

文章编号: 0253-2239(2008)12-2250-05

衍射轴棱锥产生光学点阵的理论和实验

吴逢铁 江新光

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 提出一种利用衍射轴棱锥产生三维光格的方法。由广义的惠更斯-菲涅耳衍射积分理论出发, 分析准直单色平面光波大角度斜入射轴棱锥形成的光学点阵的特性。数值模拟光束在不同入射角入射轴棱锥情况下, 随轴向距离变化的纵向光强分布以及同一轴向距离处的横向光强分布光斑图。结果指出, 随着入射轴棱锥角度的增大, 在最大无衍射距离内会形成有规则的光学点阵, 这种光学点阵与三维光子晶体的结构相近, 实验结果与数值模拟相吻合。

关键词 衍射; 贝塞尔光; 光子晶体; 光学点阵

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082812.2250

Experiments and Theory of Facular Lattice Generated by Diffractive Axicon

Wu Fengtie Jiang Xinguang

(College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract A method of producing three-dimensional facular lattice through a diffractive axicon was proposed. Based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral theory, the characteristics of the facular lattice generated by a collimated monochromatic plane wave obliquely illuminated on a diffractive axicon with a large incident angle were analyzed. With different incident angles, the optical intensity distribution along the propagation direction and the diffractive optical intensity in a certain axis distance were numerically simulated. The results indicate that a regular diffractive facular lattice will appear in the maximum diffraction-free distance with the increase of the oblique incident angle. The structures of the facular lattice resemble that of the three-dimensional photonic crystal. The experimental result agrees with the numerical simulation.

Key words diffraction; Bessel beam; photonic crystal; facular lattice

1 引 言

1987 年 J. Durnin 提出无衍射贝塞尔 (Bessel) 光^[1], 这种光束可以不受衍射限制, 在很长一段距离内保持无衍射传输特性。正因为它的这种特性, 近年来有关贝塞尔光的研究及其应用倍受关注^[2]。近似无衍射贝塞尔光的产生有多种方法, 其中利用轴棱锥系统产生贝塞尔光束的方法具有装置简单、转换效率高和损伤阈值高等显著优点^[3~6], 轴棱锥的相关特性及对光束的传输变换也得到深入的研究^[7~9]。虽然轴棱锥的斜入射衍射特性已有文章报

道^[10,11], 但涉及的是小角度斜入射。而分析可知, 如果增大斜入射的角度, 中心光斑会分裂成一系列有规则的光学点阵, 这些光学点阵的中心分布情况跟三维光子晶格的分布相近。光子晶体^[12,13]的光子禁带和光子局域两个重要特性应用十分广泛, 因此吸引了很多研究人员去寻找和优化各种用于制造光子晶体的方法和途径, 其中利用激光干涉法形成的光学格子用于制造光子晶体最近也倍受关注^[14]。本文主要研究单色平面光波大角度斜入射轴棱锥衍射形成规则的衍射光学点阵, 分析了轴棱锥的不同

收稿日期: 2008-04-02; 收到修改稿日期: 2008-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(60477041)和福建省自然科学基金(A0710011, A0410017)

作者简介: 吴逢铁(1958-), 男, 博士, 教授, 主要从事光束传输与变换及非线性光学等方面的研究。

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn

参量以及入射角度的变化对形成的光学点阵的影响。这种因为衍射形成的规则的光学点阵与三维光子晶体的结构相似,期望在光子晶体的制造方面有潜在的应用,因此有必要对轴棱锥大角度斜入射衍射形成的光学点阵的特性进行深入研究。

2 理论分析

光束斜入射经过轴棱锥(其衍射光路图如图 1 所示),利用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分理论可以计算轴棱锥后 z 处的光场 $E(x, y, z)$ 分布。

