

doi: 10.3788/gzxb20144306.0606001

确定光子晶体光纤轴向方位角的侧视光强特征法

陈哲¹, 谢俊辛¹, 罗云瀚¹, 唐洁媛¹, 黄华才¹, 余新宇¹, 甘宏波¹,
马悦¹, 卫青松¹, 余健辉¹, 张军¹, 卢惠辉¹, 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, 广州 510632)

(2 华中科技大学 武汉国家光电实验室(筹), 武汉 430074)

摘 要:光子晶体光纤轴向方位角的确定在光纤器件的加工制作中具有重要的意义. 采用平行光侧向照射光子晶体光纤, 研究了六边形结构、混合结构以及大模场结构这三种光子晶体光纤, 获取其在不同轴向方位角时的侧视光强图像. 随着光纤绕轴向旋转, 其光强图像出现特定的亮纹光强特征, 通过分析得到亮纹光强特征值随光纤轴向旋转之间的变化关系, 发现其透射光强图像的光强特征值呈现周期性变化, 并与光纤空气孔结构有一定对应关系. 采用 Tracepro 仿真模拟三类光子晶体光纤的侧视光强图像特征, 在模拟侧视光强图像中, 也出现随轴向旋转变化的亮纹特征, 模拟侧视光强亮纹变化特征与实验亮纹特征具有相似的变化规律. 对比光子晶体光纤亮纹光强特征值随轴向方位角变化关系的实验曲线与模拟曲线, 发现当光源平行于光纤空气孔构成的近似六边形结构的顶角连线照射时, 其亮纹光强特征值出现极大值, 可以实现光子晶体在特定轴向方位角的定位.

关键词:光纤光学; 定轴方法; 侧视光强法; 光子晶体光纤; 光强特征值

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0606001-8

Determination of Azimuth Angle of Photonic Crystal Fiber by Characteristic Analysis of Side Transmission Images

CHEN Zhe¹, XIE Jun-xin¹, LUO Yun-han¹, TANG Jie-yuan¹, HUANG Hua-cai¹, YU Xin-yu¹,
GAN Hong-bo¹, MA Yue¹, WEI Qing-song¹, YU Jian-hui¹, ZHANG Jun¹, LU Hui-hui¹,
PENG Jing-gang²

(1 Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong
Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

(2 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China)

Abstract: Determination of azimuth angle of photonic crystal fiber is essential in the fabrication of devices based on photonic crystal fiber. The side images of hexagonal, hybrid and large mode area-20 structures of photonic crystal fibers were studied by illuminating the side of photonic crystal fibers vertically. The side images vary with the rotation of the fibers, and they display special light intensity characteristics. The characteristic values of images show periodic variation, which is corresponding with the inner structure of photonic crystal fibers. Simulation analysis for photonic crystal fibers were made by Tracepro software, the results of simulation show that the characteristic values of side images change with the rotation of fiber, and they perform the similar features with the experimental research. Compared with the

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61177075, 11004086, 61008057)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(Nos. 2012A032300016, 2012A080302004)、中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. 21612437, 21613405, 21613325)、广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(No. LYM10024)和深圳市光纤传感网技术工程实验室开放基金(No. SZELOFSN-201301)资助

第一作者:陈哲(1957—),男,博士,教授,主要研究方向为新型光纤无源器件、光纤通信与光纤传感技术、光电检测技术、光学设计与仿真等. Email: thzhechen@jun.edu.cn

通讯作者:罗云瀚(1979—),男,博士,副研究员,主要研究方向为新型光纤无源器件、光电传感、生物医学光子学和微流光学传感等. Email: yunhanluo@163.com

收稿日期:2014-02-28; **录用日期:**2014-05-06

<http://www.photon.ac.cn>

characteristic curve of the experimental and the simulation results, the characteristic values has maxima values around the vertex direction of hexagonal structure formed by air holes, and it can be used to distinguish azimuth angle of photonic crystal fibers.

Key words: Fiber optics; Method to determine azimuth angle; Side transmission; Photonic crystal fibers; Characteristic value of light intensity

OCIS Codes: 060.2340; 060.5295; 050.2770; 050.5298

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)又称多孔光纤或微结构光纤^[1-2],通常以纯石英或聚合物等材料为基底,在光纤的横截面上具有二维周期性折射率分布(空气孔或高折射率柱),而沿光纤长度方向折射率分布不变.由于 PCF 具有无截止单模传输、可调节的色散、高双折射、大模场面积和高非线性等优异的光学特性,PCF 及其器件的研究已成为光通信和光电子领域的热点,可以应用于 PCF 激光器、模间干涉传感器、超宽色散补偿等多个方面^[3-7]. PCF 横截面中心区域的空气孔排列规则性决定 PCF 中光传输特性,是 PCF 制作中质量控制的重要因素.此外,在 PCF 器件的制作中,如 PCF 侧边抛磨^[8]、耦合器制作、PCF 光栅刻写^[9-12],都需要精确地调节 PCF 处于某些特定的轴向方位角位置.研究表明在对 PCF 采用侧边抛磨加工时,不同的侧面抛磨加工之后的 PCF 具有不同的光传输模式^[8].

PCF 的轴向方位角的确定目前主要采用有损、非在线的方式,如截取一段 PCF,用显微镜或者电镜观察光纤的横截面.因此,有必要研究一种用于确定 PCF 内部空气孔轴向方位角的无损、非接触、在线确定的方法.陈少英等采用侧视光强法分析研究熊猫型保偏光纤,用于确定保偏光纤的快轴、慢轴^[13-14]. L. Y. Zang 等利用 He-Ne 激光垂直于 PCF 轴向照射,分析 PCF 的内部微结构^[15],但该方法需要向 PCF 的空气孔中灌注折射率匹配液,从而会导致光纤的污染.

