

# 基于非正交二元相位板的多焦点阵列光镊

孙丰钰<sup>1</sup>, 陈苗<sup>1</sup>, 梁宇<sup>1</sup>, 宋翰林<sup>2</sup>, 王天屹<sup>1</sup>, 刘忠凯<sup>1</sup>, 孙美玉<sup>1\*</sup>, 朱林伟<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>鲁东大学物理与光电工程学院, 山东 烟台 264025;

<sup>2</sup>鲁东大学交通学院, 山东 烟台 264025

**摘要** 提出了一种基于非正交二元相位板的阵列光镊系统, 此系统可以实现对非正交排列的多个粒子的稳定捕获。通过对高数值孔径物镜在紧聚焦条件下的傅里叶变换理论和遗传算法来设计二元相位, 优化得到具有不同分束比的, 具有高衍射效率、高均匀度的归一化相位转折点, 进而根据相位转折点设计出具有不同倾斜角度的非正交二元相位板。利用此二元相位板可以获得高数值孔径物镜聚焦下的各种非正交分布的阵列光斑。利用此类非正交阵列光斑, 在光镊实验中实现了对二氧化硅微球的稳定捕获。理论模拟与实验结果表明, 此方法可以实现对非正交排列的大量粒子的稳定捕获, 在纳米粒子阵列的外延生长领域有着良好的应用前景。

**关键词** 激光器; 激光捕获; 二元相位板; 非正交阵列; 遗传算法

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0714003

## Multifocal Array Optical Tweezers Using Non-Orthogonal Binary Phase Plate

Sun Fengyu<sup>1</sup>, Chen Miao<sup>1</sup>, Liang Yu<sup>1</sup>, Song Hanlin<sup>2</sup>, Wang Tianyi<sup>1</sup>,  
Liu Zhongkai<sup>1</sup>, Sun Meiyu<sup>1\*</sup>, Zhu Linwei<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;

<sup>2</sup> College of Transportation, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

**Abstract** In this work, an array optical tweezer system based on non-orthogonal binary phase plates is proposed. The proposed system can stably trap multiple particles arranged in a non-orthogonal array. The binary phase is designed through a genetic algorithm and the Fourier transform theory of a high numerical aperture (NA) objective lens under tight focusing conditions. The normalized phase turning point of the binary phase is optimized to have different beam-splitting ratios, high diffraction efficiency, and high uniformity, and then it can be used to design the non-orthogonal binary phase plate with different inclination angles. Using this binary phase plate, we can obtain a variety of non-orthogonal array spots in the focal plane of the high-NA objective lens. Furthermore, the stable trapping of silica microspheres can be realized in the experiment of optical tweezers based on the non-orthogonal array spots. Theoretical simulation and experimental results show that this method can effectively achieve the optical trapping of a non-orthogonal arrangement of a large number of particles. This technology is expected to play an essential role in the epitaxial growth of nanoparticle arrays.

**Key words** lasers; laser trapping; binary phase plate; non-orthogonal array; genetic algorithm

**OCIS codes** 140.7010; 100.1390; 140.3290; 100.3008

## 1 引 言

1986 年, Ashkin 等<sup>[1-2]</sup> 根据激光的力学效应, 首次利用单光束强聚焦的激光产生的梯度力三维光势阱实现了微小粒子的捕获, 标志着光镊技术的诞生。这种技术可以非接触、无损伤地操纵活体物质,

成为生物学领域的重要研究工具之一<sup>[3-4]</sup>。同时, 光镊技术可以实现对微小粒子的操控和微小力的测量等, 在物理或化学领域也得到广泛的应用<sup>[5-9]</sup>。鉴于光镊作为激光物理领域的一项开创性发明, 其发明者 Ashkin 在 2018 年被授予诺贝尔物理学奖。由此说明, 光镊技术已受到全球科学家的青睐, 具有良好

收稿日期: 2019-03-01; 修回日期: 2019-03-14; 录用日期: 2019-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61675093)、鲁东大学城新创新奖学金(20180209)

