

侧边抛磨光子晶体光纤传输特性理论分析

何小莉¹ 陈哲^{1,2} 余健辉^{1,2*} 曾应新¹ 罗云瀚^{1,2} 张军^{1,2} 唐洁媛^{1,2}
卫青松¹ 谢俊辛¹ 黄华才¹

(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暨南大学光电工程研究所, 广东 广州 510632)

摘要 在建立了侧边抛磨光子晶体光纤 D 型光纤光学模型的基础上, 采用三维有限差分光束传输法计算和分析了侧边抛磨光子晶体光纤的光功率衰减、传输模场等与抛磨区几何参数(剩余半径、轴向旋转角、侧边抛磨区长度)的变化关系。结果表明, 当剩余半径大于 $-1.5 \mu\text{m}$ 时, 侧边抛磨光子晶体光纤的光功率衰减随着剩余半径的减小而增大; 光沿着光纤传输时, 基模光传输到抛磨区光功率发生衰减, 经过抛磨区后, 基模光功率出现回升。沿不同的轴向旋转角方向侧边抛磨, 剩余半径大于 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 侧边抛磨光子晶体光纤的光功率衰减随着剩余半径变化的差别较小; 剩余半径足够小时, 光沿着光纤传输到抛磨区时, 会产生高阶模, 沿轴向旋转角 $\theta=30^\circ$ 侧边抛磨时基模模场分布分散程度最大, 且在抛磨区产生更多的高阶模。剩余半径大于 $1.5 \mu\text{m}$ 时, 抛磨光纤长度变化对输出光功率影响很小, 剩余半径小于 $1.5 \mu\text{m}$ 时, 输出光功率透射率随着光纤抛磨长度的变化呈振荡变化。分析结果可为侧边抛磨光子晶体光纤的器件制作提供理论指导。

关键词 光纤光学; 侧边抛磨光子晶体光纤; 有限差分光束传输法; 光功率衰减; 传输模场

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0306003

Theoretical Analysis of Optical Propagation Characteristics of Side-Polished Photonic Crystal Fiber

He Xiaoli¹ Chen Zhe^{1,2} Yu Jianhui^{1,2} Zeng Yingxin¹ Luo Yunhan^{1,2}
Zhang Jun^{1,2} Tang Jieyuan^{1,2} Wei Qingsong¹ Xie Junxin¹ Huang Huacai¹

(¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)
²Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

Abstract Based on the optical model of D type of side-polished photonic crystal fiber (SPPCF), both the attenuation of optical power and the field distribution of propagation modes in the device of SPPCF are calculated and analyzed with the variation of geometry factors, such as residual radius after side polishing, axial rotation angle, and the length of side-polished area, by using three-dimensional finite difference beam propagation method (FDBPM). The analysis results show that when the residual radius is longer than $-1.5 \mu\text{m}$, the shorter the residual radius is, the larger the attenuation of the optical power in SPPCF is; the optical power of LP_{01} mode of the SPPCF is attenuated in the side-polished area, and recovered after light passes through the side-polished area. When the residual radius is longer than $0.5 \mu\text{m}$, there is a small difference between the attenuations of optical power of PCFs polished at

收稿日期: 2013-09-10; **收到修改稿日期**: 2013-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61177075, 11004086, 61008057)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(2012A032300016)、中央高校基本科研业务费专项资金(21612437, 21613405)、广东高校优秀青年创新人才培养计划(LYM10024)

作者简介: 何小莉(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事新型光纤无源器件方面的研究。E-mail: jasmine660@163.com

导师简介: 陈哲(1957—), 男, 博士, 教授, 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、光学设计以及光学仿真计算等方面的研究。E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: kensomyu@gmail.com

different axial rotation angles. When the residual radius is small enough, high order modes appear during the process of the light passing through the side-polished area. The mode field distribution is the most dispersive one and many high order modes appear in side polished area when the axial rotation angle is 30° . When the residual radius is longer than $1.5 \mu\text{m}$, the change of the side-polished length has a little impact on the attenuation of optical power in SPPCF; when the residual radius is shorter than $1.5 \mu\text{m}$, the attenuation of optical power changes in oscillation as the side-polished length varies. The analysis may provide a theoretic guide to device fabrication of SPPCF.

Key words fiber optics; side-polished photonic crystal fiber; finite difference beam propagation method; attenuation of optical power; propagation mode field

OCIS codes 060.2310; 060.2270; 060.4005

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)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的周期性折射率分布(空气孔或高折射率柱),而沿光纤长度方向折射率分布不变。PCF 主要分为折射率导光型和光子带隙导光型。由于 PCF 具有无截止单模传输特性、可调节的色散特性、高双折射特性、大模场面积和高非线性特性等优异的光学特性^[1],PCF 及其器件的研究已成为光通信和光电子领域科学家们关注的热点,可以应用在光纤传感器、光子晶体天线、超宽色散补偿、光学集成电路等多个方面^[2-5]。

侧边抛磨光子晶体光纤(SPPCF)是在光纤侧边抛磨技术的基础上实现的。利用光学微加工技术,将一定长度的圆柱形的光纤抛磨掉一部分制成抛磨光纤侧边,其中抛磨过的那段光纤横截面相似于大写字母 D,未抛磨过的光纤仍是圆柱形。在抛磨区形成 PCF 传输光的“窗口”,在此“窗口”处,人们就可以利用倏逝场来激发、控制、探测 PCF 中的传输光波。对 PCF 的侧边抛磨破坏了完整 PCF 的无截止单模传输特性。目前,已经提出利用 SPPCF 设计实现如光纤传感器、光纤耦合器、表面等离子共振(SPR)传感器等^[6-7]各种新型光纤器件的计算方案和实验。例如,王闵等^[8]用软件 MODE SOLUTIONS 的时域有限差分法(FDTD),结合完全匹配层(PML)吸收边界条件对一种单圈环形分布 SPPCF 在不同抛磨厚度和不同环境介质折射率条件下的光学特性进行了模拟计算;Hua 等^[9]通过模拟计算利用 SPPCF 在可见光到近红外的波段下设计实现了光纤耦合器;Kim 等^[10]制作了可调耦合率的侧边抛磨光子晶体光纤耦合器,可调耦合率范围 $0\% \sim 90\%$ 。现有的研究主要集中于利用 SPPCF 制作新型器件,但随着 SPPCF 应用的开展,研究中开始需要在制作 SPPCF 时对工艺参数进行预测和控制,例如制作基于 SPPCF 的光子晶体光纤耦合器,以及光子晶体光纤表面等离子激元生化传感器

