

# 可操控二种冷原子或冷分子样品的光学双阱 新方案及其实验研究\*

陆俊发<sup>1)2)</sup> 周琦<sup>1)2)</sup> 潘小青<sup>3)</sup> 印建平<sup>2)†</sup>

1) (东华理工大学理学院, 抚州 344000)

2) (华东师范大学物理系, 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

3) (江西理工大学理学院, 赣州 341000)

(2013年8月1日收到; 2013年9月6日收到修改稿)

提出了一种构建可囚禁与操控二种冷原子或冷分子样品的光学双阱的新方案, 该方案采用常用的液晶空间光调制器作为分光器件, 分光调制函数类似二元相位光栅; 对提出的方案进行了模拟实验研究, 并研究了从光学双阱到单阱的双向演化过程, 该光学双阱的模拟实验结果表明与理论方案相符, 双阱的操控性好, 有利于二种不同的冷原子或冷分子样品的装载与操控等相关实验研究.

**关键词:** 原子光学, 原子分子囚禁, 液晶空间光相位调制器, 光学双阱

**PACS:** 37.10.De, 37.10.Gh, 37.10.Pq, 42.50.-p

**DOI:** 10.7498/aps.62.233701

## 1 引言

近几年人们利用可控制的组合双光学势阱或多阱的偶极势研究诸如粒子的量子隧道效应<sup>[1-3]</sup>及其相干控制<sup>[4]</sup>, 玻色冷原子的量子输运<sup>[5]</sup>、阱间量子干涉<sup>[6]</sup>、双样品玻色费米混合的自发对称破缺<sup>[7]</sup>、双阱间少量玻色子的量子隧道贯穿动力学<sup>[8]</sup>和冷原子凝聚体的铁磁性<sup>[9]</sup>, 冷原子波函数的规范与离散<sup>[10]</sup>, 根据双阱中不稳定的玻色-爱因斯坦凝聚动力学从而研究量子力学中的非线性<sup>[11]</sup>、双阱势中原子旋转趋势的相干控制<sup>[12]</sup>、双阱中凝聚物旋转驱动的对称性破缺<sup>[13]</sup>、双阱中两种玻色-爱因斯坦凝聚体的动力学<sup>[14]</sup>等等现象, 是近期的一个研究热点. 为此需要有一个操控自如的双光学阱, 就是一个值得探讨的问题, 2005年, 纪宪明等提出了一种产生可控的光学双阱的方案<sup>[15,16]</sup>, 2006年沐仁旺等在实验上进行了模拟实验验证, 得到了与理论方案相同的结果<sup>[17]</sup>; 同年沐仁旺等提出了一种纵向双阱方案<sup>[18]</sup>; 2008年, 纪宪明等提出

了用错位相位光栅产生的可调光学双阱的方案<sup>[19]</sup>; 2009年, 印建平等提出了一种可控制静电双阱方案<sup>[20]</sup>. 以上这些方案提出, 为产生双势阱用于相关科学研究的实验提供了可能. 本文提出并实验验证了一种可囚禁与操控二种冷原子或冷分子的组合双光学阱的新方案, 此方案比上述产生双光阱的方案更方便、操控更有效.

## 2 产生新颖的光学双阱的方案及理论分析

### 2.1 理论方案

液晶类似于单轴晶体可将入射偏振光分解为垂直于液晶分子长轴方向的  $o$  分量与平行于分子长轴方向的  $e$  分量, 液晶空间光调制器 (liquid crystal spatial light modulation, LC-SLM) 对其中  $o$  分量不具调制作用; 但可对  $e$  分量进行相位或振幅调制<sup>[21]</sup>, 当我们在 LC-SLM 上沿水平方向取  $n$  条像素为一周期单元, 将整个 LC-SLM 分为  $N$  个周期

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11274114, 10374029, 10674047) 和华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室开放基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jpyin@phy.ecnu.edu.cn