\* E-mail: s.m.y.2008@163.com; \*\* E-mail: lwzhu@siom.ac.cn

的发展前景。

通常情况下,单光束光镊只能操控单个粒子,对于多个粒子的操控需要采用多焦点光镊技术,而对于大量粒子的捕获,需要采用阵列光镊技术。与单光束光镊技术相比,阵列光镊具有更加灵活的优点,是一种能同时操控多个微粒的新型光镊,在不同尺度颗粒如生物细胞、DNA 等微小生物颗粒的分选方面具有重要的应用。目前,研究人员已提出多种产生阵列光镊的方法,比如利用多光束干涉产生多焦点阵列的干涉法<sup>[10]</sup>、利用分光控制激光照射时间的分时复用法<sup>[11-12]</sup>、基于空间光调制器的全息光镊法<sup>[13-14]</sup>、采用衍射光学元件的多焦点产生法<sup>[15]</sup>等。但是利用多光束干涉法产生阵列光镊,虽然简单有效,但在通常情况下所产生的光斑数量有限,实验中相邻焦点的相互影响较大。利用分时复用法产生的阵列光镊灵活度高,可以任意操控各个粒子,但实验中受限于激光能量,可操控的粒子数量有限,此外需要利用分束扫描器件,实验装置复杂且价格昂贵。利用空间光调制器产生的全息光镊可以实现各种复杂的操控,且捕获的粒子数量较多,但是受限于空间光调制器的昂贵价格和较低的衍射效率,其应用范围也受到一定的限制。相比较而言,利用纯相位的衍射光学元件产生的阵列光镊,衍射效率高、实验结构简单,在实际的应用中有一定的优势。最新的研究结果表明,利用光镊技术可以实现纳米材料的诱导排列、晶体材料的激光诱导生长和表面等离激元耦合增强等<sup>[16-18]</sup>。在这些应用中需要用到非正交阵列光镊来产生具有六边形结构的金纳米粒子排列等<sup>[19]</sup>。目前大多数二元相位衍射光学元件产生的多焦点阵列为正交分布,基于此衍射元件捕获到的微粒排列也呈正交分布,很难实现多个微粒任意排列角度的稳定捕获。

本文提出一种基于高数值孔径物镜在紧聚焦条件下的快速傅里叶变换算法,并结合遗传算法对归一化相位转折点进行优化,得到二元相位。基于此相位可以设计出用来产生任意角度、任意分束比的非正交分布二元相位板。利用此类二元相位板可以实现捕获任意数量和排布形状微粒的阵列光镊系统。理论模拟结果和实验结果表明,该系统可以实现多层次的微粒操控,可为各种排布的微小物质之间的相互作用的定量测量和操控提供一种新的方法<sup>[20]</sup>,特别适用于纳米器件及材料排列、纳米材料诱导生长等领域。

## 2 原理与设计

通常情况下,要想实现微粒的稳定捕获及成像,一般采用高数值孔径的物镜来进行光镊实验。如图 1 所示,当一束经纯相位元件调制后的单色平面光波入射到高数值孔径物镜时,其聚焦场的分布可以表示为<sup>[21-22]</sup>

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{-if}{\lambda} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} P(\theta, \Phi) \mathbf{E}_t(\theta, \Phi) \exp(ikz \cos \theta) \sin \theta \times \exp\{ik \sqrt{x^2 + y^2} \sin \theta \cos[\arctan(y/x - \Phi)]\} d\Phi d\theta, \quad (1)$$

式中: $x, y, z$  分别为三维直角坐标系的坐标分量; $P(\theta, \Phi)$ 为纯相位衍射元件的光场分布; $\mathbf{E}_t$ 为透镜后的透射场分布; $\lambda$ 为波长;波数 $k=2\pi/\lambda$ ; $\alpha$ 为物镜的最大孔径角; $f$ 为物镜焦距; $r, \Phi$ 为物镜后焦面上的极坐标; $\theta$ 为物镜的偏折角,满足关系式 $\sin \theta = rNA/(Rn_t)$ ,其中 $NA$ 为物镜的数值孔径, $n_t$ 为介质的折射率, $R$ 为入射光瞳的半径。在波矢空间中,(1)式可进一步表示为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{-if}{\lambda} \int_0^\infty \int_0^\infty P(\theta, \Phi) \mathbf{E}_t(\theta, \Phi) \exp(ik_z z) / \cos \theta \times \exp[-i(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y, \quad (2)$$

式中: $k_x = k \cos \Phi \sin \theta$ ;  $k_y = k \sin \Phi \sin \theta$ ;  $k_z = k \cos \theta$ 。因此,可用傅里叶变换(FT)来表示 $k$ 空间高数值孔径物镜聚焦场的矢量衍射积分,

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \mathcal{F}[P(\theta, \Phi)] \otimes \mathcal{F}[\mathbf{E}_t(\theta, \Phi) \exp(ik_z z) / \cos \theta], \quad (3)$$

式中: $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换运算; $\otimes$ 表示卷积运算。

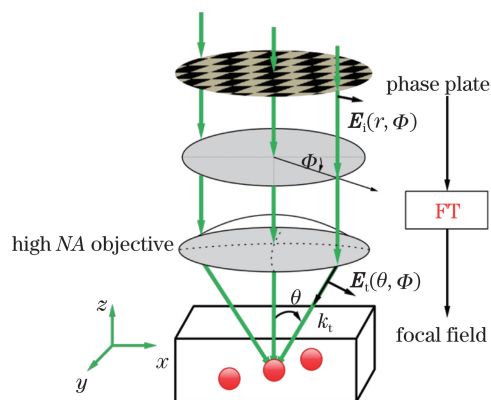


图 1 高数值孔径物镜的聚焦示意图

Fig. 1 Focusing schematic of high-NA objective lens

从(3)式可以看出,可将经过相位板调制和高数值孔径物镜聚焦后的光场分布表示为相位板透射率

的傅里叶变换与未经调制的光场分布的傅里叶变换的卷积。因此,若相位板透射率的傅里叶变换为阵列函数分布,则经过此相位板调制和物镜聚焦后的光场分布具有多个焦点。基于以上分析,可以通过对相位板的透射率函数进行编码,使其傅里叶变换函数满足阵列函数的表达式。在阵列光镊实验中,需要多个聚焦光斑的光强分布是均匀的等光强分布。为了避免一般光栅因 sinc 函数强度包络引起的光强分布不均匀,可以采用横向坐标调制型二元相位光栅来产生等强度的阵列光束。这种相位编码原理如图 2(a)所示,通过优化横向坐标  $x_n (n = 1,$

