

空间散斑场捕获大量吸光性颗粒 及其红外显微观测^{*}

张志刚 刘丰瑞 张青川[†] 程腾 伍小平

(中国科学技术大学近代力学系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 合肥 230027)

(2013年9月16日收到; 2013年10月13日收到修改稿)

光镊技术被广泛应用于捕获和操纵微纳米尺寸颗粒, 主要包括捕获水中透明性颗粒和空气中吸光性颗粒两种类型. 本文用激光束照射毛玻璃散射片, 透射光经透镜会聚后在透镜的像平面附近产生了主观散斑场. 该散斑场为空间分布, 包含大量的亮斑和暗斑. 大量由亮斑包围的暗斑如同一个个空间能量陷阱, 被用来捕获大量的吸光性墨粉颗粒, 被捕获颗粒的尺寸约 $2\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$, 密度约 $1\text{--}2\text{ g/cm}^3$. 采用红外显微镜拍摄到空间散斑场捕获颗粒的红外像, 红外图像显示被捕获颗粒吸光后温度升高, 证实了空间散斑场捕获吸光性颗粒的机理为光泳力原理.

关键词: 光镊, 空间散斑场, 光泳力, 红外显微

PACS: 87.80.Cc, 87.64.km, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.63.028701

1 引言

光能够影响物体的运动, 光与物质相互作用的一个非常重要的成果是利用光来改变微小物体的运动状态, 实现操纵, 也就是光镊技术. 在生物和化学等领域, 光镊技术被广泛应用于捕获、筛选和操纵微纳米尺寸细胞和颗粒, 并取得了相当显著的成果^[1-4]. 光镊技术捕获和操纵的颗粒分为透光性颗粒^[5-7]和吸光性颗粒^[8,9]两种类型. 对透光性颗粒的捕获和操纵主要在液体中进行, 以平衡颗粒所受到的几个主要作用力, 包括散射力、梯度力以及重力等^[10]. Ashkin^[11]认为, 颗粒在光束附近时会受到光对它产生的力的作用, 其中由光弱指向光强方向的力称为梯度力, 沿光的传播方向的力称为散射力. 适当改变光束聚焦情况, 使得梯度力和散射力的大小发生改变, 可以实现颗粒的捕获和分离. 对吸光性颗粒的捕获和操纵主要在空气中进行, 研究学者普遍认为捕获机理是基于光泳力原理^[12]. 当

激光照射到吸光性颗粒时, 被照射表面吸收光能, 温度升高. 颗粒与周围空气存在热交换, 颗粒表面较高处的空气温度也高. 颗粒周围的气体分子做自由运动撞击到颗粒表面并被颗粒反弹时, 表面温度较高处的气体分子撞击和反弹时的频率以及平均动量大于未被照射表面的, 因此吸光性颗粒获得了沿光强梯度方向的净动量, 从而发生定向运动, 这就是光泳力原理. 当空间中存在由亮区包围的暗区能量陷阱时, 吸光性颗粒受到光泳力作用会被束缚在暗区能量陷阱. 为了衡量光镊捕获颗粒能力的大小, 光阱刚度的计算^[13-15]、光镊阱位的操控研究^[16]等也是目前光镊技术研究的重要组成部分.

目前生成光镊的方式多种多样, 主要是因为产生能量陷阱的方式是多种多样的, 包括高数值孔径的物镜汇聚生成亮区能量陷阱、由相向照射的空心光束形成的暗区能量陷阱、由空间光调制器生成的多个亮区能量陷阱、由位错光栅形成的涡旋光束、由带有缺陷的纳米光纤形成的亮区能量陷阱等^[17].

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB302105)、国家自然科学基金 (批准号: 11332010, 11102201)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: WK2090050017) 和中国科学院科研装备研制项目 (批准号: YZ201265) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

已有的光镊方式主要是对单个或少量颗粒进行捕获和操纵,而不能同时对大量颗粒进行捕获和操纵,这是由于这些光镊技术所产生的能量陷阱的数量很少所限制的.要想实现同时捕获大量颗粒,需要同时产生多个能量陷阱. Shvedov 等^[18]采用空间散斑场生成了大量的空间暗区能量陷阱,捕获了大量直径约 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的碳纳米泡沫. 碳纳米泡沫采用高脉冲激光烧蚀碳制成,密度仅有 10 mg/cm^3 ,远低于日常生活和生产所接触到的微纳米颗粒密度,而随着颗粒密度的升高和尺寸增大,对空气中吸光性颗粒的捕获难度也大大提高. 如果能够实现对日常生活和生产所接触的大量吸光性颗粒同时捕获,则可应用在 PM2.5 检测和颗粒筛选等方面^[19,20].

