

确定光子晶体光纤方位角的散射图案特征法

黄华才¹ 陈 哲¹ 罗云瀚^{1*} 唐洁媛¹ 谢俊辛¹ 余新宇¹ 何小莉¹ 甘宏波¹
马 悦¹ 卫青松¹ 余健辉¹ 张 军¹ 卢惠辉¹ 戴能利² 彭景刚²

(¹暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632)
²华中科技大学武汉国家光电实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

摘要 为了满足加工和制作光子晶体光纤器件时的方位角定位需求,提出基于激光前向散射图案的方位角确定方法。用波长为 650nm 的激光垂直照射在光子晶体光纤的侧面,拍摄前向散射图案同时实时记录光子晶体光纤端面的显微图像。选取前向散射图案的局部区域强度之和为特征值,通过比较分析得出当求取前向散射图案半幅散射条纹强度值总和时,其特征值变化规律与光子晶体光纤内部轴向结构相对应,可用于光子晶体光纤特殊方位角的确定。在三种不同结构的光子晶体光纤的特殊方位角定位中,该方法的定位精度均小于 0.5°,充分证实了该方法的有效性和普适性。提出的光子晶体光纤轴向特殊方位角确定方法简单实用、定位精确,将在光子晶体光纤器件加工中发挥重要的作用。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 散射图案; 特征值; 轴向方位角

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1205005

Characteristics Method of Forward Scattering Patterns for Determining Azimuth Angle of Photonic Crystal Fibers

Huang Huacai¹ Chen Zhe¹ Luo Yunhan¹ Tang Jieyuan¹ Xie Junxin¹ Yu Xinyu¹
He Xiaoli¹ Gan Hongbo¹ Ma Yue¹ Wei Qingsong¹ Yu Jianhui¹ Zhang Jun¹
Lu Huihui¹ Dai Nengli² Peng Jinggang²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Educational Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China
²Wuhan National Optoelectronic Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In order to meet the requirement of determining the azimuth angles in fabricating optical devices from photonic crystal fibers (PCFs), a method based on analyzing the forward scattering patterns is proposed. The PCF sample is illuminated transversely by a laser of 650 nm, and the forward scattering patterns and the tip microscopic images are simultaneously recorded. The summary of local intensities of the forward scattering patterns is chosen as the characteristic value. The characteristic value presents good correspondence to the azimuth angles of photonic

收稿日期: 2014-05-26; **收到修改稿日期**: 2014-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61177075,61008057,11004086,61475066,61405075)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(2012A032300016,2012A080302004,2011A081302002,2012A080301002)、广东省学科建设专项资金(2013CXZDA005)、中央高校基本科研业务费专项(21614313,21613325,21613405)、东南大学生物电子学国家重点实验室开放研究基金(2014H09)

作者简介: 黄华才(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤光学及信息技术、光学设计与仿真等方面的研究。

E-mail: huacai_huang@163.com

导师简介: 陈 哲(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事新型光纤无源器件、光纤通信与光纤传感技术、光电检测技术、光学设计、光学及光电系统计算机仿真等方面的研究。E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: yunhanluo@163.com

crystal fiber by comparing the half-image summarized intensities of the forward scattering patterns. Based on this correspondence, the special azimuth angle can be determined. The accuracy within 0.5° obtained in the applications to three kinds of PCFs proves that the proposed method is effective and universal. This method is simple in operation, accurate in determination, and is expected to play an important role in the axial orientation in the fabrication of PCF based devices.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; scattering pattern; characteristic value; azimuth angle

