

文章编号: 0258-7025(2010)10-2559-06

外径波动下空心布拉格光纤的模式传输特性

石立超¹ 张 巍¹ 邢文鑫¹ 李志广² 王文涛² 黄翊东¹ 彭江得¹

(¹ 清华大学电子工程系, 北京 100084; ² 北京玻璃研究院, 北京 100062)

摘要 在空心布拉格光纤拉制过程中引入的光纤外径波动会造成不同位置光纤包层一维光子晶体结构的光子带隙不完全重叠, 极大地影响光纤的传输特性。研究了外径慢变正弦波动下, 空心布拉格光纤中各类模式的传输特性。理论计算表明, 尽管各模式类传输特性不尽相同, 同一类模式中, 不同阶的模式损耗情况也不一样, 但是, 各模式的外径波动容限相差不大。在计算例中, TE_{0n} 模的外径波动容限大约为 9%, TM_{0n} , HE 和 EH 模式的外径波动容限在 6%~7%。采用的理论分析方法可以拓展到其他光纤结构参数组合和任意光纤波动情况。

关键词 光纤光学; 模式特性; 传输矩阵法; 空心布拉格光纤; 外径波动

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2559

Mode Transmission Characteristics in Hollow-Core Bragg Fibers with Slowly Variation in Outer Diameter

Shi Lichao¹ Zhang Wei¹ Xing Wenxin¹ Li Zhiguang² Wang Wentao²
Huang Yidong¹ Peng Jiangde¹

(¹ Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
(² Beijing Glass Research Institute, Beijing 100062, China)

Abstract During the fabrication process of hollow-core Bragg fibers, outer diameter variations would be induced unavoidably, which lead to band gap shifts of the one dimensional photonic crystal structures in the fiber claddings, impacting their transmission characteristics severely. The mode transmission characteristics of hollow-core Bragg fibers with slowly sine variation in outer diameter have been investigated. The simulation results show that, despite the transmission characteristics are different between different mode classes and the mode losses are different between modes in the same mode class with different orders, the diameter variation tolerances are almost the same. In the case calculated, the diameter variation tolerances of the TE_{0n} mode are about 9%, and 6%~7% for the TM_{0n} , HE and EH modes. The method deployed can be used for any diameter variations and structure parameters.

Key words fiber optics; mode characteristics; transfer-matrix method; hollow-core Bragg fibers; outer diameter variation

1 引 言

空心光子晶体光纤近年来引起人们的广泛关注^[1~7], 而空心布拉格光纤就是其中重要的一种。布拉格光纤的概念在 20 世纪 70 年代末提出^[8], 近十几年来随着光子晶体光纤的发展, 逐渐引起人们的重视。1998 年 Y. Fink 等^[9]提出并论证了一维光子晶体的全向反射现象, 使人们意识到布拉格光

纤结构能够支持独特的全向反射导光机制, 具有类金属波导的特征^[10]。2002 年, 他们利用硫化物玻璃和聚合物材料首次制备出在中红外波段导光的空心布拉格光纤^[2]。近年来, 这种空心布拉格光纤引起人们特别的关注, 已在高功率二氧化碳激光传输上获得商业应用^[11], 并在光传感以及光电功能器件等领域展现出十分广阔的应用前景^[12]。

收稿日期: 2010-02-05; 收到修改稿日期: 2010-04-08

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327600)、国家自然科学基金(60777032)和北京市自然科学基金(4102028)资助课题。

作者简介: 石立超(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事微结构光纤方面的研究。E-mail: slc07@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 张巍(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微纳结构光电功能材料和器件等方面的研究。

