

文章编号: 0253-2239(2005)02-174-5

方形渐变空气孔微结构光纤的色散特性分析*

武劲青 薛文瑞** 周国生

(山西大学物理电子工程学院量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

摘要: 提出了一种新型的方形分布渐变空气孔微结构光纤。借助时域有限差分法计算了孔间距取 $2.0\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\ \mu\text{m}$, 最小孔直径分别取 $0.4\ \mu\text{m}$ 、 $0.6\ \mu\text{m}$ 、 $0.7\ \mu\text{m}$ 、 $0.8\ \mu\text{m}$ 和 $1.0\ \mu\text{m}$, 从第一层到第五层直径线性递增量分别为 $0.1\ \mu\text{m}/\text{层}$ 和 $0.2\ \mu\text{m}/\text{层}$ 的五层渐变空气孔微结构光纤的基模色散曲线图, 结果表明渐变空气孔微结构光纤在控制色散的能力上明显优于空气孔不变的微结构光纤, 这种光纤的色散曲线在 $1400\sim 2000\ \text{nm}$ 波长范围内保持平坦且具有更低的色散量; 当渐变空气孔微结构光纤第三层孔的直径取与孔直径不变微结构光纤的孔直径相同, 且第一层到第五层孔直径按每层 $0.2\ \mu\text{m}$ 的斜率增长时, 其色散曲线最低最平坦, 色散值保持在 $30\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 左右。

关键词: 导波与光纤光学; 微结构光纤; 色散; 时域有限差分法; 导波模式

中图分类号: TN913.7 文献标识码: A

Dispersion Property Analysis of Square-Lattice Varying Microstructured Optical Fiber

Wu Jinqing Xue Wenrui Zhou Guosheng

(School of Physics and Electronics Engineering, National Key Laboratory for Quantum Optics and Optical Quantum Device, Shanxi University, Taiyuan 030006)

Abstract: A new square-lattice varying microstructured optical fiber is presented. Using finite-difference time-domain method, the dispersion curves of five-ring varying microstructured optical fiber are calculated, hole-to-hole space of which is $2.0\ \mu\text{m}$ and $2.5\ \mu\text{m}$, the least diameter is $0.4\ \mu\text{m}$, $0.6\ \mu\text{m}$, $0.7\ \mu\text{m}$, $0.8\ \mu\text{m}$ and $1.0\ \mu\text{m}$, and the diameter increases from the first ring to the fifth ring by a pitch of $\Delta d=0.1\ \mu\text{m}$ and $\Delta d=0.2\ \mu\text{m}$ respectively. The result shows that the new square-lattice varying microstructured fiber is better than the square-lattice no-varying microstructured fiber in controlling the dispersion and dispersion slope in the wide wavelength, the dispersion curve of which can remain flatter and lower in $1400\sim 2000\ \text{nm}$. When the third ring diameter of varying microstructured fiber has the same value with the diameter of no-varying microstructured fiber, the lowest and flattest dispersion curve is obtained, in this case, the dispersion value is about $30\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ and $\Delta d=0.2\ \mu\text{m}$. So the flatter and lower dispersion curve can be realized by adjusting the diameters, distribution of air holes, and the hole-to-hole space.

Key words: guided wave and fiber optics; microstructured optical fiber; dispersion; finite-difference time-domain method; guided wave mode

1 引 言

近年来,微结构光纤(或称为多孔光纤)引起了人们的关注。这种类型的光纤是由单种材料构成的,一般在它的包层中沿整个光纤长度方向分布着规则或不规则的空气洞。这种类型的光纤的导光机制可划分为两类:一是光子带隙效应(Photonic-

bandgap effect),二是平均折射率效应(Average-index effect)。光子带隙效应导光一般要求包层中的空气洞呈类似于晶体中原子排列的周期性分布^[1,2],这种类型的光纤在很宽的波长范围内可以单模工作。平均折射率效应导光一般不要求包层中的空气洞呈周期性分布^[3]。

* 山西省自然科学基金(20041036)资助课题。

作者简介:武劲青(1977~),女,山西大学物理电子工程学院硕士研究生,研究方向为导波光学、光纤光学和光子晶体光纤。

** 通信联系人。E-mail: wxue@sxu.edu.cn。

收稿日期:2004-04-23;收到修改稿日期:2004-08-13

Saitoh 等^[4]在 2003 年提出了一种新型的六角形微结构光纤,通过改变微结构光纤空气洞的大小,间距,形状和排列等参量可以在 1550 nm 的通信窗口调整色散曲线的形状从而得到超低超平的色散曲线。这对于实现高速大容量的波分复用(WDM)的信息传输是非常有利的。