时,就需要特殊的 SPPCF,这就需要获得 SPPCF 制作过程中侧边抛磨深度、侧边抛磨区长度以及沿不同轴向旋转角方向侧边抛磨对光传输的影响,另外也需要实时监控抛磨深度、抛磨后模场在传输过程中变化等的物理图像。

本文针对 SPPCF 制作工艺中的需要,以光纤横截面中空气孔为六边形排布的 PCF 为研究对象,建立了 SPPCF 的光学模型,通过运用三维有限差分光束传输法(3D-FDBPM),计算研究了 SPPCF 在不同剩余半径、不同侧边抛磨区长度、不同的轴向旋转角方向侧边抛磨时的传输光功率衰减及其传输模场的变化,并对其结果进行了分析,为 SPPCF 的实验提供理论数据,并用以指导实验。

2 侧边抛磨光子晶体光纤光学模型

实验所用 SPPCF 是利用轮式抛磨法制作而成的,其优点是制作的侧边抛磨区的平坦区表面平行于纤芯轴,有利于光学器件的制作^[11-14]。选取横截面为六边形五层空气孔的折射率导光型 PCF 为计算对象,所取参数与真实的 SPPCF 一致,如图 1(a)所示。图 1(b)是 PCF 基模的模场分布。在计算中,建立 SPPCF 结构的光学模型如图 2 所示,计算 SPPCF 模型的横截面为 D 型横截面,将侧边抛磨区中间的区域理想化为平面,由于轮式抛磨会造成抛磨过渡区,因此可将左右两端简化为光滑的弧形区域。在图 2 基础上建立数值计算模型,其中图 2(a)为波导光学模型的轴向侧视图,包括 4 个区域:PCF 上的侧边抛磨区、抛磨区上的填充聚合物区、光波导的光纤导入段区及导出段区。图 2(b)为图 2(a)中 SPPCF 数值模型的横截面图,图中有两个区:光纤上的侧边抛磨区及抛磨区上的填充聚合物区。 L_0 、 L_1 、 L_2 分别表示抛磨区的总长度、抛磨平坦区长度、抛磨过渡区长度, R 表示剩余半径(即抛磨面到 PCF 中心的距离);图 2(b)中的 d 表示空气孔的直径, Δ 表示两个空气孔中心间距, n_{air} 、 n_{cl} 、 n_{sp} 分别为

PCF 空气孔、PCF 材料和抛磨区填充聚合物区的折射率;抛磨区两边完整的未抛磨光纤段分别为波导

导入、导出段,二者长度均为 L 。PCF 中光沿着 Z 方向传输。

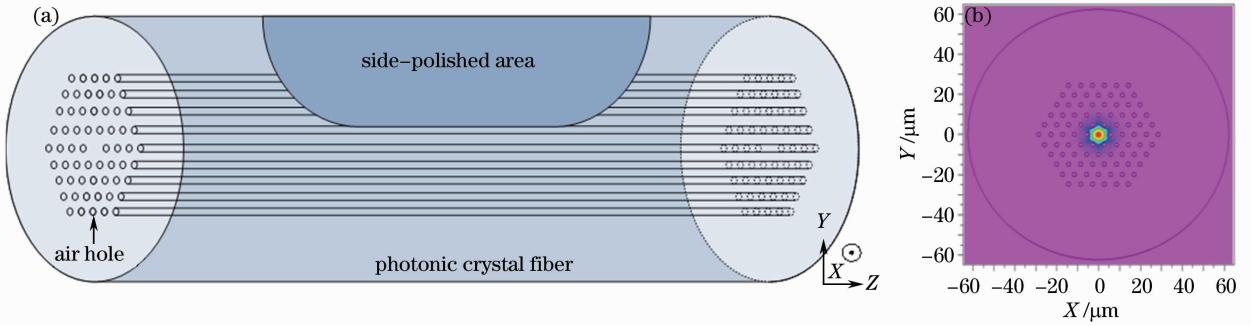


图 1 (a)侧边抛磨光子晶体光纤的结构示意图; (b) PCF 基模 LP_{01} 的模场分布
Fig.1 (a) Sketch of SPPCF structure; (b) LP_{01} mode of photonic crystal fiber

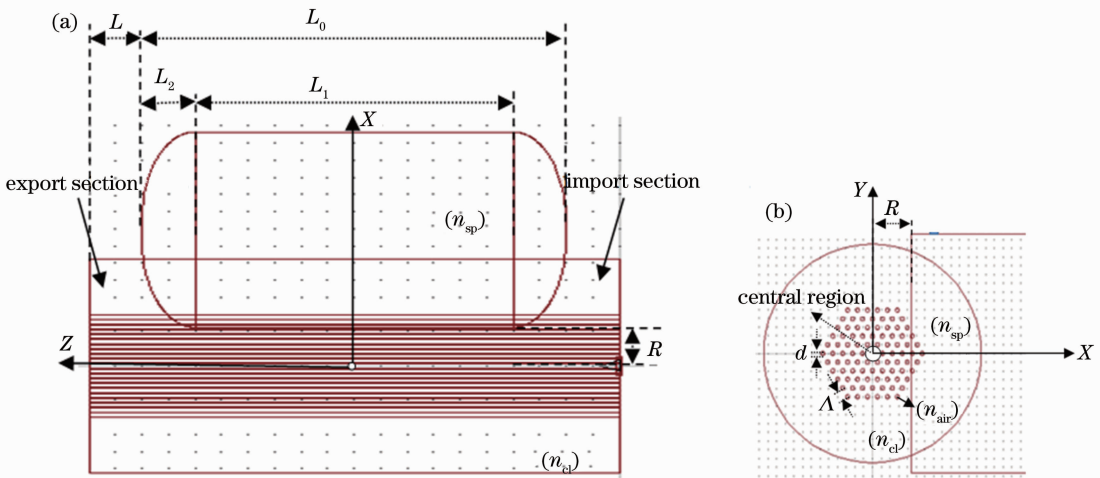


图 2 建立的 SPPCF 光学模型。(a)用于数值计算的光学模型的纵向截面; (b) SPPCF 计算光学模型的横截面
Fig.2 Numerical optical model of SPPCF. (a) Longitudinal cross-section of optical model; (b) transverse cross-section of SPPCF optical model

