

## 基于集成光束分配芯片的空间叠层衍射成像

杜振民<sup>1,2</sup>, 胡成洋<sup>1,2</sup>, 符庭钊<sup>1,2</sup>, 陈明华<sup>1,2</sup>, 杨四刚<sup>1,2</sup>, 陈宏伟<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>清华大学电子工程系, 北京 100084;

<sup>2</sup>北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084

**摘要** 空间叠层衍射成像是一种基于相干光的无透镜成像方式,因此可以避免透镜系统孔径有限带来的衍射极限问题。目前,空间叠层衍射成像方案多采用机械结构对光探针进行平移,这种方式会使光探针的位置产生偏移误差,导致成像质量的下降。为解决这一问题,利用硅基光子集成技术设计并制作了基于滤波器件的光束空间分配芯片,该芯片上共有 16 个发射天线,相当于 16 个光探针,光探针阵列以一定的交叠率照射物体,其衍射图样强度被红外相机的不同感光区域记录。该芯片可以替代传统的机械式光探针来实现空间叠层衍射成像。百纳米级的加工工艺降低了光探针位置的偏移误差,提高了成像的质量和系统的稳定性。同时,由于集成芯片的尺寸仅有毫米级别,故成像系统的尺寸也可相应地减小。

**关键词** 成像系统; 相干成像; 光子集成; 红外成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1517004

### 1 引言

传统的成像方案一般都有透镜系统参与<sup>[1-4]</sup>,理想透镜的响应函数是一个冲激函数<sup>[5]</sup>,因此点光源通过一个理想透镜之后在像面上所成的像仍然是一个点。但是普通透镜的响应函数是透镜支撑域的傅里叶变换,这会导致点光源经透镜成像后表现为一个弥散的亮斑,进而限制物体的分辨率,即透镜衍射极限<sup>[6-7]</sup>。无透镜成像方案的提出解决了透镜系统衍射极限导致分辨率受限的问题。相干衍射成像是无透镜成像方案中备受关注的一种方案<sup>[8]</sup>。理论上,相干衍射成像的分辨率可以达到无穷大。但实际上,由于在相干衍射成像中物体和其共轭翻转的功率谱完全一致,故算法恢复过程经常会出现本征模糊的问题<sup>[9-10]</sup>。为了解决这一问题,空间叠层衍射成像应运而生。

空间叠层衍射成像是在相干衍射成像的基础上让样本和光探针发生相对运动,并且相邻光探针存在一定的交叠率。光探针依次记录物体的多幅衍射

图样,利用相邻光探针之间的冗余信息使得恢复算法迅速收敛<sup>[11]</sup>。光探针的交叠部分会对算法产生限制,这样就消除了相干衍射成像中存在的本征模糊问题。对于空间叠层衍射成像来说,影响其成像质量的主要因素有光探针形状的稳定性和光探针位置的准确性、相邻光探针交叠率以及采集到的衍射图样的质量。近年来,大批研究者为了改善空间叠层衍射成像的效果做出了许多工作。早在 2008 年,就有研究人员分析了光探针相干度对成像效果的影响<sup>[12]</sup>。而后又有研究人员利用挡板遮挡零级衍射光的方法解决了采集到的衍射图样低频分量功率过强而高频分量功率较弱的问题<sup>[13]</sup>。还有研究人员提出可以在光探针运动过程中同步采集物体的衍射图样而不是光探针停留一次采集一次,这极大地提高了成像的帧率<sup>[14]</sup>。对于光探针位置误差的问题,有研究人员提出可以对光探针进行随机编码调制,增加先验信息,以对抗光探针位置误差带来的影响<sup>[15]</sup>,或者使用退火算法从算法层面降低光探针位置误差对成像质量的影响<sup>[16]</sup>。

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-06-16; 录用日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(61771284)、清华大学国强研究院项目(2020GQG1010)

通信作者: \*chenhw@mail.tsinghua.edu.cn

对于空间叠层衍射成像来说,影响其成像质量的最大因素就是光探针的位置误差。虽然上述部分方法可以降低这一误差对成像质量的影响,但是上述方法是以提升系统与算法复杂度为代价的,并没有从根本上解决这一问题。本文在硅基集成平台上设计并制作了一种新型的光束分配芯片,芯片上每一个光发射天线出射的光经透镜准直后都是一个光探针。由于每个光发射天线的相对位置是固定的,因此无论光发射天线是同时出射还是单个出射,光探针的位置都不会出现误差。同时由于芯片的尺寸仅有毫米量级,因此系统的整体尺寸也可极大地缩小。

