

双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析

王 丹¹ 郑 义²

(¹ 晋中学院物理与电子工程学院, 山西 晋中 030600)
(² 北京交通大学激光研究所, 北京 100044)

摘要 光纤色散会使脉冲展宽, 从而导致误码, 在通信网中这是必须避免的一个问题。运用有限元法, 在考虑石英基质材料色散的前提下, 数值模拟了呈圆形排列的双包层光子晶体光纤的场分布、基模有效折射率和色散特性。结果表明, 小空气孔间距和直径不变时, 大空气孔与第一圈小孔的间距和大空气孔的直径对色散曲线的走向起决定性作用。如同某些色散补偿光纤一样, 有效模折射率会在某个波长处过渡, 从而实现平坦色散, 如当直径 $d_1 = 3.1 \mu\text{m}$, $d_2 = 1 \mu\text{m}$, 间距 $\Lambda_1 = 5 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$ 时, 在 $1.22 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 超宽波长范围内, 其色散值 $D_{\max} - D_{\min} < 4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。

关键词 光纤光学; 平坦色散; 有限元法; 光子晶体光纤

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0806010

Numerical Simulation and Analysis of Double Cladding Photonic Crystal Fiber with Flattened Dispersion

Wang Dan¹ Zheng Yi²

(¹ School of Physics and Electronics Engineering, Jinzhong University, Jinzhong, Shanxi 030600, China)
(² Institute of Laser, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Dispersion of fiber may broaden the pulse width and lead to error, which must be avoided in optical communications. Using the finite element method (FEM) and considering the material dispersion of SiO_2 , the mode field, the effective index of fundamental mode and the dispersion property of double-cladding photonic crystal fiber (PCF) with circular arrangement are numerically simulated. Results show that the distance between large air holes and small air holes of the first layer and the diameter of large air holes determine the shape of dispersion curve when the distance and diameter of small air holes are unchanged. As some dispersion-compensating fiber, the effective mode refractive index has a transition at a wavelength, thus flattened dispersion can be realized. For example, when diameter $d_1 = 3.1 \mu\text{m}$, $d_2 = 1 \mu\text{m}$, distance $\Lambda_1 = 5 \mu\text{m}$ and $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$, within the wavelength range of $1.22 \sim 1.6 \mu\text{m}$, the difference between the maximum and minimum of dispersion is less than $4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$.

Key words fiber optics; flattened dispersion; finite element method; photonic crystal fiber

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.4005; 060.4510; 060.5295

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)由于在包层中引入空气孔,可以得到在石英玻璃中掺杂所无法实现的大折射率差,通过与传统光纤中相同的全内反射就可以将光约束起来,因而可以获得常规光纤所没有的各种新奇性质,如宽带单模传输和可控的色散特

性^[1,2]、强烈的非线性效应^[3]等。这些特性使其在光通信、非线性光学等领域有着潜在的应用前景。光纤色散可使脉冲展宽而导致误码,而不论是在线性光学领域还是非线性光学领域,总是希望光纤色散在应用波长窗口内大小合理且平坦^[4]。

到目前为止已提出一些新颖的 PCF 结构。

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-04-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(60978028)、山西省教育厅项目(山西省普通本科高等教育教学改革项目、晋教高字[2009]19号)和晋中学院教改项目(JG20090104, JG20090119, JG20090205)资助课题。

作者简介: 王 丹(1975—),女,硕士,讲师,主要从事光纤光学、微结构光纤和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: danw66@126.com

