

## 泽尼克多项式校正全息阵列光镊像差的实验研究\*

刘伟伟<sup>1)2)</sup> 任煜轩<sup>1)2)</sup> 高红芳<sup>1)2)</sup> 孙晴<sup>1)2)</sup> 王自强<sup>1)2)</sup> 李银妹<sup>1)2)†</sup>

1) (中国科学技术大学光学与光学工程系, 合肥 230026)

2) (合肥微尺度物质科学国家实验室, 合肥 230026)

(2012年1月5日收到; 2012年3月11日收到修改稿)

像差会影响光镊对粒子的捕获效果. 全息阵列光镊中, 像差不仅来自光学元件, 由特定算法设计的光阱相位片也会在光路中引入像差. 本文通过液晶空间光调制器加载泽尼克多项式相位图, 对全息阵列光镊中由光栅透镜组型算法引起的像差进行校正. 结果显示: 利用三阶泽尼克多项式可有效消除光路中由光栅透镜组型算法引起的慧差, 使得捕获  $2\ \mu\text{m}$  聚苯乙烯小球的阵列光阱刚度提高了约 40%; 对比不同项的像差校正结果发现, 全息阵列光镊中由算法引起的慧差与光学元件引起的像差一样, 也会对阵列光阱的捕获效果产生较大影响; 同时根据一阶像差校正结果可得光栅透镜组型算法对于一阶泽尼克像差具有鲁棒性. 实验结果表明, 对全息阵列光镊中由算法引起的像差进行校正, 对于提高光阱的捕获效果和深化对算法特性的认识都具有重要意义.

**关键词:** 泽尼克多项式, 液晶空间光调制器, 全息阵列光镊, 像差校正

**PACS:** 87.80.Cc, 42.40.Eq, 42.40.Jv, 42.15.Fr

## 1 引言

阵列光镊是在单光镊基础上发展起来的、能同时操纵多个粒子的新型光镊<sup>[1-3]</sup>, 阵列光镊可以通过多种技术手段来实现, 衍射光学元件<sup>[3-5]</sup>是目前广泛采用的技术, 它通过对入射单光镊光束的振幅、相位或二者同时调制生成阵列多光阱. 纯相位型液晶空间光调制器 (SLM) 对入射光场的相位进行调制, 通过 SLM 生成的阵列光阱具有操纵方便、光阱实时动态可控等优点<sup>[6,7]</sup>, 在胶体多体相互作用<sup>[8]</sup>和多体相互作用力测量<sup>[9]</sup>等领域有着重要应用. 基于 SLM 构建全息阵列光阱的关键是设计出快速的相位片算法<sup>[10]</sup>. 常见算法大致可分为两类, 一类是基于变换的迭代方法, 如 Gerchberg-Saxton 算法 (简称 GS 算法)<sup>[10,11]</sup>, 输入-输出算法 (IO 算法), 相位混合算法 (PMA 算法)<sup>[12]</sup> 和杨-顾算法<sup>[13]</sup>等; 第二类是基于搜索极值的优化算法<sup>[14]</sup>, 如点产生直接搜索法<sup>[15]</sup>, 共轭梯度算法, 模

拟退火法<sup>[16]</sup>和基因遗传算法<sup>[17]</sup>等. 上述算法均能设计生成质量较佳的阵列多光阱相位图, 但缺点是算法耗时长, 无法实现对阵列光阱位置的实时调控. 通常采用光栅透镜组算法<sup>[18]</sup> (gratings and lenses algorithm, 简称 GL 算法) 来生成阵列光阱相位图, 它具有计算速度快、改变光阱位置时扰动小等优点, 可满足对阵列光阱的动态三维操控需求. 但 GL 算法的缺点是精度不够高, 所设计的相位片是对理想情况的近似<sup>[18]</sup>, 这往往会导致光路中像差的产生, 从而使得光阱波阵面发生畸变, 进而影响阵列光阱对粒子的捕获效果.

全息光镊中的光学元件也会以多种形式在光路中引入像差. 如 SLM 的表面弯曲会引起像散等像差等<sup>[19]</sup>; 而透镜、反射镜的加工误差、空气的热扰动将导致光路中随机像差的产生; 使用油浸物镜时, 玻片与水溶液界面间的折射率失配也将导致光路中存在球差等像差. SLM 具有实时快速擦写相位片的功能, 在加载全息光阱相位片的同时也可加载相应的像差校正相位图, 起到波前校正的作

\* 国家自然科学基金 (批准号: 21073174, 20974107, 60974038) 资助的课题.