E-mail: zwei@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

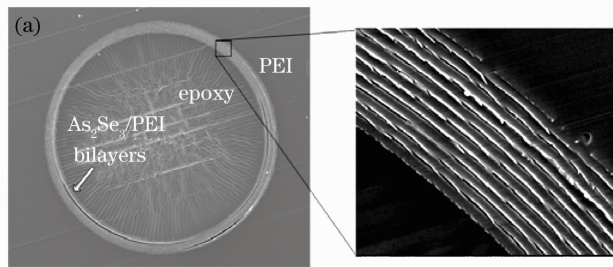
空心布拉格光纤中,包层一维光子晶体的周期决定了光子带隙的位置,进而决定了光纤的导光波段。在光纤拉制过程中,光纤横截面结构参数间的比例关系与光纤预置棒大体相同,一维光子晶体的周期与光纤的外径成正比。因此,可以通过控制光纤的拉丝比控制光纤的外径,进而控制空心布拉格光纤的导光波段^[13]。然而,在实际光纤拉制过程中,不可避免地会引入光纤外径的波动,即不同位置光纤的外径不同。这将造成不同位置光纤包层的光子带隙不完全重叠,会极大地影响光纤的传输特性。迄今为止,这一影响的定量研究未见报道。

本文针对这一问题,研究了光纤外径缓变正弦波动下空心布拉格光纤中各类传播模式的传输特性,在理论上定义并针对光纤样品给出了空心布拉格光纤的外径波动的容限。首先介绍采用的物理模型和理论分析方法;进而给出了在不同外径波动幅度下,空心布拉格光纤中各模式传输特性的计算结果和讨论。

2 理论分析方法

2.1 空心布拉格光纤的模式特性

图 1(a)是实际制作的空心布拉格光纤横截面



扫描电子显微镜(SEM)照片(为了在端面处理中保持结构完整性,空心布拉格光纤芯区填充了环氧树脂)。图中可见由两种不同折射率的材料构成的一维光子晶体结构。其中白色圆圈条纹是三硒化二砷(As₂Se₃)构成的高折射率膜层,低折射率膜层和光纤的外包层都采用聚醚酰亚胺(PEI)材料。图 1(a)所示的空心布拉格光纤可以简化为如图 1(b)所示的理论模型。光纤中心为空气芯区,其半径和折射率分别表示为 t_c 和 n_c (空心芯区, $n_c = 1$)。包层一维光子晶体结构起到带隙限光的作用,其中高折射率膜层的厚度和折射率分别为 t_h 和 n_h ,低折射率膜层的厚度和折射率分别表示为 t_l 和 n_l 。令 a 为一维光子晶体的周期, $a = t_h + t_l$ 。

空心布拉格光纤的导光波段可以通过包层一维光子晶体的带隙确定。图 1(a)中光纤样品的包层一维光子晶体能带结构如图 2 所示。其中浅灰色和深灰色区域分别是一维光子晶体中 TM 和 TE 模式的光子能带,白色区域是光子带隙。在大芯区直光纤的情况下,光子带隙落在光锥边界(即图中 $n_{eff} = 1$ 的实线)上的频率范围决定了空心布拉格光纤的导光波段^[2,13]。可见,光纤样品一阶导光波段在 $4.3 \mu\text{m}$ 附近,如图 2 中的粗实线所示。

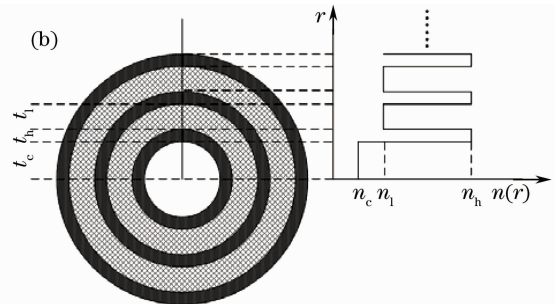


图 1 空心布拉格光纤。(a)实际制作的空心布拉格光纤样品横截面电子显微镜照片,(b)理论模型

Fig. 1 Hollow-core Bragg fibers. (a) SEM of Bragg fiber sample, (b) theoretical model