目前国内对于光镊技术的研究主要集中在透明性颗粒的捕获和操纵等方面,而对于吸光性颗粒的捕获和操纵的研究很少. 为了实现对日常生活和生产中更为常见的吸光性颗粒的捕获,本课题组选用打印机墨粉颗粒作为被捕获颗粒,颗粒尺寸约为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 左右,密度约为 $1\text{--}2\text{ g/cm}^3$,采用大功率激光器照射毛玻璃散射片生成空间散斑场,并首次使用红外显微镜观测由空间散斑场捕获的墨粉颗粒. 本文第二部分描述了生成空间散斑场的实验方法,第三部分采用可见光显微镜观测空间散斑场捕获的墨粉颗粒图像,第四部分使用红外显微镜观测空间散斑场捕获的墨粉颗粒图像.

2 空间散斑场

当激光照射表面粗糙(与光波长相比)的物体时,物面就会散射无数相干子波,这些散射子波在物体周围空间相互干涉. 若散射子波的相位差满足相长干涉条件,则散射子波在物体周围空间形成亮点;若相位差满足相消干涉条件,则形成暗点. 由于散射子波的相位随机分布,因此这些散射子波在物体周围空间就形成了无数随机分布的亮点和暗点,这种随机分布的亮点和暗点就称为散斑^[21].

选用 532 nm 波长激光器,最大功率为 1.5 W . 由大功率激光器发出的激光照射到毛玻璃散射片上,散射后的激光经透镜会聚,在透镜像平面形成空间散斑场,如图 1 所示. 照射到毛玻璃上的激光光束直径 D 为 1 mm ,透镜的焦距 f 为 25 mm ,通光孔径 D_a 为 15 mm ,放置在距离毛玻璃 $Z_0 = 35\text{ mm}$ 的位置上,像平面距离透镜的距离 Z_a 为 88 mm . 用

于捕捉微纳米颗粒的空间散斑场位于透明的玻璃容器中,用于喷入含有打印机墨粉的气体. 图 2(a) 为像平面处的空间散斑场效果图,存在大量的亮斑和暗斑,由亮斑包围的暗斑如同一个个空心光瓶结构,光瓶中心为暗区能量陷阱. 图 2(b) 为空间散斑场 xz 平面光强分布图像,峰处为亮斑区域,光强较强;谷处为暗斑区域,光强较弱. 基于光泳力原理,与光瓶尺寸相当的吸光性颗粒进入到光瓶之后,受力方向指向光瓶中心的暗斑,使得颗粒被束缚在光强分布图像的谷处. 空间散斑场的散斑特征尺寸与光路布置有关,可用归一化强度自相关函数的半极大值宽度来量度,其横向(光束横截面方向)尺寸 $\sigma_{\perp}$ 与轴向尺寸 $\sigma_{\parallel}$ 分别表示为^[22]

$$\sigma_{\perp} = 1.4\lambda \frac{Z_a}{D_a} = 4.37\text{ }\mu\text{m}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\parallel} = 6.7\lambda \left(\frac{Z_a}{D_a} \right)^2 = 122.68\text{ }\mu\text{m}. \quad (2)$$

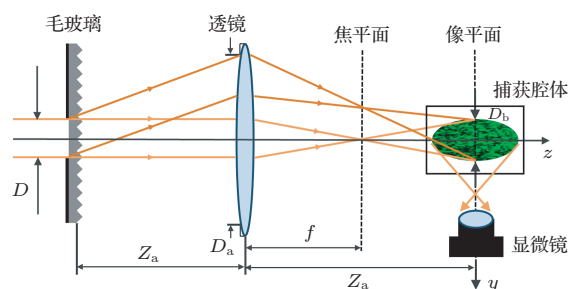


图 1 空间散斑场捕获墨粉颗粒的实验光路图 D 为照射到毛玻璃上的激光光束直径, D_a 为透镜的通光孔径, D_b 为像平面上的像宽度, Z_0 为毛玻璃到透镜的距离, f 为透镜焦距, Z_a 为透镜到像平面的距离