2005年武劲青等^[5]设计了一种方形渐变微结构光纤;2006年刘洁等^[3]改变了六边形 PCF 中的第一层和第三层空气孔获得了低平色散;2007年刘兆伦等^[6]设计了一种第一层为椭圆空气孔的六边形 PCF;2007年,郭丽霞等^[7]也提出了一种复合六边形空气孔格点 PCF;2008年苑金辉等^[8]提出了一种呈六边形的阶梯结构 PCF;2010年侯宇等^[9]提出了一种八边形双包层光子晶体光纤;2010年 Guo 等^[10]通过在传统六边形 PCF 芯区加一小孔来实现平坦色散,这种光纤对芯区空气孔的尺寸非常敏感。如上所述,多数 PCF 设计平坦色散的方法是将包层孔设计为规则的三角阵列,而且具有相同的孔间距,然后通过改变其包层中的几层空气孔的直径或者逐层改变空气孔的直径以达到不同波段内的色散平坦化。改变的空气孔的个数较多,对光纤层数要求较高,制备工艺难度较大。

本文提出一种新的呈圆形分布的双包层 PCF。与传统六边形双包层光纤相比,设计容易,改变的空气孔的个数较少;其模场形状具有更加接近于圆形的理想效果;而且大小空气孔的间距不同,只需通过调节大孔的间距和直径就可以很容易地改变色散曲线。双包层 PCF 除在波分复用通信系统中和优化一些非线性器件的性能时有着重要的应用外,还可以作为高功率光纤激光器的理想介质,具有抽运效率高、散热性能好,特别是其模场面积和色散特性灵活可调的优点,可以大大提高输出的激光质量。

目前,分析光纤中导波模式的理论方法有平面波展开法(PWM)、有效折射率方法、时域有限差分法(FDTD)和有限元法(FEM)等。在这些方法中,有限元法^[11]分析光波导的模场具有较高的计算精度,可适用截面是任意不规则形状、空气孔任意排

布、材料折射率任意组合的情况,能够对光纤的色散特性进行很好的阐述,建模和计算过程也比较方便。其基本原理是:从麦克斯韦方程出发导出 PCF 所遵循的本征值方程:

$$\nabla \times (\epsilon_r^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) = (\omega/c)^2 \mu_r \mathbf{H}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y) \exp(-j\beta z)$ 是磁场强度, ϵ_r 和 μ_r 分别是介质的介电常数和磁导率, c 为真空中光速, ω 为光波角频率。用有限元法建立适当的模型,可以得到电场或磁场分布及传播常数 β 。计算过程简要归纳如下:根据所要计算的区域构建模型;设定波长、材料折射率参数、子区域及边界条件;对整个计算区域进行离散网格化,在每个小区域求解(1)式,再对所有小区域内的解进行综合,得到该计算区域上的解;进行解后处理。

本文采用有限元法对所提出的双包层 PCF 光纤进行模拟分析,计算了光纤的空气孔间距及直径对场分布、基模有效折射率和色散的影响。

2 有限元法分析程序的验证

首先运用有限元法对一个阶跃光纤的传输特性进行分析,并与理论结果进行误差比较,验证这种方法的正确性。

该传统阶跃光纤的参数选取如下:中心半径取 $4 \mu\text{m}$,包层半径取 $62.5 \mu\text{m}$,芯区折射率取 1.5,包层折射率取 1.45,计算结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,对于 HE_{11} 模来说,有限元法得到的 n_{eff} 与用传统的解析的模场分析方法^[12]所获得的结果吻合得很好,说明这种有限元法在分析横截面具有不均匀性的光波导时,具有较高的精度。

表 1 有限元法分析阶跃光纤中 HE_{11} 模与理论值比较的相对误差

Table 1 HE_{11} mode of step fiber analyzed by FEM and the relative error to the theoretical values

$\lambda / \mu\text{m}$	Theory β / m^{-1}	Theory n_{eff}	FEM n_{eff}	Relative error / %
1.0	9.40905×10^6	1.497497	1.497498	7.886428×10^{-5}
1.1	8.55102×10^6	1.497031	1.497028	1.879277×10^{-4}
1.2	7.83624×10^6	1.496612	1.496527	0.005653
1.3	7.23083×10^6	1.496069	1.495998	0.004748
1.4	6.71206×10^6	1.495561	1.495442	0.007926
1.5	6.26296×10^6	1.495172	1.49486	0.020838
1.6	5.86859×10^6	1.494424	1.494256	0.011253
1.7	5.52109×10^6	1.493805	1.49363	0.011708
1.8	5.21173×10^6	1.493051	1.492985	0.004398
1.9	4.93575×10^6	1.492543	1.492321	0.014882

