

文章编号: 1001-3806(2013)02-0187-04

## 高非线性平坦色散光子晶体光纤的研究

简多刘敏\* 何丁丁 李丹 廖洲一  
(重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了研究最内层空气孔的大小以及空气孔的占比改变对光子晶体光纤的非线性系数、色散的影响, 采用全矢量有限元方法, 进行了理论分析和实验验证, 取得了非线性系数、色散系数随频率和结构参数的变化数据。结果表明, 三角晶格结构的非线性系数大, 色散较平坦, 能够在 400nm ~ 1160nm 保持单模传输, 非线性系数达到  $172\text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ , 在  $0.65\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$  范围内具有超平坦色散。这一结果对光通信领域的研究是有帮助的。

**关键词:** 光纤光学; 非线性; 色散平坦; 全矢量有限元法; 光子晶体光纤

**中图分类号:** TN929.11      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.012

### Research of photonic crystal fiber with high nonlinear flattened dispersion property

JIAN Duo, LIU Min, HE Ding-ding, LI Dan, LIAO Zhou-yi

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to analyze the dependence of the nonlinear coefficient and dispersion property on the structural parameters of the inner air hole size and the changing of the air hole fraction, by using the full vector finite element method, the nonlinear coefficient and dispersion property as a function of frequency and design parameters were investigated. According to the analysis results, the nonlinear coefficient of photonic crystal fiber with hexagonal structure is significantly increased and the dispersion is flat. It is shown from numerical results that it is possible to design photonic crystal fiber of hexagonal structure with single mode transmission during 400nm ~ 1160nm and high nonlinear coefficient achieves  $172\text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ , dispersion becomes flattened between  $0.65\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ . This result is helpful to the research of optical communication.

**Key words:** fiber optics; nonlinearity; flattened dispersion; full vector finite element method; photonic crystal fiber

### 引言

光子晶体光纤<sup>[1-4]</sup> (photonic crystal fiber, PCF), 又称微结构光纤 (microstructure fiber, MF), 它是由沿轴向规则排列着空气孔的规则石英包层和破坏了包层结构周期性结构形成的纤芯组成, 具有传统光纤难以实现的许多特性<sup>[5-9]</sup>, 如: 高双折射、奇异的色散特性以及高非线性特性等, 在光通信领域具有广阔的应用前景。

作者运用全矢量有限元法对不同结构的光子晶体光纤进行特性分析, 通过调节光纤的结构参数, 灵活地调节光纤的非线性系数和色散系数<sup>[10]</sup>, 并在一定波长范围内令光子晶体光纤实现高非线性和平坦色散特性。作者将三角晶格结构光子晶体光纤和四角晶格结构光子晶体光纤进行对比, 发现三角晶格结构光子晶

体光纤更适合用于研究高非线性和色散平坦, 进而设计了一种在  $0.85\mu\text{m}$  通信窗口附近具有高非线性和平坦色散的三角晶格光子晶体光纤。

### 1 理论基础和结构模型

全矢量有限元法优点在于有效地识别光纤中的传输模式, 对不同光子晶体光纤的模型进行网格化处理, 求解精度高, 适于研究光子晶体光纤的许多特性。因此, 本文中采用全矢量有限元法进行数值计算。

光子晶体光纤的非线性系数<sup>[11]</sup>和色散<sup>[12-13]</sup>的可调性取决于可以对光纤的包层结构进行灵活设计, 其中包层结构参数主要包括空气孔半径  $r$  和空气孔间距  $\Lambda$  以及空气填充率  $f$ 。在光子晶体光纤的模拟计算过程中, 采用等效面积法将  $f$  取为:

$$f = (2\pi/\sqrt{3})(r/\Lambda)^2 \quad (1)$$

光子晶体光纤的非线性系数  $\gamma(\lambda)$  可以表示为:

$$\gamma = \frac{n_2\omega_0}{cA_{\text{eff}}} = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (2)$$

式中  $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$  是石英非线性折射率,  $A_{\text{eff}}$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61007049)

作者简介: 简多 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤、光纤光栅方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liumin@cqu.edu.cn

