

文章编号: 1007-6654(2008)02-0156-04

## 采用强聚焦光学系统实现原子操控的一种方案

张 静, 李 刚, 王军氏, 张天才 \*

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

**摘要:** 采用光学手段操控原子是研究原子之间纠缠、控制其相互作用的重要途径,也是量子信息研究中的重要课题。本文基于日前的实验系统,提出了利用由三组驻波场组成的强聚焦光学系统产生间距可控的光学晶格,并在此基础上实现多光学偶极阱的一种方案。我们系统地讨论了两驻波场与第三驻波场的夹角和相对位相对光学阱分布的影响,指出在此基础上可以在一定程度上通过微光学阱实现单个原子的操控并实现偶极阱间距的可控调节。该结果对研究光学晶格中的 BEC 之间的作用、原子干涉以及原子之间偶极-偶极作用等具有重要意义。

**关键词:** 光学偶极阱; 光学晶格; 原子操控

**中图分类号:** O431      **文献标识码:** A

光学偶极阱通过诱发原子的电偶极矩而对原子产生作用。利用远离原子共振线的大失谐激光将原子束缚在光场中光强最强处的方法被越来越多地应用到原子控制中,成为操控原子的重要手段<sup>[1,2]</sup>。这种远离共振的光学阱具有广泛的用途,吸引了人们的很大兴趣。例如,它可以用来产生全光学的玻色-爱因斯坦凝聚体<sup>[3-5]</sup>、简并费米气体<sup>[6]</sup>以及全光学的原子激光<sup>[7]</sup>。光学偶极阱允许我们制备、操纵和读出原子的内态,直接控制空间中的单个原子。多光学阱形成的光学晶格更是开辟了量子信息研究的新领域。利用光学晶格产生的多光学阱可以实现对多原子的控制,这为研究原子之间的相互作用,原子纠缠、原子之间的量子态的传送等提供了可能<sup>[8,9]</sup>。Brennen 等人提出了可以利用光学晶格中的中性原子实现量子逻辑门,针对(包括带电粒子方案在内的)退相干问题提供了一种方法<sup>[10]</sup>。他们指出,利用激光诱导的偶极-偶极相互作用可以使被束缚的中性原子之间产生纠缠。研究如何构建尺寸合适的、可控的远离共振的光学晶格,使原子各自所处的基本单元之间具有足够的距离,并且整个光学晶格结构有足够的尺度可以装载很多原子或单原子,是实现量子信息的重要课题。人们已经在实验室取得了一系列的进展,比如采用全息相衬底板,Boiron 等人用 YAG 激光器建立了周期是 29  $\mu\text{m}$  的光学晶格<sup>[11]</sup>。在其它的一些实验中, Hannover 小组采用排列显微透镜

的技术来聚焦红移的激光束,建立了一系列可用于量子存储的微光学阱<sup>[12-14]</sup>。Peil 等人产生了各自独立的两组光学晶格,空间周期相差 3 倍,在相距约 30  $\mu\text{m}$  的各个位置处载入了  $^{87}\text{Rb}$  原子的玻色-爱因斯坦凝聚体<sup>[15]</sup>。

在某些情况下人们希望获得微小的光学阱以实现单个原子的控制,比如亚微米尺度的光学阱<sup>[16,17]</sup>,并在此基础上进一步希望获得对某一个原子与其它原子之间距离的控制从而控制其相互作用。本文基于目前我们的实验系统,提出了采用三组强聚焦光学系统形成光学晶格的一种方案。该方案相对比较简单,能够产生可控的光学晶格,这对于控制原子之间的纠缠和偶极-偶极相互作用至关重要,并可进一步用于研究多通道的量子存储。

