

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0177-04

光子晶体光纤对 260 nm 紫外激光的传输特性

刘华刚 胡明列* 栗岩峰 宋有建 刘博文 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 通过有效折射率模型分析了光子晶体光纤的无限截止单模特性, 数值模拟表明只要光纤微结构包层中空气孔直径与孔间距之比足够小, 光子晶体光纤就可以在任意波长支持单模传输。具体计算了光子晶体光纤在大于 200 nm 的波长范围内支持单模传输的结构参数, 为实现光子晶体光纤单模传输紫外激光提供了理论依据。实验采用光纤激光器四次谐波 260 nm 飞秒激光和一段小空气孔直径的光子晶体光纤, 研究了紫外激光在光子晶体光纤中的传输特性。其中光子晶体光纤纤芯直径为 4.54 μm , 耦合效率大于 31%。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 紫外激光; 无截止单模

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0177

Transmission of 260 nm Ultraviolet Laser in Photonic Crystal Fiber

Liu Huagang Hu Minglie Li Yanfeng Song Youjian Liu Bowen

Chai Lu Wang Qingyue

(*Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Key Laboratory of Optoelectronic Information and Technical Science, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract Properties of the endlessly single mode of photonic crystal fiber (PCF) are analyzed theoretically with the effective-index model. Numerical calculation shows that PCF can be single mode for any wavelength if the proportion of the diameter of the air holes to the pitch in the cladding is small enough. Structure parameters of a single-mode PCF for wavelength above 200 nm are calculated exactly, which provide us with theoretical instruction for the ultraviolet (UV) light single-mode delivery of PCF. Based on 260 nm femtosecond pulses output from a frequency-quadrupled fiber laser, transmission of the UV laser is experimentally demonstrated using a piece of PCF with small air hole. With a core diameter of 4.54 μm , the transmission loss and the coupling efficiency of the PCF are measured to be 0.043 dB/cm and above 31%, respectively.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; ultraviolet laser; endlessly single mode

1 引 言

近年来紫外激光在许多领域,如材料加工、生物化学检测、医疗以及光纤传感等方面都得到了极其广泛的应用。在紫外激光的应用过程中,需要选择合适的

传输介质将其传输到目标工作区域,因而开发传输紫外激光的光纤具有重要的现实意义,并成为人们所关注的一项重要技术课题。其中要实现紫外激光的单模传输更具挑战性。根据传统阶跃光纤的单模传输理

收稿日期: 2010-03-16; **收到修改稿日期**: 2010-06-01

基金项目: 国家重点基础研究(2006CB806002)、国家 863 计划(2007AA03447Z)、国家自然科学基金(60678012, 60838004)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073)、教育部科学技术研究重点项目(108032)和教育
部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题

作者简介: 刘华刚(1981—),男,博士研究生,主要从事超短脉冲激光和非线性光学频率变换技术方面的研究。

E-mail: liuhg2007@gmail.com

导师简介: 王清月(1939—),男,教授,博士生导师,主要从事光子晶体光纤及超短脉冲激光技术方面的研究。

E-mail: chywang@tju.edu.cn

* **通信联系人**: E-mail: huminglie@tju.edu.cn

论,要在短波长满足单模条件,需要减小纤芯直径或数值孔径,这无疑会造成模场面积的减小并增大耦合损耗^[1]。

光子晶体光纤^[2](PCF)技术的发展与应用为克服传统光纤发展中的一些技术障碍提供了可能的解决途径。光子晶体光纤是一种带有线缺陷的二维光子晶体,芯层为单一的实心介质材料(通常为融石英),周围为二维方向上紧密排列而在轴向保持结构不变的波长量级的空气孔构成的微结构包层。它具有许多优于传统光纤的特性,如支持宽带的单模传输,模场面积、保偏特性、色散以及非线性具有极大可控性和设计自由度。尤其是光子晶体光纤的无截止单模^[3,4]特性为实现大模面积宽带紫外激光单模传输提供了理论基础。本文将光子晶体光纤应用于传输紫外飞秒激光,采用数值模拟的方法分析了光子晶体光纤无截止单模的实现条件,通过计算给出了光子晶体光纤在大于 200 nm 的波长范围内支持单模传输的结构参数。并用一根小空气孔占空比的光子晶体光纤实验研究了 260 nm 飞秒激光脉冲的传输特性。