3 理论模型

下面将有限元法用于所提出的双包层 PCF 的计算中。光纤截面示意图如图 1 所示。该光纤由纯石英和空气孔组成，每层上的各空气孔到中心点的距离相同，外层空气洞的数量是与之相邻层数的 2 倍，内包层由一圈呈正六边形的大空气孔组成，外包层由 3 圈呈圆形分布的小空气孔组成。大空气孔间距为 Λ_1 (大空气孔中心距光纤中心的距离)、直径为 d_1 ；小空气孔直径为 d_2 、间距为 Λ_2 (小空气孔中心点之间的距离)。

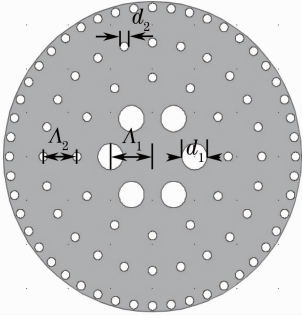


图 1 双包层光子晶体光纤的横截面

Fig. 1 Cross section of double-cladding PCF

PCF 的材料色散是由于石英的折射率对波长的依赖性所引起的，可表示为

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_m}{d\lambda^2}, \quad (2)$$

式中 c 为真空中的光速， λ 为光纤中传输光的波长， $n_m(\lambda)$ 可由 Sellmeier 方程^[13] 计算；文中计算考虑了这一色散。波导色散 $D_w(\lambda)$ 与光纤的包层结构参数密切相关：

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

式中 n_{eff} 为模式的有效折射率。所以 PCF 的总色散可表示为

$$D(\lambda) \approx D_w(\lambda) + D_m(\lambda). \quad (4)$$

4 数值结果和讨论

4.1 大空气孔间距 Λ_1 的改变对有效模折射率 n_{eff} 及色散特性的影响

固定大空气孔直径 $d_1 = 3 \mu\text{m}$ ，小空气孔直径 $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ，小孔间距 $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$ ，第一圈小孔至中心点的距离为 $9 \mu\text{m}$ ，只改变内包层大孔间距 Λ_1 ($3 \mu\text{m} < \Lambda_1 < 7 \mu\text{m}$) 的取值。此时除特殊参数外，有效模折射率在一固定间隔时都是随波长增加而减小；在同一波长下，当 $\Lambda_1 < 4.9 \mu\text{m}$ 时 n_{eff} 随 Λ_1 的增大而逐渐减小且差距越来越小，尤其在短波长处更为明显；然而，当 $\Lambda_1 > 5.1 \mu\text{m}$ 时 n_{eff} 随 Λ_1 的增大而逐渐增大且差距越来越大，尤其在长波长处更为明显，如图 2(a) 所示。