单元, 在每个周期单元内加上一个二值 (相位) 型的调制函数 (图 1(b)), 此时反射式 LC-SLM 等效于相位呈二元分布的液晶相位型反射光栅, 光栅周期单元的宽度即光栅常数  $d$  等于像素的宽度乘以周期内像素数  $n$ . 我们调整入射的偏振光的振动方向, 使其振动方向与液晶分子长轴方向一致, 当此光波传播经过圆形窗口射到 LC-SLM 上, 则此时在液晶中仅有 e 光出现, 经 LC-SLM 调制反射, 再

经透镜会聚后在透镜的焦平面附近干涉叠加, 将分别对称地聚焦在透镜焦点两侧的空间位置, 形成二个聚焦点, 当光波红失谐时即成为可用于囚禁与操控冷原子或冷分子的光学双阱. 当改变光栅常数  $d$  时, 两侧聚焦点的空间位置对称地发生变化, 当  $d$  增加时此二焦点对称地靠近, 直至重合, 此时光学双阱即变成了单阱, 此演化过程可双向进行

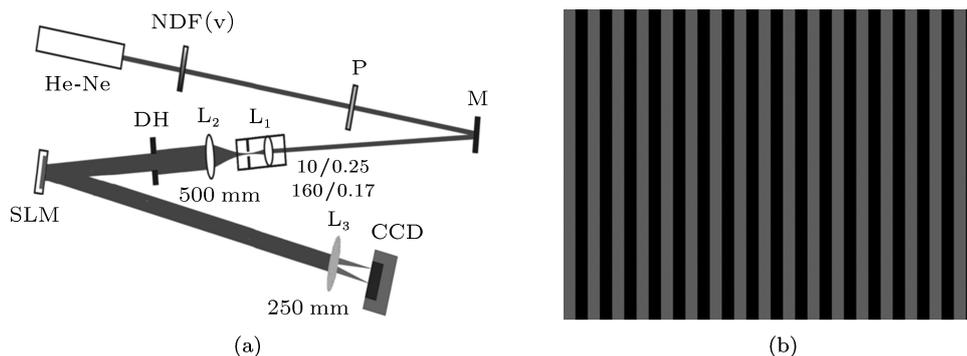


图 1 产生光学双阱原理示意图 (a) 产生反射式光学双阱光路图 (M 为反射镜; NDF(v) 为中性可变衰减片; P 为起偏器; DH 为圆孔光阑); (b) LC-SLM 上二元调制函数

## 2.2 方案的理论分析

产生光学双阱的实验光路如图 1(a) 所示, 从透过直径为  $2R$  圆孔孔径光阑 (Hole) 的平行光照明 LC-SLM 上一圆形区域再经透镜  $L_3$  聚焦到其焦平面前后, LC-SLM 相位板和孔径  $H$  引入的调制函数可合并表示为

$$g_e(x, y) = \left\{ \text{rect} \left[ \frac{(x-d/4)}{d/2} \right] - \text{rect} \left[ \frac{(x+d/4)}{d/2} \right] \right\} \times \sum_m \delta(x-md) \cdot \text{cire}(r/R), \quad (1)$$

式中  $\text{cire}(r/R)$  是半径为  $R$  的圆孔光阑 Hole 的孔径函数,  $d$  是光栅的空间周期, 液晶光栅对入射光的相位调制函数是

$$\left\{ \text{rect} \left[ \frac{(x-d/4)}{d/2} \right] - \text{rect} \left[ \frac{(x+d/4)}{d/2} \right] \right\} \sum_m \delta(x-nd),$$

即相位调制是二元型, 一个值是 0, 另一个即是  $\pi$ , 在一个空间周期内均分. 如入射平面偏振光强度为  $I$ , 则振幅为  $A = \sqrt{I}$ , 波长为  $\lambda$ , 透镜焦距为  $f$ , 光沿  $z$  方向传播, 根据菲涅耳衍射理论, 在透镜焦平面上的光扰动分布为

$$U(x_0, y_0, f) = \frac{A_e}{\lambda f} \iint g_e(x, y) \times \exp \left[ -\frac{i2\pi}{\lambda f} (xx_0 + yy_0) \right] dx dy. \quad (2)$$