实验表明,SPPCF 的传输光功率及模场变化主要与其侧边抛磨区长度、剩余半径和侧边抛磨的方向等相关,因此在设计光学模型时,可假设 PCF 的抛磨表面足够光滑,即忽略表面粗糙度引起的散射,且抛磨碎屑没有堵住 PCF 的空气孔。

对于图 2 所示的光学模型,采用完全透明边界条件(FTBC),利用三维有限差分光束传输法做数值计算。有限差分法是用差分方程代替波动方程的一种数学方法,将波导分成有限的差分网格,用差分近似获得差分方程,从而得到离散场的数值解。计算软件为 Rsoft 公司的软件 Rsoft 中 BeamPro 模块。

实验中常需要确定侧边抛磨平面的法线方向,这个法线方向可与 PCF 的轴向旋转角相关连。在此定义 PCF 的轴向旋转角为绕 PCF 中心轴旋转的角度。在图 2(b)中所建立坐标系中,取六边形的某两个相对棱角的对角线为 X 轴,垂直于此棱角对

线的方向为 Y 轴,则 PCF 的轴向旋转角为与 X 轴的逆时针夹角 θ ,如图 3 中所示。此角度 θ 也就是侧边抛磨平面的法线方向与 X 轴的夹角,因此,不同侧边抛磨平面的法线方向的取向,可以用不同的 θ 来描述。由于空气孔排列为正六边形,所以轴向旋转角 $\theta=45^\circ$ 与 $\theta=15^\circ$ 的横截面内空气孔空间排布情况一样,而 $\theta=60^\circ$ 与 $\theta=30^\circ$ 情况一样,故可只讨论轴向旋转角为 0° 、 15° 、 30° 三种轴向旋转角时的传输特性。如图 3 所示,图 3(a)~(c)分别为轴向旋转角为 0° 、 15° 、 30° 时光纤横截面图。

3 计算结果及分析

因所研究的光传输特性是讨论传输光功率的变化,所以在计算中将主要讨论 SPPCF 中的光功率透射率。光功率透射率 T 是指一定能量的光注入 SPPCF,并经一段长度传输后,输出光功率占输入光

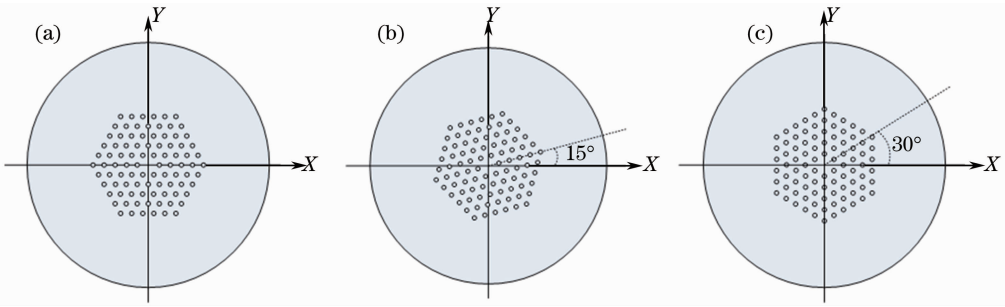


图 3 轴向旋转角定义及三种不同轴向旋转角时的 PCF 横截面。(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=15^\circ$; (c) $\theta=30^\circ$

Fig. 3 Definition of axial rotation angle and transverse cross-section of PCF when axial rotation angle is (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=15^\circ$; (c) $\theta=30^\circ$

功率的百分比。

利用图 1 所示 SPPCF 的数值模型,计算参数(参数如有不同时,将给以特殊说明)主要有:输入光波长为 1550 nm,光纤材料折射率 $n_{cl}=1.45$,光纤直径为 $D=125 \mu\text{m}$,空气孔折射率 $n_{air}=1$,空气孔直径 $d=2.28 \mu\text{m}$,空气孔等边排列,相邻空气孔中心间距 $\Lambda=5.7 \mu\text{m}$,抛磨区长度 $L_0=8 \text{ mm}$,抛磨平坦区长度 $L_1=6 \text{ mm}$,两个侧边抛磨过渡区长度都为 $L_2=1 \text{ mm}$,PCF 中心实芯区域的内接圆半径为 $4.56 \mu\text{m}$;为简化计算,PCF 的导入段及导出段 L 都设为 1 mm ;侧边抛磨区置于空气中。在理论计算中入射光模场为 PCF 的基模 LP_{01} ,在光纤终端监测经过抛磨区后的基模模场的光功率输出和光纤总的光功率输出。

当 PCF 侧边抛磨到一定深度时,其光功率透射率及其光纤中的传输光模场都会发生变化;另外,因分析对象为横截面是正六边形五层空气孔的 PCF,所以当沿不同轴向旋转角方向开始侧边抛磨时,其光功率透射率和光纤中模场的变化也可能不相同。因此本研究分别计算了 SPPCF 的光功率透射率、传输模场分布等随 SPPCF 剩余半径、抛磨光纤长度及侧边抛磨方向(轴向旋转角)等几何参数变化的特性。

3.1 剩余半径对 SPPCF 光功率传输及其光纤中传输模场的影响

当沿轴向旋转角 $\theta=0^\circ$ 方向进行侧边抛磨, $R=4.5 \mu\text{m}$ 时, SPPCF 横截面如图 4 所示。此时侧边抛磨面法向与 0° 方向一致。因 PCF 中心实芯区域的内接圆半径为 $4.56 \mu\text{m}$,所以现在抛磨面刚好进入中心实芯区域。设其他参数不变,计算光功率透射率 T 随剩余半径 R 的变化。计算得到的结果如图 5 所示。

