

文章编号: 0253-2239(2006)05-0757-6

多棱锥镜产生多光束干涉场的理论和实验研究*

雷 铭^{1,2} 姚保利^{1**}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710068)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 提出了一种使用多棱锥镜和多棱台镜产生多束相干光形成二维和三维光学格子的方法。理论分析和数值模拟了多束轴对称平面波干涉产生的二维及三维点阵结构的特性, 得到了光场分布随光束数增加的关系, 发现随着干涉光数目的增加, 干涉场会复杂变化, 当棱锥棱数足够多近似于一个圆锥时, 干涉场会变为同心圆结构的贝塞尔光束的场分布。实验上使用多棱锥和多棱台镜进行了多光束干涉实验, 得到了多束轴对称平面波干涉形成的光学格子, 将数值模拟与实验结果进行了比较, 二者完全吻合。

关键词: 光电子学; 光子晶体; 干涉; 光学格子; 棱锥镜; 光镊

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Theoretical and Experimental Studies on Multi-Beam Interference by Using Pyramid Lens

Lei Ming^{1,2} Yao Baoli¹

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)
(² Graduate College, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: A method of producing 2D and 3D optical lattices with multi-beam interference by using the pyramid lens and the top-chopped pyramid lens is proposed. The structures of 2D and 3D optical lattices formed by interference of multiple z -axis symmetrically distributed plane waves are numerically simulated and analyzed. The relation between the optical-field distribution and the light beam number is conducted, the interference field tends complicate with the rise of beam numbers, when the arrises of the pyramid are enough and the pyramid can be regarding as an axicon, the interference field becomes a Bassel distribution with a concentric circles structure. In the experiment, the multi-arrise pyramid lens and the multi-arrise top-chopped pyramid lens are used to generate optical lattices. The experimental results are quite consistent with the simulation results.

Key words: optoelectronics; photonic crystal; interference; optical lattice; pyramid lens; optical tweezers

1 引 言

光子晶体是一种高折射率衬比度材料形成的二维或三维空间周期为波长量级的周期性微结构, 它可以产生特定的光子禁带, 当光在其中传播时会产生许多奇特的现象^[1,2], 因而在光波导、光存储、光通信等领域有着十分诱人的应用前景。制作可见光到近红外波段的光子晶体是目前的一个重点研究方

向, 制备方法有很多, 如半导体光刻技术、离子束刻蚀、化学刻蚀、激光微加工等^[3,4], 但这些方法都需要昂贵的设备。激光由于具有很好的相干性, 用多束激光干涉产生的光强周期点阵分布具有很高的有序度, 而且通过改变激光的光束数、传播方向和偏振态, 可以产生各种各样的一维、二维和三维光强分布的周期格阵^[5]。激光空间干涉光场形成的这种光强

* 国家自然科学基金(60337020, 60278026)资助课题。

作者简介: 雷 铭(1978~), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事激光微操作系统的研究。E-mail: leiming@opt.ac.cn

** 通信联系人。E-mail: yaobl@opt.ac.cn

收稿日期: 2005-06-17; 收到修改稿日期: 2005-10-20

周期分布格阵被称为光学格子(Optical lattice)。这种方法制作光子晶体或光学微结构器件具有设备简单,可一步成型等优点,近年来受到人们的重视。1997年,V. Berger等^[6]用平面上三个互为 60° 夹角的光栅对入射激光衍射形成三束平面波干涉,在GaAs中制作了二维六角型周期结构。2001年和2003年,Kondo小组使用飞秒激光及衍射分束器(DBS)产生四束光干涉,在SU8光刻胶材料上分别利用单光子和双光子吸收效应成功地制备出二维及三维亚微米周期晶格结构^[7]。中国科学院物理所程丙英等^[8~10]在国内率先使用激光空间干涉的办法模拟产生晶格图案,并对其进行了机理分析和计算机模拟。山东大学蔡履中等^[11]证明了四个非共面光束干涉可以形成所有14种布拉维(Bravais)点阵,并进行了理论及实验研究。中山大学苏慧敏等^[12]对激光偏振态对干涉图案衬比度的影响进行了理论分析,并使用氩离子激光在SU8光刻胶材料上制作了三维面心立方结构。四川大学和中科院光电技术研究所的张锦等^[13]也利用这一方法进行了大面积周期性图形光刻技术的研究。由于在实验中从一束激光中分出多束等光强的光束并调节使其发生干涉需要精密的光路调节与稳定的实验平台,所以大多数研究限于3~6束光的干涉。衍射分束器虽然可以得到多光束,但由于其透射率不高以及加工较困难,激光功率会损失很多且激光模式也会变差,其制作成本也相对较高。