收稿日期: 2012-07-18; 收到修改稿日期: 2012-08-28

是模有效面积<sup>[14]</sup>,  $\omega_0$  为角频率  $c$  为真空中光速  $\lambda$  为波长。基模的有效面积  $A_{\text{eff}}$  可以作为非线性特性的一个指标, 小的  $A_{\text{eff}}$  将提高非线性效应:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_S |E_t|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |E_t|^4 dx dy} \quad (3)$$

式中  $E_t$  为横电场矢量,  $S$  为光子晶体光纤的横截面。

色散是衡量光纤特性的一个很重要的参量, 尤其是对高速长距离光纤通信系统, 色散是一个必须考虑的因素。光纤色散分为材料色散和波导色散, 在这里, 忽略材料色散, 主要考虑波导色散, 其表达式为:

$$D_w = - \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} [\text{Re}(n_{\text{eff}})] \quad (4)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率。

图 1a 和图 1b 是两种不同结构的光子晶体光纤截面几何结构, 其中 type 1 是包层为由圆形空气孔构成的具有六重旋转对称性的三角形晶格结构, type 2 是包层为由圆形空气孔构成的四重旋转对称性的正方形晶格结构, 两种光子晶体光纤的纤芯由中心抽取一个空气孔形成。其中最内层空气孔直径为  $d_1$ , 其余包层空气孔直径为  $d$ , 孔间距为  $\Lambda$ 。在数值分析过程中, 包层空气孔折射率设为 1, 背景材料折射率设为 1.45。

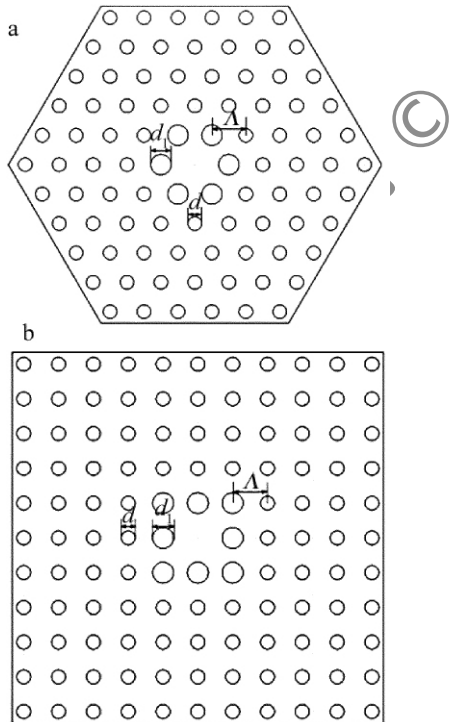


Fig. 1 Cross section of two PCFs  
a—type 1 b—type 2

## 2 数值分析与结果

### 2.1 非线性系数

图 2a 为  $d=0.6\mu\text{m}$ ,  $\Lambda=1.2\mu\text{m}$ , 最内层空气孔  $d_1$

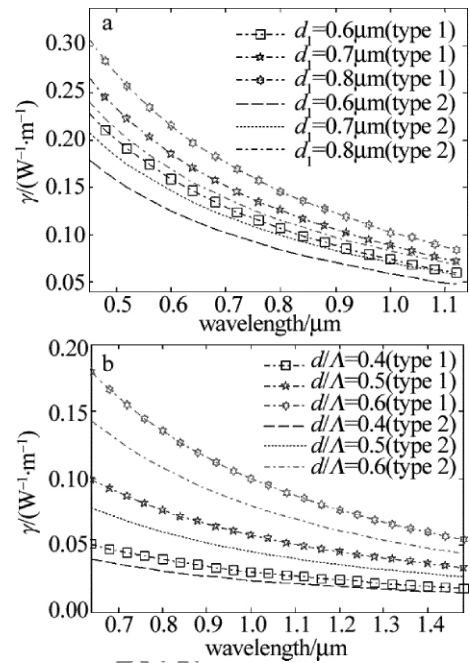


Fig. 2 Variation of nonlinear coefficient  $\gamma$  with different parameter  $d_1$   
a— $\gamma$  variation with  $d_1$  b— $\gamma$  variation with  $d/\Lambda$

以  $0.1\mu\text{m}$  的步长由  $0.6\mu\text{m}$  增加到  $0.8\mu\text{m}$  时, 两种不同结构的光子晶体光纤的非线性系数  $\gamma$  随波长变化的情况。由图 2a 可以看出, 对于特定结构的光子晶体光纤, 随着传输波长的增加, 非线性系数减小。这是因为 PCF 纤芯与空气孔包层之间存在高折射率差, 从而对其中的光波有很强的模场限制作用, 而随着波长增加, 光向光纤包层扩散, 有效模面积增加, 从而非线性系数降低。特定波长处, 非线性系数随最内层空气孔直径  $d_1$  的增大而增大, 因为随着最内层空气孔的增大, 纤芯被挤压, 有效模面积降低, 光聚集在纤芯传输, 从而非线性系数增大。

图 2b 为两种光子晶体光纤在最内层空气孔  $d_1 = 1.44\mu\text{m}$ 、外层空气孔  $d = 0.96\mu\text{m}$  保持不变时, 孔间距  $\Lambda$  分别为  $1.6\mu\text{m}$ ,  $1.92\mu\text{m}$  和  $2.4\mu\text{m}$ , 即  $d/\Lambda$  由 0.6 降低到 0.4 时, 非线性系数  $\gamma$  随波长  $\lambda$  的变化关系。可以看出, 对于两种不同排列的 PCF, 在最内层空气孔和外层空气孔孔径保持不变的情况下, 随着传输波长的增加, 非线性系数减小, 其中  $d/\Lambda$  越大, 非线性系数越大。波长  $0.84\mu\text{m}$  处, type 1 的 PCF, 其非线性系数分别是  $0.1267\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ,  $0.07153\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  和  $0.03654\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ; type 2 的 PCF, 其非线性系数分别是  $0.101\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ,  $0.05631\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$  和  $0.02897\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

由图 2 可以看出, 对参量相同、而空气孔排列不同的光子晶体光纤进行对比, 在同一波长处, type 1 的光子晶体光纤, 其非线性系数要高于 type 2 的光子晶体光纤。可见 type 1 的光子晶体光纤在高非线性性能上要优于 type 2 的光子晶体光纤。

### 2.2 色散

图 3a 为  $d=0.6\mu\text{m}$   $\Lambda=1.2\mu\text{m}$ , 最内层空气孔孔径  $d_1$  以  $0.1\mu\text{m}$  的步长由  $0.6\mu\text{m}$  增加到  $0.8\mu\text{m}$  时, 两种不同结构的光子晶体光纤的色散系数随波长变化的情况。图 3b 为两种光子晶体光纤在最内层空气孔孔径  $d_1=1.44\mu\text{m}$ , 外层空气孔  $d=0.96\mu\text{m}$  保持不变, 孔间距  $\Lambda$  分别为  $1.6\mu\text{m}$   $1.92\mu\text{m}$   $2.4\mu\text{m}$ , 即  $d/\Lambda$  由  $0.6$  降低到  $0.4$  时, 色散系数  $\gamma$  随波长  $\lambda$  的变化关系。

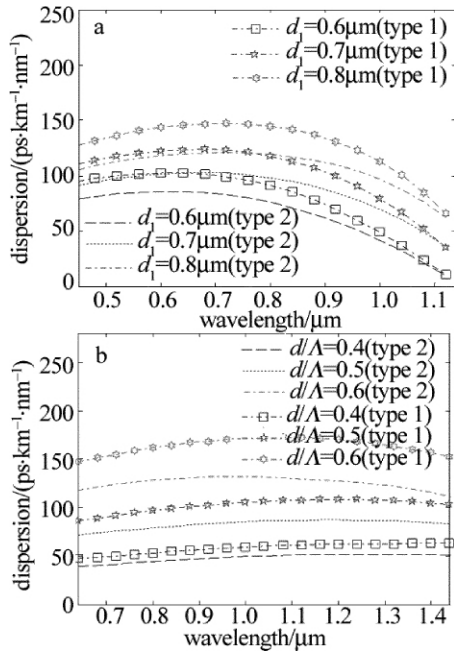


Fig. 3 Variation of dispersion with different parameter  $d_1$   
a—dispersion variation with  $d_1$  b—dispersion variation with  $d/\Lambda$

由图 3a 可知, 对于特定结构的光子晶体光纤, 在包层空气孔孔径  $d$ 、包层孔间距  $\Lambda$  一定的情况下, 同一波长处, 光纤的色散系数随着最内层空气孔孔径  $d_1$  的增大而增大。由图可知, 对于包层空气孔正六边形排列的 PCF, 当最内层空气孔孔径  $d_1$  分别为  $0.3\mu\text{m}$ ,  $0.35\mu\text{m}$  和  $0.4\mu\text{m}$  时, 在  $0.84\mu\text{m}$  处的色散分别为  $85.22\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ,  $116.9\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  和  $141.4\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。可见对于特定包层结构的 PCF, 可以通过改变最内层空气孔的孔径, 从而设计在指定波长处色散平坦的光子晶体光纤。

从图 3b 可以看出, 在包层空气孔孔径都保持不变的情况下, 随着  $d/\Lambda$  的减小, 色散变得更加平坦。其中, 对比相同结构参量的 type 1 光子晶体光纤和 type 2 光子晶体光纤, 可以看到, type 2 的光子晶体光纤色散更加平坦, 且色散值更低。可见, 通过选择合适的包层排列结构以及参量, 可以使 PCF 色散在指定波长处平坦。

### 3 高非线性平坦色散光子晶体光纤的优化设计

通过以上分析, 在包层空气孔孔径  $d$ 、孔间距  $\Lambda$  固

定的前提下, 增大最内层空气孔孔径  $d_1$ , 可以产生非线性系数更高的光子晶体光纤。而在最内层空气孔孔径  $d_1$  保持不变的前提下, 通过降低  $d/\Lambda$  值, 可以获得色散性能更为平坦的光子晶体光纤。相同参量的正六边形排列的光子晶体光纤相较于正方形排列的光子晶体光纤, 有更高的非线性。因此, 可以通过灵活调整外层空气孔孔径  $d$ , 最内层空气孔孔径  $d_1$  和孔间距  $\Lambda$ , 以及包层结构, 来设计不同波段范围的高非线性和色散平坦光子晶体光纤。

作者设计了在  $0.85\mu\text{m}$  附近具有平坦色散和高非线性的光子晶体光纤。图 4 和图 5 为通过全矢量有限元法模拟给出了包层空气孔孔径  $d=0.65\mu\text{m}$ 、最内层空气孔孔径  $d_1=1.05\mu\text{m}$ 、包层孔间距  $\Lambda=1.3\mu\text{m}$ , 正六边形排列的光子晶体光纤的非线性系数  $\gamma$  和色散系数  $D$  随波长  $\lambda$  的变化关系。

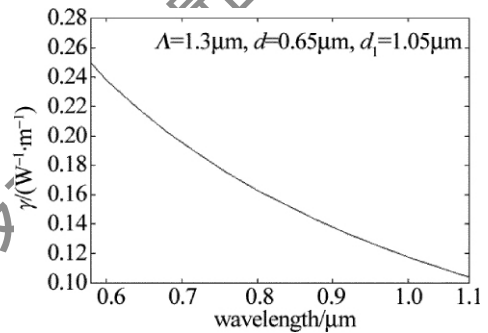


Fig. 4 Nonlinear coefficient as a function of wavelength for type 1

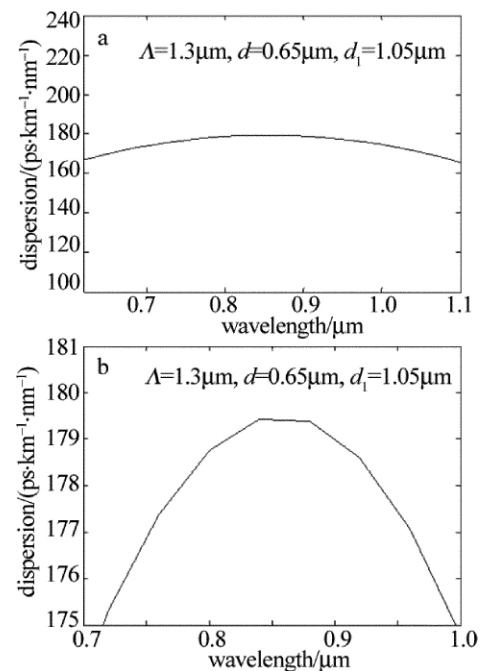


Fig. 5 Dispersion coefficient as a function of wavelength for type 1  
a—wavelength varying from  $0.6\mu\text{m}$  to  $1.1\mu\text{m}$  b—wavelength varying from  $0.75\mu\text{m}$  to  $0.95\mu\text{m}$

由图 4 和图 5 可以看出, 光子晶体光纤在指定的  $0.85\mu\text{m}$  处非线性系数达到  $172\text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ , 在

0.75 $\mu\text{m}$ ~0.95 $\mu\text{m}$  波长范围内色散平坦,色散变化范围小于 $\pm 5\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 。此结构的光子晶体光纤在0.85 $\mu\text{m}$ 附近获得了更高的非线性系数和超平坦的色散,并且几何结构更为简单。这为研究高非线性色散平坦光子晶体光纤提供了一定的依据。

#### 4 结 论

高非线性和平坦色散晶体光纤在光学参量放大、超连续谱产生和非线性器件方面具有重要的应用价值,吸引了不少学者从事高非线性和平坦色散晶体光纤的探索研究,取得了不少研究成果。

作者在前人工作的基础上,利用全矢量有限元法研究了内层空气孔的大小以及空气孔的占空比变化对光子晶体光纤的非线性系数和色散的影响,得到了非线性系数、色散系数与频率和结构参量的关系,通过对比三角晶格结构光子晶体光纤和四角晶格结构光子晶体可知,三角晶格结构光子晶体光纤更适合于获得高非线性和色散平坦的光子晶体光纤。在此基础上通过改变光子晶体光纤的空气孔间距 $\Lambda$ 和外层空气孔的孔径 $d$ 以及最内层空气孔的孔径 $d_1$ ,设计了在不同波长范围具有色散平坦性能的高非线性光子晶体光纤。通过增大最内层空气孔的孔径,能有效地增大光纤的高非线性性能,结合增大空气孔孔径,设计出非线性系数达 $172\text{km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ ,在0.65 $\mu\text{m}$ ~1.0 $\mu\text{m}$ 范围内具有超平坦色散的光子晶体光纤,这种光子晶体光纤能够在400nm~1160nm波长范围保持单模的传输。上述结果对于研制该波段具有高非线性平坦色散的光子晶体光纤具有指导意义。

#### 参 考 文 献

- [1] RUSSELL P St J. Photonic crystal fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4729-4749.
- [2] WANG Zh, LI X B, WANG J J. Properties of uniform fiber Bragg grating in high birefringent photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1325-1328 (in Chinese).
- [3] LI D, LIU M, JIAN D, *et al.* Characteristics of high birefringent dual-core photonic crystal fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0405005 (in Chinese).
- [4] LIU Zh L, LIU X D, NI Z H *et al.* Research on high nonlinearity and flattened dispersion of photonic crystal fibers [J]. Laser and Infrared, 2006, 36(1): 47-50 (in Chinese).
- [5] SU H X, WANG K, CUI J H, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2008, 2(2): 6-8 (in Chinese).
- [6] SAITOH K, FUJISAWA T, KIRIHARA T, *et al.* Approximate empirical relations for nonlinear photonic crystal fiber [J]. Optics Express, 2006, 14(14): 6572-6582.
- [7] PETROPOULOS P, HEIDEPRIEM H E, FINAZZI V, *et al.* Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers [J]. Optics Express, 2003, 11(26): 3568-3573.
- [8] LIU J, YANG Ch X, GU G, *et al.* A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(10): 1569-1574 (in Chinese).
- [9] WANG Q Y, HU M L, CHAI L. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(1): 57-66 (in Chinese).
- [10] JIANG L H, HOU L T. Effect of structure parameters changes on the properties of photonic crystal fiber with two zero-dispersion wavelengths [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 1095-1100 (in Chinese).
- [11] YUSOFF Z, LEE J H, BELARDI W, *et al.* Raman effects in a highly nonlinear holey fiber: amplification and modulation [J]. Optics Letter, 2002, 27(6): 424-426.
- [12] RENVERSEZ G, KUHLMEY B. Dispersion with microstructured optical fibers: ultra-flattened chromatic dispersion with low losses [J]. Optics Letter, 2003, 28(12): 989-991.
- [13] HE F L, LIU M, DONG C P, *et al.* Research of dispersion characteristics of square-lattice all solid photonic bandgap fibers [J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 90-92 (in Chinese).
- [14] ZHANG Y, LI X Z, ZHENG Y. Analysis of dispersion characteristics of photonic crystal fiber [J]. Laser Technology, 2009, 33(1): 24-26 (in Chinese).