由图 5 可知,因 PCF 中心实芯区域的内接圆半径为 $4.56 \mu\text{m}$,在 R 为 $-1.5 \mu\text{m}$ 处,即中心实芯区

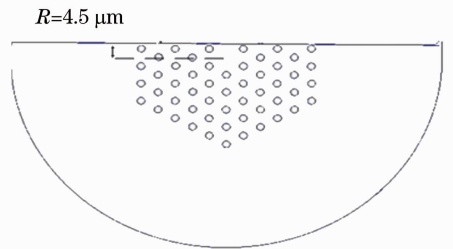


图 4 SPPCF 横截面图

Fig. 4 Transverse cross-section of SPPCF

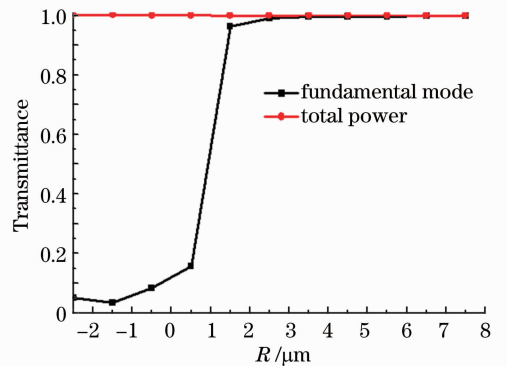


图 5 沿轴向旋转角为 0° 方向进行侧边抛磨时,光功率透射率 T 随剩余半径 R 变化

Fig. 5 Optical power transmittance T of SPPCF versus residual radius R under axial rotation angle $\theta=0^\circ$

域大部分被抛磨掉时,光纤的基模光功率透射率最小,约为 0.03。当 $-1.5 \mu\text{m} \leq R \leq 4.5 \mu\text{m}$ 时(即抛磨面位于中心实芯区域,如图 4 所示),光纤的基模光功率透射率随着 R 的增大而增大。 R 从 $0.5 \mu\text{m}$ 增大到 $1.5 \mu\text{m}$ 时(即抛磨面在中心实芯区域内,部分中心实芯区域被抛磨掉),光纤的基模光功率透射率由 0.15 快速增加达到 0.8,表明当抛磨面在中心实芯区域范围内时,光功率透射率对 R 最为灵敏。当 $R > 4.5 \mu\text{m}$ 后(即抛磨面位于中心实芯区域边缘外),随着 R 的增大,基模光功率透射率趋近于 1,变化曲线的坡度较小,表明光功率透射率对 R 的响应

灵敏度减小。当 $R < -1.5 \mu\text{m}$ 时的基模光功率透射率大于 $R = -1.5 \mu\text{m}$ 时的光功率透射率，这是因为光沿着光纤传输时，基模光功率随着传输长度会发生振荡，光到达最后一个抛磨过渡区时，基模光功率处于一个上升的过程，故其回升的光功率透射率要大于 $R = -1.5 \mu\text{m}$ 时光功率透射率，如图 6 所示。而光纤的总光功率透射率为在整个 PCF 范围内的光功率透射率，一直保持在 1 不变。如图 8(b)、图 10(b)、图 11(b) 所示，光传输到抛磨区时，基模部分转化为高阶模，且分布在光纤未被抛磨区域，没有明显的泄露模，光经过抛磨区后，高阶模分布在光纤整个横截面上，故光纤的总功率透射率保持不变。

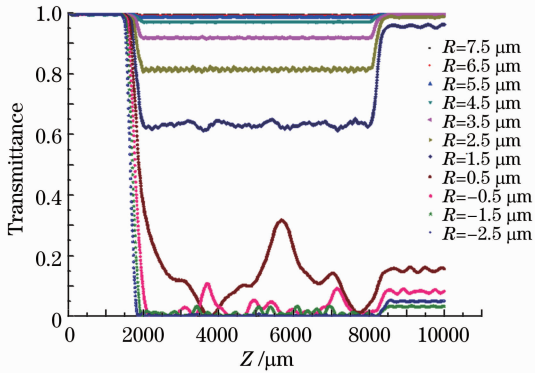


图 6 沿轴向旋转角为 0° 的方向侧边抛磨时，不同 R 情况下，光沿着 Z 轴传输时随 Z 变化的光功率曲线

Fig. 6 Optical power transmittance T versus the length of the transmission Z under different R , when polished along the direction of axial rotation angle $\theta = 0^\circ$

图 6 给出了沿轴向旋转角为 0° 的方向侧边抛磨时，在不同的剩余半径 R 下，光沿着 Z 轴方向传输，随 Z 变化的光功率透射率曲线，侧边抛磨区参数如前所述。在图 6 中可以看到，对不同的 R 值都有：当 $Z = 1000 \mu\text{m}$ ，即光刚传输到导入抛磨过渡区时，基模光功率开始出现衰减；当 $1000 \mu\text{m} < Z < 8000 \mu\text{m}$ ，即在侧边抛磨区内时，传输光功率随 Z 增大呈振荡变化，只是不同 R 值时振荡幅值不一样；随着剩余半径 R 的减小，在抛磨区内，传输基模光功率的衰减变大，振荡加强。当 $Z = 8000 \mu\text{m}$ ，即光传输经过抛磨平坦区进入到导出抛磨过渡区时，基模的光功率开始有所回升。回升原因在于：光在抛磨区传输时，激发产生了其他的高阶模式，部分光能以高阶模式存在，导致基模能量减少，在光经过抛磨区后，部分高阶模的光功率转化回基模的光功率，所以基模光功率出现回升。图 7(a)~(d) 分别为剩余半径 R 为

$4.5 \mu\text{m}$ 时， $Z = 4000 \mu\text{m}$ 处，即光已传输到抛磨平坦区，SPPCF 的高阶模光传输模场的模场分布， m 表示 LP_{0m} 的模阶数， n_{eff} 为有效折射率，图中的直线表示抛磨面。图 6 还表明：当 $R > 0.5 \mu\text{m}$ 时，基模光功率回升的幅度很大；当 $R < 0.5 \mu\text{m}$ 时，基模光功率回升的幅度变小，这是因为 $R < 0.5 \mu\text{m}$ 时，光纤抛磨深度已经接近或超过光纤半径，在抛磨区产生的高阶模的大部分能量会辐射到 PCF 外，成为光能损耗，只留少量高阶模的能量在输出端被耦合回光纤中，转化为基模的光能。

