

基于多光束干涉技术计算机模拟研究手性螺旋结构

牛东杰^{1,2} 吕浩¹ 张清悦^{1,2} 赵秋玲¹ 王霞¹

(¹青岛科技大学数理学院光电科学与技术研究所, 山东 青岛 266061)
²青岛科技大学材料科学与工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要 根据多光束相互干涉理论, 计算模拟了手性螺旋结构以及相关影响因素。模拟结果表明相干光束之间的夹角、偏振态、偏振方向以及光束相位差等参数, 对于干涉形成的三维螺旋结构均有不同的显著影响。研究结果为螺旋结构的实验制备提供了理论指导, 可促进手性超材料的研究及应用。

关键词 物理光学; 多光束干涉; 手性; 螺旋结构; 计算机模拟

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s209011

Study of Computer Simulation on Chiral Spiral Structure Based on Multi-Beam Interference Lithography

Niu Dongjie^{1,2} Lü Hao¹ Zhang Qingyue^{1,2} Zhao Qiuling¹ Wang Xia¹

¹*Institute of Photonic-Electronic Science and Technology, College of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China*
²*College of Material Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266042, China*

Abstract Based on multi-beam interference theory, the chiral spiral structure by interference lithography is simulated, and several factors that can influence the structures are discussed. The simulation results indicate that there are different special effects of incident angle, polarization status, polarization direction and phase difference on the three-dimensional spiral structures. The computer simulation of photonic crystal provides an effective guidance for the experimental fabrication, and promotes the development and applications of chiral spiral structures.

Key words physical optics; multi-beam interference; chirality; spiral structure; computer simulation

OCIS codes 090.2880; 120.4610; 350.4238; 160.1585

1 引言

光子晶体的概念自 1987 年提出^[1,2]以后, 因其能够有效调控光子的运动状态而被科学研究者广泛关注^[3~5]。螺旋结构光子晶体作为一种典型的手性结构, 且具有完全光子带隙^[6]以及良好的旋光性^[7], 是极具应用潜力的三维光子晶体之一, 在旋光、旋磁、微波吸收、微波天线和微纳集成偏光器件等方面

具有较好的应用前景^[7,8]。如果在结构中引入缺陷, 还可以实现滤波等功能器件, Alongkarn 等^[9]分析了胆甾型液晶螺旋结构中引入缺陷后光的传输情况, 发现缺陷模的中心波长可以由扭转角控制, 并且二者呈线性关系, 可应用于可调滤波器及光开关等领域。

在较好应用潜力的激励下, 手性螺旋结构光子

收稿日期: 2012-09-04; **收到修改稿日期**: 2012-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(11274189、10974106)、山东省自然科学基金(2010JQ18、2009ZRA02051)、山东省高等学校科技计划(J09LA10)和青岛市科技计划项目[11-2-4-3-(1)-jch]资助课题。

作者简介: 牛东杰(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体实验制作、计算机模拟等方面的研究。

E-mail: ndjje@126.com

导师简介: 王霞(1972—), 女, 博士, 教授, 主要从事光子晶体及光信息材料等方面的研究。

E-mail: phxwang@yahoo.com.cn(通信联系人)

晶体的制备也已经广泛研究开来。由于天然手性材料往往为块体且旋光率低,在纳米科技发展和应用尤其是集成光子器件应用中受到很大的局限。如何通过微加工技术实现手性螺旋结构的制备成为人们需要攻克的难题。Scott 等^[10]用倾斜溅射沉积法在硅基底上制作出禁带位置在近红外-红外波段的螺旋结构光子晶体。Kock 等^[11]利用激光直写法在 SU-8 光刻胶上刻写出禁带位置在红外波段的四角螺旋结构。螺旋结构光子晶体对制备技术的要求较高,实验操作需要高的精度,上述方法在制作螺旋结构中存在着制作周期长、单次制作体积小、费用高等缺陷,一定程度上限制了该结构的性质和应用研究。