† E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn

用. 针对全息光镊中由光学元件引起的像差, 科研工作者已通过 SLM 做了较多研究. 如 Grier 小组通过 SLM 引入球差、像散等像差模拟了光路中由光学元件引起的像差对全息光阱的影响<sup>[20]</sup>; Wulff 等则指出 SLM 表面弯曲所引起的主要像差为像散, 其实验结果表明消除光路中的像散可以有效提高全息光阱的捕获效果, 同时实验也发现随着粒子尺寸的增大像散对光阱捕获效果的影响将减弱<sup>[21]</sup>; 而 López-Quesada<sup>[19]</sup> 和 Bowman<sup>[22]</sup> 等则进一步利用 Shack-Hartmann 波前探测器对 SLM 引起的像差进行了精确探测, 之后通过 SLM 迭代加载相应的像差相位图, 实验也使得 SLM 中存在的像差得到了有效校正.

在全息阵列光镊中, 对算法引起的像差进行校正, 对于提高光阱的捕获效果和深化我们对算法特性的认识都有着重要意义, 先前文献还鲜有报道. 像差一般采用泽尼克多项式来展开, 它是描述像差波前的完备集. 本文拟通过 SLM 加载泽尼克多项式相位图对全息阵列光镊中由 GL 算法引起的像差进行校正. 实验首先利用  $Z_3^{-1}$  项对光路中由 GL 算法引起的慧差进行校正; 并就  $Z_3^{-1}$  项与  $Z_0^0$ ,  $Z_2^0$  两项的像差校正结果进行了对比分析, 实验还利用  $Z_1^1$ ,  $Z_1^{-1}$  项对 GL 算法做了一阶泽尼克像差校正, 并分析了该两项的像差校正结果.

## 2 原理和装置

### 2.1 GL 算法及全息阵列光镊装置

本文采用 GL 算法来构建全息阵列光镊. 在众多设计阵列光阱相位片的算法中, GL 算法<sup>[18]</sup> 具有简单速度快, 改变光阱位置时扰动小等优点, 它通过对各个空间位置的单光阱相位图进行叠加的原理来生成阵列多光阱相位片, 各单光阱的相位图包含对光栅型和透镜组型两种相位片的设计. 其中光栅型相位片具有类似于光栅的周期性相位分布, 用来调节光阱的横向位置; 而透镜组型相位片则是对光阱的轴向位置进行设定. 具体地, 相位分布为  $\phi_{\text{gratings}}(x, y) = a(\Delta x x_{\text{h}} + \Delta y y_{\text{h}})$  的光栅型相位片对物镜焦点处的光阱实现位移为  $\Delta x, \Delta y$  的横向偏移,  $a$  为相位比例系数, 大小与光学系统的成像特性及激光波长有关,  $(x_{\text{h}}, y_{\text{h}})$  为全息面上的位置坐标. 相位分布

为  $\phi_{\text{lens}}(x_{\text{h}}, y_{\text{h}}) = -\frac{k}{2f(\Delta z)}(x_{\text{h}}^2 + y_{\text{h}}^2)$  的透镜组型相位片则是对光阱实现轴向偏移为  $\Delta z$  的操作,  $k$  为光波波矢,  $f(\Delta z)$  为该透镜组型相位片的等效焦距, 大小与光阱轴向偏移量  $\Delta z$  和光学系统的成像特性有关. 偏离物镜焦点位移为  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  的单光阱相位图为上述两种相位分布  $\phi_{\text{gratings}}, \phi_{\text{lens}}$  的叠加  $\phi_i = (\phi_{\text{gratings}} + \phi_{\text{lens}}) \bmod(2\pi)$ . 通过对各光阱在全息面上的光场复振幅  $u_{\text{h},n}$  叠加, 即得到了任意空间位置分布的阵列多光阱相位图  $\phi_{\text{h}} = \arg\left(\sum_{n=1}^N u_{\text{h},n}\right)$ .

利用 SLM 作为衍射光学元件构成的全息阵列光镊光路具有结构简单、调节方便及衍射效率高等优点<sup>[23]</sup>, 实验光路图如图 1(a) 所示. 实验采用由 Nd:YAG 激光器 (HPG-5000, ELFORLIGHT, 5 W, CW, 532 nm) 发出的线偏振基模高斯光来生成阵列四光阱<sup>[24]</sup>. 基模高斯光的偏振方向与 SLM 中液晶分子的长轴方向平行, 以保证 SLM 对入射偏振光进行纯相位调制; SLM 由计算机控制并加载由上述 GL 算法设计生成的阵列四光阱相位图, 如图 1(b) 所示. 实验所用的 SLM 为反射型的纯相位型液晶空间光调制器<sup>[24,25]</sup> (Holoeyes, PLUTO), 像素分辨率为  $1920 \times 1080$ , 在 420—850 nm 波长范围内最大相位调制为  $2\pi$  弧度, 可满足实验所用 532 nm 激光的相位调制需求. 实验时, 从激光器发出的线偏振光首先经透镜组  $f_1, f_2$  扩束和 SLM 调制后形成阵列四光阱光束; 调制后的光束再经阱位透镜  $f_3$  聚焦由两片  $45^\circ$  全反镜耦合至显微镜 (Olympus IX-70, JAPAN) 中, 最后通过高数值孔径油浸物镜 ( $\text{NA} = 1.3$ , 100 倍) 的聚焦在其焦平面上形成阵列四光阱. 捕获四个直径  $2 \mu\text{m}$  的聚苯乙烯小球, 通过 CMOS 相机 (DALSA 1.4 M100)<sup>[26]</sup> 记录得到图 1(c) 所示的实验图像, 图中 T1, T2, T3, T4 为光阱编号. 实验中相机采集频率 50.0 Hz, 单张曝光时间 10 ms.