本文采用侧视光照射 PCF,分别对 3 类 PCF 的侧视光强特征随轴向方位角变化特征进行了实验研究与仿真模拟.结果表明仿真和实验具有相似的光强特征,并与 PCF 内部空气孔结构特征相吻合,依据 PCF 侧视图像中的最大亮纹光强特征值可确定 PCF 的特定轴向方位角.

1 侧视成像实验原理

图 1 是基于侧视光强分布特征确定 PCF 轴向方位角方法的实验原理图.非相干光经过准直后垂直于光纤轴向照射 PCF,光在光纤表面及光纤内部发生一系列的反射、折射、散射等,从 PCF 的另一侧面透射出去,形成特定的侧视图像.PCF 可以看作是由一个大圆柱透镜和内部有许多微结构空气孔的小圆柱形透镜组

成.PCF 作为圆柱形透镜有自身的焦点,对入射非相干平行光具有复合圆柱形透镜的作用,在光线前进方向上,位于 PCF 另一侧距离光纤一定位置处的观测面上,将会形成一定的图案模式.随着 PCF 轴向旋转,其内部空气孔阵列与入射平行光的相对位置发生改变,其侧视光强图像及特征也会发生变化.因此,在距离光纤 L 位置处放置一透镜,采集 PCF 的侧视光强图像会聚到 CCD,通过分析侧视光强图像的特征,可以确定 PCF 空气孔的轴向方位角.

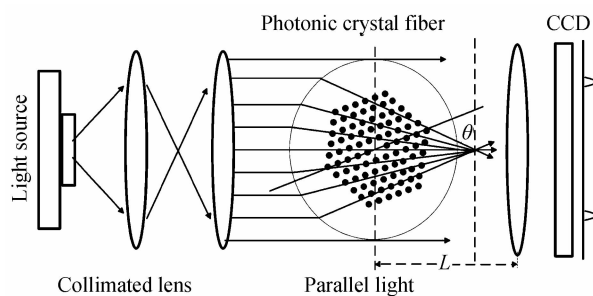
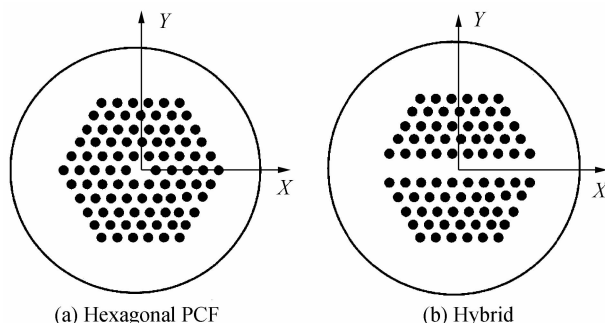


图 1 基于侧视光强分布确定 PCF 轴向方位角的实验原理
Fig. 1 Schematic for determining azimuth angle of PCF by side transmission

2 侧视成像实验研究与结果分析

根据确定 PCF 轴向方位角的需要,实验分析了六边形结构(Hexagonal PCF)^[16]、混合结构(Hybrid PCF)^[17]、大模场(Large Mode Area-20 PCF, LMA-20)^[18]等光纤的侧视光强图像.图 2(a)~(c)为对应三种 PCF 的横截面示意图,作为对比也研究了单模光纤(如图 2(d)),三种 PCF 横截面上微结构空气孔排列近似六边形结构,因此可定义某两个相对顶角的连线方向为起始方位角方向,即 0° 轴向方位角方向,如图 2 中 X 轴方向.逆时针旋转任意角度,起始方位角方向与 X 轴的夹角为 θ ,如图 1.因为单模光纤横截面是圆周对称的,故定义过横截面中心沿着任一直径方向为起始方位角方向.



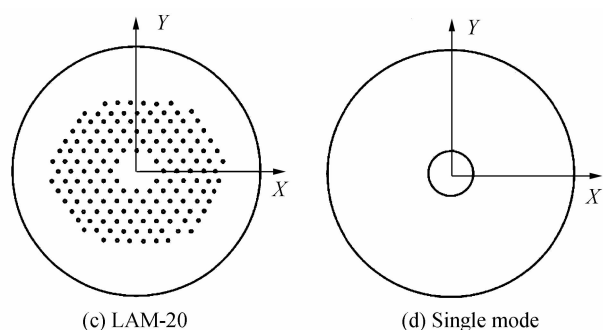


图2 不同光子晶体光纤和单模光纤横截面示意图
Fig. 2 Cross section of the different fibers

2.1 实验方法与特征量选取

采用显微镜作为实验平台,将去掉保护层的光纤,固定于绕光纤芯轴旋转的旋转台上,使用步进电机驱动光纤旋转台,步进电机每旋转一次的角度间隔为 0.5° .图1所示的光源、显微镜以及CCD相机均为显微镜自带.

