

侧边抛磨光子晶体光纤的光学特性

王 闵 代吉祥 杨明红

(武汉理工大学光纤传感国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要 建立了一种侧边抛磨光子晶体光纤(SP-PCF)的光学模型,通过数值仿真和实验研究了这种侧边抛磨光子晶体光纤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。实验结果表明,存在一个抛磨敏感区域,当抛磨深度在敏感区域内变化时,光子晶体光纤(PCF)的基模有效折射率随着环境介质折射率的改变而发生明显变化。这种侧边抛磨光子晶体光纤可以作为一种环境折射率敏感的传感器,有望在微型生物或化学传感方面得到应用。

关键词 传感器;光学特性;时域有限差分法;光子晶体光纤;抛磨深度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s105008

Optical Properties of Side-Polished Fiber with Two-Dimensional Photonic Crystal Lattice

Wang Min Dai Jixiang Yang Minghong

(National Engineering Laboratory for Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract An optical model of side-polished photonic crystal fiber (SP-PCF) is presented firstly, then simulations and experiments are carried out to investigate the optical characteristics of the SP-PCF under different conditions, i. e., different side-polished depths and different covered materials. The results of both the simulations and the experiments show that there exists a side-polished sensitive area. When the polished depth is changing in the area, the refractive index of the covered material has obvious influence on the the effective refractive index of fundamental mode of the SP-PCF. According to the results, SP-PCF could be used as ambient refractive index sensor, and it has potential applications as miniature bioorchemical sensors.

Key words sensors; optical properties; finite-different time-domain; photonic crystal fiber; side-polished depth

OCIS codes 060.5295; 160.4760; 060.2370

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)是由石英和空气孔构成的折射率周期性分布的微结构光纤,由于改变包层中引入空气孔的大小和排列控制光纤光学特性,因此PCF在光纤传感器、光子晶体天线、超宽色散补偿、光学集成电路等很多方面具有广泛的应用前景^[1~4]。

目前在PCF中填充液体的常用方法是利用毛细管作用将液体填充进入PCF,但这种方法填充长

度有限,对于粘度大的聚合物液体,填充长度往往不超过 1 cm ^[5~8]。而利用微加工技术制成的侧边抛磨光子晶体光纤(SP-PCF)可以很好地克服这一缺点,直接将填充物质覆盖在侧边抛磨区域,制作简单、精度容易控制。通过改变材料的折射率,引起纤芯中的传输功率产生变化,利用这种原理可以制作各种光纤器件。

本文建立了SP-PCF的光学模型,通过数值仿真和实验研究了这种SP-PCF在不同抛磨厚度和不

收稿日期: 2011-07-25; **收到修改稿日期**: 2011-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(60908020)资助课题。

作者简介: 王 闵(1983—),女,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: bluebluecherry@163.com

导师简介: 杨明红(1975—),男,博士,教授,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: minghong.yang@whut.edu.cn
(通信联系人)

同环境介质折射率条件下的光学特性。仿真和实验结果表明,存在一个抛磨深度敏感区域,在该区域抛磨深度及覆盖材料折射率的变化会对光子晶体光纤的基模有效折射率和有效模场面积有影响。

2 仿真计算结果及分析

仿真实验中所用软件为 MODE SOLUTIONS,利用时域有限差分法(FDTD)结合完全匹配层(PML)吸收边界条件对 SP-PCF 进行模拟计算^[9]。图 1(a)为实验所用光纤横截面图,图 1(b)为 SP-PCF 光学模

型。SP-PCF 的横截面为 D 型,侧抛边界为理想平面。 n 、 n_{air} 、 n_{cl} 分别是覆盖材料、空气孔和包层的折射率, Δ 是相邻空气孔间距, d 是空气孔直径, L 是覆盖材料厚度, h 是抛磨面与纤芯的距离,即光纤剩余的厚度。各参量设置如下: $n_{\text{cl}} = 1.465$, $n_{\text{air}} = 1$, $\Delta = 4 \mu\text{m}$, $d = 2 \mu\text{m}$, $L = 30 \mu\text{m}$ 。 n 取为 1.4524, 1.4398, 1.4293, 1.4189, 1.41, 1.401, 1.385, 1.36, 1.33。光源波长设为 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, 对不同抛磨深度的 SP-PCF, 改变 n 研究 SP-PCF 基模有效折射率 n_{eff} 的变化。

