

一种新型混合双包层光子晶体光纤的 色散特性研究^{*}

崔艳玲^{1)†} 侯蓝田¹⁾²⁾

1) (燕山大学红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学亚稳材料制备技术与科学重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2009 年 5 月 6 日收到; 2009 年 7 月 22 日收到修改稿)

以多极法理论为基础, 设计了一种混合双包层结构的光子晶体光纤. 通过改变其五层空气孔的四个结构参数 (内层空气孔直径、外层空气孔直径、六边形孔间距和八边形孔间距), 理论上实现了色散绝对值在 1.44—2.0 μm 的波段内变化仅为 1.25 $\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 的平坦色散特性. 在此情况下对其损耗进行了数值模拟, 使所设计的光纤在 1.44—2.0 μm 的宽波段范围内具有小于 0.005 dB/km 的低限制损耗特性.

关键词: 光子晶体光纤, 多极法, 平坦色散, 限制损耗

PACC: 4280M, 4281D, 8120J

1. 引 言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 是一种由单一材料构成, 包层中具有周期性光波长度级空气孔结构的新型光纤^[1]. 它所具有的独特性质, 均是由包层中的二维光子晶体结构带来的. 这些特性主要包括: 无截止单模^[2], 可控的模式面积和高双折射, 较宽波长范围内可控的色散特性^[3,4], 作为传输介质的高非线性特性等.

虽然 PCF 具有以上特性, 但其与普通的通信光纤相比, 损耗仍很大 (普通光纤已达到 0.2 dB/km, 而 PCF 目前一般仍为 20 dB/km). 高损耗对其走向实用化是一个很大的制约. 为了克服这种限制, 之前已经出现了利用 PCF 可控的色散特性来控制其损耗的研究, 即通过实现在一定波段内的色散平坦化来减小其限制损耗, 而这种方法被证明是具有一定可行性和现实意义的. 目前, 有关此方面的报道已较多, 而且也取得了一定的进展, 损耗也在不断地降低 (已有达到 1.7 dB/km 的报道). 但大部分的研究仅局限于六边形或八边形的特定包层结构, 形式较单一.

本文提出了一种由六边形和八边形相结合的混合双包层光子晶体光纤结构, 并以所设计的光子晶体光纤的五层空气孔为研究对象, 通过改变其五层空气孔的四个结构参数 (内层空气孔直径 d_1 、外层空气孔直径 d_2 、六边形孔间距 Λ 和八边形孔间距 Λ_1), 使其在一定波段具有低损耗和平坦色散特性, 并对其进行了数值模拟和理论分析.

2. 理论基础

根据多极法 (multi-pole method, MPM)^[5], 第 l 个空气孔的内部的模场可以展开成 Bessel 函数的形式, 其电场纵向分量在极坐标系下可以表述为^[6]

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m^{(l)} J_m(k_{\perp}^i r_l) \times \exp(im\phi_l) \exp(i\beta z), \quad (1)$$

在第 l 个空气孔近邻的介质中, 其电场纵向分量为

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [b_m^{(l)} J_m(k_{\perp}^e r_l) + c_m^{(l)} H_m^l(k_{\perp}^e r_l)] \times \exp(im\phi_l) \exp(i\beta z), \quad (2)$$

其中, $k_{\perp}^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$, $k_{\perp}^e = (k_0^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2}$, 空气

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2003CB314905)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60637010) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2003AA311010) 资助的课题.

[†] E-mail: hero_8281@yahoo.com.cn

的折射率 $n_i = 1$, n_e 是石英折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是自由空间的波数, 同理可得磁场分量的表达式.

在空气孔的边界面上, 利用电磁场的边界条件, 可以得到关于 $a_m^{(l)}$, $b_m^{(l)}$ 和 $c_m^{(l)}$ 的表达式, 进一步通过 $n_{\text{eff}} = \beta/k$ 求得 PCF 的基模有效折射率 n_{eff} .

进而可求得 PCF 的色散系数^[7]

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

其中 λ 为在光纤中传输光的波长, c 为真空中的光速.

