

# 空芯光子晶体光纤光子带隙的测量与数值模拟<sup>\*</sup>

米 艳<sup>1)†</sup> 侯蓝田<sup>1)</sup> 周桂耀<sup>1)</sup> 王 康<sup>1)</sup> 陈 超<sup>1)</sup> 高 飞<sup>1)</sup> 刘博文<sup>2)</sup> 胡明列<sup>2)</sup>

1) 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) 天津大学精密仪器与光电工程学院超快激光研究室, 天津 300072)

(2007 年 9 月 15 日收到, 2007 年 11 月 16 日收到修改稿)

用全矢量平面波法计算三角结构光子晶体光纤的带隙. 用透射法测量了自制的空芯光子晶体光纤的透射谱, 得到了它在可见光波段透射强度与波长的关系, 并在随后的实验中观测到了传光的模场图. 通过理论模拟了实验所用的空芯光子晶体光纤的带隙图, 与实验结果具有较好的一致性.

关键词: 空芯光子晶体光纤, 光子带隙, 全矢量平面波法, 透射

PACC: 4281D, 4270Q, 4280L

## 1. 引 言

空芯光子晶体光纤(hollow-core photonic crystal fiber, 简称为 HC-PCF)的周期性包层结构具有光子禁带效应, 可以将某些波长的光限制在纤芯区域传播, 所以它又被称为光子带隙光纤(photonic bandgap fiber, 简称为 PBGF). HC-PCF 的三角形晶格结构存在完全的二维光子带隙, 即在一定频率范围内光无法在横向传播. 在 HC-PCF 的纤芯处引入了一个大空气孔, 该大空气孔纤芯可看成是对 HC-PCF 包层的二维光子晶体的破坏, 使由二维周期性包层结构产生的光子能带在空气芯处形成缺陷态, 即所谓光子带隙缺陷态, 于是, 频率处在光子带隙内的光波长将被限制在光子晶体缺陷内, 而频率处在光子带隙外的光波长将不受包层横向光子带隙效应的限制, 光波能量在沿光纤传输很短距离后因横向泄漏而损失掉. 这样, HC-PCF 就只能将处于包层光子带隙内的光波长限制在低折射率纤芯中沿轴向传输<sup>[1-4]</sup>.

当前国际上有关带隙传光的报道很多<sup>[3-7]</sup>, 但国内还没有出现相关报道. 燕山大学于 2007 年成功研制出了我国第一根可见区 PBGF, 填补了我国的空白.

## 2. 理论计算

HC-PCF 的带隙性质研究主要是应用全矢量平面波法(full-vector plane-wave method, 简称为 FVPWM)<sup>[8]</sup>, 它是研究光子晶体能带结构的有效方法之一, 其主要思路是将周期性相对介电常数和电磁场在倒格矢空间做傅里叶展开.

假定所研究的光子晶体结构是线性、各向同性和非磁性材料组成, 给定的场是时间的正弦函数, 将麦克斯韦方程组经过适当变换可得到波矢量为  $k$ , 频率为  $\omega$  的单色光波的磁场  $H(r) \exp[i(\omega t - k \cdot r)]$  满足的方程:

$$\nabla \times \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r), \quad (1)$$

在无限周期性结构问题中, 根据布洛赫理论(1)式中的磁场  $H(r)$  和  $1/\epsilon(r)$  可分别表示成

$$\begin{aligned} H(r) &= e_k e^{ik \cdot r} \sum_G h(G, k) e^{iG \cdot r} \\ &= \sum_G h(G, k) e^{i(k+G) \cdot r} e_{k+G}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\epsilon(r)} = \sum_G \epsilon^{-1}(G) e^{iG \cdot r}, \quad (3)$$

其中  $G$  是倒格矢,  $e_{k+G}$  是垂直于  $k+G$  的单位矢量, 将  $e_{k+G}$  分解为两个正交分量  $e_{1, k+G}, e_{2, k+G}$ . 则  $H$  可进一步写为

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号 2003CB314905)和国家高技术研究发展计划(批准号 2003AA311010)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: miyan1213@163.com

$$H(r) = \sum_{G, \lambda} h(G, \lambda) e^{(k+G) \cdot r} e_{\lambda, k+G}, \quad (4)$$

