

文章编号: 1001-3806(2012)01-0090-03

正方形栅格全固态光子晶体光纤色散的研究

贺冯良 刘敏* 董传培 张敏 马玲芳
(重庆大学 通信工程学院 重庆 400044)

摘要: 为了研究正方形栅格全固态光子晶体光纤色散特性,基于全矢量有限元法,对其色散特性进行了数值模拟。通过改变正方形栅格全固态光子晶体光纤的结构参量,分析比较了它们的色散特点,并通过改进结构得出一种零散波长在 $1.55\mu\text{m}$ 的四方栅格全固态光子带隙光纤。结果表明,四方栅格全固态光子带隙光纤色散具有3个零色散点,其零色散波长随高折射率棒直径 d 的增大而向长波方向移动,其色散平坦程度随棒间距 Λ 的减少而变得更加平坦。这为全固态光子晶体光纤的设计和制作提供了理论依据。

关键词: 光纤光学;全固态光子晶体光纤;正方形栅格;全矢量有限元法;色散特性

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.023

Research of dispersion characteristics of square-lattice all solid photonic bandgap fibers

HE Feng-liang, LIU Min, DONG Chuan-pei, ZHANG Min, MA Ling-fang
(College of Communications Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the dispersion characteristics of square-lattice all solid photonic bandgap fibers, the dispersion characteristics were simulated by means of full-vector finite element method. After changing the structure parameters of a square-lattice all solid photonic bandgap fiber, its dispersion characteristics were analyzed. Finally, an all solid photonic bandgap fiber with zero dispersion wavelength at $1.55\mu\text{m}$ was proposed. The analytical results demonstrate that an all solid square-lattice photonic bandgap fiber has three zero wavelengths, the dispersion characteristic curves shift to the longer wavelength as the hole diameter d becomes larger and the dispersion slope becomes more flattened with the decrease of the hole pitch Λ . It provides a theoretical evidence to design and fabricate all solid photonic bandgap fibers.

Key words: fiber optics; all solid photonic bandgap fibers; square-lattice; full-vector finite element method; dispersion characteristics

引言

光子晶体光纤^[1] (photonic crystal fiber, PCF) 是一种包层结构呈周期性排列光纤,由于其结构参量设计的灵活性和特殊性的工作机理,使它具有传统光纤无法比拟的新颖特性。根据导光机理不同,PCF可分为全内反射型光子晶体光纤 (total internal reflection photonic crystal fiber, TIR-PCF) 和光子带隙型光子晶体光纤 (photonic bandgap photonic crystal fiber, PBG-PCF)^[2]。按照其纤芯分类,PCF可以分为实芯结构和空芯结构,空芯结构一般是通过光子带隙^[3]来导光的。而对实芯结构,如果包层背景材料大于包层高折射率棒,则为全内反射型 PCF^[4]。如果包层背

景材料小于包层高折射率棒,则是通过带隙型原理来导光的。全固态带隙结构^[5]光子晶体光纤就是一种通过带隙原理来导光的实芯 PCF。它与空芯光子带隙光纤一样,都是基于光子带隙效应将光束局域在低折射率材料构成的纤芯中,只是构成空芯光子带隙光纤的两种材料分别是空气和硅,而全固态带隙结构光子晶体光纤的低折射率材料为硅,高折射率周期结构由掺杂的硅材料棒构成。通常研究的光子带隙光纤是空芯光子带隙光纤^[6],这种光纤存在严重的表面散射,导致它的最低损耗为 1.2dB/km ,很难再达到传统光纤 0.14dB/km 至 0.15dB/km 的损耗量级。另外,空芯光纤难于拉制,还要承受表面模^[7];这就减少了它们的透射波段。全固态光子带隙光纤^[8-9]由于不含空气孔,具有容易拉制、纤芯可以掺杂、避免表面模存在、易于与单模光纤熔接等特点,适合用于高功率激光器、放大器以及光纤光栅等领域中,引起了业界的广泛的关注。

作者简介: 贺冯良(1985-)男,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤领域的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liumin@cqu.edu.cn

