

文章编号: 1001-5078 (2006) 03-0196-03

空芯光子晶体光纤中光子带隙的测量

刘艳云, 侯蓝田, 李秋菊, 韩颖, 郭巍
(燕山大学 红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:利用全矢量法对空芯光子晶体光纤的光子带隙的存在进行了数值模拟, 并通过实验进行了证实。采用透射谱的方法对带隙型光子晶体光纤分别在可见光以及近红外波段进行了测量, 光从光纤的一端注入, 探测器从另一端接收, 实验结果发现可见光附近没有明显的透射带, 而在波长为 2591nm 处出现了一个很强的透射带, 证明了光子带隙的存在, 与理论模拟相一致, 实验的重复性好。

关键词:空芯光子晶体光纤; 光子带隙; 透射谱法; 测量

中图分类号: TN929; **文献标识码:** A

Measurement of the Bandgap in Hollow-core Photonic Crystal Fibers

L U Yan-yun, HOU Lan-tian, LI Qiu-ju, HAN Ying, GUO Wei

(Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Using an efficient, full-vectorial numerical simulation method, we analyze the existent conditions of the photonic bandgap (PBG), which is further demonstrated through experimental research. We utilize the method of transmission spectrum to measure the hollow-core photonic crystal fibers (HC-PCFs) in the visible and near infrared regions. The signal is obtained by detecting light from the end of the fiber. The experimental results indicate that there is a strong transmission band in the near infrared region, but hardly any bandgaps in the visible region, which is consistent with the theoretical computation. The repetition of the experimental results is fine.

Key words: hollow-core photonic crystal fibers; photonic bandgap; transmission spectrum method; measurement

1 引言

1995年, Birks等人提出了一种在空芯中利用光子带隙效应导光的多孔光纤, 也称为空芯光子晶体光纤^[1]。1999年, 这种光纤得到证明^[2], 空芯的光子晶体光纤是由周期性变化的晶格组成, 光纤的包层是由周期性排列的空气孔组成, 其纤芯是由一个破坏了周期性的横向缺陷组成, 可以是点缺陷, 也可以是线缺陷或面缺陷。由于这种光纤的导光机制与传统光纤以及折射率引导型的光子晶体光纤截然不同, 入射到空气芯中的光, 其模折射率落入在包层的光子带隙中时, 不能通过包层中传输而限制在纤

芯内部 (即空气中), 从而大大减少了衰减和非线性^[3], 因此空芯光子晶体光纤的光子带隙效应引起了人们的广泛注意。

2 理论模型

许多数值方法都已经应用于光子晶体光纤的分析中^[4~6], 标量法建模对折射率引导型光子晶体光纤来说是充分的, 但是对于利用光子带隙效应导光

基金项目: “863”计划资助项目 (2003AA311010); 国家“973”规划资助项目 (2003CB314905)。

作者简介: 刘艳云 (1979 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向是微结构光纤的参数测量与研究。E-mail: yanyunliu2004@163.com

收稿日期: 2005-07-11; 修订日期: 2005-09-19

的空芯光子晶体光纤的建模分析来说需要用全矢量法。我们用一个有效变量法来解这个矢量电磁场方程 (1) 的本征值问题^[7]:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon_r(r)} \nabla \times H(r) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} H(r) \quad (1)$$

在方程 (1) 中: H 是电磁场函数; ϵ_r 是介电常数; ω 是角频率; c 是光速。根据 Bloch 原理, 对于全周期结构, 方程 (1) 的解可以写成一个与结构具有相同周期的周期函数所调制的平面波形式。用傅立叶级数展开, 对这个周期函数进行近似, 可以得到一个解的形式为:

$$H(r) = \sum_{\mathbf{G}} \sum_{\mathbf{G}'} h_{\mathbf{G}+\mathbf{G}'} \exp[i(\mathbf{k}+\mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}] \quad (2)$$

这里, $\mathbf{k}$ 是波矢; $\mathbf{G}$ 是栅格矢量, 而 $\mathbf{r}$ 代表与 $\mathbf{k} + \mathbf{G}$ 相正交的两个场的方向。对于一个特殊的波矢 $\mathbf{k}$, 特征解可以通过函数的最小化找到:

$$E(H) = \frac{\langle \nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon_r(r)} \nabla \times H \right] | H \rangle}{\langle H | H \rangle} \quad (3)$$