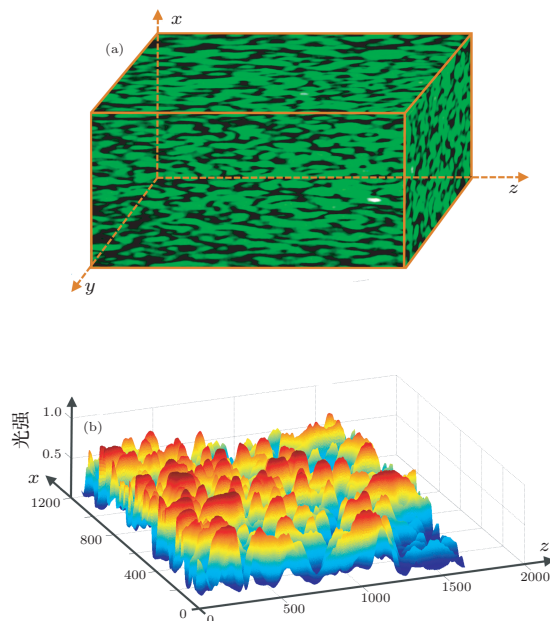


图 2 空间散斑场 (a) 空间散斑场效果图; (b) 空间散斑场沿 xz 平面的归一化光强分布图像

可见, 空间散斑如同雪茄状分布, 其轴向特征尺寸远大于横向特征尺寸, 因此被空间散斑场捕获的颗粒尺寸主要受散斑的横向尺寸影响.

3 实验结果与讨论

打印机墨粉颗粒尺寸为几个微米量级, 吸光性能好(吸光率接近1), 在日常生活和生产中经常用到, 容易获得, 因此选用打印机墨粉作为被捕获吸光性颗粒. 采用图1所示光路生成空间散斑场, 激光器功率设为1.5 W, 往捕获腔体内喷入打印机墨粉, 由长焦显微镜观察墨粉颗粒表面漫射的激光, 稳定捕获时的图像如图3(a)所示, z 方向为激光束传播方向. 逐渐降低激光器功率, 激光光强降低, 使得被捕获颗粒受到的光泳力降低, 部分被捕获颗粒

脱离了暗区能量陷阱的束缚, 使得被捕获颗粒的数量减小, 当激光器功率为1.1 W时, 被捕获颗粒图像如图3(b)所示. 继续降低激光器功率, 被捕获颗粒的数量进一步减少, 当激光器功率降低到0.8 W时, 被捕获颗粒图像如图3(c)所示. 此时, 将激光器功率增大到1.5 W, 部分空气中漂浮的墨粉颗粒重新被暗区能量陷阱捕获到, 被捕获颗粒数量增加, 如图3(d)所示. 图3(d)与图3(a)相比颗粒数量减少, 主要是因为激光器功率重新增大到1.5 W时, 空气中悬浮的墨粉颗粒数量相对刚喷入墨粉颗粒时大大减少, 使得能够进入能量陷阱并被捕获的颗粒相对减少. 图3采集的为激光照射到颗粒表面后散射的图像, 其颗粒显示尺寸远大于颗粒的实际尺寸.