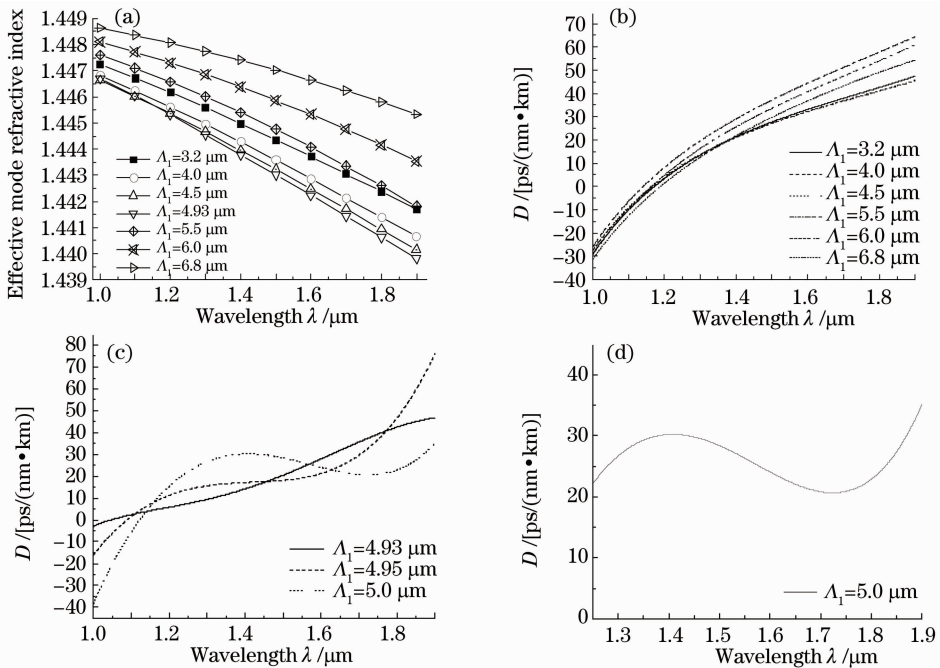


图 2 $d_1 = 3 \mu\text{m}$ ， $d_2 = 1 \mu\text{m}$ ， $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$ 时，光纤在 Λ_1 不同的情况下有效模折射率(a)和总色散随波长的变化关系(b)~(d)

Fig. 2 Variation of (a) effective mode refractive index and (b)~(d) total dispersion with wavelength when $d_1 = 3 \mu\text{m}$ ，

$d_2 = 1 \mu\text{m}$ ， $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$ and different values are chosen for Λ_1

色散曲线如图 2(b)所示,无论 Λ_1 为多少,色散值都随波长 λ 增大而增大;当 $3 \mu\text{m} < \Lambda_1 < 4.9 \mu\text{m}$ 时色散曲线基本重合;当 $5.1 \mu\text{m} < \Lambda_1 < 7 \mu\text{m}$ 时曲线随 Λ_1 的增大而逐渐下移,零色散点也随之右移,但色散曲线形状几乎一样,变化不是很大。

合适地调整参数将得到非常平坦的色散曲线。图 2(c)是 $4.9 \mu\text{m} < \Lambda_1 < 5.1 \mu\text{m}$ 时的色散曲线,可以看出,色散曲线与 Λ_1 取其他值时相比变化很大,走向完全不同,每条曲线在很宽的波段内保持平坦,色散值 $D_{\max} - D_{\min} < 10 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。图 2(d)是 $\Lambda_1 = 5 \mu\text{m}$ 时的色散系数随波长的变化曲线,在 $1.22 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 波长范围内保持平坦。随着 Λ_1 的增大,平坦波段和零色散点分别右移,而且对参数变化较敏感。