对不同剩余半径下光沿着 Z 轴传输的 LP_{01} 模场分布的理论计算也证明了高阶模场光功率损耗的分析，如图 8 所示。图 8(a) 表明，当剩余半径 $R = 7.5 \mu\text{m}$ ，即已经磨到剩余最后一层空气孔时，虽然侧边抛磨破坏了原来 PCF 横截面上空气孔排布的周期性结构，但光传输到抛磨区时，由于基模模场主要被约束在中心实芯区域，因此，在侧边抛磨区外空气中的倏逝场很少。光在传输过程中，主要保持其基模形式，激发的高阶模能量较少，而基模的模场分布基本不变，因此基模光功率透射率的衰减很小。图 8(b) 表明，当剩余半径 $R = 0.5 \mu\text{m}$ 时，抛磨面已经位于中心实芯区域内，近一半中心实芯区域被抛磨掉。图 8(b) 各插图表明，光沿着光纤传输到抛磨区时， LP_{01} 模场分布随 Z 的传输产生了较大的变化。首先，整个 LP_{01} 模场中心不再位于 PCF 的中心，而是向远离抛磨面的方向偏离，这是与普通单模光纤的不同之处。普通单模光纤由于纤芯区域的折射率高于包层折射率，所以当其被侧边抛磨后，传输光的基模场还是主要被限制在纤芯区域，只是在包层或包层外的倏逝场能量变大。而 PCF 的材料折射率只有一个，其余就是空气孔，因此 PCF 的侧边抛磨虽然使中心实芯区域减小了，但其余的远离抛磨面的实体材料部分又担当起了新的传光中心区域的角色，与空气孔一起构成新的高低折射率导光结构，因此 LP_{01} 模场就向远离抛磨面的方向移动了。其次，图 8(b) 各插图也表明， LP_{01} 模场分布不再是对称的，而是远离抛磨面方向的模场能量分布较多，即产生了较大比例的倏逝场能量，而图 7 也表明高阶模是向远离抛磨面区域分布的。图 8(b) 的插图还表明，当光传输到 $Z = 2500 \mu\text{m}$ 时， LP_{01} 模场偏离较大，已经出现了高阶模； $Z = 4000 \mu\text{m}$ 时， LP_{01} 模场的约束已经较小，模场能量分布范围变大，产生了更多的高阶模，所以光功率透射率衰减较大； $Z = 5500 \mu\text{m}$ 时， LP_{01} 模场约束恢复加强，模场能量分布范围变小，高

阶模的能量部分耦合回基模,基模光功率透射率有一定的回升; $Z=7500 \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模场的约束再次变小,再次出现较多的高阶模,光功率透射率衰减增大;光经过抛磨区后,例如 $Z=10000 \mu\text{m}$ 时,部分的

传输高阶模的光能量回复到基模模式,但由于基模和高阶模在传输中产生了较大的、不可逆的传输损耗,所以最终 SPPCF 产生了较大的传输损耗。图 6 也给出了这种传输损耗的变化的结果。

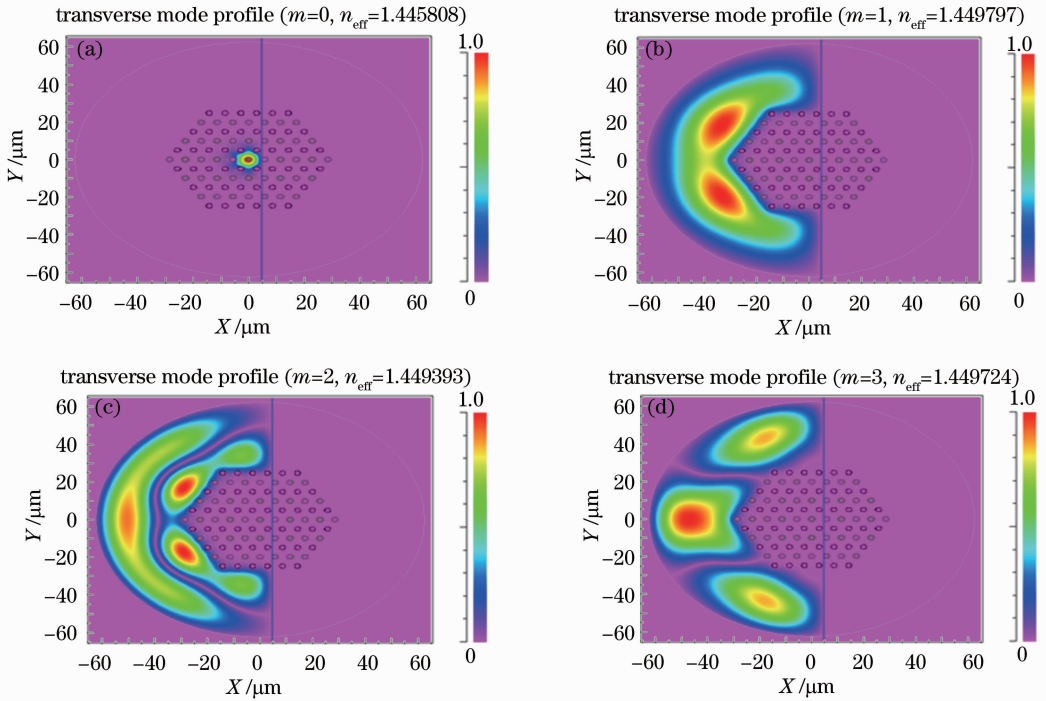


图 7 抛磨旋转角为 0° , 剩余半径为 $4.5 \mu\text{m}$, $Z=4000 \mu\text{m}$, 即光已传输到抛磨平坦区时, SPPCF 传输的高阶模场的分布(直线表示抛磨面)。(a) $m=0$; (b) $m=1$; (c) $m=2$; (d) $m=3$

Fig. 7 Distributions of high order modes in SPPCF, when axial rotation angle is 0° , residual radius is $4.5 \mu\text{m}$, and $Z=4000 \mu\text{m}$. (a) $m=0$; (b) $m=1$; (c) $m=2$; (d) $m=3$ (straight line in figure means polished surface)