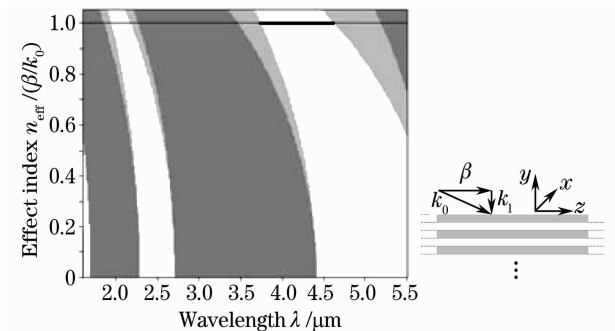


图 2 空心布拉格光纤样品中一维光子晶体的光子带隙
Fig. 2 Band-gap of one dimensional photonic crystal in the Bragg fiber sample

采用传输矩阵法(TMM)^[8,14]计算空心布拉格光纤的模式传输特性。传输矩阵法的基本原理是将布拉格光纤中传播模式的电磁场分布用贝塞尔函数展开,

$$\begin{bmatrix} E_z(r) \\ H_\theta(r) \\ H_z(r) \\ E_\theta(r) \end{bmatrix}_{i_{th} \text{ layer}} = [M_i(r)] \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 E 和 H 分别代表布拉格光纤传播模式中的电场分量和磁场分量。 i 表示一维光子晶体分层结构中的第 i 层, $M_i(r)$ 是一个由贝塞尔函数组成的 4×4 的矩阵, A_i, B_i, C_i, D_i 是展开系数。 z, θ, r 是圆柱

坐标系下的空间坐标分量。应用层与层间界面处的边界条件,以及 $r=0$ 和 $r=\infty$ 处的边界条件,空心布拉格光纤中的电磁模式求解问题转化为求含模式有效折射率的矩阵本征值问题^[14]。求解得到的模式有效折射率为复数,其实部和虚部分别表示模式

的传播常数和损耗特征。传输矩阵法通过引入材料折射率虚部考虑材料光吸收特性^[15],并且可以处理周期有限的一维光子晶体包层,因此,综合考虑了模式的材料损耗和泄露损耗,能够全面地反映空心布拉格光纤传播模式的传输特性。

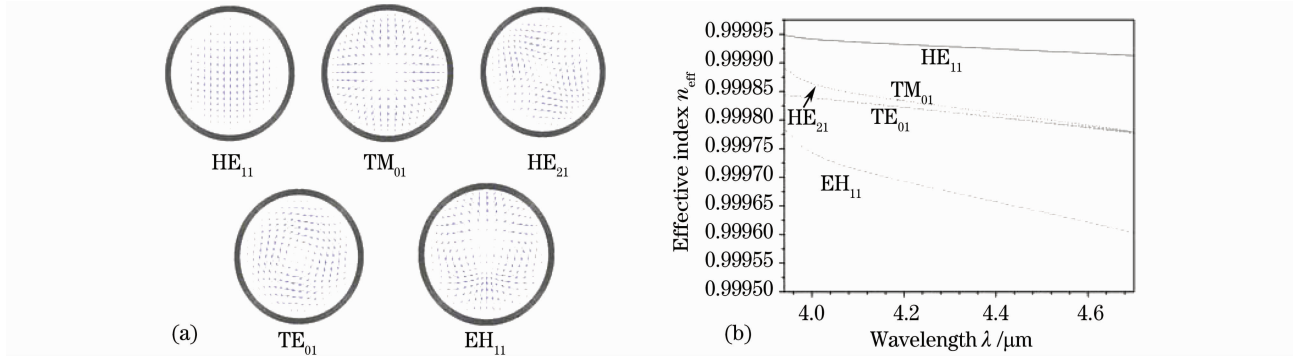


图3 布拉格光纤最低阶的5个模式的电场矢量图(a)和一阶带隙内的等效折射率(b)

Fig. 3 Electric field of the lowest 5 modes (a) and their mode effective index in the first band gap (b)

图3给出了用传输矩阵法计算得到的图1(a)所示空心布拉格光纤样品中5个最低阶模式的电场矢量图和它们在一阶带隙内的等效折射率。可见空心布拉格光纤中模式的场分布特性与金属圆波导非常相似^[10]。