目前,分析光纤中导波模式的理论方法有平面波展开法、有效折射率方法、局域基函数方法、全矢量双正交基方法、有限元方法和时域有限差分方法(FDTD)^[5~9]等。在这些方法中,时域有限差分方法因为不涉及本征值问题,可以避免计算机计算时间长、内存要求高的困难,所以计算效率较高。时域有限差分方法已成功应用于微结构光纤的模式分析^[7~9]。本文采用这种方法对提出的方形分布渐变空气孔微结构光纤的色散特性进行分析。分析过程中,按照国际上流行的一种做法,就是把光纤的色散分解为波导色散和材料色散两部分来处理^[4]。

2 时域有限差分法简介

时域有限差分法是在 1966 年由 Yee^[10]提出来的。对于线性、无耗、各向同性的无源介质来说,时间依赖的麦克斯韦方程可以通过所谓的 Yee 氏技术在离散的三维网格中进行时间和空间的离散化。对于光纤中的导模来说,可以假定传播常量沿传播方向(z 方向)为 β , 这样每一个场分量就具有 $\phi(x, y, z) = \phi(x, y)\exp(i\beta z)$ 的形式,这里 ϕ 代表任何场分量。因为 z 方向的导数可以用 $i\beta$ 来代替,所以麦克斯韦方程就可以只用横向场量表达出来^[11]。采用非各向同性良匹配层(APML)边界条件^[12],在初始时刻引入一个人为设定的场分布,只要演化时间足够长,这个场分布中非物理的成分在时间演化过程中会逐渐消失,而物理的成分会保留下来,即导模。

由时域有限差分法得到传播常量 β 随真空中波长 λ 的关系,通过换算可得到有效折射率 n_{eff} 和波导色散参量 D_g 的关系^[13]。由于模式场的主要部分,尤其是基模场的主要部分,集中在第一层空气孔所包围的中心区域,这一区域的面积相对较大且连续分布,所以可以采用塞尔迈耶尔(Sellmeier)公式^[13]得到波导的材料色散 D_m 。总色散为波导色散 D_g 和材料色散 D_m 之和。

本文提出了一种方形分布渐变空气孔的微结构光纤,如图 1 所示,计算了孔间距 Λ 取 2.0 μm 和 2.5 μm , 最小孔直径分别取 0.4 μm 、0.6 μm 、

0.7 μm 、0.8 μm 和 1.0 μm , 直径线性递增 Δd 为 0.1 μm 和 0.2 μm 的五层渐变空气孔微结构光纤的基模色散曲线图。同时计算了空气孔直径均取 0.8 μm 和 1.0 μm 的微结构光纤的色散曲线与之比较。比较得出渐变空气孔微结构光纤在控制色散的能力上明显优于空气孔不变的微结构光纤。

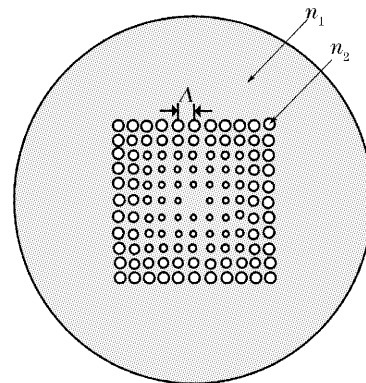


图 1 方形分布渐变空气孔微结构光纤示意图, Λ 为孔心间距, n_1 为介质折射率, n_2 为空气孔折射率, 五层孔直径从内到外分别用 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 表示

Fig. 1 Square-lattice varying microstructured optical fiber, Λ is the hole-to-hole spacing, n_1 is the material index, and n_2 is the air index, and the five diameters from the center to the outer are d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5

在计算区域中,采用了 811801 (901 \times 901) 个网格点,如图 2 所示,其中包含 50 层非各向同性良匹配层 APML 来截断时域有限差分法网格。在整个计算区域中,采用均匀的空间离散距离, $\Delta x = \Delta y = 0.05 \mu\text{m}$, 时间的离散步满足数值稳定性条件^[7], 总时间步数取 10000 步。