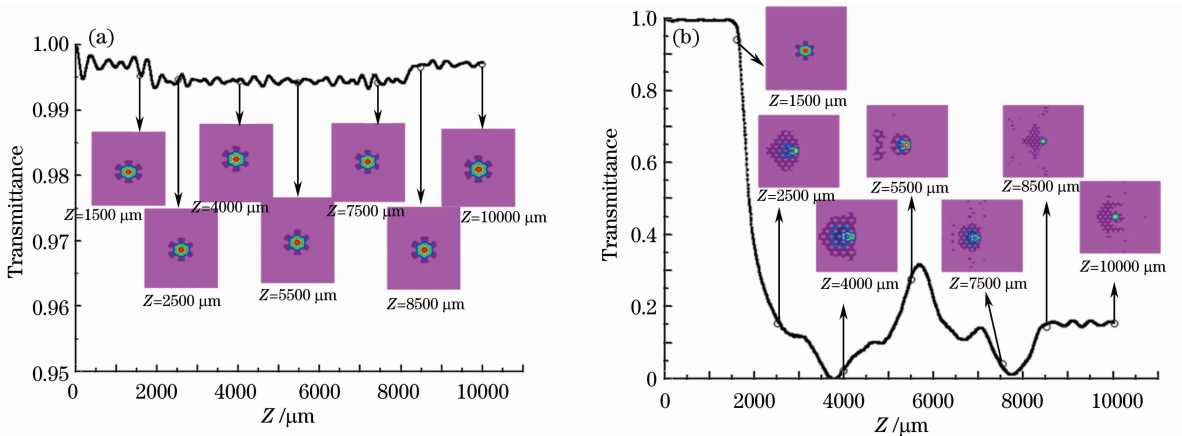


图 8 沿轴向旋转角为 0° 的方向侧边抛磨时, 不同 R 值下, 光传输模场 LP_{01} 沿着 Z 轴传输变化, 图中插图给出了各位置 Z 处光纤横截面的 LP_{01} 模场分布。(a) 剩余半径 R 为 $7.5 \mu\text{m}$; (b) 剩余半径 R 为 $0.5 \mu\text{m}$

Fig. 8 Distributions of propagation mode LP_{01} along Z axis under different R , polished along the direction of axial rotation angle $\theta = 0^\circ$. Illustrations mean the distributions of propagation mode LP_{01} at different Z points in SPPCF.

(a) Residual radius is $7.5 \mu\text{m}$; (b) residual radius is $0.5 \mu\text{m}$

3.2 沿不同轴向旋转角方向侧边抛磨对 SPPCF 光功率传输的影响

由于本文讨论的 PCF 为正六边形五层空气孔

的折射率导光型 PCF, 在制作 SPPCF 器件时, 需要了解沿不同轴向旋转角方向抛磨所得到的 PCF 的光功率衰减和光纤中传输模场的变化情况, 因此, 本

文对沿不同轴向旋转角方向抛磨下, SPPCF 的光功率透射率和传输模场变化进行了计算分析。

图 9 为当沿轴向旋转角 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 方向进行侧边抛磨时, 光纤基模光功率透射率随着剩余半径 R 变化的关系图。由图 9 可知, LP_{01} 基模光功率透射率随着剩余半径 R 的增加而增大, 但剩余半径 $R > 0.5 \mu\text{m}$ 时, 在不同轴向旋转角上抛磨引起的光功率变化差别较小。例如, 图 9 显示当剩余半径 $R > 1.5 \mu\text{m}$ 时, 沿轴向旋转角 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 进行侧边抛磨后引起的基模光功率透射率差别很小, 仅为千分之几。沿不同轴向旋转角抛磨, 当剩余半径 R 在 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 的范围内时, 基模光功率透射率衰减得最为迅速, $\theta=0^\circ$ 时光功率透射率衰减了 81%, $\theta=15^\circ$ 时光功率透射率衰减了 80%, 而 $\theta=30^\circ$ 时光功率透射率衰减了 74%。剩余半径 $R < 0.5 \mu\text{m}$ 后, 沿不同轴向旋转角方向抛磨所得到的光功率透射率衰减相差较大, $\theta=15^\circ$ 时光功率透射率最小, 特别是当 $R < -0.5 \mu\text{m}$, 即 PCF 的中心实芯部分一大半被抛磨掉, $\theta=15^\circ$ 时光功率透射率约为 0.02, 而 $\theta=30^\circ$ 时光功率透射率约为 0.1。这可为制作 PCF 耦合器提供有意义的指导。

图 8、图 10、图 11 给出了沿轴向旋转角分别为 $0^\circ, 15^\circ$ 和 30° 侧边抛磨时, 剩余半径分别为 $7.5 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 情况下, 光沿着光纤传输模场的变化情况。图 8(a)、图 10(a)、图 11(a) 都表明, 剩余半径为 $7.5 \mu\text{m}$, 即还未抛磨到光纤的最内层空气孔时, 光在传输过程中主要为基模形式, 基模光功率透射率衰

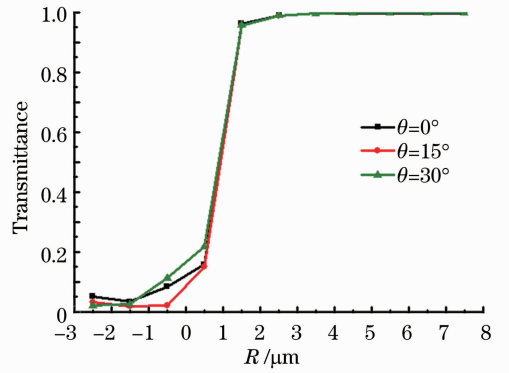


图 9 沿不同轴向旋转角方向进行侧边抛磨时, SPPCF 中光功率透射率与剩余半径关系的传输特性曲线
Fig. 9 Optical power transmittance T of SPPCF versus residual radius R when polished along the direction of different axial rotation angles

减较小。图 8(b)、图 10(b) 和图 11(b) 表明, 剩余半径为 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 沿不同轴向旋转角抛磨传输模场的差异最大, 如 3.1 节中所分析的, 光沿着光纤传输到抛磨区时, 会产生高阶模, 基模光功率透射率出现大幅度衰减, 然而在传输过程中, 高阶模与基模能量相互转化, 这就是光传输到 $Z=5500 \mu\text{m}$ 左右基模光功率透射率回升的原因, 回升约有 0.3。比较不同轴向旋转角下抛磨时光传输模场的变化, 可以发现在剩余半径 R 为 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 光传输到抛磨区范围, 即当 $Z=4000 \mu\text{m}$ 或 $Z=7500 \mu\text{m}$ 时, 沿轴向旋转角 $\theta=0^\circ$ 侧边抛磨时的基模模场分散程度较 $\theta=15^\circ$ 或 $\theta=30^\circ$ 时的小, 也即产生的高阶模较少; 沿轴向旋转角为 15° 和 30° 侧边抛磨的基模模场分布更