将(3)和(4)式代入方程(1)中,得到关于  $H$  的本征方程为

$$\sum_G |k + G| |k + G'| \varepsilon^{-1}(G - G') \times \begin{bmatrix} e_2 e'_2 & -e_2 e'_1 \\ -e_1 e'_2 & e_1 e'_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \end{bmatrix} = \frac{w^2}{c^2} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

光子带隙的产生可以理解为得到一系列具有相似频率但不同波矢量的平面波. 在倒易空间, 这些平面波可以看作在不同方向传播. 对于 HC-PCF, 带隙出现在与空气孔平行的传播常数不为零时的情形, 也就是沿着空气孔的纵向传输. 光波由二维光子晶体平面( $x-y$  平面)外入射, 计算的波矢不在周期平面内, 求解时, 将波矢  $k$  分解为沿  $z$  轴的纵向分量  $k_z$  和垂直于  $z$  轴的横向分量  $k_t$ , 保持纵向分量  $k_z$  不变(非 0 值), 取横向分量  $k_t$  为  $x-y$  平面内的第一布里渊区边界上的不同波矢, 求解特征方程即可得到对应于不同纵向分量  $k_z$  的光波面外入射的带隙关系.

### 3. 实验研究与计算模拟

采用二次拉制方法自制的 HC-PCF<sup>[9]</sup> 的光纤截面的电子显微镜扫描图如图 1 所示. 图 1 中, 内包层直径为  $75 \mu\text{m}$ , 外包层直径为  $305 \mu\text{m}$ . 图 2 为所测 HC-PCF 的内包层结构的横截面图.

本实验用透射法测量 HC-PCF 的光子带隙的实验装置图如图 3 所示.

实验中, 从溴钨灯光源发出的光经准直透镜成为平行光束, 溴钨灯光源的光谱图如图 4 所示, 光束经过微调耦合进入被测光纤, 实验中所用 HC-PCF 结构如图 1 所示, 外包层主要起隔离的作用. 要获得好的波导特性, 传输光的能量应该主要集中在

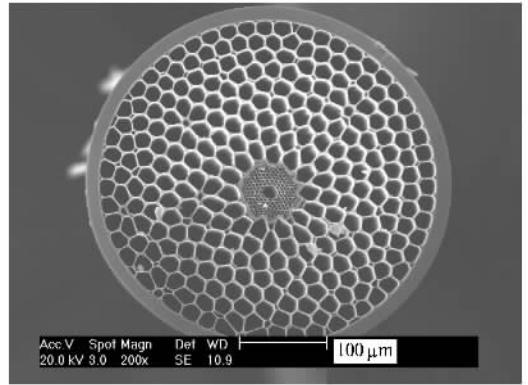


图 1 测量所用 HC-PCF 的横截面图

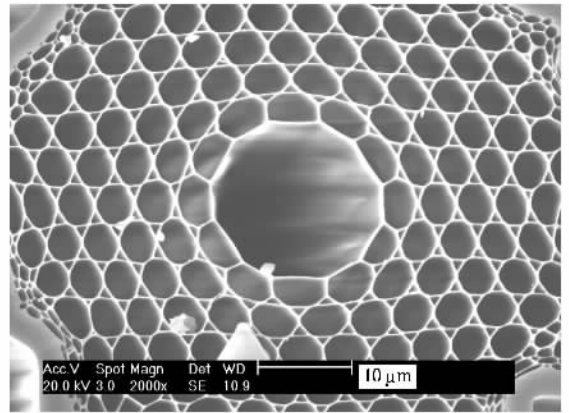


图 2 测量所用 HC-PCF 的内包层结构的横截面图

HC-PCF 内包层结构的纤芯中, 结构参数为, 纤芯孔直径  $d_{c0} = 15.2 \mu\text{m}$ , 孔间距  $\Lambda = 4.03 \mu\text{m}$ , 包层孔直径  $d = 3.91 \mu\text{m}$ , 空气填充率  $f = 90\%$ . 被测 HC-PCF 长为  $60 \text{ cm}$ . 光阑保证只有纤芯部分光束通过小孔, 避免将 HC-PCF 端面输出能量也入射到光谱分析仪中, 影响纤芯的信号, 然后光束经过聚焦透镜聚焦在光谱分析仪输入的光纤端面上, 光谱分析仪的波长范围取为  $400-1200 \text{ nm}$ , 实验中测得的纤芯透射谱和