图3(a)~(d)为六边形PCF处于 0° 、 20° 、 40° 、 60° 轴向方位角时对应的侧视光强图像,当光纤处于 0° 或 60° 轴

向方位角时,平行于光纤轴向方向,有两条明显的亮纹分布在距离光纤边缘一定位置处,而且亮纹的光强随着六边形PCF绕轴向的旋转而变化.图像已经采取平滑滤波处理,减小实验光源变化带来的误差以及光斑噪声的干扰.选取侧视图像中覆盖光纤的一个固定位置区域,如图3方形虚线框,水平方向(即垂直于光纤轴向方向)取140个像素,而沿着光纤轴向方向,即竖直方向取100个像素,将每一列的100个像素对应的灰度值分别取平均值,作为对应所在列的相对光强灰度值,得到如图3(e)~(h)所示的处于 0° 、 20° 、 40° 、 60° 轴向方位角时,对应的相对侧视光强灰度值分布(灰度值变化范围 $0\sim 255$)实验曲线,分布曲线左右两边缘灰度值约为250的区域表示光纤边缘之外的区域;在光纤区域内,分布曲线有两个突起的极大值区域,这对应亮纹的位置.在图3中,可以看到二条亮纹的光强度都是随着光纤旋转而变化的,因为随着PCF的旋转,PCF内部空气孔的空间位置也会随着光纤旋转而发生变化,垂直于PCF轴向的入射光的散射也会发生相应变化.

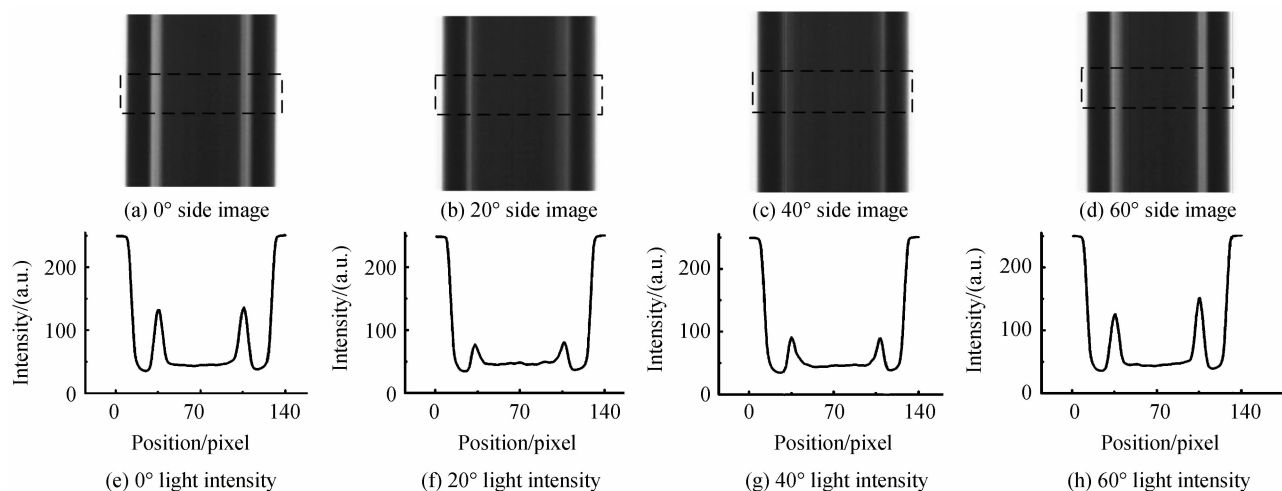


图3 六边形PCF在不同轴向方位角对应的侧视光强图像和横向光强分布曲线

Fig. 3 Side images and the corresponding horizontal intensity distribution of the hexagonal PCF at different azimuth angle

如图4(a)~(d)所示为实验中三种PCF及单模光纤在 0° 轴向方位角时的侧视光强图像,图4(e)~(h)为对应的横向光强分布曲线.实验结果表明,各类PCF的侧视光强实验图像具有共同特点:即随着这些PCF绕轴向的旋转,其侧视光强图像中亮纹随着光纤的旋转而变化.对于六边形PCF,取侧视光强图像中沿着轴向距离光纤两边缘一定距离的两条亮纹区域各自最大相对光强灰度值的平均值,作为六边形PCF在对应轴向方位角时的亮纹相对光强特征值.对于Hybrid光纤,沿着光纤轴向方向的图像中也有两条亮纹分别分布在距离光纤边缘的一定位置处,但是随着光纤绕轴向的旋转,两条亮纹光强度的变化不是很明显,反而是在沿着光纤轴向的中心区域,当光纤旋转到某些特殊角度时出现亮纹特征,且亮纹的光强度相比周围特别

大,而当光纤旋转到其他轴向方位角时,光纤中心区域的相对光强灰度值和周围没有明显的差别,所以取Hybrid侧视光强图像中的中心区域最大相对光强灰度值的平均值,作为Hybrid在对应轴向方位角度的亮纹相对光强特征值.而在LMA-20的侧视光强图像中,沿着光纤轴向方向,当其处于某些特定的轴向方位角时,光纤中心区域亮纹的灰度值比较大,而在其它轴向方位角位置时,光纤中心区域亮纹光强灰度值相比于周围区域的光强灰度值变化不是很明显,取LMA-20侧视光强图像中的中心区域最大相对光强灰度值的平均值,作为LMA-20在对应轴向方位角度的亮纹相对光强特征值.对于单模光纤,在沿着光纤轴向方向的图像中,位于光纤中心区域有一条亮纹,且随着光纤绕轴向的旋转,亮纹光强度变化不是很明显,取中心