我们考虑如图 1 所示的由空间三束光组成的系统。三组驻波系统形成的光场在空间相遇,其中的驻波 II 和驻波 III 分别与驻波 I 成  $\theta$  和  $-\theta$  角。我们首先考虑该系统交汇区域中光场的分布,进而考虑角度  $\theta$  对光学晶格中光学阱的影响。根据高斯光束的电场(振幅)分布<sup>[18]</sup>,两束反向传播的高斯光在空间形成驻波的强度分布可以表示为

$$I = \frac{8P}{\pi\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{1+(z/f)^2}} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \times \cos^2\left[k\left(z + \frac{r^2}{2(Z+f^2/z)}\right) - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right] \quad (1)$$

收稿日期: 2008-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(10434080); 国家重点基础研究计划课题(2006CB921102)

作者简介: 张静(1979-) 山西侯马人,光学专业博士研究生。 \* 通讯作者: Email: tezhang@sxu.edu.cn

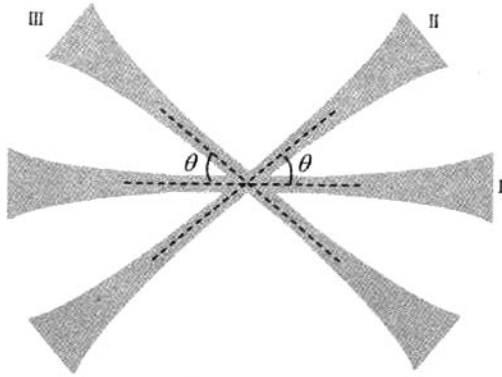


图1 三组驻波在空间形成光学阱的示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of multiple optical traps by three standing light wave systems

其中  $P$  是激光功率,  $\omega_0$  是腰斑半径,  $z$  是传播方向上的位置,  $f = \pi\omega_0^2/\lambda$  是瑞利长度,  $r$  是径向的位置,  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $\omega(z) = \omega_0\sqrt{1 + (z/f)^2}$  是  $z$  处的光束半径。原子所感受到的偶极势可以表示为<sup>[19]</sup>

$$U_{\text{dip}} = \frac{\pi c^2 \Gamma}{2\omega_a^3} \left( \frac{1}{\Delta_1} + \frac{2}{\Delta_2} \right) I(\mathbf{r}) \quad (2)$$

其中,  $\omega_a$  和  $\Gamma$  分别为原子线的跃迁频率和共振衰减率(自然线宽),  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  分别是偶极俘获光相对于原子线的失谐。以铯原子为例,选择偶极俘获光的波长为 935 nm,即 Cs 原子 D2 线的 Magic Wavelength,偶极俘获光的频率为 10 mW。实际过程中通过非球面镜对光束进行强聚焦,可以获得  $2 \mu\text{m}$  甚至更小的腰斑半径。根据(1)和(2)可以得到空间某处(这里我们选择的是  $x = 1 \mu\text{m}, y = 1 \mu\text{m}$  处)的光学阱深度随角度的变化关系,如图 2 所示。

可以看出在  $45^\circ$  附近阱深的变化呈对称分布,间距不等。这是因为角度的变化使得三组驻波光场在同一方向上的分量发生了变化,从而改变了某个确定位置的阱的深度。从整体来看,也必然会改变阱的大小、形状和位置。图 3 给出了角度取不同值时光学阱的分布情况。我们可以看出,改变角度,阱的大小、形状、位置和间距均会发生变化。实际过程中可以通过连续改变入射光的角度来改变阱的位置进而改变原子的位置。需要指出的是,中心处 ( $x = 0 \mu\text{m}, y = 0 \mu\text{m}$ ) 随角度变化的只有阱的大小和形状,而阱深并不会随角度变化。这时微调角度就可以控制位于中心的阱中的原子与相邻阱中原子的相对位置。