OCIS codes 060.5295; 100.2000; 140.3460; 290.5825

1 引 言

自 1991 年 Russell 第一次提出了光子晶体光纤^[1],光子晶体光纤引起广泛关注^[2-3],已应用于光子晶体光纤激光器^[4]、模间干涉传感器^[5]、折射率传感器^[6]、光学集成电路^[7]、温度传感器^[8]等方面。当加工制作基于光子晶体光纤的光学器件时,其制作过程都要求对光子晶体光纤的特殊方位角进行确定。例如,在光子晶体光纤光栅中刻写时,刻写激光以不同角度进入光子晶体光纤内部的效率不同,因此需要在刻写过程中确定激光的进入方向与光子晶体光纤端面微结构之间的相对位置关系^[9-10]。在加工侧边抛磨光子晶体光纤时^[11],由于不同角度的抛磨会导致光子晶体光纤抛磨区模场的不同分布,在光子晶体光纤耦合器的制作时,需要根据设计要求调整两根光子晶体光纤的相对位置^[12-13]。虽然端面成像的方法可以确定光子晶体光纤的方位角^[14],但只适用于光纤端面可供观察的情况,例如光子晶体光纤熔接。但对于光子晶体光纤器件加工时其端面无法直接观察,难以使用端面成像方法观察光纤端面进而确定方位角。因此,发展一种无损、无破坏性的光子晶体光纤轴向方位角的定位方法,对加工制作光子晶体光纤器件有着十分重要的意义。

目前,对光子晶体光纤内部结构方位角的研究多数为数值模拟研究^[15-18],也有少数采用实验方法确定光子晶体光纤内部结构方位角的研究^[19-20]。在文献^[19-20]中,用氦氛激光垂直光纤轴向方向

照射光子晶体光纤,分析前向散射光接近中心处的散射光强度变化实现了对光子晶体光纤内部结构的检测。为了降低激光在光子晶体光纤内部多重散射效应的影响,需要在光子晶体光纤的空气孔中填充折射率接近光纤包层的匹配液。但匹配液的加入将污染光子晶体光纤,影响光子晶体光纤的性质。文献^[20]的实验结果显示,不同种类的光子晶体光纤对于前向散射光的接收器的位置各不相同,且对位置的精确度要求很高。

本文将发展一种基于前向散射图案确定光子晶体光纤轴向方位角的方法,分析对比了几种图案处理特征方法,得出优化的光子晶体光纤轴向方位角确定图案特征值,建立了特征值与光子晶体光纤轴向方位角的对应关系,并实现了三种不同结构的光子晶体光纤的特殊轴向方位角确定,以及在确定光子晶体光纤特殊方位角的基础上可以实现其他方位角的选择及确定。

2 实验设计及方法

2.1 实验设计

实验装置如图 1(a)所示,光子晶体光纤沿 Z 轴方向摆放并固定在步进电机的同心轴上,采用半导体激光器(波长 650 nm,功率 100 mW)沿着 X 轴方向照射光子晶体光纤。在激光照射光子晶体光纤的另一方垂直于 X 轴放置成像屏,采用 CCD 相机拍摄成像屏的散射图案。为了实时监视光子晶体光

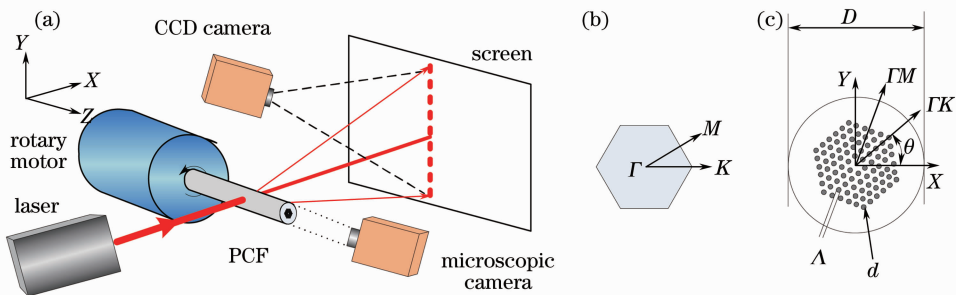


图 1 (a) 实验装置图; (b) 光子晶体光纤六边形方位角 ΓK 和 ΓM ; (c) 无截止单模光子晶体光纤结构图
Fig. 1 (a) Diagram of the experimental setup; (b) definition of the hexagon azimuth angle of photonic crystal fiber;
(c) endless single mode photonic crystal fiber structure