本文提出了一种使用多棱锥镜或多棱台镜产生多光束的方法。光束的夹角由棱锥(棱台)的底角决定,光束的数目由棱数决定。棱锥或棱台由普通的光学玻璃制成,透射率可接近100%,具有使用简单,制作成本低,易于集成,稳定性好,透射率高,损伤阈值高等优点,可用于各种脉冲或连续的激光器。理论分析和数值模拟了多束轴对称平面波干涉产生的二维及三维点阵结构的特性,并与实验结果进行了比较,二者完全符合。得到了光场分布随光束数增加的关系,发现随着干涉光数目的增加,干涉场会复杂变化,当棱锥棱数足够多近似于一个圆锥时,干涉场会变为同心圆结构的贝塞尔光束的场分布^[14]。棱锥(棱台)镜产生的光点阵列及圆锥镜产生的贝塞尔光束不仅可用于光子晶体的制造,并且在生物医学领域的研究中可以用来产生多光束光镊,同时捕获和操作多个微小粒子,扩展了普通单光束光镊的用途^[15~17]。而且由于其体积小易于集成等优点,也可以用于细胞分选和生物芯片技术的研究^[17~19]。

2 多光束干涉理论

多束平面波在空间相干叠加会产生二维或三维的空间光点阵列分布。当各光束之间的夹角较小时($\theta < 10^\circ$),可以近似认为各光束的偏振态都相同。如果光束之间的夹角不满足小角度情况,则计算时必须考虑到各光束的偏振态关系对干涉光场衬比度的影响^[12]。为了简化计算,这里只考虑各束平面波偏振方向相同的情况,此时可以用标量波来处理。设第 j 束平面波的复振幅为

$$E_j(\mathbf{r}) = E_j \exp(i\mathbf{K}_j \cdot \mathbf{r} + i\delta_j), \quad (1)$$

其中 E_j 为电场强度振幅, \mathbf{r} 为位矢, \mathbf{K}_j 为波矢, δ_j 为初相位。设 θ_j 和 ϕ_j 分别表示 \mathbf{K}_j 与 z 轴夹角及其在 xy 平面内投影与 x 轴的夹角, λ 为波长,则

$$\mathbf{K}_j = \frac{2\pi}{\lambda} [\sin \theta_j \cos \phi_j, \sin \theta_j \sin \phi_j, \cos \theta_j]. \quad (2)$$

设有 m 束沿 z 轴对称分布的平面波干涉,此时各束平面波的波矢与 z 轴夹角都相同(即 $\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_m = \theta$),各束平面波波矢在 xy 平面的投影将 360° 圆周均分(即 $\phi_j = 360^\circ(j-1)/m, j = 1 \dots m$)。所以各波矢的 z 向分量都相同,干涉场沿 z 轴方向没有变化,干涉场只在 xy 平面上形成二维周期性分布。干涉后的电场强度复振幅为

$$E_{\text{tot}}(\mathbf{r}) = E_1 + E_2 + \dots + E_m, \quad (3)$$

光强分布为

$$I(\mathbf{r}) = |E_{\text{tot}}|^2 = E_{\text{tot}} \cdot E_{\text{tot}}^*. \quad (4)$$

如果再引入一束沿 z 轴传播的平面波 K_{m+1} :

$$E_{m+1}(\mathbf{r}) = E_{m+1} \exp(i\mathbf{K}_{m+1} \cdot \mathbf{r} + i\delta_{m+1}), \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{m+1} = \frac{2\pi}{\lambda} [0, 0, 1], \quad (6)$$