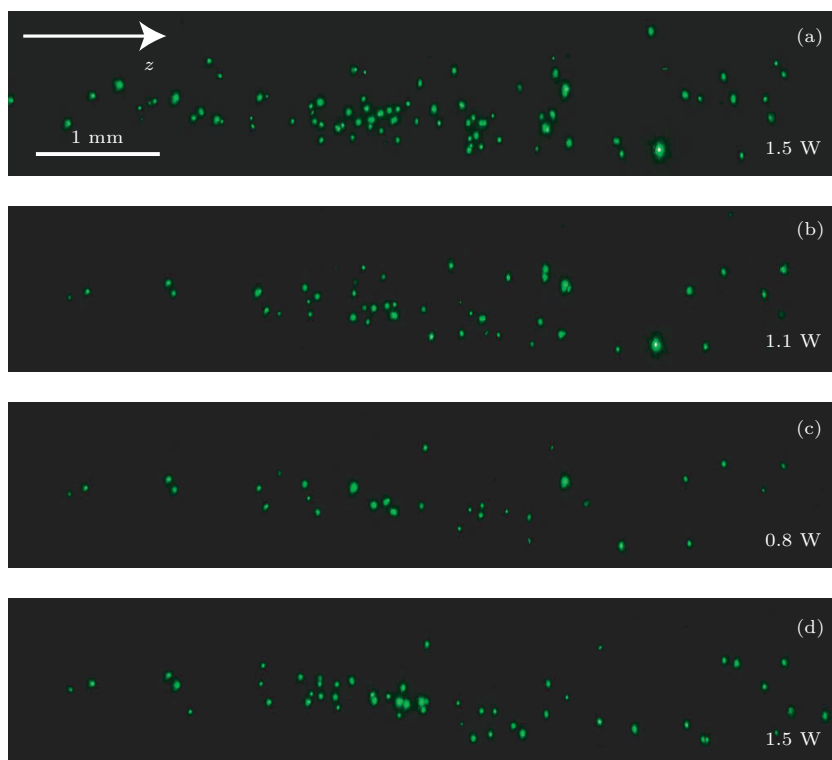


图3 空间散斑场捕获墨粉颗粒图像 (a) 激光器功率为1.5 W时, 喷入大量的墨粉颗粒, 被捕获颗粒图像; (b) 激光器功率降低到1.1 W时, 被捕获颗粒图像; (c) 激光器功率降低到0.8 W时, 被捕获颗粒图像; (d) 激光器功率重新增大到1.5 W时, 被捕获颗粒图像

被捕获墨粉颗粒的扫描电子显微镜照片如图4(a)所示. 从图中可见, 被捕获墨粉颗粒特征尺寸分布比较广, 从约2 μm 到约8 μm , 也即颗粒尺寸低于空间散斑横向特征尺寸的墨粉和颗粒尺寸略高于空间散斑横向特征尺寸的墨粉都能够被空间散斑场捕获. 颗粒尺寸低于空间散斑场横向特征尺寸时的捕获如图4(b)和

(c)所示. 图4(b)中低于空间散斑场横向特征尺寸的较小颗粒部分进入到散斑场亮区, 受到光泳力作用指向中心暗区能量陷阱, 颗粒被推回暗区能量陷阱中央, 如图4(c)所示, 稳定时颗粒未被激光照射, 不受光泳力的作用. 颗粒尺寸高于空间散斑场横向特征尺寸时的捕获如图4(d)和(e)所示. 图4(d)中高于空间散斑场横向

特征尺寸的较大颗粒部分进入到散斑场亮区, 受到多个光泳力作用, 光泳力的合力指向中心暗区能量陷阱, 颗粒被推回暗区能量陷阱中央, 如图 4(e) 所示, 稳定时颗粒仍然受到多个光泳力作用, 但光泳力的合力为零. 因此, 小于空间散斑场横向特征尺寸的颗粒和略大于空间散斑场横向特征尺寸的颗粒都能够被空间散斑场所形成的暗区能量陷阱捕获, 而远大于空间散斑场横向特征尺寸的颗粒不能

够被空间散斑场所形成的暗区能量陷阱捕获. 空间散斑场能够实现对一定尺寸范围内的颗粒选择性地捕获, 调节光路参数来改变空间散斑场的横向特征尺寸, 可应用于 PM2.5 检测以及颗粒筛选与分离中. 由 4(c) 和 (e) 图像比较可知, 大尺寸吸光性颗粒被空间散斑场捕获时所受到的光照射面积大, 由光泳力理论可知, 大尺寸颗粒的温升也应比小颗粒温升高.

