

文章编号: 1001-2486(2011)02-0001-04

## 光子晶体光纤的空气孔膨胀和拉锥技术研究\*

陈子伦<sup>1</sup>, 奚小明<sup>1</sup>, 孙桂林<sup>1,2</sup>, 徐中南<sup>1</sup>, 侯静<sup>1</sup>, 姜宗福<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 海军航空工程学院 基础部, 山东 烟台 264001)

**摘要:**光子晶体光纤的空气孔膨胀和拉锥技术是一种有效的改变光纤结构参数的技术手段。空气孔膨胀可以改变空气孔的填充比例,即改变空气孔直径和孔间距的大小,光纤拉锥可在保持空气孔直径和孔间距比例不变的情况下改变纤芯的大小。光子晶体光纤结构参数的可控性改变可实现一些特殊光子晶体光纤器件的制作,对进一步实现和挖掘光子晶体光纤的潜在应用价值具有重要的意义。

**关键词:**光纤光学;光子晶体光纤;空气孔膨胀;拉锥;结构参数

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A

## Studies on the Hole Inflation and Tapering Techniques of Photonic Crystal Fibers

CHEN Zi-lun<sup>1</sup>, XI Xiao-ming<sup>1</sup>, SUN Gui-lin<sup>1,2</sup>, Xu Zhong-nan<sup>1</sup>, HOU Jing<sup>1</sup>, JIANG Zong-fu<sup>1</sup>

(1. College of Opto-electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Institute of Systems and Mathematics, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Hole inflation and tapering techniques have been rated effective methods to change the structure parameters of the photonic crystal fibers (PCFs). Hole inflation can change the air-filling fraction, that is, the hole diameter and pitch of the PCFs and tapering can change the core diameter while preserving the cross section of the original PCFs. Controllable-change of the structure parameters of the PCFs allows some special PCF devices to be made, and is of great significance to further realize the potential applications of PCFs.

**Key words:** fiber optics; photonic crystal fiber; hole inflation; tapering; structure parameters

光子晶体光纤(PCF),又称多孔光纤或微结构光纤,其包层是由波长量级的空气孔在二维方向上周期性排列形成的。光子晶体光纤较普通光纤最大的优势在于其结构设计的灵活性,可以很方便地通过改变其结构和结构参量空气孔间距 $\Lambda$ 、空气孔直径 $d$ 来实现普通光纤难以实现的光学特性,例如无截止单模特性、可控的色散特性、高非线性及高双折射性等特性。自1996年第一根全内反射型光子晶体光纤被成功拉制后<sup>[1]</sup>,光子晶体光纤得到了迅速的发展,目前已经成为光电子学领域的研究热点之一<sup>[2-3]</sup>。

光子晶体光纤的后处理技术是对已有的光子晶体光纤进行处理,是实现一些特殊光器件制作的重要手段<sup>[4]</sup>,是进一步实现和挖掘光子晶体光纤潜在应用价值的重要途径。空气孔间距和空气孔大小以及纤芯的大小是光子晶体光纤的重

要结构参数,这些参数的量值直接决定着光子晶体光纤的光学性能。对已有的光子晶体光纤的结构参数进行改变,将会使光子晶体光纤获得一些特殊的光学性能从而实现不同光器件的制作。光子晶体光纤空气孔膨胀和光纤拉锥就是这样的一种后处理技术<sup>[5-9]</sup>,它可以任意的改变现有光子晶体光纤的结构参数,实现光子晶体光纤的特殊性能。本文对光子晶体光纤的空气孔膨胀和拉锥技术进行了详细的实验研究,通过合理的参数设置,可以实现光子晶体光纤空气孔任意比例的膨胀和纤芯任意比例的拉锥。

### 1 理论基础

光子晶体光纤在熔融拉锥机上加热的过程中,光纤基质二氧化硅会慢慢变软甚至熔化,包层中的空气孔由于受到表面张力的作用而塌缩。如

\* 收稿日期:2010-10-09

基金项目:教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-08-0142);国家自然科学基金资助项目(61007037)

作者简介:陈子伦(1978—),男,讲师,博士。

果通过向光子晶体光纤空气孔中充气,改变空气孔的压强,在加热的过程中内部气体产生的压力超过表面张力的作用,空气孔就会发生膨胀。光子晶体光纤在加热过程中空气孔保持不变形时,空气孔内部的压强具有一个临界值<sup>[4]</sup>

$$P_{st}(\text{bar}) = 6/d(\mu\text{m}) \quad (1)$$

式中,  $P_{st}$  为空气孔不变形的临界压强值,  $d$  为光子晶体光纤空气孔的直径。当空气孔内的压强  $P > P_{st}$  时,加热过程中空气孔将膨胀;当  $P = P_{st}$  时,加热过程中空气孔不变形;当  $P < P_{st}$  时,加热过程中空气孔将缩小。因此,要使光子晶体光纤空气孔发生膨胀,需要满足下面两个条件:一是空气孔内部的压强要大于式(1)中的临界压强值;二是光子晶体光纤加热的温度要足够高,能够使光纤材料变软或者熔化,这样光子晶体光纤空气孔才能发生变形。