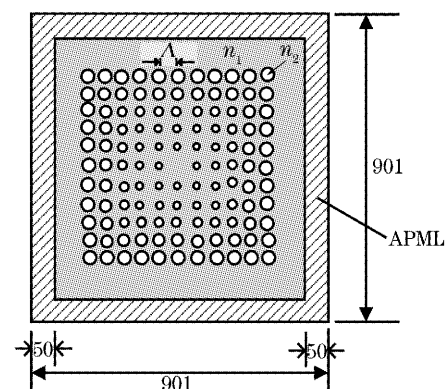


图 2 计算区域和非各向同性良匹配吸收边界, 图中数字代表 FDTD 程序中所用到的网格点数

Fig. 2 The computational domain and APML layer. the numbers in the graph indicate mesh points used in FDTD

为了检验时域有限差分法程序,对传统阶跃光纤

的 HE_{11} 模的传播常数 β 与波长 λ 的依赖关系进行了分析,结果表明该程序的结果和理论计算^[14]得到的结果吻合得非常好^[15],说明时域有限差分法方法可正确有效地用来对光波导进行计算。另一方面也说明,取 10000 个时间步就足以给出精度较高的结果。

3 结果和讨论

先取介质棒的折射率固定为 1.5,孔间距 Λ 取 $2.0 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 两种情况下,最小孔直径分别取 $0.6 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$,从第一层到第五层直径线性递增 $\Delta d = 0.1 \mu\text{m}$ 的五层渐变空气孔微结构光纤进行了计算,同时计算了直径均取 $0.8 \mu\text{m}$ 的五层

不变空气孔微结构光纤与之进行比较,结果见图 3。

由图 3(a)可看出,孔间距 Λ 取 $2.0 \mu\text{m}$ 时,在同一波长下, d_1 增大色散变大, $d_1/\Lambda = 0.3 \sim 0.4$, 即 d_1 分别为 $0.6 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$ 时的色散曲线基本相似,且在 $1400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波长范围内都较为平坦,色散变化大约都小于 $10 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$,而这三条曲线彼此间隔大约是 $15 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。同时我们还计算了孔直径均取 $0.8 \mu\text{m}$, 即 $d_1/\Lambda = 0.4$ 情况下的色散曲线,该色散曲线仅在 $1300 \sim 1500 \text{ nm}$ 波长范围内较平坦,且色散值也较大,大约为 $45 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。

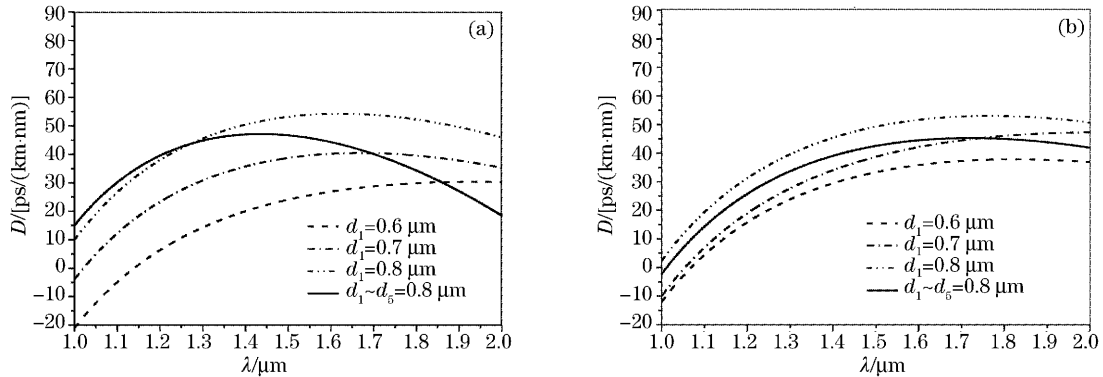


图 3 (a) 孔间距 Λ 取 $2.0 \mu\text{m}$, d_1 分别为 $0.6 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$, 由内到外五层直径线性递增 $\Delta d = 0.1 \mu\text{m}$ 时的色散曲线, (b) 孔间距 Λ 取 $2.5 \mu\text{m}$, d_1 分别为 $0.6 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$, 由内到外五层直径线性递增 $\Delta d = 0.1 \mu\text{m}$ 时的色散曲线, 为了对比, 同时给出了 $d_1 \sim d_5$ 为 $0.8 \mu\text{m}$ 的微结构光纤的色散曲线

Fig. 3 (a) Dispersion curves of four different structures; three curves are of the smallest air-hole diameters are $0.6 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ and $0.8 \mu\text{m}$, with the varying diameter $0.1 \mu\text{m}$, (b) dispersion curves of four different structures: three curves are of the smallest air-hole diameters are $0.6 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ and $0.8 \mu\text{m}$, with the varying diameter $0.1 \mu\text{m}$, for contrast we give the dispersion curve of every diameter having the same value $0.8 \mu\text{m}$