$2, 3, \dots, N)$ ,使得要求的衍射级次的总能量均匀分布。这种二元相位光栅的透射率函数可以表示为<sup>[23]</sup>

$$P(x) = \text{comb}(x) \otimes \sum_{n=0}^{N-1} t_n(x), \quad (4)$$

$$t_n(x) = \exp\{i[1 + (-1)^n]\varphi/2\} \cdot \text{rect}\left[\frac{x - (x_{n+1} + x_n)/2}{x_{n+1} - x_n}\right], \quad (5)$$

式中: $\varphi$ 为二元结构之间的相位差; $\{x_n\}$ 为一个周期内归一化的相位转折点,且  $x_0 = 0, x_N = 1$ ;  $N$ 为相位转折点的总数。在二元相位编码情况下,此相位调制光场的远场傅里叶变换的各级系数可以表示为<sup>[24-25]</sup>

$$C_m = \begin{cases} \frac{-i}{2m\pi} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{N-1} (-1)^n \exp(-i2\pi m x_n) + (-1)^N \exp(-i2\pi m x_N) \right], & m \neq 0 \\ 2 \sum_{n=1}^{N-1} (-1)^n x_n + (-1)^N x_N, & m = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $m = 1, 2, \dots, M$ 表示衍射级次,其产生的分束比为  $Q = 2M + 1$ 。各个衍射级次的强度分布为  $I_m = C_m \times C_m$ 。

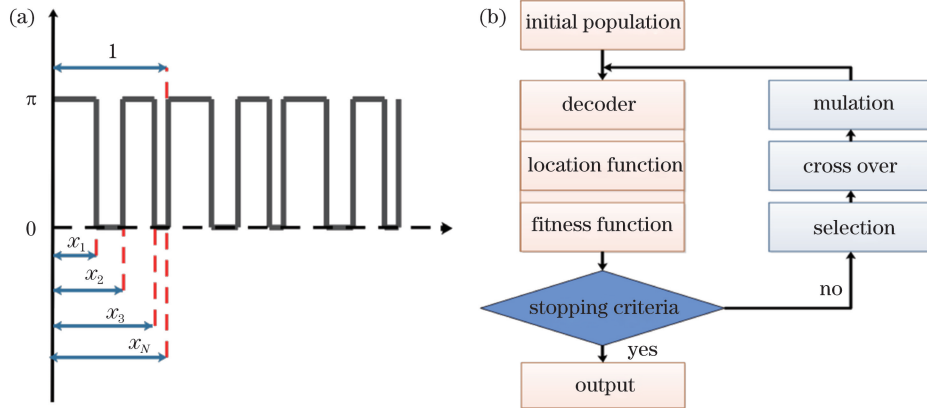


图 2 相位板设计。(a)相位分布示意图;(b)遗传算法原理图

Fig. 2 Design of phase plate. (a) Schematic of phase distribution; (b) principle of genetic algorithm

为了获得均匀分布的阵列光斑,只要找到各分束比对应的归一化相位转折点即可。从本质上讲,这是一个有约束的优化问题,即通过调节  $x_n$  来实现目标函数在满足约束条件的前提下达到最优。采用均匀度、衍射效率、价值函数、特征尺寸等约束条件参数来评估所设计相位板的性能<sup>[26-27]</sup>,其中特征尺寸函数为  $\Delta = \min(x_n - x_{n-1})$ ,均匀度函数  $\mu$  定义为

$$\mu = \frac{\max(I_m) - \min(I_m)}{\max(I_m) + \min(I_m)}, \quad (7)$$

衍射效率  $\eta$  定义为

$$\eta = I_0 + 2 \sum_{m=1}^M I_m, \quad (8)$$

评价函数  $\phi$  定义为

$$\phi = \left[ (I_0 - I_{av})^2 + 2 \sum_{m=1}^M (I_m - I_{av})^2 \right] / \left[ I_0 + 2 \sum_{m=1}^M I_m \right], \quad (9)$$

式中:平均光强  $I_{av} = (I_0 + 2 \sum_{m=1}^M I_m) / (2M + 1)$ 。

本研究基于遗传算法来优化各个归一化相位转折点,其流程如图 2(b)所示。在  $0 \sim 1$  范围内对归一化相位转折点位置  $x_n$  进行编码,编码的染色体是  $0$  到  $1$  之间的实数组成的—维向量。在优化过程中,首先解码遗传个体的染色体,得到归一化相位转折点的位置信息;利用衍射级次对应的系数函数得到该系数  $C_m$  对应的函数值,利用由衍射效率函数、均匀度函数、价值函数、特征尺寸函数组成的适应度函数得到该遗传个体的适应度。然后,根据适者生