为了进一步观察色散的变化规律, 对色散求一阶导数, 这样就得到了色散斜率

$$D_s = \frac{dD}{d\lambda}. \quad (4)$$

光纤的限制损耗是衡量纤芯对光场局域能力的, 主要由包层结构参数 (空气孔直径 d 和孔间距 Λ) 来控制, 它可表述为

$$L = 8.686 \times \text{Im}[k_0 n_{\text{eff}}], \quad (5)$$

其中 L 为光纤基模的限制损耗, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数.

3. 混合双包层光子晶体光纤的设计和数值模拟

图 1 所示为所设计的六边形和八边形相结合的混合双包层 PCF (double-cladding hybrid photonic crystal fiber, DC-HyPCF) 的端面图, 其结构参数: 六边形的孔间距及八边形的环间距 $\Lambda = 1.7 \mu\text{m}$, 八边形同一层孔间距 $\Lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$, 最内层六边形空气孔直径 $d_1 = 0.595 \mu\text{m}$, 其余空气孔直径 $d_2 = 1.12 \mu\text{m}$. 与传统六边形 PCF 不同的是, 八边形两个相邻顶点间的夹角为 45° ^[8]. 因此, 与传统的 PCF 相比, 在空气孔环数相同时, 八边形包层具有更多的空气孔数. 例如, 对于空气孔环数分别为 1, 2, 3, 4 时, 八边形空气孔数为 8, 24, 48, 80, 而三角形排列的六边形空气孔数为 6, 18, 36, 60. 因此, 在芯区附近可实现较高的空气填充率和较低的折射率, 对光有很强的限制作用.

此外, 由于六边形结构的空气孔排布最有利于优化色散曲线, 而八边形结构可以获得较低的限制损耗^[9], 为了同时满足色散平坦和低损耗的需要, 本文提出了混合双包层 PCF 结构.

由于这种结构的 PCF 色散特性主要是由内芯和周围的空气孔结构决定的, 因此, 内包层结构与

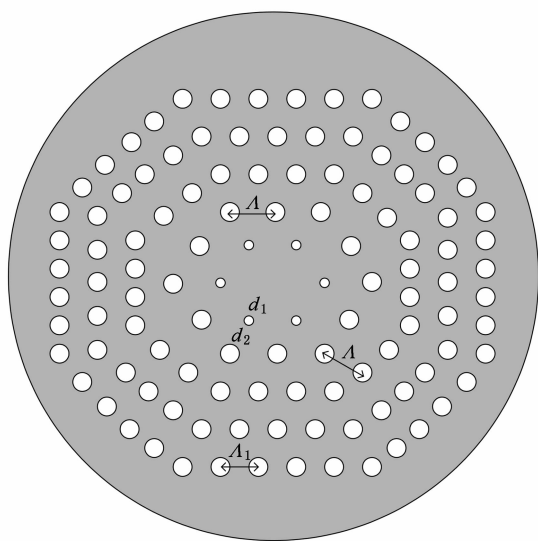


图 1 混合双包层 PCF 的端面图

常规 PCF 相同时, 可以实现相似的色散特性. 通过数值模拟, 可以发现内包层空气孔对色散特性的影响更大, 因为模场在内包层传输. 故本文采用内二层为六边形, 外三层为八边形的结构. 同时, 由全内反射定理^[10]可知, 包层的周期性结构对于高折射率芯导光几乎没有影响, 且具有规则结构的 PCF 难以在宽波段获得平坦色散^[11], 故本文将最内一层空气孔的直径缩小以调节光纤的色散特性.

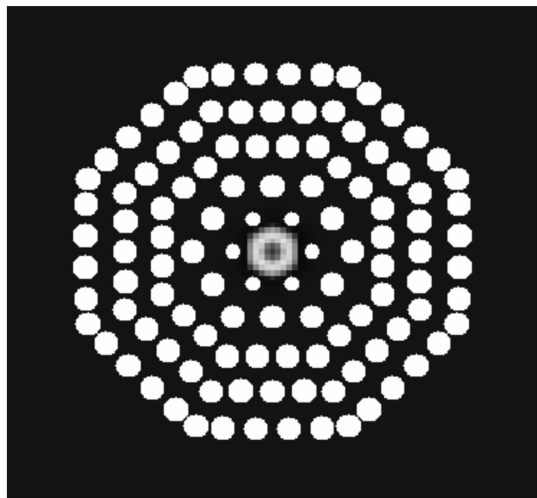


图 2 DC-HyPCF 基模的纵向 Poynting 矢量图

图 2 表示混合双包层 PCF (DC-HyPCF) 基模的纵向 Poynting 矢量 S_z , 对应的结构参数为: 六边形的孔间距及八边形的环间距 $\Lambda = 1.7 \mu\text{m}$, 八边形同一层空气孔的孔间距 $\Lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$, 内环六边形空气孔

