

文章编号: 0258-7025(2003)10-0901-03

大芯区的单模光子晶体光纤

倪 屹¹, 彭江得¹, 柯亚杰¹, 张 磊¹, 蔡 青², 李 勤², 李进科²

(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 采用毛细玻璃管拼接并拉丝的方法试制成功光子晶体光纤样品, 它由石英纤芯和周围呈六角形分布的两圈气孔组成, 气孔直径 $4\ \mu\text{m}$, 间距 $17\ \mu\text{m}$, 芯区直径 $30\ \mu\text{m}$ 。理论模拟和光学实验均证实此光纤在 $632.8\ \text{nm}$ 以上的波长范围内为单模光纤。

关键词 导波光学; 光子晶体光纤; 单模; 正交函数

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Single-mode Photonic Crystal Fiber with a Large Core

NI Yi¹, PENG Jiang-de¹, KE Ya-jie¹,

ZHANG Lei¹, CAI Qing², LI Qin², LI Jin-ke²

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

Abstract A photonic crystal fiber was fabricated by drawing milled silica rods. It consisted of a pure silica core with a diameter of $30\ \mu\text{m}$, which was surrounded by two rings of air holes with a hexagonal symmetry, the hole diameter and the spacing between holes were $4\ \mu\text{m}$ and $17\ \mu\text{m}$, respectively. Simulation and experiments showed that this fiber was single mode for wavelength beyond $632.8\ \text{nm}$.

Key words waveguide optics; photonic crystal fiber; single mode; orthogonal functions

1 引 言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber)通常由单质材料(如纯石英玻璃等)和一组沿光纤长度方向周期排列气孔构成, 气孔的尺度与导波波长在同一量级, 在光纤的芯区引入缺陷(实芯或空芯), 即能形成导光的纤芯。光子晶体光纤的导光机制有两种: 全反射限制和带隙限制。全反射限制的光子晶体光纤的导光原理与常规光纤依赖于光在纤芯-包层界面全内反射的传输原理相似, 由于纤芯周围周期排列的气孔的存在, 使得芯区包层的等效折射率降低, 这样, 纤芯中的光就可以以全反射的方式传播。而带隙限制的光子晶体光纤中光的传播是基于二维折射率周期变化的介质结构所形成的光子带隙对缺陷(实芯或空芯纤芯)中光的约束, 因而适当改变光子晶体光纤的几何结构参量, 即可调整其光子带隙结

构, 从而改变其光学特性, 进而实现对光的控制。世界上第一根全反射限制的光子晶体光纤和第一根带隙限制的光子晶体光纤分别于 1996 年^[1]和 1998 年研制成功^[2]。

近年来, 国外光子晶体光纤的研究已取得重要进展, 并已开始实用化。如在色散特性方面, 理论模拟表明, 特殊设计的光子晶体光纤的色散可达 $-2000\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$, 可以在 100nm 的范围内补偿相当自身长度 35 倍的常规光纤(补偿精度 0.2%)^[3]。由于光子晶体光纤的芯区面积可以很小, 因此可在较低的抽运功率下获得较强的光纤非线性效应, 从而进行各种光纤非线性效应的研究, 如 Raman 放大和参量放大等。Southampton 大学的研究人员已经率先在光子晶体光纤中实现了 Raman 放大, 他们采用 $75\ \text{m}$ 长的光子晶体光纤(有效面积 $A_{\text{eff}} = 2.85\ \mu\text{m}^2$), 获得了 $42\ \text{dB}$ 的 Raman 增益^[4]。Northwestern

收稿日期: 2002-06-10; 收到修改稿日期: 2002-07-11

作者简介: 倪屹(1970—), 男, 清华大学电子工程系讲师, 博士, 主要从事光电子研究。E-mail: niy@tsinghua.edu.cn

大学的研究小组率先在光子晶体光纤中实现了参量放大,他们采用了小芯区面积的光子晶体光纤(有效面积 $A_{\text{eff}} = 2.4 \mu\text{m}^2$),使得光纤非线性系数 $\gamma = 2\pi n_2 / (\lambda A_{\text{eff}})$ 得到显著提高,从而在 6.1 m 的光子晶体光纤中实现了 13 dB 的增益(峰值功率仅为 6 W)^[5]。国内对光子晶体光纤的研究刚刚起步,我们研制成功了一根光子晶体光纤,在 633 nm 以上为单模光纤,而芯区面积比常规单模光纤大了一个量级,充分显示了光子晶体光纤独特的光学特性。

