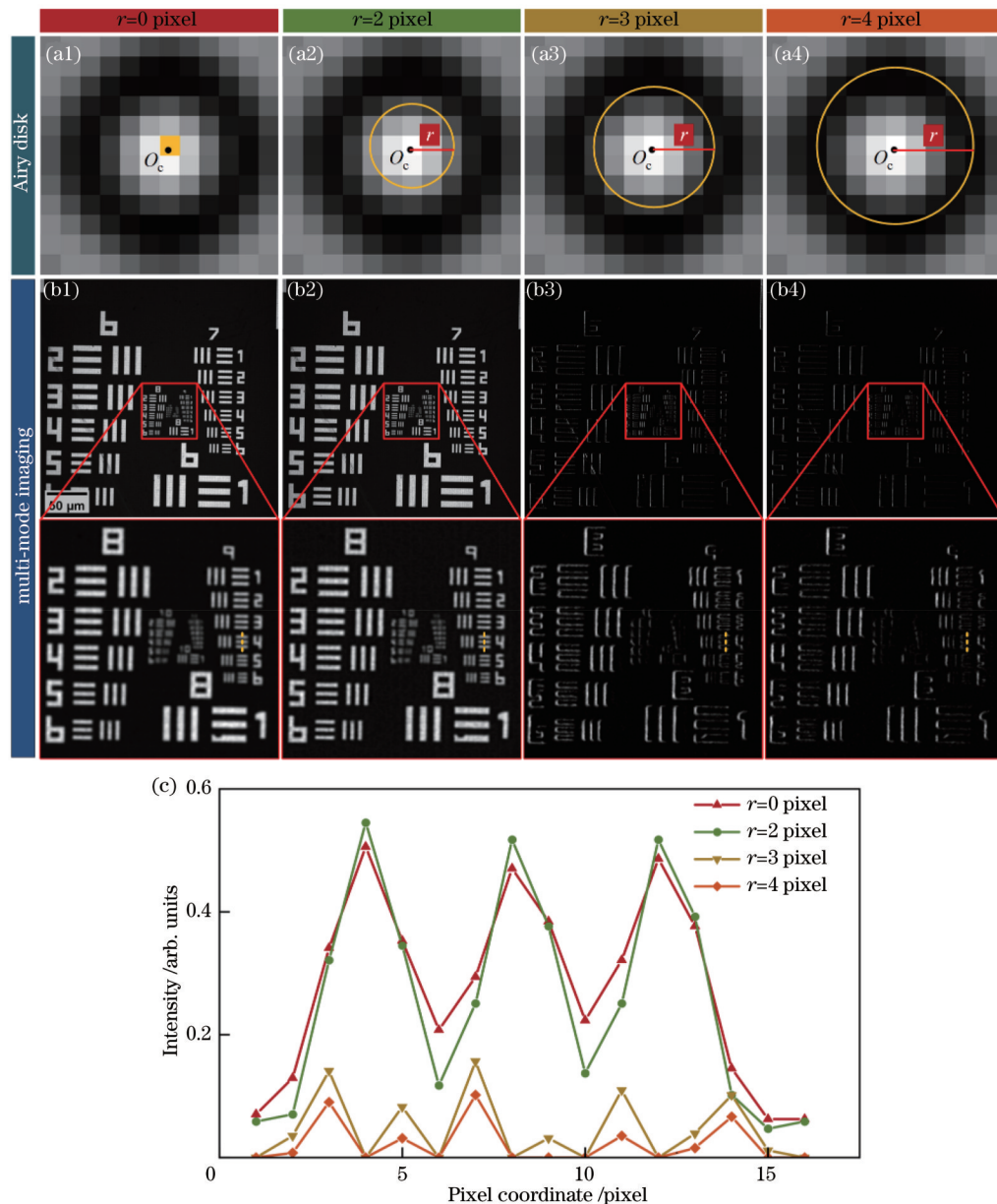


图 14 分辨率板的多模式图像。(a1)~(a4)设计数字针孔抽取不同的信号;(b1)~(b4)利用抽取的信号重建的多模式图像;(c)虚线处的轮廓

Fig. 14 Multimode images of resolution target. (a1)~(a4) Design digital pinhole to extract different signals; (b1)~(b4) multimodal images reconstructed using extracted signals; (c) profiles at the dash lines