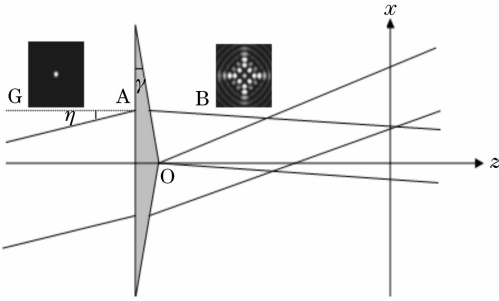


图 1 光束斜入射轴棱锥的衍射光路示意图

Fig. 1 Light diffraction obter an axicon in oblique illumination

设轴棱锥的底角(锥面和平面间的夹角)为 γ ,已知轴棱锥的振幅透过率

$$t(\rho) = \begin{cases} \exp[-ik(n-1)\gamma\rho], & (\rho \leq R) \\ 0, & (\rho > R) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波矢, λ 为入射光波长, n 是轴棱锥的折射率, γ 是轴棱锥底角, R 是入射光斑半径。考虑入射光为单色平面波,光束斜入射角为 η ,则入射光场可以表示为

$$\begin{aligned} E'(\rho) &= \exp(ik\rho\cos\varphi\sin\eta)t(\rho) \\ &= \exp(ik\rho\cos\varphi\sin\eta)\exp[-ik(n-1)\gamma\rho]. \end{aligned} \quad (2)$$

当入射角 η 很小,利用菲涅耳近似可求得光束通过轴棱锥后的衍射光场分布,当 η 增大时,光场分布会发生很大变化,这时利用基尔霍夫衍射积分理论可以求得经过轴棱锥后 z 处的光场:

$$\begin{aligned} E_z(r, \phi, z) &= \frac{\exp[ik(z + \frac{r^2}{2z} - \frac{r^4}{8z^3})]}{iz\lambda} \times \\ &\int_0^{2\pi} \exp[ik(\frac{\rho^2}{2z} - \frac{\rho^2 r^2}{2z^3}) - ik(n-1)\rho\gamma] \times \\ &H(\rho, r, \phi, z)\rho d\rho \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中 } H(\rho, r, \phi, z) = \int_0^{2\pi} \exp(ik\rho) [\rho\sin\eta\cos\varphi - \frac{\rho}{z}(1 - \frac{\rho^2 + r^2}{2z^2})\cos(\varphi - \phi) - \frac{\rho^2 r^2}{4z^3}\cos(2\varphi - 2\phi)] d\varphi \quad (4)$$

从(3)式可以看出,畸变衍射光场分布主要由(4)式 $H(\rho, r, \phi, z)$ 决定,对(4)式进行化简表示成:

$$H(\rho, r, \phi, z) = \int_0^{2\pi} \exp[-ik(\frac{\rho}{z})r'\cos(\varphi' - \phi') - ik(\frac{\rho^2 r^2}{4z^3})\cos(2\varphi')] d\varphi', \quad (5)$$

这里:

$$r' = \sqrt{(r - z\sin\eta\cos\phi)^2 + (z\sin\eta\sin\phi)^2}, \quad \phi' = \arctan(\frac{z\sin\eta\sin\phi}{r - z\sin\eta\cos\phi}).$$

利用稳相法可以化简(3)式的外围积分式,同时得到相应的 $H(\rho_p, r, \phi, z)$ 表达式,其中 ρ_p 是由(3)式确定的稳相点:

$$\rho_p = \frac{(n-1)\gamma}{(1/z - r^2/z^3)} \approx (n-1)\gamma z, \quad (6)$$

而斜入射导致的畸变无衍射光的性质也主要是由 $H(\rho_p, r, \phi, z)$ 决定的。把(6)式代入到(5)式中,得到

$$H(\rho_p, r, \phi, z) \approx \int_0^{2\pi} \exp[-iU\cos(\varphi' - \phi') - iN\cos 2\varphi'] d\varphi', \quad (7)$$

其中 $U = k(n-1)\gamma r'$, $N = kz(n-1)^2 \gamma^2 \sin^2 \eta/4$ 。

根据公式(7)分析轴棱锥斜入射产生的畸变无衍射光的光斑性质。对同一斜入射角 η 来说,不同 z 处的光斑分布是不同的, z 越大,光斑分裂越明显;

而在同一 z 处,随着 η 的增大分裂也增大;并且分裂是对称地从近似无衍射光的内环向外分裂;中心强度随着分裂的程度会发生变化,而没有分裂的外环

仍保持近似无衍射光的分布特性。

3 数值模拟

利用 MathCAD 软件,根据(7)式对光束大角度

斜入射轴棱锥产生的畸变无衍射光进行数值模拟分析。模拟参量选择 $\eta = 40^\circ$, $\gamma = 0.5^\circ$, $n = 1.5$, $k = 2\pi/(632.8 \times 10^{-9})$, 图 2 模拟的是不同距离 z 处,横截面光强的平面及其对应立体分布图。