光子晶体光纤空气孔膨胀的示意图见图 1(a),光子晶体光纤一端通过塌缩空气孔密封,在光纤另一端进行充气加压。经过一段时间,光纤空气孔中的气压与充气气压平衡,充气加压完成。每次改变充气气压时,都需要等待空气孔中的气压平衡,否则膨胀过程中每个空气孔的膨胀程度会不一样。充气过程需要的时间视光纤的长短、光纤空气孔的大小以及充气气压的大小而定。光纤越长,空气孔越小,充气气压越高,则充气的时间也越长,一般需要 10~30min。充气加压完成后就可在拉锥机上进行加热膨胀。

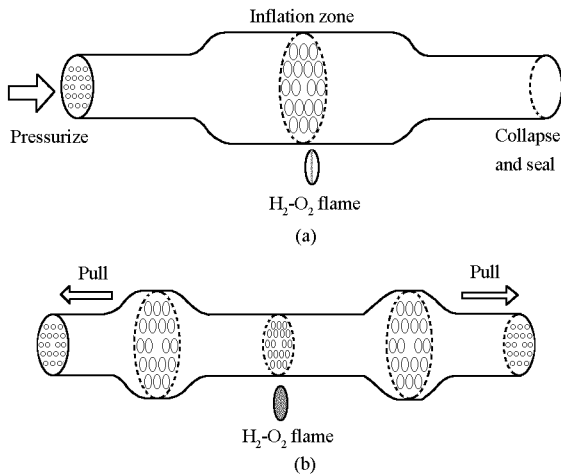


图 1 光子晶体光纤空气孔膨胀(a)和拉锥(b)示意图  
Fig.1 Schematic picture of PCF's hole inflation (a) and tapering(b)

光子晶体光纤空气孔膨胀后,改变了光子晶体光纤空气孔直径和孔间距的大小,光纤的芯径基本保持不变。为了改变光纤芯径的大小,可以对空气孔膨胀后的光子晶体光纤进行拉锥。在拉

锥过程中,通过熔融拉锥机参数的设置,可以在保持光子晶体光纤空气孔直径和孔间距比例不变的情况下的光纤拉锥,见图 1(b)。这样通过空气孔膨胀和光纤拉锥就可以任意地改变光子晶体光纤的所有结构参数,从而实现想要的光纤结构参数。

## 2 实验装置

光子晶体光纤空气孔膨胀和拉锥的实验装置示意图如图 2 所示,其中图 2(a)为熔融拉锥机部分,主要是由火焰移动台 A、固定及拉伸光纤移动台 B 以及控制系统(图 2 中未给出)组成。火焰移动台可以实现来回扫功能,最大复扫距离为 30cm;两光纤移动台 B 的最大拉伸距离大于 30cm,从而光纤的加热处理距离能够达到 30cm。图 2(b)为光子晶体光纤充气装置,由充气仓 C 和压力调节阀 D 构成,能够实现对光子晶体光纤空气孔充气,通过调节压力调节阀 D 可以任意调节空气孔内气体压强。

在实现光子晶体光纤空气孔膨胀的实验中,首先将光子晶体光纤的一端固定在充气仓 C 内,将光纤另一端的空气孔完全密封(可以利用熔接机或者熔融拉锥机塌缩空气孔密封,也可以使用紫外固化胶密封);然后通过充气仓 C 向光子晶体光纤内充入干燥  $N_2$ ,利用压力调节阀 D 控制充气仓内的气压;等空气孔内气体压强达到平衡后,在熔融拉锥机上加热一段光子晶体光纤,通过调节加热参数,就可以实现光纤加热部分空气孔任意比例的膨胀。在光子晶体光纤的拉锥过程中,不需要使用充气装置,通过合理的参数设置在熔融拉锥机上就可以实现空气孔和孔间距比例保持不变的原始光纤任意比例的拉锥。

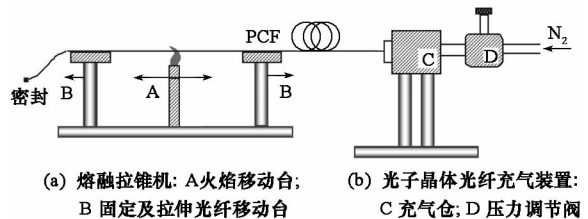


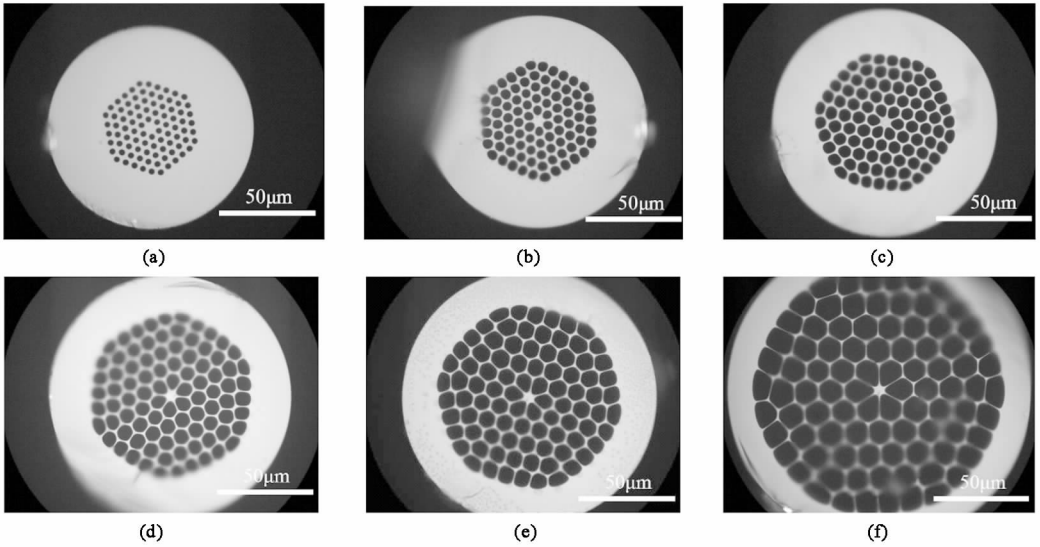
图 2 光子晶体光纤空气孔膨胀及拉锥装置示意图  
Fig.2 Schematic experimental setup of PCFs' hole inflation and tapering

## 3 实验结果

利用上面介绍的光子晶体光纤空气孔膨胀和拉锥实验装置,进行了光子晶体光纤空气孔膨胀和拉锥实验。光子晶体光纤的显微镜照片见图 3

(a)。空气孔的大小为  $3.4\mu\text{m}$ ,通过式(1)计算可得到临界压强值为  $1.77\text{bar}$ ,实验中所使用的充气压强值为  $6\text{bar}$ ,大于临界压强值,因此,在加热过程中空气孔将发生膨胀。在使空气孔发生膨胀时,所采用的方法是“高温低速法”,“高温”能够使光纤材料变软或者熔化,从而使光子晶体光纤空气孔易发生形变,“低速”是火焰的扫描速度(复扫速度)要慢,给光纤空气孔足够的变形时间。光纤在膨胀过程中不需要拉锥,但是为了使光纤在加

热过程中一直处于绷直的状态,实验中会使光纤在很小的速度下向两边拉伸。通过控制火焰复扫的次数就可以控制加热的时间,最终得到不同程度的膨胀效果。不同火焰复扫次数下空气孔的膨胀效果见图 3,在加热过程中其他所有的参数都相同,火焰的复扫速度  $3000\mu\text{m/s}$ ,光纤的拉伸速度  $10\mu\text{m/s}$ ,氢气火焰的流量为  $125\text{ sccm}$ (standard cubic centimeter per minute)。

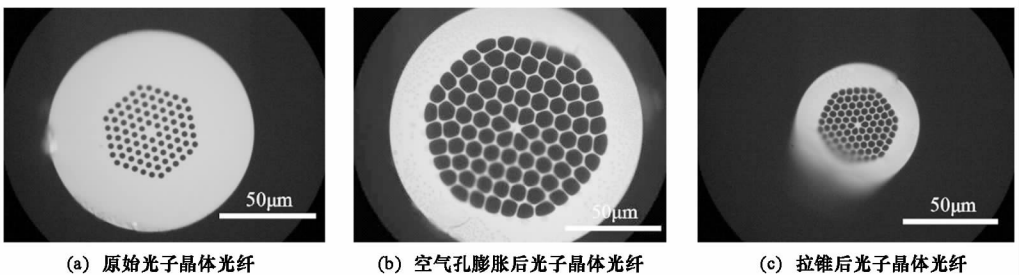


(a) 原始光子晶体光纤; (b)-(f) 不同复扫次数下空气孔膨胀的光子晶体光纤, 分别对应的复扫次数为 4~8 次

图 3 光子晶体光纤充气膨胀后横向截面显微镜照片  
Fig.3 Micrographs of the cross section of hole-inflated PCFs