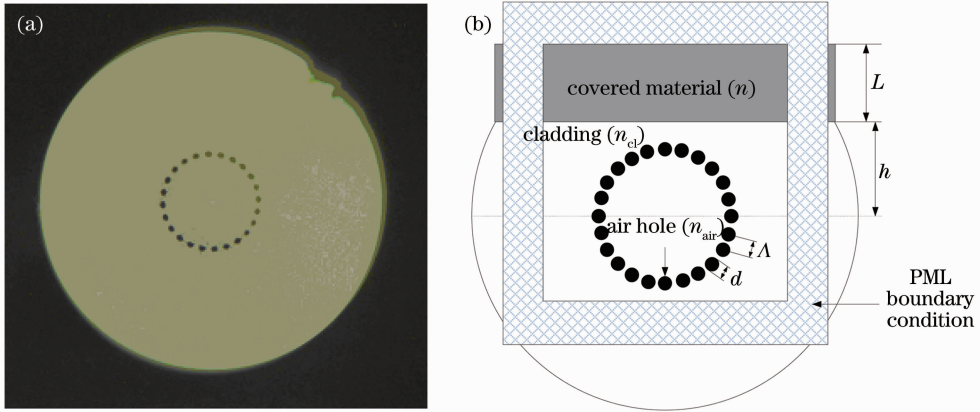


图 1 (a) 实验光纤横截面示意图; (b) SP-PCF 光学模型

Fig. 1 (a) Cross-section of PCF; (b) structure of SP-PCF used in the simulations

仿真实验得到的结果如图 2(a) 所示, 图中横坐标表示剩余厚度 h , 纵坐标表示的是 n_{eff} 。当 h 为 $19 \sim 30 \mu\text{m}$ 时, n_{eff} 随着 n 的改变并没有变化; 当 h 为 $18 \mu\text{m}$ 时, 随着 n 的改变 n_{eff} 逐渐开始发生变化, 曲线开始下降; 而当 h 小于 $9 \mu\text{m}$ 时, 对应着 n 的改

变, n_{eff} 明显变化, 曲线的坡度越大, 随着 h 的减小, n_{eff} 减小。如图 2(b) 所示, h 小于 $9 \mu\text{m}$ 被认为是 PCF 抛磨敏感区域, 在这个区间内, n_{eff} 随着 n 的变化得到较明显的改变。

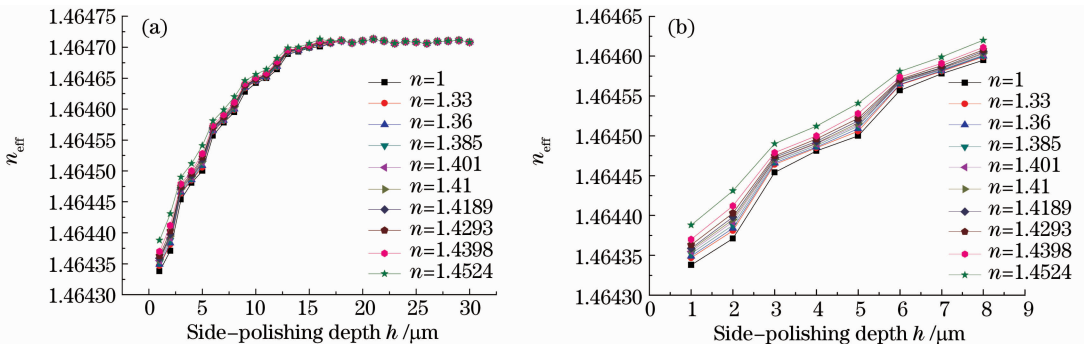


图 2 不同侧抛程度的 PCF n 与 n_{eff} 的关系

Fig. 2 Relationship between n and n_{eff} at different side-polishing depths

3 实验研究

实验所用的侧抛光子晶体光纤是利用轮式法制作的 SP-PCF, 在电镜下测量其抛磨深度 h 为 $3.16 \mu\text{m}$ 。根据甘油浓度与其折射率的对应关系, 配置体积分数分别为 78.3%, 71.6%, 64.3%,