2.2 慢变直径波动下空心布拉格光纤的传输特性

光纤拉制过程中引入的直径波动在导致光纤导光波段的波动的同时,有可能引起模式之间的耦合。在慢变波动下,光纤中各模式发生绝热变化,模间耦合可以忽略。在光纤光学中通常用 Stewart-Love 临界条件^[16]判断光纤直径波动是否满足绝热近似条件

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \ll \frac{1}{\Delta}, \quad (2)$$

式中 ρ 为光纤直径, Δ 为两光纤模式的拍长, $\Delta = \lambda / (n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}2})$, λ 为光波波长, $n_{\text{eff}1}$, $n_{\text{eff}2}$ 为两光纤模式的有效折射率。对于在中红外波段应用的大芯径空心布拉格光纤,尽管存在非常多的模式,但在实际应用中外界激励的光功率往往集中分布在最低阶的几个模式上。这些低阶模式的有效折射率差较大,且光纤直径波动有轴对称特征,仅会引起角量子数相同的模式间耦合^[17],这使得在一般光纤拉丝工艺引

入的波动幅度范围内,可能产生耦合的模式之间满足 Stewart-Love 临界条件。以图3所示实际光纤样品的计算结果为例,在一阶带隙中心频率处 HE_{11} 模和 HE_{21} 模的有效折射率分别为 $n_{\text{eff}1} = 0.999929533$ 和 $n_{\text{eff}2} = 0.999627042$,对应(2)式左侧为 1.2566。另一方面,假设直径正弦波动,取波动周期为 1 m,波动幅度为 $\pm 20\%$ 的极端情况,(2)式右侧仍有 70.3470,绝热近似仍然满足。对于其他低阶模式之间的耦合可以得到类似的结果。因此,重点研究直径慢变波动下空心布拉格光纤的损耗特性变化,不考虑模式间的能量耦合。

由此,可以建立空心布拉格光纤直径波动的物理模型和理论分析方法。考虑光纤外径沿传播方向存在慢变的正弦波动,物理模型如图4所示。其中 D 为光纤平均外径, δd 是光纤最大(或最小)外径与平均外径的偏差。定义 $\Delta = \delta d / D$ 为光纤外径波动幅度。为了定量分析外径波动对光纤内各模式传输特性的影响,在理论计算中首先将光纤细分为外径不同的光纤段,每段光纤近似外径均匀。然后,采用传输矩阵法计算各光纤段的模式传输特性。将各光纤段中模式传输特性累加平均,最终得到在慢变正

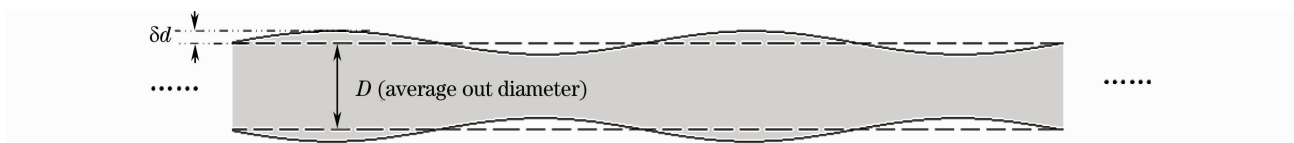


图4 空心布拉格光纤直径波动物理模型

Fig. 4 Theoretical model of Bragg fiber diameter variation

弦波动下空心布拉格光纤中各模式的传输谱,以此为基础系统地考察光纤外径波动对各类传播模式传输特性的影响。

3 计算结果和讨论

理论计算参数参考图 1 所示半导体聚合物空心布拉格光纤样品,其一阶导光波段在 $4.3 \mu\text{m}$ 附近。包层光子晶体中两种膜层的折射率分别选择半导体玻璃 As_2Se_3 和聚合物材料 PEI 在 $4.3 \mu\text{m}$ 附近的折射率,有 $n_h = 2.7411^{[18]}$, $n_l = 1.599 + 0.002i^{[19]}$ 。空心布拉格光纤主要结构参数与包层一维光子晶体周期 a 的关系为空心芯区半径 $t_c = 100a$,高低折射率层的厚度分别为 $t_h = 0.2a$ 和 $t_l = 0.8a$ 。包层一维光子晶体取 10 个周期 ($N = 10$),周期 $a = 1.36 \mu\text{m}$ 。

