

多光纤点光源干涉法制作光子晶体的研究

王高亮¹, 孙晓红¹, 郝宇¹, 黄颖娟²

(1. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052;

2. 内蒙古大学物理科学与技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要:利用多光纤点光源全息干涉法对四光纤(4+1)和五光纤(5+1)的干涉场进行理论模拟和实验测量,并比较了中心光束对整个干涉场的影响,研究表明中心光束只对干涉场对比度有影响,而不影响干涉晶格结构。同时给出了多光纤干涉的实验结果,从实验结果看出,实验和理论有比较好的一致性。并且设计了四根光纤干涉形成的渐变型光子晶体结构,对其光场的分束和聚焦作用进行了理论模拟。本文的研究为制作渐变型光子晶体分束器和聚焦透镜提供了很好的理论和实验依据。

关键词:全息干涉;渐变型光子晶体;晶格;分束器;聚焦透镜

中图分类号:0436.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.11.16

Fabrication of photonic crystals by using multi-fiber interferometry

WANG Gao-liang¹, SUN Xiao-hong¹, HAO Yu¹, HUANG Ying-juan²

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. Inner Mongolia University School of Physical Science Technology, Hohhot 010021, China)

Abstract:In this article, theoretical calculation and experimental measurement of four and five fiber interfering field are investigated by using multi-fiber holographic interferometry. The effect of the central beam on the interfering field is explored, and the results show that the central beam only affects the interfering contrast without affecting the lattice structure. At the same time, by comparing the theoretical and experimental results, a good agreement is obtained. Furthermore, gradient photonic crystal (GPC) structures are designed for four fiber interferometry. The beam splitting and focusing effect is analyzed for GPC structures. This provides theoretical and experimental basis for the fabrication of good beam splitter and a focusing lens.

Key words:holographic interferometry; GPC; lattice; beam splitter; focusing lens

1 引言

1987年,光子晶体的概念是由E. Yablono-vitch^[1]和S. John^[2]分别独立提出的,由于光子晶体的光子局域和光子禁带特性,使得光子晶体的应用十分广泛。传统意义上的光子晶体是指存在光子带隙(PBG)的周期性人工微结构,故也称光子晶体为光子晶体带隙材料。最初,人们认为晶体只是有周期性的,而且只能有1次,2次,3次和6次旋转周期性,但1984年,美国科学家D. Shechtman^[3]等用急冷凝固方法制作高强度铝合金时,首次发现了具有五次非晶体学旋转堆成

的二十面体,这一发现打破并丰富了晶体学理论,随后科学家们又发现了具有8次,10次,12次,14次旋转对称性的二维晶体结构,准晶是准周期晶体的简称,它是一种同时具有长程准周期性平移和非晶体学旋转对称的固态有序相^[4]。渐变型光子晶体就是对光子晶体的晶格常数、材料折射

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11104251)资助。

作者简介:王高亮(1987-),男,硕士,主要从事光子晶体超性能材料,光纤通信等方面的研究。E-mail: wanganggaoliang1314@126.com

收稿日期:2013-04-07; **修订日期:**2013-04-23

率或单位元细胞内每种材料的填充率等结构参量施以连续和缓慢的变化^[5]。

论文对多光纤点光源干涉法对四光纤(4+1)和五光纤(5+1)的干涉场进行理论模拟和实验测量,并比较了中心光束对整个干涉场的影响,研究表明中心光束只对干涉场对比度有影响,而不影响干涉晶格结构^[6-8],并且从实验结果看出,实验和理论有比较好的一致性,这为制作周期光子晶体、准晶光子晶体以及渐变型光子晶体结构提供了很好的研究基础。

