

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0124-04

基于 FDTD 方法的光子晶体光纤色散特性分析

常建华¹ 李传起² 武旭华¹

(¹ 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044; ² 南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044)

摘要 基于电磁场时域有限差分法(FDTD)计算光子晶体光纤(PCF)的方法, 分析了运用该方法时需要注意的一些问题, 特别是关于晶格位置、晶格上各个电磁场分量的分布以及完全匹配层(PML)中在边界处的电磁场的处理。以此为理论依据分析了一种纯石英材料双层芯 PCF, 对这种光纤的传输特性进行了详细的数值模拟。通过调整光纤的结构参数, 设计出大负色散值的宽带色散补偿光子晶体光纤(DCPCF)。数值模拟结果显示在 1530~1565 nm 波长范围内其色散值在 -400 和 -600 ps/(km·nm)之间变化, 达到了具有相同有效模面积的普通色散补偿光纤(DCF)的 5 倍。在整个 C 波段可以有效补偿长度 25 倍以上的标准单模光纤(SMF), 其色散剩余量在 ±1.0 ps/nm·km 以内。该种结构的 PCF 对于制作高增益和宽带色散补偿于一体的集中式光纤放大器具有十分重要的意义。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 色散; 时域有限差分法

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0124

Analysis of Dispersion Characteristic in Photonic Crystal Fibers Based on FDTD Method

Chang Jianhua¹ Li Chuanqi² Wu Xuhua¹

¹ College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China
² College of Maths & Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract A method based on finite difference time domain (FDTD) is applied to calculate the photonic crystal fiber (PCF). Some problems by using FDTD have been pointed out, especially the distribution of mesh and set to the properties of PML. A dual-concentric-core photonic crystal fiber based on pure silica has been analyzed by the proposed method. The transmission characteristic of such PCF has been deeply numerically simulated. By adjusting the structural parameters, we designed broadband dispersion compensating PCFs (DCPCFs) with large negative dispersion values. Simulation results show that the dispersion values vary between -400 and -600 ps/(nm·km) over the C band (from 1530 to 1565 nm), which is 5 times larger than the conventional dispersion compensating fibers (DCF) with nearly equal effective mode area. It can effectively compensate for the dispersion of 25 times of its length of standard single-mode fiber (SMF) with residual dispersion below ±1.0 ps/(nm·km) over the entire C band. It is very useful of such PCFs to be applied in leap optical amplifiers with high gain and dispersion compensation functionalities in a single component.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; dispersion; finite difference time domain(FDTD)

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)以其独特的光学特性和灵活的设计成为近年来的热门研究课题。这类光纤是由在纤芯周围沿着轴向规则排列微小空气孔构成,

通过这些微小空气孔对光的约束, 实现光的传导。独特的波导结构, 灵活的制作方法, 使得 PCF 与常规光纤相比具有许多奇异的特性^[1~2], 这使得它在新一代光纤通信系统、新型光器件中具有广阔的应

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(08KJD510004, 07KJB510066)和南京信息工程大学科研基金(QD60)资助课题。

作者简介: 常建华(1976—), 男, 副教授, 主要从事光子学与光通信方面的研究。E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

用。人们先后提出了多种数值模拟方法^[3~5]用以对 PCF 特性进行分析,如:有效折射率法、平面波法、边界元方法、有限元方法(FEM)、有限差分法(FDTD)等。这些方法对于 PCF 的模拟分析各有其优缺点和适用范围。有效折射率法将 PCF 近似为阶跃型折射率分布的传统光纤,忽略了其中的复杂折射率分布,因此通过它可以简单地计算出光纤中的一些性质,但不能精确地表示例如双折射和色散等模式特性;平面波法将波动方程中的场和折射率用平面波分量分别进行展开,可以精确地模拟 PCF,但是效率并不高,而且由于平面波法对所处理对象的周期性要求较高,因而不能分析横向分布周期性不好的 PCF;有限元法通过在不同子空间离散麦克斯韦方程组,可以精确地获得不同结构 PCF 的横向场分布等,但在实际计算过程中,未知量太多,且这种方法不易掌握;时域有限差分方法是研究电磁波问题的一种常用方法,它可以精确地描述出 PCF 中的色散、模式和非线性等问题,且这种方法简单易实现。

FDTD 作为一种主要的电磁场时域计算方法,最早由 Yee K S 在 1966 年提出。该方法通过将麦克斯韦旋度方程转化为有限差分式而直接在时域求解,通过建立时间离散的递进序列,在相互交织的网格空间中交替计算电场和磁场。具有节省计算机存储空间和 CPU 时间以及适用于各种复杂边界条件等优点。作为一种高效的计算电磁场的数值方法,其被广泛应用于 PCF 的模拟计算中。利用 PCF 结构设计的灵活性,及其色散、模式等特性的