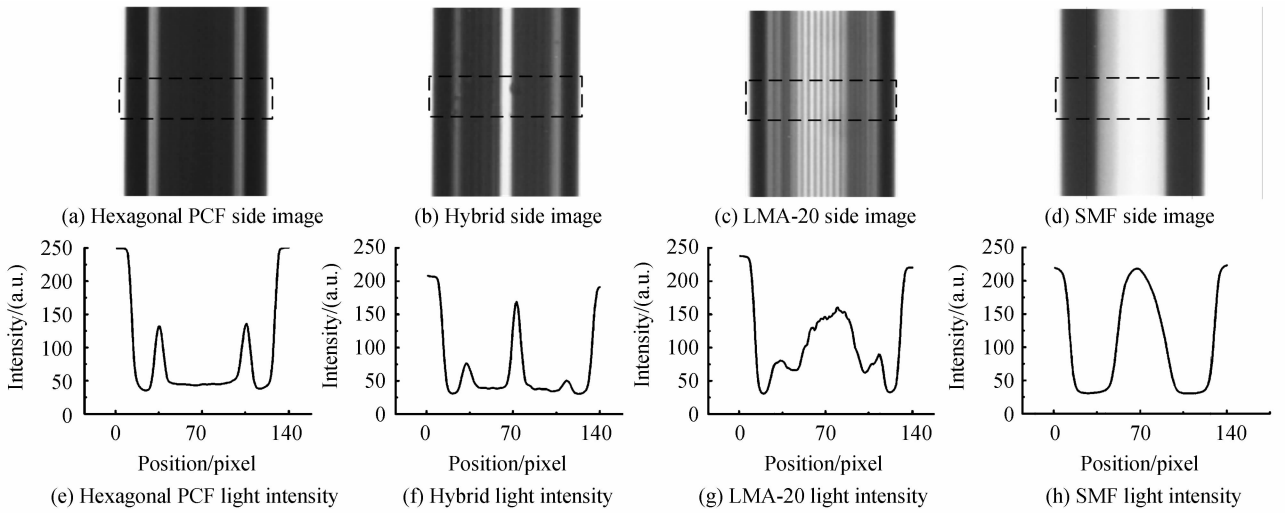


图4 在0°轴向方位角时不同光纤的侧视图像及横向光强分布曲线

Fig. 4 Side images and the corresponding intensity distribution for different fibers at the azimuth angle of 0°

区域最大相对光强灰度值的平均值,作为单模光纤在对应轴向方位角时的亮纹光强特征值。

确定 PCF 和单模光纤实验侧视图像中亮纹光强特征值计算公式为

$$\langle I \rangle = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij}}{M \times N} \quad (1)$$

式中 P_{ij} 表示光纤侧视图像中所选区域第 i 行、第 j 列的亮纹灰度值, M 为所取亮纹的水平宽度(单位为像素个数), N 为所取亮纹竖直方向宽度(单位为像素个数),亮纹光强特征值 $\langle I \rangle$ 为所求光纤亮纹区域光强灰度值的平均值,即为所分析的 PCF 的侧视光强的特征值。

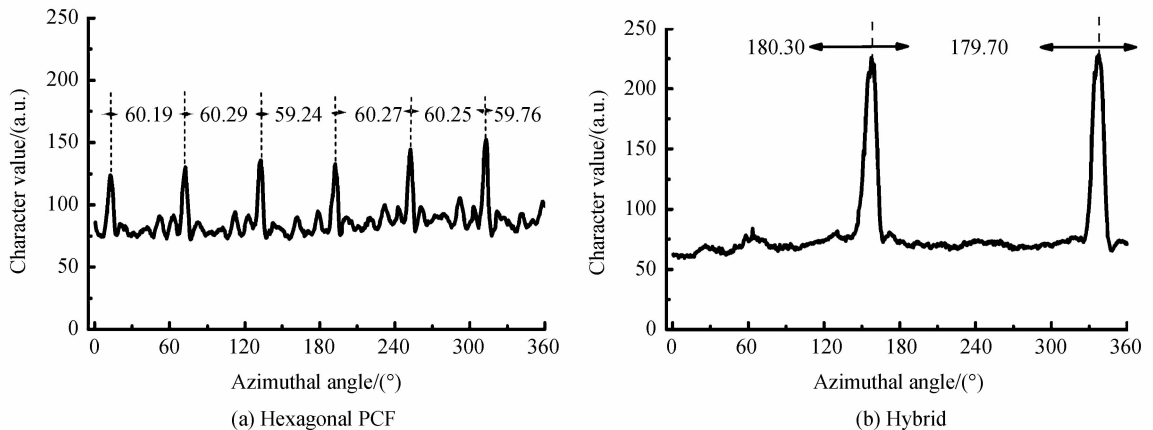
2.2 实验亮纹特征量随 PCF 轴向旋转变化的关系

根据 3 种 PCF 与单模光纤在 360°空间中的侧视光强图像亮纹光强特征值与光纤旋转的角度关系,实验测得亮纹光强特征值随光纤轴向方位角变化的实验关系曲线如图 5。随着光纤的旋转,PCF 亮纹光强特征值出现周期性的极大值,六边形 PCF 出现亮纹极大值

的周期约为 60°(图 8(a)), Hybrid 的周期约为 180°(图 8(b)), LMA-20 的周期约为 60°(图 8(c))。而在两相邻亮纹极大值之间,实验亮纹光强特征值相对小一些。单模光纤由于纤芯具有圆对称性,其亮纹光强特征值在不同轴向方位角时没有明显变化(图 8(d)),图 8(d)中的曲线起伏为测试中的光源强度噪声等引起。

3 仿真结果与特征量分析

由图 5(a)~(c)可知光子晶体光纤在某些特定的轴向方位角度位置光强特征值特别大,为了确定侧视图像中亮纹光强特征值特别大时对应的轴向方位角度,可以使用简化的光学仿真模型来模拟 3 种 PCF 的侧视光强图像随轴向方位角度变化关系。仿真计算采用 Tracepro 软件(LMAbda Research Com.)中的光线追迹方法,分别对图 2 所示结构的光纤进行模拟仿真。模拟中光源为 40 万条平行光线,由于光纤的透镜作用,经过光纤的光线具有会聚性,调节合适的成像距离 L ,通过统计在观测面上的光线数得到侧视光强分布,



