

液晶空间光调制器产生可调三光学势阱*

周巧巧¹⁾ 徐淑武¹⁾²⁾ 陆俊发²⁾³⁾ 周琦²⁾³⁾ 纪宪明^{1)2)†} 印建平²⁾

1) (南通大学理学院, 南通 226007)

2) (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)

3) (东华理工大学理学院, 抚州 344000)

(2013年2月27日收到; 2013年4月10日收到修改稿)

提出了产生三光学势阱的新方案, 在该方案中用液晶空间光调制器制作相位型闪耀光栅, 单色相干光照明, 产生按等边三角形分布的三个光学势阱, 三个光阱光强大小分布相同, 调节空间光调制器的相位分布, 可以改变光阱的相对位置, 实现三光阱到单个光阱、两光阱合并为一个光阱等演变及其反向演变, 调节过程简单、方便. 根据现有空间光调制器性能和尺寸, 模拟设计光栅, 计算三光阱的光强分布和调控过程中光强的变化, 结果表明: 用一般功率的激光照明, 能够得到具有较大峰值光强和较高光强梯度的可调三光阱, 在原子和分子光学实验研究中有多种重要的应用.

关键词: 原子和分子光学, 可调三光学势阱, 空间光调制器

PACS: 37.10.Gh, 37.10.Jk, 42.79.Kr

DOI: 10.7498/aps.62.153701

1 引言

用可控的势阱操控冷原子和冷分子在原子物理的研究中具有十分重要的意义, 人们已经提出了多种产生可控的磁势阱和光学势阱及其阵列的方案^[1-3], 我们也提出过采用 π 相位板产生可控光学双势阱方案^[4-6], 研究了双阱到单阱的演化过程, 并对方案进行了实验研究, 验证了方案的可行性. 随着液晶技术获得快速发展, 利用液晶空间光调制技术 (LC-SLM) 对光波作振幅调制和相位调制, 可根据需要, 制作各种类型的衍射光学元件, 不仅制作流程简单, 而且通过计算机控制电信号实现实时的波面变换, 形成能够实时调控的原子光学器件^[7-15], 从而能够在较大的范围内满足原子光学实验的需要, 为原子光学实验开辟了新途径. 近年来, 有关三样品原子缔合分子或三样品原子的冷碰撞性质、三种不同的 Fermi 原子气体的配对的研究^[16-19], 物质波的四波混频及其相关现象的研究^[20-23]已成为超冷原子、分子物理领域中的热

门研究课题. 可控的三光学势阱有助于这些课题的研究, 陆俊发等人提出了利用 LC-SLM 与透镜组合产生组合三光学势阱的方案^[24], 但是该方案还存在一些不足, 方案中的三个光学势阱分布在同一直线上, 三个光阱所处的相对位置的地位不相同, 在三阱演变为双阱过程中, 中间光阱的光强逐渐变小, 两边两个光阱的光强逐渐增大, 在这样的演变过程中, 囚禁在中间光阱的原子会逃逸出去. 本文将提出一种用 LC-SLM 技术产生可调三光学势阱的新方案, 三个光阱的相对位置按等腰三角形分布, 调节相位分布, 既可以实现三阱到单阱或单阱到三阱的演变, 也可以任意改变光阱间的相对位置. 在三阱到单阱的演变过程中, 三个光阱同时靠近或同时分开, 三个光阱的光强始终保持相等, 避免出现被囚禁的原子逃逸现象的发生.

2 用 LC-SLM 技术产生可调三光学势阱的方案

我们取 LC-SLM 的输入窗口为边长为 a 的正

* 国家自然科学基金 (批准号: 11034002, 11274114)、科技部量子调控重大研究计划项目 (批准号: 2011CB921602) 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: jixm@ntu.edu.cn

六边形,如图1所示,将正六边形分为三个边长为 a 的棱形,棱形的顶角分别为 120° 和 60° ,在三个棱形区域内通过计算机程序控制加在LC-SLM上的电压信号,使每个棱形内的相位沿中线(两个 120° 顶角的连线)OC,OA,OE方向按线性变化,取OC为 x_1 方向,OA为 x_2 方向,OE为 x_3 方向,三个棱形内的振幅透射率函数分别写为

$$\begin{aligned} T_{\text{OBCD}} &= \exp(i2\pi\alpha_1 x_1/a), \\ T_{\text{OFAB}} &= \exp(i2\pi\alpha_2 x_2/a), \\ T_{\text{ODEF}} &= \exp(i2\pi\alpha_3 x_3/a), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\alpha_j(j=1,2,3)$ 是可调节的相位变化参数,透射率函数都是以 2π 为周期的周期函数.在可见光和近红外区域LC-SLM能够实现0到 2π 的相位调制,当 α_j 较大时,在对应的棱形区域内实际分布的是一组闪耀光栅, α_j 是沿 x_j 方向的周期个数,图1中的每个棱形是一组闪耀光栅,三组光栅的闪耀方向互成 120° 角.