2 理论分析与数值模拟

根据传统阶跃型光纤单模理论,阶跃光纤归一化频率 V 表示为

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 a \sqrt{2\Delta}, \quad (1)$$

其中 λ 为传输波长, a 为纤芯半径, n_1 为芯层折射率, $\Delta \approx \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}$ 为相对折射率差, n_2 为包层折射率,单模传输的归一化截止频率为 $V_c = 2.405$ 。由于 V 与波长成反比,要降低截止波长,使其能在紫外光谱区满足单模条件,可以通过减小纤芯半径或相对折射率差来实现。但是减小相对折射率差会增大弯曲损耗,减小纤芯半径势必会造成纤芯过小而增大耦合损耗。如 R. J. Bartula 等^[5]所报道的 337 nm 单模光纤,纤芯半径仅约为 1 μm ,耦合效率小于 10%。

1997 年, T. A. Birks 等^[3]报道了光子晶体具有无限单模特性,再结合光子晶体光纤结构参数的灵活可调性,为解决传统光纤所遇到的问题提供了新的途径。所谓无截止单模特性是指当光子晶体光纤包层空气孔直径(d)与孔间距(Λ)之比小于一定数值时,光纤在任何波长处都是单模的,即不存在高阶模的传输频带,而且这一特性与光纤的绝对尺度无关,这使在紫外光谱范围设计出大模面积的单模光子晶体光纤成为可能。无截止单模特性可以用有效折射率模型来解释。图 1

是一光子晶体光纤模型的横截面示意图。使用类似于传统光纤的归一化频率分析方法,若分别采用 n_{clad} 和 V_{eff} 表示包层的有效折射率和光子晶体光纤的有效归一化频率,则 V_{eff} 可表示为^[3,4]

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi r}{\lambda} (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

其中 r 为纤芯的半径, λ 为真空中的波长, n_{core} 为纤芯的折射率。与传统光纤相同, V_{eff} 取决于光纤的结构参数,当 V_{eff} 小于某一数值(即截止频率)时光子晶体光纤满足单模传输条件。若定义 $r = \Lambda$, 光子晶体光纤单模条件为 $V_{\text{eff}} \leq 4.1$ (注意不同于传统光纤的 2.405)^[6]。

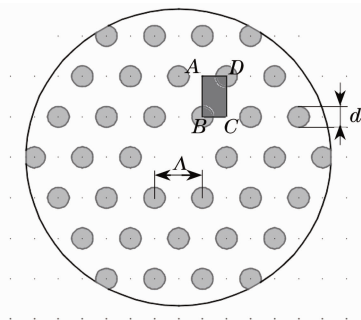


图 1 光子晶体光纤截面示意图

Fig. 1 Schematic of the cross section of a PCF

光子晶体光纤包层中空气孔的引入使得包层具有依赖于波长的有效折射率,该有效折射率定义为包层无穷大而且没有缺陷的光子晶体[称为空间填充基模(FSM)]的折射率^[3],FSM 折射率(n_{clad})可以采用数值方法精确计算^[7,8]。如图 1 所示,选用区域 ABCD 为计算 n_{clad} 所采用的基本单元,其中 AB 和 CD 边设为理想电导体边界,AD 和 BC 边设为理想磁导体边界。这样采用有限元方法(使用 Comsol Multiphysics 软件)可以模拟计算这一相当于没有边界、没有缺陷的光子晶体光纤,从而获得包层的有效折射率 n_{clad} 。在某一辐射波长下,由计算所得到的 n_{clad} 和(2)式,可以得到相应的有效归一化频率 V_{eff} 。图 2 为当 $\Lambda = 2.9 \mu\text{m}$ 时,在不同空气孔直径 d 情况下, V_{eff} 随 Λ/λ 的变化曲线。有效折射率模型认为包层内空气孔中光的填充程度随辐射波长的不同而变化,进而影响其有效折射率的大小,因此 n_{clad} 不是包层材料折射率的简单平均或加权平均,而是由随波长变化而变化的光场分布决定的。波长的减小使得光场越来越集中在折射率较高的石英区域中,因而提高了 n_{clad} ,其效果是降低了芯层和包层的折射率之差,使得归一化频率 V_{eff} 趋于定值,从而使光纤在波长减小时仍然满足单模传输条件。如图 2 所示,在 Λ 保持不变, $d = 1.2 \mu\text{m}$ 和 $1.25 \mu\text{m}$ (对应于空气孔占空比 $d/\Lambda = 0.41$ 和 0.43) 时,在计算的波长范围内

