

# 八角光子晶体光纤传输特性与非线性特性研究\*

闫海峰<sup>†</sup> 俞重远 田宏达 刘玉敏 韩利红

(北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

(2009 年 3 月 29 日收到; 2009 年 10 月 5 日收到修改稿)

基于有限元法对一种全内反射型八角光子晶体光纤的传输特性和非线性特性进行了研究, 并改变该光子晶体光纤空气孔结构参数得出了其特性与光波长的曲线关系图. 最终得到一种新结构光子晶体光纤, 在入射光波长为  $1.55 \mu\text{m}$  低损耗窗口处具有非常优越的传输特性和较平坦非线性特性.

**关键词:** 光子晶体光纤, 色散, 损耗, 非线性系数

**PACC:** 4280M, 4281D, 4281F

## 1. 引 言

光子晶体光纤又称微结构光纤或多孔光纤, 作为一种新型光纤, 其色散特性<sup>[1]</sup>, 偏振特性<sup>[2-4]</sup>, 双折射特性<sup>[5]</sup>, 在光电子器件领域已经获得广泛的研究与应用. 光子晶体光纤是在石英光纤中沿轴向均匀排列着空气孔, 从光纤端面看, 存在一个周期性的二维结构, 如果其中一个或多个孔缺失, 则形成缺陷, 光能够在该缺陷内传播. 根据导光原理不同, 光子晶体光纤可分为两类: 一类是全内反射型光子晶体光纤; 另一类是光子带隙型光子晶体光纤<sup>[6]</sup>. 对于全内反射型光子晶体光纤, 它的传输特性完全取决于其截面空气孔的分布<sup>[6,7]</sup>. 由于光子晶体光纤空气孔的排列和大小有很大的控制余地, 可以根据需要设计光子晶体光纤的各种特性, 目前对光子晶体光纤微结构设计已经成为科研工作的热点研究领域<sup>[8]</sup>.

近年来, 有限元法已被成功应用于光子晶体和光子晶体光纤的特性研究中, 其特点是计算精确, 对于各种复杂的因素(如复杂的几何形状, 任意的边界条件, 不均匀的材料特性等), 有限元法都能灵活地加以考虑, 且不会发生处理、求解上的困难. 该方法采用矩阵形式作为计算工具, 便于计算机编程, 可充分利用计算机的大容量记忆与高速度运算, 因而有限元法被公认为各个领域数值计算和分

析的有效工具, 并得到普遍的重视与广泛的应用; 在所有连续介质问题和场问题中, 都有有限元法的用武之地, 在选取合适的仿真参数前提下, 有限元法是分析光子晶体光纤物理特性的一种高效数值方法<sup>[9-11]</sup>. 在本文中, 我们将采用这一方法研究一种新型光子晶体光纤的特性.

## 2. 物理模型

本文主要对一种八角多层全内反射型光子晶体光纤传输特性<sup>[12,13]</sup> 和非线性特性进行了较深入的研究, 其结构如图 1 所示. 为在  $1.55 \mu\text{m}$  低损耗窗口处能够得到较为优秀的特性, 将图 1(a) 所示光子晶体光纤模型进行了优化调整, 其结构如图 1(b). 在图 1 中, 最外层圆环为光子晶体光纤的完美匹配层(PML)作为计算时的吸收边界条件<sup>[14]</sup>; 内部为光子晶体光纤结构, 由二氧化硅和空气孔构成, 其横截面为沿轴向周期性排列的空气孔, 中心位置周期性遭到破坏形成缺陷, 该缺陷构成纤芯, 光可以沿缺陷在纤芯中传播. 这种光子晶体光纤结构主要由下列几何参数决定: 空气孔间距  $\Lambda$ 、大空气孔直径  $d_1$  和小空气孔直径  $d_2$ . 在研究中发现, 通过改变空气孔间距  $\Lambda$ 、空气孔直径  $d$  数值大小, 以及包层中空气孔层数, 光子晶体光纤的传输特性会发生极为显著的变化.

