

新颖操控冷原子/冷分子的组合三光阱 新方案及实验研究

周琦^{1,3} 陆俊发^{1,3} 潘小青² 印建平^{3*}

(¹ 东华理工大学理学院, 江西 抚州 344000; ² 江西理工大学理学院, 江西 赣州 341000)

³ 华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 提出了一种构建可囚禁与操控三种冷原子或冷分子样品的光学三阱组的新方案, 该方案采用常用的液晶空间光调制器作为分光器件, 分光调制函数类似于二元相位光栅; 对提出的方案进行了模拟实验, 并研究了从光学三阱到单阱的双向演化过程。该光学三阱的模拟实验结果与理论方案相符, 三阱的操控性好, 有利于三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 原子与分子物理学; 冷原子囚禁与操控; 组合三光阱

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0402001

Theoretical and Experimental Study of a Novel Combinative Triple-Well Optical Trap for Triple-Species Cold Atoms or Molecules

Zhou Qi^{1,3} Lu Junfa^{1,3} Pan Xiaoqing² Yin Jianping³

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

² College of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

³ State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

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

Key words atomic and molecular physics; trapping and controlling of cold atom; combination of triple-well optical trap

OCIS codes 020.1335; 020.1475; 020.7010

1 引言

组合的三光学阱可用于研究由有色噪声驱动的逻辑随机共振^[1]、有限超点阵晶格的光输运^[2]、三阱势中囚禁的多玻色子体系长时间的动力学特性^[3]、实现原子隧穿的相干控制^[4]、在三阱中空位点间的相干传输^[5]和量子级联激光^[6-7], 也可以用于研究

三阱中玻色-爱因斯坦凝聚体的约瑟夫森振荡、自囚禁跃迁^[8]、三阱光学晶格中两相互作用超冷原子的玻色-哈勃参数的重新定义^[9], 当然还可以用于三原子复合分子或冷原子(冷分子)的绝热膨胀或绝热压缩等规律研究。因此产生可操控自如的组合三光学阱可给上述研究创造方便条件, 2011 年本课题组曾

收稿日期: 2013-08-27; 收到修改稿日期: 2013-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(11274114, 10374029, 10674047)、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

作者简介: 周琦(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事原子、分子物理等方面的研究。E-mail: qizhou@ecit.cn

* 通信联系人。E-mail: jpyin@phy.ecnu.edu.cn

提出过一个三阱方案^[10],本文提出了一种可方便产生组合三光学阱的新方案,并利用原理性实验研究了该方案,结果表明,该方案的理论计算结果与实验结果符合得相当好。

2 新颖的组合三光学阱的产生方案

产生组合三光学阱的实验光路如图 1 所示,新方案采用液晶空间光调制器(LC-SLM)作为入射光波的调制工具^[11-15],其有与单轴晶体相似特性,即入射到液晶中的偏振光分解为垂直于液晶分子长轴方向的寻常光(o 光)分量与平行于分子长轴方向的非寻常光(e 光)分量,其中 o 光分量按一般光的透射、反射规律透射、反射,LC-SLM 会对 e 光分量进

行相位或振幅调制^[16],当在 LC-SLM 上加一个二值(相位)型的调制函数,反射型 LC-SLM 等效于相位呈二元分布的液晶反射光栅,其光栅周期单元的宽度为光栅常数 d 。入射偏振光在 LC-SLM 中的入射与反射过程中完成相位调制,然后经过透镜会聚,在透镜的焦平面前后,o 光聚焦在焦平面中心,而经 LC-SLM 调制后的 e 光将分别对称地聚焦在 o 光两侧的空间位置,o 光和 e 光共形成三个聚焦点,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组合三光学阱。当改变光栅常数 d 时,o 光聚焦点位置不动,两侧 e 光聚焦点的空间位置对称地发生变化,当 d 增加时此二焦点距离变小,直至为 0,此时三光学阱将变成单阱,此过程可双向进行。