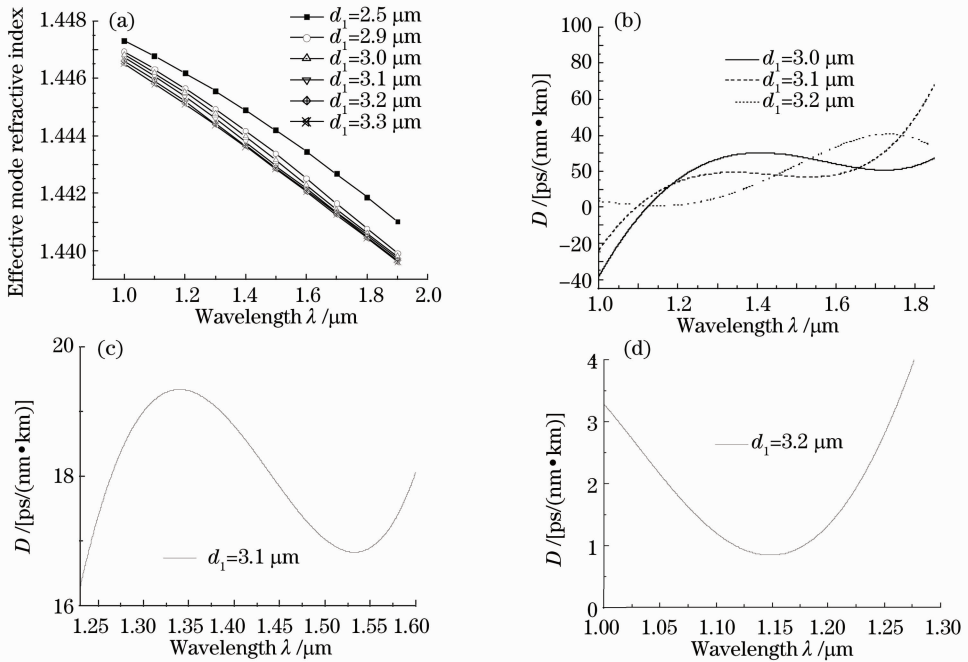


图 3 $\Lambda_1 = 5 \mu\text{m}$, $d_2 = 1 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$ 时,光纤在 d_1 不同的情况下有效模折射率(a)和总色散随波长的变化关系(b)~(d)

Fig. 3 Variation of (a) effective mode refractive index and (b)~(d) total dispersion with wavelength when $\Lambda_1 = 5 \mu\text{m}$, $d_2 = 1 \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$ and different values are chosen for d_1

合适地调整参数将得到如图 3(b)所示非常平坦的色散曲线,可以看到,随 d_1 的增加色散平坦波段右移。图 3(c)是 $d_1 = 3.1 \mu\text{m}$ 时的色散曲线,在 $1.22 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波长范围内非常平坦,其色散值 $D_{\max} - D_{\min} < 4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。图 3(d)是 $d_1 = 3.2 \mu\text{m}$ 时的色散曲线,在 $1.0 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 波长范围内更加平坦,其色散值 $D_{\max} - D_{\min} < 3 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 且 D_{\min} 达到了小于 $1 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的超低值。

图 4 给出了大孔 $\Lambda_1 = 5 \mu\text{m}$, $d_1 = 3.2 \mu\text{m}$ 且小孔 $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$, $d_2 = 1 \mu\text{m}$ 时光纤分别在波长 $1.0, 1.4$

由图 2 所示结果可知,改变大空气孔间隔 Λ_1 对所提出的双包层 PCF 的色散有较强的影响。

4.2 大空气孔直径 d_1 的改变对有效模折射率 n_{eff} 色散和模场的影响

小孔的位置及直径保持不变,大孔位置不变,只改变大孔直径,即:固定内包层大孔间距 $\Lambda_1 = 5 \mu\text{m}$,小空气孔直径 $d_2 = 1 \mu\text{m}$,小孔间距 $\Lambda_2 = 4 \mu\text{m}$,第一圈小孔至中心点的距离为 $9 \mu\text{m}$,只改变大孔直径 d_1 ($1 \mu\text{m} < d_1 < 5 \mu\text{m}$) 的取值。同 4.1 节所述,除特殊参数外,有效模折射率在一固定直径时都随波长增加而减小;在同一波长下, n_{eff} 随 d_1 的增大而逐渐减小且差距越来越小,尤其在长波长处更为明显,如图 3(a)所示。

和 $1.9 \mu\text{m}$ 处的磁场能量分布图。可以看到,在波长较短时,基模场主要集中分布在内芯区且呈圆形,然而,当波长增大时基模场的一部分能量则在芯区,另一部分能量分布在第一圈小空气孔和第二圈小空气孔之间传播;若波长再增大,基模场的能量将完全分布于第一圈小空气孔和第二圈小空气孔之间,内芯中存在的场可以忽略。正因为这一机制的存在,使得有效模折射率在某个波长处过渡,得到了超低超平坦的色散曲线。