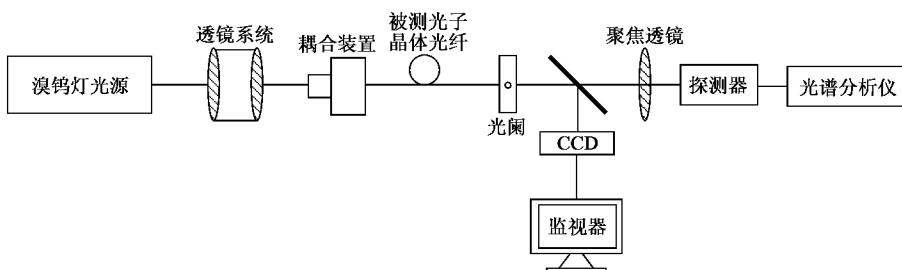


图 3 透射法测量 HC-PCF 的实验装置图

模场图分别如图 5 和图 6 所示.

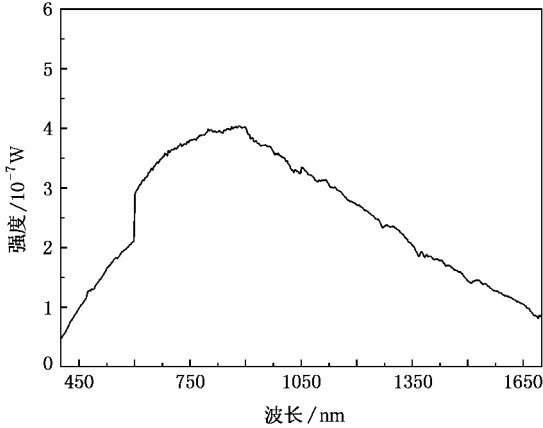


图 4 溴钨灯光源的光谱图

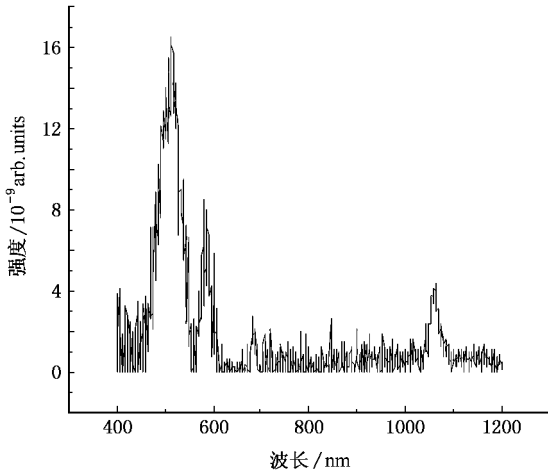


图 5 测量 HC-PCF 的透射谱图

从溴钨灯光源的光谱图(图 4)可以看出光源的光谱是连续的,但在光纤的透射谱(图 5)中,可以看出有三个明显的透射带,对应的波长范围分别为

489—528 nm, 565—593 nm, 1056—1064 nm.

从纤芯模场图(图 6)中,可以看到纤芯中的光是黄光(570—600 nm)和绿光(500—570 nm).图 6(a)中,溴钨灯光源发出的光很好得耦合进 HC-PCF 的纤芯,光的能量几乎都限制在纤芯中,包层中没有泄漏.图 6(b)中,由于耦合得不是很好,虽然入射光的能量主要集中在 HC-PCF 的纤芯,但纤芯附近的包层仍可以看到一些红光.图 6(c)所示是只含纤芯部分的模场图.

将沿着光纤轴方向的波矢量  $k$  的分量定义为传播常数  $\beta^{[3]}$ ,  $\beta = kn \cos \theta$ , 其中  $n$  为折射率,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为真空中的波长,光在折射率为  $n$  的材料中传播与光纤轴的夹角为  $\theta$ . 传播常数  $\beta$  决定了光波在波导中是传播还是倏逝,如果  $\beta < nk$ , 则光波在折射率为  $n$  的材料中与光轴成  $\theta$  角的方向传播,如果  $\beta > nk$ , 则  $\theta$  是虚数,光在该材料中倏逝.在 HC-PCF 中,通常用  $\beta a$  来表征纵向传播常数( $a$  为包层空气孔间距),用  $ka$  表示归一化频率,  $\beta a = ka$  定义为空气线.综合上述分析可得,如果要在 HC-PCF 中实现中心缺陷导光,必须同时具备光波频率落入光子带隙范围内以及传播模式满足  $\beta a \leq ka$  (对于空气,  $n$  近似为 1)这两个条件,反映在带隙图中,即要求光子带隙与空气线有重叠<sup>[10-12]</sup>.