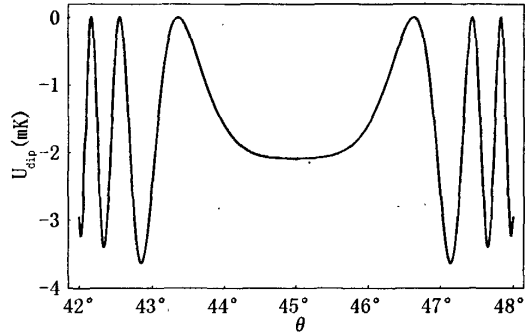


图2 对 Cs 原子而言,  $x = 1 \mu\text{m}, y = 1 \mu\text{m}$  处光学偶极阱的深度随两组驻波与第三组驻波所成角度的变化关系。参数为  $\lambda_{\text{trapping}} = 935 \text{ nm}$ ,  $\omega_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $P_{\text{trapping}} = 10 \text{ mW}$ 。

Fig. 2 Potential depth as a function of angle  $\theta$  at position  $x = 1 \mu\text{m}, y = 1 \mu\text{m}$ . The parameters are  $\lambda_{\text{trapping}} = 935 \text{ nm}$ ,  $\omega_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $P_{\text{trapping}} = 10 \text{ mW}$ .

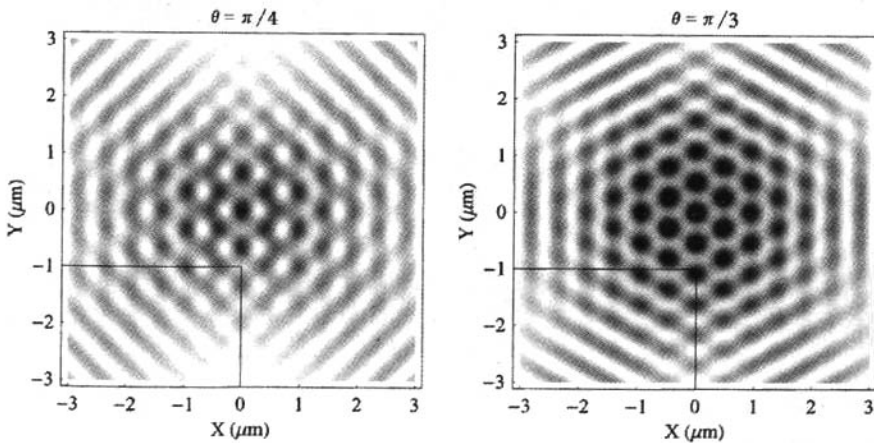


图3 角度分别为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  时光学阱的分布。其他参数均与图 2 相同。

Fig. 3 Optical Lattice with  $\theta$  at  $45^\circ$  and  $60^\circ$ , respectively.

The parameters are the same as those used in Fig. 2.

我们进一步考虑驻波 II 和驻波 III 分别与驻波 I 有  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的相位差,这在实际过程中可以通过控制光场的位相实现。选择角度为  $45^\circ$ ,我们得到的  $x=0 \mu\text{m}, y=0 \mu\text{m}$  处偶极阱深度与相位差  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  之间的关系如图 4 所示,可以看出,阱深随相位差的变化是周期性的。并且偶极

阱的深度对相位差的敏感性依赖于具体的位置,对于  $x=0 \mu\text{m}, y=0 \mu\text{m}$  来说,由于它处在对称中心的位置,因此对于  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的敏感性是相同的,而对于其他位置则不然,比如  $x=1 \mu\text{m}, y=1 \mu\text{m}$  处,就只对  $\varphi_1$  敏感,而  $x=1 \mu\text{m}, y=-1 \mu\text{m}$  处,则只对  $\varphi_2$  敏感。