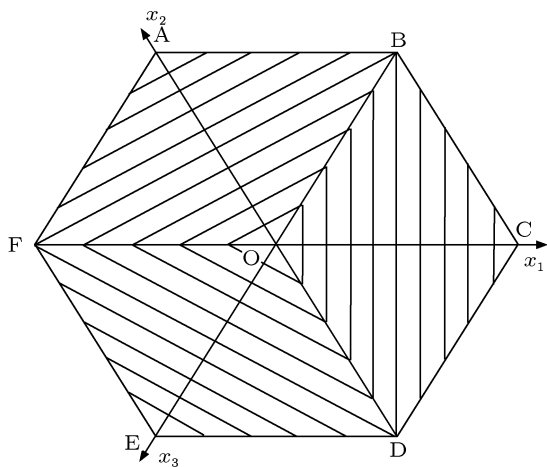


图1 用液晶空间光调制器制作相位型闪耀光栅的原理性方案

用图2所示的光路,以波长为 λ 的平面光波或高斯光波垂直照射LC-SLM,用焦距为 f 的透镜聚焦,在透镜焦平面上,三组闪耀光栅的衍射主最大沿 x_j 方向偏离焦点的距离为 $\frac{\alpha_j f \lambda}{a}$, α_j 都较小时,三个衍射主最大相互重叠,形成单光阱; α_j 较大时,三个衍射主最大相互分开,形成三光阱.三个光阱间的相互距离由 α_j 决定,当 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ 时,三个光阱成等边三角形,只要调节 α_j 的大小就可以调节光阱间的距离,实现单阱到三阱、三阱到单阱、双阱到单阱、单阱到双阱等多种演变.

3 可调三光阱光强分布的计算、分析与讨论

3.1 等边三角形分布的三光学势阱光强分布

为了计算方便,在图2所示的光路中我们讨论单色平面光波输入的情况,LC-SLM放置在透镜前焦面上,把LC-SLM的透射率函数记为 $W(x_0, y_0)$,根据菲涅耳衍射积分公式,在透镜后输出光振动为

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= \frac{A_0}{\lambda f} \iint_{-\infty}^{\infty} W(x_0, y_0) \exp \left\{ i \frac{k}{2f} \left[\left(\frac{z}{f} - 1 \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times (x_0^2 + y_0^2) - 2(xx_0 + yy_0) \right] \right\} dx_0 dy_0 \\ &= \frac{A_0}{\lambda f} \cdot \square \left\{ W(x_0, y_0) \exp \left\{ i \frac{k}{2f} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \left[\left(\frac{z}{f} - 1 \right) (x_0^2 + y_0^2) \right] \right\} \right\} \Big|_{\substack{f_x = \frac{x}{f\lambda} \\ f_y = \frac{y}{f\lambda}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

$\square\{f(x_0, y_0)\}$ 表示 $f(x_0, y_0)$ 的傅里叶变换,利用(2)式直接计算 $U(x, y, z)$ 比较困难, $U(x, y, z)$ 可分为三个光栅衍射产生的光振动代数和,三个光栅衍射产生的光振动分别记为 $U_{\text{OBCD}}(x, y, z)$, $U_{\text{ODEF}}(x, y, z)$, $U_{\text{OFAB}}(x, y, z)$,

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= U_{\text{OBCD}}(x, y, z) + U_{\text{ODEF}}(x, y, z) \\ &\quad + U_{\text{OFAB}}(x, y, z), \end{aligned} \quad (3)$$

其中计算棱形OBCD的衍射比较简单,由图1可以看出:棱形OBCD绕O点旋转 $\pm 120^\circ$,分别得到棱形ODEF和OFAB,根据坐标旋转傅里叶变换的原理[25]

$$\begin{aligned} U_{\text{OFAB}}(f_x, f_y, z) &= U_{\text{OBCD}}(f_x \cos \theta \\ &\quad + f_y \sin \theta, f_y \cos \theta \\ &\quad - f_x \sin \theta, z) |_{\alpha_1 \rightarrow \alpha_2}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\theta = \frac{2\pi}{3}$,把 θ 改为 $-\theta$, α_2 改为 α_3 ,则可计算 $U_{\text{ODEF}}(x, y, z)$,从而可得到 $U(x, y, z)$.