\* 国家自然科学基金(批准号:60971068 和 60908028)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yanhaifeng1976@gmail.com

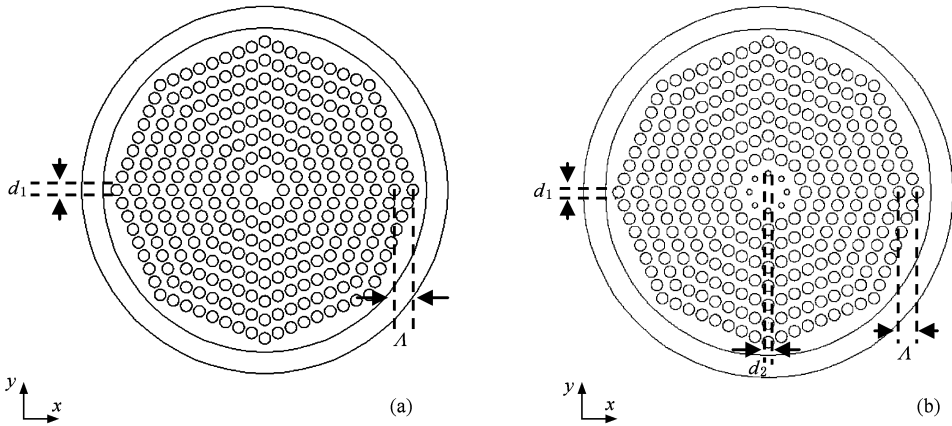


图1 光子晶体光纤结构示意图 (a)八角光子晶体光纤; (b)改进八角光子晶体光纤

### 3. 数值结果与分析

当空气孔间距  $\Lambda = 0.86 \mu\text{m}$ , 大空气孔直径  $d_1$

$= 0.61\Lambda$ , 小空气孔直径  $d_2 = 0.28\Lambda$ , 入射光波长  $\lambda = 1.4\text{—}1.7 \mu\text{m}$  时, 上述两模型的有效折射率  $n_{\text{eff}} = \text{Re}[n_{\text{eff}}] + \text{Im}[n_{\text{eff}}]$  与光波长  $\lambda$  的关系曲线如图2所示。