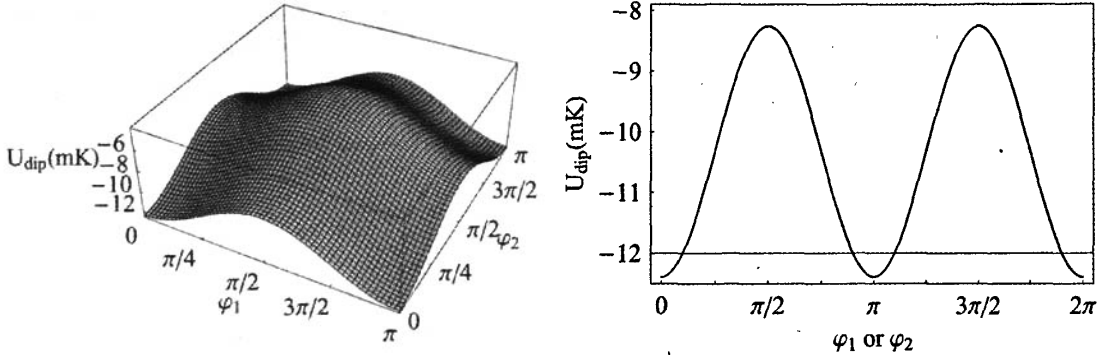


图 4 角度为  $45^\circ$  时,  $x=0 \mu\text{m}, y=0 \mu\text{m}$  处光学偶极阱的深度与位相差  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的关系。其他参数均与图 2 相同。

Fig. 4 Potential depth versus phase difference between  $\varphi_1$  and  $\varphi_2$  at  $x=0 \mu\text{m}, y=0 \mu\text{m}$  with  $\theta = 45^\circ$ .

The parameters are the same as those used in Fig. 2.

选择相位差  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ , 我们得到了角度为  $45^\circ$ 、位相差分别为  $0, \pi/8$  和  $\pi/4$  时光学阱的分布,如图 5 所示。可以看出,光学晶格中阱的尺寸均在  $0.5 \mu\text{m}$  以下,且每个光学阱的位置会随着相位差的变化而发生很明显的变

化,如果我们连续地改变相位,阱中的原子将会随着阱的位置移动而移动,从而可以在微米尺度实现原子的连续运载。

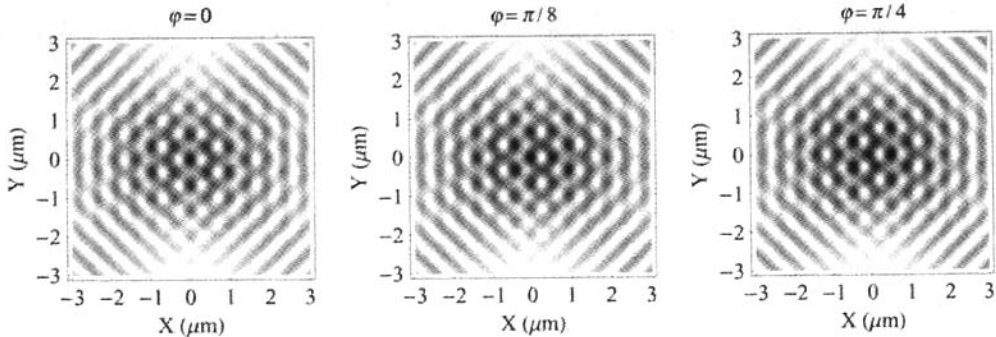


图 5 角度为  $45^\circ$ 、位相差分别为  $0, \pi/8$  和  $\pi/4$  时光学阱的分布。其他参数均与图 2 中的相同。

Fig. 5 Multiple dipole traps with  $\theta = 45^\circ$  and phase difference at  $0, \pi/8$  and  $\pi/4$ , respectively.

The parameters are the same as those used in Fig. 2.

通过以上的讨论,我们看到,利用三组驻波系统可以形成特定分布的二维光学晶格。光学阱的尺度在半波长量级,通过改变角度和光束的位相可以在一定范围内实

现对原子的控制。其中入射方向影响光学阱的大小、形状、位置以及阱的间距,而位相则主要影响光学阱的位置分布。

参考文献:

[1] ADAMS C S, LEE H J, CHU S, et al. Evaporative Cooling in a Crossed Dipole Trap [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 3577-3580.  
 [2] FRIEBEL S, D'ANDREA C, H NSCH T W, et al. CO<sub>2</sub>-laser Optical Lattice with Cold Rubidium Atoms [J]. *Phys Rev A*, 1998, 57: R20-R23.