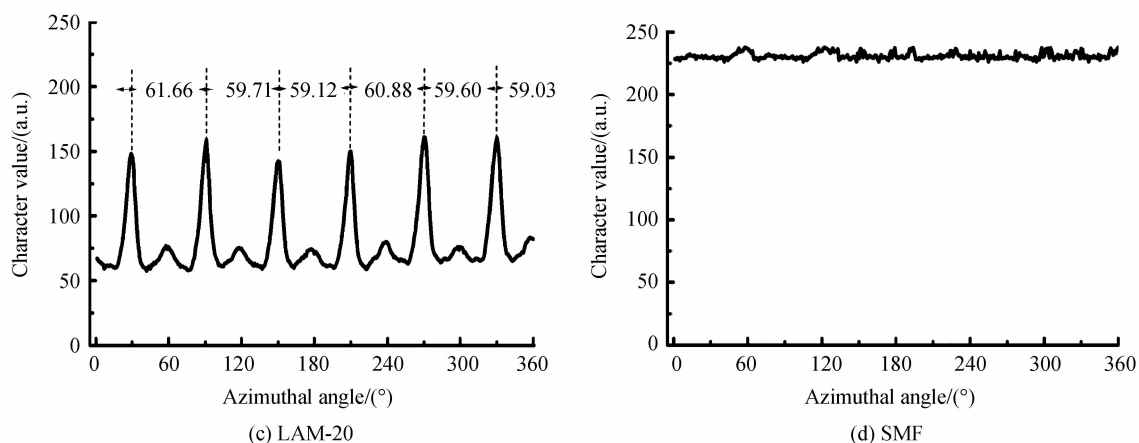


图 5 光强特征值随轴向方位角度变化关系的实验曲线
Fig. 5 Experimental results of the characteristic value with varying azimuth angle

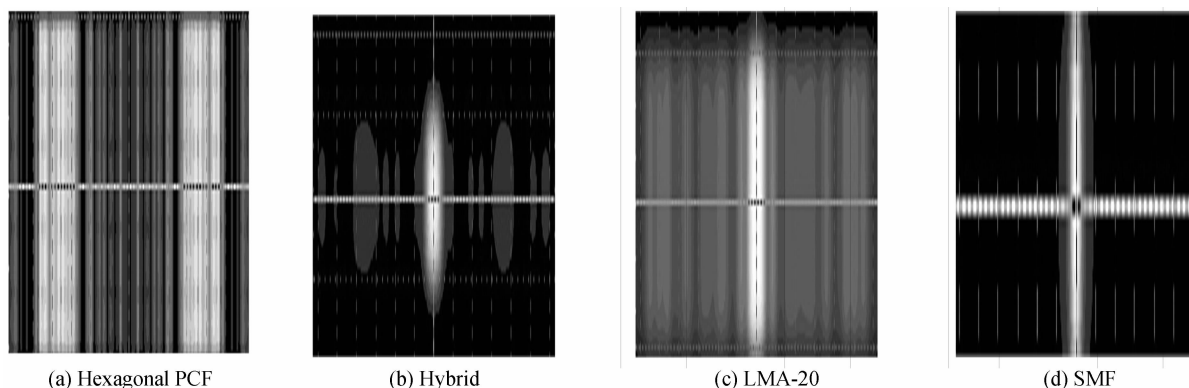


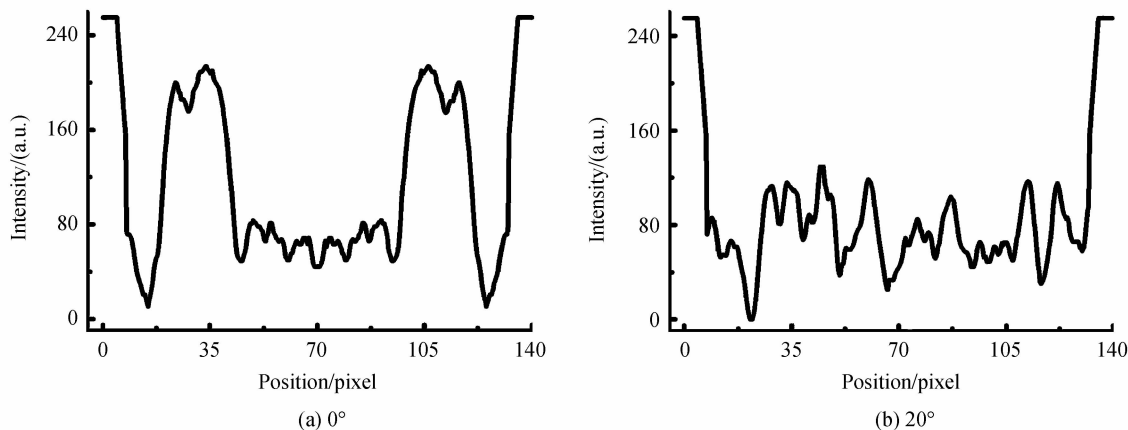
图 6 三种 PCF 和单模光纤在 0° 轴向方位角时模拟侧视光强图

Fig. 6 Simulation of side images to fibers at the azimuth angle 0° in the axial direction

每次逆时针转动光纤 1°, 获得 360 张侧视光强的分布图. 实验结果如图 6, 对于 Hybrid、LMA-20, 在它们的模拟侧视光强图像中, 当光纤处于某些特殊的轴向方位角时, 沿着光纤轴向位于光纤中心区域有一条亮纹, 而在其它轴向方位角时中心区域的亮纹不明显. 此外, 类似于六边形 PCF 的侧视光强图像, 在沿着光纤轴向距离光纤边缘一定位置处也分布有两条亮纹, 但是其亮纹灰度值比 Hybrid、LMA-20 在特殊轴向方位角位置时的值小很多, 而且随着 Hybrid、LMA-20 的旋转, 这两条亮纹灰度值变化不明显, 因此取 Hybrid、

LMA-20 侧视图像中光纤中心区域固定位置的亮纹灰度值作为它们各自的亮纹光强特征值. 而对于单模光纤, 在它的侧视光强图像中, 沿着光纤轴向位于光纤中心区域位置也有亮纹, 将这条亮纹的光强灰度平均值作为单模光纤的亮纹光强特征值.