用于最小化的一种快速迭代法利用傅立叶时域里用的空间旋转因子 $\nabla \times$ 而 $1/\epsilon_r(r)$ 是在实际空间的^[8]。这里描述的方法用于全周期结构, 适用完全的快速计算方法, 这种快速的收敛和有效的缩放比, 对于准确建模的超晶胞近似空芯 PBG 光纤, 计算任务比较大。矢量法的一个重要优点是在实域中的有效折射率分布可以用离散形式来代替。已经建立了空气传导光子带隙光纤的包层条件, 我们现在讨论芯区的条件和空气导模的特性。为了设计芯区和初步估计光子带隙光纤中空气导模的数量, Cregan 等人^[9]用这样的近似方程:

$$N_{\text{PBG}} = \frac{(\beta_H^2 - \beta_L^2) \tilde{r}_{co}^2}{4} = \frac{(k^2 n_1^2 - \beta_L^2) \tilde{r}_{co}^2}{4} \quad (4)$$

这里, N_{PBG} 是光子带隙导模的数量, n_1 是纤芯的折射率, β_H 和 β_L 分别是在一个固定频率下, 光子带隙上边界和下边界的传播常数, 在此考虑的 HC-PCFs, 纤芯半径 $\tilde{r}_{co} \approx \sqrt{7}\Lambda/2$, 方程 (4) 可以估计出 $N_{\text{PBG}} = 1.3 \approx 1$, 即至少有 1 个导模存在。

3 实验研究

频率落在光子带隙内的光是不能从包层中传播(泄漏)出去, 只能在光纤中传输, 这样就为我们测量光子晶体光纤的光子带隙提供了理论上的依

据^[10]。

实验所用自制光纤样品结构参数为: 纤芯空气孔直径 $11.14\mu\text{m}$, 孔间距 Λ 为 $4.21\mu\text{m}$, 包层空气孔直径 d 为 $3.55\mu\text{m}$, 如图 1。实验装置如图 2。

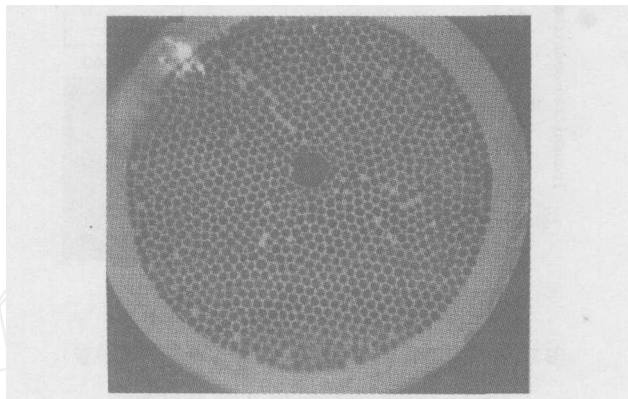


图 1 测量所用空芯 PCF 的横截面图

Fig 1 scanning electron micrograph (SEM) of HC-PCF used in the experiment

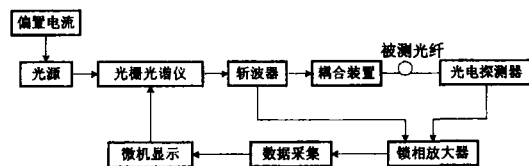


图 2 测量光子带隙的实验装置图

Fig 2 schematic diagram of the experimental configuration

测量系统主要由光源和光电检测器构成, 采用波长范围为 $1 \sim 16\mu\text{m}$ 的碳化硅红外光源, 光栅光谱仪的分辨率为 0.2nm/mm , 取一段 $10 \sim 30\text{cm}$ 不等长的被测光纤, 将端面处理后放入测量系统中, 为了保证光的强度, 光纤的输入端应与光源对准, 这就需要一个耦合装置。耦合装置主要采用的是 $40\times$ 或 $10\times$ 的微区透镜, 因为光源经光谱仪的出射狭缝输出的光斑大小约为 14mm , 而且是竖直的光斑, 所以照射到纤芯时, 会有很大的能量损失, 所以用 $40\times$ 或 $10\times$ 的微区透镜将单色仪输出光聚焦到 HC-PCF 端面上, 耦合装置在整个系统中起着很大的作用。另外, 光电探测器前端需要加一个前置放大器, 以保证信号能够得到足够的放大。当光源所发的光通过被测光纤时, 在光纤末端经过光电探测器和锁相放大器放大, 数据采集系统将采集到的信号, 送入计算机即可得到相应的光能量与波长的关系谱图。

在测量方框图中斩波器将直流光信号变为交变光信号, 作为参考光信号送到锁相放大器中, 与通过

了被测光纤的光信号锁定,以克服直流漂移和暗电流等影响,确保测量精度。

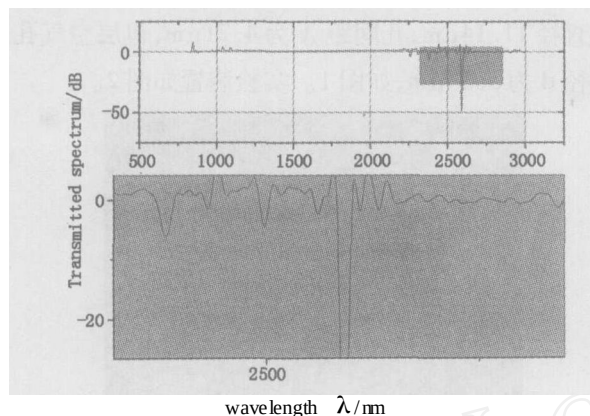


图 3 测量所得的透射谱图 (放大区域为光子带隙位置)