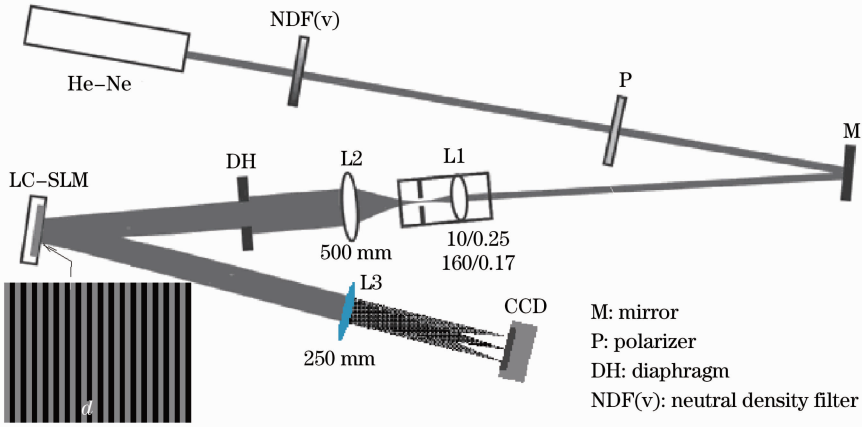


图 1 产生组合三光学阱实验光路图

Fig. 1 Optical pathway diagram for generating a combinative tripe-well optical trap

从半径为 R 的圆形孔径光阑(DH)透过的平行光照明 LC-SLM 上一圆形区域再经透镜(L3)聚焦,对于 o 光和 e 光,LC-SLM 和 DH 引入的调制函数可分别表示为

$$\begin{cases} g_o(x, y) = f_{\text{cire}}\left(\frac{r}{R}\right), \\ g_e(x, y) = \left\{ f_{\text{rect}}\left[\frac{(x-d/4)}{d/2}\right] - f_{\text{rect}}\left[\frac{(x+d/4)}{d/2}\right] \right\} * f_{\text{comb}}\left(\frac{x}{d}\right) \cdot f_{\text{cire}}\left(\frac{r}{R}\right), \end{cases} \quad (1)$$

式中 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$; $f_{\text{cire}}(r/R)$ 、 $f_{\text{rect}}(x/d)$ 与 $f_{\text{comb}}(x/d)$ 分别表示圆形、矩形与梳状函数,即

$$f_{\text{cire}}\left(\frac{r}{R}\right) = \begin{cases} 1 & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases}, \quad f_{\text{rect}}\left(\frac{x}{d}\right) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{d}{2} \\ 0 & |x| > \frac{d}{2} \end{cases}, \quad f_{\text{comb}}\left(\frac{x}{d}\right) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - md),$$

式中 δ 为单位脉冲函数, $f_{\text{cire}}(r/R)$ 是 DH 的圆形孔径函数,液晶光栅对入射光的相位调制函数由卷积 $\left\{ f_{\text{rect}}\left[\frac{(x-d/4)}{d/2}\right] - f_{\text{rect}}\left[\frac{(x+d/4)}{d/2}\right] \right\} * f_{\text{comb}}\left(\frac{x}{d}\right)$ 表示,即相位调制是二值型,一个值是 0,另一个即是 π ,在一个空间周期内均分。当入射平面偏振光

强度为 I ,则振幅为 $A = (I)^{1/2}$,波长为 λ ,偏振光振动方向与液晶分子长轴方向之间的夹角为 Φ ,则 o 光分量为 $A_o = A \sin \Phi$,e 光分量为 $A_e = A \cos \Phi$,透镜焦距为 f ,沿 z 方向传播,根据菲涅耳衍射理论,在透镜焦后产生的衍射光场分布为

$$U(x_0, y_0, z) = \frac{A_0}{\lambda z} \iint g_0(x, y) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda} \left[(x^2 + y^2) \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{f} \right) - \frac{2(xx_0 + yy_0)}{z} \right]\right\} dx dy + \frac{A_e}{\lambda z} \iint g_e(x, y) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda} \left[(x^2 + y^2) \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{f} \right) - \frac{2(xx_0 + yy_0)}{z} \right]\right\} dx dy. \quad (2)$$

在透镜的物方焦平面上, $z=f$, 此时相应的光扰动分布为

$$U(x_0, y_0, f) = \frac{A_0}{\lambda f} \iint g_0(x, y) \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda f}(xx_0 + yy_0)\right] dx dy + \frac{A_e}{\lambda f} \iint g_e(x, y) \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda f}(xx_0 + yy_0)\right] dx dy, \quad (3)$$