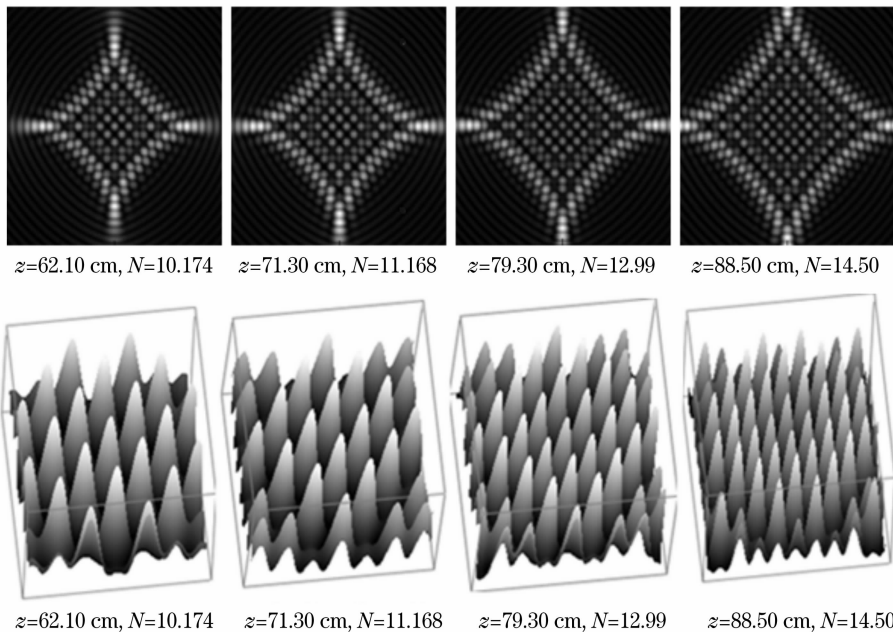


图 2 不同轴向距离 z 处的光强模拟图

Fig. 2 Numerical simulation of the optical intensity distribution at different propagation distance z

表达式 $N = kz(n-1)^2\gamma^2(\sin^2\eta/4)$ 指出, N 值随着变量 z , γ 和 η (角度小于 $\pi/2$) 的增加而增大,因此可以直接选择不同的 N 来模拟横向光斑图。从图 2 可以明显看出,随着 N 的增大,衍射光斑会发生明显的变化。以上模拟中 N 的变化是由 z 参量的增加引起的,随着 z 的增加,中心光斑形成的 3×3 规则的光

学点阵逐渐增大到 6×6 的情况,中心点周期性地消失接着又重现,形成规则的三维周期结构。

为了更好地了解大角度入射情况下,轴棱锥光强分布变化的情况,模拟光强随 z 变化的纵向剖面光强分布图。下面模拟了 $\gamma = 0.5^\circ$, 斜入射角 η 分别为 $0^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 和 40° 对应的纵向剖面光强分布图