高度可调性,提出了一种单一石英材料的双层芯光子晶体光纤。运用 FDTD 法,对这种光纤的传输特性进行分析模拟,得出了该 PCF 的色散曲线。数值结果显示该种 PCF 在整个 C 波段具有平坦的高负色散特性。

2 时域有限差分法

由于光子晶体光纤具有复杂的结构形式,精确的电磁波理论分析方法变得非常困难,人们普遍采用数值分析方法对其进行研究。FDTD 方法是由微分形式的麦克斯韦旋度方程出发进行差分离散。电场和磁场在时间顺序上交替抽样,抽样时间间隔彼此相差半个时间步,使得麦克斯韦旋度方程离散以后构成显式差分方程,从而可以在时间上迭代求解。因而,由给定相应的初始值,FDTD 方法可以逐步推进地求得各个时刻空间的电磁场分布。设光纤的介电常数为 ϵ 、磁导率为 μ ,电导率为 σ 、磁阻率为 ρ ,在无源区域中麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

它表示三维空间电场和磁场之间的关系。对于光子晶体光纤而言,它在垂直于周期性平面的轴向具有不变的介电常数分布,因此沿着轴向的电磁场可表示为 $\psi(x, y, z) = \psi(x, y) \cdot e^{i\beta z}$,其中 ψ 表示电场或磁场分量。从而,可得在轴向传播常数为 β 时,在时间和空间上离散后的 FDTD 方程^[6]:

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i+1/2, j) &= CA(i, j)E_x^n(i+1/2, j) + CD \cdot CB(i+1/2, j) \cdot \\ &\quad [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2) - i\beta H_y^{n+1/2}(i+1/2, j)] \\ E_y^{n+1/2}(i, j+1/2) &= CA(i, j+1/2)E_y^n(i, j+1/2) + CD \cdot CB(i, j+1/2) \cdot \\ &\quad [i \cdot \beta \cdot H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2) + H_x^{n+1/2}(i-1/2, j+1/2)] \\ E_z^{n+1}(i, j) &= CA(i, j)E_z^n(i, j) + CD \cdot CB(i, j) \cdot \\ &\quad [H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j) - H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) + H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)] \\ H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) &= H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) + CD[i \cdot \beta \cdot E_y^n(i, j+1/2) - E_z^n(i, j+1) + E_z^n(i, j)] \\ H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) &= H_y^{n-1/2}(i+1/2, j) + CD[E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j) - i \cdot \beta \cdot E_x^n(i+1/2, j)] \\ H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2) &= H_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2) + CD \cdot \\ &\quad [E_x^n(i+1/2, j+1) - E_x^n(i+1/2, j) - E_y^n(i+1, j+1/2) + E_y^n(i, j+1/2)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 i, j, k 为网格空间中的点, n 为时间步长, Δt 为时间步长; Δs 为空间步长。

$$\begin{aligned} CA(i, j, k) &= \frac{1 - [\sigma(i, j, k)\Delta t/2\epsilon(i, j, k)]}{1 + [\sigma(i, j, k)\Delta t/2\epsilon(i, j, k)]} & CB(i, j, k) &= \frac{\epsilon_0}{\epsilon(i, j, k) + \sigma(i, j, k)\Delta t/2} \\ CD &= (\Delta t/\Delta s) \cdot (1/\sqrt{\epsilon_0\eta_0}) \end{aligned} \quad (4)$$

为了得到稳定解, 时间步长 Δt 必须满足 $\Delta t \leq 1/(v_{\max} \sqrt{1/\Delta x_{\min}^2 + 1/\Delta y_{\min}^2 + (\beta/2)^2})$, 其中 Δx , Δy 为网格宽度和长度, v_{\max} 为波的最大相速度, β 为传播常数。为了尽量降低数值色散带来的影响要求空间步长满足 $\Delta s \leq (1/10)\lambda_{\min}$, 这样可以使得误差控制在 0.3% 以内。在网格边界处采用完美匹配层(PML)边界条件, 它能够使得任意频率和任意方向电磁波无反射的吸收。激励源采用高斯脉冲 $E_i(t) = \exp[-(t - t_0)^2/T^2]$, T 的选取要使得脉冲的主要频谱分量覆盖所需要的频率。

3 结果与讨论

采用 FDTD 数值仿真的 PCF 截面图如图 1 所示。整个光纤是由基质材料纯石英和镶嵌的不同尺寸的空气孔组成, 孔间距为 Λ , 大孔的直径为 d_1 , 小孔的直径为 d_2 。中心缺失空气孔的石英区域为 PCF 的内芯, 第一层空气孔构成光纤的内包层, 第二层至第七层较小的空气孔构成 PCF 的环形外芯, 它外边的空气孔组成光纤的外包层。

