

高非线性光子晶体光纤色散特性的研究

吴 铭^{1, 2} 刘海荣² 黄德修¹

(¹武汉国家光电实验室, 湖北 武汉 430074
²华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用矢量光束传输法对不同结构参量的高非线性光子晶体光纤的非线性特性和色散特性进行了数值分析, 计算得出高非线性光子晶体光纤的物理参量基模有效面积 A_{eff} 、非线性系数 γ 和色散系数 D 。分析了 A_{eff} 、 γ 和 D 与高非线性光子晶体光纤结构参量空气孔间距 Λ 、空气孔直径 d 之间的关系。分析结果表明, 通过调节光子晶体光纤的结构参量可以灵活地调整高非线性光子晶体光纤的非线性特性和色散特性。

关键词 光电子学; 光子晶体光纤; 矢量光束传输法; 高非线性; 色散

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

Dispersion Property in Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber

Wu Ming^{1,2} Liu Hairong² Huang Dexiu¹

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China
² School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The dispersion and nonlinear property of highly nonlinear photonic crystal fiber (HNLPCF) are simulated with the vectorial beam propagation method. The effective area of fundamental mode A_{eff} , nonlinear coefficient γ and dispersive coefficient D are evaluated. The relationship between A_{eff} , γ and D with the pitch Λ and hole diameter d , is analyzed. The dispersion and nonlinear property of highly nonlinear photonic crystal fiber can be controlled by the structural parameters, Λ and d .

Key words optoelectronics; photonic crystal fiber; vectorial beam propagation method; high nonlinearity; chromatic dispersion

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)^[1]又称为多孔光纤,或微结构光纤,其包层是由波长量级的空气孔在二维方向上周期性排列形成的。光子晶体光纤这种结构的包层从根本上改变了传统光纤的很多传输特性,主要包括在极宽谱内的单模传输,高的非线性效应^[2~5],灵活的色散特性和极强的双折射效应等。

光子晶体光纤较普通光纤最大的优势就在于其结构设计的灵活性,可以很方便地改变其结构和结构参量空气孔间距 Λ 、空气孔直径 d 来改变光子晶

体光纤的各种特性。当光子晶体光纤空气孔间距小于 $3 \mu\text{m}$, 占空比较大时,光场能被高度局域集中,具有很高的非线性系数,可以达到普通光纤的几十倍,从而可以极大地提高非线性效应的效率,因此光子晶体光纤是理想的非线性介质,在非线性应用方面具有广泛的前景。采用这种高非线性光子晶体光纤(HNLPCF)制作各种高非线性效应的光纤器件会大大提高器件的各种性能。

本文采用矢量光束传输法(VBPM)^[6]对高非线性光子晶体光纤进行了数值分析,分析研究了高非

收稿日期: 2007-05-11; 收到修改稿日期: 2007-10-11

作者简介: 吴 铭(1980—),男,湖北武穴人,博士研究生,主要从事光纤通信、光纤通信器件、光子晶体光纤等方面的研究。E-mail: vachelwu@126.com

导师简介: 黄德修(1937—),男,湖南宁乡人,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与传感等方面的研究与教学。E-mail: wnlo2@mail.hust.edu.cn

线性光子晶体光纤的非线性特性和色散特性, 得出了基模有效面积 A_{eff} 、非线性系数 γ 和色散系数 D 与结构参量 Λ 和 d 之间的关系。详细分析了结构参量的变化对色散的调节作用。

2 理论模型

大的空气孔占空比对获得高的非线性是有利的, 但是对于大空气孔占空比的光子晶体光纤, 弱近似条件不再满足, 标量法已不适用, 必须采用矢量法才能得出较为精确的数值解。采用矢量光束传输法数值分析的高非线性光子晶体光纤的截面示意图如图 1 所示, 由纯石英和空气孔组成, 这种结构的制作工艺难度相对较小。

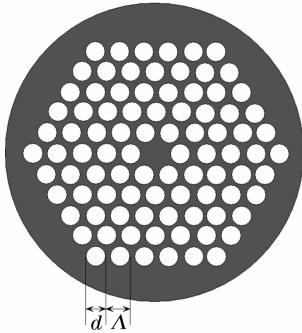


图 1 高非线性光子晶体光纤截面示意图

Fig. 1 Transverse cross section of highly nonlinear photonic crystal fiber

在分析高非线性光子晶体光纤中各种非线性效应的产生机理时难以避免地要用到非线性系数 γ 这个重要的物理量:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中 $n_2 = 2.76 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}^{[7]}$, 是石英的非线性折射率, A_{eff} 为光纤基模的有效面积^[8, 9], ω_0 为角频率, c 为真空中光速, λ 为波长。基模的有效面积 A_{eff} 可以作为非线性特性的一个指标, 小的 A_{eff} 将提高非线性效应:

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

式中 E_t 为横电场矢量, S 为光子晶体光纤的横截面。

A_{eff} 依赖于两个因素, 纤芯与包层之间的折射率差和纤芯尺寸。由于光子晶体光纤纤芯与空气孔包层之间的高折射率差, 从而对其中的光波有很强的模场限制, 有很高的非线性特性, 另外, 可以通过小的纤芯直径来减小 A_{eff} 从而提高非线性。

光子晶体光纤的色散 D 为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2}, \quad (3)$$

式中 n_{eff} 为有效折射率。

光子晶体光纤的材料色散可以由 Sellmeier 方程计算:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^m \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}, \quad (4)$$

对于块体熔石英, 当 $m=3$ 时, 参量 A_i, λ_i 分别为: $A_1=0.6961663, A_2=0.4079426, A_3=0.8974794,$ $\lambda_1=0.0684043 \mu\text{m}, \lambda_2=0.1162414 \mu\text{m}, \lambda_3=9.896161 \mu\text{m}.$

3 数值结果与分析

对 Λ 小于 $3 \mu\text{m}, d/\Lambda=0.6, 0.7, 0.8, 0.9,$ 高非线性光子晶体光纤进行的数值计算, 在 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 处的基模有效面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 与结构参量空气孔间距 Λ 和空气孔直径 d 之间的关系分别如图 2、图 3 所示。

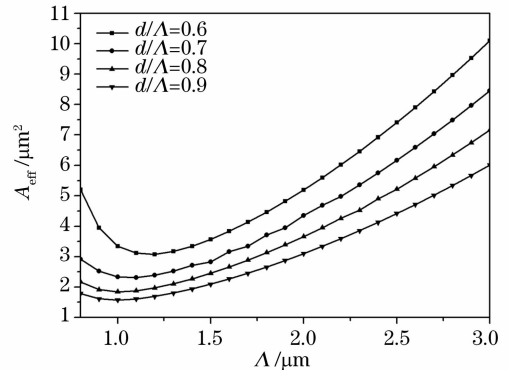


图 2 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 处高非线性光子晶体光纤 A_{eff} 与 Λ 的变化关系

Fig. 2 A_{eff} as a function of Λ at $\lambda=1550 \text{ nm}$

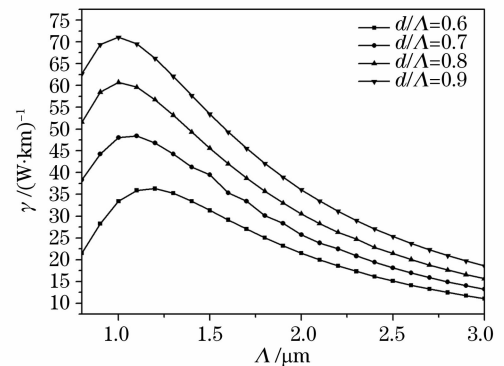


图 3 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 处高非线性光子晶体光纤 γ 与 Λ 之间的关系

Fig. 3 γ as a function of Λ at $\lambda=1550 \text{ nm}$

在 $\Lambda=1.2 \mu\text{m}, d/\Lambda=0.6$ 时,

$$\gamma_{\max}=36.32 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1};$$

在 $\Lambda=1.1 \mu\text{m}, d/\Lambda=0.7$ 时,

$$\gamma_{\max}=48.41 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1};$$

在 $\Lambda=1.0 \mu\text{m}, d/\Lambda=0.8$ 时,

$$\gamma_{\max}=60.70 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1};$$

在 $\Lambda=1.0 \mu\text{m}, d/\Lambda=0.9$ 时,

$$\gamma_{\max}=70.03 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}.$$

由图 3 可以看到,每组 d/Λ 在 $\Lambda=1.0 \mu\text{m}$ 附近均有一个最大值。 d/Λ 的增大, γ_{\max} 值对应的 Λ 值减小。这说明随着 Λ 值的减小,高非线性光子晶体光纤的模场限制能力是增大的,但是当 Λ 值减小到 $1.0 \mu\text{m}$ 左右,与波长相当,模场限制能力自然会下降,从而造成非线性系数的减小。这说明对于确定的结构参量,非线性在 $1.0 \mu\text{m}$ 左右有一个最大值,针对不同的需要,可以选择不同的结构参量。而普通单模光纤的非线性系数为 $1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 左右,色散位移光纤为 $10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 左右,这就预示着高非线性光子晶体光纤有很强的非线性效应,是比较

理想的非线性材料。

结构参量 $d/\Lambda=0.6, 0.9; \Lambda=1.0 \mu\text{m}, 1.5 \mu\text{m}, 2.0 \mu\text{m}$ 的色散曲线如图 4 所示。由图 4 可以看到, d/Λ 一定, Λ 值增大,第一零色散点向长波长移动,色散曲线的弯曲程度降低,这就说明随着高非线性光子晶体光纤的模场限制能力的增强,使得色散大幅减小,可以起到色散补偿的作用。在 Λ 减小到 $1.5 \mu\text{m}$ 以下,出现第二零色散点,随着 Λ 值减小,第二零色散点向短波长处移动。这样,调节 Λ 值可以使第二零色散点到 1550 nm 附近,满足超连续谱应用等应用的需要。

结构参量 $\Lambda=1.0 \mu\text{m}, 2.0 \mu\text{m}; d/\Lambda=0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 的色散曲线如图 5 所示。由图 5 可以看到 Λ 值一定, d/Λ 的增大可以是 D 值减小,第一零色散点向长波长处移动;出现第二零色散点后,第二零色散点向短波长处移动。因此可以设计不同的结构参量可以灵活地改变高非线性光子晶体光纤的色散特性来满足不同应用的需要。

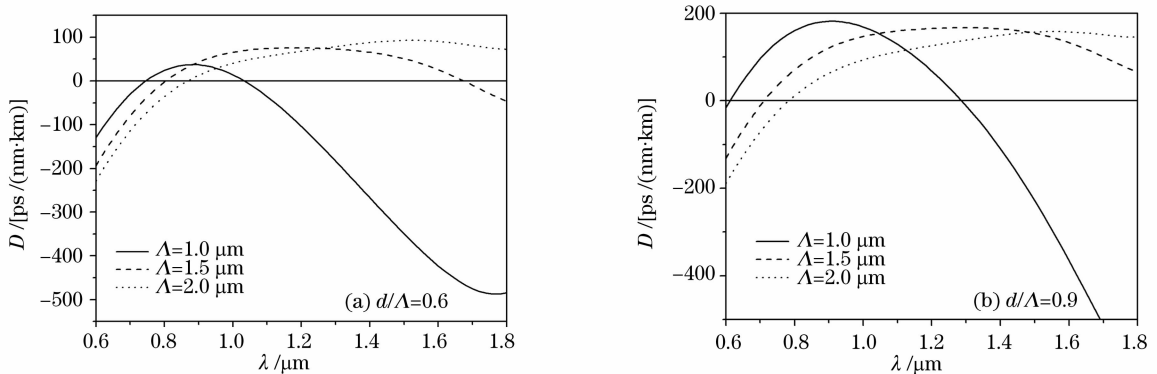


图 4 色散随波长的变化关系

Fig. 4 Variation of dispersion with wavelength

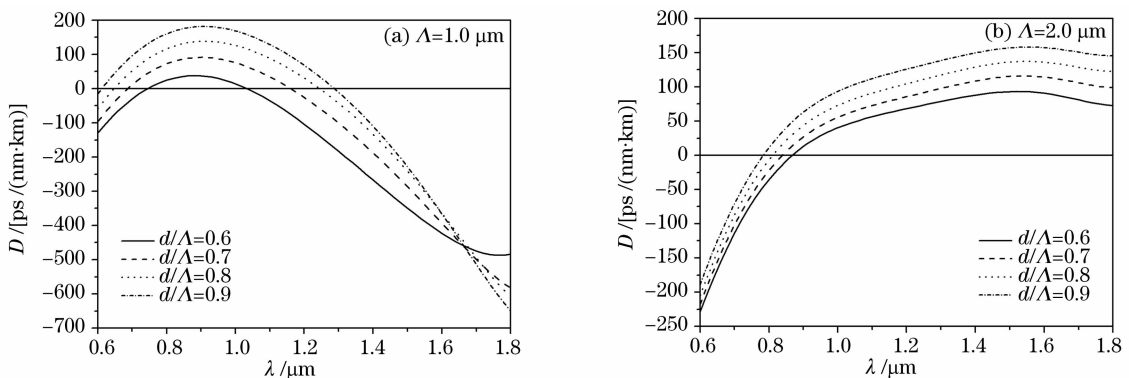


图 5 色散随波长的变化关系

Fig. 5 Variation of dispersion with wavelength

4 结 论

本文采用矢量光束传输法对高非线性光子晶体光纤进行了数值分析,通过调节结构参量可以设计出不同色散特性的高非线性光子晶体光纤,为基于高非线性光子晶体光纤的光纤器件的选材和应用提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 P. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299** (5605): 358~362
- 2 P. Petropoulos, H. E. Heidepriem, V. Finazzi *et al.*. Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(26): 3568~3573
- 3 Liu Jie, Yang Changxi, C. Gu *et al.*. A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1569~1574
刘 洁,杨昌喜,C. Gu 等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1569~1574
- 4 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月,胡明列,柴 路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 5 K. Saitoh, T. Fujisawa, T. Kirihaara *et al.*. Approximate empirical relations for nonlinear photonic crystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(14): 6572~6582
- 6 K. Saitoh, M. Koshiba. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme; application to photonic crystal fibers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(7): 927~933
- 7 T. Kato, Y. Suetsugu, M. Nishimura. Estimation of nonlinear refractive index in various silica-based glasses for optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(22): 2279~2281
- 8 N. A. Mortensen. Effective area of photonic crystal fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(7): 341~348
- 9 M. Koshiba, K. Saitoh. Structural dependence of effective area and mode field diameter for holey fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(15): 1746~1756