通过计算模拟,得到归一化传播常数  $\beta a$  随归一化频率  $ka$  变化的带隙图如图 7 所示.

图 7 中实线表示空气线,从 HC-PCF 的导光原理<sup>[3]</sup>可知,只需要考虑空气线上方的带隙,从图 7(a)看到空气线上方有三个带隙,  $ka$  的取值范围为 42.5—44, 对应波长为 575—595 nm,图 7(b)中空气线上方有两个带隙,  $ka$  的取值范围为 47.7—51.3, 对应波长为 493—530 nm,但是,在固定的归一化传播常数处,对应的带隙很窄.随着波长的增大,也就

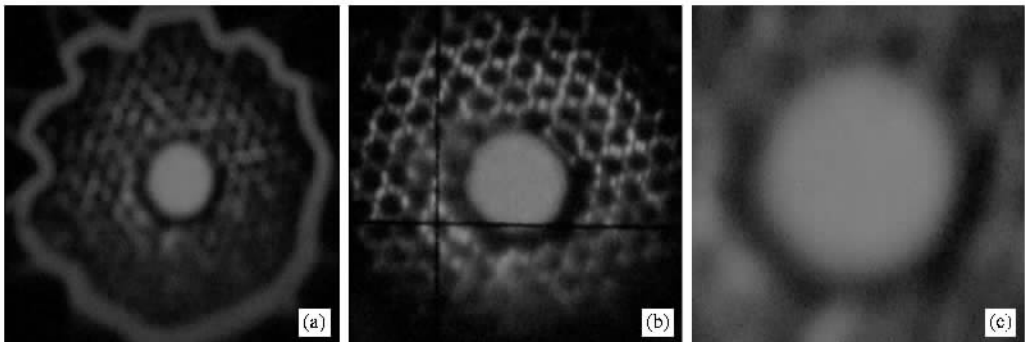


图 6 HC-PCF 的模场图

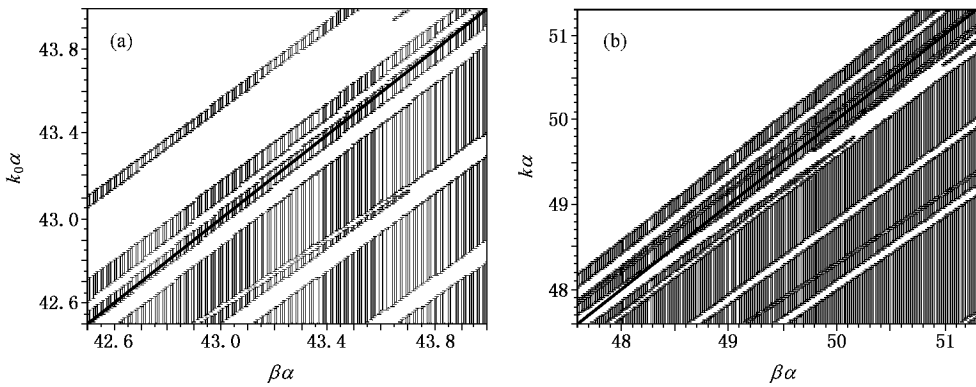


图 7 随归一化传播常数变化的光子带隙图 (a)  $\beta a = 42.5-44$ ; (b)  $\beta a = 47.6-51.3$

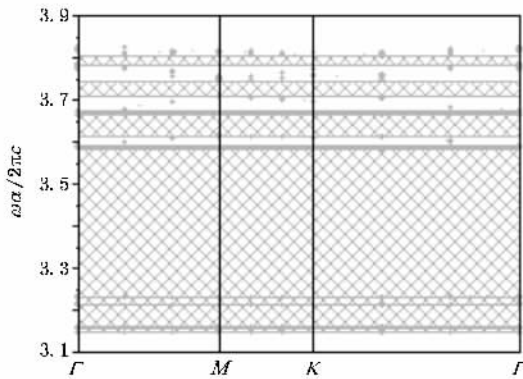


图 8  $\beta a = 23.65$  的光子带隙图

是归一化频率的减小,带隙变宽,如图 8 所示, $\beta a = 23.65$  时,带隙图中满足 HC-PCF 导光原理的  $\omega a/2\pi c$  的值为 3.78—3.8,对应波长为 1060—1066 nm. 可以看出计算模拟的三个波段与实验结果相近.

理论模拟中,假设每个孔都是均匀的圆形,忽略了实际结构中存在的间隙孔,间隙孔的存在可能会

是使波段向短波偏移,但这对于分析 HC-PCF 的影响很小,由于实验条件的限制,没有测得 HC-PCF 入射端面处的反射谱,但是入射光的功率很低只有 10 mW 经过传输和反射的损耗后,大概只有小于 2 mW 左右可以接收到反射谱中,根据以往的经验,在透射谱的透射带应该是反射谱中的吸收峰,其结果和测得的 HC-PCF 的透射谱一致.

### 4. 结 论

本文通过采用 FVPWM 的理论模拟和实验测量方法,证明了燕山大学自行制备的 HC-PCF 具有可见区到近红外的三个光子带隙,这不仅为制备 PBGF 创造了条件,而且为 HC-PCF 的进一步应用提供了广阔的前景. 实现带隙在可见光波段传光,不仅有利于带隙的实验观测,而且为超短光脉冲的传输提供了良好的平台,更为带隙向紫外和中远红外拓展提供了可能.

[ 1 ] Knight J C 2003 *Nature* **424** 847

[ 2 ] Guan C Y, Yuan L B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1244 (in Chinese)  
[ 关春颖、苑立波 2006 物理学报 **55** 1244 ]

[ 3 ] Knight J C, Broeng J, Birks T A, Russell P St J 1998 *Science* **282** 1476

[ 4 ] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, Briks T A, Russell P St J, Roberts P J, Allan D C 1999 *Science* **285** 1537

[ 5 ] Konorov S O, Fedotov A B, Kolevatova O A, Belogazov V I, Skibina N B, Shcherbakov A V, Zheltikov A M 2002 *Jetp Lett.* **76** 341

[ 6 ] Couny F, Sabert H, Roberts Williams D P, Tomlinson A, Mangan B J, Farr L, Knight J C, Birks T A, Russell P St J 2005 *Opt. Express* **13** 558

[ 7 ] Bouwmans G, Luan F, Knight J C, Russell P St J 2003 *Opt. Express* **11** 1613

[ 8 ] Guo S P, Albin S 2003 *Opt. Express* **11** 167

[ 9 ] Zhou G Y, Hou Z Y, Pan P F, Hou L T, Li S G, Han Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1271 (in Chinese) [ 周桂耀、侯峙云、潘普丰、侯蓝田、李曙光、韩颖 2006 物理学报 **55** 1271 ]

[ 10 ] Chen M Y, Yu R J 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 819

[ 11 ] Barkou S E, Broeng J, Bjarklev A 1999 *Opt. Lett.* **24** 46

[ 12 ] Murao T, Saitoh K, Koshiba M 2006 *Opt. Express* **14** 2404

# Measurement and numerical simulation of the bandgap in hollow-core photonic crystal fibers<sup>\*</sup>

Mi Yan<sup>1)†</sup> Hou Lan-Tian<sup>1)</sup> Zhou Gui-Yao<sup>1)</sup> Wang Kang<sup>1)</sup> Chen Chao<sup>1)</sup> Gao Fei<sup>1)</sup>  
Liu Bo-Wen<sup>2)</sup> Hu Ming-Lie<sup>2)</sup>

1) *Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*

2) *Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

( Received 15 September 2007 ; revised manuscript received 16 November 2007 )

## Abstract

The full-vector plane-wave method was used to calculate the bandgaps of the photonic crystal fiber with triangular structure. The transmission spectrum of the hollow-core photonic crystal fiber fabricated by Yanshan University was measured, and we obtained the relation between the transmission intensity and the wavelength in visible region. In the subsequent experiment, the mode field patterns were observed. The theoretical simulation is well consistent with the experimental result.

**Keywords** : hollow-core photonic crystal fiber, photonic bandgap, full-vector plane-wave method, transmission spectrum

**PACC** : 4281D, 4270Q, 4280L

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2003CB314905 ) and the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 2003AA311010 ).

<sup>†</sup> E-mail : miyan1213@163.com