2 理论分析及模拟

2.1 四根光纤干涉

如图 1 所示,光纤出射端的四个点光源 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 分别置于矩形的四个顶点上,假定每个圆(对应每根光纤)的直径为 α ,则每个点光源的坐标位置为: $(-0.5\alpha, 0.5\alpha)$, $(0.5\alpha, 0.5\alpha)$, $(-0.5\alpha, -0.5\alpha)$, $(0.5\alpha, -0.5\alpha)$ 。每个点光源在任一点 $P(x, y, z)$ 处的振幅我们用 $U_n(P)$ (n 分别取 1, 2, 3, 4,) 来表示,则 P 点处的干涉光强可表示为:

$$I(P) = |U(P)|^2 = \left| \sum_{n=1}^4 U_n(P) \right|^2 \quad (1)$$

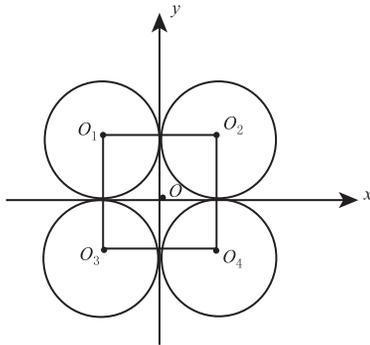


图 1 出射端四根光纤的位置关系

Fig 1 The position relations of four-fiber interferometer

根据各个点光源的位置坐标,在近轴近似条件下,得到:

$$U_n(P) = \frac{A}{Z} \exp(ikr_n) \quad (2)$$

其中:

$$r_n = \sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 + z^2} \approx z + \frac{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}{2z}, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

公式中 (x_n, y_n) 分别是四个点光源的位置坐标。若在某一平面处, z 取定值,若光纤的直径已知,编程计算可得到干涉场随 x, y 变化的二维光强干涉图,当光纤的直径 a 、观察平面 z 和光源波长分别取值

为 $\alpha = 125 \mu\text{m}$, $z = 100 \mu\text{m}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$ 时,模拟干涉结果如图 2 所示,为二维矩形晶胞结构的周期光子晶体。

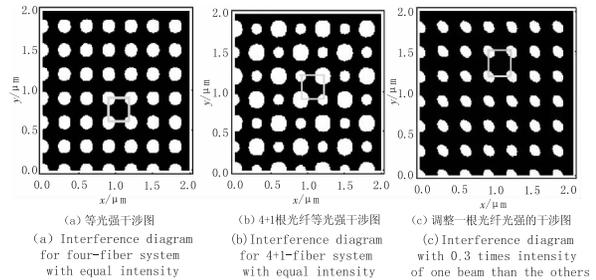


图 2 四根光纤干涉图

Fig. 2 Paraxial interference pattern for four-fiber system

从图 2(a) 可以看出,四根光纤等光强干涉形成的光子晶体为具有周期性质的矩形晶胞结构的光子晶体。若中间加一根光纤,确保是在四根光纤的中间,就形成了 4+1 根光纤,从模拟图即图 2(b) 可以看出,晶胞中对角的光点变大,对比度发生变化,是种复合型的光子晶体。图 2(c) 是四根光纤中,其中一根光纤的光强是其他的 0.3 倍,从图中可以看出,干涉场仍是具有矩形晶胞结构的二维周期光子晶体,只是晶胞的形状发生了变化。

在 y 取定值时,观察 $x-z$ 平面的光强分布图,图 3(a) 是四根光纤干涉, $x-y$ 平面的干涉图,从图可以看出,当 z 取不同值时,光子晶体的周期是不同的,即是渐变型结构的光子晶体。如图 3(b) 和图 3(c) 分别是当 $z = 63 \mu\text{m}$ 和 $z = 100 \mu\text{m}$ 处 $x-y$ 平面的晶体结构。

理论计算表明了通过调整四根光纤全息干涉,可以制做周期性光子晶体和渐变型光子晶体。

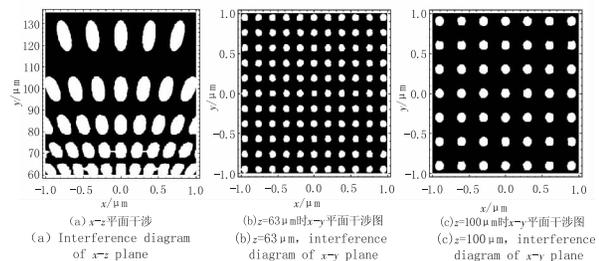


图 3 四根光纤干涉 y 取定值干涉图

Fig. 3 y takes the constant, interference diagram for four-fiber interferometer

2.2 五根光纤干涉理论及模拟

五根光纤干涉的原理图如图 4 所示,同理四根光纤干涉,可以求出五个点光源的位置坐标。编程计算可得到干涉场随 x, y 变化的二维准晶结构,其模拟干涉图如图 5 所示。