相应的光强分布为

$$I_f = |U(x_0, y_0, f)|^2 = \pi \left(\frac{A_0 R}{\lambda f} \right)^2 \left[2 \frac{J_1(kRr_0/f)}{kRr_0/f} \right]^2 + \pi \left(\frac{A_e R}{\lambda f} \right)^2 \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2(n\pi/2)}{n\pi/2} \cdot \frac{2J_1 \left[kR \sqrt{\left(x_0 - \frac{n\lambda f}{d} \right)^2 + y_0^2/f} \right]}{kR \sqrt{\left(x_0 - \frac{n\lambda f}{d} \right)^2 + y_0^2/f}} \right\}^2, \quad (4)$$

式中 x_0, y_0 为焦平面坐标, $r_0 = (x_0^2 + y_0^2)^{1/2}$ 为透镜焦平面上某点距光轴的距离, J_1 为一阶贝赛尔函数。从光强的计算公式中可见, 第一项与 d 无关, 其位置在透镜焦点即坐标原点处, 是 o 光形成的; 在第二项中, 当 $n=0$ 时, 第二项亦为 0, $n=\pm 1$ 时, 第二项对称分居于原点两侧, 在 $x_0 = \pm \lambda f/d, y_0 = 0$ 处的二个光强极大值, $n=\pm 2$ 时, 该项仍为 0, $n=\pm 3$ 时, 其值不为 0 但等于 $n=1$ 时该项值的 $1/9$, 小于通常囚禁原子时的最大光强的 $1/e^2$ 的值, 因此可

忽略不计, 其后所有 n 为偶数的项都为 0, n 为奇数的项不为 0, 但由于数值更小可忽略。因此第二项中只有当 $n=\pm 1$ 时, 该项的值对于操控原子、分子才有意义, 当通过调整 Φ 到适当的值时第二项的值可与第一项相当, 即在 $y_0 = 0, x_0 = 0$ 和 $x_0 = \pm \lambda f/d$ 处共存在三个聚焦点, 也就是形成了可囚禁与操控冷原子或冷分子的组合三光学阱。侧边光阱与中间光阱间距为 $\Delta x_{\max} = \lambda f/d$ 。考虑到反射式 LC-SLM

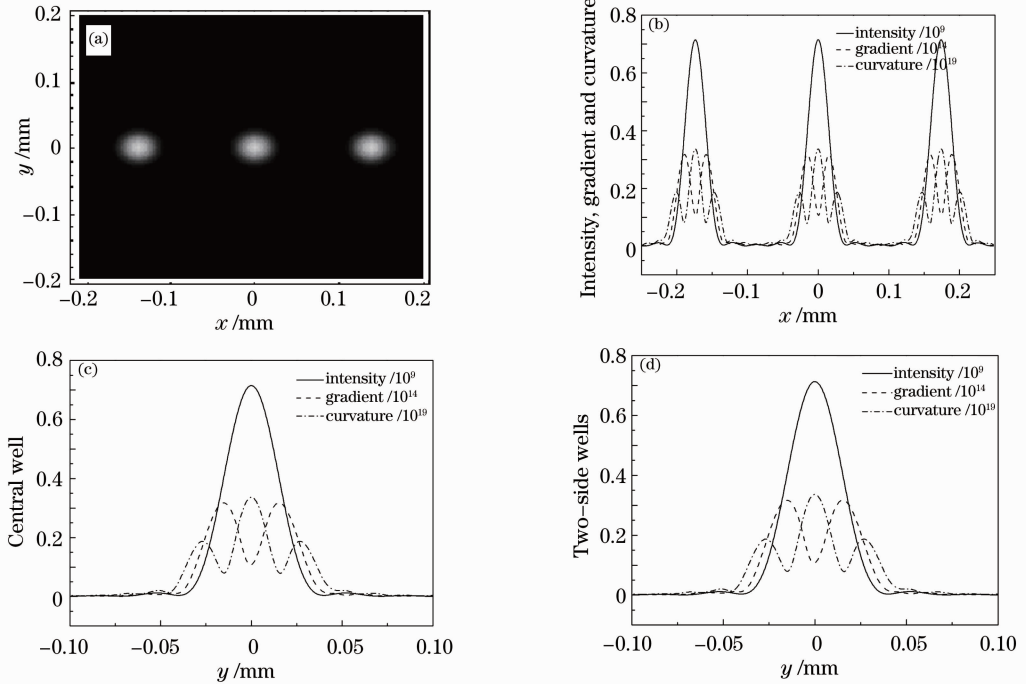


图 2 数值计算结果。(a) 焦平面光强; (b) x 方向; (c) 中心光阱 y 方向; (d) 侧边光阱 y 方向

Fig. 2 Numerical results of the light intensity distributions (a) in focus plane, (b) in x direction, (c) in y direction of central well and (d) in y direction of two-side wells