纤方位角的实际位置,采用另一台显微相机同步观察光子晶体光纤的端面,以获得光子晶体光纤前向散射图案与端面图案的对应关系。

本文主要研究几种空气孔排列呈六边形结构的光子晶体光纤。根据六边形晶体结构中规则^[21-22],分别定义从六边形中心到顶角的连线方向为 ΓK ,中心与边的中点的连线方向定义为 ΓM ,如图1(b)所示。定义 X 轴与 ΓK 的夹角为光纤轴向方位角 θ ,当光子晶体光纤 ΓK 方向方位角与 X 轴方向重合时,光子晶体光纤轴向方位角为 0° 。图1(c)是无截止单模光子晶体光纤结构示意图,光纤外径 D 为 $125\ \mu\text{m}$,空气孔直径 d 为 $2.28\ \mu\text{m}$,空气孔之间的

间距 Λ 为 $5.70\ \mu\text{m}$ 。

2.2 实验方法

调整实验系统,使得激光沿 X 轴方向横向照射待测光子晶体光纤,调节两个相机对焦位置。通过步进电机控制光子晶体光纤轴向旋转,使得光子晶体光纤方位角方向 ΓK 与 X 轴方向重合,分别拍摄部分前向散射图案及其光子晶体光纤端面图案。光子晶体光纤逆时针每旋转 0.5° ,重复拍摄光子晶体光纤的前向散射图案和端面显微图像,直至完成 360° 的旋转周期。图2是在光子晶体光纤处于不同轴向方位角时的散射图案及其对应的端面显微图像。

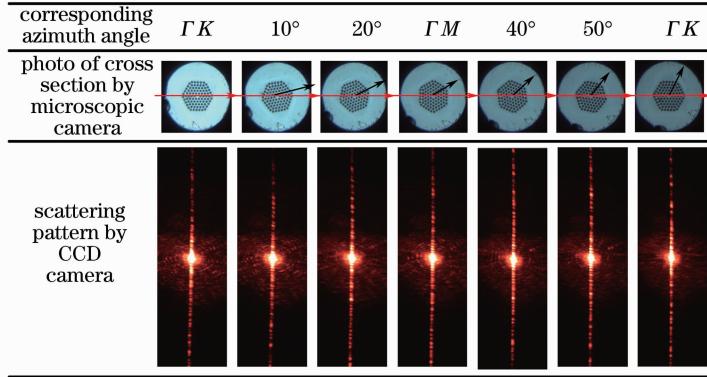


图2 光子晶体光纤处于不同方位角下激光照射光纤产生的散射光

Fig. 2 Laser optical scattering patterns of photonic crystal fiber under different azimuth angles

3 图案特征分析方法

从图2中可以看出:1)所有的散射图案中间都有一个亮点,此处为激光垂直照射光子晶体光纤产生的0级条纹,而在图案最亮点上下两边为散射条纹,分别为 $\pm 1, \pm 2$ 级等散射条纹;2)光子晶体光纤处于不同方位角情况产生的散射图案散射条纹信息各不相同,尤其散射条纹强度变化很大;3)每张散射图案均不对称,包括散射图案上下、左右有稍微的移动或偏摆,难以从散射图案中直接获取方位角信息。因此考虑利用散射图案分区域求取强度值总和作为散射图案的特征值 V ,并以此分析散射图案与光子晶体光纤方位角的关系。

$$V = \sum_{i=1, j=1}^{M, N} p(i, j), \quad (1)$$

式中 V 是散射图案所选的区域强度值总和, $p(i, j)$ 是该区域内第 i 行第 j 列处的强度值, M 为所选图案区域的竖直方向像素数量, N 为所选图案区域的水平方向像素数量。对每个角度下拍摄到的散射图案作同样处理,进而得到前向散射图案所选区域的强