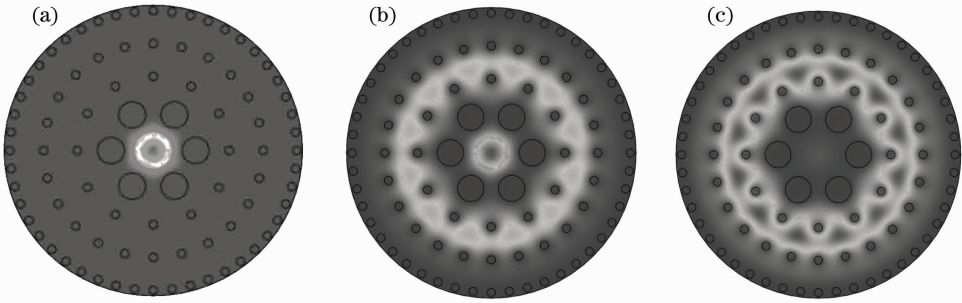


图 4 $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=3.2 \mu\text{m}$ 且 $\Lambda_2=4 \mu\text{m}$, $d_2=1 \mu\text{m}$ 时, 光纤分别在 $\lambda=1 \mu\text{m}$ (a), $\lambda=1.4 \mu\text{m}$ (b) 和 $\lambda=1.9 \mu\text{m}$ (c) 的磁场能量分布图

Fig. 4 Magnetic-energy distributions at (a) $\lambda=1 \mu\text{m}$ (b) $\lambda=1.4 \mu\text{m}$ and (c) $\lambda=1.9 \mu\text{m}$ in the double-cladding PCF when $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=3.2 \mu\text{m}$ and $\Lambda_2=4 \mu\text{m}$, $d_2=1 \mu\text{m}$

4.3 小空气孔间距 Λ_2 和小空气孔直径 d_2 的改变对色散 D 的影响

计算了小空气孔间距 Λ_2 和小空气孔直径 d_2 的改变对色散 D 的影响。图 5(a) 是 $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=3 \mu\text{m}$, $d_2=1 \mu\text{m}$ 时, 在 Λ_2 不同的情况下光纤总色

散随波长的变化关系; 图 5(b) 是 $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=3 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=4 \mu\text{m}$ 时, 在 d_2 不同的情况下光纤总色散随波长的变化关系。可以看出, 改变小空气孔间距 Λ_2 和小空气孔直径 d_2 对所提出的双包层光子晶体光纤的色散也有影响。

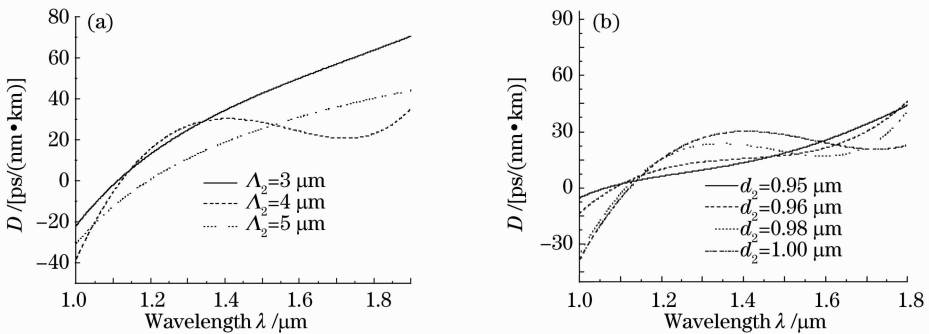


图 5 (a) $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=3 \mu\text{m}$, $d_2=1 \mu\text{m}$ 时, 光纤在 Λ_2 不同的情况下总色散随波长的变化关系; (b) $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=3 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=4 \mu\text{m}$ 时, 光纤在 d_2 不同的情况下总色散随波长的变化关系

Fig. 5 Variation of total dispersion with wavelength (a) when $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=3 \mu\text{m}$, $d_2=1 \mu\text{m}$ and different Λ_2 ; (b) when $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=3 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=4 \mu\text{m}$ and different d_2