($0.2 \sim 2 \mu\text{m}$), V_{eff} 均小于 4.1, 理论上仅支持单模传输。由图 2 还可以看出 V_{eff} 随 d 减小而减小, 因此只要空气孔直径 d 与空气孔间距 Λ 之比足够小, 光子晶体光纤就可以在紫外波段保持单模。取 $\lambda = 260 \text{ nm}$, 光纤结构参数为 $d = 1.2 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.9 \mu\text{m}$, 对此光子晶体光纤的模式特性进行了数值模拟。图 3 显示了其基模模场分布, 且进一步的计算显示, 这种光纤中只支持基模传输, 没有发现高阶模式。

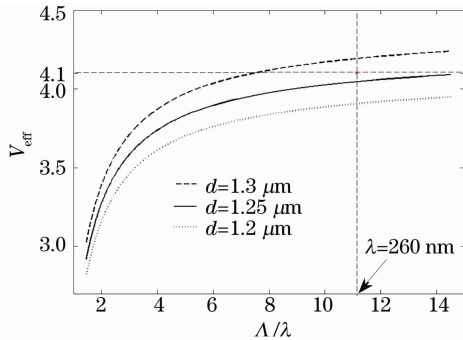


图 2 不同的 d 条件下, V_{eff} 随 Δ/λ 的变化曲线, $\Lambda = 2.9 \mu\text{m}$
 Fig. 2 Variation of V_{eff} as a function of Δ/λ for different d , $\Lambda = 2.9 \mu\text{m}$

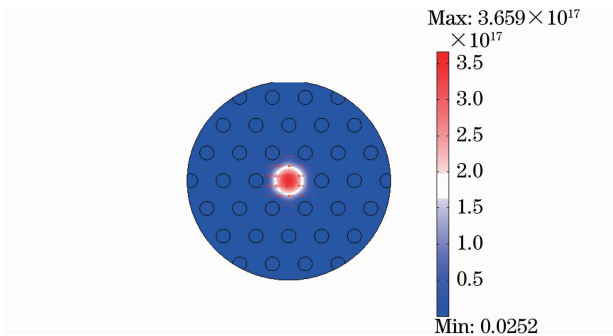


图 3 $\lambda = 260 \text{ nm}$ 时数值模拟光子晶体光纤基模模场分布图。 $d = 1.25 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.9 \mu\text{m}$

Fig. 3 Distribution of the field of the fundamental mode at the wavelength of 260 nm. $d = 1.25 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.9 \mu\text{m}$

3 实验研究

采用一根空气孔占空比(d/Λ)较小的光子晶体光纤, 实验测试了 260 nm 紫外飞秒脉冲激光在这种光纤中的传输情况。图 4 是实验装置示意图以及所采用光纤的横截面扫描电镜图。光纤结构参数 $\Lambda \approx 2.9 \mu\text{m}$, $d \approx 1.26 \mu\text{m}$, 接近于图 2 中实线所表示的光纤参数。所采用的紫外光源为光子晶体光纤激光器四倍频产生的 260 nm 紫外飞秒激光, 脉冲宽度约为 120 fs, 重复频率为 50 MHz^[9]。紫外激光首先采用焦距为 100 mm 的石英透镜准直, 然后用一个焦距为 15 mm 的石英透镜耦合进光子晶体光纤, 光纤被夹持在一个精密的三维调整架上以获得最大的耦合效率。实验观察到光纤输出端的远场模式如图 5(a) 所示, 呈现为基模光斑且光束质量较好。在光纤弯曲、扭转等情况下, 均未观察到多模现象。由图 4 中光纤横截面扫描电镜图进行二值化处理获得空气孔与融石英介质的边界, 然后根据该边界所表示的实际光纤的结构形状, 采用有限元方法对其进行模式分析。仿真模拟结果也显示, 这种结构的光纤中仅存在基模, 图 5(b) 为获得的光纤基模模场分布图, 未发现有多阶模式。