## 2 基本原理

### 2.1 空间叠层衍射成像原理

空间叠层衍射成像的成像过程如图 1 所示。从图 1 可以看出,空间叠层衍射成像的光路与相干衍射成像的光路基本相同。所不同的是在空间叠层衍

射成像的过程中,光探针相对样本存在位移,光探针通过二维扫描逐渐覆盖整个成像区域。对大多数样本来说,圆形探针的恢复效果最为理想<sup>[17]</sup>。相邻光探针之间可能存在一定比例的交叠。交叠率可以表示为

$$o_t = 1 - \frac{d}{2r}, \quad (1)$$

式中  $d$  代表相邻两个光探针照射在样本上时的距离,  $r$  代表光探针的半径。如图 1(b) 所示,光探针照射样本上之后,就会携带所照射区域的幅度和相位信息,根据夫琅禾费衍射定律,可知远场中会生成物体的夫琅禾费衍射图样。用电荷耦合元件(CCD)去记录每个光探针在远场呈现的衍射强度图。由于物体的夫琅禾费衍射图样强度与傅里叶频谱强度呈正比关系,因此在 CCD 上相当于获得了物体的频谱强度。将所有光探针的衍射图样代入叠层迭代引擎(PIE)恢复算法就可以恢复出待测物体的幅度和相位信息。整个 PIE 算法恢复过程的步骤如下。

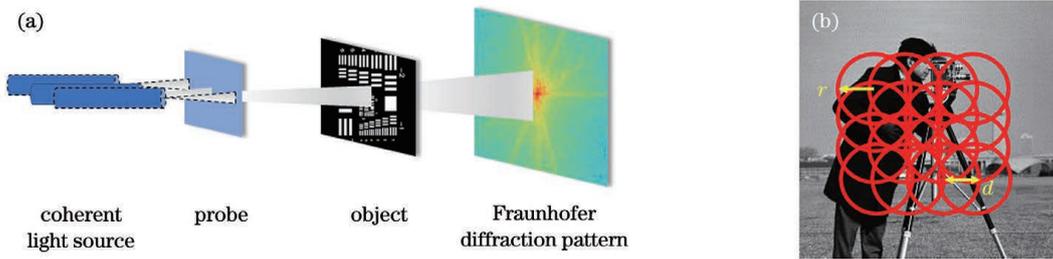


图 1 空间叠层衍射成像示意图。(a)成像光路;(b)相邻光探针交叠

Fig. 1 Schematic diagrams of Ptychography. (a) Imaging optical path; (b) overlapping of adjacent probes

1) 随机估计出物体的初始空间分布  $O_0(x, y) = |O_0(x, y)| \exp[j\varphi_0(x, y)]$ , 其中  $\varphi_0(x, y)$  表示物体的初始相位。

2) 对于初始的物体空间分布,可以得到第  $(m, n)$  次扫描中光探针通过物体之后的光场为  $O_0^{(m, n)}(x, y) = O_0(x, y)p(x - x_m, y - y_n)$ , 其中由于光探针的排布是二维排布,故其扫描过程也是二维扫描,即其扫描的次数共有  $x, y$  两个维度的索引,第  $(m, n)$  次扫描表示光探针移动到第  $m$  行、第  $n$  列的位置,此时光探针中心的位置为  $(x_m, y_n)$ ,  $p(x - x_m, y - y_n)$  代表第  $(m, n)$  次扫描中的光探针的光场分布。同时可以得到第  $(m, n)$  次扫描中光探针所照射的物体的衍射强度分布为  $U_0^{(m, n)}(x', y')$ 。

3) 用 CCD 上记录得到的第  $(m, n)$  次的扫描衍射图样强度替代第 2) 步中得到的衍射图样的幅度部分,从而得到一个新的衍射图样分布  $U_1^{(m, n)}(x', y')$ , 对  $U_1^{(m, n)}(x', y')$  作傅里叶逆变换得到下一次迭代中物体的空间分布  $O_1(x, y)$ 。

4) 移动光探针,将光探针的空间分布更新为  $p_{m+1, n}(x - x_{m+1}, y - y_n)$ 。

5) 重复步骤 1) 至步骤 4), 直到光探针遍历整个物体,完成一次迭代,进入下一次迭代。

6) 迭代过程一直运行到误差函数小于某一个阈值为止。误差函数的表达式为

$$E_k = \sum_{m=1, n=1}^{M, N} \sum_{a=1, b=1}^{I, J} (|U_k^{(m, n)}| - \sqrt{T_{(m, n)}})^2, \quad (2)$$

式中  $|U_k^{(m, n)}|$  代表在第  $k$  次迭代中第  $(m, n)$  次扫描得到的远场衍射分布的幅度值,而  $\sqrt{T_{(m, n)}}$  则代表 CCD 上记录的第  $(m, n)$  次扫描得到的物体的实际远场衍射图样的幅度值。

光探针本身的性质对 PIE 算法的恢复结果影响很大,尤其是相邻光探针之间的交叠率以及光探针的位置误差。下面将理论分析不同交叠率和不同光探针误差对同一个样本恢复效果的影响。