激光全息光刻技术利用多束相干激光干涉产生晶格结构,并记录于感光材料上,从而形成不同维度周期有序的微纳结构,具有单次曝光刻写、制作面积大、样品均匀性好和制作成本低等优点,在光子晶体及微纳结构的制作中得到了广泛应用^[12~18]。采用激光全息光刻技术,人们成功实现了面心立方^[3]、金刚石结构^[18]和准晶^[19]等结构的实验室制备。通过灵活多样的光束配置可获得不同类型的微纳结构,在光束构型设计中对干涉场进行计算分析至关重要,是成功制备的前提。本文根据多光束干涉理论,对全息光刻技术制作螺旋结构^[20]进行了模拟分析。模拟发现 5+1、7+1、8+1 光束相干涉在结构区域都可产生具有部分螺旋形貌的柱状结构,而 6+1 光束干涉结构在所有区域都是柱状螺旋。选择了 6+1 光束配置进行模拟并分析了各光束的入射角、偏振态、偏振方向、光束相对对结构的影响。

2 全息干涉理论基础

全息干涉的相干光束可以用下式进行描述^[4]:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = [e_x E_x + e_y E_y \exp(i\delta)] E(x, y) \times \exp\{i[kz + \Phi(x, y, z)]\}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{k} 为波矢, δ 为相位差,若 $\delta = m\pi (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, 表示光束是线偏振光;若 $\delta = \pm \frac{\pi}{2}$, 并且 $E_x = E_y$, 表示光束是圆偏振光;其余情况下表示光束是椭圆偏振光。 $E(x, y)$ 表示在 x - y 平面的振幅分布。 $\Phi(x, y, z)$ 表示光波的波前形状,实际计算中用平面波模拟激光波,此时 $E(x, y)$ 为常数, $\Phi(x, y, z) = \Phi_0$, 即

$$\mathbf{E}(x, y, z) = [e_x E_x + e_y E_y \exp(i\delta)] E(x, y) \times \exp[i(kz + \Phi_0)]. \quad (2)$$

对于 6+1 光束配置,如图 1 所示,其中 $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4, \mathbf{k}_5, \mathbf{k}_6$ 为 6 束边缘光, \mathbf{k}_0 为中间光束。其中任一束光的光矢量分布为

$$\mathbf{E}_n(x_n, y_n, z_n) = [e_{x_n} E_{x_n} + e_{y_n} E_{y_n} \exp(i\delta)] \times E_n(x, y) \exp[i(kz_n + \Phi_{0n})], \quad (3)$$

七束光光场的矢量叠加为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \sum_{i=0}^6 [e_{x_i} E_{x_i} + e_{y_i} E_{y_i} \exp(i\delta)] \times E_i(x, y) \exp[i(kz_i + \Phi_{0i})], \quad (4)$$

干涉光场的强度分布为

$$\mathbf{I}(x, y, z) = \mathbf{E}(x, y, z) \times \mathbf{E}(x, y, z)^* \quad (5)$$

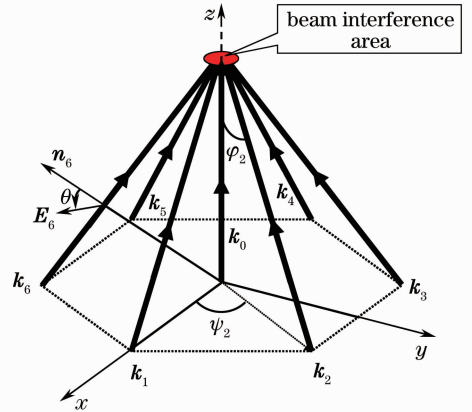


图 1 直角坐标系中 6+1 束光干涉光路图
Fig. 1 6+1 beams interference configuration in rectangular coordinate system

根据上述干涉强度计算理论基础,利用 C 语言进行编程计算,获得干涉格点的场强值,并在 Linux 系统下导入 Opencv 软件进行图像模拟,获得干涉格点结构。模拟过程中,需要选择合适的阈值,在模拟图像结果中把低于阈值的部分去掉,获得相对应的结构。

3 模拟结果与分析

3.1 手性螺旋结构的模拟结果

模拟分析了 6+1 光束配置下的干涉强度分布,光束构型如图 1 所示,其中中间光束为圆偏振光,周围 6 束光为对称分布的线偏振光,线偏振光的偏振角度 θ_i 定义为振动矢量 \mathbf{E}_i 与法向矢量 \mathbf{n}_i 逆时针之间的夹角,用以描述光束的偏振方向。根据理论计算结果,获得了如图 2 所示的干涉结构图,其中周围光束入射角均为 60° 、偏振角 θ_i 均为 90° ,各光束在汇聚点处相位相同,无相位差。图 2(a)、(b)分别是结构的立体图和侧视图,可见该光束配置可获得典型的螺旋结构。