相应的光强分布为

$$I_f = |U(x_0, y_0, f)|^2 = \pi \left( \frac{A_e R}{\lambda f} \right)^2 \left[ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2(n\pi/2)}{n\pi/2} \times \frac{2J_1 \left( kR \sqrt{\left( x_0 \pm \frac{n\lambda f}{d} \right)^2 + y_0^2 / f} \right)}{\left( kR \sqrt{\left( x_0 \pm \frac{n\lambda f}{d} \right)^2 + y_0^2 / f} \right)} \right]^2, \quad (3)$$

式中,  $R$  为圆孔光阑 Hole 的半径,  $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$  为透镜焦平面上某点的位置,  $J_1$  为一阶贝塞尔函数. 从光强的分布公式中可见, 当  $n=0$  时,  $I_{f_0}$  亦为 0,  $n=\pm 1$  时,  $I_{f_{\pm 1}}$  得到对称分居于原点两侧的二个光强极大值,  $n=\pm 2$  时, 光强仍为 0,  $n=\pm 3$  时,  $I_{f_{\pm 3}} = I_{f_{\pm 1}}/9 < I_{f_{\pm 1}}/e^2$ , 因此可忽略不计, 其后所有  $n$  偶数项都为 0, 奇数项不为 0, 但由于数值更小可忽略. 因此只有当  $n=\pm 1$  时, 即在  $y_0=0, x_0=\pm \lambda f/d$  处共存在二个聚焦点, 即光强极大值, 也就是形成了可囚禁与操控冷原子或冷分子的光学双阱. 二光阱间距为  $\Delta x_{\max} = 2\lambda f/d$ , 考虑到使用反射式 LC-SLM 时光波一般是斜入射的, 设入射光与 LC-SLM 法线间的夹角为  $\varphi$ , 则对  $L_3$  的光轴后传播的光线来说, 原光栅常数  $d$  需要修正为  $d \cos \varphi$ , 光学双阱

间距变为  $\Delta x_{\max} = 2\lambda f / (d \cos \varphi)$ . 改变光栅周期  $d$  即可改变光阱之间的距离. 当光波为红失谐时, 上述光学双阱可用于二种冷原子或冷分子样品的激光囚禁与操控, 从而可以实现如冷原子或冷分子的冷碰撞, 二种原子的复合分子等科学课题的研究. 从光学双阱的光强表达式中可见, 光学双阱中二个阱除位置不同外其余几何及光学特性参数完全相同, 在合并为单阱后, 其几何及光学特性参数除光强度外完全相同于原来的阱之一的参数.

图 2 呈现了当  $R = 2.5 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $f = 250 \text{ mm}$ , 光栅常数  $d = 48 \times 19 \text{ }\mu\text{m}$ , 入射光强  $I = 2.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  时在  $x$  方向的光强及光强梯度与曲率的分布情况 (图 2(a)) 和当  $x = 0.175 \text{ mm}$  (即在  $x$  方向光强最大值位置) 时在  $y$  方向上的光强及光强梯度与曲率的分布情况 (图 2(b)).