由于第 $m+1$ 束光沿 z 轴传播,其 z 轴波矢分量与其他 m 束 z 轴波矢分量不同,所以此时干涉场除了在 xy 平面上形成周期性分布外,沿 z 轴方向也会有周期性变化,此时这 $m+1$ 束光干涉会在空间形成三维光学格子。 $m+1$ 束光干涉后的光强分布为

$$I(\mathbf{r}) = |E_1 + E_2 + \dots + E_m + E_{m+1}|^2. \quad (7)$$

3 多棱锥(棱台)镜产生多光束干涉方法

如前所述,产生多束平面波干涉有多种方法,如反射镜分束镜组合光路分束,多光栅分束,衍射分束器分束,这里提出了采用多棱锥镜和多棱台镜的实验方案,可以产生轴对称多束平面波干涉。以正四棱锥镜为例,如图1(a)所示,激光束经扩束准直后正入射棱锥的底面,在四个锥面上入射光被折射,形成四束与光轴夹角相同的对称分布平面波,并且它

们的振幅和初相位也都相同。在棱锥的后面,它们有一段相交的区域,在此形成干涉区,使用配有显微镜的 CCD 可以直接观察和记录其光场强度分布的情况。为了产生 $m+1$ 束光,将棱锥的顶部磨平抛光,使其可以直接透射一部分入射光形成第 $m+1$ 束光,如图 1(b)所示。

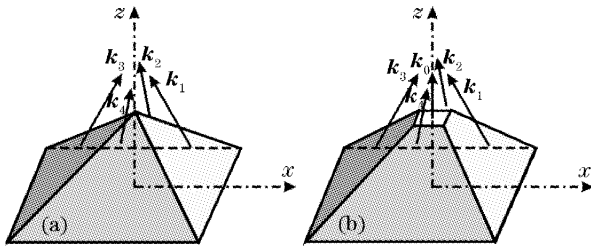


图 1 多棱锥镜(a)和多棱台镜(b)形成多光束干涉示意图[以四棱锥(棱台)为例]

Fig. 1 Multi-beam interference by using the pyramid lens (a) and the top-chopped pyramid lens (b) (take the four-arris pyramid lens and top-chopped pyramid lens as examples)

下面分析一下干涉光场的性质。如图 2 所示,半径为 w_0 的平行光束垂直对称入射底角为 γ 的棱锥(棱台),光束传播方向定义为 z 轴,纸面上垂直于 z 轴方向定义为 x 轴。入射光束经棱锥(棱台)折射分束后会在图示的阴影区内发生干涉,形成沿 z 轴方向没有变化的二维周期性图案(棱锥情况),或沿 z 轴也有周期性变化的三维周期性图案(棱台情况)。二维和三维干涉图案可由(1)式~(7)式进行数值计算。干涉区在 z 轴方向的长度为

$$Z_{\max} = w_0 / \tan \theta, \quad (8)$$

其中 θ 为折射光束 E_1 (或 E_2) 与 z 轴的夹角。为了得到较长的干涉区域,棱锥的底角通常加工得很小,此时有近似关系:

$$\theta \approx (n-1)\gamma, \quad (9)$$

其中 n 为锥镜的折射率。对于棱台产生的 $m+1$ 束光束,在 z 方向形成的光强调制周期为

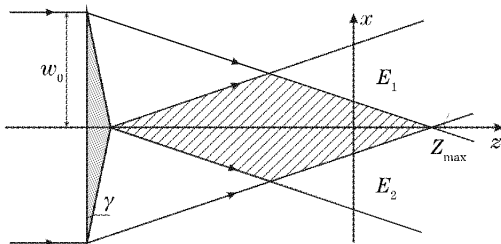


图 2 平行光通过棱锥镜的平面几何光路示意图

Fig. 2 Plane geometrical scheme of a collimated beam passing through a pyramid lens

$$d_z = \frac{\lambda}{1 - \cos \theta} \approx \frac{2\lambda}{[(n-1)\gamma]^2}. \quad (10)$$

要得到更多光束的干涉,可以增加棱锥的棱数,当棱锥的棱数足够多时,棱锥就会变为圆锥。光束入射圆锥镜会在其后产生类似于贝塞尔函数的光场强度分布,大多数基于此现象的推导都是基于菲涅耳衍射积分^[15,16]。本文使用的多光束干涉的方法也可以模拟出圆锥镜产生的光场强度分布,与理想贝塞尔函数吻合得非常好。