图 7 为六边形 PCF 处于 0°、20°、40°、60° 轴向方位角时的侧视光强分布图. 图 7(a) 对应六边形 PCF 处于 0° 轴向方位角位置的光强分布曲线, 曲线有两个明显的突起部分, 它对应为观测面上沿着轴向距离光纤边缘一定位置分布的两条亮纹, 随着 PCF 绕轴向旋转,



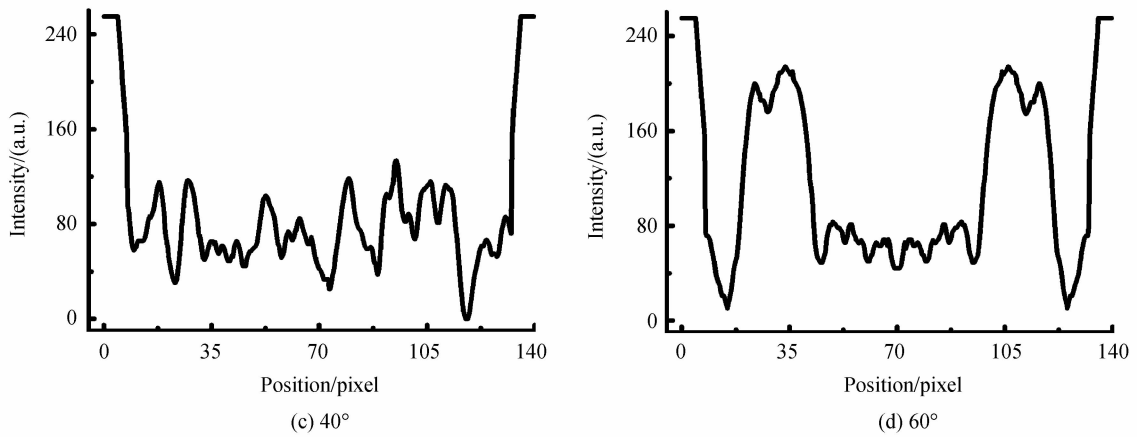


图 7 六边形 PCF 在不同方位角时模拟侧视光强值分布
Fig. 7 Side transmission distribution of the hexagonal PCF at different azimuth angles

观测面上的侧视光强图像亮纹的光强度也在发生变化,对应亮纹的位置只发生微小的变化.当轴向方位角为 60° 时,图 7(d) 的图形又恢复到具有对成性的两条亮纹.当平行光前进方向平行于六边形 PCF 的六边形空气孔的某两个顶角连线方向时,在观测面上的两条亮纹光强度较大,相对光强度灰度值约为 210,而在其他轴向方位角时这两条亮纹光强度小很多,平均相对光强度灰度值主要在 100 左右,可以将这两条亮纹光强灰度值的平均值作为光强特征值.

三种 PCF 以及单模光纤的仿真亮纹光强特征值

随轴向方位角变化关系曲线,如图 8. 光纤在 360° 空间轴向旋转过程中,六边形 PCF、Hybrid、LMA-20 在 0° 轴向方位角,分别每隔 60° 、 180° 、 60° 周期,它们的亮纹光强特征值出现一次极大值,该极大值的位置对应着 PCF 的 0° 轴向方位角,利用这一关系就可以找出 PCF 的 0° 轴向方位角.由图 8(d) 可知单模光纤在不同轴向的亮纹光强特征值没有变化,这是由于单模光纤内部除纤芯外不具有用来改变光线传输的微结构区域.仿真图中小周期的光强分布对应着 PCF 内部的孔之间的周期性对称结构.