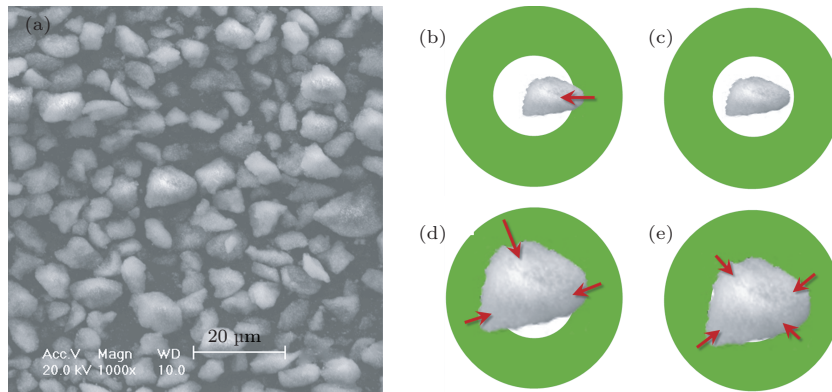


图 4 被捕获墨粉颗粒扫描电子显微镜图像以及墨粉受力分析, (图中红色箭头标示光泳力方向) (a) 被捕获墨粉颗粒的扫描电子显微镜照片; (b) 低于空间散斑场横向特征尺寸的较小颗粒部分进入到散斑场亮区, 受到光泳力作用指向中心暗区能量陷阱; (c) 低于空间散斑场横向特征尺寸的较小颗粒处于中心暗区时, 未被激光照射, 不受到光泳力作用; (d) 高于空间散斑场横向特征尺寸的较大颗粒部分进入到散斑场亮区, 受到多个光泳力的合力指向中心暗区能量陷阱; (e) 高于空间散斑场横向特征尺寸的较大颗粒处于中心暗区时, 受到多个光泳力的合力为零

4 红外显微观测被捕获吸光性颗粒

Lewittes 等^[23]进行了光悬浮吸光性颗粒实验, 并首次提出了实验中操纵颗粒的原理为光泳力. 基于多年的红外成像研究经验^[24–26], 我们课题组首次将红外显微镜应用到观测由球差透镜生成的暗区能量陷阱捕获的吸光性颗粒, 并成功观测到被捕获颗粒的温升, 证实了基于球差透镜捕获吸光性颗粒的原理为光泳力^[27]. 本文将红外显微镜应用到观测由空间散斑场捕获的吸光性颗粒的实验中, 成功观测到空间散斑场捕获的墨粉颗粒温升图像. 红外显微镜的像素数为 320×240 , 空间分辨率为 $22 \mu\text{m}$, 温度分辨率为 $\pm 0.05 \text{ K}$. 采用红外观测与分析软件将拍摄图像进行高斯拟合放大, 以便能更清晰地看到被捕获墨粉颗粒, 并截取颗粒部分, 如图 5 所示. 图中右侧为红外显示图像的温标条, 图中最低温度处相比环境温度高出约 0.35 K , 是由于截取区域内除了能够观测到的颗粒外, 还有一些受到红外显微镜景深限制未能观察到的颗粒, 这些颗粒辐射的红外光被感热芯片接收, 使得采集到的捕获区域相对于其他区域温度要高. 另外由于焦深

限制, 未能拍摄到的颗粒较多的区域相对于颗粒较少的区域温度会略高, 使得图中背景左右温升不同. 红外相机采集到的被捕获颗粒的最大温度与环境最低温度的差值约为 1.53 K , 这么小的温升差值是由红外显微镜的空间分辨率引起的. 选用红外显微镜采集的原始数据进行处理, 红外显微镜的每个像素对应的实际尺寸为 $22 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$, 而较大墨粉颗粒的尺寸仅为 $8 \mu\text{m}$. 当采用红外显微镜对墨粉颗粒进行红外成像时, 较大的墨粉颗粒在红外显微镜记录平面的红外图像只占红外显微镜一个像素单元的 13%. 最大温升处应为被捕获的大颗粒处, 也即该像素 13% 面积受到的红外辐射热流使其产生的温升值为 1.53 K , 若整个单元都受到同样强度的辐射热流率密度, 其温升应为 $1.53 \text{ K} / 0.13 = 12 \text{ K}$, 因此大颗粒的实际温升约为 12 K (由于红外显微镜空间分辨率限制和感热芯片噪声影响, 实际温升会略有偏差). 可见, 空间散斑场捕获的墨粉颗粒的温升是很明显的, 这与光泳力理论相符合, 验证了空间散斑场捕获吸光性颗粒的机理为光泳力原理. 由于较小尺寸的颗粒温升较

小,与背景噪声相差不大,且红外显微镜的景深很短,红外显微镜所记录的颗粒数量相较于可见光长焦显微镜拍摄的颗粒数量要少很多.