目前市面上可售的液晶SLM窗口面积大约在 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,根据这一尺度,我们设计图1中的六边形的边长 $a = 10 \text{ mm}$.在图2所示的光路中以波长 $\lambda = 530 \text{ nm}$ 、光强 $I_0 = 0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (振幅 $A = \sqrt{I_0}$,实际有效输入功率为 0.26 W)的平面光作为输入光波,用 $f = 50 \text{ mm}$ 的短焦距显微物镜聚焦,

用 (2)—(4) 式计算 $U(x, y, z)$, 衍射光强分布为

$$I(x, y, z) = U(x, y, z)U^*(x, y, z). \quad (5)$$

取 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$, 三个光阱等距离地分布成等边三角形, 光阱间的距离 $\Delta l = \sqrt{3} \frac{\alpha f \lambda}{a}$, 调节 α 的大小可以调节光阱间的距离, 图 3 是 $\alpha = 0, 0.5, 2, 4, 6$ 时, 焦平面上的光强分布的三维图和密度图.

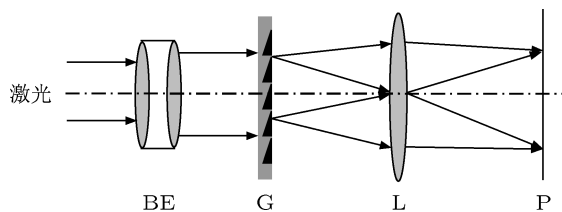


图 2 产生光阱阵列的光路图 (BE: 扩束器; G: LC-SLM; L: 透镜; P: 输出平面)

由图 3 可见, 从 α_1 开始增大 α 的值, 从单光阱演变成三光阱, 随着 α 的增大, 三光阱间的距离逐渐增大, 在演变过程中, 三个光阱的强度分布相同. 反之, α 从大逐渐减小时, 三光阱间的距离逐渐减小, 可实现三光阱到单光阱的演变. 计算表明当 $\alpha \geq 3$, 改变 α , 移动光阱时, 光阱的光强大小和几何形状基本不变, 我们计算了 $\alpha = 4$ 时三光阱中一个光阱 (图 3(d) 右图中上方的光阱) 的有关参数, 列于表 1, 表中 $\Delta x_{1/e^2}$, $\Delta y_{1/e^2}$, $\Delta z_{1/e^2}$ 是以峰值光强的 $1/e^2$ 为边界计算的光阱沿 x, y, z 方向的宽度.

3.2 单个光阱和双光阱的移动调控

改变 (1) 式中的相位参数 α_j 不仅能够实现三光阱到单光阱的演变, 也能够实现单个光阱或双光阱的移动. 如保持 α_2, α_3 大小不变, 改变 α_1 的大小, 则可以保持三光阱中两个光阱的位置不变, 平移一个光阱, 图 4 是 $\alpha_2 = \alpha_3 = 4, \alpha_1 = 3, 1.5, 0, -2$ 时焦平面上的光强分布的三维图和密度图. $\alpha_1 = -2$ 时, 三个光阱移到同一条直线上, 在平移过程中各个光阱的光强分布基本不变.

保持 α_1 的大小不变, 同时调节 α_2, α_3 的大小, 可以保持一个光阱的位置和光强大小不变, 另两个光阱互相靠近或分离. 图 5 是 $\alpha_1 = 4, \alpha_2 = \alpha_3 = 3, 1.5, 0$ 时焦平面上的光强分布的三维图和密度图. $\alpha_2 = \alpha_3 = 0$ 时, 两个光阱变成一个光阱.