### 2.2 光探针交叠率对成像质量的影响

本研究采用  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的灰度图像

作为样本,且样本相位值为 0。光探针形状为圆形,其半径为 43 pixel。如前文所述,光探针的交叠率由相邻光探针之间的距离决定,因此通过改变相邻光探针之间的距离就可以改变其交叠率。为了研究光探针的交叠率与成像质量之间的关系,将相邻光探针的交叠率分别设置为 0.6、0.7、0.8、0.9,保持光探针大小和形状不变,观察 500 次迭代之后 PIE 恢复算法在不同交叠率下所对应的误差函数值(见表 1)以及恢复出来的图像

质量(见图 2)。

表 1 展示了在不同交叠率的情况下迭代 500 次之后 PIE 算法得到的误差函数的大小。

表 1 不同交叠率下恢复算法迭代 500 次得到的误差函数值

Table 1 Error obtained by 500 iterations of PIE under different overlap ratios

Overlap ratio	0.6	0.7	0.8	0.9
Error / $10^{-4}$	2.58	1.85	1.6	22.7

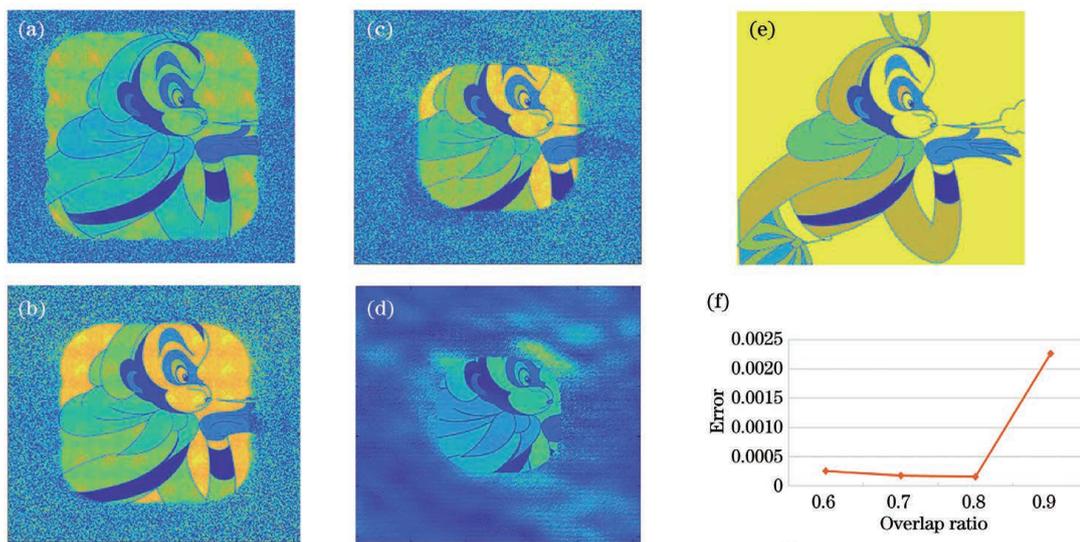


图 2 不同交叠率下 PIE 算法迭代 500 次后恢复出的样本幅度分布。(a)交叠率为 0.6 时的恢复样本图像;(b)交叠率为 0.7 时的恢复样本图像;(c)交叠率为 0.8 时的恢复样本图像;(d)交叠率为 0.9 时的恢复样本图像;(e)原始样本图像;(f)500 次迭代后误差函数随交叠率的变化

Fig. 2 Sample recovered by 500 iterations of PIE under different overlap ratios. (a) Recovered sample at overlap ratio of 0.6; (b) recovered sample at overlap ratio of 0.7; (c) recovered sample at overlap ratio of 0.8; (d) recovered sample at overlap ratio of 0.9; (e) object; (f) error obtained by 500 iterations of PIE under different overlap ratios

从图 2 和表 1 可以看出,对于 PIE 恢复算法来说,光探针的交叠率对成像质量的影响是很大的,成像的质量与交叠率的大小并不是简单的单调增加或降低,而是在 0.8 的时候达到误差函数的最小值。交叠率从较小的值过渡到 0.8 的时候,误差函数的降低是比较缓慢的,但是超过 0.8 之后,误差函数开始急剧增大,成像质量迅速恶化。

因此,在空间叠层衍射成像中,要使得算法最终获得好的恢复质量,将光探针之间的交叠率设置为 0.8 最为合适。但是从图 2 也可以看出,交叠率的增大的同时,成像视场相应地变小,因此,在光探针尺寸较小的情况下,一味地追求成像质量,让交叠率达到 0.8,会使视场过于狭小。考虑到算法的恢复效果在 0.6~0.8 的范围内变化并不像超过 0.8 之后那么剧烈,故可以针对成像质量与成像视场的具体需求,从 0.6~0.8 的范围内选择合适的光探针交叠率。