4 数值模拟结果与实验结果对比

根据(1)式~(7)式,用 MATLAB 软件编程,计算了不同束平面波干涉形成的二维和三维光场强度分布图案,并与三棱锥(棱台)镜、四棱锥(棱台)镜、圆锥镜的实验结果进行了比较,理论计算与实验结果完全吻合。计算中用到的参量是: $\lambda = 633 \text{ nm}$, $\theta = 2.5^\circ$, $\phi_j = 360^\circ \cdot (j-1)/m$, $E_j = 1$, $\delta_j = 0$, ($j = 1, \dots, m$)。图 3 计算的是 4 束平面波干涉产生的沿 z 轴不变的光场强度分布情况。随着干涉光束数目的增加,干涉光场的分布发生变化,但都具有图 3 所示的沿 z 轴不变的柱状特性。图 4 给出了随干涉光束数目增加,干涉场光强在 xy 平面的二维分布情况。

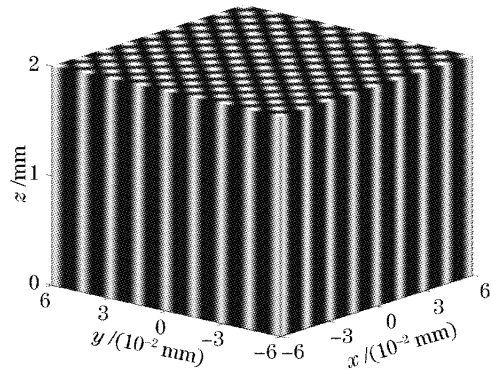


图 3 数值模拟 4 束平面波干涉产生的沿 z 轴不变的光场强度分布三维图

Fig. 3 3D simulation of cylindrical intensity distribution along z -axis interfered by four plane waves

可以看出,随着平面波数目的增加,干涉图案逐渐演变成一个同心圆结构的图案。当 m 足够大时,可以认为多棱锥变成了圆锥,平行光通过圆锥镜会产生如图 5(a)所示的零阶贝塞尔光强分布。我们计算了 $m=40$ 时的干涉图案,如图 5(b)所示,这与零阶贝塞尔光束非常相近。为了证实这一点,我们用零阶贝塞尔函数去拟合图 5(b)干涉图强度的径向分布,结果如图 5(c)所示,证明 $m=40$ 产生的干涉图案已完