4 结 论

提出了一种基于单像素成像原理的多模式显微成像技术。该技术将相机每个像素点作为单像素探测器,重建一幅艾里斑图像,艾里斑图像中不同位置的值得表示样品不同物点衍射的不同级次的信号。实验结果表明:该技术无须改变实验装置或者更换不同的显微镜,通过设计不同的数字针孔,从重建的艾里斑图像中抽取不同位置的光强值,就可得到样品不同物点发出的不同级次的衍射信号;将这些抽取的信号按照相机像素坐标排列,就可重建不同模式的图像,如明场成像、偏置成像及暗场成像。这些多模式图像的视场相同,有利于对样品进行综合分析,获取样品完整的形貌特征。所提方法采用的傅里叶单像素成像算法包含差分运算,因此能够抑制离焦背景噪声。但由于采用单像素成像方法,成像时间比传统的多模式显微成像方法所需的成像时间长,以本文的实验结果为例,采用 Intel (R) Core (TM) i7-10700 CPU @ 2.90 GHz, 32.0 GB 内存,重建 4 幅像素数为 850×850 的多模式图像需要 4 min 左右,其计算时间取决于图像像素数,因此所提方法不适用于动态场景的成像。尽管如此,实验结果表明所提方法在对静态样品成像时具有明显的优势,能够利用同一套实验装置、相同的实验数据获取多模式图像。作为一种新的计算成像方法,所提方法有望在微纳器件的离线表征中得到应用。

参 考 文 献

- [1] Murphy D B, Davidson M W. Fundamentals of light microscopy and electronic imaging[M]. 2nd ed. New Jersey: Wiley, 2012.
- [2] Zheng G A, Kolner C, Yang C. Microscopy refocusing and dark-field imaging by using a simple LED array[J]. Optics Letters, 2011, 36(20): 3987-3989.
- [3] Zuo C, Sun J S, Feng S J, et al. Programmable aperture microscopy: a computational method for multi-modal phase contrast and light field imaging[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 80: 24-31.
- [4] 左超, 陈钱. 计算光学成像: 何来, 何处, 何去, 何从? [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 20220110.
- [5] Zuo C, Chen Q. Computational optical imaging: an overview [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(2): 20220110.
- [6] 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.
- [7] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. Science, 2013, 340(6134): 844-847.
- [8] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. Nature Communications, 2016, 7: 12010.
- [9] Phillips D B, Sun M J, Taylor J M, et al. Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling[J]. Science Advances, 2017, 3(4): e1601782.
- [10] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging[J]. Nature Photonics, 2019, 13(1): 13-20.
- [11] Sun M J, Zhang J M. Single-pixel imaging and its application in three-dimensional reconstruction: a brief review[J]. Sensors, 2019, 19(3): 732.
- [12] Gibson G M, Johnson S D, Padgett M J. Single-pixel imaging 12 years on: a review[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 28190-28208.
- [13] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(12): 121105.
- [14] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. Optica, 2014, 1(5): 285-289.
- [15] 孙宝清, 江山, 马艳洋, 等. 单像素成像在特殊波段及三维成像的应用发展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303016.
- [16] Sun B Q, Jiang S, Ma Y Y, et al. Application and development of single pixel imaging in special wave band and three-dimensional imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303016.
- [17] 赵海潇, 郭岩, 李珮明, 等. 单像素成像信噪比分析及其在特殊波段的发展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011010.
- [18] Zhao H X, Guo Y, Li P M, et al. Investigation of single-pixel imaging in signal-to-noise ratio and its development at special wavelength[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011010.
- [19] Peng J Z, Yao M H, Cheng J J, et al. Micro-tomography via single-pixel imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31094-31105.
- [20] 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.
- [21] 钟金钢, 姚曼虹, 彭军政. 计算傅里叶显微成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811009.
- [22] Zhong J G, Yao M H, Peng J Z. Progress in computational Fourier microscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811009.
- [23] Zhang Z B, Ye J Q, Deng Q W, et al. Image-free real-time detection and tracking of fast moving object using a single-pixel detector[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35394-35401.
- [24] Zhang Z B, Yao M H, Li X, et al. Simultaneous functional and structural imaging for photovoltaic devices[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 193: 101-106.
- [25] Jiang H Z, Zhai H J, Xu Y, et al. 3D shape measurement of translucent objects based on Fourier single-pixel imaging in projector-camera system[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 33564-33574.
- [26] 赵慧洁, 李宇曦, 姜宏志, 等. 复杂光照条件下的高精度三维成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811018.
- [27] Zhao H J, Li Y X, Jiang H Z, et al. High-precision 3D-imaging technology under complex illumination[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811018.
- [28] Jiang W J, Yin Y K, Jiao J P, et al. 2, 000, 000 fps 2D and 3D imaging of periodic or reproducible scenes with single-pixel detectors[J]. Photonics Research, 2022, 10(9): 2157-2164.
- [29] Zhang Z B, Ma X, Zhong J G. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6225.
- [30] Jiang H Z, Li Y X, Zhao H J, et al. Parallel single-pixel imaging: a general method for direct-global separation and 3D shape reconstruction under strong global illumination[J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129(4): 1060-1086.
- [31] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C]//Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988, September 1988, Manchester. London: Alvey Vision Club, 1988: 147-152.