### 2.3 光探针位置误差对成像质量的影响

为探究光探针位置稳定性对最终成像质量的影响,在光探针位置存在不同程度误差的情况下对其成像质量进行了仿真,相邻光探针的交叠率设置为 0.6,迭代次数设置为 500 次。将光探针的位置误差设定为服从高斯分布的随机误差。将其误差的幅度分别设定为 2,4,6,9 pixel,分别对应于光探针半径的 5%、10%、15%和 20%。表 2 显示了在不同光探针位置误差幅度下恢复算法得到的误差函数值。

表 2 不同光探针位置误差幅度下恢复算法迭代 500 次得到的误差函数

Table 2 Error obtained by 500 iterations of PIE under different position errors of probes

Position error of probe /pixel	2	4	6	9
Error / $10^{-3}$	1.43	1.68	1.92	2.21

图 3 显示了在不同光探针位置误差幅度下恢复算法迭代 500 次之后的图像。

从表 2 和图 3 可以看出,光探针位置误差对成

像质量的影响是巨大的,结合上一节中的表 1 和图 2 可以发现,相对于光探针的交叠率,光探针位置误差对成像质量的影响更为严重。

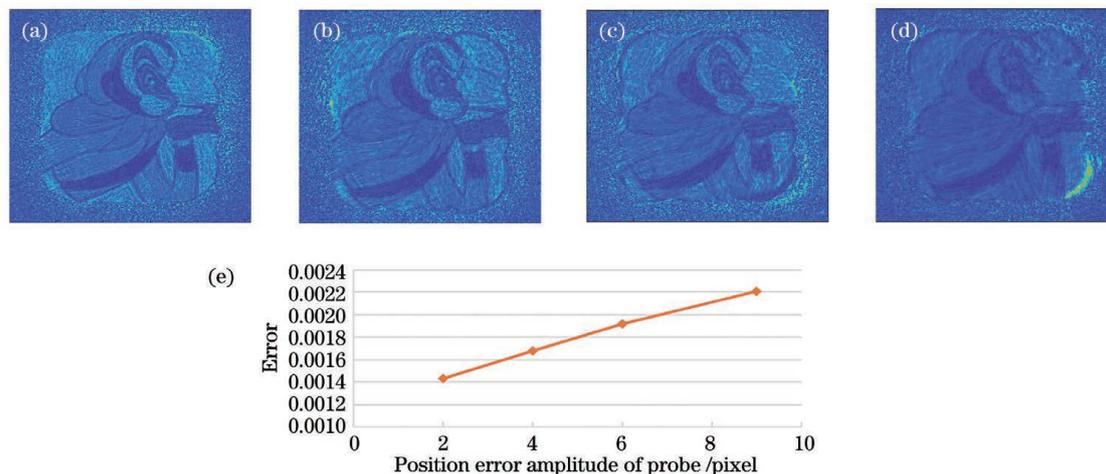


图 3 不同光探针位置误差幅度下 PIE 算法迭代 500 次后恢复出的样本幅度分布。(a)误差幅度为 2 pixel 时的恢复样本图像;(b)误差幅度为 4 pixel 时的恢复样本图像;(c)误差幅度为 6 pixel 时的恢复样本图像;(d)误差幅度为 9 pixel 时的恢复样本图像(e)500 次迭代后误差函数随光探针位置误差幅度的变化

Fig. 3 Sample recovered by 500 iterations of PIE under different position errors of probes. (a) Recovered sample at position error of 2 pixel; (b) recovered sample at position error of 4 pixel; (c) recovered sample at position error of 6 pixel; (d) recovered sample at position error of 9 pixel; (e) error obtained by 500 iterations of PIE under different position errors of probes

因此,如何找到一种成像方式能够有效对抗光探针位置误差对成像质量带来的影响,成为了提升空间叠层衍射成像稳定性的重要问题。光探针位置之所以出现误差,就是因为机械式的光探针在移动的过程中其本身不稳定所致。如果光探针相对位置都是固定的,则光探针位置就不会存在误差。这就是集成平台上以滤波系统添加光发射天线的方式充当光探针,代替传统机械结构的原因所在。

#### 2.4 集成平台上的光束分配芯片

本研究在 220 nm 的绝缘体上硅(SOI)平台上利用滤波系统级联光发射天线的方式实现了一个硅基集成光束分配芯片,它所使用的加工工艺是线宽为 180 nm 的 CMOS 加工工艺。由于芯片上不存在宽度小于 180 nm 的波导,实际加工过程所造成的光探针的位置误差不会超过相邻光发射天线距离的万分之一,故由加工误差带来的光探针位置误差可以基本忽略不计。其原理如下:一束宽谱光经光纤耦合到芯片上,经过滤波系统之后不同波长的光会被送到其对应的光发射天线上,光发射天线由周期为 625 nm,蚀刻深度为 70 nm 的扇形光栅来实现,相邻光发射天线之间的横向