由图 3(b)可看出,孔间距 Λ 取 $2.5 \mu\text{m}$ 时,在相同波长下,色散随 d_1/Λ 的增大而增大。 $d_1/\Lambda = 0.24 \sim 0.32$, 即 d_1 分别为 $0.6 \mu\text{m}$, $0.7 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$ 时的色散曲线较相似,在 $1400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波长范围内色散曲线也较平坦,色散变化也都小于 $10 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$,且这三条曲线彼此间隔大约为 $10 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。为了比较我们还计算了孔直径均取 $0.8 \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda = 0.32$ 情况下的色散曲线,由图可看出它与 d_1 为 $0.6 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$ 时的渐变微结构光纤的色散曲线相似,在 $1400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波长范围内色散曲线较平坦,色散值相差大约 $10 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。

综合图 3(a)和图 3(b)不难看出,当 $d_1/\Lambda = 0.3$ 左右色散较小大约为 $30 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$,色散曲线也较平坦。孔直径渐变的微结构光纤与孔直径均取 $0.8 \mu\text{m}$ 的微结构光纤相比,当直径为 $0.8 \mu\text{m}$ 的空气

孔位于第三层和第二层时,也就是 d_1 分别为 $0.6 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 时,能在更大波长范围内得到更小和更平坦的色散曲线,色散值比孔直径不变的微结构光纤小 $20 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 和 $10 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$,由此看出采用孔直径渐变的微结构光纤能够得到更低更平坦的色散曲线,与孔直径不变的微结构光纤相比,孔直径渐变的微结构光纤在控制色散大小和范围上具有明显的优势。同时还注意到孔直径渐变微结构光纤第三层和第二层的直径取与孔直径不变微结构光纤的直径相同时,该直径位于第三层时的色散曲线更低更平坦。

孔直径渐变微结构光纤不仅在更大的波长范围内保持平坦的色散而且还具有更小的色散。这是因为在短波长范围内,导模主要受内部空气孔的影响,而在长波长范围内,导模主要受外部空气孔的影响。孔直径渐变的微结构光纤正是因为有效地控制了内

外空气孔对导模传播的影响而获得了更低更平坦的色散曲线,这一点在 Λ 取较小值如 $2 \mu\text{m}$ 时尤为明显。

同时还计算了孔间距 Λ 取 $2.0 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 两种情况下,最小孔直径分别取 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 、

$0.8 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$,从第一层到第五层直径线性递增 $\Delta d=0.2 \mu\text{m}$ 的五层渐变空气孔微结构光纤的色散曲线。同时计算了直径均取 $0.8 \mu\text{m}$ 的五层不变空气孔微结构光纤与之进行比较,结果见图 4。

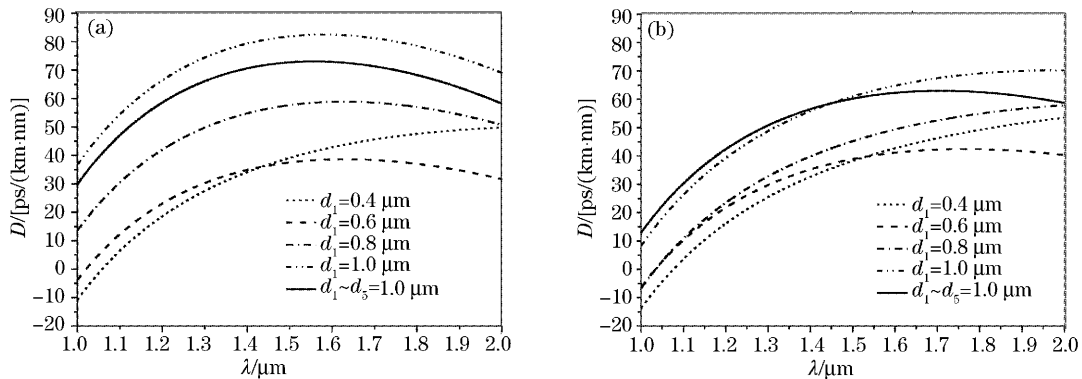


图 4 (a) 孔间距 Λ 取 $2.0 \mu\text{m}$, d_1 分别为 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$, 由内到外五层直径线性递增 $\Delta d=0.2 \mu\text{m}$ 时的色散曲线, (b) 孔间距 Λ 取 $2.5 \mu\text{m}$, d_1 分别为 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$, 由内到外五层直径线性递增 $\Delta d=0.2 \mu\text{m}$ 时的色散曲线, 为了对比, 同时给出了直径 $d_1 \sim d_5=1.0 \mu\text{m}$ 微结构光纤的色散曲线