全变为零阶贝塞尔光束。贝塞尔光束具有在光束传播方向保持光束直径不变的特性,可以克服高斯光束

瑞利极限的限制,因而近年来在微粒的三维捕获方面得到了应用,拓展了光镊的应用范围^[15,16]。

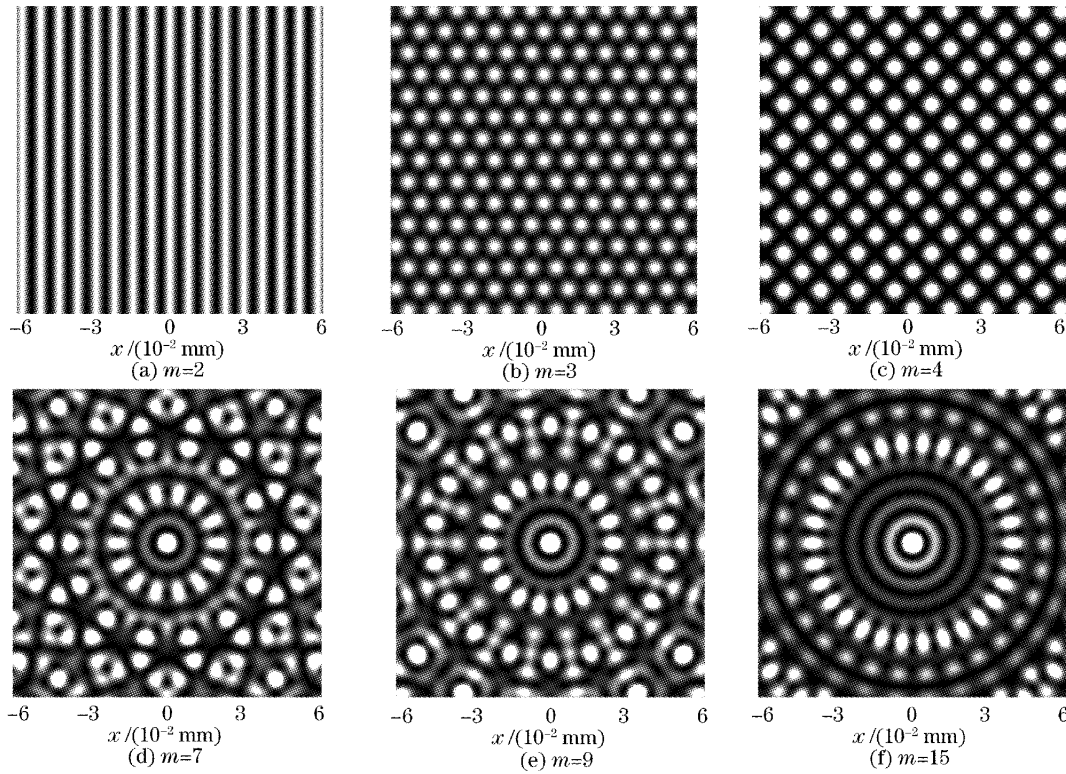


图 4 不同束沿 z 轴对称分布平面波干涉形成的 xy 平面光强分布图案。λ=633 nm,θ=2.5°

Fig. 4 Simulations of 2D patterns in xy plane by interference of m plane waves (θ=633 nm,θ=2.5°)

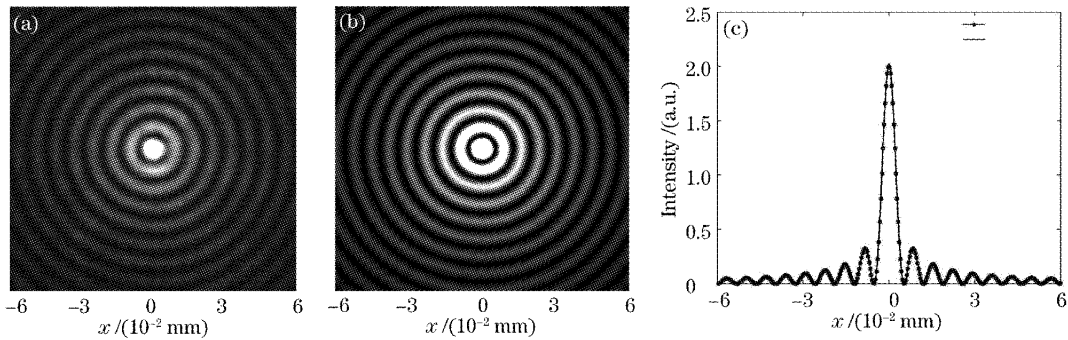


图 5 圆锥镜产生的零阶贝塞尔光强分布与 m=40 形成的干涉光场强度分布比较。(a)实验使用圆锥镜产生的零阶贝塞尔光强分布;(b)多光束(m=40)干涉形成的光强分布;(c)用零阶贝塞尔函数拟合多光束干涉光强径向分布曲线

Fig. 5 Comparison of beam patterns between zero-order Bessel beam formed by an axicon (a) and the simulation of interference of 40 plane waves (b), (c) fitting the radial intensity profile of pattern (b) with zero-order Bessel function

对于 m+1 束沿 z 轴对称分布平面波干涉的情况,通过计算模拟同样可以得到其在空间形成的三维光学格子结构,如图 6 所示,计算参量与图 4 相同。

从(10)式可以看出,三维点阵在 z 方向的周期与棱锥镜底角的平方成反比,xy 平面点阵周期也与棱锥底角有关,棱锥底角越大,形成的光格周期越

小,但干涉区域也越小。实验用的棱锥(棱台)镜底角有两种,即 γ=2°和 5°,棱锥镜折射率 n=1.5,激光波长 λ=633 nm(氦氖激光)。图 7(a)是使用 γ=2°的四棱锥镜产生的光点阵列,用配接(10×)显微镜 CCD 拍摄得到的照片,x 方向点间距测量值为 33 μm;图 7(b)是使用相应参量计算模拟产生的点阵,计算得到 x 方向的点间距为 36 μm。还使用了