PCF 在紫外波段损耗较大, 在输入端激光功率为 4.5 mW 时, 取较短的、长度为 26 cm 没有弯曲的光纤, 测得输出功率为 1.2 mW, 长度为 9 cm 时, 输出功率为 1.42 mW, 因此这段 17 cm 光纤损耗为 0.043 dB/cm, 端面耦合效率大于 31%。较高的耦合效率得益于这种光子晶体光纤较大的纤芯直径, 其直径 $D = 2\Lambda - d$, 约为 $4.54 \mu\text{m}$ 。理论计算表明, 光纤的数值孔径 NA 约为 0.044, 较小的 NA 也使得光纤的弯曲损耗较大。光纤有弯曲时, 损耗会迅速增大, 远大于 0.043 dB/cm。值得注意的是, 长时间观测发现, 光纤的内部会产生红色的荧光^[10, 11], 同时光纤损耗也随时间逐渐增大, 输出功率逐渐降低。导致这一现象的主要原因是光纤端面以及内部存在缺陷, 在 高能激光长时间作用下能量

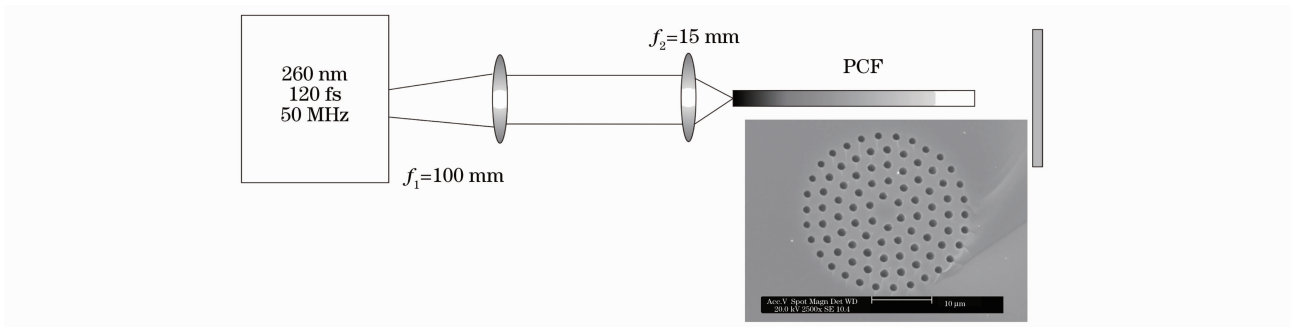


图 4 实验装置图与 PCF 横截面扫描电镜图

Fig. 4 Experimental setup and the scanning electron microscope image of the cross section of a PCF