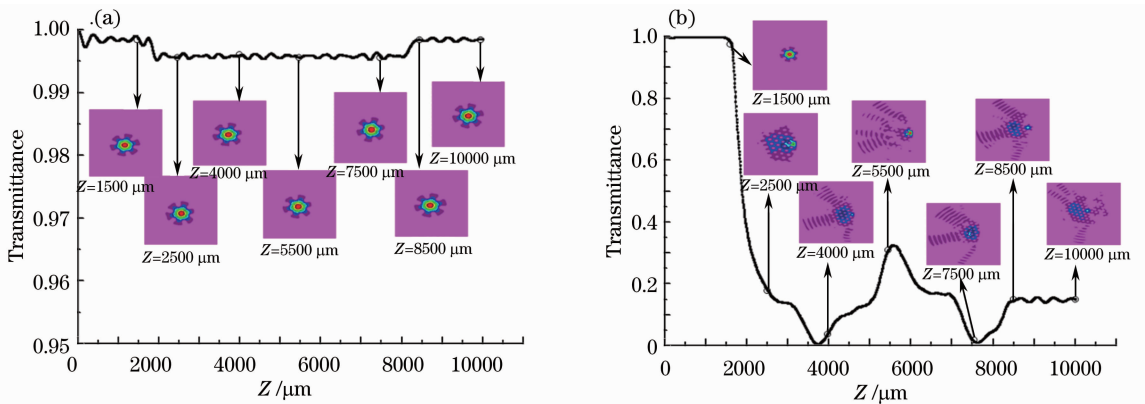


图 10 沿轴向旋转角 $\theta=15^\circ$ 的方向侧边抛磨时, 不同 R 值下, 光传输模场 LP_{01} 沿着 Z 轴传输变化, 图中插图给出了各位置 Z 处的 LP_{01} 模场分布。(a) 剩余半径 R 为 $7.5 \mu\text{m}$; (b) 剩余半径 R 为 $0.5 \mu\text{m}$

Fig. 10 Distributions of propagation mode LP_{01} along Z axis under different R , polished along the direction of axial rotation angle $\theta=15^\circ$. Illustrations mean the distribution of propagation mode LP_{01} at different Z points in SPPCF.

(a) Residual radius is $7.5 \mu\text{m}$; (b) residual radius is $0.5 \mu\text{m}$

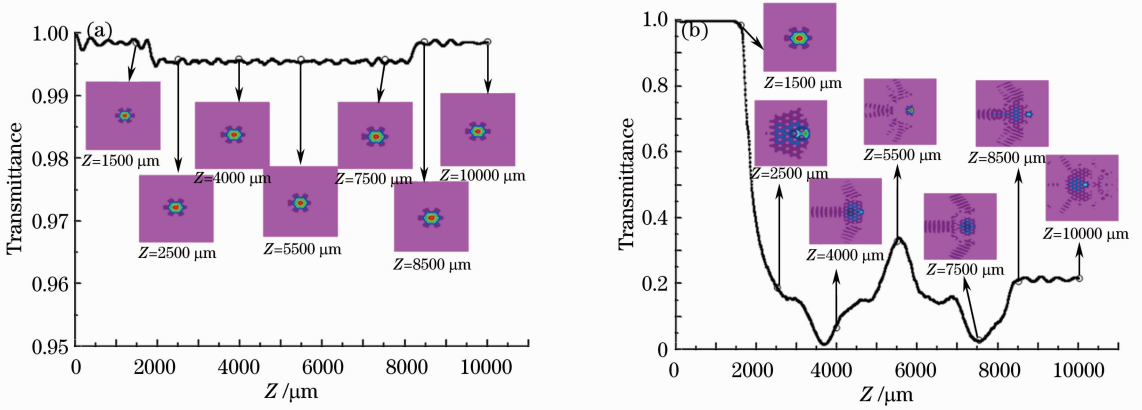


图 11 沿轴向旋转角 $\theta=30^\circ$ 的方向侧边抛磨时,不同 R 值下,光传输模场 LP_{01} 沿着 Z 轴传输变化,图中插图给出了各位置 Z 处的 LP_{01} 模场分布。(a)剩余半径 R 为 $7.5 \mu\text{m}$; (b)剩余半径 R 为 $0.5 \mu\text{m}$

Fig. 11 Distributions of propagation mode LP_{01} along Z axis under different R , polished along the direction of axial rotation angle $\theta = 30^\circ$. Illustrations mean the distribution of propagation mode LP_{01} at different Z points in SPPCF.

(a) Residual radius is $7.5 \mu\text{m}$; (b) residual radius is $0.5 \mu\text{m}$

加分散,也即光到达抛磨区产生较多的高阶模。传输光经过抛磨区后,在 $Z=8500 \mu\text{m}$ 和 $Z=10000 \mu\text{m}$ 时,光传输主要回复到基模,但模场的分散程度不一样。 $\theta=0^\circ$ 时基模模场分散程度最小, $\theta=30^\circ$ 时基模模场的分散程度最大。在此模拟不同的轴向旋转角和剩余半径 R 时光传输模场的变化可为实验提供参考。

3.3 光纤侧边抛磨长度对 SPPCF 光功率传输的影响

根据图 6 的曲线,可以知道在光传输到 SPPCF 的抛磨区时,光功率发生衰减,且随 Z 的增加呈振荡传输,当剩余半径 R 减小时,振荡幅度变化加强。由此可知,不同的抛磨光纤长度会对光纤的输出功率大小造成影响。为了研究抛磨光纤长度对光功率衰减的影响,图 12 给出了沿 $\theta=0^\circ$ 侧边抛磨,不同剩余半径时,SPPCF 光功率透射率随着光纤抛磨长度变化的关系曲线。

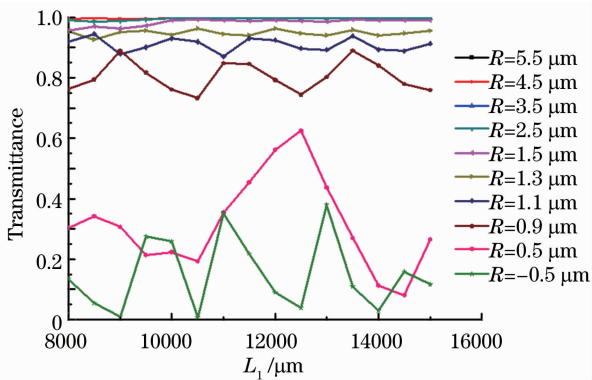


图 12 沿 $\theta=0^\circ$ 侧边抛磨,不同剩余半径下,光纤侧边抛磨平坦区长度对光功率透射率的影响曲线

Fig. 12 Optical power transmittance T of SPPCF versus the length of flat area with polishing L_1 when $\theta=0^\circ$