间距为 120  $\mu\text{m}$ ,纵向间距为 150  $\mu\text{m}$ 。滤波系统由两级级联的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)与 16 个微环级联构成,输入光的带宽为 10 nm。每个光发射天线的出射光经透镜准直之后成为一个光探针。由于每个光探针对应的波长都不相同,因此可以通过调节波长来决定让哪一个光探针进行扫描。同时由于光发射天线在芯片上的位置是固定的,因此在成像过程中光探针的位置几乎是不存在误差的。这就避免了光探针位置误差对成像质量带来的影响。

该光束分配芯片共有 16 个光发射天线。图 4 显示了该集成光束分配芯片的版图和 16 个光发射天线各自对应的出射波长。

从图 4 可以看出,16 个光发射天线对应的输出波长都是不同的,它们之间最小的波长间隔也达到了 0.25 nm,这意味着完全可以通过调节输入光的波长来控制让哪一个光探针进行扫描。同时,从图 4(a)可以看出,每个光发射天线的位置都是固定的,这也意味着让光发射天线出射的光来充当光探针时,光探针相对位置的误差是极小的。而且,由于每个光探针对应的波长不同,故可以采用不同波长的单色光作为输入光使光探针依次实现扫描,或采

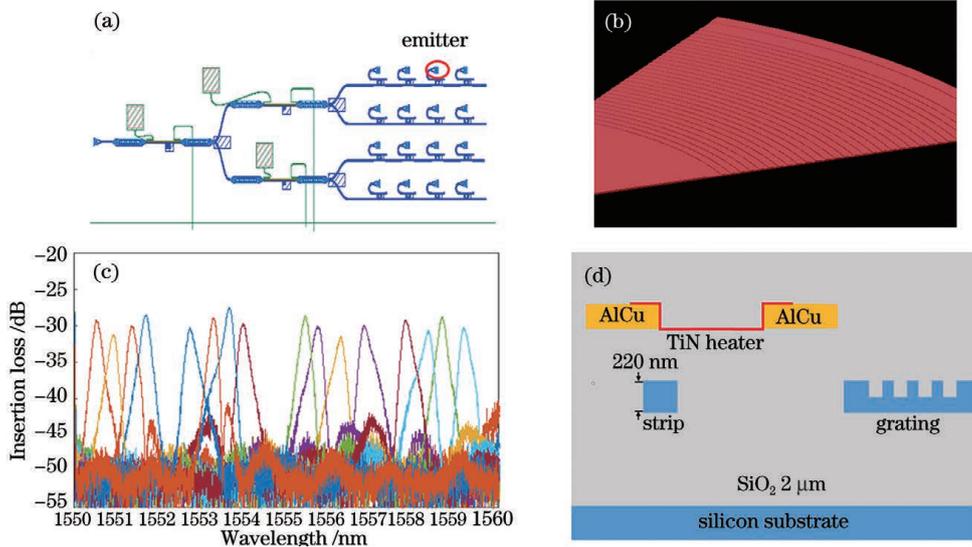


图 4 集成光束分配芯片的性能。(a)光束分配芯片的版图;(b)光发射天线三维结构图;(c)16 个光发射天线对应的出射波长;(d)芯片剖面结构示意图

Fig. 4 Performance of integrated beam steering chip. (a) Layout of beam steering chip; (b) three-dimensional schematic diagram of emitter; (c) corresponding wavelength of 16 emitters; (d) schematic diagram of chip cross-sectional structure

用宽光谱作为输入光使所有光探针同时照射样本,在 CCD 的不同位置记录不同光探针照射样本得到的衍射图样,这增加了成像方式选择的多样性。

### 2.5 基于光束分配芯片的空间叠层衍射成像光路架构

当利用集成平台上的光束分配芯片代替机械结构进行空间叠层衍射成像时,整个成像光路可以由图 5 来表示。

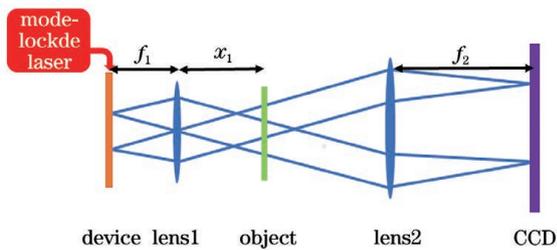


图 5 基于集成光束分配芯片的空间叠层衍射成像光路图  
Fig. 5 Optical path diagram of Ptychography based on the integrated beam steering chip