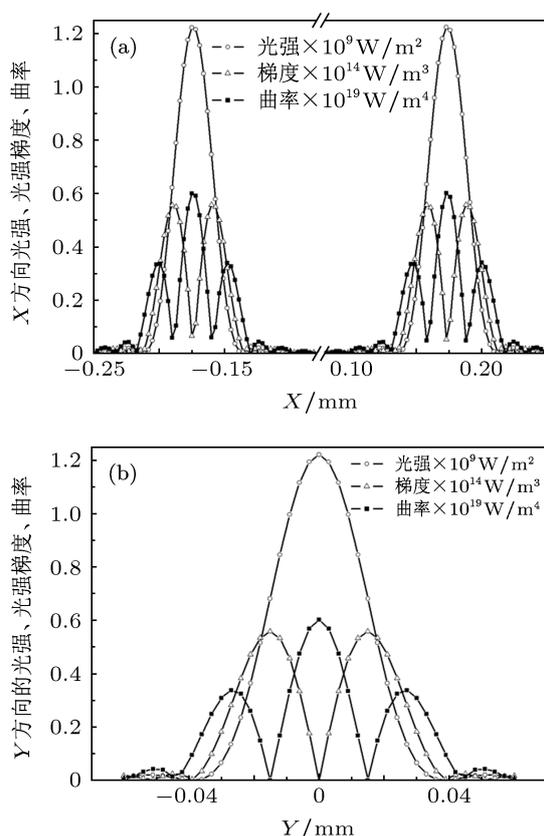


图 2  $xy$  轴上光强、光强梯度、曲率分布图 (a)  $x$  轴中的分布情况; (b)  $y$  轴中的分布情况

### 3 实验过程与结果

#### 3.1 实验过程

我们对上述产生光学双阱方案进行了原理性的模拟实验研究, 为便于观察, 我们在实验中用了外腔式的  $0.6328 \text{ }\mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器作为平面单

色光源, 实验装置如图 1(a) 所示, 为使实验结果形成的光阱的光强能被 CCD 接收与观测, 加衰减器 NDF(v) 对入射激光束起衰减作用, 再用偏振片 Pz 改变入射偏振光的振动方向, 反射镜 M 改变光路以方便光路调节, 为保证光束大小和质量, 采用 10 倍显微物镜和共焦的焦距为  $500 \text{ mm}$  的透镜组成扩束系统, 用  $50 \text{ }\mu\text{m}$  孔径的小孔在显微物镜焦点处滤波以改善光束质量, 得到了大于 LC-SLM 孔径的平行激光束, 再经过通光孔径为  $5 \text{ mm}$  圆孔光阑 Hole, 照明并经 LC-SLM 调制反射, 经过焦距  $250 \text{ mm}$  的透镜聚焦到 CCD 上记录观测. 在光路的调节中必须保证光路中各光学元件共轴, 才能获得较好的光阱图像, 阱的光强的相对大小, 也通过 CCD 测定, 实验中使用的该 LC-SLM 是由德国 Holoeye 公司生产的 Holoeye LC-R2500 型空间光调制解调器.

#### 3.2 实验结果

##### 3.2.1 光学双阱光强分布观测

在如图 1(a) 所示的光路中, 在透镜  $L_3$  的焦平面上利用电荷耦合器件 CCD 相机观测光阱的光强分布, 所用 CCD 相机的像素大小 (空间分辨率) 为  $4.2 \text{ }\mu\text{m}$ , 当调好光阱的图像后, 即可用 CCD 进行观测, 光阱的径向的光强分布用 CCD 一次照相即可得到, 为得到轴向的光强分布, 我们沿轴向每间距  $2 \text{ mm}$  记录一次在垂直轴向平面内的光强分布, 然后再进行合成得到沿轴向的光强分布. 实验所观测到的光阱三维光强分布图像如图 3(a) 所示. 得到图 3(a), (b), (c) 时的相关参数为: 透镜焦距为  $250 \text{ mm}$ , 入射光波长  $\lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m}$ , 光栅常数  $d = 48 \times 19 \text{ }\mu\text{m}$ , 即 LC-SLM 上光栅周期为 48 条像素, 因此  $d = 19 \text{ }\mu\text{m} \times 48 = 912 \text{ }\mu\text{m}$ , 圆形透光孔的半径  $R = 2.5 \text{ mm}$ , 其中图 3(a) 是由实验测量数据还原的三维光强分布情况; (b) 是理论计算得到的焦平面上光强密度分布情况; (c) 则是实验得到的焦平面上的光强密度分布. 图 3(d) 和 (e) 得到时的光栅周期是 24 条像素, 其他参数与上相同, 其中 (d) 是根据理论由计算得到的光强密度分布, (e) 是实验测得的光强密度分布, 可见理论与实验结果符合得相当好.