收稿日期: 2011-04-06; 收到修改稿日期: 2011-04-19

由于当前光纤拉制技术的局限性,目前对全固态带隙结构光纤的研究主要是针对三角形栅格,业界对正方形栅格^[10]的研究却是寥寥无几。另外,正方形栅格还可以实现较三角栅格更大的模场面积,更利于高功率光纤激光器运转。本文中基于全矢量有限元的方法对正方形栅格的全固态带隙结构光纤的色散特性进行研究分析。

1 理论建模

图 1 为正方形栅格全固态带隙型光子晶体光纤的横截面图。从结构上看,该结构就是在低折射率基底中按照一定规则周期排列着掺锗的高折射率柱,形成光子带隙包层,中心通过缺失高折射率柱形成缺陷纤芯,结构中包层背景材料的折射率为 n_1 ,高折射率棒区域的折射率为 n_h ,高折射率棒直径为 d ,棒之间的空间距离为 Λ 。

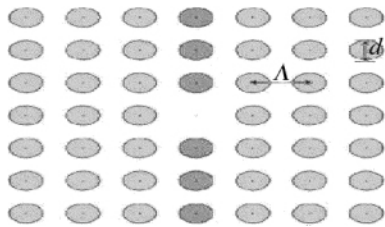


Fig. 1 Cross section of a square-lattice all solid photonic bandgap fiber

2 理论基础

数值模拟基于全矢量有限元方法,其基本原理是将大的求解区域离散为若干小区域,将每个区域的场函数用含有待定系数的插值函数表示,这样就将无限个自由度的原边值问题转化成了有限个自由度的边值问题,然后利用变分原理将微分方程化为含有待定系数的代数方程,最后结合边界条件进行求解。通常,离散后的单元越小,所选的插值多项式阶数越高,计算精度也越高,但也会导致计算更加复杂,使得计算量显著增大,在实际问题的计算中,应该根据所需的计算精度和计算机的运算能力进行权衡。作者就是采用 COMSOL Multiphysics 软件进行仿真实验。COMSOL Multiphysics 起源于 MATLAB 的工具箱,其核心算法是有限元法。

色散^[11]是指不同频率的电磁波以不同的相速率和群速率在介质中传播的物理现象,它表明折射率 $n(\omega)$ 对频率的依赖关系,它是光纤的重要参量之一,会直接导致光脉冲的展宽,限制通信速率的进一步提高。同时色散对光纤中的诸多效应都起着重要的作用,如孤子传输、超短脉冲的产生、超连续光谱的产生和谐波的获得等等。全固态光子晶体光纤的色散值

D_g 可以通过下述波长与有效折射率 n_{eff} 的关系获得:

$$D_g = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (1)$$

式中 c 为真空中的光速, n_{eff} 为光传导模式的有效折射率(这里仅讨论材料波导色散,材料色散相对波导色散可以忽略不计)。

3 计算和讨论

在计算过程中,由于该 PCF 的高度对称性,利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 计算时采用 1/4 结构(见图 2),可以获得同样的仿真数据,这样不但可以降低计算的复杂度,而且可以提高计算效率,这里取 $n_1 = 1.475$, $n_h = 1.47288$ 。

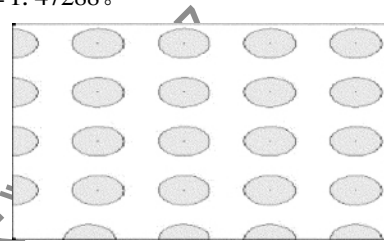


Fig. 2 A quarter simulation model

3.1 高折射率棒间距 Λ 不变、棒直径 d 变化时色散特性

图 3 为 Λ 不变、棒直径 d 变化时基模式的有效折射率(由函数拟合得来),其中 $\Lambda = 5\mu\text{m}$, d 分别等于 $2\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ (对应的相对孔径 d/Λ 分别为 0.4, 0.6, 0.8)。有效折射率反映光的传导特性,由图 3 可知,随着孔径 d 的增大,有效折射率呈增大趋势。