3.1 最低阶模式—— HE_{11} 模

图 5 是不同光纤外径波动幅度下,在一阶导光波段内空心布拉格光纤 HE_{11} 模式的传输谱。图 5 中心未加阴影的区域即为图 1(b)中由一维光子晶体带隙和光锥边界共同决定的一阶导光波段。可见,随着光纤外径波动逐渐增加,由于不同光纤外径下 HE_{11} 模式的导光波段不完全重叠,使得导光波段内最低损耗点损耗值逐渐变大,同时导光带宽逐渐变窄。当外径波动等于 10% 时, HE_{11} 模的一阶通光带基本消失。

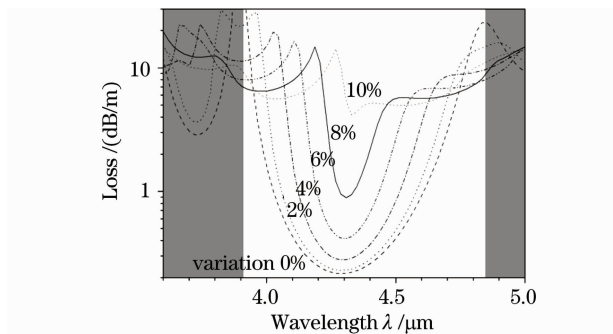


图 5 不同外径波动幅度下空心布拉格光纤一阶导光波段内 HE_{11} 模的传输谱

Fig. 5 Transmission spectrum of HE_{11} mode with different magnitudes of outer diameter variations within the first order of guided wave range

为了定量描述外径波动对空心布拉格光纤不同模式传输特性的影响,定义了模式最大有效传输长度 L_{max} ,即在模式导光波段内最低损耗频率下传输功率下降一半的传输长度。图 6 给出了根据图 5 计算的 HE_{11} 模式在不同外径波动下导光波段内的最低损耗值(实线)及其有效传输长度(虚线)。可以看

到,随着光纤外径波动增加,有效传输长度随外径波动幅度的上升而下降,对应的 HE_{11} 模式的最低损耗值最初上升较缓,但在外径波动较大处上升迅速,过渡区大约在有效传输长度下降一半处。由此,定义有效传输长度下降一半对应的外径波动幅度为导波模式的外径波动容限。对于 HE_{11} 模,外径波动容限约为 6%。

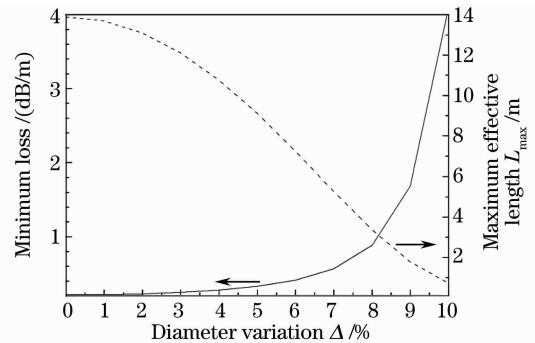


图 6 一阶导光波段内 HE_{11} 模最低损耗值和有效传输长度与外径波动幅度的关系

Fig. 6 Minimum loss and maximum effective length of HE_{11} mode within the first order of guide wave range with different magnitudes of outer diameter variations