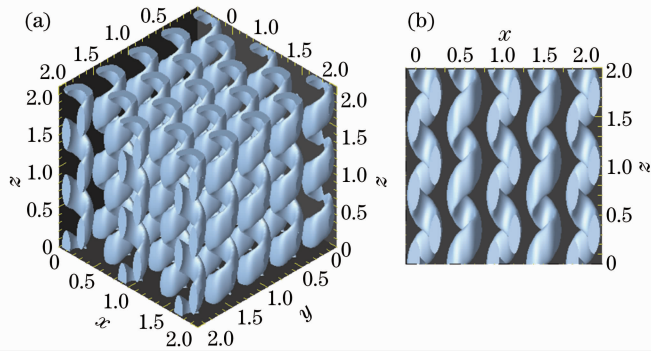


图2 中间光束为圆偏振光,周围光束均为 90° 线偏振光,汇聚点处各相位相同时的模拟结果图。(a)立体图;(b)侧视图
Fig. 2 Simulation results of the beam interference when the middle beam is circularly polarized, all the peripheral beams are 90° linearly polarized with same phase at the interference area. (a) Stereo view; (b) side view

周围光束的入射角决定螺旋结构的周期特性,

即纵向螺距和横向螺径尺寸,满足 $l = \frac{\lambda}{1 - \cos \varphi}$,

$a = \frac{\lambda}{\sin 60^\circ \sin \varphi}$,其中为 l 螺径, a 为螺距, λ 为激光

在介质中的波长, φ 为周围光束的入射角^[20]。在同样的波长下,随着入射角度的增大,螺径与螺距均呈减小的趋势。图3是不同入射角对应的螺距与螺径的变化图,图3(a)是螺距变化的侧视图,图3(b)是螺径变化的俯视图。

3.2 中间光束偏振态对结构的影响

产生螺旋结构的光束配置中,中间光束的偏振态对螺旋的影响至关重要,正是因为中间引入了圆偏振光才产生了周期性螺旋结构。图4为将中间光束改为线偏振光时的模拟结果,中间光束偏振方向与周围任意一束光的偏振方向相同,其他配置不变,得到的结构不再是螺旋,而是纵向有位移的开口环,其中图4(a)为立体图,图4(b)为俯视图,图中较亮的一半环位置较高,较暗的部分位置较低一些,单环

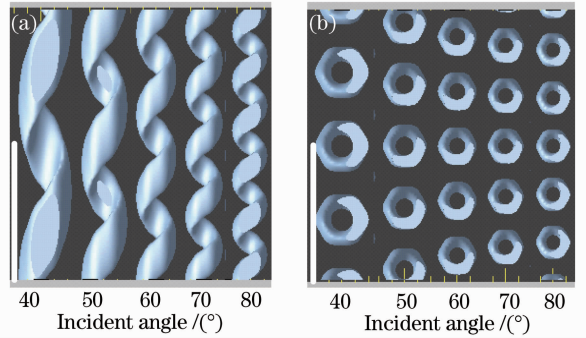


图3 周围光束入射角同时变化时得到的模拟图。(a)侧视图,对应螺距变化;(b)俯视图,对应螺径变化。

图中标尺为 $1 \mu\text{m}$

Fig. 3 Simulation results with the incident angles of all side beams changing. (a) Side view, represents the change of pitch; (b) top view, represents the change of diameter. The scale is $1 \mu\text{m}$

高度约为 300 nm 。采用该光束配置,实验中利用光刻胶可以制作出特性优良的二维开口环状光子晶体^[21],获得强的旋光性、圆二色性^[22,23],并有望在圆