使用时光波一般是斜入射的,设入射光与 LC-SLM 法线间的夹角为 φ ,则 d 需要修正为 $d \cos \varphi$,组合三光阱中 o 光阱中心与另一侧 e 光阱中心间距变为 $\Delta x_{\max} = \lambda f / (d \cos \varphi)$ 。因此只需改变光栅常数 d 即可改变光阱之间的距离。当光波为红失谐时,上述组合三光学阱可用于三样品冷原子或冷分子的激光囚禁与操控,从而可以实现相关科学课题的研究。从三光阱的光强表达式中可以计算出,当 φ 等于 35° 左右时(但实际上由于闪耀光栅的衍射效率不为 1, φ 将小于 35° ,可由实验确定),三个光学阱除光阱位置不同外其余几何及光学特性参数完全相同,在三光阱合并为单阱时,其几何特性参数完全相同于三阱之一的参数。

光阱在焦平面上的径向光强分布、光阱的光强及其梯度与曲率在 x 和 y 方向上的分布的计算结果由图 2 所示,计算时参数为如下:LC-SLM 光栅常数 d 为 48 pixel,其值等于 0.912 mm,圆孔直径为 5 mm,透镜焦距长 250 mm,入射激光束的强度为 $I = 1.5 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;图 2(a)是在焦平面上的二维光强密度分布,图 2(b)是在 x 方向上三阱的光强及其梯度与曲率的分布情况,图 2(c)、(d)分别是中间光阱和二侧边上的一个光阱在 y 方向上的光强及其梯度与曲率的分布情况;从图 2(b)~(d)中光强、光强梯度和曲率分布情况可见,三光阱的几何及光学特征参数完全相同。

3 组合三光学阱的模拟实验研究方案

对上述产生组合三光学阱方案进行了原理性的验证实验,为便于实验观察,在实验中用了可见光波段的外腔式 $0.6328 \mu\text{m}$ He-Ne 激光器作为平面单色光源,实验装置如图 1 所示,为使形成的光阱光强能被 CCD 接收与观测,加衰减器(NDF)对入射激光束光强进行衰减,用偏振片 P 改变入射偏振光的振动方向,用反射镜 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 mm 的透镜组成扩束系统,用 $50 \mu\text{m}$ 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,此光束经过通光孔径为 5 mm 的圆孔 DH,照明 LC-SLM 并由 LC-SLM 调制反射,经过焦距 250 mm 的透镜聚焦到电荷耦合器件(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,光阱光强的相对大小也通过 CCD 测定,实验中使用的该 SLM 是由德国 Holoeye 公司生产的 Holoeye LC-

R2500 型空间光调制器。

4 实验结果

4.1 光学三阱光强分布观测

在如图 1 所示的光路中,在透镜 L3 的焦平面上利用 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 $4.2 \mu\text{m}$,当调好光阱的图像后,即可用 CCD 进行观测,光阱的径向光强分布用 CCD 一次照相即可得到,为得到轴向的光强分布,沿轴向每间隔 2 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 所示。测量得到图 3(a)~(c)时的相关参数如下:透镜焦距为 250 mm,LC-SLM 上光栅周期为 48 pixel,即 $d = 19 \mu\text{m} \times 48 = 912 \mu\text{m}$,入射光波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,其中图 3(a)是由实验测量数据形成的三维光强分布情况,图 3(b)是理论计算得到的焦平面上光强密度分布情况,图 3(c)则是实验得到的焦平面上的光强密度分布。图 3(d)、(e)中光栅周期是 24 pixel,其他参数与图 3(a)~(c)相同。其中图 3(d)是理论计算得到的光强密度分布,图 3(e)是实验测得的光强密度分布。实验数据在采集和处理时,采用多帧时间平均的方法,以便抵消激光输出功率的起伏和噪声影响;对应理论计算的结果采用接近实验环境的参数设置;由于 CCD 获取的数据为相对光强,在与理论比较时,对实验数据按理论功率进行了归一化处理。从图 3 中可以看出理论与实验结果符合得相当好,差别仅在于实验图上光斑的大小比理论计算的结果大一些,这是由于激光束在扩束后准直程度不佳所造成的。