### 2.2 泽尼克多项式的波前校正原理及像差校正结果的检测

利用 GL 算法虽然可以实现阵列光阱的动态三维操控, 但缺点是光束经由 GL 算法设计的相位片调制后的质量不是最佳的, 这将导致阵列光阱的波前发生畸变而影响光阱的捕获效果<sup>[18,27]</sup>. 光路中由算法和光学元件引起的畸变波前可用一系列正

交的泽尼克多项式的线性组合来表示, 这既能满足对阵列光阱复杂波前相位信息的描述, 同时也有很高的精度 [28,29]. 圆内泽尼克多项式通常表示为如下的二维极坐标形式:

$$Z_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta), & m \geq 0, \\ -N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta), & m \leq 0, \end{cases}$$

其中,

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}}, \delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ 1, & i \neq j, \end{cases}$$

$$R_n^{\pm m}(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left[ \frac{n+m}{2} - s \right]! \left[ \frac{n-m}{2} - s \right]!} \rho^{n-2s}$$

式中  $\rho, \theta$  为极坐标轴,  $\delta_{ij}$  为克罗内克符号,  $m, n$  为泽尼克多项式的角向频率数和径向频率数, 是反映多项式空间频率的重要参数, 且满足关系式  $n - |m| = \text{even}, m < n$ . 泽尼克多项式通过双数索引方案  $Z_n^m$  进行标识, 下标  $n$  代表多项式的阶数, 上标  $m$  表示这一阶的模. 泽尼克多项式表示像差时, 也叫泽尼克像差.  $n = m = 0, Z_0^0$  为一

常数项像差. 上述泽尼克多项式组成一个正交的完备集, 实际光路中的像差正是这些完备的基矢所张 Hilbert 空间中的一个矢量. 以下为部分项的径向函数和全息相位图. 图 2(a) 为其中五项的径向函数随归一化半径  $r$  的变化曲线; 图 2(b) 为前四阶九项的全息相位图, 图中颜色的灰度代表相位值大小的不同.

在由泽尼克多项式表示的畸变波前中像差校正旨在消除畸变波前中各泽尼克像差分量. SLM 是一种动态元件, 在计算机的控制下既能加载全息光阱相位片, 也可以加载像差校正相位图而起到波前校正的作用. 所以在全息阵列光镊中, 通过 SLM 加载合适校正系数的像差相位图可望抵消光路中相应的泽尼克像差分量, 从而实现对全息阵列光镊的像差校正. 通常低阶像差是引起波前畸变的主要像差, 本文选取  $Z_0^0, Z_2^0, Z_1^1, Z_1^{-1}, Z_3^{-1}$  五项低阶泽尼克多项式对阵列光镊中由 GL 算法引起的像差进行校正. 其中一些项与初级赛德尔像差存在着对应关系 [28], 如  $Z_2^0$  项对应场曲,  $Z_3^{-1}$  项对应慧差等. 各项的像差校正实验在由 Labview 编制的控制程序中完成.