##### 3.2.2 光栅周期对双光阱间距的观测

根据理论分析, 双光阱的中心间距将会随光栅常数  $d$  发生变化, 理论上二光束分别有衍射角  $\sin \theta = \lambda / (d \cos \varphi) = \pm x / f$ , 整理得到当光波斜入射时二光束形成的双阱间距为  $\Delta x_{\max} = 2\lambda f / (d \cos \varphi)$ ,

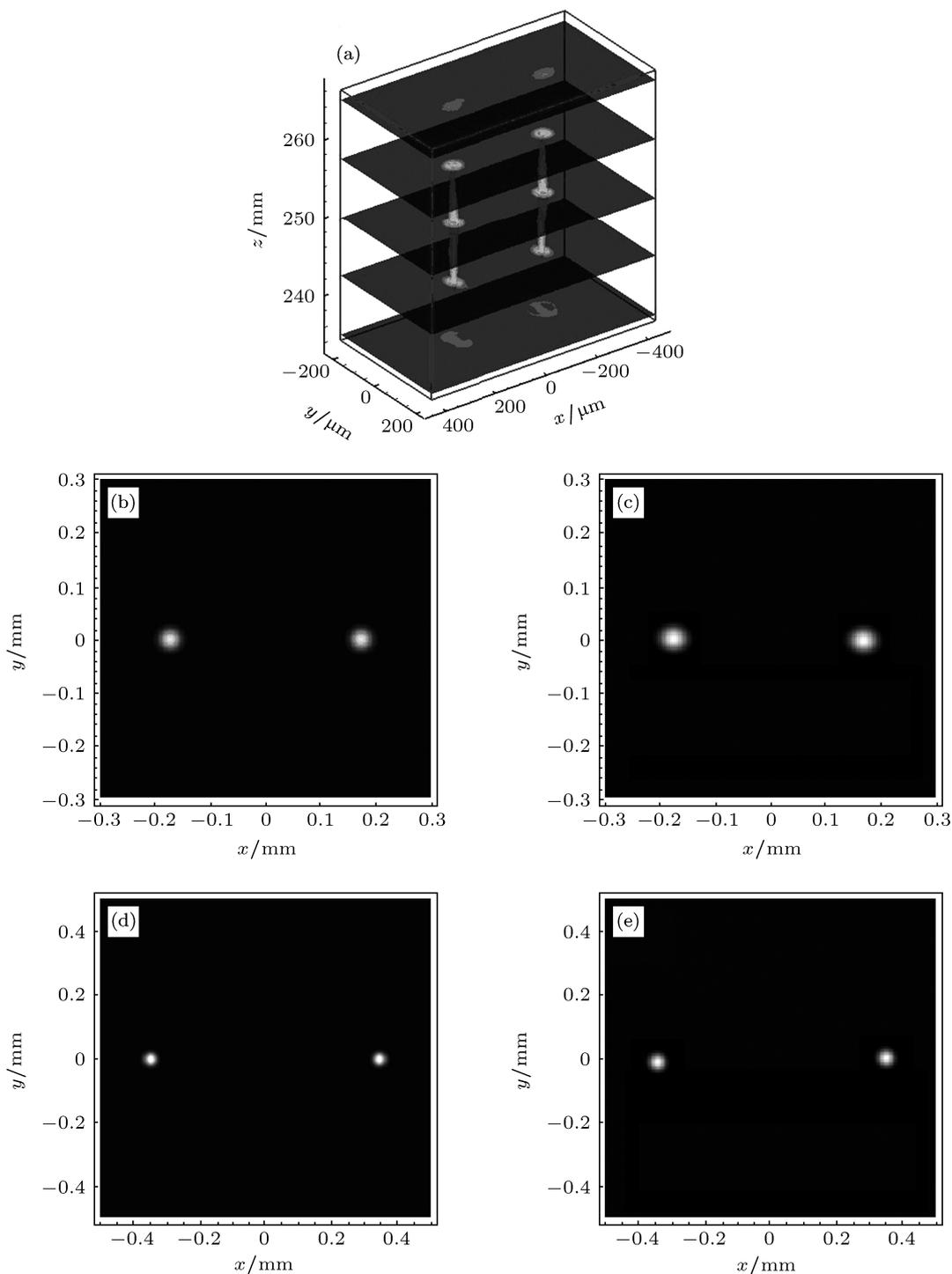


图3 组合双光学阱的光强分布情况 (a) 当光栅常数  $d$  为 48 条像素时重现的实验光阱三维光强分布; (b) 参数与 (a) 相同时在透镜焦面上的二维光强分布的理论计算结果; (c) 实测的二维光强分布; (d) 当  $d$  为 24 条像素时的焦面二维光强分布的理论计算结果; (e) 实测光强分布

实验过程中, 我们通过改变 LC-SLM 上加的电压函数改变 LC-SLM 上光栅周期  $d$ , 当在不同的光栅周期时记录双光阱光强分布, 再找出相对光强极大值即光阱中心的位置, 计算出相应光阱中心位置间的距离, 得到双光阱光强极大位置差的数值. 图 4 反映了双光阱间距随 LC-SLM 光栅空间周期之间的

变化关系. 圆点连线是理论计算结果, 三角连线是实验结果. 从图中可见, 在误差近  $30 \mu\text{m}$  范围的情况下, 实验结果基本与理论分析相符合. 理论上需要光栅常数  $d$  趋向无限大时, 双光阱间距才趋于零, 但由于光阱本身有一定的大小, 根据一阶贝赛尔函数可算出, 单光阱的径向半径为  $\rho = 0.61\lambda f/R$ ,