4.2 光栅常数 d 对三光阱间距影响的观测

实验过程中,通过改变 LC-SLM 上加的电压函数改变 LC-SLM 上光栅常数 d ,根据理论分析,组合三光阱中两侧的二个阱的中心位置将会发生变化,当光波斜入射时边上的一个阱与中心阱之间的双阱间距为 $\Delta x_{\max} = \lambda f / (d \cos \varphi)$,测量得到在不同的光栅周期时的双阱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,得到了双光阱光强极大位置差的数值。图 4 反映了两阱间距随 LC-SLM 光栅空间周期之间的变化关系,方块点是理论关系计算的数据,圆点是实验数据,从图中可见,实验结果完全与理论分析相符合。理论上要光栅常数 d 趋向无限大时,双光阱间距才趋于零,但

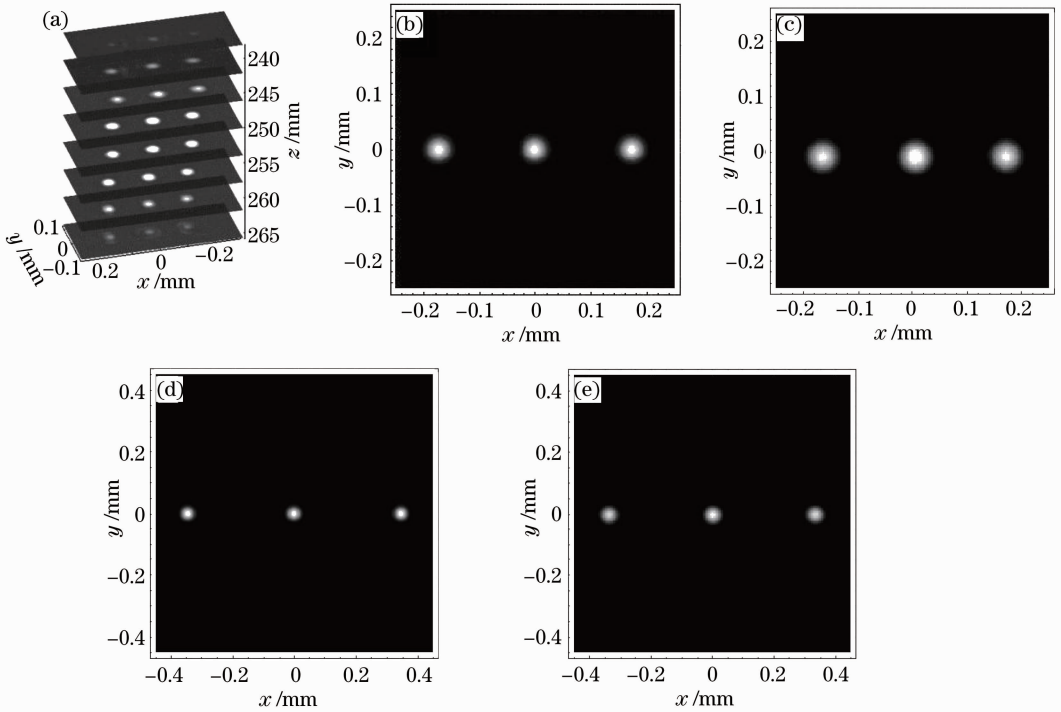


图3 实验与理论结果。(a)三维光强；(b) $d=48$ pixel 理论值；(c) $d=48$ pixel 实验值；(d) $d=24$ pixel 理论值；(e) $d=24$ pixel 实验值

Fig. 3 Experimental and numerical results. (a) 3D light intensity; (b) numerical results with $d=48$ pixel; (c) experimental results with $d=48$ pixel; (d) numerical results with $d=24$ pixel; (e) experimental results with $d=24$ pixel

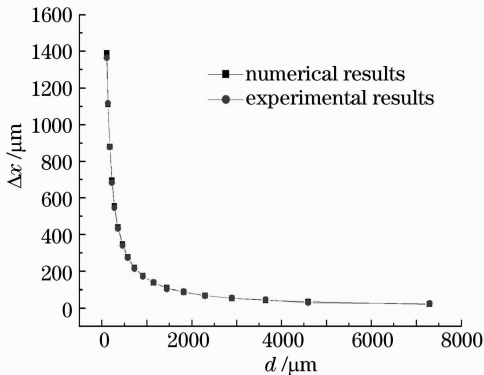


图4 中间阱与两侧阱的间距实验结果与理论分析

Fig. 4 Comparison of experimental results and numerical ones of the distance between central well and two-side ones