存的原理,采用选择算子筛选出适应度最优的个体,采用交叉算子和变异算子得到新的染色体;重复以上所述的“评价—选择—交叉—变异”循环,直到满足判据条件。

通过所提优化设计方法,可以得到不同分束比对应的归一化相位转折点。表 1 中给出了分束比分别为 3、5、7、9 的优化结果。从表 1 可以看出,这些归一化相位转折点产生的聚焦光场的均匀性都大于

99%;大多数分束比对应的衍射效率高于 70%。之所以使用此方法优化归一化相位转折点位置,是因为其进化算子的各态历经性能能够非常有效地进行概率意义的全局搜索,可以快速地优化出归一化相位转折点。相比于其他算法,该算法优化时间更短,优化准确度更高,可得到全局最优值,其他分束比对应的归一化相位转折点同样可以通过所提方法得到。

表 1 数值优化结果

Table 1 Results of numerical optimization

Q	$x_n$				$\eta / \%$	$\mu$	$\Delta$
3	0.26474				66.42	0.00001	0.265
5	0.03861	0.38735	0.65203		77.38	0.00001	0.039
7	0.19327	0.42517	0.89947		78.63	0.00001	0.101
9	0.06668	0.12869	0.28569	0.45634	0.59076	0.00001	0.067

### 3 模拟结果与分析

根据表 1 所示的归一化相位转折点  $x_n$  设计二元相位结构的衍射光学元件。通常情况下,可以利用两个正交分布的相位转折点得到的二元相位结构来产生光强均匀分布的二维正交阵列分布。通过文献调研发现,产生这种正交多焦点阵列的方法有很多种,但很少有人研究非正交的阵列结构。本研究基于上述二元相位转折点,通过非正交叠加方式来产生二元相位结构,以实现非正交的阵列多焦点分布。图 3 所示为各种非正交阵列分布的二元相位及其对应的聚焦光场的强度分布。图 3(a)所示为产生  $3 \times 3$  的二元相位及其对应的聚焦光斑强度分布。相位图主要依据表 1 的数据,将此一维相位图沿  $x$  轴方向旋转不同的角度后与原来的一维相位图相叠加,得到非正交分布的二维相位图。从图 3 可以看出,此时的相位结构由一些非矩形的单元结构组成。从数值模拟得到的物镜聚焦面上的光场强度分布图可以看出,在高数值孔径物镜聚焦下,经过二元相位分布调制后,可以在物镜的聚焦面上产生对应的二维非正交的阵列多焦点分布。多焦点阵列光斑的分布与叠加相位的旋转角度相关。从图 3 还可以看出,聚焦面上的光斑分布除了中间  $3 \times 3$  个强度均匀分布的焦点外,还有其他衍射级次的光斑出现,这主要是因为优化后相位转折点的衍射效率较低,其他衍射级次的光斑占有一定的衍射效率。当优化后相位转折点的衍射效率较高时,其他衍射级次的光斑可以忽略不计,如图 3(b)所示的  $5 \times 5$  阵列分布中,

除了中间  $5 \times 5$  个光强分布均匀的聚焦点外,没有观察到其他衍射级次的聚焦光斑。图 3(c)所示为  $7 \times 7$  阵列中,夹角为  $60^\circ$  和  $120^\circ$  时的相位分布和对应聚焦场的强度分布。可以看出,利用此非正交的二元相位可以很方便地获得非正交的光斑阵列。图 3(d)所示为  $9 \times 9$  阵列中,夹角为  $75^\circ$  和  $105^\circ$  时的相位分布和对应聚焦场的强度分布。在以上模拟得到的各个相位图及其对应的高数值孔径物镜聚焦下的光场强度分布中,其各项参数与结合理论设计出的结果相吻合。

## 4 阵列光镊实验

### 4.1 实验系统

从以上分析及数值模拟结果可以看出,只要通过数值优化算法得到了不同分束比对应的归一化相位转折点,就能设计出具有不同分束比及各种倾斜角度的二元相位板,其制作过程采用传统的化学刻蚀法,具体加工工艺如图 4(a)所示。图 4(b)是依据表 1 中阵列点数为 7 的归一化相位转折点设计的分束比为  $7 \times 7$ 、倾斜角度为  $120^\circ$  的相位板实物图,所设计的相位图是尺寸为  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  的正方形,其中一个周期位  $150 \mu\text{m}$ ;当刻蚀激光的波长  $\lambda_c = 532 \text{ nm}$ 、加工玻璃的折射率  $n_c = 1.51$  时,该相位图所刻蚀深度  $h = \lambda_c / 2(n_c - 1) = 0.52 \mu\text{m}$ 。图 4(c)所示为  $532 \text{ nm}$  波长的激光经加工好的相位板调制后,经物镜聚焦在聚焦平面的 CCD 图像。可以看出,其实验结果与数值模拟结果相同,均为  $7 \times 7$  个光强均匀分布的倾斜角度为  $120^\circ$  的阵列聚焦光斑。