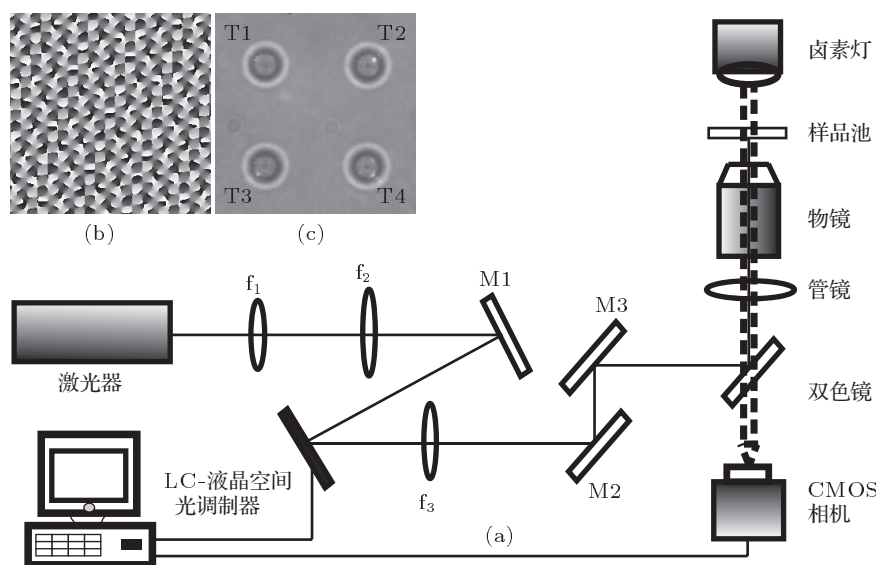


图 1 全息阵列光镊原理图 (a) 全息阵列光镊光路图; (b) 阵列四光阱的全息相位图; (c) 阵列四光阱的粒子捕获图

检测泽尼克多项式像差校正结果的方法有很多 [30-34], 光阱刚度是反映光阱捕获效果的重要参数, 刚度越大则光阱对粒子的捕获越稳定. 热运动法具有较高的光阱刚度测量精度 [26,30], 本实验通

过热运动法测量阵列四光阱的横向刚度随各项像差系数的变化, 来定量反映各项的像差校正结果. 热运动法 [26,30] 中, 根据小球在光阱中做受限布朗运动的郎之万方程可推得关系式  $k_x \langle x^2 \rangle = k_B T$ ,

其中  $x$  为光阱横向坐标, 坐标原点位于光阱中心,  $k_B$  为玻尔兹曼常数, 所以通过统计小球均方位移  $\langle x^2 \rangle$  和测量溶液温度  $T$ , 可算得光阱  $x$  方向上的刚度  $k_x$ ; 同理可得  $y$  方向上的光阱刚度  $k_y$  [35]. 实验时溶液温度  $T$  取室温值. 光阱中小球轨迹利

用 CMOS 相机 [24,26] 追踪, 小球坐标位置则通过相关运算图像分析法 [27-29] 来进行分析. 为了保证小球均方位移  $\langle x^2 \rangle$  的统计准确性, 相机在每一像差系数下采集 1000 幅阵列四光阱的小球捕获图像.

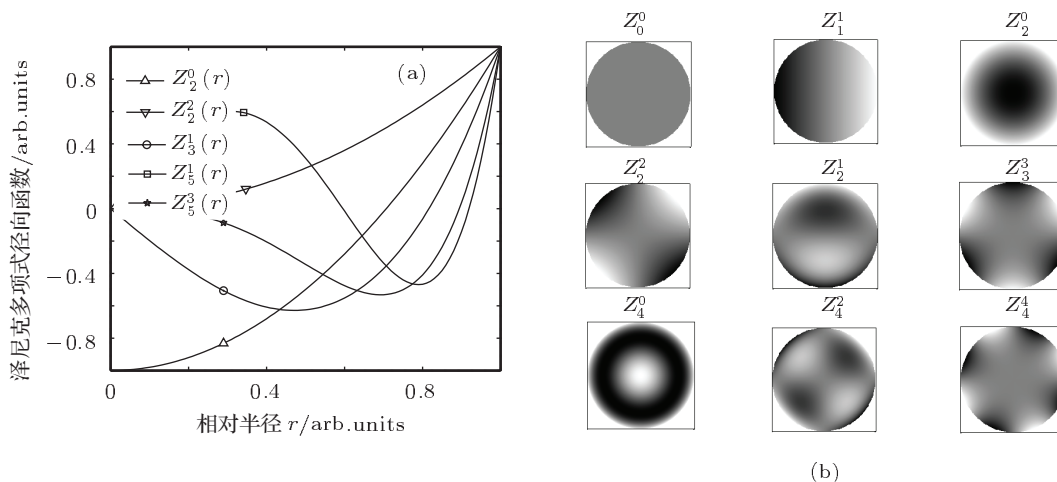


图2 泽尼克多项式的径向函数和全息相位图 (a) 其中五项泽尼克多项式的径向函数的变化曲线; (b) 前四阶九项泽尼克多项式的全息相位图

### 3 实验与结果分析

实验选取  $Z_0^0, Z_2^0, Z_1^1, Z_1^{-1}$  和  $Z_3^{-1}$  五项泽尼克多项式对全息阵列光镊中由 GL 算法引起的像差进行校正. 各项的像差系数范围为  $-20$  至  $100$ , 实验时每 10 刻度调节一次, 实验温度为  $26^\circ\text{C}$ . 通过 SLM 向光路中加载不同像差系数的泽尼克像差相位图. 需要指出的是, 实验中由 GL 算法生成的四光阱空间位置是对称的, 像差对各光阱的影响程度相近, 因而各项的像差校正结果可直观地反映光路中的对应像差对阵列光阱的影响. 像差校正结果中, 各项分别在其最佳校正系数处有着最佳的像差校正效果, 该项对光阱刚度的提高幅度越大, 表明光路中相应的泽尼克像差对阵列光阱的捕获效果影响越大.