3.2 角向均匀模式——TE 和 TM 模

图 7 是不同外径波动幅度下角向均匀模式 (TE_{0n} 和 TM_{0n}) 的有效传输长度计算结果。可以看到, TE_{0n} 模式的有效传输长度远大于 TM_{0n} 。对于同类模式,有效传输长度随模式阶数的下降而增长。其中 TE_{01} 模是空心布拉格光纤中损耗最低的模式,对于没有外径波动的光纤它的有效传输长度约为 35 km。另一方面,两类模式有效传输长度均随外

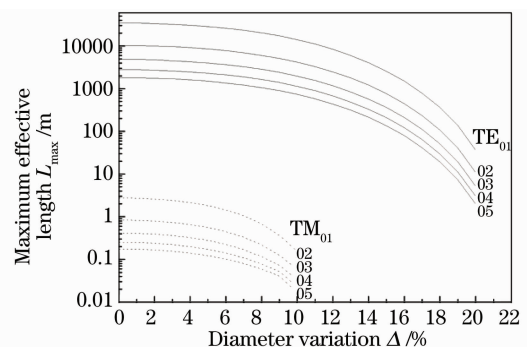


图 7 TE 和 TM 若干低阶模式有效传输长度与光纤外径波动幅度的关系

Fig. 7 Maximum effective length of the few lowest TE and TM modes within the first order of guide wave range with different magnitudes of outer diameter variations

径波动幅度增加而下降,相对而言,TE_{0n}模式的下降趋势略缓。从图7中可以看出,同一模式类中,尽管不同阶的模式传输损耗不同,但各模式的外径波动容限相近。TE_{0n}模式的外径波动容限(约为9%)总体上比TM_{0n}模式(6.1%~6.6%)大,表明TE_{0n}模式传输特性受外径波动影响相对较小。

3.3 混合模式——HE和EH模

图8,9是不同外径波动下,空心布拉格光纤两类混合模式(HE和EH模式)中若干低阶模式的有效传输长度的计算结果。可见,低阶混合模式的有效传输长度与TM模式类似,总体上也具有有效传输长度随模式阶数的下降而增长的趋势。各模式有效传输长度同样随外径波动幅度的增加而减小。从图8,9中可以看到,各个模式的外径波动容限均在6%~7%。

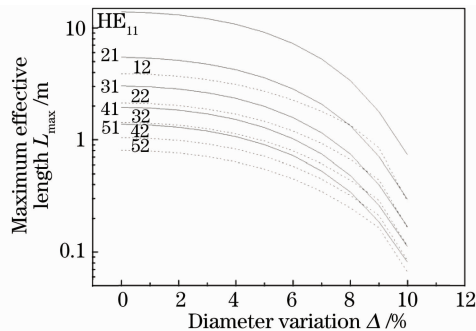


图8 HE若干低阶模式的有效传输长度与光纤外径波动的关系

Fig. 8 Maximum effective length of the few lowest HE modes within the first order of guide wave range with different magnitudes of outer diameter variations

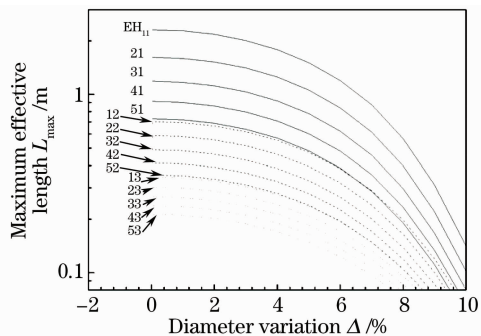


图9 EH若干低阶模式的有效传输长度与光纤外径波动的关系

Fig. 9 Maximum effective length of the few lowest EH modes within the first order of guide wave range with different magnitudes of outer diameter variations

以上计算结果表明,尽管各模式类传输特性不尽相同,同一类模式中,不同阶的模式损耗情况也不一样,但是,各模式的外径波动容限却相差不大。

TE_{0n}模式外径波动容限最大,大约为9%,TM_{0n},HE和EH模式的外径波动容限在6%~7%。空心布拉格光纤作为多模光波导,在实际应用中各类模式均有激励的可能,因此,应选择上述计算容限中最低者作为空心布拉格光纤制备过程中外径控制的理论指导。