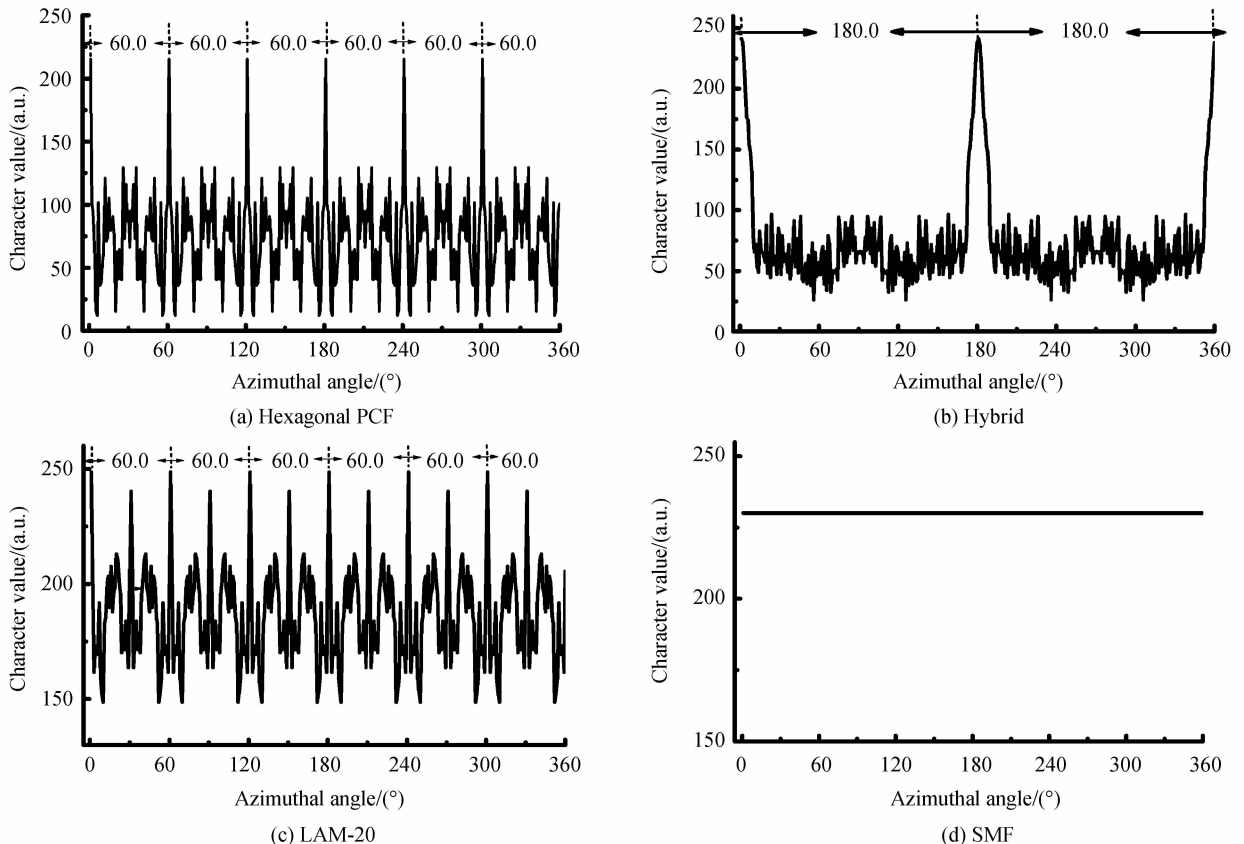


图 8 光强特征值随轴向方位角度变化关系的模拟曲线
Fig. 8 Characteristic value of simulation curve in different azimuth angle

4 实验与模拟仿真结果分析与讨论

六边形 PCF 内部空气孔横截面呈正六边形,有 6 个周期,在实验侧视光强图像中(图 4(a)),沿着光纤轴向距离光纤边缘一定位置有两条亮纹,且随着光纤的旋转,亮纹的光强也发生变化.在模拟侧视图像中(图 7(a)),当光源的照射方向平行于六边形 PCF 内部空气孔的顶角连线方向时,侧视图像中的亮纹灰度值特别大,而当光纤旋转到其他轴向方位角时,亮纹灰度值则小很多.对比图 5(a)与图 8(a),在 360° 空间中曲线整体变化具有相似性,模拟曲线每隔 60° 周期就会出现一个亮纹灰度极大值点,实验曲线大约每隔 60° 周期也会出现一个亮纹灰度极大值点.因此在实验中的这些特征量为极大值的点所对应的轴向方位角方向,就可以作为六边形 PCF 内部六边形空气孔二个相对顶角的对角线方向.

Hybrid 光纤横截面中心区域空气孔分布类似于六边形结构分布,即沿 0° 轴向方位角方向出现了空气孔缺失.在其模拟仿真和实验侧视光强图像中,沿着光纤轴向距离光纤边缘一定位置有两条亮纹,在某些特殊角度位于光纤中心区域有亮纹,且随着光纤的旋转,亮纹的光强也发生变化.在模拟侧视图像中,当光源的照射方向平行于 Hybrid 内部空气孔缺失的方向时,侧视图像中的亮纹光强特征值特别大,而当光纤旋转到其他轴向方位角时,亮纹灰度值则要小很多.对比图 5(b)与图 8(b),在 360° 空间中曲线整体变化具有相似性,模拟曲线每隔 180° 周期就会出现一个亮纹光强特征值极大值点,考虑到光纤制作中的误差,实验曲线中,大约每隔 180° 周期也会出现一个亮纹光强特征值极大值点.因此实验中的这些光强特征量为极大值的点所对应的方向,就可以作为 Hybrid 内部空气孔缺失的方向.

对于 LMA-20,其内部空气孔横截面也呈现正六边形,只是在六边形顶角位置处的空气孔出现缺失,有 6 个周期,在其模拟仿真和实验侧视光强图像中,沿着光纤轴向位于光纤中心区域有亮纹,且随着光纤的旋转,亮纹的光强也发生变化,在模拟侧视图像中,当光源的照射方向平行于 LMA-20 内部空气孔六边形顶角连线方向时,侧视图像中的亮纹灰度值特别大,而当光纤旋转到其他轴向方位角时,亮纹灰度值则小很多.对比图 5(c)与图 8(c),在 360° 空间中曲线整体变化具有相似性,模拟曲线每隔 60° 周期就会出现一个亮纹灰度极大值点,而在实验曲线中,大约每隔 60° 周期也会出现一个亮纹灰度极大值点.因此实验中这些特征量为极大值的点所对应的方向,就可以作为 LMA-20 内部六边形(顶角位置空气孔缺失)空气孔二个相对棱角的对角线方向.单模光纤内部成中心对称,其模拟侧

视图像的亮纹灰度值没有变化,实验中单模光纤侧视图像亮纹灰度值随轴向方位角度变化关系曲线具有微小的波动,对比图 5(d)与图 8(d),在各个轴向方位角的侧视光强亮纹灰度值差别很小,这也正与单模光纤内部结构成中心对称性相关.