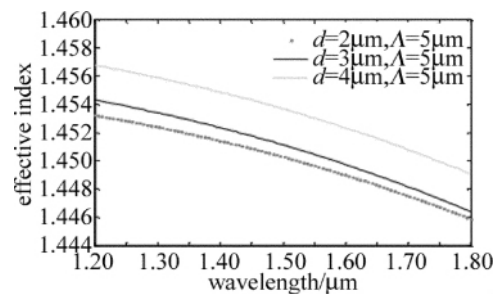
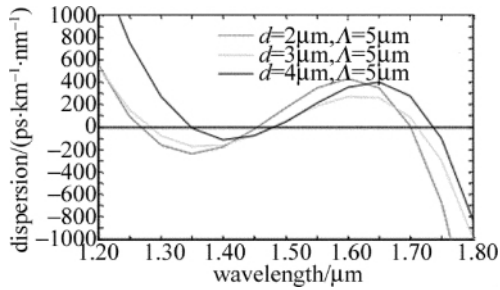


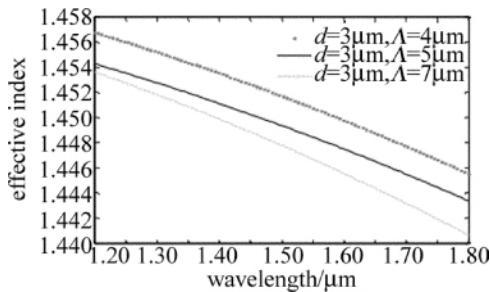
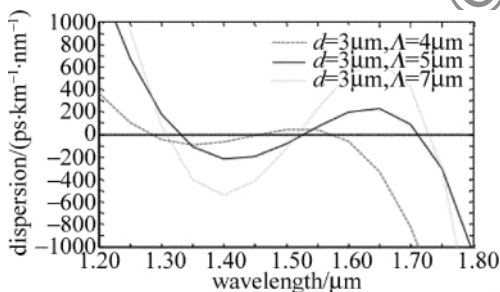
Fig. 3 Effective mode index for fundamental mode as Λ is a constant

由(1)式可知,知道有效折射率,然后对折射率求二阶导数就可以推导出其色散关系。图 4 为 Λ 不变,棒直径 d 变化时基模式的群速率色散特性曲线。由该色散图可知,正方形栅格全固态带隙型光子晶体光纤的色散曲线有 3 个零色散点,而一般的空芯带隙型 PCF 只有一个零色散点,3 个零色散点的出现就极大的扩大了该 PCF 的使用。由曲线的变化趋势可知,该全固态 PCF 在 Λ 不变的前提下,随着孔径 d 的增加,特性曲线呈现向长波方向移动,这样通过改变孔径 d 就可以移动零色散点,进而满足零色散波长在某中特定场合的使用。

Fig. 4 Group velocity dispersion as Λ is a constant

3.2 棒直径 d 不变、高折射率棒间距 Λ 变化时色散特性

图5为 d 不变、高折射率棒间距 Λ 变化时基模的有效折射率变化曲线图。由该曲线变化趋势可知,随着棒间距 Λ 增大,有效折射率呈减少趋势。对应色散曲线特性如图6所示,由图可知,随着 Λ 减小,色散曲线更加趋于平坦, Λ 增大,色散曲线更加陡峭,这样通过通在带隙允许的范围内,通过调节 Λ 就可以调节色散曲线的斜率。

Fig. 5 Effective mode index for fundamental mode as d is a constantFig. 6 Group velocity dispersion as d is a constant

4 一种改进型的全固态带隙型光子晶体光纤的设计

通过上述对正方形栅格的全固光子晶体光纤的色散特性分析,根据它的特性可设计出一种在O波段(即起始波段)具有负色散特性,同时在 $1.55\mu\text{m}$ 具有零色散特性。该改进特性的光纤既能满足 $1.55\mu\text{m}$ 的低损耗传输窗口具有低色散特性,同时也可以满足在 $1.31\mu\text{m}$ 的传输窗口用来进行色散补偿^[12]。其结构见图7,其中 $d_1=3\mu\text{m}$, $d_2=4\mu\text{m}$, $\Lambda=5\mu\text{m}$,通过有限元法模拟可知,其有效折射率和色散曲线分别如图8、图9所示。