度值总和与光子晶体光纤方位角的关系曲线,以下是具体优化图案区域选择方法。

3.1 单一条纹区域强度确定法

如图3(e)所示,选取散射图案的1级、2级、3级和4级条纹小区域,利用(1)式计算各区域的强度值之和,其中 M 为20, N 为30。如图3(a)~(d)分别对应1~4级条纹强度值与光子晶体光纤方位角的关系。从图中可以发现,随着光子晶体光纤方位角的变化,单一条纹区域强度没有明显的变化规律。

3.2 全幅散射条纹强度值总和确定法

设 M 为1200, N 为30,采用(1)式中计算如图4(b)虚线所示区域强度值总和,其特征强度值总和与光子晶体光纤方位角关系曲线如图4(a)所示。在全幅散射图案区域强度值总和中,其强度值总和与光子晶体光纤方位角的变化曲线没出现明显的规律,难以用于光子晶体光纤方位角的确定。

3.3 半幅散射条纹强度值总和确定法

如图5(c)所示,以中心亮纹为分界,分别选取上、下两个区域的散射图案并利用(1)式计算其强度

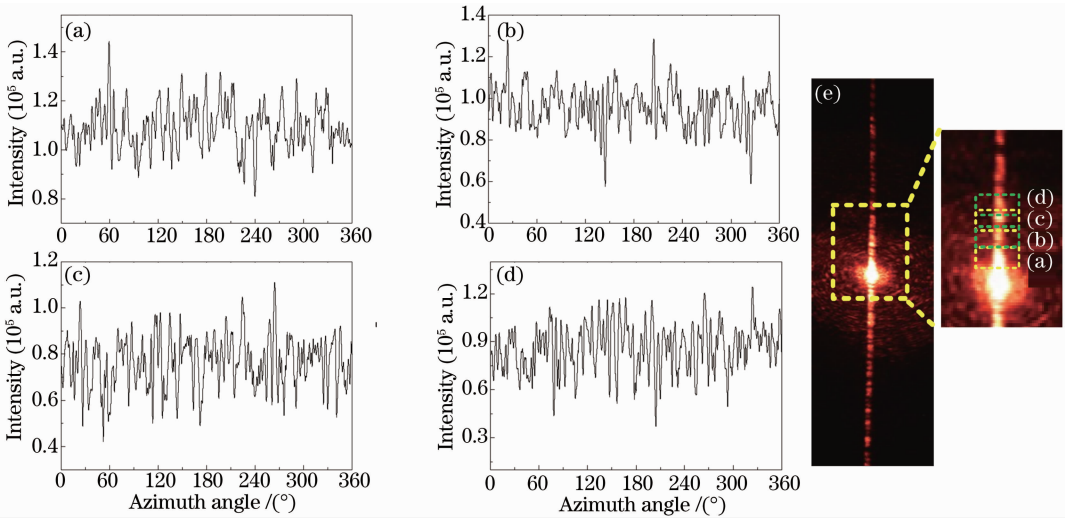


图 3 无截止单模光子晶体光纤前向散射图案各级条纹小区域强度值总和与光子晶体光纤方位角关系曲线图。

(a)~(d) 对应 1、2、3 和 4 级散射条纹区域；(e) 散射条纹区域示意图

Fig. 3 Relationship between the local summarized intensity of the forward scattering patterns at different levels for the endless single mode photonic crystal fiber and the azimuth angle. (a)~(d) Correspond to the level 1 to 4; (e) stripes schematic of different levels in the forward scattering patterns

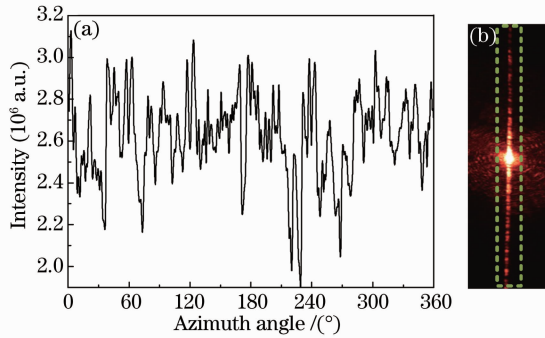


图 4 (a) 无截止单模光子晶体光纤前向散射图案强度值总和与光子晶体光纤方位角关系曲线图；(b) 散射条纹区域示意图

Fig. 4 (a) Relationship between the total summarized intensity of the forward scattering patterns for the endless single mode photonic crystal fiber and the azimuth angle; (b) stripes schematic of different levels in the forward scattering patterns