在图 5 中,激光光源经光纤耦合到芯片,而后不同光发射天线出射的光经透镜 1 准直之后形成空间相干光,并将其用作光探针来扫描。由于不同光发射天线相对透镜中轴线的位置不同,因此不同光探针的传输角度也不相同。样本被放置在透镜 1 的后焦面后的位置,它距离透镜 1 的距离为  $x_1$ ,同时透镜 1 的焦距为  $f_1$ 。通过调节  $x_1$  的值可以改变相邻光探针之间的交叠率。 $x_1$  与光探针交叠率  $o_1$  之间的关系可表示为

$$o_1 = 1 - \frac{d(x_1 - f_1)}{(\alpha f_1 + d_x)f_1}, \quad (3)$$

式中: $d$  代表芯片上相邻光发射天线之间的间距,在实际实验的过程中先用放大系统对芯片上的光发射天线阵列放大 10 倍,在本文所提成像系统中,取  $d=1.2 \text{ mm}$ ;  $\alpha$  代表从光发射天线出射光的发散角大小,取  $\alpha=0.015 \text{ rad}$ ;  $d_x$  表示光斑在发散之前的尺寸,取  $0.2 \text{ mm}$ 。探针照射到样本后,携带样本的幅度和相位信息继续向前传播,在经过透镜 2 后样本的远场衍射信息出现在透镜 2 的后焦面上。将 CCD 放置在透镜 2 的后焦面处,这样就可以在 CCD 上记录到样本的远场衍射图样的强度信息。透镜 1 和透镜 2 组成了一个等比例放大系统,因此相邻光探针所对应的衍射图样强度的中心位置的距离是芯片上相邻两个光发射天线之间距离的整数倍,这个倍数等于  $f_2/f_1$ 。

上文中提到过空间叠层衍射成像的最大优势就是无透镜成像,它可以突破透镜孔径有限所带来的衍射极限,但是在实验成像光路中使用了两个透镜,这似乎与无透镜成像的理念相矛盾。实际上,第一个透镜的作用是对光发射天线出射的光束进行整形,将空间发散的光准直为空间相干光,所以透镜 1 并不参与实际的成像过程。透镜 2 确实在成像过程中发挥了作用,但实际上在进行成像时不需要透镜 2,只不过这样的话样本的衍射图样就只能在其远场进行采集,这增大了对实验场地尺寸的要求。

所以放置透镜 2 是为了可以在一个较短的距离内获得样本的远场衍射图样。如果为了避免透镜存在的衍射极限问题,透镜 2 是可以从光路中去除的。另一方面,透镜 2 的存在让 16 个光探针的全部衍射图样聚集在一个较小的区域内,这样就可以用一次 CCD 曝光的时间来记录整个 16 幅衍射图样,极大地提高了成像帧率。从这个角度来说,加入透镜 2 可以看作是在成像帧率与成像分辨率之间做了一个权衡。

### 3 实验结果分析

基于图 5 所示的成像光路在实验台上搭建整个成像系统。使用的光源是中心波长为 1550 nm,带

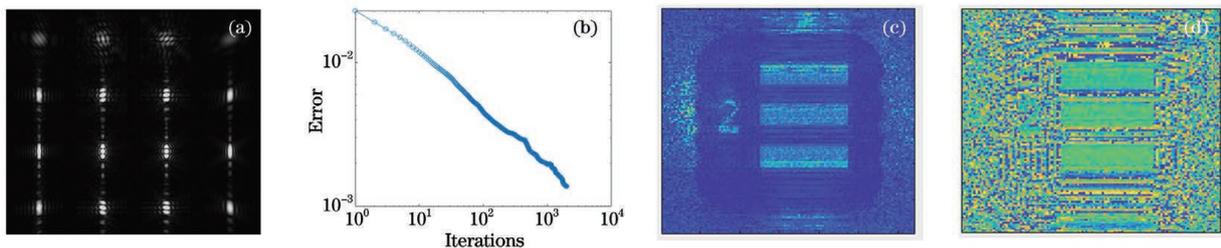


图 6 实验结果。(a) CCD 上记录到的 16 幅衍射图样;(b) 误差函数随迭代次数的变化曲线;(c) PIE 算法恢复得到的样本幅度信息;(d) PIE 算法恢复得到的样本相位信息

Fig. 6 Experimental results. (a) 16 diffraction patterns recorded on CCD; (b) variation curve of error with iterations; (c) sample amplitude recovered by PIE algorithm; (d) sample phase recovered by PIE algorithm

从图 6 可以看出,根据我们在实验中获得的 CCD 上的衍射图样,成功地恢复了样本的幅度和相位信息。从图 6(b) 来看,在经过 2000 次迭代之后,整个算法的误差降到了  $1.1 \times 10^{-3}$  左右。这个误差值虽可以接受但是相对于仿真中得到的误差还是略高了一些。这主要是因为成像质量除了和交叠率以及光探针位置误差有关外,还和 CCD 上记录的衍射图样质量有很大的关系。由于用一次曝光记录了所有 16 幅衍射图样,因此 CCD 上相邻衍射图样之间其实是有交叠的,交叠的部分是样本的高频分量,这导致了相邻衍射图样之间的串扰。其次,从图 6(a) 也可以看出,相较于衍射图样中的高频分量,低频分量的功率要强很多,但是 CCD 的感光区间是有限的。因此为了能够记录较多的频率分量,中心频率不得不实施一定限度的过曝,这也对最终的成像质量造成了影响,但中心频率过曝的问题可以通过用挡板遮挡零级衍射光的方法来解决<sup>[13]</sup>,无需多虑。综上所述,本研究用实验成功地证明所设计的集成光束分配芯片可以用于空间叠层衍射成像,且解决了光探针位置存在误差导致成像质量下降的问题。