5 结 论

借有限元法, 对所提出的圆形双包层 PCF 的总色散、模场及基模有效折射率进行了数值计算和模拟, 结果发现内、外空气孔间隔及直径对其色散曲线都有影响, 但大空气孔和第一圈小空气孔的间距及大孔的直径对色散曲线的走向起决定性作用。如同某些色散补偿光纤一样, 有效模折射率会在某个波长处过渡, 从而实现平坦色散。例如, 当 $d_1=3.1 \mu\text{m}$, $d_2=1 \mu\text{m}$, $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=4 \mu\text{m}$ 时, 在 $1.22\sim 1.6 \mu\text{m}$ 波长范围内, 其色散值 $D_{\text{max}} - D_{\text{min}} < 4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$; 当 $d_1=3 \mu\text{m}$, $d_2=1 \mu\text{m}$, $\Lambda_1=5 \mu\text{m}$, $\Lambda_2=4 \mu\text{m}$ 时, 在 $1.22\sim 1.9 \mu\text{m}$ 超宽波长范围内色散值 $D_{\text{max}} - D_{\text{min}} < 10 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。具有这种如同色散补偿光纤模场的色散平坦其结构不同于以往的色散平坦光纤, 可为

光电子器件和全波通信光纤的设计和研制开辟新的思路。

参 考 文 献

- Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. Numerical simulation and analysis on photonic crystal fiber with closing to zero and flattened chromatic dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 713~717
李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 接近于零色散的色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 713~717
- Chi Hao, Zeng Qingji, Zhao Huandong *et al.*. Analysis on dispersion characteristics of photonic crystal fiber [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2003, **22**(2): 149~153
- Liu Jie, Yang Changxi, Claire 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, Claire 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
- Dai Nengli, Li Yang, Peng Jinggang *et al.*. Development of

- dispersion-flattened photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 010602
- 戴能利, 李 洋, 彭景刚等. 色散平坦光子晶体光纤的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(1): 010602
- 5 Wu Jingqing, Xue Wenrui, Zhou Guosheng. Dispersion property analysis of square-lattice varying microstructured optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 174~178
- 武劲青, 薛文瑞, 周国生等. 方形渐变空气孔微结构光纤的色散特性分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 174~178
- 6 Liu Zhaolun, Wang Wei, Zhao Xingtao *et al.*. Modified design and characteristics analysis of broadband flat dispersion photonic crystal fiber [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(1): 104~107
- 刘兆伦, 王 伟, 赵兴涛等. 宽带色散平坦光子晶体光纤的优化设计与特性分析 [J]. *半导体光电*, 2007, **28**(1): 104~107
- 7 Guo Lixia, Wu Yanrong, Xue Wenrui *et al.*. Dispersion properties of photonic crystal fiber with composite hexagonal air hole lattice [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 935~939
- 郭丽霞, 武延荣, 薛文瑞等. 复合六边形空气孔格点光子晶体光纤的色散特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 935~939
- 8 Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Investigation of a step-structure photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1167~1171
- 苑金辉, 侯蓝田, 周桂耀等. 一种阶梯结构的色散平坦光子晶体光纤的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1167~1171
- 9 Hou Yu, Zhou Guiyao, Hou Lantian *et al.*. Analysis of dispersion properties of octagonal structural photonic crystal fiber with double cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1068~1072
- 侯 宇, 周桂耀, 侯蓝田等. 八边形双包层光子晶体光纤色散特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1068~1072
- 10 Guo Yuan, Ruan Shuangchen. Analysis on the dispersion properties of photonic crystal fiber with an air-hole defect core [J]. *J. Shenzhen University Science and Engineering*, 2010, **27**(4): 386~390
- 11 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng. Analysis of the microstructure fiber by the finite element method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1337~1342
- 胡明列, 王清月, 栗岩锋. 微结构光纤的有限元分析算法 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1337~1342
- 12 A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London: Springer, 1983
- 13 Wu Chongqing. *Optical Waveguide Theory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000
- 吴重庆. *光波导理论* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000