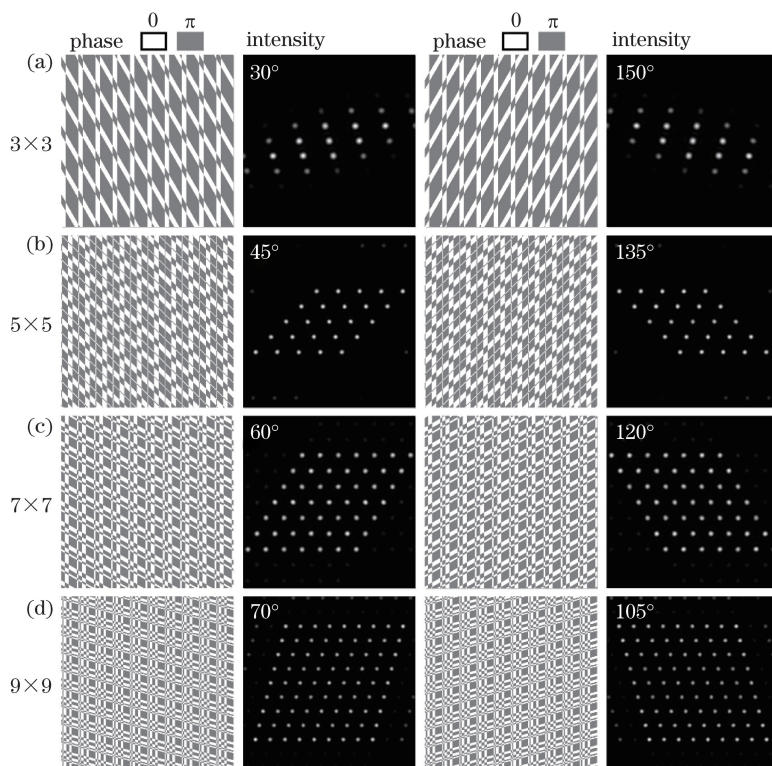


图 3 不同非正交阵列分布多焦点的相位图及其对应的聚焦场强度分布

Fig. 3 Phase patterns of multiple focal spots and corresponding intensity distributions in focal plane with different non-orthogonal arrays

因此,基于此二元相位板产生的多焦点阵列可以用来实现阵列光镊,具体的实验光路如图 4(d)所示。图 4(d)是自主搭建的一套光镊系统,主要由两部分组成:一部分是用于捕获微粒的聚焦光路;另一

部分是用来成像的照明光路。其中 PF 为针孔滤波器,  $L_1$  为准直透镜,  $L_2$  为成像透镜, DOE 为相位板, F 为滤光片, SP 为二向色镜,  $OL_1$  为高数值孔径物镜,  $OL_2$  为聚焦物镜。在聚焦光路中,从激光器出

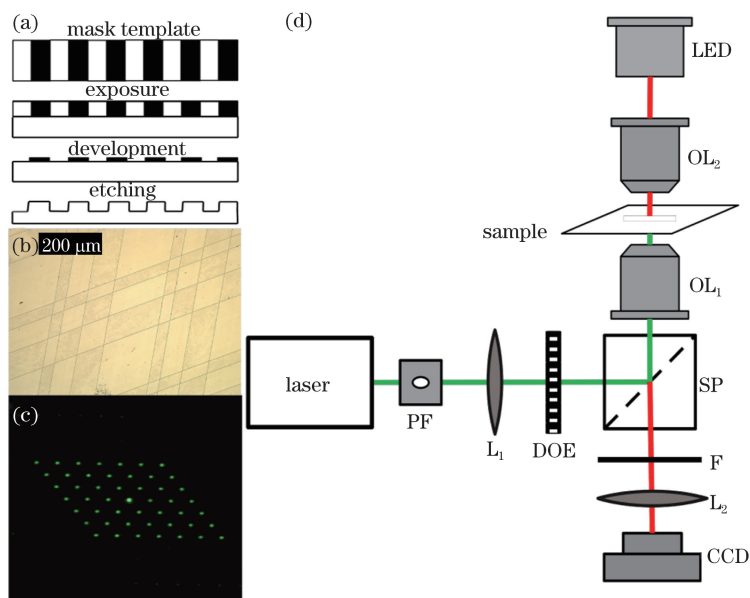


图 4 实验装置示意图。(a)二元相位板制作过程示意图;(b)相位板显微成像图;(c)实验点阵图;(d)实验光路图

Fig. 4 Schematic of the experimental setup. (a) Schematic of manufacturing process for binary phase plate; (b) microscopy image of phase plate; (c) experimental result of focal-spot array; (d) schematic of experimental light path