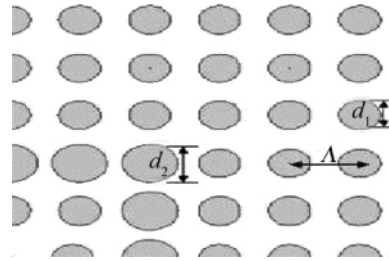


Fig. 7 A quarter simulation model for an improved square lattice all solid photonic bandgap fiber

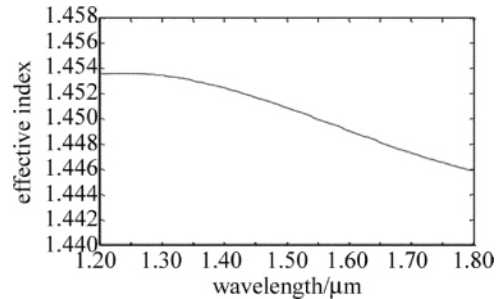


Fig. 8 Effective mode index for fundamental mode of improved structure

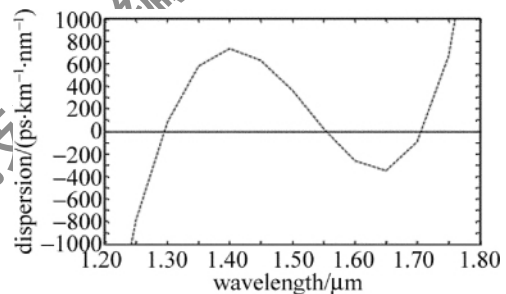


Fig. 9 Group velocity dispersion for the improved structure

5 结论

通过全矢量有限元方法,模拟仿真了正方形栅格全固态光子带隙光纤色散随结构的变化特性。通过数值模拟可知,正方形栅格全固态光子带隙光纤色散具有3个零色散点,其零色散波长随 d 的增大而向长波方向移动,其色散平坦程度随 Λ 的减少而变得更加平坦,最后通过改进结构得出一种零散波长在 $1.55\mu\text{m}$,且在 $1.31\mu\text{m}$ 窗口具有负色散补偿特性的正方形栅格全固态光子带隙光纤。

参考文献

- [1] RUSSELL P St J. Photonic crystal fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4729-4749.
- [2] KNIGHT J C, ROENG J B, BIRKS T A, et al. Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. Science, 1998, 282(5393): 1476-1478.
- [3] ZHANG H, WANG Q G, YANG B J. Research progress of photonic bandgap photonic crystal fibers [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(3): 301-311 (in Chinese).
- [4] WANG J Y, JIANG Ch, HU W Sh, et al. Properties of index-guided PCF with air-core [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(2): 317-321.

(下转第102页)

算放大器 OPA656, 微处理器 PIC16F873, 若干电容、电阻组成两级放大电路。当光电倍增管的输出信号先进入初级放大电路的反相输入端, 经初级放大后再进入次级放大电路, 次级放大电路的反向输入端和输出端分别接数字电位器的 M 端和 L 端。输出信号分两路, 一路接入下级电路, 一路接入电压比较器, 比较器的输出端接微处理器 PIC16F873 的 I/O, 通过 ADC 采样判断输出电压是否超出上下门限的范围, 数字电位器的片选信号端口 CS 和控制信号端口 U/D, INC 与微处理器 SPI 口连接, 完成 W 的位置变换, 实现增益调节^[9-12]。

微处理器通过编程主要实现功能: 采样两个比较器的输出, 判断是否进行增益调节; 选择相匹配的增益; 向数字电位器写入增益调节代码, 该过程循环直至符合要求。

改变输入信号的幅值观察响应曲线。图 7 为输入频率为 1.5 MHz, 幅值分别为 0.05 mV, 0.1 mV, 1 mV, 10 mV 的矩形波信号图。图 7 中, channel A 为输入信号, channel B 为输出信号。从仿真图形可看出幅值相差 200 倍的信号源, 响应信号幅值被可变增益放大器很好地控制在 0.09 V ~ 0.11 V 之间^[13-14]。

4 结束语

由可控增益放大器原理入手, 主要论述了两种实现可控增益放大器的方法, 并以具体例子仿真验证基于数字电位器实现的方法, 很好地实现了对信号动态范围的压缩。该方法能很好地适用于水下光通信系统, 既减小接收信号的动态范围, 又有效提高了 ADC 的精度。但是两种方法在不同的应用环境实现难度不一样, 实际应用时应综合考虑器件、环境等各种因素, 以达到最优效果。

(上接第 92 页)

[5] MOHAMMAD-NEJAD S, ALIRAMEZANI M, POURMAHYABADI M. A novel all-solid photonic bandgap fiber with ultra-low confinement loss[J]. Iran University of Science and Technology, 2009, 1(1): 268-269.