2 光子晶体光纤结构参量设计

在标准的阶跃折射率光纤中,归一化工作频率 V 可表示为

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2} \quad (1)$$

其中 ρ 为芯区半径, λ 为工作波长, n_{co} 和 n_{cl} 分别为光纤芯区和包层的折射率。光纤的单模传输条件要求 $V \leq 2.405$ 。对某一波长而言的单模光纤,随着波长 λ 的减小将成为多模光纤。

图 1 为光子晶体光纤的结构示意图。 d 为气孔直径, Λ 为相邻气孔中心的距离。在周期结构的中心去掉一个气孔所形成的缺陷就构成了光子晶体光纤的纤芯。由于气孔的存在,使得纤芯周围包层的等效折射率比纤芯小,这样在纤芯中就能导光。

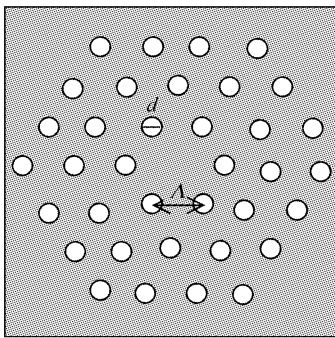


图 1 光子晶体光纤结构示意图

Fig. 1 Cross section of photonic crystal fiber

对于光子晶体光纤,其等效的 V_{eff} 可表示为^[6]

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{eff}}^2} \quad (2)$$

这里 Λ 大致等于光子晶体光纤的纤芯半径。 n_{eff} 是引入周期气孔后光子晶体光纤的等效折射率。随着导波波长的缩短,光场越来越避开包层中的气孔,从而更加集中于石英部分,这样就相应地增加了包层中的等效折射率 n_{eff} ,从而在满足 $V \leq 2.405$ 的单模条

件下,使得最大芯区半径 ρ_{max} 可大大增加。

对图 1 所示的光子晶体光纤,文献[6]中计算了在不同的 d/Λ 情况下 V_{eff} 与 Λ/λ 的关系,如图 2 所示。从图 2 可以看出,当 $d/\Lambda \leq 0.15$ 时,在所有的波长范围内均有 $V_{\text{eff}} < 2.405$,也就是说当气孔尺寸满足一定条件时,可以使光子晶体光纤在所有波长都能保持单模传输。这种“无限”单模特性是光子晶体光纤所独有的。

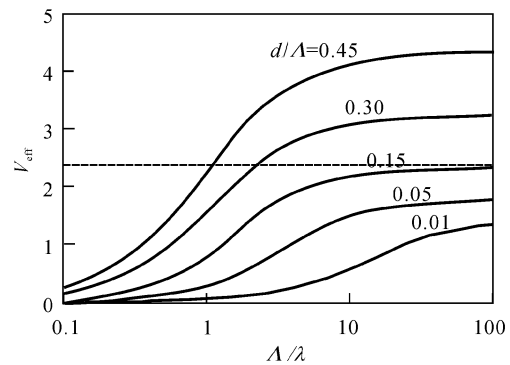


图 2 不同的 d/Λ 下, V_{eff} 与 Λ/λ 的关系曲线

Fig. 2 Variation of V_{eff} with Λ/λ for various relative hole diameters d/Λ

我们设计的光子晶体光纤的尺寸为: $\Lambda = 17 \mu\text{m}$; $d = 4 \mu\text{m}$,理论模拟表明对应其 $V_{\text{eff}} = 2.405$ 的导波波长约为 $0.6 \mu\text{m}$,也就是说当 $\lambda > 0.6 \mu\text{m}$ 时,为单模光纤。

这里将此光子晶体光纤与常规单模光纤作一比较。取 λ 为 632.8 nm,常规单模光纤的相对折射率差 $\Delta n = 0.4\%$,从(1)式可以算得满足单模的条件为: $\rho_{\text{max}} \leq 2.39$ 。而对此光子晶体光纤,理论模拟和光学实验(见下一节)均表明其为单模光纤,其芯区直径约为 $30 \mu\text{m}$ (见图 3),比常规单模光纤的 ρ_{max} 大了约一个量级。

3 光学实验

制作光子晶体光纤的材料为普通的石英玻璃,采用的空心玻璃管的外径为 20 mm,内径为 10 mm,实心玻璃棒的直径为 20 mm,玻璃套尺寸为外径 14 mm,内径 10 mm。具体工艺如下:将空心 and 实心石英棒在 1800°C 下分别拉细;将拉细后的空心细管截成许多短段,并将实心细棒截取一段与空心细管相同长度的短段;将空心细棒按六角形的周期结构填充入玻璃套内,在周期结构的中心用实心细棒取代原空心棒;将该捆细棒和玻璃套在 1800°C 下