#### 3.1 $Z_3^{-1}$ 项校正由 GL 算法引起的慧差

单光镊中的光阱一般位于光轴上的物镜焦点处, 与之不同的是, 阵列光镊中的光阱多分散于光轴附近, 这使得阵列光阱容易受到光路中的慧差、像散等轴外像差的影响 [20].  $Z_3^{-1}$  项与慧差相对应, 实验首先选取  $Z_3^{-1}$  项对阵列光镊中可能存在的慧

差进行校正, 结果如图 3(a) 所示. 图中  $X$  轴为  $Z_3^{-1}$  项的像差系数  $a_{3-1}$ ,  $Y$  轴为各光阱  $X, Y$  方向的刚度平均值, 而曲线 5 则表示四光阱的刚度平均值随像差系数的变化. 每一像差系数下的四点代表一次实验结果;  $X$  轴起始处的刚度值为未校正像差时的四光阱刚度.

从图 3(a) 可以看出, 随着像差系数的增大, 阵列光阱的刚度也随之提高, 且阵列各光阱刚度随像差系数的变化关系相近. 至系数 80 时, 阵列光阱的刚度平均值达最大. 根据曲线 5, 对比校正系数为 80 和未进行像差校正时的光阱刚度平均值可知,  $Z_3^{-1}$  项在其最佳校正系数 80 处使得阵列光阱的刚度提高了约 40%. 这说明全息阵列光镊光路中存在着较严重的慧差. 下面分析光路中慧差的来源. 全息阵列光镊光路中存在着两种慧差来源因素: 光学元件和由 GL 算法设计的阵列光阱相位片. 先前文献已指出, SLM 的表面弯曲会在光路中引入轴外像差 [20], 且这些轴外像差主要为像散 [21], 而引起的慧差以及其他高阶项像差所占的比重很小, 其影响可以忽略 [21]. 因此结合本实验的校正结果可知, 光路中的慧差应该来自由 GL 算法设计的全息相位片, 且慧差的存在对阵列光阱的捕获效果产生了较大影响.

### 3.2 $Z_0^0, Z_2^0$ 项校正光学系统中的球差和失焦

通常光镊装置中由玻片和水溶液界面折射率失配引起的球差、失焦像差会对光阱的捕获效果产生较大影响<sup>[36]</sup>. 在全息阵列光镊中, 为了比较由 GL 算法和光学系统局限两种因素导致的像差对阵列光阱的影响, 实验又利用  $Z_0^0, Z_2^0$  两项对光学系统中由折射率失配所引起的像差进行校正,  $Z_0^0$  项的像差校正结果如图 3(b) 所示. 由图可见, 在  $Z_0^0$  项的校正下, 阵列四光阱刚度随像差系数的变化也基本保持一致; 当系数取 100 时四光阱

的刚度值达最大, 由曲线 5 可知  $Z_0^0$  项使得阵列光阱的刚度得到了有效提高.  $Z_0^0$  为常数项像差, 其最佳校正系数为 100 表明光路中存在着较严重的负  $Z_0^0$  像差. 根据像差函数分析可得<sup>[36]</sup>, 这主要是由玻片和水溶液界面的折射率失配所引起的光波阵面的负相位移动造成的. 角向频率数同为 0 的  $Z_2^0$  像差项也是对光路中由光学系统折射率失配引起的像差进行校正, 其像差校正结果与  $Z_0^0$  项相似, 同在此不再列出  $Z_2^0$  项的像差校正结果曲线, 图 4 给出了在该项校正作用下的阵列四光阱刚度平均值变化.