由于光阱本身有一定的大小,根据一阶贝塞尔函数可算出,单光阱的径向半径为 $r=0.61\lambda f/R$,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 为 240 pixel,即 $d=240 \times 19 \mu\text{m}=3560 \mu\text{m}$ 时,双阱的间距约为 $30 \mu\text{m}$,已小于单光阱的光强分布的半径,根据瑞利判据已不可分辨。此时虽然还未完全变为单光阱,但三光阱间的间距已不可测量。上述过程是可以沿正反方向进行的,即可由三光阱改变为单光阱,也可以由单光阱再改变为三光阱,且

三光阱的间距完全由 LC-SLM 的光栅常数确定,控制非常方便。

4.3 组合三光学阱的演化

上述光栅常数 d 对三光阱间距影响的观测实验实际上即是组合三光学阱到单光学阱的演化过程,随着光栅常数 d 的增加,组合三光学阱的间距减小,逐渐由三阱演化为单阱,此过程是双向的。由 (3) 式可知,如果改变 d 为 200 pixel,三光学阱已十分靠近,但光阱间距比光阱光强分布的半径稍大时,三光阱已不再独立,实际已连为一体,改变入射偏振光的振动方向,可改变三光阱间中间阱与两侧阱的光强比,组合三光学阱将逐渐演化为双光阱,此过程也是双向的。

需要指出的是,当应用于冷原子或分子囚禁时,由于光场的改变是通过动态地切换 SLM 上的光栅花样实现,在两幅光栅花样切换的过程中,光场存在一定的不确定性,此时冷原子可能发生逃逸而造成损失。当 SLM 刷新频率足够高、光场变化平缓时,可以有效地避免原子损失^[17-18]。本课题组之前的双光阱研究^[19]表明当 SLM 刷新频率为 80 Hz 时,包括冷原子装载、合并整个过程,冷原子的整体损失率约为 41.6%,如果采用更长的演化时间和更高的

刷新频率, 损失率可以进一步降低。

4.4 组合三光学阱可能的应用分析

1) 大晶格常数的光学晶格

选择矩形边框透镜, 沿 x 、 y 方向延伸排列, 形成一个二维的透镜阵列, 与图 1 的 LC-SLM 光调制器组合, 即可形成一个产生特殊组合三光学阱的光学晶格的系统, 当用平面单色光垂直照射时, 该系统产生的光学晶格的晶格常数取决于所用透镜的大小, 其在 x 、 y 方向上的晶格常数分别为透镜在 x 、 y 方向上的宽度, 当用多束光斜入射时可产生更复杂的光学晶格。如采用的透镜的焦距很小时, 还可实现原子、分子的表面囚禁与操控。

2) 三种冷原子或冷分子样品的囚禁与操控

由于该组合三光学阱的间距可以很大, 因此可非常方便地实现三种不同的冷原子或冷分子样品的装载, 进而在光阱的合并过程实现冷原子样品间的冷碰撞或复合分子等研究, 产生自然界中不存在的新的物质。也可以在该过程中实现同种冷原子或分子样品的绝热膨胀或压缩或量子隧道效应等研究, 还可以实现物质波的四波混频等。

5 结 论

提出了一种利用反射式 LC-SLM 产生用于实现囚禁冷原子或冷分子的可控制的组合三光学阱新方案, 计算分析了该方案产生的三光阱的几何与光学特征参数, 实验模拟研究了组合三光学阱产生规律。实验结果表明, 理论与实验完全符合; 组合三光阱到双光阱或到单光阱的双向演化过程是许多冷原子或冷分子实验研究所必需的, 提出的这个三阱新方案简便易行, 具有非常好的操控性, 可以非常灵活地实现组合三阱到双阱或单阱的双向演化, 通过改变起偏器 P 的分光角度 φ , 可以改变入射激光的 o 光与 e 光比例, 从而实现非对称三阱结构或双阱结构, 可应用于研究非对称三阱中的 Josephson 振荡^[8]与冷原子三极管效应^[20]。此外, 该三光阱阱间势垒的高度以及分离距离能够在较大范围内进行调节, 一方面便于不同冷原子或冷分子样品的装入, 另一方面能够有效地改变各势阱冷原子云或凝聚体间的耦合强度; 通过附加的偏置磁场, 可以达到控制原子-原子相互作用的目的; 较大的阱间分离允许对单个阱进行寻址, 从而控制势阱中的原子布居数目。