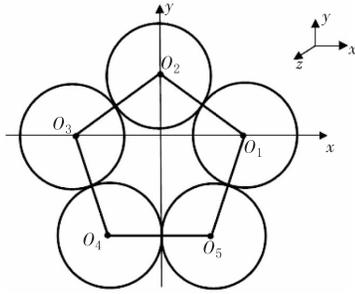


图4 五根光纤干涉出射端位置关系

Fig. 4 The position relations of five - fiber interferometer

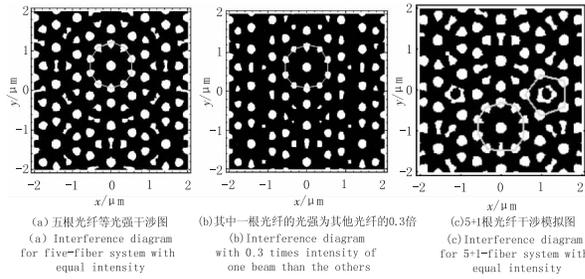


图5 五根光纤干涉图

Fig. 5 Paraxial interference pattern for five-fiber system

从图5(a)中可以看出五根光纤干涉,干涉场所形成的是具有准周期结构的光子晶体,即准晶。若五根光纤中其中一根光纤的光强为其他光纤的0.3倍,如图5(b)所示,其中的一些亮点变暗,但不影响其准晶结构。图5(c)是在五根光纤中间加上一根光纤,形成5+1根光纤干涉,从干涉图可以看出,干涉场内具有准晶结构,中间是具有10次旋转对称性的晶胞。

3 实验结果分析

3.1 实验装置

实验装置图如图6所示,其中光源为波长为532 nm的绿光半导体激光器,激光通过光纤传输,调整光纤出射端光纤的位置关系,实现多光纤耦合干涉,形成干涉场,通过使用不同放大倍数的光学显微镜观察光纤干涉场所形成的干涉晶格结构。

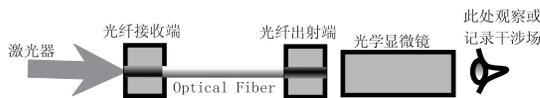


图6 实验装置原理图

Fig. 6 Experimental setup

3.2 实验结果

图7(a)为四根光纤出射端的位置关系,图7(b)是在干涉场观察到的图形,是矩形结构的光子晶体,从图中可以看到和前面理论模拟计算的一样。同理,可以得到5+1根光纤干涉得到的实验结构,图8(a)为光纤出射端点光源的位置关系,图8(b)为用光学显微镜观察干涉场得到的干涉结果。