4 结 论

理论上比较研究了空心布拉格光纤的传输特性受光纤外径波动的影响,结果表明光纤中的不同模式传输特性随光纤外径波动变化的趋势相近,同一模式类中各模式的波动容限相差不大。TE_{0n}模式的波动容限最大,约为9%;而TM_{0n},HE和EH模式的波动容限非常相近,为6%~7%。值得指出的是,尽管只考察了一组特定的光纤结构参数,且采用了正弦函数来模拟实际光纤外径的波动,采用的理论分析思路和模拟方法可以拓展到其他光纤结构参数组合和任意光纤波动情况,得到的空心布拉格光纤传输特性随外径波动幅度的变化规律具有普遍意义。

参 考 文 献

- R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- B. Temelkuran, S. D. Hart, G. Benoit *et al.*. Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for CO₂ laser transmission[J]. *Nature*, 2002, **420**(6916): 650~653
- Y. L. Hoo, S. Liu, H. L. Ho *et al.*. Fast response microstructured optical fiber methane sensor with multiple side-openings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(5): 296~298
- C. Charlton, B. Temelkuran, G. Dellemann *et al.*. Midinfrared sensors meet nanotechnology: trace gas sensing with quantum cascade lasers inside photonic band-gap hollow waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(19): 194192
- Sun Qing, Liu Erming, Qin Fenghua *et al.*. All-fiber high-pressure gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1029~1034
孙青,刘二明,秦丰华等.全光纤型空芯光子晶体光纤高压气体腔[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1029~1034
- Rao Yunjiang, Li Hong, Zhu Tao *et al.*. High temperature strain sensor based on in-line Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1484~1488
饶云江,黎宏,朱涛等.基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1484~1488
- Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. Accelerometer based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 171~175
柯涛,朱涛,饶云江等.基于空芯光子晶体光纤的全光纤法布里珀罗干涉式加速度传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 171~175

- 8 P. Yeh, A. Yariv, E. Marom. Theory of Bragg fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(9): 1196~1201
- 9 Y. Fink, J. N. Winn, S. Fan *et al.*. A dielectric omnidirectional reflector[J]. *Science*, 1998, **282**(5394): 1679~1682
- 10 M. Ibanescu, S. G. Johnson, M. Soljacic *et al.*. Analysis of mode structure in hollow dielectric waveguide fibers[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(4): 046608
- 11 OmniGuide Inc. CO₂ Laser Surgery Scalpel, Flexible CO₂ Laser Scalpel-OmniGuide [EB/OL]. (2000-06-11) [2010-04-03]. <http://www.omni-guide.com/index.htm>
- 12 A. F. Abouraddy, M. Bayindir, G. Benoit *et al.*. Towards multimaterial multifunctional fibres that see, hear, sense and communicate[J]. *Nature Materials*, 2007, **6**(5): 336~347
- 13 K. Kuriki, O. Shapira, S. D. Hart *et al.*. Hollow multilayer photonic bandgap fibers for NIR applications[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1510~1517
- 14 S. Guo, S. Albin, R. S. Rogowski. Comparative analysis of Bragg fibers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1): 198~207
- 15 G. Y. Xu, W. Zhang, Y. D. Huang *et al.*. Loss characteristics of single-HE₁₁-mode Bragg fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 359~366
- 16 S. Lacroix, R. Bourbonnais, F. Gonthier *et al.*. Tapered monomode optical fibers: understanding large power transfer[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(23): 4421~4425
- 17 J. S. Levine. Rippled wall mode converters for circular waveguide[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1984, **5**(7): 937~952
- 18 Photonic Bandgap Fibers & Devices group[EB/OL]. (2005-02-13)[2010-04-03]. <http://mit-pbg.mit.edu/Pages/As2Se3.html>
- 19 Photonic Bandgap Fibers & Devices group[EB/OL]. (2005-02-13)[2010-04-03]. <http://mit-pbg.mit.edu/Pages/PEI.html>