由实验测试和模拟仿真可知对于所测试的三种 PCF 光强亮纹极大值点均对应 0° 轴向方位角,再利用机械旋转的方法可以实现任意方位角的定位.对比图 5 和图 8,可以发现在仿真结果中亮纹光强特征值的极大值间隔严格反映 PCF 的周期结构,而在实验测试结果中存在偏差.经计算得出图 5(a)~(c)中的平均偏差分别为 0.33° 、 0.3° 和 0.84° .误差主要来源于步进电机的旋转、光源光强度的微小波动,以及实验所用的实际光纤内部空气孔结构和标准周期性相比存在的制作误差.

5 结论

提出了一种无破坏性、无污染、在线的 PCF 轴向方位角的确定方法,采用非相干光源照射光纤,用 CCD 记录经过光纤透射后的侧视图像,通过选取侧视图案中的亮纹光强特征值,建立光强特征值与轴线方位角的关系,以此确定轴向方位角.采用数值模拟和实验测试了三种 PCF 以及作为对比的单模光纤,研究结果表明,亮纹光强特征值的极大值对应 PCF 的轴向 0° 方位角,以此为参照位置,可实现任意角度的定位.模拟仿真中轴向方位角的定位完全符合光纤的横截面周期型结构,经多次重复实验测试,在 PCF 非完全标准的情况下得到测试平均偏差在 1° 以内.

所提出的侧视光强图像法和图像亮纹光强特征值的选取,能有效地解决 PCF 加工制作(如侧边抛磨、刻写光栅)中的轴向方位角定位问题.此外,对侧视图像的深入分析还能提供 PCF 很多重要的结构信息,如结构的周期性、均匀性、空气孔的大小、占空比等,这也将为实现 PCF 的无损、无接触、在线质量检测提供一种潜在的方法.

参考文献

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, CREGAN R F, *et al.* Large mode area photonic crystal fibre[J]. *Electronics Letters*, 1998, **34**(13): 1347-1348.
- [2] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358-362.
- [3] LIMPET J, SCHMIDT O, ROTHHARDT J, *et al.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 2715-2720.
- [4] CHOI H Y, KIM M J, LEE B H. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(9): 5711-5720.
- [5] SHEN L P, HUANG W P, CHEN G X, *et al.* Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(4): 540-542.

- [6] HASSANI A, SKOROBOGATIY M. Photonic crystal fiber-based plasmonic sensors for the detection of biolayer thickness [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2009, **26**(8): 1550-1557.
- [7] FRAZAO O, SANTOS J L, ARAUJO F M, *et al.* Optical sensing with photonic crystal fibers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, **2**(6): 449-459.
- [8] HE Xiao-li, CHEN Zhe, YU Jian-hui, *et al.* Numerical analysis of optical propagation characteristics of side-polished photonics crystal fiber [J/OL]. *Optical and Quantum Electronics*, <http://link.springer.com/article/10.1007/s11082-013-9834-6>.
- [9] YU Jin-bo, CHEN Zhe, LUO Yun-han, *et al.* A fused side-adhered optical fiber coupler based on side-polished fibers[J]. *Journal of 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.
- [10] ZHU Ri-dan, LUO Ai-ping, WANG Xu-de, *et al.* Broadband directional coupler based on dual core PCF[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1810-1814.
朱日丹, 罗爱平, 汪徐德, 等. 双芯光子晶体光纤宽带定向耦合器研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1810-1814.
- [11] CHEN Zhe, CUI Fei, ZENG Ying-xin. Theoretical analysis on optical propagation characteristics of side-polished fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 918-923.
陈哲, 崔菲, 曾应新. 侧边抛磨光纤波导传输特性的理论分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 918-923.
- [12] QI Yue-feng, BI Wei-hong, LIU Yan-yan, *et al.* Research on transmission spectrum characteristics of the photonic crystal bragg fiber Grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1178-1183.
齐跃峰, 毕卫红, 刘燕燕, 等. 光子晶体光纤布拉格光栅传输谱特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1178-1183.
- [13] CHEN Shao-ying, DI Hong-wei, CHEN Zhe, *et al.* Azimuth alignment method for pm fiber based on light intensity distributions with five finger profile [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(1): 35-38.
陈少英, 狄红卫, 陈哲, 等. 基于五指型光强分布的保偏光纤定轴方法[J]. *应用激光*, 2006, **26**(1): 35-38.
- [14] HUANG Lin-sheng, ZHANG Jun, CHEN Zhe, *et al.* Simulation and experiments analysis of azimuth aligning technology for polarization maintaining fiber[J]. *Infrared and Laser Engineer*, 2010, **39**(2): 279-284.
黄林盛, 张军, 陈哲, 等. 保偏光纤定轴技术的仿真及实验分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(2): 279-284.
- [15] ZANG L Y, EUSER T G, KANG M S, *et al.* Structural analysis of photonic crystal fibers by side scattering of laser light[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(9): 1668-1670.
- [16] DONG L, MCKAY H A, FU L, *et al.* All-glass endless single-mode photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(21): 2440-2442.
- [17] ARISMAR CERQUEIRA S, JR, CORDEIRO C M B, LUAN F, *et al.* Hybrid photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(2): 926-931.
- [18] MORTENSEN N A, NIELSEN M D, FOLKENBERG J R, *et al.* Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(6): 393-395.