58.3%, 44.8% 的甘油, 得到 n 分别是 1.4398, 1.4293, 1.4189, 1.41, 1.385。将 SP-PCF 分别浸在上述几种溶液中, 利用光谱分析仪观察波形变化。

图 3(a) 是实验所用 SP-PCF 在电镜下的剖面结构图, 其剩余厚度 h 为 $3.16 \mu\text{m}$, 图 3(b) 是用不同

折射率溶液覆盖在 SP-PCF 的整个抛磨区,实验测得的谱线变化曲线。当抛磨到一定深度时,光纤的结构被破坏,损耗增大,覆盖不同的折射率溶液在抛磨区时,随着 n 变大,包层有效折射率变大,损耗开始逐渐减小,谱线逐渐向上移动,光强变强。

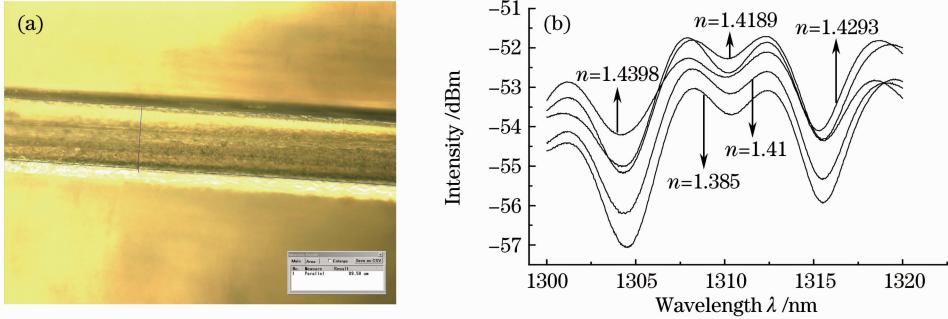


图 3 (a) SP-PCF 结构图;(b)不同折射率溶液覆盖抛磨区的光强变化($h=3.16 \mu\text{m}$)

Fig. 3 (a) Structure of SP-PCF; (b) intensity variation trends when the side-polished area is covered with different index materials

4 结 论

首先对 SP-PCF 的光学特性进行仿真计算,分别分析了基模有效折射率 n_{eff} 随侧边抛磨深度 h 和覆盖材料折射率 n 的变化情况,然后通过实验对仿真结果进行了验证。结果表明,当侧边抛磨深度 h 小于 $9 \mu\text{m}$ 时,覆盖材料折射率 n 的变化对 SP-PCF 的基模有效折射率 n_{eff} 影响比较明显。未来的工作中需要提高 PCF 的抛磨精度^[10],从而更精确地分析 SP-PCF 的光学特性。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 2 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
- 3 T. A. Birks, D. Mogilevtsev, J. C. Knight *et al.*. Dispersion compensation using single-material fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 674~676

在实验过程中,为了尽可能减小外界环境影响,每次覆盖材料前使用水清洗,并进行多次测量。由于计算模拟未考虑实际光纤抛磨面的不平整凹坑,而研磨精度很难控制在微米量级,加上电镜下测量难度较大,实验测得的和计算模拟存在一些误差。

- 4 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
- 5 K. Nielsen, D. Noordegraaf, T. Sørensen. *et al.*. Selective filling of photonic crystal fibres[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(8): L13~L20
- 6 Y. Huang, Y. Xu, A. Yariv. Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(22): 5182~5184
- 7 Xiao Limin, Jin Wei, M. S. Demokan *et al.*. Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 9014~9022
- 8 M. B. C. Cordeiro, E. M. dos Santos, C. H. B. Cruz *et al.*. Lateral access to the holes of photonic crystal fibers-selective filling and sensing applications[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8403~8412
- 9 Hu Juanjuan, Shum Ping, Lu Chao *et al.*. Generalized finite-difference time-domain method utilizing auxiliary differential equations for the full-vectorial analysis of photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(24): 1970~1972
- 10 N. Chen, S. Chi. Spectral characteristics of side-polished endlessly single-mode photonic crystal fiber; waveguide dispersion[C]. Opt. Fiber Commun. Conf. 2006 and 2006 Nat. Fiber Opt. Engrs. Conf., (OFC 2006) 2006; OW15

栏目编辑:殷建芳