参 考 文 献

1 Zhang Huiqing, Xu Yong, Xu Wei, *et al.*. Logical stochastic

- resonance in triple-well potential systems driven by colored noise [J]. *Chaos*, 2012, 22(4): 043130.
- 2 Yu Xia, Chen Keqiu, Zhang Yan. Optical transport through finite superlattice modulated with three-component quasiperiodic defect [J]. *J Appl Phys*, 2012, 112(4): 043524.
- 3 Alexej I Streltsov, Kaspar Sakmann, Ofir E Alon, *et al.*. Accurate multi-Boson long-time dynamics in triple-well periodic traps [J]. *Phys Rev A*, 2011, 83(4): 043604.
- 4 Lu Gengbiao, Hai Wenhua, Xie Qiongtao. Coherent control of atomic tunneling in a driven triple well [J]. *Phys Rev A*, 2011, 83(1): 013407.
- 5 A Benseny, S Fernández-Vidal, J Bagudà, *et al.*. Atomtronics with holes: coherent transport of an empty site in a triple-well potential [J]. *Phys Rev A*, 2010, 82(1): 013604.
- 6 Liu Tao, Tillmann Kubis, Qi Jiewang, *et al.*. Design of three-well indirect pumping terahertz quantum cascade lasers for high optical gain based on nonequilibrium Green's function analysis [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100(12): 122110.
- 7 E Dupont, S Fatholouloumi, H C Liu. Simplified density-matrix model applied to three-well terahertz quantum cascade lasers [J]. *Phys Rev B*, 2010, 81(20): 205311.
- 8 Liu Bin, Fu Libin, Liu Jie. Josephson oscillation and transition to self-trapping for Bose-Einstein condensates in a triple-well trap [J]. *Phys Rev A*, 2007, 75(3): 033601.
- 9 Schneider Philipp-Immanuel, Grishkevich Sergey, Saenz Alejandro. Ab initio determination of Bose-Hubbard parameters for two ultra-cold atoms in an optical lattice using a three-well potential [J]. *Phys Rev A*, 2009, 80(1): 013404.
- 10 Lu Junfa, Zhou Qi, Ji Xianming, *et al.*. A combinative triple-well optical trap for three-species cold atoms or molecules [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 063701.
- 陆俊发, 周琦, 纪宪明, 等. 实现冷原子、冷分子光学囚禁的组合三光学势阱方案[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 063701.
- 11 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0309001.
- 沈川, 张成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0309001.
- 12 Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0514001.
- 于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0514001.
- 13 Huang Dajie, Fan Wei, Li Xuechun, *et al.*. Beam shaping for 1053-nm coherent light using optically addressed liquid crystal light valve [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(S2): S21406.
- 14 Liu Dongmei, Liu Juan, Zhang Zhao, *et al.*. Study of initial phase calibration and multi-wavelength response of phase-only spatial light modulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 041203.
- 刘冬梅, 刘娟, 张昭, 等. 相位型液晶空间光调制器初始相位的校准与多波长响应的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 041203.
- 15 Zheng Mingjie, Li Zhifang, Chen Daqiang, *et al.*. Gamma correction of a new type Holoeye Pluto pure phase spatial light modulator and its evaluation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 112302.
- 郑明杰, 李志芳, 陈大强, 等. 新型 Holoeye Pluto 纯位相型空间光调制器的伽马修正及评价[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(11): 112302.
- 16 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1231-1235.
- 张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析[J]. *光学*

- 学报, 2008, 28(7): 1231–1235.
- 17 V Boyer, R M Godun, G Smirne, *et al.*. Dynamic manipulation of Bose-Einstein condensates with a spatial light modulator [J]. Phys Rev A, 2006, 73(3): 031402(R).
- 18 F K Fatemi, M Bashkansky, Z Dutton. Dynamic high-speed spatial manipulation of cold atoms using acousto-optic and spatial light modulation [J]. Opt Express, 2007, 15(6): 3589–3596.
- 19 Zhou Qi, Lu Junfa, Yin Jianping. Controllable optical multi-well trap and its optical lattices using compounded cosine patterns [J]. Chin Phys B, 2010, 19(12): 123203.
- 20 J A Stickney, D Z Anderson, A A Zozulya. Transistorlike behavior of a Bose-Einstein condensate in a triple-well potential [J]. Phys Rev A, 2007, 75(1): 013608.

栏目编辑：王晓玻