3.3 实际制作的光栅对光阱光强分布可能带来的影响

LC-SLM 按照灰度等级调制相位, 在相位跃变处还存在边缘效应, 这是 LC-SLM 的两个固有缺陷. 实际制作的闪耀光栅与 (1) 式所表示的理想光栅并不完全一样, 实际光栅衍射的光强分布与上文计算的结果间必然存在误差, 主要表现在两个方面: 第一, 按灰度等级调制相位导致光栅的相位轮廓为台阶形. 根据二元光学理论^[26], 台阶数为 L 的闪耀光栅与 (1) 式所表示的理想光栅的 1 级衍射光强之比为 $\eta_{s1} = [\text{sinc}(1/L)]^2$, $L > 20$ 时, $\eta_{s1} > 99\%$. 一般 LC-SLM 按 256 个灰度等级调节相位, 台阶数 L 都会大于 20, 对光强分布的影响可以忽略. 第二, 边缘效应导致相位跃变处的相位分布达不到理想要求, 边缘效应的宽度与 SLM 的像素大小相近, 目前市面上可售的 SLM 的像素大小已达到 μm 量级. 本文所设计可调相位光栅, 分为三个梯形区域, 独立调制各区域相位时, 在连接区有相位跃变; 在光栅两个周期的分界线上也有相位跃变. 但是每个梯形的边长为 10 mm, 最小的光栅周期为 1.67 mm (对应于 $\alpha = 6$), 都远大于像素尺寸, 因此, 边缘效应对光强分布不会有大的影响. 综上所述, 用 SLM 实际制作的光栅, 衍射光强分布与本文计算光强分布间存在误差, 运用高质量的 LC-SLM 制作光栅, 能够使误差达到很小, 以至于可忽略不计.

4 可调三光阱阵列的潜在应用

由图 3 和表 1 可知, 我们用一般功率的激光输入, 能够获得较高光强和光强梯度的三个光学势阱, 这种光阱用于囚禁冷原子有较高的光学偶极势, 根据文献 [4] 提供的有关公式和表 1 中提供的的数据, 我们计算了可调三光阱囚禁⁸⁸Sr 冷原子的最大光学偶极势为 0.26 mK, 光与原子相互作用的引力是原子自重的 5000 倍. 增大输入光的功率, 能够获得更大光强的三光阱, 可用于囚禁冷分子.

利用这种可调控的三光阱阵列囚禁冷原子 (或冷分子), 在原子光学中可以开展许多研究工作, 如从磁光阱中把超冷原子团装载到图 3(a) 所示的单光阱中, 通过调节 LC-SLM 的相位分布, 使单光阱演变成三个强度分布相同的光阱, 很自然地把单光阱中的原子均匀地分到三个光阱中, 再根据需要调节相位参数 α_j , 改变三光阱的相对位置, 研究不同相对位置状态下三原子团间的量子隧道效应和量