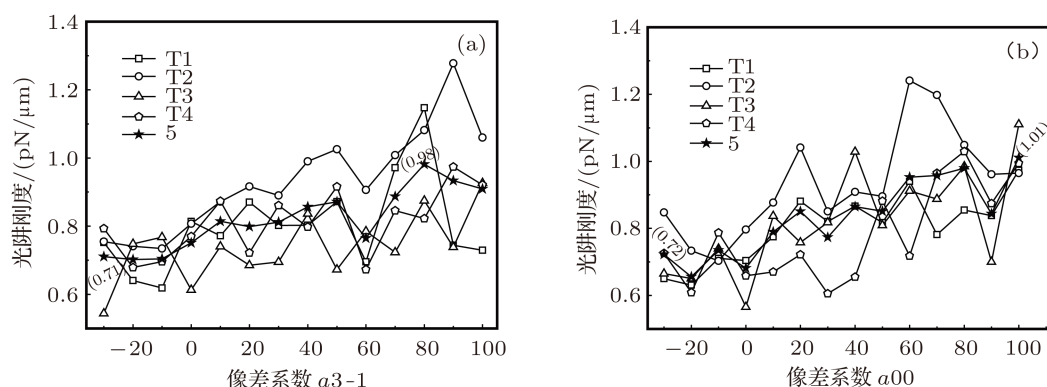


图 3 像差校正结果 (a)  $Z_3^{-1}$  项; (b)  $Z_0^0$  项

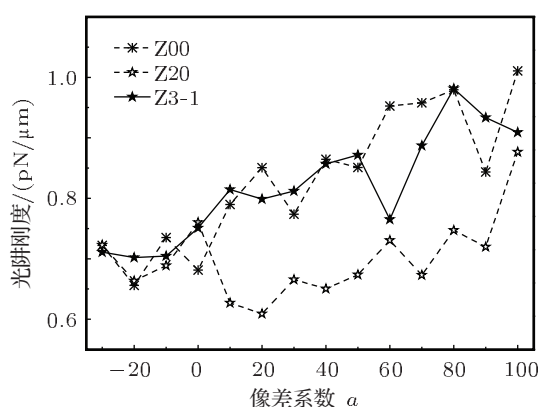


图 4  $Z_3^{-1}$  与  $Z_0^0, Z_2^0$  三项校正下的光阱刚度平均值变化曲线

### 3.3 $Z_3^{-1}$ 项与 $Z_0^0, Z_2^0$ 两项的像差校正结果比较

下面比较  $Z_3^{-1}$  项与  $Z_0^0, Z_2^0$  两项的像差校正结果, 将上述三项的四光阱刚度平均值的变化曲线绘于图 4 中. 由图可见, 在  $Z_0^0$  与  $Z_2^0$  两项的校

正下四光阱刚度平均值随像差校正系数的变化关系相近, 该两项有着相似的像差校正效果; 且  $Z_0^0$  项的校正效果优于  $Z_2^0$  项. 同时对比  $Z_3^{-1}$  项与  $Z_0^0$  项的像差校正结果可知,  $Z_0^0$  项在像差系数 100 时可大幅的提高阵列光阱刚度, 有着最佳的像差校正效果; 而  $Z_3^{-1}$  项与  $Z_0^0$  项一样, 在其最佳校正系数 80 处也可以同等大幅度的提高阵列光阱刚度, 这说明阵列光镊中由 GL 算法引起的慧差和光学系统中由玻片与水溶液界面的折射率失配引起的球差等像差一样, 都会对阵列光阱刚度产生较大程度的影响, 使得阵列光阱的捕获效果变差. 而通过 SLM 加载  $Z_3^{-1}$  项的校正相位图可以有效消除光路中的慧差, 提高阵列各光阱刚度. 同时这也说明了在加载像差校正相位图后, 由 GL 算法生成的阵列四光阱相位片的性能得到了优化. 这启发我们在进行相位片的算法设计时, 通过加载校正相位图也可以考虑作为对算法性能进行优化的一条有效途径.

### 3.4 $Z_1^1, Z_1^{-1}$ 项校正 GL 算法的一阶泽尼克像差

$Z_1^1$  和  $Z_1^{-1}$  像差作为一阶泽尼克像差, 与初级像差中的畸变相对应, 原则上也会对分散于光轴附近的阵列光阱产生影响. 实验再次通过 SLM 加载  $Z_1^1, Z_1^{-1}$  两项的校正相位图对 GL 算法进行一阶泽尼克像差校正, 实验结果如图 5(a), (b) 所示. 图中曲线 5 也为四光阱刚度的平均值变化.

从图 5(a) 可以看出,  $Z_1^{-1}$  项中各光阱刚度随像差系数的变化同步, 且起伏不大、无明显的刚度极大值出现; 在图 5(b) 中,  $Z_1^1$  项虽然能在像差系数 20 处小幅度的提高阵列四光阱刚度, 但由曲线 5 不难发现该项对光路中的一阶像差校正作用依然很有

限. 因而根据上述结果可知,  $Z_1^1, Z_1^{-1}$  项不能有效提高阵列光阱的刚度. 同时当考虑  $Z_1^1$  和  $Z_1^{-1}$  两项的校正相位图是作为像差引入光路时, 光阱刚度未发生明显改变也表明一阶泽尼克像差对阵列光阱捕获效果的影响可以忽略. 该结果区别于通常像差对光阱捕获效果影响较大的情形, 具有一定的反常性, 但这在全息阵列光镊中对于算法的像差校正却有着特殊意义, 下面来做简要说明. 由上述结果可知, 光路中可能来自于阵列光阱相位片的一阶泽尼克像差不会对光阱的捕获效果产生较大影响, 而这从另一方面也反映了由 GL 算法设计生成的阵列光阱可以很好地抵抗来自光路中的一阶泽尼克像差干扰, 因此 GL 算法对于一阶泽尼克像差具有鲁棒性 (robustness).