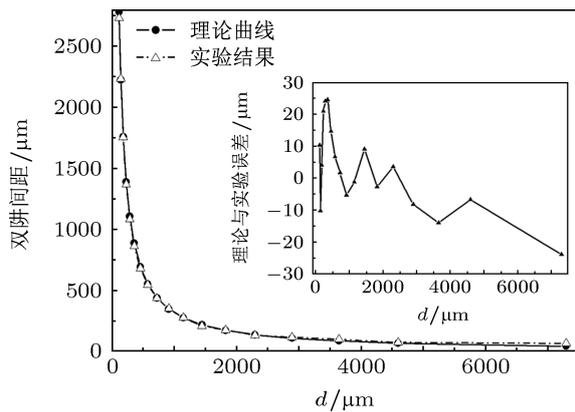


图4 双阱间距实验结果与理论分析

当用实验中的参数代入计算可见其值为  $36.6 \mu\text{m}$ , 当光栅常数  $d = 384$  个像素, 即  $d = 384 \times 19 = 7296 \mu\text{m}$  时, 双光阱的间距为  $43 \mu\text{m}$ , 已小于二个单光阱的光强分布的半径之和, 根据瑞利判据已很难分辨. 此时虽然还未完全变为单光阱, 但在实验上接近单光阱了, 此时双光阱的间距已不可测量. 上述过程可以沿正反方向进行, 即可由双光阱改变为单光阱, 也可以由单光阱再改变为双光阱, 且双

光阱的间距完全由 LC-SLM 的光栅常数确定, 光阱位置调控非常方便.

## 4 结论

我们提出并实验实现了一种利用 LC-SLM 产生可用于囚禁操控二种冷原子或冷分子样品的双光学阱组的新方案, 该方案简便易行, 具有非常好的操控性, 双阱的间距可以很大且调节方便, 便于二种不同种类的冷原子或冷分子样品的装入; 我们用模拟实验的方法研究了该方案的可行性, 得到了与理论方案的预期完全相同的结果.

如将图 1 中的透镜换成二维矩形透镜阵列, 则可得二维的双阱阵列, 即可形成特殊的二维双阱光学晶格, 如用多束不同方向入射光照明时, 可得到更加丰富的光学晶格, 当用的透镜焦距很短时, 还可形成表面二维光学晶格.

该方案由于对双阱的操控性好, 因此可用有关双原子或分子样品的囚禁与操控, 具有很好的潜在应用前景.