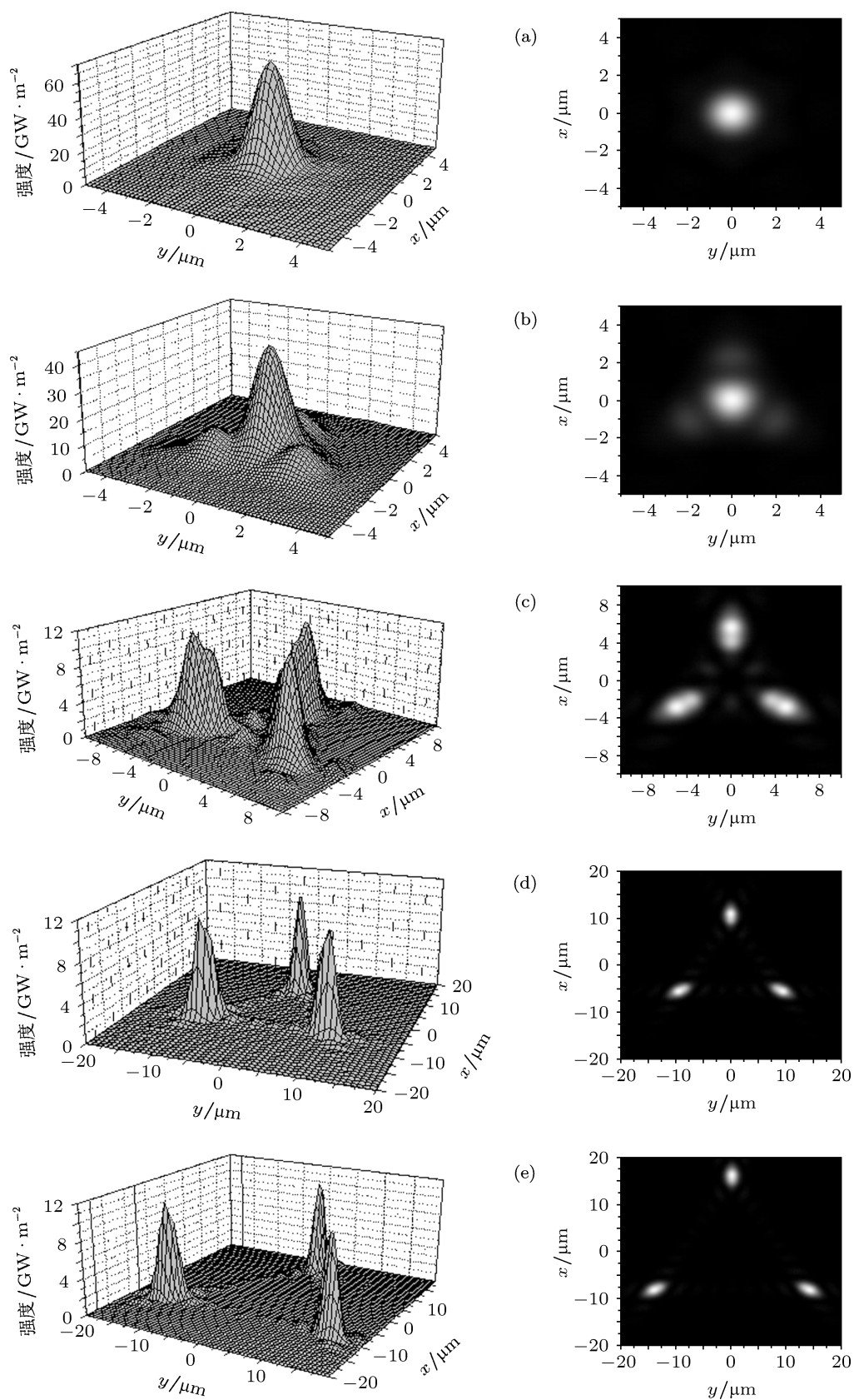
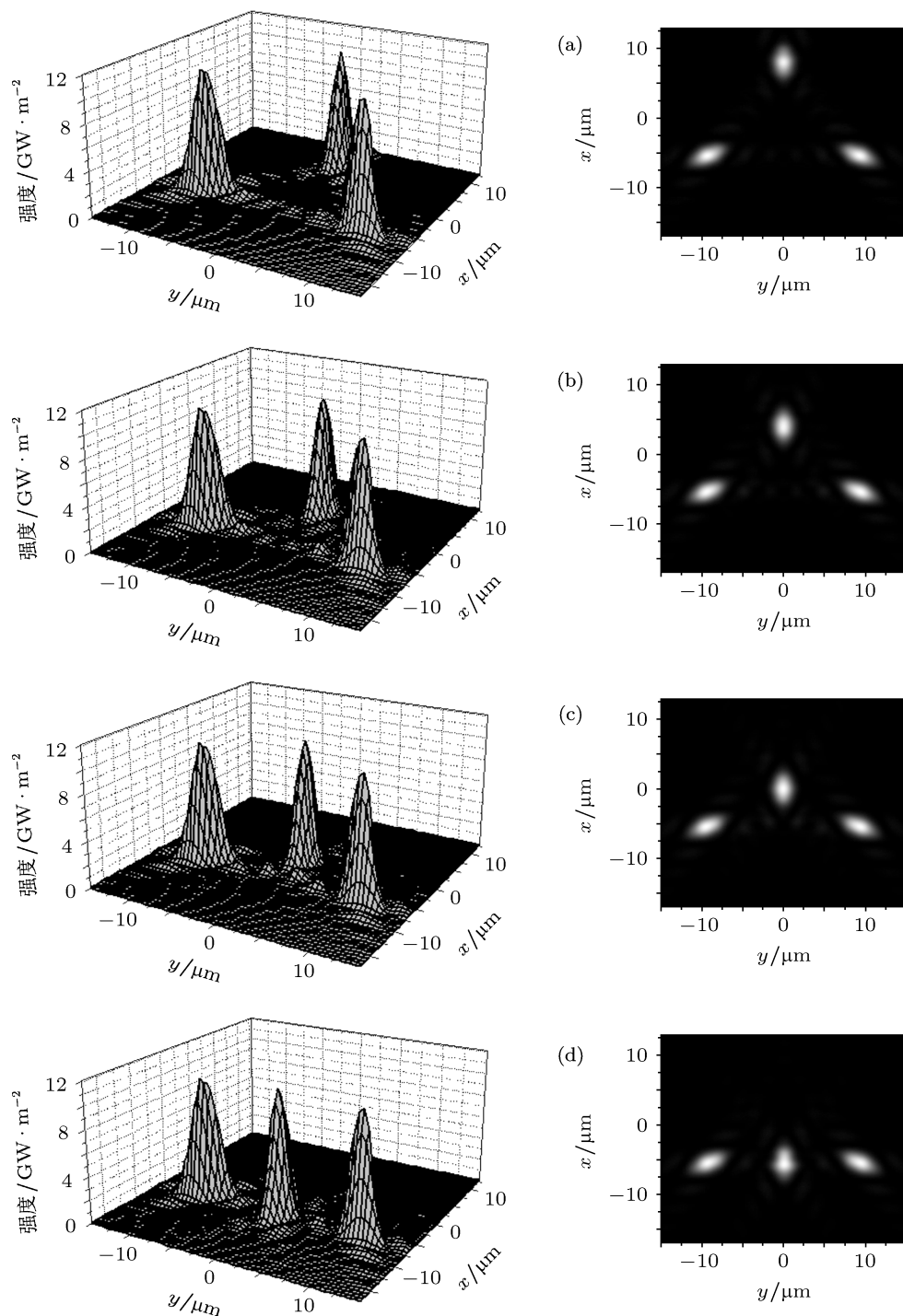