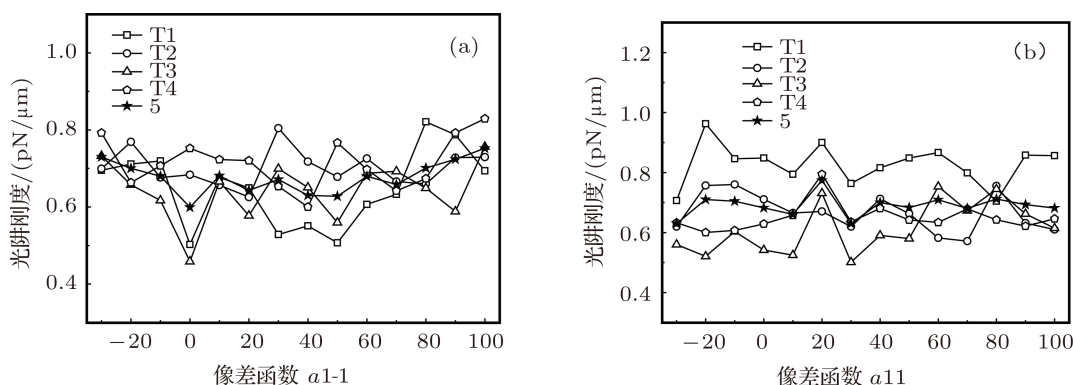


图 5 像差校正结果 (a)  $Z_1^{-1}$  项; (b)  $Z_1^1$  项

## 4 结论

利用 SLM 加载泽尼克多项式相位图, 对全息阵列光镊中由 GL 算法引起的像差进行了校正. 采用热运动法测量光阱横向刚度随像差系数的变化来反映各项的像差校正结果, 实验得到并分析了五项泽尼克多项式的像差校正结果. 结果显示, GL 算法会导致全息阵列光镊光路中产生较严重的慧差, 而利用  $Z_3^{-1}$  项可以有效消除光路中的慧差, 提高阵列各光阱刚度, 刚度提高幅度可达 40%. 为了阐明由 GL 算法引起的像差对阵列光阱捕获效果的影响程度, 实验又利用  $Z_0^0, Z_2^0$  两项对由光学系统局限所引起的像差进行校正, 通过比较  $Z_3^{-1}$  项与该两项的像差校正结果发现, 光路中由 GL 算法引起的慧差和光学系统中由玻片和水溶液界面的折射率

失配引起的像差一样, 也会较大幅度地影响阵列光阱对多粒子的稳定捕获. 同时在利用  $Z_1^1, Z_1^{-1}$  两项对 GL 算法进行一阶泽尼克像差的校正实验中, 由实验结果分析可得 GL 算法对于一阶泽尼克像差具有鲁棒性.

由上述泽尼克多项式的像差校正结果可知, 通过 SLM 加载像差相位片对全息阵列光镊中由算法引起的像差进行校正具有重要意义: 这一方面可以拓展我们对算法特性的认识; 更为重要的是可以改善算法的性能, 有效提高阵列光阱的捕获效果. 这意味着在全息阵列光镊中利用较低功率的激光即可实现对多个微观粒子的稳定捕获, 从而减小了高功率激光对捕获粒子尤其是生物粒子的伤害, 而这无疑会有力的促进全息阵列光镊在胶体多体相互作用等领域中开展更加广泛而富有成效的应用.