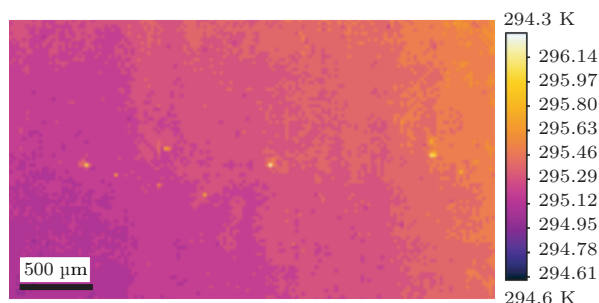


图5 红外显微观测空间散斑场捕获的吸光性墨粉颗粒

5 结 论

本文介绍了生成空间散斑场的实验方法,并利用该方法捕获吸光性颗粒,成功捕获了大量吸光性墨粉颗粒.被捕获颗粒的尺寸约为2—8 μm ,密度可达到1—2 g/cm^3 ,与日常生活周围的粉尘颗粒尺寸和密度相当,因此本方法可应用于PM2.5检测以及微纳米颗粒分离与筛选等方面.另外本文采用红外显微镜观测到空间散斑场捕获吸光性颗粒的红外显微图像,颗粒温升明显,为光泳力理论提供了强有力的论据,同时验证了空间散斑场捕获吸光性颗粒的作用机理为光泳力.

感谢由昆山光微电子有限公司提供红外显微镜 OTD-60S (320 $\times$ 240, 22 μm) 以及热分析软件 ATI.