射的波长为 532 nm 的激光(LWGL532-5W,北京镭志威光电,中国),经针孔滤波器系统(GCO-0112M,大恒光电,中国)和准直透镜滤波扩束后,通过加工好的二元相位板,经长波通二向色镜(DMLP567L,Thorlabs,美国)反射到高数值孔径的物镜(UPlanSApo 100 $\times$ oil,奥林巴斯,日本)中,经相位板调制后的激光经物镜聚焦后,可以在样品池中产生多个紧聚焦的阵列光斑,用来捕获微小粒子。在照明光路中,将中心波长为 620 nm 的 LED(GCI-0604,大恒光电,中国)作为照明光源,经过显微物镜(GCO-2107,大恒光电,中国)聚光后照射在样品上,其透射光依次经过高数值孔径的物镜、二向色镜、滤光片、成像透镜后,成像在 CCD(HV3151UC,大恒图像,中国)上,其像素大小 3.2  $\mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$ 。CCD 与计算机相连,可实时观察微粒的动态捕获过程。滤光片(DCC-3004,大恒光电,中国)与二向色镜的作用一样,主要用来滤除实验中部分反射绿光对成像的干扰。实验中使用的样品是直径为 1  $\mu\text{m}$  的单分散二氧化硅微球(6-7-0100,天津倍思乐,中国),经合适的配比稀释后,滴入载波片和盖波片之间创建微通道中,这样可以使二氧化硅微球在微通道中自由移动,方便聚焦光斑对微球进行捕获。

## 4.2 实验结果与分析

图 5 所示为 3 $\times$ 3 阵列中各种倾斜角度的聚焦场强度分布和光学捕获微粒的实验结果,其中第 1、3 列为物镜焦平面上的聚焦光斑阵列的强度分布图。记录此聚焦光斑阵列图像时,是将图 4(d)所示的实验装置中的样品换为一块反射镜,当物镜的聚焦面正好被调节到反射镜的镜面时,反射回的聚焦光斑的像经放大后成像在 CCD 成像器件上。此时,可以得到经相位板调制后的光场,以及经物镜聚焦后的光场强度分布。从图 5 可以看出,在物镜的聚焦区域,可以生成强度均匀分布的多焦点阵列光斑。因此,利用此光斑阵列可以实现多焦点的阵列光斑捕获。使用样品代替反射镜后,可以实现粒子的光镊操控实验。图 5 的第 2、4 列为对应的光学捕获二氧化硅微球的实验结果图。可以看出,利用这种非正交的二元相位板可以很方便地实现多个二氧化硅微球的稳定捕获,而且微球的排布也与阵列光斑的排布相同。同时,捕获粒子的排列也随着非正交二元相位的角度变化而变化。因此,通过各种不同偏转角度的二元相位板可以实现各种不同阵列排布的光学捕获。

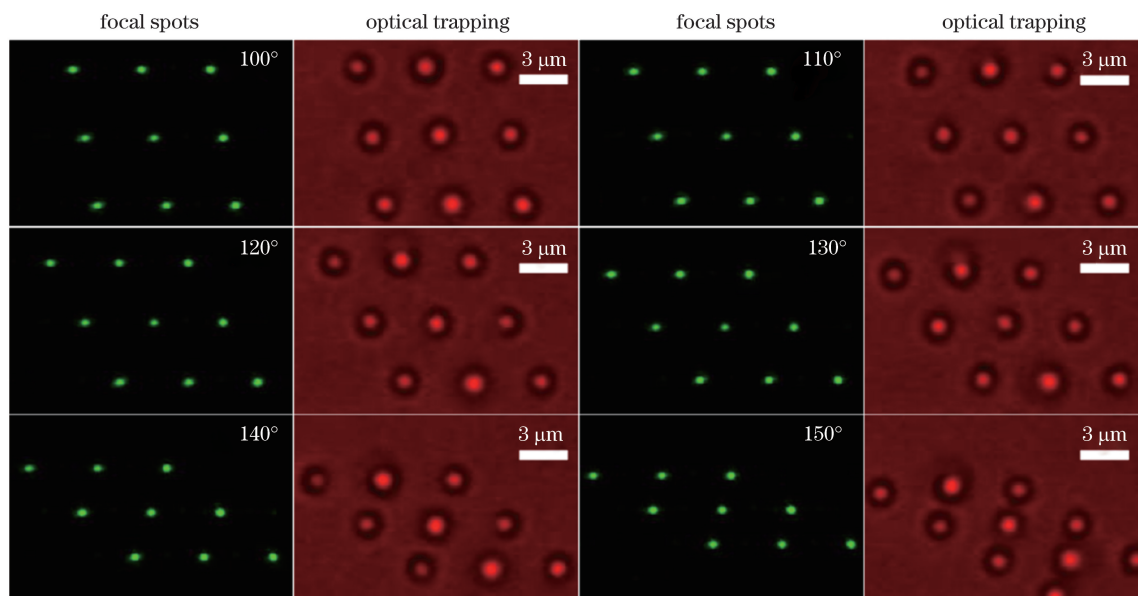


图 5 焦平面上不同偏转角度的 3 $\times$ 3 个光斑分布图和对应捕获的二氧化硅微球的实验结果图

Fig. 5 Intensity distributions of 3 $\times$ 3 focal spots with different inclination angles in focal plane and corresponding experimental results of optical trapping for silica microspheres

利用此类非正交的二元相位板,同样可以实现其他分束的多焦点阵列光镊捕获。但是,当阵列光斑的数量增多时,在激光器出射功率一定的情况下,分配到每个光斑的聚焦功率减少,这会对稳定捕获