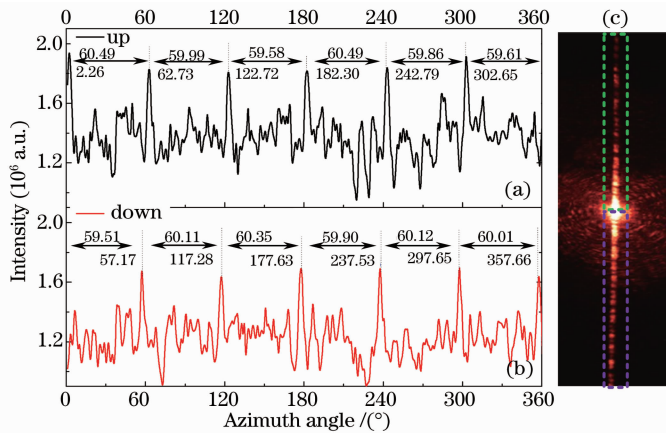


图 5 无截止单模光子晶体光纤前向散射图案(a)上、(b)下区域强度值总和与方位角的关系；(c) 散射条纹区域示意图

Fig. 5 Relationship between the half-image summarized intensity of the forward scattering patterns in the (a) up and (d) down areas for the endless single mode photonic crystal fiber and the azimuth angle; (c) stripes schematic of different levels in the forward scattering patterns

值,其中 M 为 600, N 为 30。如图 5(a)和(b)分别对应上、下半区域强度值与光子晶体光纤方位角的关系。

从图 5 中可以发现:1) 随着光子晶体光纤方位角的变化,上、下半区域强度值呈现周期性变化,每隔 60° 出现一个特征峰值,与无截止单模光子晶体光纤内部结构呈六边形相对应;2) 上半区域强度值特征峰落后于对应的方位角 ΓK ,而下半区域强度值特征峰超前方位角 ΓK 。无截止单模光子晶体光纤前向散射图案在 360° 内的变化与其内部结构即方位角有关系。

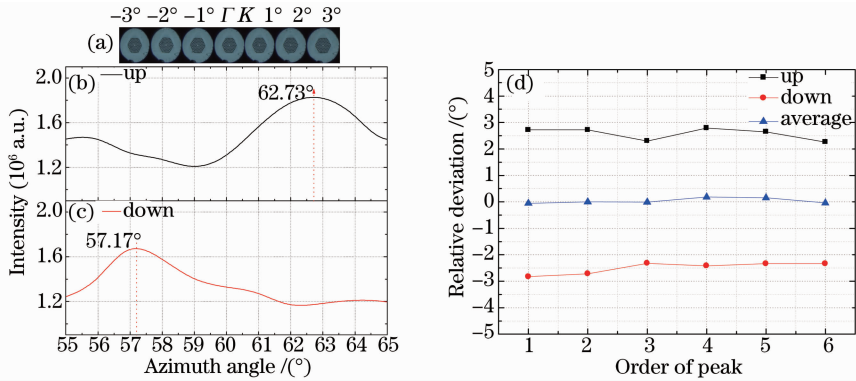


图 6 (a) 光子晶体光纤处于不同方位角时的端面显微图片;(b)、(c) 为图 5 对应的局部放大图;
(d) 6 个特征峰位置的相对偏差

Fig. 6 (a) Microscopic pictures at different azimuth angles of the observed photonic crystal fiber; (b), (c) correspond to the zoomed-in graphs of Fig. 5; (d) six characteristic peaks positions relative deviations