[6] ROBERTS P J, COUNY F, SABERT H, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2005, 13(1): 236-244.

[7] WEST J, SMITH C, BORRELLI N, et al. Surface modes in air-core photonic band-gap fibers[J]. Optics Express, 2004, 12(18): 1485-1496.

[8] LUAN F, GEORGE A K, HEDLEY T D, et al. All-solid photonic bandgap fiber[J]. Optics Letters, 2004, 29(20): 2369-2371.

参 考 文 献

- [1] CHANCEY M A. Short range underwater optical communication links [D]. Raleigh, North Carolina, USA: North Carolina State University, 2005: 2-24.
- [2] DENG R, RAO J H, ZHANG X H, et al. Convocational code design avoiding malignant codes in underwater optical communication systems [J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 222-225 (in Chinese).
- [3] HUANG X Sh, WANG R L, XU R Sh, et al. The transmitting and receiving system for underwater laser communication [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1998, 28(4): 651-656 (in Chinese).
- [4] WANG J D. Design of a digital automatic gain controller used for communication receivers [J]. Avionics Technology, 2010, 41(1): 37-40 (in Chinese).
- [5] LIU Ch X, FU Y T. Gain-programmed amplifier based on AD8402 digital potentiometer [J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(7): 1458-1461 (in Chinese).
- [6] LI D. Research and design of variable gain amplifier [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009: 15-37 (in Chinese).
- [7] XI Y H. Realization of programmable gain amplifier [J]. Information Technology, 2009, 33(9): 24-25 (in Chinese).
- [8] STOJANOVIC V, KUPFER T. On the design of AGC circuits in IM-DD NRZ optical transmission systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(20): 3426-3432.
- [9] CHENG Y B, LI Q, LIU Sh Q. A novel design for laser orientation detection system [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 538-540 (in Chinese).
- [10] FENG Y, ZHANG H. Variable-gain control base on digital potentiometer for laser receiving circuit [J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(4): 9-13 (in Chinese).
- [11] CHEN J Y, YI X S. Time in terval measurement of laser ranging based on CPLD & microchip [J]. Laser Technology, 2008, 33(4): 363-365 (in Chinese).
- [12] TAN Zh Q, LONG X W. Design of driving circuits of semiconductor lasers for measurement of continuous-wave cavity ring-down technology [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 27-30 (in Chinese).
- [13] CHEN B L, ZHANG H, JI T G. The laser proximity fuze based on the AGC [J]. Laser Journal, 2004, 25(1): 72-73 (in Chinese).
- [14] ZHANG X J, ZHANG H, CHEN B L. Methods of improving the precision of laser proximity fuze with laser pulse-phase detecting system [J]. Journal of Detection & Control, 2007, 29(2): 77-80 (in Chinese).
- [9] BÉROURNÉ A, PUREUR V, BOUWMANS G, et al. Solid photonic bandgap fiber assisted by an extra air-cladding structure for low-loss operation around 1.5 μm [J]. Optics Express, 2007, 15(2): 316-324.
- [10] SHI Q, KAI G Y, WANG Zh et al. Properties of all-solid square-lattice photonic bandgap fibres [J]. Chinese Physics Letter, 2007, 24(8): 2259-2262.
- [11] ZHAN Y, LI X Z, ZHENG Y. Analysis of dispersion characteristics of photonic crystal fibers [J]. Laser Technology, 2009, 33(1): 24-25 (in Chinese).
- [12] ZHAO Ch F, LU X, LUO Sh P. Numerical analysis of quasi-soliton propagation using dispersion compensation [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 15-16 (in Chinese).