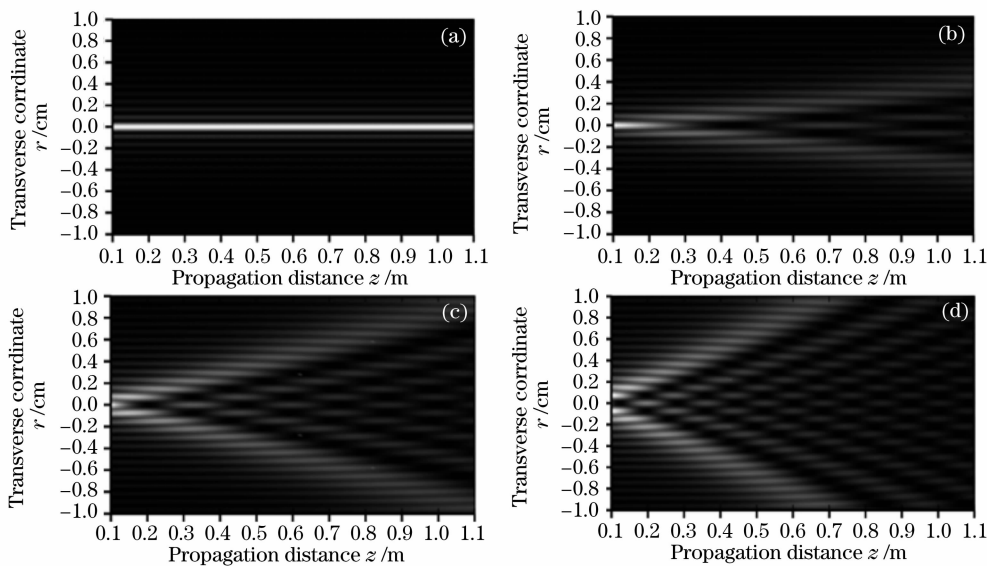


图 3 随 η 变化的纵向光强模拟分布图。(a) 0° ; (b) 20° ; (c) 30° ; (d) 40°

Fig. 3 Numerical simulation of the longitudinal optical intensity with η . (a) 0° ; (b) 20° ; (c) 30° ; (d) 40°

(如图 3 所示)。

从纵向剖面光强分布图(图 3)可以清楚地看到,随着斜入射角的增加,衍射光斑分裂程度明显增大。当入射角为 0° 时,衍射光为标准零阶 Bessel 光分布。当入射角为 20° 的时候,中心光斑在 110 cm 内只有中心少数光环发生分裂,形成的光学点阵不是很明显;但是入射角增大到 30° 的时候,就可以看到很有规则的光学点阵,光斑分裂的单个小光点周期性地消失又重现,总体来看光学点阵随着轴向传播并向外扩散分裂;随着入射角的进一步增大,从图 3 可以清楚地看到它的分布变化规律。当入射角增大到 40° 的时候,可以看到中心区域的传播分裂与激光干涉法形成的三维晶格结果基本一样。并且可以明显看到随着参量的改变,光学点阵的单个光斑点的尺寸是有改变的,也就是说可以通过改变 N 表达式中的参量如传输距离 z ,轴棱锥底角 γ 以及入射光角度 η 来控制光斑点的尺度,因此如果应用到三维光子晶体的制造中,晶格常数是可以设置参量而改变的,从而也增加该方法应用于光子晶体制作的可能性。

4 实验结果

如图 4 所示,采用 3 mW He-Ne 激光(波长 632.8 nm)作为光源,输出的光束经透镜 $f_1 = 15\text{ mm}$ 和 $f_2 = 45\text{ mm}$ 扩束准直后入射到底角 $\gamma = 0.5^\circ$ 的石英轴棱锥(其折射率 $n = 1.5$)上,而轴

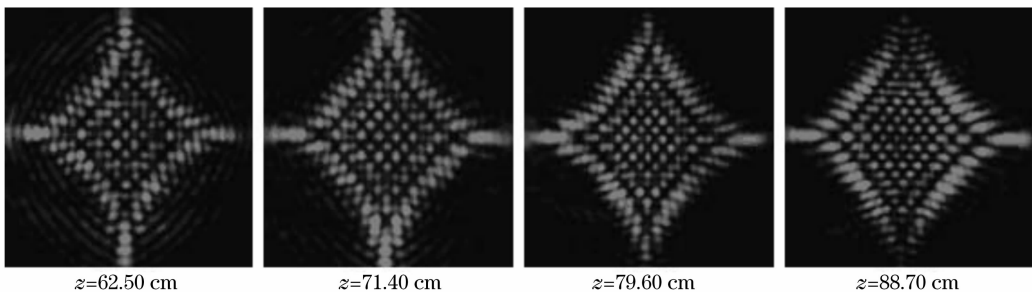


图 5 实验拍摄的不同距离处的横向光强分布图

Fig. 5 Transverse optical intensity profile at different propagation distance captured in experiment

5 结 论

提出了一种利用轴棱锥的衍射特性产生周期光学点阵的方法,理论分析、数值模拟和实验结果证明了方法的可行性和可靠性。这种衍射形成的规则的光学点阵与激光干涉法形成的周期光格结构非常相似。利用激光制造三维光子晶体简单、快捷,且能够在一次激光发射过程中获得高周期、大尺寸结构的

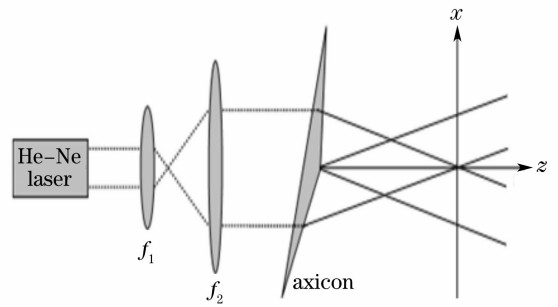


图 4 轴棱锥衍射形成光学点阵的实验装置图

Fig. 4 Experimental installation of the facular lattice generation by a diffractive axicon