再拉细,形成光纤预制棒;将所得预制棒在 1800℃ 下拉成光子晶体光纤。

最终的光纤外径约为 105 μm ,相邻气孔中心间距约为 17 μm ,气孔直径约为 4 μm ,中间纤芯直径约为 30 μm 。图 3 为其扫描电镜照片。

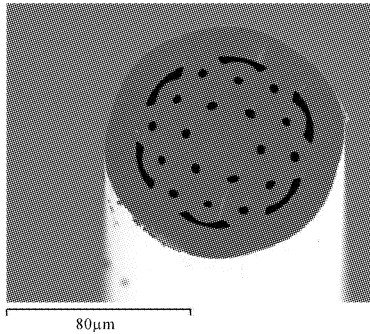


图 3 光子晶体光纤的扫描电镜图

Fig. 3 Scanning electron microscope image of the end of the photonic crystal fiber

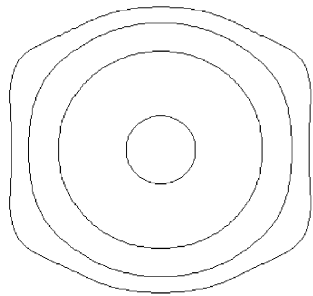


图 4 理论模拟的光纤中模场分布

Fig. 4 Calculated mode pattern of this fiber

对此光子晶体光纤,采用正交函数展开的方法^[7]计算了在 632.8 nm 的 He-Ne 光源激励下光纤中的模场分布,理论计算表明在此光源激励下,在光纤中可形成单模传输,计算的模场分布结果见图 4。

采用单模的 He-Ne 激光器作为光源,通过透镜将光注入到 3m 长的光子晶体光纤中,在光纤的另一端,用数码相机拍下其近场模斑如图 5。可以清晰地看出其对称的六角形分布,这与理论模拟的结果是吻合的。

在图 5 的模斑中,还测量了其光强的分布。具体做法是在光功率计的探头上蒙上一层滤纸,并在滤纸上扎一针孔,探头固定,将光纤置于可移动并可精密读数的平台上,调整光斑,使其中心与探头上的小孔等高。以步长 0.1 mm 的幅度移动光纤,在每一位置记录光功率计的读数。完成 x 方向的扫描后,将光纤旋转 90°,按同样的方法完成 y 方向的扫描,最后结果见图 6。可以看出在模斑中,光强大致

是按高斯分布的,这进一步证实了此光纤在 632.8 nm 波长下是单模光纤。

我们研制成功的这一光子晶体光纤,其芯区直径约为 30 μm ,理论模拟和实验结果表明,光子晶体光纤使光纤单模传输的范围得到大大扩展。

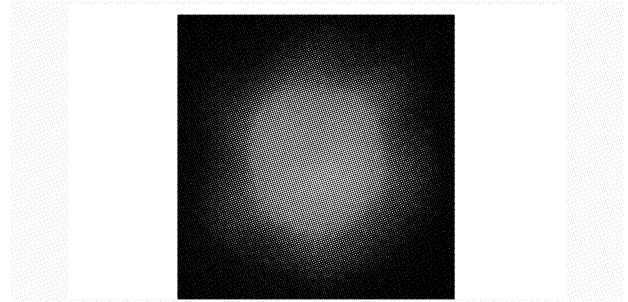


图 5 光子晶体光纤的近场模斑

Fig. 5 Recorded near-field pattern of this fiber

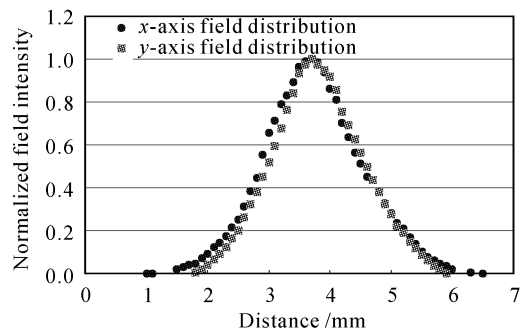


图 6 光纤模斑中的光强分布

Fig. 6 Variation of intensity with positions in the pattern of this fiber

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 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, **282**(5393):1476~1478
- 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
- 4 J. H. Lee, Z. Yusoff, W. Belardi *et al.*. A holey fibre Raman amplifier and all-optical modulator [C]. *Opt. Comm.*, 2001, ECOC'01, **6**:46~47
- 5 J. E. Sharping, M. Fiorentino, Ayodeji Coker *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14):1048~1050
- 6 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13):961~963
- 7 T. M. Monro, D. J. Richardson, N. G. R. Broderick *et al.*. Holey optical fibers: an efficient modal model [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(6):1093~1102