- [1] Grier D G 2003 *Nature* **424** 810
- [2] Garcés-Chávez V, McGloin D, Melville H, Sibbett W, Dholakia K 2002 *Nature* **419** 145
- [3] Dufresne E R, Spalding G C, Dearing M T, Sheets S A, Grier D G 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 1810
- [4] Dufresne E R, Grier D G 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 1974
- [5] Ren Y X, Li M, Huang K, Wu J G, Gao H F, Wang Z Q, Li Y M 2010 *Appl. Opt.* **49** 1838
- [6] Zhang P, Wang S, Liu Y M, Yin X B, Lu C G, Chen Z G, Zhang X 2011 *Opt. Lett.* **36** 3191
- [7] Sun J X, Sun Q, Li D X, Lu Z W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3900 (in Chinese) [孙金霞, 孙强, 李东熙, 卢振武 2007 物理学报 **56** 3900]
- [8] Merrill J W, Sainis S K, Blawdziewicz J, Dufresne E R 2010 *Soft. Matter* **6** 2187
- [9] Mejean C O, Schaefer A W, Millman E A, Forscher P, Dufresne E R 2009 *Opt. Express* **17** 6209
- [10] Sun Q, Ren Y X, Yao K, Li Y M, Lu R D 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 109003 (in Chinese) [孙晴, 任煜轩, 姚焜, 李银妹, 卢荣德 2011 中国激光 **38** 109003]
- [11] Gerchberg R W, Saxton W O 1972 *Optik* **35** 237
- [12] Deng X G, Li Y, Qiu Y, Fan D Y 1995 *Chin. J. Lasers* **4** 447
- [13] Yang G Z, Gu B Y 1981 *Acta Phys. Sin.* **30** 414 (in Chinese) [杨国桢, 顾本源 1981 物理学报 **30** 414]
- [14] Seldowitz M A, Allebach J P, Sweeney D W 1987 *Appl. Opt.* **26** 2788
- [15] Georgiou A, Wilkinson T D, Collings N, Crossland W A 2008 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **10** 015306
- [16] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P 1983 *Science* **220** 671
- [17] Bennett A P, Shapiro J L 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 1305
- [18] Leach J, Wulff K, Sinclair G, Jordan P, Courtial J, Thomson L, Gibson G, Karunwi K, Cooper J, Laczik Z J, Padgett M 2006 *Appl. Opt.* **45** 897
- [19] López-Quesada C, Andilla J, Martín-Badosa E 2009 *Appl. Opt.* **48** 1084
- [20] Roichman Y, Waldron A, Gardel E, Grier D G 2006 *Appl. Opt.* **45** 3425
- [21] Wulff K D, Cole D G, Clark R L, DiLeonardo R, Leach J, Cooper J, Gibson G, Padgett M J 2006 *Opt. Express* **14** 4169
- [22] Bowman R W, Wright A J, Padgett M J 2010 *J. Opt.* **12** 124004
- [23] Zhang P, Zhang Z, Prakash J, Huang S, Hernandez D, Salazar M, Christodoulides D N, Chen Z G 2011 *Opt. Lett.* **36** 1491
- [24] Gao H F, Ren Y X, Liu W W, Li Y M 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0404002 (in Chinese) [高红芳, 任煜轩, 刘伟伟, 李银妹 2011 中国激光 **38** 0404002]
- [25] Zhang P, Prakash J, Zhang Z, Mills M S, Efremidis N K, Christodoulides D N, Chen Z G 2011 *Opt. Lett.* **36** 2883
- [26] Ren Y X, Wu J G, Chen M, Li H, Li Y M 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 028703
- [27] Grier D G, Roichman Y 2006 *Appl. Opt.* **45** 880
- [28] Born M, Wolf E 2006 *Principles of Optics* (7th Ed.) (Beijing: Electronics Industry Press) p440 (in Chinese) [M 波恩, E 沃尔夫 2006 光学原理 (第七版) (北京: 电子工业出版社) 第 440 页]
- [29] Li Y, Li L, Huang Y F, Liu J G 2009 *Chin. Phys. B* **18** 565
- [30] Ren Y X, Wu J G, Zhong M C, Li Y M 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 170
- [31] Song Q B, Wen C, Zhang Y, Wang G F, Ye A P 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 600
- [32] Selhuber U C, Zins I, Schubert O, Sönnichsen C, Oddershede L B 2008 *Nano Lett.* **8** 2998
- [33] Richardson A C, Reihani S N S, Oddershede L B 2008 *Opt. Express* **16** 15709
- [34] Liao G B, Bareil P B, Sheng Y L, Chiou A 2008 *Opt. Express* **16** 1996
- [35] Ren Y X, Wu J G, Li Y M 2011 In: Mordechai S ed. *Applications of Monte Carlo Method in Science and Engineering* (Rijeka: Intech) p21
- [36] Dienerowitz M, Gibson G, Bowman R, Padgett M 2011 *Opt. Express* **19** 24589

# Aberrations in holographic array optical tweezers corrected with Zernike polynomials\*

Liu Wei-Wei<sup>1)2)</sup> Ren Yu-Xuan<sup>1)2)</sup> Gao Hong-Fang<sup>1)2)</sup> Sun Qing<sup>1)2)</sup>  
Wang Zi-Qiang<sup>1)2)</sup> Li Yin-Mei<sup>1)2)†</sup>

1) (*Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, Hefei 230026, China*)

(Received 5 January 2012; revised manuscript received 11 March 2012)

## Abstract

Aberrations will degrade trapping performance of optical tweezers. In the holographic optical tweezers, aberrations originate not only from optical elements but also from holographic phase hologram of optical traps designed by a certain algorithm. We utilize a spatial light modulator to imprint Zernike polynomials phase hologram for correcting some certain aberrations in holographic array optical tweezers which are caused by grating and lens algorithm. The results show that third-order Zernike term can effectively correct coma due to the algorithm in the optical train, and the trap stiffness for 2  $\mu\text{m}$  diameter polystyrene beads can reach 40%. Further comparison between different Zernike term aberration correction effects demonstrates that coma caused by grating and lens algorithm in the holographic array optical tweezer has the same serious influence on tweezer trapping performance as the aberrations originating from optical elements. Meanwhile, based on first-order Zernike term aberration correction results it can be obtained that grating and lens algorithm are robust with first-order Zernike aberrations. The correcting of aberrations for algorithm in holographic optical tweezers has great significance for improving the tweezer trapping performance and deepening the understanding of specific algorithm.

**Keywords:** Zernike polynomials, spatial light modulator, holographic array optical tweezers, aberration correction

**PACS:** 87.80.Cc, 42.40.Eq, 42.40.Jv, 42.15.Fr

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 21073174, 20974107, 60974038).

† E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn