

柚子型光子晶体光纤布拉格光栅理论及实验研究

齐跃峰^{1,2} 侯崇岭¹ 毕卫红^{1,2}

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004
²燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 利用有限元法对一种柚子型光子晶体光纤中的传输模式进行了模拟,得到了各传输模式的有效折射率和模场分布。结合耦合模理论和相关函数方法,对柚子型光子晶体光纤布拉格光栅反射谱进行了理论分析,解释了柚子型光纤光栅出现多个谐振峰的原因;数值分析了光纤纤芯直径和空气孔尺寸对光栅传输谱的影响。结果表明谐振峰波长随纤芯直径的增大向长波方向漂移,而随空气孔增大向短波方向移动,并且不同谐振模式的变化幅度不同;利用相位模板法撰写了光子晶体光纤光栅,实验结果与理论分析能够很好地吻合。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;布拉格光栅;耦合模理论;相位模板法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0205004

Theoretical and Experimental Research on Fiber Bragg Gratings in Grapefruit Photonic Crystal Fibers

Qi Yuefeng^{1,2} Hou Chongling¹ Bi Weihong^{1,2}

¹Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
²Key Laboratory of Especial Optical Fiber and Fiber Sensor (Hebei Province),
Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract The grapefruit photonic crystal fiber is simulated using finite element method (FEM). The effective refractive index and field distribution of each mode are calculated. Based on the coupled mode theory and correlation function mode-solver, the transmission spectrum of fiber Bragg gratings in grapefruit photonic crystal fibers is studied and the result explains the reason of multiple peaks. The influence of the structure change of the fiber core diameter and air hole size on the transmission spectrum is simulated. The results show that the resonance wavelength would shift to the longer wavelength with the increase of the diameter of the fiber core. The resonance wavelength would shift to the shorter wavelength with the increase of the size of the air holes, and the change is different for each resonant pattern. The fabrication of Bragg grating in a photonic crystal fiber is investigated experimentally by phase mask method. Experimental data are consistent with simulation numerical results.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; Bragg grating; coupled mode theory; phase mask method

OCIS codes 060.2310; 060.5295; 050.2770

1 引言

光子晶体光纤(PCF)^[1]自问世以来,已经发展成为光电子器件研究领域的一个热点,而且由其制作的光器件也正在向实用化方向迈进^[2,3]。

基于光子晶体光纤撰写的光纤光栅(FG)成为了无源微结构光纤器件的代表。在光子晶体光纤上成功写入的光纤布拉格光栅(FBG),得到的反射谱具有多个谐振峰^[4],并且这种光栅不同谐振峰对温

度和应变等物理量敏感度不一致,因此更适合应用到多参量传感领域。这种器件有望在光通信、光传感领域得到广泛的应用^[5~7]。

自1999年Eggleton等^[8]首次报道在PCF上写入光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅以来,光子晶体光纤光栅(PCFG)的制备方法及理论分析正成为人们研究的热点^[9~12]。目前,PCFG的制作有很多种方法,如相位模板法、热激成栅法、机械压力法、

收稿日期: 2011-08-31; 收到修改稿日期: 2011-10-25

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)、河北省自然科学基金(F2010001286)和河北省应用基础研究计划(10963526D)资助课题。

作者简介: 齐跃峰(1972—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yfqi@ysu.edu.cn

双光子吸收法等。与其他的制作方法相比,紫外曝光技术写制 PCFG 的优点是沿袭了传统光纤光栅写制技术,继承性好,技术比较成熟,且容易实现批量生产。PCF 和传统的光纤光栅写入技术的结合为制造新型的光纤光栅提供了良机。

本文通过理论分析和实验研究,对柚子型 PCFG 的成栅机理进行了分析。

2 耦合模理论

光纤光栅是一种参数纵向周期变化的光子器件。纤芯折射率调制的均匀光子晶体布拉格光栅中,模式耦合主要发生在前向传输的纤芯模和反向传输的纤芯模以及反向传输的包层模之间。在理想情况下,各阶次模式之间没有能量交换,但光栅中周期性的折射率变化引起了模式间耦合的发生。

光纤中纤芯模与反向传导的纤芯模或包层模式之间耦合的相位匹配条件如下^[8,13]:

$$\beta_{\text{clad},i} + \beta_{\text{co}} = 2\pi/\Lambda, \quad (1)$$

式中 $\beta_{\text{clad},i}$ 和 β_{co} 分别表示第 i 阶包层模的传播常数和纤芯模的传播常数, Λ 为布拉格光栅的周期。传播常数表达式为

$$\beta = (2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}, \quad (2)$$

式中 β 为传播常数, λ 为波长, n_{eff} 为有效折射率。因此,第 i 阶包层模的谐振波长为

$$\lambda_{\text{clad},i} = (n_{\text{clad},i} + n_{\text{co}})\Lambda, \quad (3)$$

式中 $n_{\text{clad},i}$ 为第 i 阶包层模的有效折射率。

在光子晶体光纤布拉格光栅中,纤芯模式之间耦合的谐振波长满足

$$\lambda_{\text{B}} = 2n_{\text{co}}\Lambda, \quad (4)$$

式中 λ_{B} 为光栅布拉格波长, n_{co} 为纤芯模的有效折射率。

模式耦合的谐振峰的强度由耦合系数表征。耦合系数又分为横向耦合系数和纵向耦合系数,在弱导情况下,由于横向耦合模场远远大于纵向模场,所以在光栅中可以忽略纵向模场之间的耦合作用。 $K'_{ij}(z)$ 表示第 i 阶与第 j 阶模的横向耦合系数,积分式如下^[8,13]:

$$K'_{ij}(z) = \frac{\omega}{4} \iint_{\text{core}} \Delta\epsilon(x,y,z) e_i(x,y) e_j^*(x,y) dx dy, \quad (5)$$

式中 e_i 和 e_j 分别表示第 i 阶与第 j 阶模的电场分布, ω 表示角频率, $\Delta\epsilon(x,y,z)$ 表示介电微扰,在 $\Delta n \ll n$ 时, $\Delta\epsilon = \epsilon_0 \Delta n^2 \approx 2\epsilon_0 n \Delta n$, 其中 ϵ_0 为真空中的介电常数, n 是纤芯折射率, Δn 是光栅折射率调制深度。由此,耦合系数为

$$K'_{ij}(z) = \sigma_{ij}(z) + 2k_{ij}(z) \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right), \quad (6)$$

式中 σ_{ij} 为直流耦合系数, k_{ij} 为交流耦合系数, Λ 为光栅周期。其中,

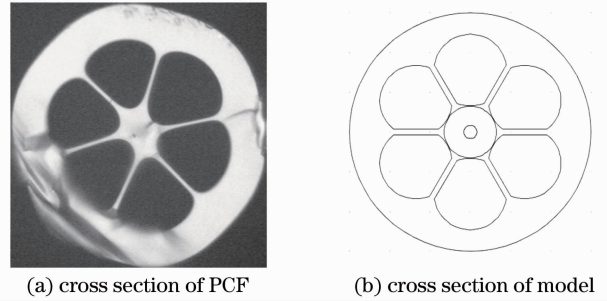
$$\sigma_{ij}(z) = \omega \frac{\epsilon_0 n_{\text{co}}}{2} \iint_{\text{core}} \overline{\Delta n_{\text{co}}(z)} e_i(x,y) e_j^*(x,y) dx dy, \quad (7)$$

$$k_{ij}(z) = (s/2)\sigma_{ij}(z), \quad (8)$$

式中 s 表示与折射率调制有关的条纹可见度,根据光栅反射率的强弱取值,反射率强时取 1,弱时取 0.5。

3 数值结果及分析

对实验所用的柚子型光子晶体光纤进行数值模拟,光纤结构如图 1(a)所示。纤芯直径为 $6.6 \mu\text{m}$, 光纤直径 $125 \mu\text{m}$, 纤芯与空气孔之间的区域为内包层,直径为 $19 \mu\text{m}$, 柚子型空气孔径长 $35 \mu\text{m}$, 孔间距 $2 \mu\text{m}$, 孔外边缘与光纤包层边缘间距 $18 \mu\text{m}$ 。包层折射率为 1.4460, 掺锗纤芯折射率 1.4493。



(a) cross section of PCF (b) cross section of model

图 1 柚子型光子晶体光纤的横截面和模型横截面

Fig. 1 Grapefruit photonic crystal fiber's cross section and cross section of the model

3.1 模式耦合分析

利用有限元法^[14,15]分析光纤中传输的模式,得到特定波长对应的各传输模式的有效折射率和模场分布。图 2 是所得前四阶模式的模场分布,其中 LP_{01} 为纤芯模式, LP_{02} 、 LP_{03} 、 LP_{04} 分别为 1、2、3 阶包层模。从图中可以看出,参与耦合的各阶谐振模式在纤芯的能量分布都很集中,由(5)式可知,模式在纤芯的能量分布直接影响耦合发生的强度。

分析模式时,依次改变波长,得到图 2 所示的四阶模式在不同波长所对应的有效折射率和模场分布。根据(2)式传播常数和有效折射率之间的关系,可以得到各模式的传播常数的拟合曲线,如图 3 所示,其中 β_A 、 β_B 、 β_C 、 β_D 分别表示纤芯模和包层模在 1550 nm 波长附近的传播常数,虚线表示 $2\pi/\Lambda - \beta_{\text{co}}$, 为相位匹配条件,图中虚线与各实线的交点即满足布拉格谐振条件的波长。

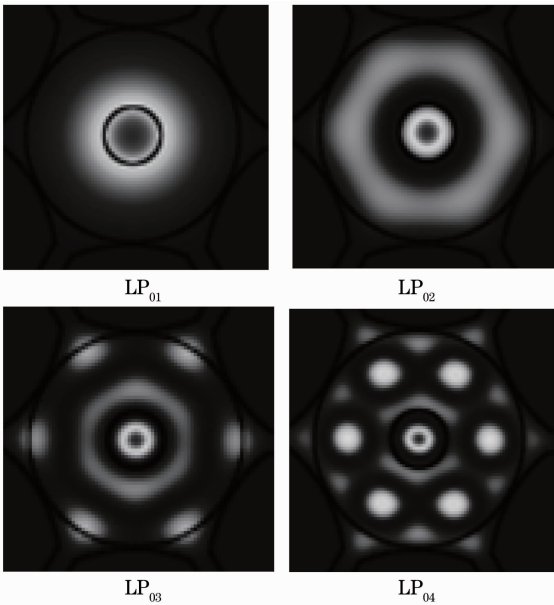


图 2 参与耦合的各模式模场图

Fig. 2 Field distribution of each mode

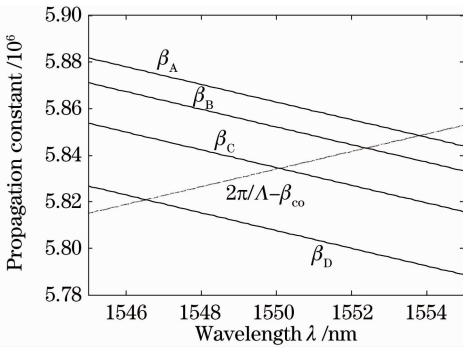


图 3 谐振模式的色散曲线

Fig. 3 Dispersion curves of resonant patterns

图 4 给出了四个谐振峰的反射谱,01 表示正反纤芯模式之间的耦合,02、03、04 分别表示一阶、二阶和三阶包层模与纤芯模的相互耦合。01~04 各个谐振峰值分别为 1554.1, 1552.3, 1550.1, 1546.5 nm。分析可知,在普通单模 FBG 中,包层模的能量分布在整个包层中,而纤芯半径远小于包层半径,因此包层模与纤芯模的耦合较小,而柚子型 PCF 由于空气孔的存在,低阶模式被限制在空气孔内的区域,包层模与纤芯模的耦合强度变大,因此,满足相位匹配条件的模式,在与纤芯重叠的区域发生耦合,从而产生了 PCFG 有多个谐振峰的现象。根据耦合模理论,模式间的耦合强度由耦合系数表示,根据(5)式可知,由于不同包层模式在纤芯折射率调制区域的场强分布不同,其与纤芯模式场的交叠积分区域也不同,计算得出的耦合系数不同,即耦合强度不同。纤芯模式之间的耦合交叠区域最大,因此耦合强度最强,表

现在反射峰值上也最大。

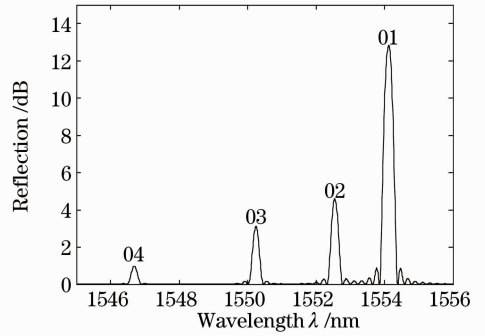


图 4 柚子型光子晶体光纤光栅的反射谱

Fig. 4 Reflection spectrum of Bragg gratings in grapefruit photonic crystal fiber

3.2 光纤结构的改变对光栅谐振峰的影响

对于不同的结构参数,光纤中各个模式的有效折射率以及模场的分布都会受到影响,表现在传输谱上,就是各个谐振峰的变化规律。在柚子型光子晶体光纤中,纤芯的直径和包层空气孔的大小是对谐振峰影响最为明显的两个参数。本文通过改变这两个参数,对光纤光栅传输谱进行了研究,从中得到了各谐振峰随不同参数变化的规律,为制作合适的 PCFG 提供理论依据。

3.2.1 纤芯直径对谐振峰的影响

如图 5 所示,改变光子晶体光纤纤芯的直径,发现各谐振波长随着纤芯直径的增加向长波方向移动。图中 A1,B1,C1,D1 分别表示纤芯谐振峰和包层谐振峰随纤芯直径增大的变化。当特定波长的光束在光纤中传输时,各个谐振模式的有效折射率随纤芯直径的变化呈近似线性的变大。因此,导致各谐振峰向长波方向线性移动。

图 6 是各谐振峰之间的间距随纤芯直径的变化。E1,F1,G1 分别表示纤芯谐振峰和一、二、三阶包层谐振峰之间的间距随纤芯直径变化的趋势。从

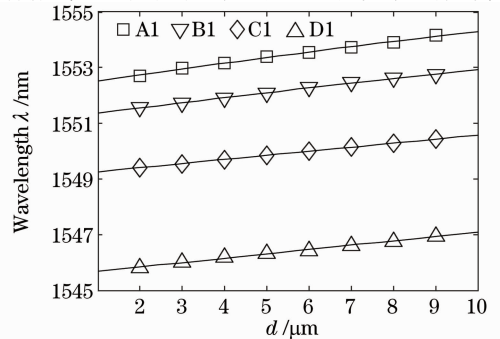


图 5 各谐振峰随纤芯直径的变化

Fig. 5 Resonance peak change versus the diameter of fiber core

中可以看出,随着纤芯直径的变化,各谐振峰的间距变化很小,基本保持一致。这是因为,当纤芯直径增大时,各谐振模式的有效折射率线性增加,同时变化幅度几乎相同,从而反射谱中的纤芯模谐振峰和各阶包层模谐振峰整体向长波方向移动,因此各谐振峰间距离保持一致。

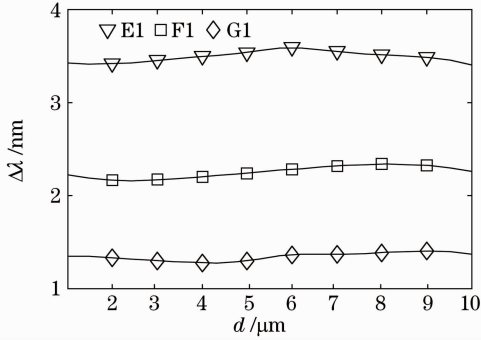


图 6 各谐振峰间距随纤芯直径的变化

Fig. 6 Spacing of resonance peak versus the diameter of fiber core

3.2.2 空气孔对谐振峰的影响

柚子型光子晶体光纤中的空气孔是不规则的形状,研究时将空气孔近似成圆,因此得到其几何中心,再进行不同比例的增大或减小,得到了不同大小的空气孔下各谐振波长的反射谱,发现谐振波长随着空气孔的增大向短波方向漂移。在不同结构下,谐振峰间距也在增加,随着空气孔的增大,各谐振模式的变化趋势也有差别:对于纤芯模,谐振峰的变化很小,而对于包层模其变化较大,同时,阶数越高,变化就更大。如图 7 所示,随着空气孔的增大,所得的反射谱向短波方向移动。图 7 中 A, B, C, D 分别表示纤芯谐振峰和包层谐振峰的变化。

图 8 表明各峰值间的间距随空气孔增大在逐渐变大,图中 E, F, G 分别表示纤芯谐振峰和一、二、三阶包层谐振峰之间的间距随空气孔的变化。对此分析可知,空气的存在将包层模式限制在内包层中,这

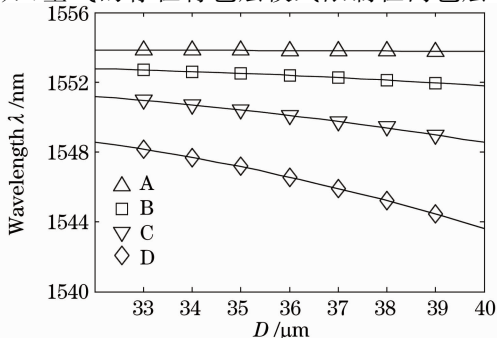


图 7 各谐振峰随空气孔尺寸的变化

Fig. 7 Resonance peak change versus the size of air hole

将导致包层的有效半径减小,而且根据文献[9]可知,第 i 阶谐振峰与第 $i+1$ 阶谐振峰之间的波长差随着包层有效半径的减小而增大。同时由于空气孔的变化对纤芯模谐振峰几乎没有影响,而对于包层模式的影响较大,因此,随着波长间隔的增加,包层模谐振峰向短波方向漂移。

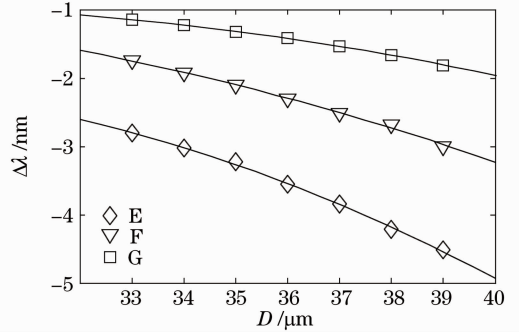


图 8 各谐振峰间距随空气孔尺寸的变化

Fig. 8 Spacing of resonance peak versus the size of air hole

4 光子晶体光纤布拉格光栅实验

4.1 实验装置

本实验中,紫外光源采用相干公司的 COMPexPro-50 型 ArF 准分子激光器,工作波长为 193 nm,柚子型光子晶体光纤纤芯直径为 3.3 μm ,包层直径为 125 μm 。实验装置如图 9 所示,使用环形器连接宽带光源、光子晶体光纤和光谱分析仪,以便在写制光栅的同时观测光栅的反射谱。相位模板由 StockerYale 公司生产,周期为 1068.07 nm。

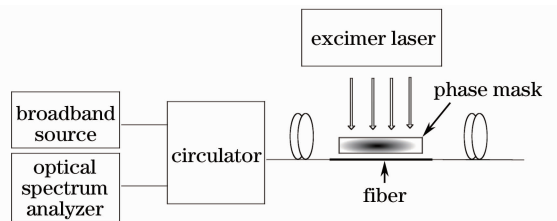


图 9 相位模板法制作光纤光栅装置图

Fig. 9 Experimental setup of grating fabrication with phase masks

4.2 光子晶体光纤载氢

光敏性对光纤成栅起着关键性的作用,直接影响成栅的效果。与单模光纤相比,由于 PCF 包层中空气孔的存在,加之光纤的纤芯直径比较小,载氢效果很差。为了克服这一缺点,本课题组在载氢前,将 PCF 的涂覆层去除一段,同时采用加热处理,加快载氢速度,这将在很大程度上增加纤芯中氢的含量。实验前将 PCF 放置在 12 MPa 下加热载氢一周。

4.3 实验结果分析

实验采用 10 Hz 脉冲频率, 激光器能量 30 mJ。实验中发现, 各个谐振峰并不是同时出现, 而是从主峰最先开始, 当主峰增加到 8 dB 时, 左侧才出现第一个包层模谐振峰, 随着曝光时间增加, 其他两个谐振峰先后出现。对 PCF 曝光 3500 次, 主峰的反射率已经达到了 90% 以上。写入过程中观察到 PCF 中空气孔使紫外光线有一定的散射, 这也是 PCFG 比普通单模光纤光栅制作困难的一个原因。

实验结果如图 10 所示, 由于单模光纤与光子晶体光纤的连接不理想, 图像中产生了很多的小波峰, 这是由于两端折射率突变引起的法布里-珀罗(F-P)效应所致。

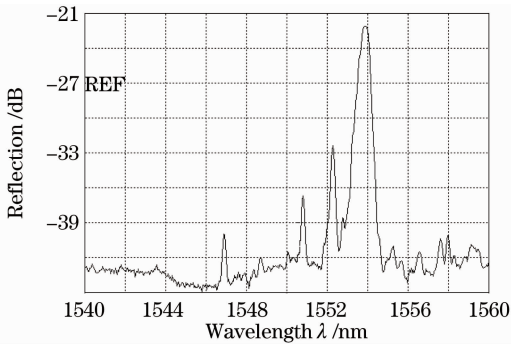


图 10 PCFG 的实验图形

Fig. 10 Experimental result of PCFG

根据实验中出现的四个波峰, 对数值分析结果和实验数据进行比较, 如表 1 所示。

表 1 模拟和实验数据对比

Table 1 Comparison between simulation and experimental data

Coupled modes	Simulation results	Experimental results
LP_{01} - LP_{01}	1554.1 nm	1553.9 nm
LP_{01} - LP_{02}	1552.3 nm	1552.2 nm
LP_{01} - LP_{03}	1550.1 nm	1550.6 nm
LP_{01} - LP_{04}	1546.5 nm	1546.8 nm

在反射谱中, 波长对应 1553.9 nm 的谐振峰满足纤芯耦合的布拉格条件, 是光栅的主反射峰, 深度达到了 21 dB, 其他反射峰是纤芯模式与包层模式耦合的结果, 反射率呈依次下降趋势, 包层模的耦合强度要弱于纤芯模, 同时损耗很大。

5 结 论

利用有限元法分析了一种柚子型光子晶体光纤的传输特性, 借助于耦合模理论分析了其多个谐振峰的反射谱。由于空气孔将低阶模式限制在内包层中, 在与纤芯重叠的区域, 满足相位匹配条件的模式

才会发生耦合, 同时, 模式在重叠区域的场强以及与纤芯模式电场的重叠积分的大小直接影响了谐振峰强度, 这也解释了光子晶体光纤出现多个不同反射深度的谐振峰的原因。研究了纤芯直径和空气孔尺寸的改变对光栅传输谱的影响, 结果表明谐振峰波长随纤芯直径的增大向长波方向漂移, 而随空气孔增大向短波方向移动, 并且不同谐振模式的变化幅度不同。实验中得到的柚子型 PCFG 与理论分析吻合, 为写入光栅提供了实践的依据。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2415~2418
刘博文, 胡明列, 宋有建等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 3 Sun Bing, Chen Mingyang, Zhou Jun *et al.*. Design of a broadband mode converter based on an asymmetric dual-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1581~1585
孙兵, 陈明阳, 周骏等. 非对称双芯光子晶体光纤宽带模式转换器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1581~1585
- 4 Liu Jianguo, Kai Guiyun, Xie Lifang *et al.*. The analysis of microstructure optical fiber Bragg grating resonant peaks[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(5): 369~373
刘建国, 开桂云, 薛力芳等. 微结构光纤光栅谐振峰的分析[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(5): 369~373
- 5 Zhao Jiarong, Jin Wei, Ju Jian *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement using a highly birefringence fiber loop mirror and a long-period grating written in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(20): 4077~4080
- 6 Faramarz E. Seraji, S. Farsinezhad, Leila Chehrehghani Anzabi. Optimization of long-period grating inscribed in large mode area photonic crystal fiber for design of bandstop filter[J]. *Optik*, 2011, **122**(1): 58~62
- 7 Yiping Wang, Hartmut Bartelt, Wolfgang Ecke *et al.*. Sensing properties of fiber Bragg gratings in small-core Ge-doped photonic crystal fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(6): 1129~1134
- 8 B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, R. S. Windeler *et al.*. Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1460~1462
- 9 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Jin Long *et al.*. Recent progress on imprinting technologies of photonic crystal fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 42~47
涂勤昌, 张伟刚, 金龙等. 光子晶体光纤光栅制备方法最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 42~47
- 10 Qi Yuefeng, Bi Weihong, Liu Yanyan *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, 刘海燕等. 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
- 11 Chen Weiguo, Lou Shuqin, Wang Liwen *et al.*. Properties of long period gratings in photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 699~704
陈卫国, 娄淑琴, 王立文等. 光子晶体光纤长周期光栅的特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 699~704