$\gamma=5^\circ$ 的三棱锥镜产生图 4(b)所示的光点阵列,用配接(25 \times)显微物镜 CCD 拍摄,测量 x 方向点间距

为 $9.5 \mu\text{m}$; 计算模拟点阵的 x 方向点间距为 $9.7 \mu\text{m}$, 实验结果与计算符合得很好。

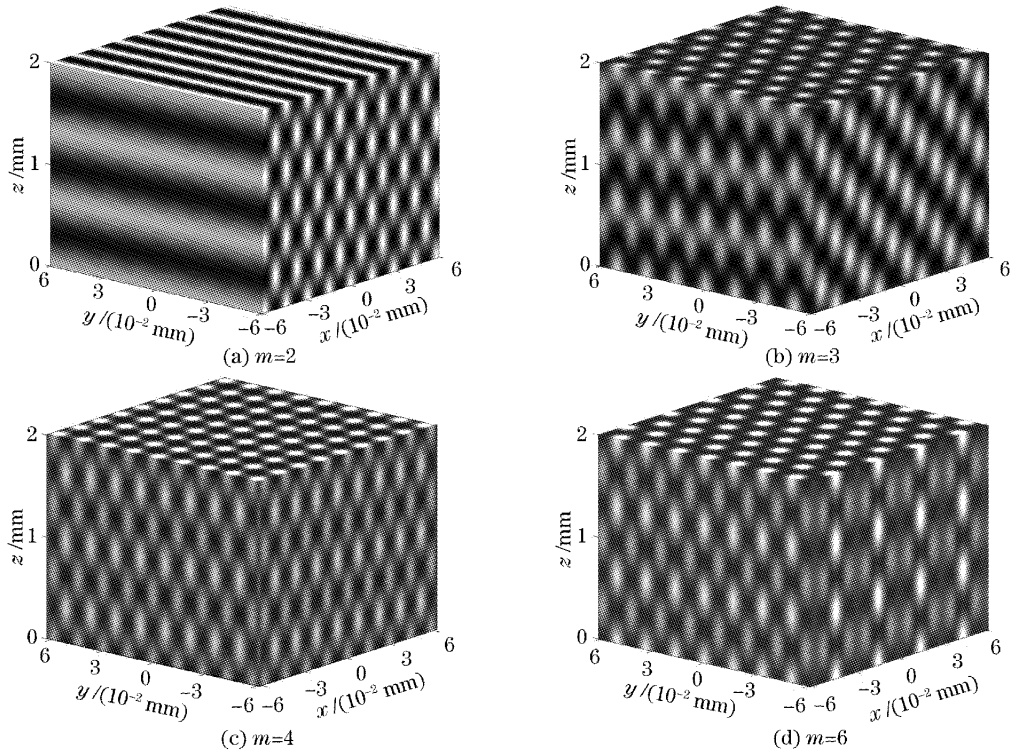


图 6 $m+1$ 束沿 z 轴对称分布平面波干涉形成的光强点阵三维分布图。 $\lambda=633 \text{ nm}, \theta=2.5^\circ$
Fig. 6 3D simulations of intensity distribution interfered by $m+1$ plane waves with z -axis symmetrical distribution ($\lambda=633 \text{ nm}, \theta=2.5^\circ$)

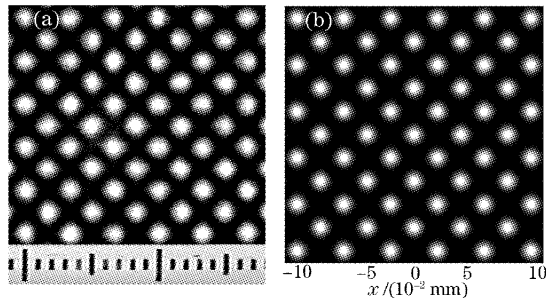


图 7 实验用四棱锥镜产生的光点阵列与理论计算结果的比较。(a) $\gamma=2^\circ$ 的四棱锥镜产生的光点阵列,10 \times 物镜拍摄,图中刻度尺为 $10 \mu\text{m}/\text{div}$; (b)计算模拟产生的点阵结构 $\theta=1^\circ, m=4$

Fig. 7 Comparison of optical lattices between experimental result and theoretical simulation by use of four-arris pyramid lens. (a) Optical lattice formed by four-arris pyramid lens with $\gamma = 2^\circ$ (screened by $10 \times$ objective), the scale in the figures is $10 \mu\text{m}/\text{div}$; (b) simulated lattice corresponding to (a), $\theta=1^\circ, m=4$

实验中还使用了 $\gamma=5^\circ$ 的三棱台镜和 $\gamma=2^\circ$ 的四棱台镜,分别得到了如图 6(b)和图 6(c)所示的三维光场分布,通过在 z 轴方向移动 CCD,可以清楚