积累而导致光纤损坏,且光纤曝光过度会使光纤内部产生各种色心,最终导致激光的传输效率下降^[10~13]。重新处理光纤端面后,光纤传输效率会有所增加,但无

法达到最初最高的传输效率。这也与文献中所报道的采用 250 nm 直流激光所观测到的现象一致^[1]。

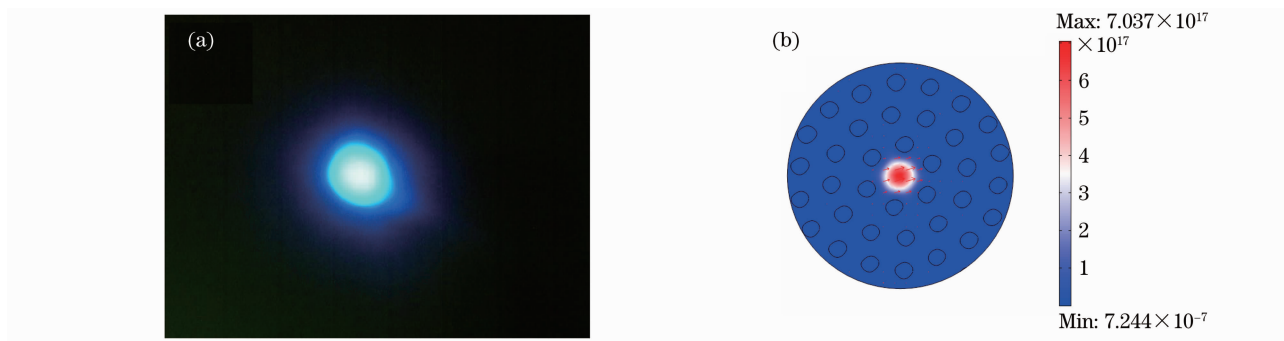


图 5 (a)PCF 输出的 260 nm 远场模式照片,(b)仿真模拟 PCF 基模模场分布

Fig. 5 (a) Photograph of the far-field mode of PCF output at 260 nm,
(b) field of the fundamental mode of numerical simulation of the PCF

4 结 论

基于光子晶体光纤无截止单模特性以及灵活的结构设计自由度,仅仅使用单一的融石英材料,在微结构包层中选取小的空气孔占空比,就可以设计出大纤芯直径、传输宽带紫外激光的单模光子晶体光纤。理论计算表明,当 $\Lambda=2.9 \mu\text{m}$, $d \leq 1.25 \mu\text{m}$ 时,光子晶体光纤在波长大于 200 nm 范围内,均满足单模条件。采用 260 nm 的飞秒激光,实验测试了一根小占空比的光子晶体光纤的传输特性,其纤芯直径约为 $4.54 \mu\text{m}$,传输损耗为 0.043 dB/cm,数值模拟也显示这根光子晶体光纤支持单模传输。这种新型的紫外激光单模光子晶体光纤可满足短距离、高光束质量的紫外激光的传输与应用。

参 考 文 献

- 1 N. Yamamoto, L. Tao, A. Yalin *et al.*. Single-mode delivery of 250 nm light using a large mode area photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(19): 16933~16940
- 2 P. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 3 T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 4 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell *et al.*. Properties of photonic crystal fiber and the effective index model [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(3): 748~752
- 5 R. J. Bartula, J. W. Walewski, S. T. Sanders. Generation of ultraviolet broadband light in a single-mode fiber [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **84**(3): 395~400
- 6 T. Birks, D. Mogilevtsev, J. Knight *et al.*. The analogy between photonic crystal fibres and step index fibres [C]. in Optical Fiber Communication Conference and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OFC /IOOC), 1999, **4**: 114~116
- 7 F. Brechet, J. Marcou, D. Pagnoux *et al.*. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method [J]. *Opt. Fiber Tech.*, 2000, **6**(2): 181~191
- 8 Y. Li, Y. Yao, M. Hu *et al.*. Analysis of the fundamental space-filling mode of photonic crystal fibres: a symmetry point of view [J]. *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(7): 075302
- 9 Liu Huagang, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. High power ultraviolet laser source based on photonic crystal fiber femtosecond laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2812~2816
刘华刚,胡明列,刘博文等.基于光子晶体光纤飞秒激光技术的高功率紫外激光源 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2812~2816
- 10 W. Leung, M. Kulkarni, D. Krajnovich *et al.*. Effect of intense and prolonged 248 nm pulsed-laser irradiation on the properties of ultraviolet-grade fused silica [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(6): 551~553
- 11 R. Taylor, K. Leopold, R. Brimacombe *et al.*. Dependence of the damage and transmission properties of fused silica fibers on the excimer laser wavelength [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(15): 3124~3134
- 12 Xu Shixiang, Li Xishan, Zhang Guoxuan. The XeCl excimer laser induced damage properties of the UV silica fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(8): 645~648
徐世祥,李锡善,张国轩.紫外石英光纤 XeCl 准分子激光感光破坏特性的实验研究 [J]. *中国激光*, 1994, **A21**(8): 645~648
- 13 R. Schenker, P. Schermerhorn, W. Oldham. Deep-ultraviolet damage to fused silica [J]. *J. Vac. Sci. & Technol. B*, 1994, **12**(6): 3275~3279