由图 12 可知,当剩余半径 $R \geq 1.5 \mu\text{m}$ 时,不同光纤抛磨长度对光纤基模光功率透射率的衰减影响非常小,最多只有 0.04 的变化。当剩余半径 $R < 1.5 \mu\text{m}$ 后,光纤光功率透射率随着光纤抛磨长度增大呈振荡变化,且剩余半径越小,振荡幅度越大。剩余半径 $R=0.5 \mu\text{m}$ 时,基模光功率透射率随抛磨长度的最大变化幅度达 0.54; 剩余半径 $R=-0.5 \mu\text{m}$ 时,基模光功率透射率随抛磨长度的最大变化幅度为 0.37。这是由于剩余半径 $R < 1.5 \mu\text{m}$ 后,光在 SPPCF 抛磨区传输时,光功率出现较大衰减,且随 Z 变化振荡较大,因此此时不同的侧边抛磨区长度导致其输出的基模光功率透射率变化较大。在设计研制 SPPCF 的实验时,可以根据实验对光传输参量的要求来选择合适的 SPPCF 的抛磨长度。

4 结 论

在建立 SPPCF 光学模型的基础上,利用三维有限差分光束传输法模拟计算了 SPPCF 的光传输特性。分析了抛磨剩余半径、轴向旋转角和抛磨光纤长度对 SPPCF 器件光功率传输特性和传输模场的影响。结果表明,当剩余半径大于 $-1.5 \mu\text{m}$ 时,SPPCF 的光功率衰减随着剩余半径的减小而增大,当剩余半径小于 $5.5 \mu\text{m}$ 时,光功率衰减比较明显;光沿着光纤传输时,光传输到抛磨区光功率发生衰减,经过抛磨区后,基模光功率出现回升,当剩余半径小于或等于 $0.5 \mu\text{m}$ 时,基模光功率回升减少。沿不同的轴向旋转角抛磨,剩余半径大于 $0.5 \mu\text{m}$ 时,沿不同轴向旋转角上抛磨引起的光功率变化差

别较小; 剩余半径在 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 的范围内, 基模光功率透射率衰减得最为迅速; 剩余半径小于 $0.5 \mu\text{m}$ 后, 不同轴向旋转角方向抛磨所得到的光功率透射率衰减相差较大。光沿着光纤传输到抛磨区时, 会产生高阶模。剩余半径为 $0.5 \mu\text{m}$, 轴向旋转角为 30° 时, 基模模场分布分散程度最大, 在抛磨区产生较多的高阶模。当剩余半径大于 $1.5 \mu\text{m}$ 时, 光纤抛磨长度变化对输出光功率影响很小; 剩余半径小于 $1.5 \mu\text{m}$ 时, 输出光功率透射率随着光纤抛磨长度的变化呈振荡变化, 且随着剩余半径的减小, 振荡加剧。以上研究为制作 SPPCF 光纤传感器、SPR 传感器、SPPCF 光纤衰减器、SPPCF 耦合器等新器件的实验提供了理论依据和参考。在设计制作 SPPCF 相关器件时, 可根据对光功率衰减或传输模场的要求来选择合适剩余半径、轴向旋转角和抛磨光纤长度。

参 考 文 献

- 1 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900139.
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900139.
- 2 T A Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(13): 961-963.
- 3 J C Knight, T A Birks, R F Cregan, *et al.*. Large mode area photonic crystal fiber [J]. *Electron Lett*, 1998, 34(13): 1347-1348.
- 4 T A Birks, D Modilevtsev, J C Knight. Dispersion compensation using single-material fibers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, 11(6): 674-676.
- 5 J H Lee, P C Teh, Z Yusoff, *et al.*. A holey fiber-based nonlinear thresholding device for optical CDMA receiver performance enhancement [J]. *IEEE Photon Technol Lett*,

- 2002, 14(6): 876-878.
- 6 X Yu, Y Zhang, G Wang, *et al.*. Nanostructure waveguide based surface plasmon resonance sensor [J]. *SIMTech Technical Reports*, 2010, 11(1): 42-45.
- 7 X Yu, D Yong, H Zhang, *et al.*. Plasmonic enhanced fluorescence spectroscopy using side-polished microstructured optical fiber [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 160(1): 196-201.
- 8 Wang Min, Dai Jixiang, Yang Minghong. Optical properties of side-polished fiber with two-dimensional photonic crystal lattice [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(S1): S105008.
王 闵, 代吉祥, 杨明红. 侧边抛磨光子晶体光纤的光学特性 [J]. *中国激光*, 2011, 38(S1): S105008.
- 9 D Hua, L Fu. Numerical analysis of coupling characteristics of tunable photonic crystal fiber coupler for nonlinear optical microscopy [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(2): 125-127.
- 10 H Kim, J Kim, B H Lee, *et al.*. Fabrication of tunable photonic crystal fiber coupler [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2004.
- 11 Chen Zhe, Cui Fei, Zeng Yingxin. 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 Jiang Peifan, Chen Zhe, Zeng Yingxin, *et al.*. Optical propagation characteristics of side polished fibers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(5): 578-581.
江沛凡, 陈 哲, 曾应新, 等. 侧边抛磨光纤的光传输特性研究 [J]. *半导体光电*, 2006, 27(5): 578-581.
- 13 Liu Linhe, Chen Zhe, Bai Chunhe, *et al.*. The effect of refractive index of material overlaid side-polished area of FBG on Bragg wavelength [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(5): 865-868.
刘林和, 陈 哲, 白春河, 等. 侧边抛磨区材料折射率对光纤光栅波长的影响 [J]. *光子学报*, 2007, 36(5): 865-868.
- 14 Zeng Yingxin, Chen Zhe, Jiang Peifan, *et al.*. Thermal distribution of waveguide based on side-polished fiber surrounded by thermo-optic polymer [J]. *Applied Laser*, 2006, 26(1): 29-34.
曾应新, 陈 哲, 江沛凡, 等. 侧边抛磨光纤聚合物热光复合波导的稳态温场分析 [J]. *应用激光*, 2006, 26(1): 29-34.

栏目编辑: 王晓琪