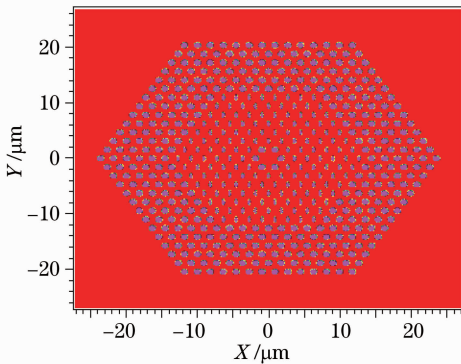


图 1 PCF 横截面图
Fig. 1 Cross section of PCF

由于 PCF 可以实现单模传输, 其色散 D 主要包括材料色散 D_m 和波导色散 D_w 。PCF 主要有二氧化硅和空气构成其材料色散可以根据 Sellmeier 方程近似求得, 而波导色散是求解总色散的关键。

PCF 总色散可以表示为 $D = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}$ 。图 2 为 $\Lambda = 1.81 \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda = 0.527$, $d_2/\Lambda = 0.39$ 时数值求得色散曲线。可以看出其色散值在 1530 ~ 1565 nm 范围内处于 -400 和 -600 ps/(nm · km) 之间。在整个 C 波段内保持了较高的负色散, 具有宽带较好的色散补偿能力。

目前光通信系统中, 由于大部分采用了掺铒光

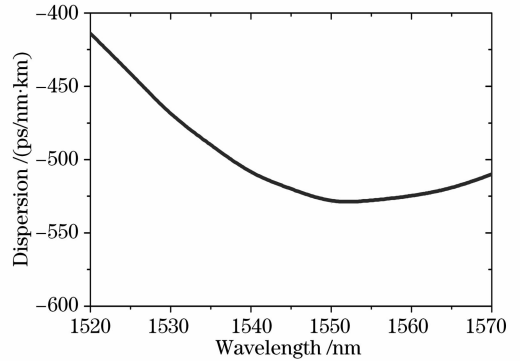


图 2 PCF 色散特性

Fig. 2 Dispersion characteristic of PCF

纤放大器实施中继放大, 光纤实际工作在 1.55 μm 附近的 C 波段, 设标准单模光纤的色散值为 $D = 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 色散斜率为 $0.056 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)$, 传输长度为 80 km。采用一段长度为 2.75 km, 结构参数为 $d_1 = 0.96 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.71 \mu\text{m}$, $\Lambda = 1.81 \mu\text{m}$ 的双层芯 PCF 作为色散补偿光纤进行色散补偿, 其补偿后的色散剩余量如图 3 所示。由图 3 可知采用该 DCPCF 在整个 C 波段约 35 nm 带宽内, 进行了良好的色散补偿, 其色散剩余量 $< \pm 1.0 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。

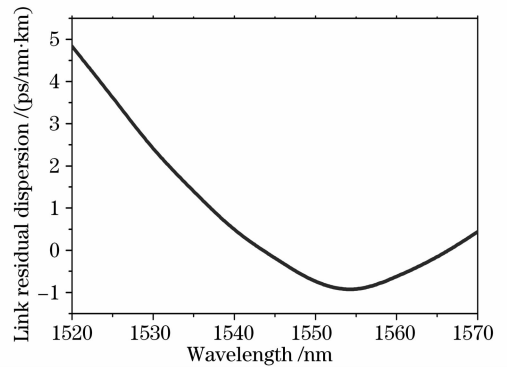


图 3 链路色散剩余量

Fig. 3 Link residual dispersion

4 结 论

采用 FDTD 分析了光子晶体光纤的色散特性。数值仿真结果表明通过调整 PCF 的结构参数可以有效调节其色散曲线。提出的双层芯结构的 PCF 实现了在 C 波段约 35 nm 带宽内平坦的高负色散, 有效补偿了长度 25 倍以上的标准单模光纤。相信合理运用 PCF 的高非线性和色散可调性可以设计出集色散和放大于一体的光放大器。这对于提高光通信系统的传输性能具有非常重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Zhao Chunliu, Li ZHaohui, Yang Xiufeng *et al.*. Effect of a nonlinear photonic crystal fiber of the noise characterization of a distributed Raman amplifier[C]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 561~563
- 2 Z. Yusoff, J. H. Lee, W. Belardi *et al.*. Raman effects in a highly nonlinear holey fiber; amplification and modulation [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6): 424~426
- 3 Zhu Zhaoming, G. B. Tomas. Full vectorial finite difference analysis of microstructured optical fibers [J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(17): 853~864
- 4 Lou Shuqin, Wang Zhi, Ren Guobin *et al.*. An efficient algorithm for modeling photonic crystal fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2005, **11**: 34~45
- 5 S. K. Varsheny, K. Saitoh, M. Koshiba. A novel design for dispersion compensating photonic crystal fiber Raman amplifier [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(10): 2062~2064
- 6 Chen Heming, Shi Weihua, Cao Xiangfeng *et al.*. Study on dispersion properties of PBG guiding photonic crystal fiber[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(3): 375~377
陈鹤鸣, 施伟华, 曹祥凤等. PBG 光子晶体光纤的色散特性研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(3): 375~377