地看到 xy 平面内的光点阵列周期性变化,实验拍摄到的光点阵列结构及 xyz 方向的周期与计算结果完全吻合。由于实验观察三维光场分布需扫描 z 轴,这里无法用图片表示三维结构,故从略。

5 结 论

计算模拟了多束轴对称平面相干光束的干涉,得到了不同束数光束干涉产生的二维及三维点阵图案。提出了一种使用多棱锥(棱台)镜产生多光束的方法,该方法具有使用简单,制作成本低,易于集成,稳定性好,透射率高等优点。使用棱锥镜产生的光场强度分布具有沿光束传播方向二维点阵不变的特性,可用于制作阵列光波导等光学微结构;使用棱台镜则可以产生沿光束传播方向也周期变化的三维光场分布。使用底角大的棱锥(棱台)和短波长的激光光源,可以得到格子周期为亚微米的光点阵列,不仅可用于光子晶体的制造,还可以利用光场中各极值点的光学梯度力产生多光束光镊用来并行地捕获和排布多个微小粒子,也可以用于细胞分选以及生物芯片技术的研究。

参 考 文 献

- 1 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, K. M. Leung. Photonic band structure; the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(17): 2295~2298
- 4 Shi-Yao Zhu, Yaping Yang, Hong Chen *et al.*. Spontaneous radiation and lamb shift in three-dimensional photonic crystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(10): 2136~2139
- 5 Michapl J. Escuti, Gregory P. Crawford. Holographic photonic crystals[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(9): 1973~1987
- 6 V. Berger, O. Gauthier-Lafaye, E. Costard. Photonic band gaps and holography[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(1): 60~64
- 7 Toshiaki Kondo, Shigeki Matsuo, Saulius Juodkazis *et al.*. Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(6): 725~727
- 8 Cheng Bingying, Zhang Yi, Mei Dongbin *et al.*. The creation of Bravais lattices by multiple laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6): 797~800 (in Chinese)
程丙英,张毅,梅东滨等. 用多光束干涉模拟晶格图案[J]. *光学学报*, 1996, **16**(6): 797~800
- 9 Lin Wei, Cheng Bingying, Mei Dongbin *et al.*. Formation of ordered 3D distribution of light intensity; from structure to orientation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1665~1670 (in Chinese)
林巍,程丙英,梅东滨等. 三维光强有序分布的获得;从结构导出相干光的配置[J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1665~1670
- 10 Wei Hu, Hongqiang Li, Bingying Cheng *et al.*. Planar optical lattice of TiO₂ particles[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 964~966
- 11 L. Z. Cai, X. L. Yang, Y. R. Wang. All fourteen Bravais lattices can be formed by interference of four noncoplanar beams [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(11): 900~902
- 12 Su Huimin, Zheng Xiguang, Wang Xia *et al.*. Computer simulation of the effect of polarization on the laser holography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(5): 1044~1048 (in Chinese)
苏慧敏,郑锡光,王霞等. 计算机模拟偏振对激光全息的影响 [J]. *物理学报*, 2002, **51**(5): 1044~1048
- 13 Zhang Jin, Feng Boru, Guo Yongkang *et al.*. Laser interference photolithography for fabricating periodic patterns in large area [J]. *Opto-Elec. Engng.*, 2001, **28**(6): 20~23 (in Chinese)
张锦,冯伯儒,郭永康等. 用于大面积周期性图形制造的激光干涉光刻[J]. *光电工程*, 2001, **28**(6): 20~23
- 14 R. M. Herman, T. A. Wiggins. Production and uses of diffractionless beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**(6): 932~942
- 15 V. Garces-Chavez, D. McGloin, H. Melville *et al.*. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam [J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 145~147
- 16 D. McGloin, V. Garces-Chavez, K. Dholakia. Interfering Bessel beams for optical micromanipulation[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(8): 657~659
- 17 M. P. MacDonald, G. C. Spalding, K. Dholakia. Microfluidic sorting in an optical lattice [J]. *Nature*, 2003, **426**(6965): 421~424
- 18 Ming Lei, Baoli Yao. Characteristics of beam profile of Gaussian beam passing through an axicon[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**: 367~372
- 19 Xing Qirong, Mao Fanglin, Lang Liying *et al.*. The experimental study of optical micro-manipulation of cells using femtosecond laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 728
邢岐荣,毛方林,郎利影等. 飞秒激光细胞显微操作系统的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 728