对于无截止单模光子晶体光纤方位角处于 ΓK 时,上、下两个区域强度值曲线特征峰对应角度与其偏差如图 6(d)所示。这些上下区域特征峰对应的角度平均值均可用以确定无截止单模光子晶体光纤方位角为 ΓK 时的内部结构位置,且精确误差均小于 0.5° 。

综上所述,实验采用对散射图案以中心最亮处分成半幅散射条纹区域强度值总和和分析时,解决了 CCD 相机拍取散射图案上、下区域散射条纹变化不一致的影响,又避免单级亮纹光强的不稳定性带来的影响。而且半幅散射条纹强度值总和确定法可实现无截止单模光子晶体光纤轴向方位角为 ΓK 时的内部结构位置的确定,即上、下散射图案区域强度值总和与方位角的变化曲线相近特征峰值对应方位角的平均值,对应于无截止单模光子晶体光纤轴向方位角正处于方向 ΓK 的位置。结合电机控制光子晶体光纤旋转,可实现对光子晶体光纤轴向结构其他位置的选择及确定。

选取图 5(a)和(b)在 60° 附近区域进行放大得到如图 6(b)和(c)所示,图 6(a)为各个光子晶体光纤方位角对应于无截止单模光子晶体光纤处于相应方位角时的端面图。图 6(b)和(c)中两曲线特征峰值对应的方位角分别为 62.73° 和 57.17° ,两者平均值为 59.95° 。在光子晶体光纤方位角为 60° 时,无截止单模光子晶体光纤轴向方位角正处于 ΓK 方向的位置。由此两曲线特征峰对应方位角的平均值,可用于判断无截止单模光子晶体光纤内部结构处于 ΓK 方向时的位置,且精确误差为 0.05° (即 $|59.95^\circ - 60^\circ|$)。

4 方法应用与对比分析

基于前向散射图案半幅散射条纹强度值求和确定法可实现光子晶体光纤方位角的确定,此方法用来验证大模场光子晶体光纤及混合结构光子晶体光纤方位角的确定,大模场光子晶体光纤外径 D 为 $125 \mu\text{m}$,空气孔直径 d 为 $1.32 \mu\text{m}$,空气孔之间的间距 Λ 为 $5.60 \mu\text{m}$;混合结构光子晶体光纤外径 D 为 $125 \mu\text{m}$,空气孔直径 d 为 $2.84 \mu\text{m}$,空气孔之间的间距 Λ 为 $3.88 \mu\text{m}$ 。

其结果图(如图 7 所示)显示,该方法实验结果同样能实现大模场光子晶体光纤以及混合结构光子晶体光纤轴向方位角为 ΓK 时的内部结构位置的确定,精确误差均小于 0.5° 。其中图 7(c)和(f)分别对应单模光纤结构示意图及实验结果图,单模光纤的散射图案上、下区域强度值总和在方位角变化时基本保持恒定,这是由于单模光纤轴向结构呈中心对称所致。