宽为 10 nm、重复频率为 500 MHz 的锁模脉冲光源。透镜 1 的焦距为 3 cm,透镜 2 的焦距为 6 cm。成像样本是一块分辨率板,将相邻光探针的交叠率设置为 0.6。根据上述分析可以得到此时样本与透镜 1 的距离为 36.5 mm。此时,系统的视场大小为  $1.45 \text{ mm} \times 1.45 \text{ mm}$ 。经过以上布置之后,我们可以在 CCD 上采集到样本的 16 张衍射图样,然后将其代入 PIE 算法中就可以恢复得到样本的幅度和相位信息。在实际实验过程中,将迭代次数设置为 2000 次。图 6 显示了在 CCD 上得到的衍射图样、PIE 算法恢复出的样本的幅度和相位信息,以及算法运行过程中误差函数的曲线。

### 4 结 论

提出一种基于集成光束分配芯片的空间叠层衍射成像方案。芯片上光发射天线出射的光经透镜准直后变为光探针,用于对样本扫描。由于在光探针前端级联了滤波系统,因此可以通过控制输入光波长的方式来控制光探针的开关,这增加了成像方式选择的多样性。同时,由于光发射天线在芯片上的位置固定,成像过程中光探针的位置不会出现误差,故光探针位置误差对成像质量的影响得以避免。相较于之前针对光探针误差的研究,我们所提方案是在器件层面解决了光探针位置误差对成像质量的影响,而不是仅在算法上进行有限的修正。同时,我们所提方案不仅没有增加成像系统的复杂度,反而缩小了整个系统的尺寸,提高了系统稳定性。

集成平台加工的稳定性和环境鲁棒性将会在激光成像的领域发挥重大的作用。用小巧的芯片代替尺寸巨大的体器件实现成像,不仅降低了系统的成本,而且也避免了环境震动与噪声对精密成像光路的影响。所以运用集成光子学的力量实现更为复杂的成像系统将是我们未来工作的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Bontz R J, Haugan M P. A diffraction limit on the gravitational lens effect[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1981, 78(1): 199-210.
- [2] Feng P, Tang F, Wang X F, et al. Dual-hole point diffraction interferometer for measuring the wavefront aberration of an imaging system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0904002. 冯鹏, 唐锋, 王向朝, 等. 双孔点衍射干涉成像系统波像差检测技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0904002.
- [3] Burdet N, Shi X W, Parks D, et al. Evaluation of partial coherence correction in X-ray ptychography [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 5452-5467.
- [4] Li D J, Hu X, Zhou K, et al. Synthetic aperture lidar imaging detection based on conformal diffractive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0428001. 李道京, 胡焯, 周凯, 等. 基于共形衍射光学系统的合成孔径激光雷达成像探测[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0428001.
- [5] Deng J J, Nashed Y S G, Chen S, et al. Continuous motion scan ptychography: characterization for increased speed in coherent X-ray imaging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 5438-5451.
- [6] Godard P, Allain M, Chamard V, et al. Noise models for low counting rate coherent diffraction imaging[J]. *Optics express*, 2012, 20(23): 25914-25934.
- [7] Kamgar-Parsi B, Johnson B, Folds D L, et al. High-resolution underwater acoustic imaging with lens-based systems[J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1997, 8(4): 377-385.
- [8] Latychevskaia T, Longchamp J N, Fink H W. When holography meets coherent diffraction imaging [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28871-28892.
- [9] Lee B, Jung S, Park J H. Viewing-angle-enhanced integral imaging by lens switching[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(10): 818-820.
- [10] Liu H G, Xu Z J, Zhang X Z, et al. Effects of missing low-frequency information on ptychographic and plane-wave coherent diffraction imaging [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2416-2427.
- [11] Maiden A M, Humphry M J, Sarahan M C, et al. An annealing algorithm to correct positioning errors in ptychography [J]. *Ultramicroscopy*, 2012, 120: 64-72.
- [12] Odstrcil M, Bussmann J, Rudolf D, et al. Ptychographic imaging with a compact gas-discharge plasma extreme ultraviolet light source [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5574-5577.
- [13] Penttinen A, Luukkala M. Sound pressure near the focal area of an ultrasonic lens[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1976, 9: 1927-1936.
- [14] Robinson I K, Libbert J L, Vartanyants I A, et al. Coherent X-ray diffraction imaging of silicon oxide growth[J]. *Physical Review B*, 1999, 60(14): 9965-9972.
- [15] Shi Y S, Wang Y L, Zhang S G. Generalized ptychography with diverse probes [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(5): 054203.
- [16] Shi Y S, Wang Y L, Li T, et al. Ptychographical imaging algorithm with a single random phase encoding[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(7): 074203.
- [17] Zhao M, Wang X M, Zhang X H, et al. Experimental research on macroscopic Fourier ptychography super-resolution imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121101. 赵明, 王希明, 张晓慧, 等. 宏观傅里叶叠层超分辨率成像实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 121101.