光子晶体光纤空气孔膨胀过程可以改变空气孔直径与孔间距的大小,但在这一过程中光纤纤芯直径基本保持不变,一些特殊的要求需要改变光子晶体光纤的芯径,拉锥是改变芯径的一种有效途径。与普通光纤的拉锥效果相同,拉锥过程将光纤的外径和纤芯直径等比例缩小,不同的是光子晶体光纤的拉锥过程必须保证空气孔不会因为加热而塌缩。光子晶体光纤的拉锥过程是在不充气的状态下完成的,光纤的两端与外界空气直接连通,所以空气孔中的气压与大气压相等。由

式(1)可知,在这种情况下利用“高温低速法”加热光纤会使空气孔塌缩。在拉锥过程中为了尽量保持光子晶体光纤的截面相对比例不变形,采用的方法是“低温快速法”,“低温”可以尽量减少空气孔的变形,“快速”可以减少光纤的加热时间。实现方式是将氢气的流量减小,火苗的复扫速度加快。图 4 是光子晶体光纤先膨胀后再进行拉锥的光子晶体光纤截面图,拉锥过程中所用的参数为:火焰的复扫速度  $8000\mu\text{m/s}$ ,光纤的拉伸速度  $1400\mu\text{m/s}$ ,氢气火焰的流量为  $90\text{sccm}$ 。



(a) 原始光子晶体光纤 (b) 空气孔膨胀后光子晶体光纤 (c) 拉锥后光子晶体光纤

图 4 光子晶体光纤膨胀拉锥后横向截面显微镜照片  
Fig.4 Micrographs of the cross section of inflated-and-tapered PCFs

采用“高温低速法”实现光子晶体光纤空气孔的膨胀,然后采用“低温快速法”实现光子晶体光

纤的拉锥。利用这两种方法就可以对现有光子晶体光纤的结构参数进行任意改变,实现光子晶体光纤的一些特殊光学性能。光纤结构参数的变化将改变最初的波导结构,所以产生的损耗是必须考虑的。通过文献[7]理论研究显示,波导结构的变化过程只要满足渐变条件,则引入的损耗是可以忽略的。而在利用熔融拉锥机加热光纤的过程中,只要逐次减小火焰的复扫路程就可以使光纤波导变形过程出现渐变区域,而且渐变区域的长度也是可以控制的。在线监测了拉锥过程的损耗,首先在膨胀后光纤的一端入射 1550nm 激光,在光纤另一端测量得到功率  $P_1$ ,再对光纤进行拉锥处理,测量拉锥后光纤输出端的功率  $P_2$ ,则可计算得到拉锥过程的损耗。实验中测得损耗小于 0.1dB,实验结果显示,光纤结构参数变化的过渡区域大于 1cm 就可以满足渐变条件,从而引入的损耗较小。

#### 4 结论与展望

本文详细介绍了光子晶体光纤的空气孔膨胀和拉锥后处理技术。在实验过程中分别采用“高温低速法”、“低温高速法”实现了光子晶体光纤空气孔的膨胀和光纤拉锥。利用这种后处理技术,可以任意地改变原始光子晶体光纤的结构参数,如空气孔直径和孔间距以及纤芯直径。由于光纤的波导结构变化很容易满足渐变条件,所以光纤的空气孔膨胀和拉锥引入的损耗非常小。

利用空气孔膨胀和拉锥后处理技术可以任意

地改变光子晶体光纤的结构参数,从而可以在原有光子晶体光纤光学性能的基础上获得一些特殊的光学性能,为一些特殊光子晶体光纤器件的制作提供了一种有效的途径,这对进一步实现和挖掘光子晶体光纤的潜在应用具有重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, et al. All-silica Single-mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(19):1547 - 1549.
- [2] 王伟,侯蓝田.光子晶体光纤的现状和发展[J].*激光与光电学进展*, 2008, 45(2):43 - 58.
- [3] 王清月,胡明列,柴路.光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J].*中国激光*, 2006, 33(1):57 - 66.
- [4] 陈子伦,侯静,姜宗福.光子晶体光纤的后处理技术[J].*激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 020602 - 1 - 7.
- [5] Wadsworth W J, Witkowska A, Leon-Saval S G, et al. Hole Inflation and Tapering of Stock Photonic Crystal Fibres [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(17): 6541 - 6549.
- [6] Xiong C, Witkowska A, Leon-Saval S G, et al. Enhanced Visible Continuum Generation from a Microchip 1064nm Laser [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(13): 6188 - 6193.
- [7] 奚小明,陈子伦,孙桂林,等.双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究[J].*光学学报*, 2011, 32(1):0206001 - 1 - 4.
- [8] 奚小明,陈子伦,孙桂林,等.普通光纤与小芯径实芯光子晶体光纤的塌孔熔接技术研究[J].*中国激光*, 2011, 38(1): 0106004 - 1 - 5.
- [9] Town G E, Lizier J T. Tapered Holey Fibers for Spot-size and Numerical-aperture Conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26(14): 1042 - 1044.