图3 三光阱同时移动 ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$) 时在焦平面上的光强分布 (左列: 三维光强分布图; 右列: 光强密度图) (a) $\alpha = 0$; (b) $\alpha = 0.5$; (c) $\alpha = 2$; (d) $\alpha = 4$; (e) $\alpha = 6$

表 1 等边三角形三光阱的有关参数

$I_{\max}$	$\overline{(\partial I / \partial x)_{\max}}$	$\overline{(\partial I / \partial y)_{\max}}$	$\overline{(\partial I / \partial z)_{\max}}$	Δl	$\Delta x_{1/e^2}$	$\Delta y_{1/e^2}$	$\Delta z_{1/e^2}$	$\Delta V_{1/e^2}$
$/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$/\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$	$/\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$	$/\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$	$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$	$/\text{cm}^3$
1.113×10^{10}	5.6×10^{16}	7.8×10^{16}	6.7×10^{15}	18.4	6.276	3.638	49.57	5.92×10^{-10}


 图 4 移动一个光阱时在焦平面上的光强分布 ($\alpha_2 = \alpha_3 = 4$) (左列: 三维光强分布图; 右列: 光强密度图) (a) $\alpha_1 = 3$; (b) $\alpha_1 = 1.5$; (c) $\alpha_1 = 0$; (d) $\alpha_1 = -2$