Fig. 4 (a) Dispersion curves of five different structures; four curves are of the smallest air-hole diameters are $0.4 \mu\text{m}$, $0.6 \mu\text{m}$, $0.8 \mu\text{m}$ and $1.0 \mu\text{m}$, with the varying diameter $0.2 \mu\text{m}$, (b) dispersion curves of five different structures; four curves are of the smallest air-hole diameters are $0.4 \mu\text{m}$, $0.6 \mu\text{m}$, $0.8 \mu\text{m}$ and $1.0 \mu\text{m}$, with the varying diameter $0.2 \mu\text{m}$, for contrast, we give the dispersion curve of every diameter having the same value $1.0 \mu\text{m}$

由图 4(a) 可看出, 孔间距 Λ 取 $2.0 \mu\text{m}$ 时, $d_1/\Lambda=0.3 \sim 0.5$, d_1 分别为 $0.6 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 时的色散曲线基本相似, 且在 $1400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波长范围内都较为平坦, 色散变化大约都小于 $15 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 而这三条曲线彼此间隔相差大约是 $20 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。另外当 d_1 为 $0.4 \mu\text{m}$ 时, 色散曲线很陡。为了比较, 同时还计算出了孔直径均取 $1.0 \mu\text{m}$, 即 $d_1/\Lambda=0.5$ 情况下直径不变微结构光纤的色散曲线, 该色散曲线与 $d_1=1.0 \mu\text{m}$ 的孔直径渐变微结构光纤的色散曲线相似, 在 $1400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波长范围内较平坦, 色散相差大约 $10 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。

图 4(b) 可看出, 孔间距 Λ 取 $2.5 \mu\text{m}$ 时, $d_1/\Lambda=0.16 \sim 0.4$, d_1 分别为 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \mu\text{m}$ 时的色散曲线较相似, 在 $1400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波长范围内色散曲线较陡, 变化较大, 都大于 $15 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 且这三条曲线相差大约为 $10 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。为了比较, 还计算了孔直径均取 $1.0 \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda=0.4$ 情况下的色散曲线, 可看出它与 d_1 为 $0.6 \mu\text{m}$ 的孔渐变微结构光纤的色散曲线相似, 在 $1400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波长范围内色散曲线较平坦, 色散变化很小, 大约为 $5 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。而这两条曲线相差大约为 $20 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。

综合图 4(a) 和图 4(b) 可看出, 在相同波长下,

d_1 增大色散增大, 当 $d_1/\Lambda=0.3$ 左右的色散曲线较好。孔直径渐变微结构光纤与孔直径均取 $1.0 \mu\text{m}$ 的微结构光纤相比, 当直径为 $1.0 \mu\text{m}$ 的空气孔位于第四层即 $d_1=0.4 \mu\text{m}$ 时色散曲线较陡, 当直径为 $1.0 \mu\text{m}$ 的空气孔位于孔渐变微结构光纤的第三层和第二层时, 也就是 d_1 分别为 $0.6 \mu\text{m}$ 和 $0.8 \mu\text{m}$ 时, 色散值比孔直径不变的微结构光纤小于 $30 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 和 $20 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 且能在很宽的波长范围内得到更低、更平坦的色散曲线, 由此看出采用孔直径渐变微结构光纤能够得到更低更平坦的色散曲线, 与直径不变的微结构光纤相比, 孔直径渐变微结构光纤在控制色散大小和范围上具有明显的优势。同样也注意到孔直径渐变微结构光纤的第三层和第二层的直径取与直径不变的微结构光纤直径相同时, 该直径位于第三层时的色散曲线更低更平坦。

另外, 还计算了孔直径增长斜率 Δd 对色散曲线的影响, 结果如图 5 所示。我们计算了 Λ 取 $2.0 \mu\text{m}$, Δd 分别取 $0 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ 的色散曲线。

由图 5 可见, 当第三层直径取 $1.0 \mu\text{m}$ 时, Δd 分别取 $0 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ 时, 色散曲线在相同的波长下, Δd 越大色散越小, $\Delta d=0.2 \mu\text{m}$ 时色散曲线最低。这三条色散曲线形状相似, 在 $1400 \sim 2000 \text{ nm}$ 波