12 Qi Yuefeng, Bi Weihong. Theoretical study on a kind of photonic crystal fiber grating based on structural change[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106003
 齐跃峰, 毕卫红. 一种基于结构性改变的光子晶体光纤光栅理论研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106003

13 B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook *et al.*. Microstructured optical fiber devices[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 698~713

14 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng. Analysis of the

microstructure fiber by the finite element method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1337~1342
 胡明列, 王清月, 栗岩峰. 微结构光纤的有限元分析计算法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1337~1342

15 Zhang Fangdi, Liu Xiaoyi, Zhang Min *et al.*. A full-vector FEM model and its application to optical waveguides and photonic crystal fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 209~215
 张方迪, 刘小毅, 张 民等. 全矢量有限元模型及其在光波导和光子晶体光纤中的应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 209~215

栏目编辑: 谢 婧

260 μm 芯径超大模场光子晶体光纤实现准单模传输

大模场光子晶体光纤的结构和设计具有很高的灵活性,能够通过调整其微结构来获得实现高能激光输出所需的有效模面积等优良特性,使光纤激光器的性能显著改善。国内目前对于光子晶体光纤的研究主要集中在基础理论和基本性能的测试上。近年来,中国科学院上海光学精密机械研究所在光子晶体光纤的制备方面展开了探索性的研究,目前掺 Yb³⁺ 石英光子晶体光纤已经实现了功率达到 7 W 的连续输出。

聚束拉丝法具有设计灵活、操作方便、容易实现复杂结构等优势而被广泛采用,该方法就是很多根高纯毛细管事先排列成一定的点阵结构,将其固化为微结构光纤预制棒,然后在拉丝设备上将其直接拉制成微结构光纤。为了保持所设计光纤结构的完整性,我们对光纤预制棒进行了处理,使其在拉丝过程中保持所设计的点阵结构,得到了结构非常完整的微结构光纤,其结构如图 1 所示。

对于如图结构光纤,损耗测试表明,其在 1053 nm 波长处的损耗为 2 dB/m。除结构损耗外,损耗主要来源于所使用石英玻璃的不纯造成的。我们采用长焦透镜耦合的方式测试 2 m 长,芯径 260 μm,外径 800 μm 的光纤在 980 nm 波长处的传输特性。如图 1 所示,光纤近场光强分布为高斯分布。采用刀

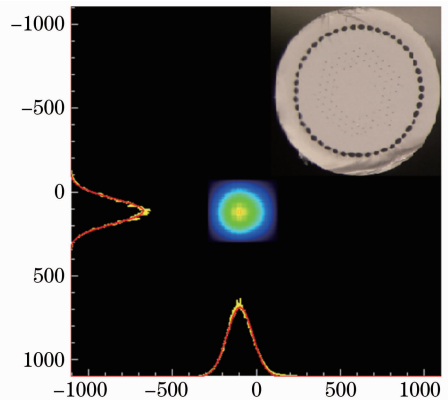


图 1 光纤端面结构图及在 980 nm 波长测得的场强分布图

Fig. 1 Cross-section of microstructure fiber and filed intensity at 980 nm

口法测试输出光束的发散角, x 方向的发散角为 3.63° , y 方向 3.72° , 约是单模理论设计的 2 倍。这表明光纤中除了基模还有一定的高阶模被激发,但基模是主要成分,因此光强分布为高斯分布。可能的原因是所拉制的光纤结合了双包层光纤和泄露模光纤进行设计,由于高温拉制过程中光纤畸变导致高阶模没有泄露完全。这是国内目前报道的能够实现准单模传输的最大芯径,为下一步实现稀土掺杂大模场微结构光纤的制备打下了基础。

冯素雅 王 孟 于春雷 周秦岭 陈丹平 陈 伟 胡丽丽

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

收稿日期: 2011-11-11; 收到修改稿日期: 2011-11-28