Fig 3 Transmission spectra of the experiment
(the zoomed region is the position of the bandgap)

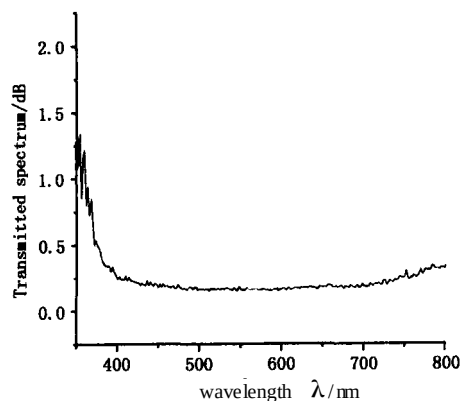


图 4 测量可见光波段透射谱图

Fig 4 Transmission spectra for visible region

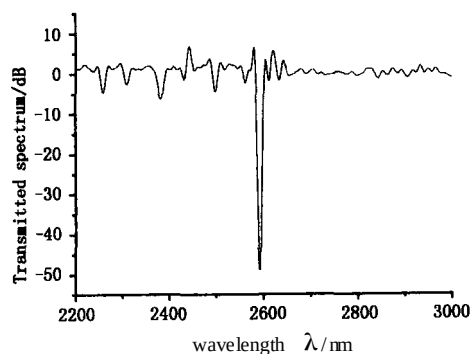


图 5 测量红外波段透射谱图

Fig 5 Transmission spectra for near-infrared region

实验结果发现在近红外区域出现了一个很强的透射带 (见图 3),但在可见光附近没有明显的透射带 (见图 4),透射谱比较平坦,因此在此区域内应该不存在光子带隙,而在近红外区域中光子带隙的位置在 $2512 \pm 12 \text{ nm}$ 处 (见图 5),与理论计算的 $N_{\text{PBG}} =$

$1.3 \approx 1$ 相一致。

4 结 论

研究表明,利用透射谱法能够很方便地测量出空芯光子晶体光纤中光子带隙的位置,这为光子带隙的实际应用提供了依据,测量空芯的光子晶体光纤,用 $40\times$ 或 $10\times$ 透镜可以将光源的光很好的耦合到光纤的端面上,实验结果可以看出在近红外波段出现了一个光子带隙,与理论计算 $N_{\text{PBG}} = 1.3 \approx 1$ 相吻合,并对此进行了反复测量,发现实验的重复性良好。证明了透射谱法的可行性。

参考文献:

- [1] T B Birks, P Roberts, P Russell, et al Full 2-d photonic bandgaps in silica/air structures [J]. IEEE Electronics Letters, 1995, 31: 1941 - 1943
- [2] R F Cregan, B J Mangan, J C Knight, et al Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air [J]. Science, 1999: 1537 - 1539.
- [3] A D Galea, F Couny, S Coupland, et al Selective mode excitation in hollow-core photonic crystal fiber [J]. OPTICS LETTERS, 2005, 30 (7), 717 - 719.
- [4] J C Knight Photonic crystal fibers [J]. Nature, 2003, 424, 847 - 851.
- [5] P St J Russell Photonic crystal fibers [J]. Science, 2003, 299, 358 - 362
- [6] J Broeng, S E Barkou, T Sφndergaard, et al Analysis of air-guiding photonic bandgap fibers [J]. Optics Letters, 2000, 25 (2), 96 - 98
- [7] Liu Xiao-dong, Guo Sheng-li, Hou Lian-tian Theoretical Study on the Closed-aperture Z-scan in the Materials with Nonlinear Refraction and Strong Nonlinear Absorption [J]. Opt Comm., 1997: 431 - 437.
- [8] G Humbert, J C Knight, G Bouwmans Hollow core photonic crystal fibers for beam delivery [J]. Optics Express, 2004, 12 (8): 1477 - 1484
- [9] F Couny, H Sabert, P J Roberts Visualizing the photonic band gap in hollow core photonic crystal fibers [J]. Optics Express, 2005, 13 (2): 558 - 563
- [10] B J Mangan, L Farr, A Langford, et al Low loss (1.7 dB/km) Hollow core photonic band gap fiber [A]. post deadline paper PDP24 in Optical Fiber Communication Conference, 2004 (Los Angeles).