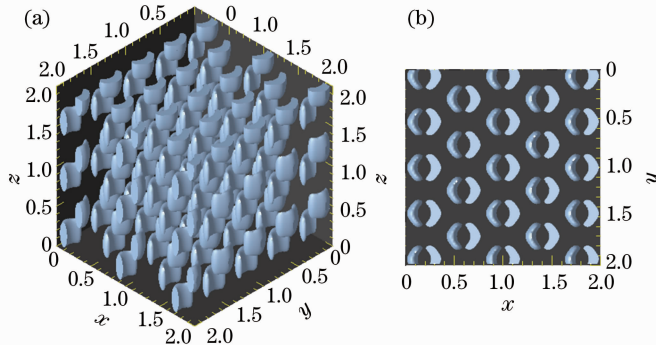


图4 周围光束为线偏振光,中间光束也是线偏振光且偏振方向与周围任一光束相同时的模拟结果图。(a)立体图;(b)俯视图,较亮的半环为位置较高的部分

Fig. 4 Simulation results of the beam interference when both the peripheral beams and the middle beam are linearly polarized, and the polarization direction of the middle beam is the same as that of any side beam. (a) Stereo view; (b) top view, the location of bright semi-ring is higher than the dark ones

偏振光下实现负折射效应^[24]。

3.3 周围光束偏振方向对结构的影响

制作手性螺旋结构的光束配置中周围光束的偏振方向对螺旋结构的影响同样不可忽略^[25],在保持中间光束为圆偏光,各周围光束在汇聚干涉点相位相同的情况下,当周围光束的偏振角度由 90° 改变为 0° 时,模拟结果为由空心的螺旋结构演变为实心螺柱,如图 5 所示,螺旋结构特征逐渐不显著。继续增大光束偏振角度,则结构呈循环趋势变化。

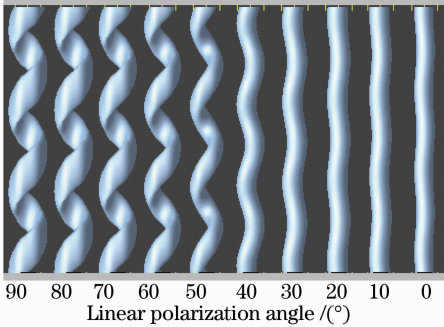


图 5 中间光束为圆偏振光,汇聚点处各相位相同,周围光束均为线偏振光,偏振方向由 90° 变为 0° 时的模拟结果图。螺旋变为实心螺柱

Fig. 5 Simulation results of the beam interference when the middle beam is circularly polarized, with same phase at the interference area. The peripheral beams are linearly polarized, their linear polarization turns from 90° to 0° , the spiral turns to solid columns

3.4 周围光束相位对结构的影响

在上述光束配置中,如果周围各束光到达会聚点的光程不同,干涉叠加时光束将会产生相位差。通过计算模拟,发现周围任一光束相位发生变化都会改变螺旋结构的形状。图 6 给出了其中一束光在会聚点处相位由 0° 改变到 90° 时的模拟结果。此时螺旋结构已发生严重变形,连接两个螺旋周期的中间连接点开始变细,并逐渐使螺旋周期分离,变成许多断开的不完整螺旋结构。继续增大光束在会聚点处的相位差,则结构呈循环趋势变化。

4 结 论

基于多光束干涉理论,计算模拟了 $6+1$ 光束配置制备螺旋结构的干涉场强度分布。分析探讨了光束的入射角、偏振状态、偏振方向和光束相位对干涉形成的三维螺旋结构的不同影响,总结了改变某一参数时的结构变化规律。计算机模拟结果对手性螺旋结构的实验制备具有重要的指导作用,可促进手

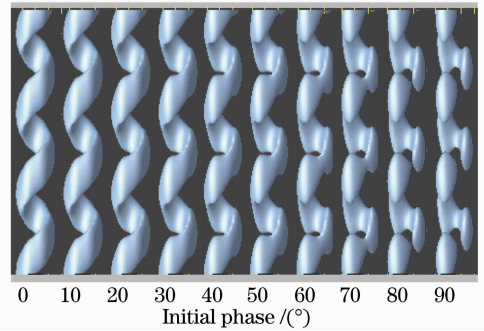


图 6 中间是圆偏振光,周围是线偏振光且一束光的初相由 0° 变为 90° 的模拟结果图,逐渐形成断开的不连续螺旋

Fig. 6 Simulation results with the middle beam of circular polarization, and initial phase of one of the side linearly polarized beams changes from 0° to 90° , forms gradually disconnected spiral structure