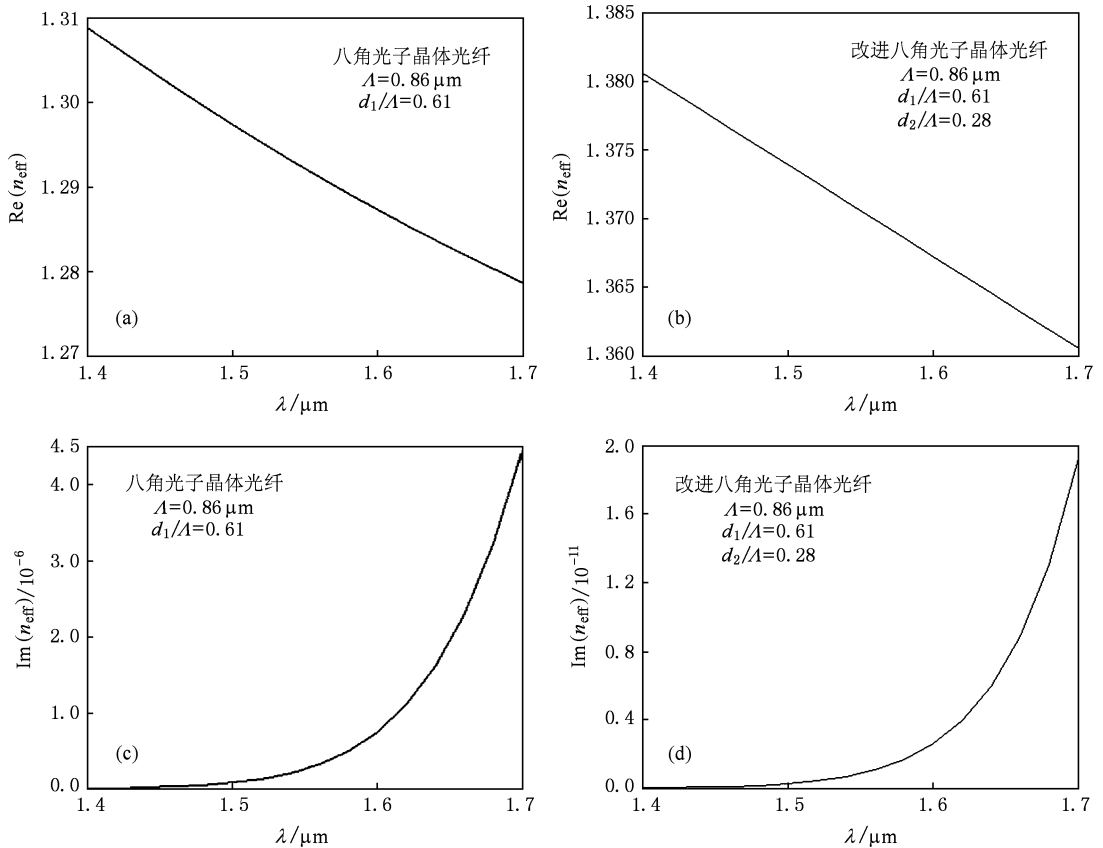


图2 有效折射率与入射光波长关系 (a)八角光子晶体光纤有效折射率实部曲线; (b)改进八角光子晶体光纤有效折射率实部曲线; (c)八角光子晶体光纤有效折射率虚部曲线; (d)改进八角光子晶体光纤有效折射率虚部曲线

从图2中可以看出,光子晶体光纤由八角模型到改进八角模型时,其有效折射率发生了显著变

化,改进八角光子晶体光纤的有效折射率实部比原模型有效折射率实部有较大提高,同时对应的有效

折射率虚部比原模型有效折射率虚部降低了约 5 个数量级. 分析其原因, 是由于改进八角光子晶体光纤模型最内层空气孔与原模型相比有较大幅度减小, 这势必导致改进模型的包层空气填充率下降, 使得包层有效折射率比原模型包层有效折射率增大, 最终造成改进八角光子晶体光纤的有效折射率实部变大; 同时光纤结构参数的变化对入射光模场也产生了相应影响, 分析模型有效折射率虚部数值可知, 改进八角光子晶体光纤模型与原模型相比其有效折射率虚部更小, 这说明它对入射光模场影响更小. 另外随着入射光波长的增大, 两模型的有效

折射率实部呈现减小的趋势, 这是由于在短波长段纤芯对模式限制较好, 在长波长段纤芯对模式限制较差造成的.

由于模式色散与有效折射率有如下关系:

$$D \approx -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d^2 \lambda}, \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为入射光波长,  $c$  为真空中光速. 在模型结构参数不变的情况下, 入射光波长  $\lambda = 1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$  时, 计算可得八角与改进八角光子晶体光纤模式色散与光波长  $\lambda$  的关系曲线, 如图 3 所示.

从图 3 中可以看出, 八角光子晶体光纤有较大

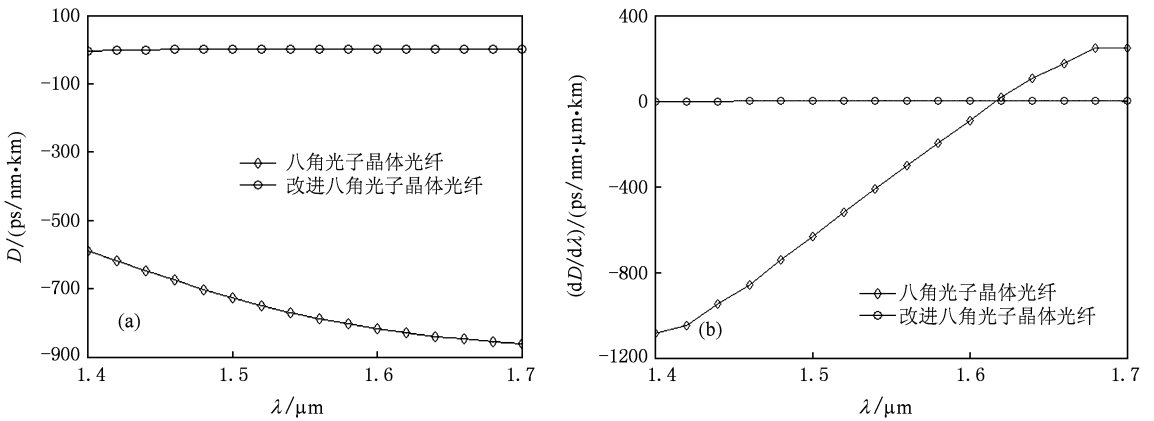


图 3 模式色散及色散平坦性与入射光波长关系 (a) 模式色散曲线; (b) 色散平坦性曲线

的负模式色散, 其数值范围在  $(-580, -870) \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ ; 对于改进八角光子晶体光纤, 由于有效折射率实部与原模型有效折射率实部在数值上有较大幅度的变化, 最终导致改进模型的模式色散与原模型有显著的不同, 其模式色散数值范围在  $(-4, 4) \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ , 同时在  $\lambda = 1.437 \mu\text{m}$  处存在模式色散零点, 在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处模式色散仅为  $3.038 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ , 与 ITU-T 规定的普通 G. 652

光纤比较色散零点向长波长方向移动. 由图 3 可知, 改进型八角光子晶体光纤模式色散数值小, 且曲线变化更为平坦.

由于光纤限制性损耗与光纤有效折射率虚部有着近似线性的关系<sup>[15]</sup>, 在模型结构参数不变的情况下, 入射光波长  $\lambda = 1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$  时, 可得八角与改进八角光子晶体光纤限制性损耗与光波长  $\lambda$  的关系曲线, 如图 4 所示.

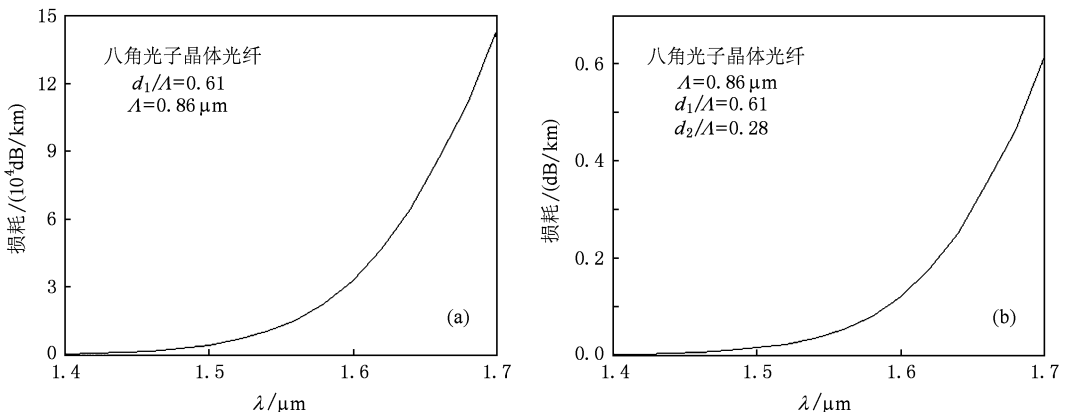


图 4 限制性损耗与入射光波长关系 (a) 八角光子晶体光纤限制性损耗曲线; (b) 改进八角光子晶体光纤限制性损耗曲线

从图4中可看出改进模型的有效折射率虚部比原模型有效折射率虚部小4到5个数量级,在入射光波长为 $\lambda = 1.4\text{--}1.7\ \mu\text{m}$ 范围内变化时,八角光子晶体光纤的限制性损耗非常大;而对于改进八角光子晶体光纤的限制性损耗取值则为 $[0.0009, 0.616]\ \text{dB/km}$ ,当入射光波长 $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$ 时该光子晶体光纤的限制性损耗仅为 $0.0437\ \text{dB/km}$ ,大大优于ITU-T规定的传输损耗值 $0.2\ \text{dB/km}$ .

我们对八角光子晶体光纤模型与改进八角光子晶体光纤模型的非线性系数进行讨论. 光纤非线性系数的定义为

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

其中 $n_2$ 为非线性折射率(与光纤材料有关); $\omega_0$ 为入射光场中心频率; $c$ 为真空中光速; $A_{\text{eff}}$ 为有效纤芯面积,表示为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_S |E_t|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |E_t|^4 dx dy}.$$

在模型结构参数不变的情况下,入射光波长 $\lambda = 1.4\text{--}1.7\ \mu\text{m}$ 时,计算可得八角与改进八角光子晶体光纤非线性系数 $\gamma$ 与光波长 $\lambda$ 的关系曲线,如图5所示.

由图5可知,在入射光波长相同的情况下,改进八角光子晶体光纤模型的非线性系数与原模型相比在短波长处略有下降,但在长波长处其非线性系数却高于原模型数值,总体看改进八角光子晶体光纤的非线性系数在 $1.55\ \mu\text{m}$ 低损耗窗口处数值变

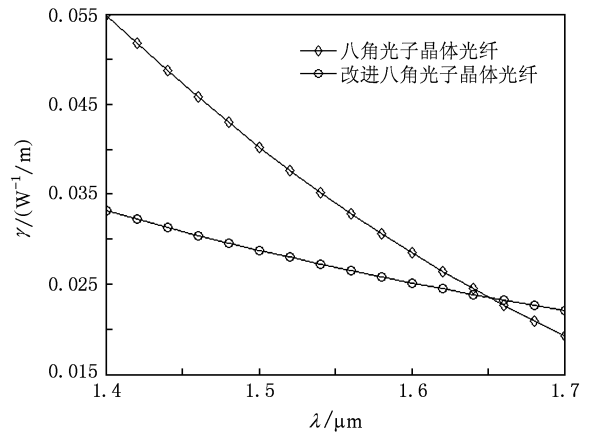


图5 非线性系数与入射光波长关系

化更小,曲线更为平坦.

## 4. 结 论

本文采用有限元法对一种八角光子晶体光纤进行了数值分析,得出了光子晶体光纤的有效折射率、模式色散、色散平坦性、限制性损耗、非线性系数与入射光波长的变化关系曲线. 通过对模型的进一步优化,得到一种新结构八角多层光子晶体光纤,该光纤在 $1.55\ \mu\text{m}$ 低损耗窗口处具有非常优越的传输特性和变化平坦的非线性特性,基于此特点结合模型,可设计出特定用途的各类光纤,如色散平坦光纤、低传输损耗光纤、非线性平坦光纤等. 我们的研究为特定用途的光子晶体光纤设计提供了一定的理论依据和参考价值.

- [1] Matsui T, Nakajima K, Sankawa I 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 757
- [2] Lou S Q, Wang Z, Ren G B, Jian S S 2004 *Chin. Phys.* **13** 1052
- [3] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4668 (in Chinese) [张晓娟、赵建林、侯建平 2007 物理学报 **56** 4668]
- [4] Zhang Y N, Miao R C, Ren L Y, Wang H Y, Wang L L, Zhao W 2007 *Chin. Phys.* **16** 1719
- [5] Lou S Q, Wang Z, Ren G B, Jian S S 2004 *Chin. Phys.* **13** 1493
- [6] Birks T A, Knight J C, Russell P St J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [7] Birks T A, Mogilevtsev D, Knight J C 1999 *IEEE Photonics*

*Technol. Lett.* **11** 674

- [8] Li Y F, Hu M L, Wang Q Y 2003 *Chin. J. Lasers* **30** 427
- [9] Liu Y M, Yu Z Y, Huang Y Z 2006 *Int. J. Mod. Phys. B* **20** 4899
- [10] Liu Y M, Yu Z Y, Huang Y Z 2007 *J. University Sci. Technol. Beijing* **14** 477
- [11] Liu Y M, Yu Z Y, Ren X M 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1850
- [12] Guan J F 2008 *Proc. of 2008 SPIE* **7** 134
- [13] Chiang J S, Wu T L. 2006 *Opt. Commun.* **258** 170
- [14] Qiu M, He S L 2000 *Phys. Rev. B* **61** 12871
- [15] Tian H D, Yu Z Y, Liu Y M, Han L H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1109

# Investigation on propagation and nonlinearity of an octagonal photonic crystal fiber\*

Yan Hai-Feng<sup>†</sup> Yu Zhong-Yuan Tian Hong-Da Liu Yu-Min Han Li-Hong

(*Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Ministry of Education, Beijing 100876, China*)

(Received 29 March 2009; revised manuscript received 5 October 2009)

## Abstract

The finite element method is used to investigate the propagation and nonlinearity of octagonal photonic crystal fibers of total internal reflection type. We changed the structural parameters of the fibers and obtained the curves of relations about the propagation and nonlinearity. At last, we found another structure of photonic crystal fiber. It is demonstrated that it is possible to design a low-loss dispersion-flattened PCF at 1.55 micrometer wavelength.

**Keywords:** photonic crystal fiber, chromatic dispersion, confinement loss, nonlinear coefficient

**PACC:** 4280M, 4281D, 4281F

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60971068 and 60908028).

<sup>†</sup> E-mail: yanhaifeng1976@gmail.com