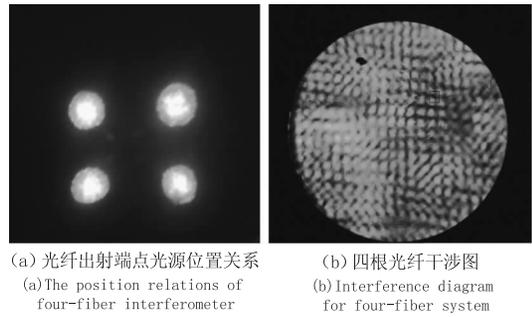


图7 四根光纤干涉实验图

Fig. 7 Interference experimental diagram for four - fiber system

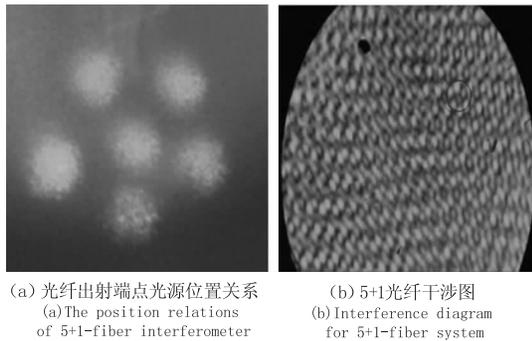


图8 5+1根光纤干涉出射端光源的位置关系和干涉场

Fig. 8 Interference experimental diagram for 5 + 1 - fiber system

4 渐变型光子晶体的特性

根据本文设计的多光纤点光源干涉法制作的渐变型光子晶体,研究渐变型光子晶体的特性。由于渐变型二维光子晶体其能带结构和等频面结构都发生变化,当光通过光子晶体时会产生光路转弯现象^[9],本文设计的渐变型光子晶体通过改变每一层光子晶体的填充率,它在z方向上第i个介质柱的半径 $\gamma_i = \gamma_0(1 + 0.02i)^2$ 其中 $i = 1, 2, \dots$,图9为光通过本文设计的渐变型光子晶体时的分束和汇聚作用。研究表明,这种采用这种结构制作的光子晶体超棱镜,其分束能力较常规棱镜要提升2到3个数量级,但其体积只有常规的1%^[10-11]。此研究为制作渐变型光子晶体分束器和聚焦透镜提供了很好的理论和实验依据。

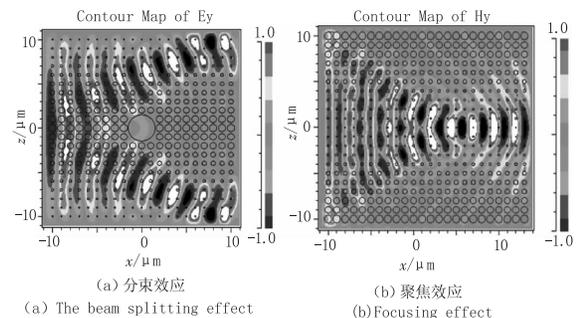


图9 渐变型光子晶体性质

Fig. 9 The beam splitting and focusing effect for GPC structures

5 结 语

本研究利用 mathematics8.0 和 Rsoft 软件理论计算了全息干涉所形成的矩形晶胞结构的周期光子晶体、渐变型光子晶体以及具有十次旋转对称性的准周期光子晶体。与此同时,实验上用多光纤点光源全息干涉系统制作光子晶体,讨论了光纤场强对光子晶体结构的影响关系,实验结果对理论模拟的正确性也得到了验证,再在干涉场对光敏介质曝光,然后对光敏介质处理,即可得到不同性质的光子晶体。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58: 2059 - 2061.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58: 2486 - 2488.
- [3] Shechtman D, Blech I, Cratias D, et al. Metallic phase with long rang orientational order and no translational symmetry [J]. Phys. Rev. Lett, 1984, 53: 1951 - 1953.
- [4] Dong Chuang. Quasicrystal materials [M]. Beijing: National Defence of Industry Press, 1998. (in Chinese)
董闯. 准晶材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [5] Wang Lei. Research on transmission spectrum of two-dimensional graded photonic crystals in Terahertz waveband [J]. Electronic Component & Device Applications, 2009, 12: 25. (in Chinese)
王磊. 太赫兹波段渐变型二维渐变型光子晶体的透射谱研究 [J]. 电子器件应用, 2009, 12: 25.
- [6] Wang X, Xu J F, Su H M, et al. Three-dimensional photonic crystals fabricated by visible light holographic lithography [J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 82: 2212 - 2214.
- [7] Sun X H, Tao X M, Ye T J, et al. Optical design and fabrication of 3D electrically switchable hexagonal photonic crystal [J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2007, 87(1): 65 - 69.
- [8] Sun Xiaohong, Wang Gaoliang, et al. Fabrication of photonic crystals by using multi-fiber holographic interferometry [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(05): 535 - 538. (in Chinese)
孙晓红, 王高亮, 等. 多光纤全息干涉法制作光子晶体 [J]. 激光与红外, 2012, 42(05): 535 - 538.
- [9] Li Yiyu, Gu Peifu, et al. Filling factor graded wavelike two dimensional photonic crystals [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 1: 169 - 173. (in Chinese)
厉以宇, 顾培夫, 等. 填充率渐变型波状结构二维光子晶体 [J]. 光学学报, 2008, 1: 169 - 173.
- [10] Zeng Yu, Zhang Hongtao. Photonic crystal and its study [J]. Journal of Jiangxi Blue Sky University, 2008, 10 (Suppl): 23 - 25. (in Chinese)
曾玉, 张洪涛. 光子晶体及其研究 [J]. 江西蓝天学院学报, 2008, 10(增): 23 - 25.
- [11] Baumberg, J J Perney, N M B Netti, et al. Visible-wavelength super-refraction in photonic crystal superprisms [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(3): 354 - 356.