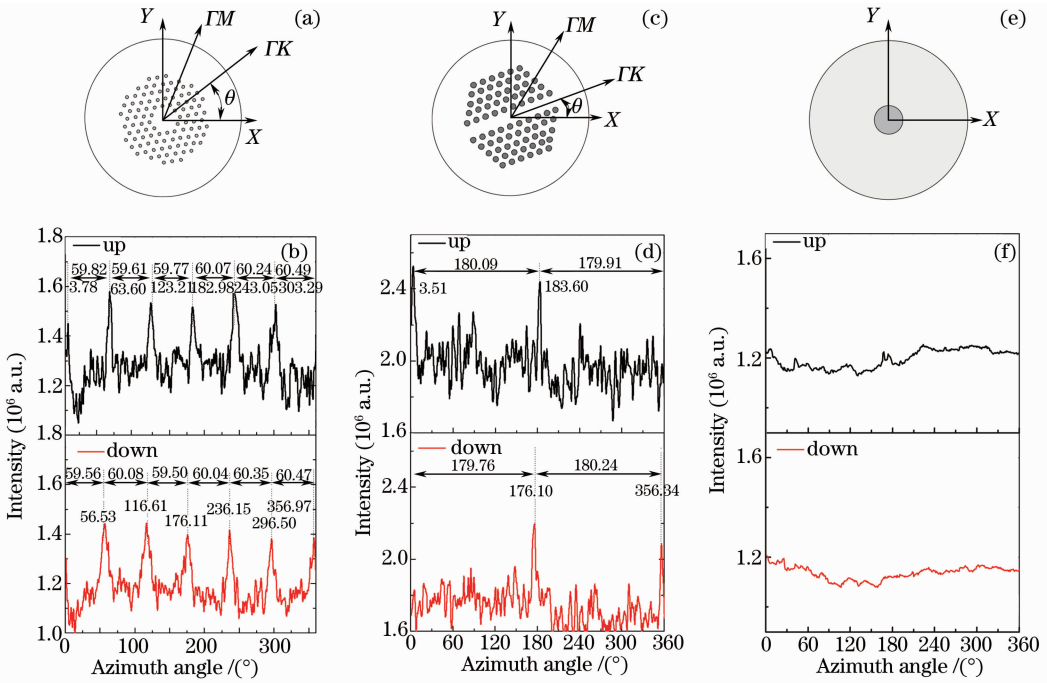


图 7 前向散射图案上、下区域强度值总和与光子晶体光纤方位角关系曲线。(a)、(b) 大模场光子晶体光纤；(c)、(d) 混合结构光子晶体光纤；(e)、(f) 单模光纤

Fig. 7 Relationship between the half-image summarized intensities of the forward scattering patterns and the azimuth angle. (a), (b) large-mode-area photonic crystal fiber; (c), (d) hybrid structure photonic crystal fiber; (e), (f) single-mode fiber

综上所述,提出的基于前向散射图案半幅散射条纹强度值求和确定法,能实现空气孔排列规律的光子晶体光纤特殊方位角的确定,并且验证了三种空气孔排列结构不同的光子晶体光纤特殊方位角的确定,且精确度均在 0.5° 以内。此基于前向散射图案半幅散射条纹强度值求和确定法,可用于实现空气孔排列规律的光子晶体光纤特殊方位角的确定。

5 结 论

利用激光垂直照射光子晶体光纤产生的前向散射图案的区域强度求和建立了特征值与光子晶体光纤轴向方位角的关系。针对散射图案中散射条纹的变化,提出三种特征值方法分析确定光子晶体光纤方位角,对比分析得出基于前向散射图案半幅散射条纹强度值求和可实现光子晶体光纤方位角确定。应用此方法分别对在三种光子晶体光纤方位角进行确定,其精确度均在 0.5° 之内,结合电机的控制还可实现光子晶体光纤其他方位角的选择及确定。通过单模光纤实验的对比分析可以证明,散射图案的变化确实是由于光子晶体光纤内部空气孔周期性结构所影响的,同时证明该方法适用于空气孔光子晶

体光纤方位角的确定。这种方法无破坏性、非接触、在线、无污染、处理方法简单、精度高、不受位置影响,适用于各种光子晶体光纤特殊方位角的确定,且在光子晶体光纤器件的制作加工过程中具有重要的应用前景。

参 考 文 献

- 1 P Russell. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.
- 2 Zhang Yin, Chen Mingyang, Zhang Yongkang. Investigation of a novel large-mode-area photonic crystal fiber transmission system and its transmission characteristics[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205001.
张 银, 陈明阳, 张永康. 新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205001.
- 3 Cao Ye, Wang Jiangyun, Tong Zhengrong. High birefringence and low confinement loss photonic crystal fiber with multiple zero dispersion points based on micro-structured core[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905005.
曹 晔, 王江韵, 童峥嵘. 基于微结构纤芯的超低损耗多零色散点的高双折射光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905005.
- 4 M Baumgartl, F Jansen, F Stutzki, et al.. High average and peak power femtosecond large-pitch photonic-crystal-fiber laser[J]. Opt Lett, 2011, 36(2): 244-246.
- 5 J Villatoro, V Finazzi, G Badenes, et al.. Highly sensitive sensors based on photonic crystal fiber modal interferometers[J]. Journal of Sensors, 2009.
- 6 O Levi, M M Lee, J Zhang, et al.. Sensitivity analysis of a