- [3] BARRETT M D, SAUER J A, CHAPMAN M S. All-Optical Formation of an Atomic Bose-Einstein Condensate [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **87**: 010404.
- [4] WEBER T, HERBIG J, GRIMM R, *et al.* Bose-Einstein Condensation of Cesium [J]. *Science*, 2003, **299**: 232-235.
- [5] TAKASU Y, MAKI K, TAKAHASHI Y, *et al.* Spin-Singlet Bose-Einstein Condensation of Two-Electron Atoms [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **91**: 040404.
- [6] GRANADE S R, GEHM M E, THOMAS J E, *et al.* All-Optical Production of a Degenerate Fermi Gas [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**: 120405.
- [7] CENNINI G, RITT G, WEITZ M, *et al.* All-Optical Realization of an Atom Laser [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **91**: 240408.
- [8] BARRETT M D, CHIAVERINI J, WINELAND D J, *et al.* Deterministic Quantum Teleportation of Atomic Qubits [J]. *Nature*, 2004, **429**: 737-739.
- [9] RIEBE M, ROOS C F, BLATT R, *et al.* Deterministic Quantum Teleportation with Atoms [J]. *Nature*, 2004, **429**: 734-737.
- [10] BRENNEN G K, CAVES C M, DEUTSCH I H, *et al.* Quantum Logic Gates in Optical Lattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**: 1060-1063.
- [11] BOIRON D, MICHAUD A, SALOMON C, *et al.* Cold and Dense Cesium Clouds in Far-detuned Dipole Traps [J]. *Phys Rev A*, 1998, **57**: R4106-R4109.
- [12] DUMKE R, VOLK M, ERTMER W, *et al.* Micro-optical Realization of Arrays of Selectively Addressable Dipole Traps: A Scalable Configuration for Quantum Computation with Atomic Qubits [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**: 097903.
- [13] BIRKL G, BUCHKREMER F B J, ERTMER W, *et al.* Atom Optics with Microfabricated Optical Elements [J]. *Opt Commun*, 2001, **191**: 67-81.
- [14] BUCHKREMER F B J, DUMKE R, ERTMER W, *et al.* Quantum Information Processing with Microfabricated Optical Elements [J]. *Laser Phys*, 2002, **12**: 736-741.
- [15] PEIL S, PORTO J V, PHILLIPS W D, *et al.* Patterned Loading of a Bose-Einstein Condensate into an Optical Lattice [J]. *Phys Rev A*, 2003, **67**: 051603.
- [16] FRESE D, UEBERHOLZ B, MESCHKE D, *et al.* Single Atoms in an Optical Dipole Trap: Towards a Deterministic Source of Cold Atoms [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**: 3777-3780.
- [17] NICOLAS S, REYMOND G, GRANGIER P, *et al.* Sub-poissonian Loading of Single Atoms in a Microscopic Dipole Trap [J]. *Nature*, 2001, **411**: 1024-1027.
- [18] BORN M, WOLF E. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 519.
- [19] GRIMM R, WEIDEMÖLLER M. Optical Dipole Traps for Neutral Atoms [J]. *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2000, **42**: 95-170.

## Multiple Optical Dipole Traps by Strongly Focused Beams for Atom Manipulation

ZHANG Jing, LI Gang, WANG Jun-min, ZHANG Tian-cai

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Controlling atoms by light is important for investigating the atom-atom entanglement and atom-atom dipole interaction. It is also a key issue for quantum information. Based on our present experimental system, we propose a scheme of generating adjustable multiple optical dipole traps by using three strongly focused beams, which implies controllable optical lattice for atom manipulation. We discuss in detail the influence of the incident angle and the phase difference on the depth and position of the traps and demonstrate that the manipulation of individual atom and control of trap-trap distance are realizable. It is of great importance in studying interaction between BECs in optical lattices, atom interference and atomic dipole-dipole interaction.

**Key words:** optical dipole trap; optical lattice; atom manipulation