- [1] Esmann M, Pritchard J D, Weiss C 2012 *Laser Phys. Lett.* **9** 160
- [2] Vatasescu M 2012 *Journal of Physics: Conference Series* **388** 122004
- [3] Liu X J, Liu H P, Shen L, Wang L, Yang H F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5277
- [4] Xiao K W, Hai W H, Liu J 2012 *Phys. Rev. A* **85** 013410
- [5] Qian Y Y, Zhang C W 2011 *Phys. Rev. A* **84** 013608
- [6] Zhou Q, Lu J F, Yin J P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 093202
- [7] Wang Y S, Yan P G, Li B, Liu X S 2012 *Chin. Phys. B* **21** 010309
- [8] Chatterjee B, Brouzos I, Cao L H 2012 *Phys. Rev. A* **85** 013611
- [9] Chengjun T, Qiang G 2012 *Journal of Physics: Conference Series* **400** 012073
- [10] Yariv Y, Erich M 2012 *Phys. Rev. A* **85** 013641
- [11] Juha J 2010 *Phys. Rev. A* **81** 051602(R)
- [12] Ng H T, Chu S I 2012 *Phys. Rev. A* **85** 023636
- [13] Mele-Messeguer M, Paganelli S, Julia-Diaz B, Sanpera A, Pells A 2012 *Phys. Rev. A* **86** 053626
- [14] Grond J, Streltsov A I, Cederbaum L S 2012 *Phys. Rev. A* **86** 063607
- [15] Ji X M, Yin J P 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 1737
- [16] Ji X M, Yin J P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4163 (in Chinese) [纪宪明, 印建平 2004 物理学报 **53** 4163]
- [17] Mu R M, Li Y L, Ji X M, Yin J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6333 (in Chinese) [沐仁旺, 李雅丽, 纪宪明, 印建平 2006 物理学报 **55** 6333]
- [18] Mu R W, Ji X M, Yin J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5795 (in Chinese) [沐仁旺, 纪宪明, 印建平 2006 物理学报 **55** 5795]
- [19] Ji X M, Xu S W, Lu J F, Xu D M, Yin J P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7591 (in Chinese) [纪宪明, 徐淑武, 陆俊发, 徐冬梅, 印建平 2008 物理学报 **57** 7591]
- [20] Xu X Y, Chen H B, Yin J P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1563206 (in Chinese) [许雪艳, 陈海波, 印建平 2009 物理学报 **58** 1563206]
- [21] Zhang C Y, Huang Z Q 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1231 (in Chinese) [张翠玉, 黄子强 2008 光学学报 **28** 1231]

# Theoretical and experimental study of a novel double-well optical dipole trap for two-species of cold atoms or molecules\*

Lu Jun-Fa<sup>1)2)</sup> Zhou Qi<sup>1)2)</sup> Pan Xiao-Qing<sup>3)</sup> Yin Jian-Ping<sup>2)†</sup>

1) (College of Science, East China Institute of Technology, Jiangxi Fuzhou 344000, China)

2) (State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

3) (College of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Jiangxi Ganzhou 341000, China)

(Received 1 August 2013; revised manuscript received 6 September 2013)

## Abstract

A novel scheme based on light diffraction to generate a double-well optical trap for trapping and controlling two-species samples of cold atoms or molecules is proposed. Specialized phase modulation similar to the binary phase-grating is implemented in a diffraction device of liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM). A continuous and reversible evolution between single-well trap and double-well trap is investigated. Corresponding experiments are performed and the results are in agreement with theories. Our results show that the proposed scheme has a controllability advantage, which is beneficial to the loading and controlling two-species samples in cold atoms or molecules experiments.

**Keywords:** atom optics, trapping of atoms or molecules, liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM), double-well optical trap

**PACS:** 37.10.De, 37.10.Gh, 37.10.Pq, 42.50.-p

**DOI:** 10.7498/aps.62.233701

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274114, 10374029, 10674047), and the Foundation of State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, China.

† Corresponding author. E-mail: jpyin@phy.ecnu.edu.cn