- photonic crystal structure for index-of-refraction sensing [C]. SPIE, 2007. 6447.
- 7 O Frazão, J L Santos, F M Araújo, *et al.*. Optical sensing with photonic crystal fibers[J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2008, 2(6): 449–459.
- 8 D J J Hu, J L Lim, Y Cui, *et al.*. Fabrication and characterization of a highly temperature sensitive device based on nematic liquid crystal-filled photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1248–1255.
- 9 Yinian Zhu, Ping Shum, Huiwen Bay, *et al.*. Strain-insensitive and high-temperature long-period gratings inscribed in photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(4): 367–369.
- 10 Tigran Baghdasaryan, Thomas Geernaert, Francis Berghmans, *et al.*. Geometrical study of a hexagonal lattice photonic crystal fiber for efficient femtosecond laser grating inscription[J]. *Opt Express*, 2011, 19(8): 7705–7716.
- 11 NanKuang Chen, Sien Chi. Influence of a holey cladding structure on spectral characteristics of side-polished endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(15): 2251–2253.
- 12 B H Lee, J B Eom, J Kim, *et al.*. Photonic crystal fiber coupler [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(10): 812–814.
- 13 Yu Jinbo, Chen Zhe, Luo Yunhan, *et al.*. A fused side-adhered optical fiber coupler based on side-polished fibers [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(5): 897–902.
余金波, 陈哲, 罗云瀚, 等. 基于侧边抛磨光纤的侧面熔粘耦合的光纤耦合器[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(5): 897–902.
- 14 Bi Weihong, Xu Rui, Fu Guangwei, *et al.*. Design of $40\times$ long working distance PCF splice system microscope objectives[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(1): 44–50.
毕卫红, 许睿, 付广伟, 等. 40 倍长工作距离 PCF 熔接系统显微物镜设计[J]. *光电工程*, 2013, 40(1): 44–50.
- 15 J Holdsworth, K Cook, J Canning, *et al.*. Rotationally variant grating writing in photonic crystal fibres[J]. *The Open Optics Journal*, 2009, 3(1): 19–23.
- 16 G D Marshall, D J Kan, A A Asatryan, *et al.*. Transverse coupling to the core of a photonic crystal fiber: The photo-inscription of gratings[J]. *Opt Express*, 2007, 15(12): 7876–7887.
- 17 J Petrovic, T Allsop. Scattering of the laser writing beam in photonic crystal fibre[J]. *Opt Laser Technol*, 2010, 42(7): 1172–1175.
- 18 Tigran Baghdasaryan, Thomas Geernaert, Martin Becker, *et al.*. Influence of fiber orientation on femtosecond Bragg grating inscription in pure silica microstructured optical fibers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(23): 1832–1834.
- 19 L Y Zang, T G Euser, M S Kang, *et al.*. Side-scattering analysis of structural rocking filters in photonic crystal fiber[C]. *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides*, 2010; BThC5.
- 20 L Y Zang, T G Euser, M S Kang, *et al.*. Structural analysis of photonic crystal fibers by side scattering of laser light[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(9): 1668–1670.
- 21 R D Meade, K D Brommer, A M Rappe, *et al.*. Existence of a photonic band gap in two dimensions[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 61(4): 495–497.
- 22 R Hillebrand, W Hergert, W Harms. Theoretical band gap studies of two-dimensional photonic crystals with varying column roundness[J]. *Physica Status Solidi B: Basic Research*, 2000, 217(2): 981–989.

栏目编辑:王晓琰