的实现带来一定的影响。为了验证更多分束的阵列光斑捕获微粒的有效性,图 6 给出了 5 $\times$ 5 阵列的各种角度的聚焦场分布及使用该光场分布捕获的二氧化硅微球的实验结果。在相同的捕获条件下,与分

束比为  $3 \times 3$  的阵列光斑相比,分束比为  $5 \times 5$  的阵列光斑实现稳定捕获所需的最小激光功率要大一些。在实验中,可以通过加大激光功率来实现对更多微粒的稳定捕获。

除了激光功率影响粒子的稳定捕获外,还有其他因素同样影响着捕获粒子的效率,比如,在二氧化硅微球样品的制作过程中,二氧化硅微球没有充分地分散开,大量微球聚积在一起,会影响捕获的稳定性。针对这一问题,可以在配制实验样本时对样本溶液进行充分振荡,使每个微球分散

开,以排除微球对实验结果的影响。其次,在实验中,微球除了受光镊力外,还受到微球布朗运动以及微球周围液体扰动产生的阻力等。因为自行搭建的光镊系统很稳定,所以排除了液体快速扰动对实验的影响,但样品溶液中样本浓度较大时,微球被捕获后也有可能由于微球的布朗运动被顶走,因此在实验中使用合适浓度的样品溶液比较重要。通过实验发现可以利用非正交分布阵列光斑捕获微球,通过旋转角度最终实现对不同微粒的筛选。

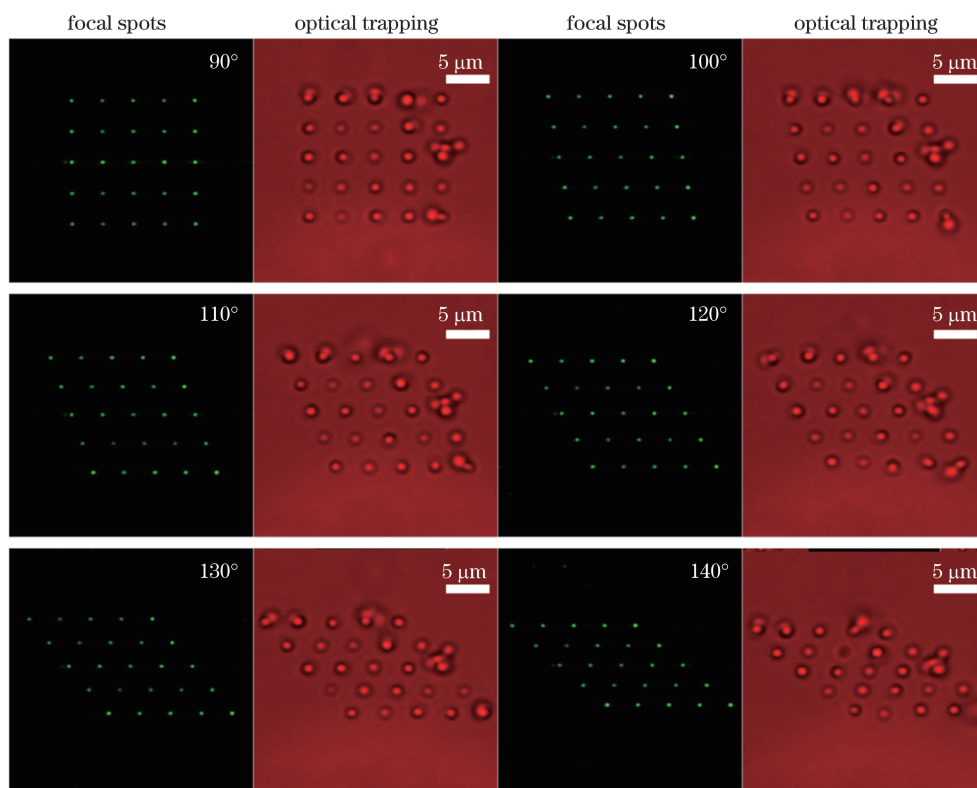


图6 焦平面上不同偏转角度的  $5 \times 5$  个光斑分布图和对应捕获的二氧化硅微球的实验结果图

Fig. 6 Intensity distributions of  $5 \times 5$  focal spots with different inclination angles in focal plane and corresponding experimental results of optical trapping for silica microspheres

## 5 结 论

一种基于非正交二元相位板的阵列光镊系统已被证实可以实现对多个粒子的非正交阵列的稳定捕获。此阵列光镊的核心元件就是一个二元相位板,此相位板可以产生非正交阵列分布的聚焦光斑。可以通过紧聚焦条件下的傅里叶变换理论和遗传基因优化算法来优化设计得到的二元非正交相位板。这种优化算法可以快速准确地获得不同分束比的,具有高衍射效率、高均匀度的二元相位分布。理论模拟和实验结果表明,这种相位分布可以实现高数值孔径物镜聚焦下的各种非正交的阵列光斑分布。将

该阵列光斑应用于自行搭建的光镊实验系统中,可以实现二氧化硅微球的稳定捕获,并可进行各种动态操控。本研究实现了将功率损耗小、制作简单、成本低的非正交分布多光斑用于阵列光镊中实现对微粒多种排布的稳定捕获,对生物微操作、晶体材料的研究具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, *et al.* Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. Optics Letters, 1986, 11(5): 288-290.