性材料的研究。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2486~2489
- 3 X. Wang, J. F. Xu, H. M. Su *et al.*. Three-dimensional photonic crystals fabricated by visible light holographic lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(14): 2212~2214
- 4 Liu Bing, Zhu Zimin. Effect of structural parameters of one-dimensional photonic crystal on forbidden band gap[J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, **28**(4): 479~482
刘 兵, 竺子民. 一维光子晶体结构参数对禁带带隙的影响研究[J]. *应用光学*, 2007, **28**(4): 479~482
- 5 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
刘 欢, 姚建铨, 李恩邦. 激光全息法制作二、三维光子晶体的模拟计算及禁带分析[J]. *物理学报*, 2006, **55**(5): 2286~2292
- 6 O. Toader, S. John. Square spiral photonic crystals: Robust architecture for microfabrication of materials with large three-dimensional photonic band gaps[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(1): 016610
- 7 Sun Guocai, Liu Zuli, Yao Kailun. Influence of the constitutive parameters of helical chiral materials on the electromagnetic wave rotation[J]. *J. Functional Materials*, 2000, **31**(1): 38~39
孙国才, 刘祖黎, 姚凯伦. 螺旋结构手性材料的结构参数对旋波性的影响[J]. *功能材料*, 2000, **31**(1): 38~39
- 8 J. Y. Chen, L. W. Chen. Defect modes in a stacked structure of chiral photonic crystals[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(6): 061708
- 9 C. Alongkarn, N. Susumu. Spiral three-dimensional photonic band-gap structure[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **57**(4): 2006~2008
- 10 R. Scott, J. Kennedy, B. Michael. Fabrication of tetragonal square spiral photonic crystals[J]. *Nano. Lett.*, 2002, **2**(1): 59~62
- 11 K. S. Kock, M. Vygantas, M. Shigeki *et al.*. Three-dimensional spiral architecture photonic crystals obtained by

- direct laser writing[J]. *Adv. Mater.*, 2005, **17**(5): 541~545
- 12 M. Campbell, D. N. Sharp, M. T. Harrison *et al.*. Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography[J]. *Nature*, 2000, **404**(6773): 53~56
- 13 X. Wang, H. M. Su, L. Z. Zhang. Fabrication of a submicrometer crystalline structure by thermoplastic holography [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31): 5588~5591
- 14 Y. C. Zhong, S. A. Zhu, H. M. Su *et al.*. Photonic crystal with diamond-like structure fabricated by holographic lithography [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(6): 061103
- 15 Y. Yang, Q. Z. Li, G. P. Wang. Fabrication of periodic complex photonic crystals constructed with a portion of photonic quasicrystals by interference lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(6): 061112
- 16 Y. Yang, Q. Z. Li, G. P. Wang. Design and fabrication of diverse metamaterial structures by holographic lithography[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11275~11280
- 17 G. Y. Dong, X. L. Yang, L. Z. Cai. Anomalous refractive effects in honeycomb lattice photonic crystals formed by holographic lithography [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(16): 16302~16308
- 18 B. Liang, Y. K. Liu, J. T. Li *et al.*. Fabrication of large-size photonic crystals by holographic lithography using a lens array [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2012, **22**(3): 035013
- 19 X. Wang, C. Y. Ng, W. Y. Tam. Large-area two-dimensional mesoscale quasi-crystals [J]. *Adv. Mater.*, 2003, **15**(18): 1526~1568
- 20 Y. K. Pang, J. C. W. Lee, H. F. Lee *et al.*. Chiral microstructures (spirals) fabrication by holographic lithography [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7615~7620
- 21 Y. Yang, Q. Z. Li, G. P. Wang. Design and fabrication of diverse metamaterial structures by holographic lithography [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11275~11280
- 22 Z. F. Li, R. K. Zhao, T. Koschay *et al.*. Chiral metamaterials with negative refractive index based on four "U" split ring resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(8): 081901
- 23 T. Driscoll, G. O. Andreev, D. N. Basov *et al.*. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(6): 062511
- 24 X. Xiong, W. H. Sun, Y. J. Bao *et al.*. Construction of a chiral metamaterial with a U-shaped resonator assembly [J]. *Phys. Rev. B*, 2010, **81**(7): 075119
- 25 H. M. Su, Y. C. Zhong, X. Wang *et al.*. Effects of polarization on laser holography for microstructure fabrication [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(5): 056619

栏目编辑:何卓铭