## Ptychography Based on Integrated Beam Steering Chip

Du Zhenmin<sup>1,2</sup>, Hu Chengyang<sup>1,2</sup>, Fu Tingzhao<sup>1,2</sup>, Chen Minghua<sup>1,2</sup>, Yang Sigang<sup>1,2</sup>,  
Chen Hongwei<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup>Beijing National Research Center for Information Science and Technology (BNRist), Beijing 100084, China

## Abstract

**Objective** Imaging is the most intuitive way to perceive the world. The resolution of traditional imaging method is limited by the diffraction limit caused by the limited aperture of lens system. Ptychography is a non-lens imaging

method based on coherent light, which avoids the diffraction limit problem caused by lens system. At present, the mechanical structure is often used to translate the optical probe in Ptychography, which brings errors of the position of the optical probe, resulting in the degradation of the imaging quality. Thus in this paper, we proposed a beam steering chip to avoid the errors of the position of the optical probe. The chip can replace the traditional mechanical optical probe to be used in ptychography. The 100 nanometer processing technology ensures that the position of the optical probe will not have errors, which greatly improves the quality of imaging and the stability of the system. On the other hand, because the size of the chip is only millimeter level, the size of the imaging system is also greatly reduced.

**Methods** The silicon-based integrated beam steering chip is processed on a 220 nm silicon on insulator (SOI) platform. The main structure of the chip is cascaded optical transmitting antennas with a filter system. The CMOS process with a linewidth of 180 nm is used to ensure that the position error of the optical probe caused by the actual processing process will not exceed one ten thousandth of the distance between adjacent optical transmitting antennas. Therefore, the position error of optical probe can almost be ignored. Light with different wavelengths will be sent to its corresponding optical transmitting antenna. The transverse spacing between adjacent optical transmitting antennas is 120  $\mu\text{m}$  while the longitudinal spacing is 150  $\mu\text{m}$ . After collimated by the lens, the light emitted from each light transmitting antenna can act as a light probe. Because the corresponding wavelength of each optical probe is different, we can adjust the wavelength to decide which optical probe to scan. At the same time, because the position of the optical transmitting antenna on the chip is fixed, there is almost no error in the position of the optical probe in the imaging process. This avoids the influence of optical probe position error on imaging quality.

**Results and Discussions** When the beam steering chip on the integrated platform is used to replace the mechanical structure for Ptychography, the whole image-forming system can be shown in Fig. 5. Fig. 6 shows the diffraction patterns obtained from the CCD, the amplitude and phase information of the sample recovered by the PIE algorithm, and the curve of the error function during the operation of the algorithm. It can be seen that according to the diffraction pattern of CCD obtained in our experiment, the amplitude and phase information of the sample are successfully recovered. Because all 16 diffraction patterns are recorded in one exposure, there is actually overlap between the adjacent diffraction patterns on CCD, and the overlapped part is the high frequency component of the sample, which leads to the crosstalk between the adjacent diffraction patterns. Second, compared with the high-frequency component in the diffraction pattern, the power of the low-frequency component is much stronger. It will lead the center frequency to be overexposed, which also affects the final image quality. According to the introduction, the problem of center frequency overexposure can be solved by using baffle to block the zero order diffraction light. To sum up, we have successfully proved that the integrated beam steering chip can be used to complete space stack diffraction imaging and solve the problem of optical probe position error.

**Conclusions** In this paper, Ptychography based on integrated beam steering chip is proposed. After collimating, the light emitted from the optical transmitting antenna on the chip becomes the optical probe. Because the filter system is cascaded in the front end of the optical probe, the switch of the optical probe can be controlled by controlling the wavelength of the input light, which increases the diversity of imaging methods. At the same time, due to the fixed position of the optical transmitting antenna on the chip, there is almost no error in the position of the optical probe, which solves the huge impact of the position error of the optical probe on the imaging quality. Compared with the previous research on the error of the position of optical probe, our method solves the problem by device rather than by correction on the algorithm. At the same time, our method not only does not increase the complexity of the imaging system, but also greatly reduces the size of the whole system. The stability and robustness introduced by integrated platform processing will play an important role in the field of laser imaging. Using a small chip instead of a large volume device to realize imaging not only reduces the cost of the system, but also avoids the impact of environmental vibration and noise on the optical path of precision imaging. So using the power of integrated photonics to achieve more complex imaging system will be the focus of our future work.

**Key words** image system; coherence imaging; integrated optics; infrared imaging

**OCIS codes** 110.1650; 100.2960; 130.3120