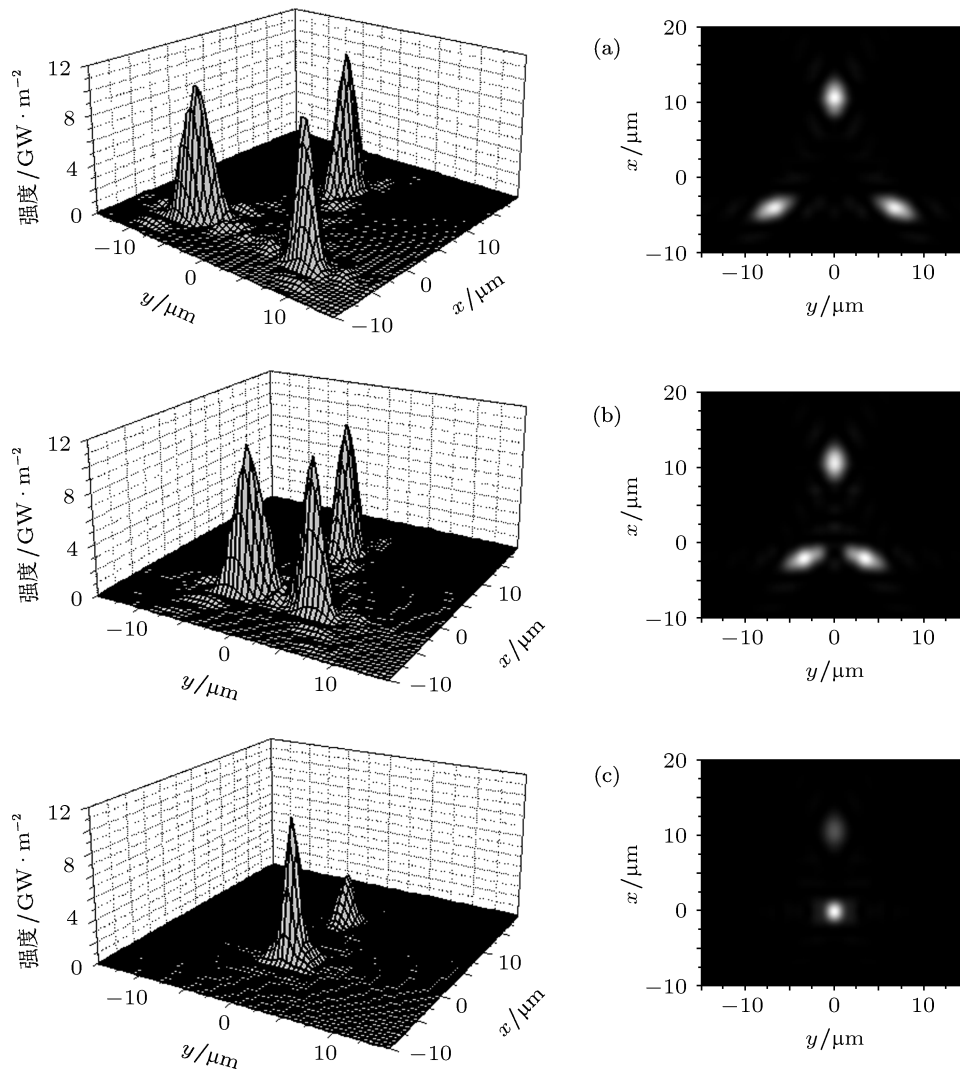


图5 两个光阱相对移动 ($\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$, $\alpha_1 = 4$) 时焦平面上的光强分布 (左列: 三维光强分布图; 右列: 光强密度图) (a) $\alpha = 3$; (b) $\alpha = 1.5$; (c) $\alpha = 0$

子纠缠; 拆除囚禁光波, 三原子团自由膨胀, 可研究来自不同方位的三原子束的碰撞或三束原子物质波的干涉. 反过来, 我们也可以先在三个分离的光阱中分别装入相同的、或不同的原子样品, 再调节相位参数 α_j , 改变光阱的相对位置, 实现三光阱变为单光阱或两光阱合并为一个光阱等演变, 研究压缩状态下原子的碰撞与干涉.

另外, 在本文中, 我们把 LC-SLM 分为三个等面积的棱形, 产生三个等光强的光阱, 我们也可以把 LC-SLM 分为三个不等面积的区域, 产生三个光强不等的光阱, 装载相同的原子得到不同的光学偶极势, 装载不同的原子可得到相同的光学偶极势, 总之, 利用不同取向的闪耀光栅, 可以根据实验的需要, 得到不同的三光阱.

5 结论

我们提出了用液晶空间光调制器制作相位型闪耀光栅产生三光阱的新方案, 所获得的三个光学势阱的光强分布和几何形状相同, 调节相位变化参数, 可以改变光阱间的相对位置, 实现三光阱合并为单光阱、两光阱合并为单光阱等演变及其反向演变, 调节过程方便、简单. 我们根据市面上可售的空间光调制器性能和尺寸, 模拟设计了闪耀光栅, 计算光阱阵列的光强分布, 结果表明: 用一般功率的激光输入, 能够产生较大的峰值光强和较高的光强梯度. 囚禁⁸⁸Sr 冷原子的最大光学偶极势为 0.26 mK, 光与原子相互作用的引力是原子自重的 5000 倍. 这种可调三光阱在原子光学实验研究中有多种重要的应用.