参考文献

- [1] Grier D G 2003 *Nature* **424** 810
- [2] MacDonald M P, Spalding G C, Dholakia K 2003 *Nature* **426** 421
- [3] Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K 2008 *Nature Photon.* **2** 675
- [4] Brzobohatý, Karásek V, Šiler M, Chvátal L, Čižmár T, Zemánek P 2013 *Nature Photon.* **7** 123
- [5] Horstmann M, Probst K, Fallnich C 2012 *Lab. on a Chip.* **12** 295
- [6] Li X C, Sun X D 2010 *Chin. Phys. B* **19** 119401
- [7] Chen H, Guo Y, Chen Z, Hao J, Xu J, Wang H T, Ding J 2013 *J. Opt.* **15** 035401
- [8] Zhang P, Zhang Z, Prakash J, Huang S, Hernandez D, Salazar M, Christodoulides D N, Chen Z 2011 *Opt. Lett.* **36** 1491
- [9] Shvedov V G, Rode A V, Izdebskaya Y V, Desyatnikov A S, Krolikowski W, Kivshar Y S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 118103
- [10] Li Q, Feng W L, Hu X M, Cao Q, Sha D G, Lin J M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 726
- [11] Ashkin A 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 156
- [12] Shvedov V G, Desyatnikov A S, Rode A V, Krolikowski W, Kivshar Y S 2009 *Opt. Express* **17** 5743
- [13] Hu G J, Li J, Long Q, Tao T, Zhang G X, Wu X P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 030301 (in Chinese)[胡耿军, 李静, 龙潜, 陶陶, 张恭轩, 伍小平 2011 物理学报 **60** 030301]
- [14] Jiang Y Q, Guo H L, Liu C X, Li Z L, Cheng B Y, Zhang D Z, Jia S T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1721 (in Chinese)[降雨强, 郭红莲, 刘春香, 李兆霖, 程丙英, 张道中, 贾锁堂 2004 物理学报 **53** 1721]
- [15] Xu S H, Li Y M, Lou L R 2008 *Chin. Phys. B* **15** 1391
- [16] Ren H L, Ding P F, Li X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 210701 (in Chinese)[任洪亮, 丁攀峰, 李小燕 2012 物理学报 **61** 210701]
- [17] Li B J, Xin H B, Zhang Y, Lei H X 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0900126 (in Chinese)[李宝军, 辛洪宝, 张垚, 雷宏香 2011 光学学报 **31** 0900126]
- [18] Shvedov V G, Rode A V, Izdebskaya Y V, Desyatnikov A S, Krolikowski W, Kivshar Y S 2010 *Opt. Express* **18** 3137
- [19] Zhang Q C, Zhang Z G, Liu F R, Liu S, Wu X P 2012 *Chinese Patent* 201210275567.0 (2012-08-03) (in Chinese) [张青川, 张志刚, 刘丰瑞, 刘爽, 伍小平 2012 中国专利 申请号: 201210275567.0 [2012-08-03]]
- [20] Zhang Q C, Zhang Z G, Liu F R, Zhang Y, Liu S, Wu X P 2012 *Chinese Patent* 201210366305 (2012-09-27) (in Chinese) [张青川, 张志刚, 刘丰瑞, 张勇, 刘爽, 伍小平 2012 中国专利 申请号: 201210366305.5 [2012-09-27]]
- [21] Wang K F, Gao M H 2010 *Speckle Metrology* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p1 (in Chinese) [王开福, 高明慧 2010 散斑计量 (北京: 北京理工大学出版社) 第1页]
- [22] Goodman J W (Translated by Cao Q Z, Chen J B) 2009 *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Application* (Beijing: Science Press) pp69-71 (in Chinese) [古德曼 J W 著 (曹其智, 陈家璧译) 2009 光学中的散斑现象: 理论与应用 (北京: 科学出版社) 第69—71页]
- [23] Lewittes M, Arnold S, Oster G 1982 *Appl. Phys. Lett.* **40** 455
- [24] Zhang Z G, Cheng T, Zhang Q C, Mao L, Gao J, Wu X P 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 093106
- [25] Zhang Z G, Mao L, Cheng T, Zhang Q C 2013 *J. Infrared Millim. Waves* **32** 331 (in Chinese) [张志刚, 毛亮, 程腾, 张青川 2013 红外与毫米波学报 **32** 331]
- [26] Cheng T, Zhang Q C, Chen D P, Wu X P, Shi H T, Gao J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 852 (in Chinese)[程腾, 张青川, 陈大鹏, 伍小平, 史海涛, 高杰 2009 物理学报 **58** 852]
- [27] Zhang Z G, Liu F R, Zhang Q C, Cheng T, Gao J, Wu X P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 208702 (in Chinese)[张志刚, 刘丰瑞, 张青川, 程腾, 高杰, 伍小平 2013 物理学报 **62** 208702]

Trapping of multiple particles by space speckle field and infrared microscopy^{*}

Zhang Zhi-Gang Liu Feng-Rui Zhang Qing-Chuan[†] Cheng Teng Wu Xiao-Ping

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

(Received 16 September 2013; revised manuscript received 13 October 2013)

Abstract

Optical tweezer technology is widely used in trapping and manipulating micro-and nano-sized particles, mainly including the trapping of transparent particles in water and the trapping of absorbing particles in air. In this paper, a frosted glass diffuser is irradiated by laser beam, and a subjective speckle field is generated in the image plane of a lens after the laser has transmitted the lens. The speckle field is spatially distributed, and contains multiple bright spots and dark spots. A large number of dark spots surrounded by bright spots are spatial energy traps, and can be used to trap a large number of absorbing particles. The sizes and densities of trapped particles are about 2–8 μm and 1–2 g/cm^3 . In addition, an infrared microscope is used to record the infrared images of the particles trapped by the speckle field, and the infrared images show that the temperature of trapped particles rises by absorbing the light energy, which verifies that the mechanism of trapping absorbing particles by speckle field is photophoretic force.

Keywords: optical tweezers, space speckle field, photophoretic force, infrared microscopy

PACS: 87.80.Cc, 87.64.km, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.63.028701

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB302105), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11332010, 11102201), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. WK2090050017), and the Instrument Developing Project of Chinese Academy of Science (Grant No. YZ201265).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn