

带隙型光子晶体光纤慢光特性的优化设计

云茂金¹ 梁 健^{1,2} 任立勇² 孔伟金¹ 万 勇¹

(¹ 青岛大学物理科学学院山东省光子学材料与技术重点实验室, 山东 青岛 266071
² 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要 设计了一种适用于脉冲无畸变慢光传输的带隙型光子晶体光纤。用平面波展开法分析了该带隙型光子晶体光纤的能带结构、群折射率以及群速度色散等特性。分析结果表明,通过对光子晶体光纤的内包层空气孔进行微流体填充,可以有效改善光子晶体光纤的慢光特性,并且得到了群折射率为 6,带宽超过 100 nm 的超宽带光子晶体慢光光纤,实现了宽带的平坦慢光传输。该带隙型光子晶体光纤在光纤通信、信息处理、光纤传感及光与物质相互作用中有广泛的应用前景。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;平面波展开法;能带结构;群速度色散;慢光

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0406005

Design and Optimization of Slow Light Photonic Bandgap Fiber

Yun Maojin¹ Liang Jian^{1,2} Ren Liyong² Kong Weijin¹ Wan Yong¹

¹ Key Laboratory of Photonic Material and Technology of Shandong Province,
College of Physical Sciences, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

² National Key Laboratory of Transient Optics and Photonic Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision
Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract A novel type of photonic bandgap fiber (PBG-PCF) applied to pulse and slow light is proposed. The designed PBG-PCF is composed of a hollow core and seven cladding layers with air hole arranged by triangular lattice. Its band structure, group index and group velocity dispersion are analyzed in detail by using plane wave expansion method. The simulation results show that slow light property can be improved effectively by microfluid infiltration for the air holes of the inner cladding of PBG-PCF, and an ultra-wide-band photonic crystal slow light optical fiber with a group index of 6, a wide band more than 100 nm, which can transmit flat slow light, is realized. The designed PBG-PCF has promising and potential applications in communication networks, signal processing, optical sensors and nonlinear interactions.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; plane wave expansion method; band structure; group velocity dispersion; slow light

OCIS codes 060.2310; 060.5295; 060.2270

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)^[1~6]由纤芯周围沿轴向周期排列的微小空气孔构成,通过改变空气孔的尺寸和填充率可以灵活调节包层和纤芯的相对折射率,从而达到对光的约束,实现光的传导。带隙型光子晶体光纤(PBG-PCF)通过光子带隙结构使得特殊

波段的光波束缚在纤芯缺陷中传播。通过调整 PBG-PCF 的结构参数可有效改变群折射率和群速度,使群折射率具有平坦的趋势,可以大幅度减小群速度,进而实现慢光传输^[7~12]。慢光效应可应用于光延迟器和光缓冲器等,并且还可以在某些非线性光学过程中用于相对增强光与物质的非线性相互作用

收稿日期: 2012-10-09; **收到修改稿日期**: 2012-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(10904080,11144007,11274188)、山东省博士基金(BS2011DX007)和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLST201012)资助课题。

作者简介: 云茂金(1974—),男,博士,教授,主要从事光子晶体、光子晶体光纤及特殊光场的产生及调控等方面的研究。

E-mail: mjyun@qdu.edu.cn

用的效果。

PBG-PCF 中光沿着缺陷纵向传输,光波矢量的纵向分量即传播常数 $\beta \neq 0$ 。如果设计的二维光子晶体在 $\beta=0$ 时存在完美带隙,即可保证当 $\beta \neq 0$ 时,带隙依然存在,这可以通过增大材料的折射率来实现^[13,14]。对于 PBG-PCF 来说,由于光子带隙的选模作用,真正的基模通常是不存在的。通常由可以传播的最低阶模式充当基模的角色。因此,在设计具有慢光特性的 PBG-PCF 时,应把慢光存在的模式调整至基模,这样可以保证大部分能量在慢光模式中传输,且不会和其他模式发生串扰,可以有效降低能量损耗。

本文利用平面波展开法对硫化物材料拉制的 PBG-PCF 模型进行了理论分析,采用微流体注入的方法改变 PBG-PCF 的带隙特性、群折射率以及群速度色散特性,实现了 PBG-PCF 中的低群速度色散的慢光传输。

2 PBG-PCF 模型的建立

提出的 PBG-PCF 结构如图 1 所示,该结构是三角形周期排列的 7 包层结构,包层中空气孔的周期为 a ,直径 $d = 0.9a$,中间大空气孔缺陷是直径为 $D_0 = 5.9a$ 的纤芯,包层材料采用折射率 n 为 2.8 的硫化物。PCF 包层结构或折射率的变化对色散特性有很大的影响^[15-18],但通过改变该模型包层的几何参数并没有得到理想的色散特性。因此,采用微流体注入的方法改变光子晶体光纤的色散特性,在图 1 中靠近纤芯的 1 圈空气孔中选取 6 个空气孔填充微流体。

3 PBG-PCF 慢光特性分析

考虑到 PBG-PCF 复杂的包层结构,采用简单、

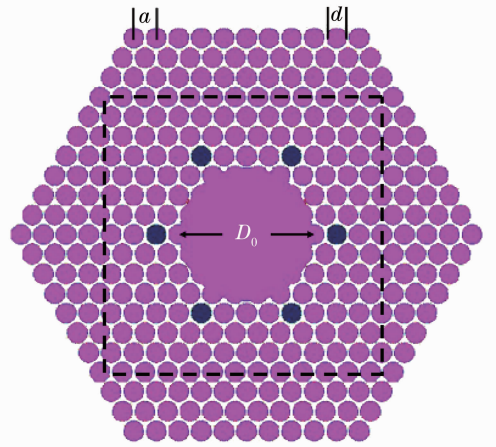


图 1 设计的 PBG-PCF 示意图

Fig. 1 Schematic of the designed PBG-PCF

可靠、高效的平面波解析法来模拟带隙型光子晶体光纤的带隙特性、缺陷模式及色散关系,选取图 1 中虚线矩形框内的结构为计算单元,设计的 PBG-PCF 模型的导模色散曲线如图 2 所示,横轴为归一化传播常数,纵轴为归一化频率。图 2(a)为没有填充微流体情况下的导模色散曲线图,微流体折射率用 n_i 表示,上下两条短点划线之间的区域就是带隙区域。随着归一化传播常数的增大,带隙区域包含的归一化频率逐渐增大,且区域范围逐渐减小。从图 2 中可以看出该模型纤芯中传播的模式数总共有 5 个,其中实线所代表的模式为最低阶模式,可视为该 PBG-PCF 的基模。通过理论模拟可以发现 5 个模式在不填充微流体的情况下,色散曲线都是类抛物线型。根据光子晶体的慢光特性,只有处于布里渊区边界位置的传输模式才可以满足零群速度传输条件,因此从图 2 中可以看出上面的 3 个高阶模满足零群速度传输条件,下面 2 个传输模式并不存在零群速度传输。

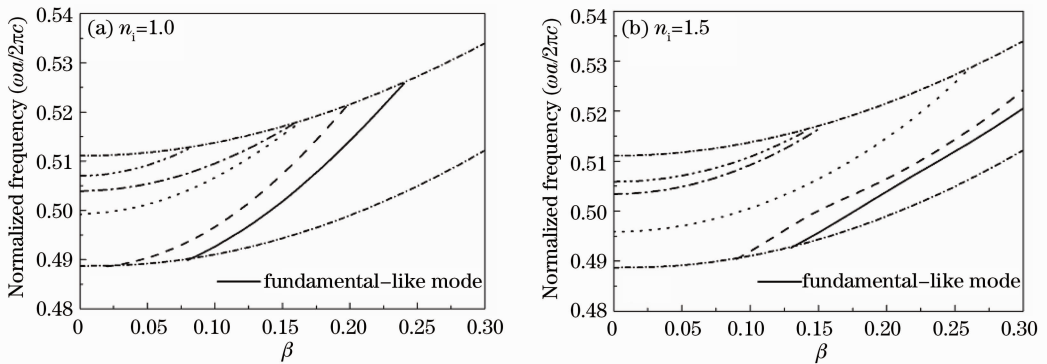


图 2 该光纤模型的带隙及导模色散曲线图。(a)未填充微流体;(b)填充折射率 1.5 的微流体

Fig. 2 Bandgaps and mode dispersion graphs of PBG-PCF (a) without microfluid infiltration ($n_i = 1.0$) and (b) with microfluid infiltration ($n_i = 1.5$)

填充折射率为 1.5 的微流体后,其对应的色散结果如图 2(b)所示,可以看出,禁带区域没有变化,这是因为光子晶体的禁带特征是光子晶体结构的固有属性,与里面的缺陷无关,缺陷的引入仅可以在原有的光子带隙中产生缺陷模。其中传输的 5 个模式中,高阶的 3 个模式的色散曲线依然呈类抛物线分布,只是模式对应的归一化频率发生移动,并没有本质的变化。两个低价模式的色散曲线在 $0.13 < \beta < 0.3$ 区域内呈线性分布,这使得满足这些传播常数的光在 PBG-PCF 中可以进行平坦的慢光传输。该光纤模型基模的截面电场分布情况如图 3 所示。选取图 2 中实线表示的模式进行模拟分析。

基模在填充不同折射率微流体情况下的色散曲线如图 4(a)所示,从图中可以看出随着填充微流体的折射率变大,基模的色散曲线逐渐由抛物线型向直线型变化,整条曲线向右移动。根据群速度 v_g 、传播常数 β 、频率 ω 之间的关系式:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta}, \quad (1)$$

以及图 4(a)中的色散关系,可以得到光在 PBG-PCF

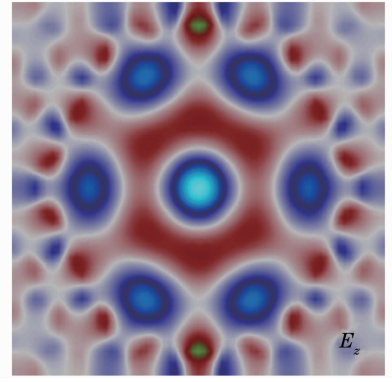


图 3 光纤截面的基模场分布

Fig. 3 Fundamental mode field distribution of light in the designed PBG-PCF

中对应的群折射率曲线如图 4(b)所示。可以看出,当不填充微流体(即 $n_i=1$)时,群折射率曲线是平滑的类抛物线型,不存在平坦群折射率的情况,随着填充微流体的折射率越来越大,群折射率曲线慢慢变直。当微流体的折射率 $n_i=1.5$ 时,群折射率曲线就出现一个如图 4(b)中标出的明显的平坦区域。平坦区域对应的群折射率大约为 6,在 1550 nm 附近,按照 10% 的平坦标准,带宽可达 100 nm。

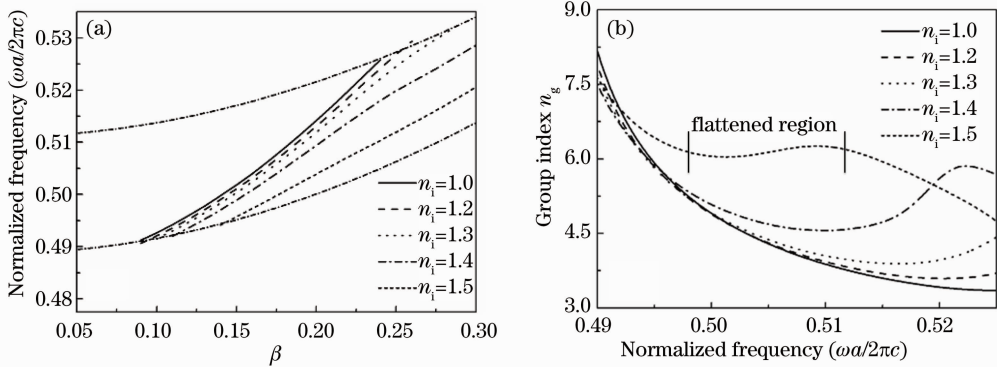


图 4 (a)填充折射率不同时基模的色散曲线图; (b)与(a)对应的群折射率曲线图

Fig. 4 (a) Dispersion curves of fundamental mode when microfluids with different indices of refraction are filled;

(b) group index graphs corresponding to Fig. 4(a)

群速度色散(GVD)的计算公式为

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d}{d\omega} \left[\frac{1}{d\omega/(d\beta)} \right] = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{1}{[d\omega/(d\beta)]^3} \frac{d^2\omega}{d\beta^2} = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{1}{v_g^3} \frac{d^2\omega}{d\beta^2}. \quad (2)$$

由(2)式可以看出,群速度色散与群速度的三次方成反比。当群速度趋于零时,群速度色散趋于无穷大,光脉冲在这样的光纤中传播一段距离后将会被展宽,导致两相邻脉冲出现重叠,不利于光信号的传输。当群速度变化较慢时,即对应群折射率比较平坦的区域,二阶色散较小,可以实现低群速度低色散传播,具有良好的慢光特性。对应于图 4(b)的群速

度色散曲线图如图 5 所示。实线表示没有填充微流体的情况,这时,该光纤模型的群速度色散是一条单调的平滑的曲线。当填充的微流体折射率逐渐升高时,群速度色散发生明显变化。当填充折射率 $n_i=1.5$ 时,可以得到在平坦群折射率的区域处的群速度色散也在 0 附近,从而实现优良的慢光特性。

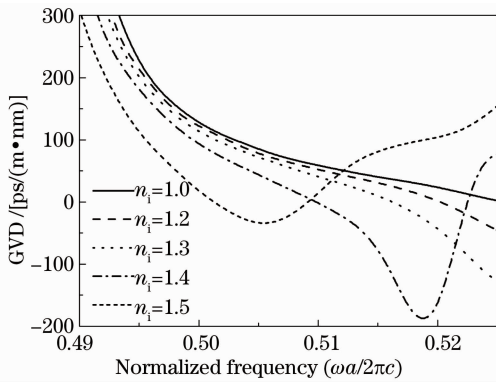


图5 不同折射率微流体填充时的群速度色散曲线图
Fig.5 Group velocity dispersions of PBG-PCF with different microfluid infiltrations

4 结 论

设计了一种新型的 PBG-PCF, 利用平面波解析法对其导模色散、群折射率以及群速度色散等特性进行了详尽的模拟与分析。结果表明通过对指定的部分空气孔填充折射率微流体, 可以实现优良的慢光特性。当微流体的折射率为 1.5 时, 可以得到群折射率为 6, 带宽超过 100 nm 的宽带慢光传输区域, 适用于高保真度的脉冲传输。与其他产生慢光效应的方法相比, PBG-PCF 慢光产生不需要复杂的光路和很长距离就可以获得大的时间延迟。因此, 所设计的具有慢光特性的 PBG-PCF 在光纤通信、光延迟线以及光纤传感等领域有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 J. C. Knight. Photonic crystal fibers [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 847~851
- 3 R. Amezcua-Correa, F. Gerome, S. G. Leon-Saval *et al.*. Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 1142~1149
- 4 Y. Y. Wang, N. V. Wheeler, F. Couny *et al.*. Low loss broadband transmission in hypocycloid-core Kagome hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 669~671

- 5 Li Wei, Chen Hui, Chen Ming. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205002
黎 薇, 陈 辉, 陈 明. 高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0205002
- 6 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonics crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010
王 丹, 郑 义. 双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806010
- 7 D. Mori, T. Baba. Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(23): 9398~9408
- 8 Jesper Lægsgaard. Zero-velocity solitons in high-index photonic crystal fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(1): 37~44
- 9 Thomas P. White, Andrey A. Sukhorukov. Transition from slow and frozen to superluminal and backward light through loss or gain in dispersion-engineered waveguides [J]. *Phys. Rev. A*, 2012, **85**(4): 043819
- 10 M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya *et al.*. Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(25): 253902
- 11 Zhao Junfa, Yang Xiufeng, Li Yuan *et al.*. Stimulated Brillouin scattering slow light in photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2437~2440
赵军发, 杨秀峰, 李 元等. 光子晶体光纤中受激布里渊散射慢光研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2437~2440
- 12 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao *et al.*. Investigation on wideband slow light based on photonic-crystal coupled waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0213001
张 伟, 王智勇, 王文超等. 基于光子晶体耦合波导的宽带慢光研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0213001
- 13 Ardavan F. Oskooi, J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson. Zero-group-velocity modes in chalcogenide holey photonic-crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 10082~10090
- 14 J. Grgić, S. H. Xiao, J. Mørk *et al.*. Slow-light enhanced absorption in a hollow-core fiber [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(13): 14270~14279
- 15 L. P. Shen, W. P. Huang, G. X. Chen *et al.*. Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(4): 540~542
- 16 F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri *et al.*. Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1065~1067
- 17 Wang Yanmei, Xue Wenrui, Zhang Wenmei. Dispersion properties of modified octagon photonic quasicrystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1644~1648
王艳梅, 薛文瑞, 张文梅. 改进的八重准光子晶体光纤的色散特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1644~1648
- 18 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on the extreme characteristics of dispersion of photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0806001
关寿华, 于清旭, 郑建洲. 光子晶体光纤色散极值特性的研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0806001

栏目编辑: 王晓瑛