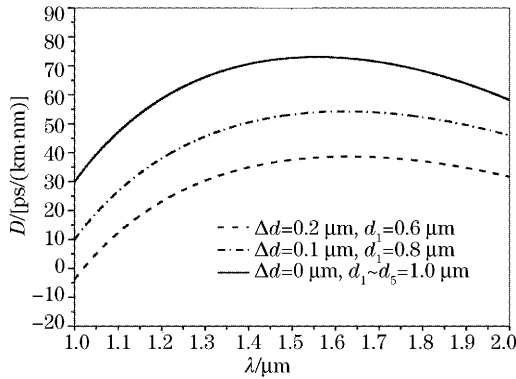


图5 孔间距 Δ 取 $2 \mu\text{m}$, d_1 为 $0.6 \mu\text{m}$ 且 $\Delta d=0.2 \mu\text{m}$ 和 d_1 为 $0.8 \mu\text{m}$ 且 $\Delta d=0.1 \mu\text{m}$, 由内到外五层直径线性递增时的色散曲线, 同时给出了直径不变 $d_1 \sim d_5 = 1.0 \mu\text{m}$ 微结构光纤的色散曲线

Fig. 5 Dispersion curves of three different structures; two curves are of the smallest air-hole diameters are $0.6 \mu\text{m}$ with the varying diameter $0.2 \mu\text{m}$ and $0.8 \mu\text{m}$ with the varying diameter $0.1 \mu\text{m}$, at the same time, we give the dispersion curve of every diameter is $1.0 \mu\text{m}$

长范围内较平坦, 色散变化均小于 $10 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 且彼此间隔大约为 $20 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。另外还计算了 $\Delta d=0.3 \mu\text{m}$ 时的色散曲线, 结果表明 Δd 取太大时的色散曲线会变得不平坦, 比 Δd 取 $0.1 \mu\text{m}$ 时的空气孔渐变微结构光纤的色散曲线差。

4 结 论

本文提出了一种新型的方形分布渐变空气孔微结构光纤, 为了比较, 同时计算了孔直径不变的微结构光纤的基模色散曲线图。当渐变空气孔微结构光纤第三层和第二层的直径取与孔直径不变微结构光纤的直径相同, 且从第一层到第五层孔直径按每层 $0.2 \mu\text{m}$ 的斜率线性增长时, 直径渐变的微结构光纤控制色散的能力更强, 而该直径位于直径渐变的微结构光纤的第三层时, 其色散曲线最低最平。对于

其他直径递增方式, 我们正在研究之中。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. G. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 2 P. St. J. Russell, J. C. Knight, T. A. Birks *et al.*. Recent progress in photonic crystal fibres [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, OSA, Technical Digest (Optical Society of America, Washington DC, 2000), Paper ThG1
- 3 T. M. Monro, P. J. Bennett, N. G. R. Broderick *et al.*. Holey fibers with random cladding distributions[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 206~208
- 4 K. Saitoh, M. Koshiba, T. Hasegawa *et al.*. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers; application to ultra-flattened dispersion[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(8): 843~852
- 5 Y. Li, Q. Wang, M. Hu. Numerical analysis of multicore photonic crystal fibers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 570~572
- 6 F. Brechet, J. Marcou, D. Pagnoux *et al.*. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method[J]. *Optical Fiber Technol.*, 2000, **6**: 181~191
- 7 Min Qiu. Analysis of guided modes in photonic crystal fibers using the finite-difference time-domain method [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2001, **30**(5): 327~330
- 8 S. Guo, S. Albin. Numerical techniques for excitation and analysis of defect modes in photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(9): 1080~1089
- 9 Zhu Yanjie, Dong Xiaopeng, Yang Xiaoli *et al.*. Application and improvement of finite-difference time-domain algorithm in the analysis of optical waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 565~571 (in Chinese)
朱燕杰, 董小鹏, 杨晓理 等. 时域有限差分法在光波导分析中的应用及改进[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 565~571
- 10 K. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1966, **14**: 302~307
- 11 F. Zepparelli, P. Mezzanotte, F. Alimenti *et al.*. Rigorous analysis of 3D optical and optoelectronic devices by the Compact-2D-FDTD method [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1999, **31**: 827~841
- 12 S. D. Gedney. An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1996, **44**: 1630~1639
- 13 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M] (Third Edition), San Diego: Academic Press, 2001
- 14 A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London: Chapman and Hall, 1983
- 15 Wenrui Xue, Guosheng Zhou, Yan Xiao *et al.*. Analysis of dispersion properties in hexagonal hollow fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(8): 1909~1914