棱锥镜架固定在精密旋转台上(旋转台的技术指标:最小刻划 1° ,最小读数 $2'$),调整轴棱锥与入射光的角度使得光束先垂直入射,用来准直入射光;再通过旋转调整入射光与轴棱锥的角度就可以拍摄到不同斜入射角对应的光斑图。出射光投影到旋转屏上,使用具有 40 倍放大功能的 CCD 体视显微镜,调整可变衰减,可拍摄到不同斜入射角对应的衍射光斑图。图 5 是斜入射角 $\eta = 40^\circ$,距轴棱锥顶点不同距离 z 处拍摄的光斑图。

实验中要得到规则且均匀的衍射光学点阵,对入射光束质量和轴棱锥加工的要求非常高,实际加工理想轴棱锥困难比较大,轴棱锥微小加工误差都会对衍射光斑产生很大影响^[11,15]。因此在实验误差允许的情况下,实验结果与理论模拟基本相吻合,这也从实验上证明了该方法的可行性。

光子晶体。本文的研究对今后应用该方法制造光子晶体提供了一定的指导作用和理论依据,同时这种衍射光束可以作为多光束光镊应用于多微粒操控。

参 考 文 献

- 1 J. Durnin. Exact solutions for nondiffracting beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(4):651~654
- 2 D. McGloin, K. Dholakia. Bessel beams: diffraction in a new

- light [J]. *Contemporary Physics*, 2005, **46**(1):15~28
- 3 J. H. McLeod. The axicon: a new type of optical element [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1954, **44**(8):592~597
 - 4 G. Scott, N. McArdle. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon[J]. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(12):2640~2643
 - 5 M. de Angelies, L. Cacciapuoti, G. pierattini *et al.*. Axisly symmetric hollow beams using refractive conical lenses [J]. *Opt. & Laser Eng.*, 2003, **39**(3):283~291
 - 6 Wu Fengtie, Chen Yunbin, Guo Dongdong. Nanosecond pulsed Bessel - Gauss beam generated directly from a Nd:YAG axicon-based resonator [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22):4943~4946
 - 7 Zeng Xiahui, Wu Fengtie, Liu Lan. The description of bottle beam based on the interferential theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2):791~797(in Chinese)
曾夏辉,吴逢铁,刘 岚. 干涉理论对 bottle beam 的描述[J]物理学报,2007,56(2):791~797
 - 8 Marcelino Anguiano Morales, Amalia Martl' nez, M. David Iturbe-Castillo *et al.*. Different field distributions obtained with an axicon and an amplitude mask [J]. *Opt. commun.*, 2008, **281**(2):401~407
 - 9 Liu Lan, Wu Fengtie. Description of bottle beam and reconstruction of bessel beam based on diffraction integral theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):370~374(in Chinese)
刘 岚, 吴逢铁. 衍射理论对局域空心光束及无衍射光束重建的描述[J]. 光学学报, 2008, **28**(2):370~374
 - 10 Zhao Bin, Li Zhu. Diffraction property of an axicon in oblique illumination[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(13):2563~2566
 - 11 Jiang Xinguang, Wu Fengtie, Liu Bin. Modification of the aberration nondiffraction beams in the manufacture error of an elliptical axicon[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(11):1538~1542 (in Chinese)
江新光, 吴逢铁, 刘 彬. 轴棱锥椭圆加工误差产生畸变无衍射光的修正[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1538~1542
 - 12 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
 - 13 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
 - 14 Liu Huan, Yao Jianquan, Li Enbang. Simulated calculation and analysis of the forbidden band for fabricating two- and three-dimensional photonic crystal structures using holographic lithography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(5): 2286~2292 (in chinese)
刘 欢, 姚建铨, 李恩邦. 激光全息法制作二、三维光子晶体得模拟计算及禁带分析[J]. 物理学报, 2006, **55**(5):2286~2292
 - 15 Zeng Xiahui, Wu Fengtie. Influence of manufacture error with non-circular symmetry in an axicon on the bessel beams quality [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6):809~813(in Chinese)
曾夏辉, 吴逢铁. 轴棱锥非圆对称加工误差对贝塞耳光束质量的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(6): 809~813