- [2] Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime[J]. *Biophysical Journal*, 1992, 61(2): 569-582.
- [3] Kroner A, Kardosh I, Rinaldi F, *et al.* Towards VCSEL-based integrated optical traps for biomedical applications[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(2): 93-94.
- [4] Taguchi K, Ueno H, Hiramatsu T, *et al.* Optical trapping of dielectric particle and biological cell using optical fibre[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(5): 413-414.
- [5] MacDonald M P, Spalding G C, Dholakia K. Microfluidic sorting in an optical lattice[J]. *Nature*, 2003, 426(6965): 421-424.
- [6] Li B J, Xin H B, Zhang Y, *et al.* Progress of optical trapping and manipulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900126.  
李宝军, 辛洪宝, 张垚, 等. 光捕获和光操控研究进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900126.
- [7] Li Y M, Gong L, Li D, *et al.* Progress in optical tweezers technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0101001.  
李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现状[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0101001.
- [8] Guo Z H, Liu Z T, Chen Q M, *et al.* Application and progress of laser shaping devices in optical tweezers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090004.  
郭志和, 刘泽田, 陈启敏, 等. 激光整形器件在光镊中的应用及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090004.
- [9] Yao B L, Lei M. Multi-purpose optical micro-manipulation platform and applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(6): 15-26.  
姚保利, 雷铭. 多功能光学微操纵平台及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(6): 15-26.
- [10] Zhou Y H, Li J F, Ren Y J, *et al.* Optical tweezers array based on double-plate shearing interference for microfluidic particle sorter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1659-1664.  
周妍煌, 李婧方, 任有健, 等. 适用于微流控芯片颗粒分选的阵列光镊系统[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1659-1664.
- [11] Wu J G, Ren Y X, Wang Z Q, *et al.* Time-sharing multiple optical traps using rotating glass plate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(10): 2751-2756.  
吴建光, 任煜轩, 王自强, 等. 旋转波片法实现分时复用多光阱[J]. *中国激光*, 2009, 36(10): 2751-2756.
- [12] Sasaki K, Koshioka M, Misawa H, *et al.* Pattern formation and flow control of fine particles by laser-scanning micromanipulation[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(19): 1463-1465.
- [13] Ren Y Y, Zhou J H, Wu J G, *et al.* Holographic tweezers: the most vigorous member in optical tweezers' family[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(11): 35-41.  
任煜轩, 周金华, 吴建光, 等. 全息光镊-光镊家族中极具活力的成员 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(11): 35-41.
- [14] Polin M, Ladavac K, Lee S H, *et al.* Optimized holographic optical traps[J]. *Optics Express*, 2005, 13(15): 5831-5845.
- [15] Korda P T, Taylor M B, Grier D G. Kinetically locked-in colloidal transport in an array of optical tweezers[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(12): 128301.
- [16] Kim H, Lee W, Lee H G, *et al.* *In situ* single-atom array synthesis using dynamic holographic optical tweezers[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13317.
- [17] Maragò O M, Jones P H, Gucciardì P G, *et al.* Optical trapping and manipulation of nanostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(11): 807-819.
- [18] Masajada J, Bacia M, Drobczyński S. Cluster formation in ferrofluids induced by holographic optical tweezers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3910-3913.
- [19] Huang N F, Martínez L J, Jaquay E, *et al.* Optical epitaxial growth of gold nanoparticle arrays[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 5841-5845.
- [20] Bao J H, Gong Z, Chen H T, *et al.* Influence of the axial displacement of a trapped bead on the calibration of the force parameters of optical tweezers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1421-1424.  
鲍建华, 龚鋈, 陈洪涛, 等. 粒子的轴向位移对光阱力学参数标定的影响[J]. *中国激光*, 2005, 32(10): 1421-1424.
- [21] Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems-I. An integral representation of the image field[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1959, 253(1274): 349-357.
- [22] Richard B B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems, II. Structure of the image field in an aplanatic system[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1959, 253(1274): 358-379.
- [23] Dammann H, Görtler K. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms[J]. *Optics Communications*, 1971, 3(5): 312-315.
- [24] Zhou C H, Liu L R. Numerical study of Dammann array illuminators[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(26): 5961-5969.



- [25] Xi P, Zhou C H, Zhao S, *et al.* Design and fabrication of  $64 \times 64$  spot array Dammann grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(4): 369-371.  
席鹏, 周常河, 赵帅, 等.  $64 \times 64$  点阵达曼光栅的设计与实现[J]. 中国激光, 2001, 28(4): 369-371.
- [26] Yang C X, Li S K, Wang X Z. Pixelated source mask optimization based on multi chromosome genetic algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0811001.  
杨朝兴, 李思坤, 王向朝. 基于多染色体遗传算法的像素化光源掩模优化方法[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0811001.
- [27] Yang C X, Li S K, Wang X Z. Source mask optimization based on dynamic fitness function[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0111006.  
杨朝兴, 李思坤, 王向朝. 基于动态适应度函数的光源掩模优化方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0111006.