- [1] Hu J J, Yin J P 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2844
- [2] Enderlein M, Huber T, Schneider C, Schaetz T 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 233004
- [3] Lei T, Poon A W 2013 *Opt. Express* **21** 1520
- [4] 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]
- [5] Ji X M, Yin J P 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 1737
- [6] Mu R W, Wang Z L, Li Y L, Ji X M, Yin J P 2010 *Eur. Phys. J. D* **59** 291
- [7] Zheng M J, Ogura Y, Tanida J 2008 *Opt. Rev.* **15** 105
- [8] Matsumoto N, Ando T, Inoue T, Ohtake Y, Fukuchi N, Hara T 2008 *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 1642
- [9] He X D, Xu P, Wang J, Zhan M S 2009 *Opt. Express* **17** 21007
- [10] Wall T E, Armitage S, Hudson J J, Sauer B E, Dyne J M, Hinds E A, Tarbutt M R 2009 *Phys. Rev. A* **80** 043407
- [11] Liu X, Zhang J, Wu L Y, Gan Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 024211
- [12] Xavier J, Dasgupta R, Ahlawat S, Joseph J, Gupta PK 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 201101
- [13] Yu Y J, Wang T, Zheng H D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3154 (in Chinese) [于瀛洁, 王涛, 郑华东 2009 物理学报 **58** 3154]
- [14] Gu S B, Xu S W, Lu J F, Ji X M, Yin J P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 153701 (in Chinese) [顾宋博, 徐淑武, 陆俊发, 纪宪明, 印建平 2012 物理学报 **61** 153701]
- [15] Xu S W, Zhou Q Q, Gu S B, Ji X M, Yin J P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 223702 (in Chinese) [徐淑武, 周巧巧, 顾宋博, 纪宪明, 印建平 2012 物理学报 **61** 223702]
- [16] Bloch I 2008 *Science* **319** 1202
- [17] Guan X W, Batchelor M T, Lee C, Zhou H Q 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 200401
- [18] Taglieber M, Voigt A C, Henkel F, Fray S, Hänsch T W, Dieckmann K 2006 *Phys. Rev. A* **73** 011402
- [19] Meng S Y, Wu W, Liu B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6902 (in Chinese) [孟少英, 吴炜, 刘彬 2009 物理学报 **58** 6902]
- [20] Deng L, Hagley E W, Wen J, Trippenbach M, Band Y, Julienne P S, Simsarian J E, Helmerson K, Rolston S L, Phillips W D 1999 *Nature* **398** 218
- [21] Ferris A J, Olsen M K, Davis M J 2009 *Phys. Rev. A* **79** 043634
- [22] Dall R G, Byron L J, Truscott A G, Dennis G R, Johnsson M T, Hope J 2009 *Phys. Rev. A* **79** 011601
- [23] Willis R T, Becerra F E, Orozco L A, Rolston S L 2009 *Phys. Rev. A* **79** 033814
- [24] Lu J F, Zhou Q, Ji X M, Yin J P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 063701 (in Chinese) [陆俊发, 周琦, 纪宪明, 印建平 2011 物理学报 **60** 063701]
- [25] Mu R W, Zhou J, Tan S Q, Huang X F, Gao W Q 1998 *Chin. Laser* **25** 829 (in Chinese) [沐仁旺, 周进, 谈苏庆, 黄信凡, 高文琦 1998 中国激光 **25** 829]
- [26] Jin G F, Yan Y B, Wu M X 1998 *Binary optics* (Beijing: National Defence Industry Press) p25 (in Chinese) [金国藩, 严瑛白, 邬敏贤 1998 二元光学 (北京: 国防工业出版社) 第 25 页]

Generation of the controllable triple-well optical trap by liquid-crystal spatial light modulator*

Zhou Qiao-Qiao¹⁾ Xu Shu-Wu¹⁾²⁾ Lu Jun-Fa²⁾³⁾ Zhou Qi¹⁾²⁾
Ji Xian-Ming^{1)2)†} Yin Jian-Ping²⁾

1) (School of Science, Nantong University, Nantong 226007, China)

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

3) (School of Science, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China)

(Received 27 February 2013; revised manuscript received 10 April 2013)

Abstract

A new scheme of generating the controllable triple-well optical trap is proposed, in which a liquid-crystal spatial light modulator (SLM) is used to fabricate the phase-type blazed grating and be illuminated with coherent monochromatic light. Three optical wells, each of which has the same intensity distribution, can be formed with relative position of the distribution of an equilateral triangle. The relative positions of the optical wells can be changed by simply and conveniently adjusting the phase distribution of the SLM to realize the evolution and reverse evolution from triple or dual wells to single well. The phase grating is designed by simulation according to the technical parameters of the SLM, and illuminated by the laser with ordinary power. The intensity distributions and intensity changes in the adjustment process for the triple wells are calculated. Results show that the controllable triple-well optical trap with very high peak value of intensity and intensity gradient can be obtained. It has many important applications in the experimental study of atomic and molecular optics.

Keywords: atomic and molecular optics, liquid-crystal spatial light modulator, controllable triple-well optical trap

PACS: 37.10.Gh, 37.10.Jk, 42.79.Kr

DOI: 10.7498/aps.62.153701

* project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11034002, 11274114), the National Key Basic Research and Development Program of China (Grant No. 2011CB921602), and the Open Research Fund of State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University.

† Corresponding author. E-mail: jixm@ntu.edu.cn