Multi-Mode Microscopic Imaging Technique Based on Single-Pixel Imaging Principle

Li Dongzhe¹, Zhou Weishuai¹, Huang Suyi¹, Yao Manhong², Li Shiping^{1,3},
Peng Junzheng^{1,3*}, Zhong Jingang^{1,3**}

¹*Department of Optoelectronic Engineering, College of Science & Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China;*

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

³*Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China*

Abstract

Objective In the manufacturing of micro-nano devices such as semiconductor chips, their morphology characterization is helpful for manufacturing process evaluation and defect detection. To obtain complete information on the sample to be tested, one has to use bright field microscopes and dark field microscopes for joint characterization of multiple imaging modes. However, the existing methods to achieve multi-mode imaging need to change the experimental device or adopt a different imaging system, which leads to different fields of view of the acquired multi-mode images and is not conducive to comprehensively analyzing the samples to be tested by synthesizing the multi-mode imaging results. Therefore, it is necessary to develop multi-mode microscopic imaging technology to deal with the above problems. For example, microscopes based on LED array light source and multi-mode microscopic imaging technology using spatial light modulators are utilized to perform different filtering in the spectral plane of traditional microscopes.

Methods Our paper proposes a multi-mode microscopic imaging technology based on the single-pixel imaging principle. It employs wide-field structured light to encode the spatial information of the sample and then leverages each pixel of the camera as a single-pixel detector to reconstruct an Airy image. Different points on the Airy disk image correspond to different orders of signals diffracted by different object points. Therefore, by designing different digital pinholes to extract the values at different positions on the Airy disk image and arranging them according to the camera pixel coordinates, multi-mode images can be reconstructed, such as bright field images, bias images, and dark field images.

Results and Discussions To design the digital pinhole to extract the signals of different diffraction orders of the sample, we should calibrate the conjugate relationship between the camera and the pixels of the spatial light modulator. We adopt an affine matrix to represent the correspondence between the camera and the spatial light modulator, and the calibrated reprojection error is shown in Fig. 7. After the affine matrix is calibrated, digital pinholes can be generated according to the calibrated affine matrix. The proposed method is employed to perform multi-modal imaging on a circuit chip and obtain the multi-modal results shown in Fig. 10. However, due to the directionality of digital pinholes, the reconstructed multimodal results are also anisotropic. To obtain isotropic multi-mode results, we design digital pinholes with the same radius and different directions as shown in Fig. 12 to obtain multiple images and then synthesize these images to obtain isotropic results. The isotropic multi-mode results are shown in Fig. 13. We have also verified through the resolution board experiment (Fig. 14) that the contrast of the bright field images reconstructed by extracting the bias signals is higher than that of the bright field images constructed by extracting the zero-frequency signals.

The proposed method adopts a Fourier single-pixel imaging algorithm that includes a differential operation to enable the suppression of out-of-focus background noise. However, due to the utilization of single-pixel imaging, the measurement number of the proposed method is more than that of the traditional multi-mode microscopic imaging method. Through taking the experimental results in our paper as an example and employing Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90 GHz, 32.0 GB memory, it takes about 4 min to reconstruct four multi-mode images with a pixel count of 850×850 , and the calculation time depends on the image number of pixels. Therefore, the proposed method is not suitable for dynamic imaging scenes.

Conclusions Our paper proposes a multi-mode microscopic imaging technique based on the single-pixel imaging principle. It adopts each pixel of the camera as a single-pixel detector to reconstruct an Airy disk image, and the values at different positions in the Airy disk image represent different orders of signals diffracted by different object points. The experimental results show that this technology does not need to change the experimental device or replace different

microscopes. By designing different digital pinholes, the light intensity values at different positions can be extracted from the single-pixel reconstructed Airy disk images. These light intensity values correspond to different orders of diffraction signals from different object points. By arranging these extracted signals according to the camera pixel coordinates, images of different modes can be reconstructed, such as bright field imaging, bias imaging, and dark field imaging. The fields of view of these multi-mode images are the same, which is conducive to the comprehensive analysis and acquisition of the complete shape characteristics of the samples. As a new computational imaging method, the proposed method is expected to be applied to the offline characterization of micro-nano devices.

Key words multi-mode microscopic imaging; single-pixel imaging; bright field imaging; bias imaging; dark field imaging