直径 $d_1 = 0.595\text{ }\mu\text{m}$, 其余空气孔直径 $d_2 = 1.12\text{ }\mu\text{m}$. 由图看出能量很好地被束缚在纤芯中.

PCF 的色散特性之所以可以调节, 主要是由于通过改变其结构参数 (如孔径 d 和孔间距 Λ) 可以改变包层的等效折射率, 进而改变纤芯传输模的有效折射率. 以下我们讨论了自由变量 $d_1, d_2, \Lambda, d_1/\Lambda$ 分别变化时, 光纤的有效折射率实部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$, 色散 D , 色散斜率 D_s 和限制损耗 L 随波长 λ 的变化情况.

3.1. 色散随 d_1/Λ 和波长 λ 的变化关系

由图 3(a) 可以看出, 固定 $\Lambda = 1.7\text{ }\mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.3\text{ }\mu\text{m}$, $d_2 = 1.12\text{ }\mu\text{m}$, d_1/Λ 分别为 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 时, 在 $1.44\text{--}2.0\text{ }\mu\text{m}$ 波段, 基模有效折射率随波长的增大而逐渐减小, 但变化率基本不变. 若固定波长不变, 基模有效折射率随 d_1/Λ 的增大而减小. 由图 3(b) 可以看出, 随着 d_1/Λ 的增大, 色散曲线先由陡峭趋于平坦, 然后又变得陡峭, 变化范围较大, 说明内径对色散的影响较大: 当 $d_1/\Lambda = 0.30$ 时, 虽然色散曲线较陡峭, 但在 $1.44\text{--}2.0\text{ }\mu\text{m}$ 之间色散的绝对值变化没有超过 $10\text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$; 当 $d_1/\Lambda = 0.35$ 时, 色散曲线趋向于平坦, 而且在 $1.44\text{--}2.0\text{ }\mu\text{m}$ 之间色散变化绝对值仅为 $1.5\text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$; 当 $d_1/\Lambda = 0.40, 0.45, 0.50$ 时, 色散曲线逐渐变得较为陡峭. 因此, 选取 $d_1/\Lambda = 0.35$ 作为平坦色散 PCF 的设计参数. 由图 3(c) 可以看出, 在 $1.44\text{--}2.0\text{ }\mu\text{m}$ 波段, 随着 d_1/Λ 的增大, 色散斜率变小, 色散斜率的绝对值不超过 $0.105\text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$, 但曲线的变化范围却达到 $0.13\text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$, 尤其是当 $d_1/\Lambda = 0.35$ 时, 色散斜率几乎为零, 这说明内径的变化对色散斜率的影响较大.

3.2. 色散随 d_1 和波长 λ 的变化关系

利用多极法进行大量数值模拟后发现: 当 $d_1 = 0.595$ 时, 所得到的色散曲线较为平坦, 且满足 $d_1/\Lambda = 0.35$. 为了进一步检验所设计光纤实际制备后的色散效果, 将光纤拉制过程中可能引起的直径变动^[12]也考虑进来, 使 d_1 在 $\pm 1\% \text{--} \pm 5\%$ 变化. 由图 4(a) 可以看出, 当 d_1 在 $\pm 1\%$ 之间变化时, 此 DC-HYPCF 色散系数在 $1.44\text{--}2.0\text{ }\mu\text{m}$ 波段仅有不超过 $1.5\text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 的变化, 仍然保持平坦的色散特性, 故放宽了对实际光纤的制备精确度的要求. 此外, 不难看出在波长 $1.65\text{ }\mu\text{m}$ 附近为色散系数的变

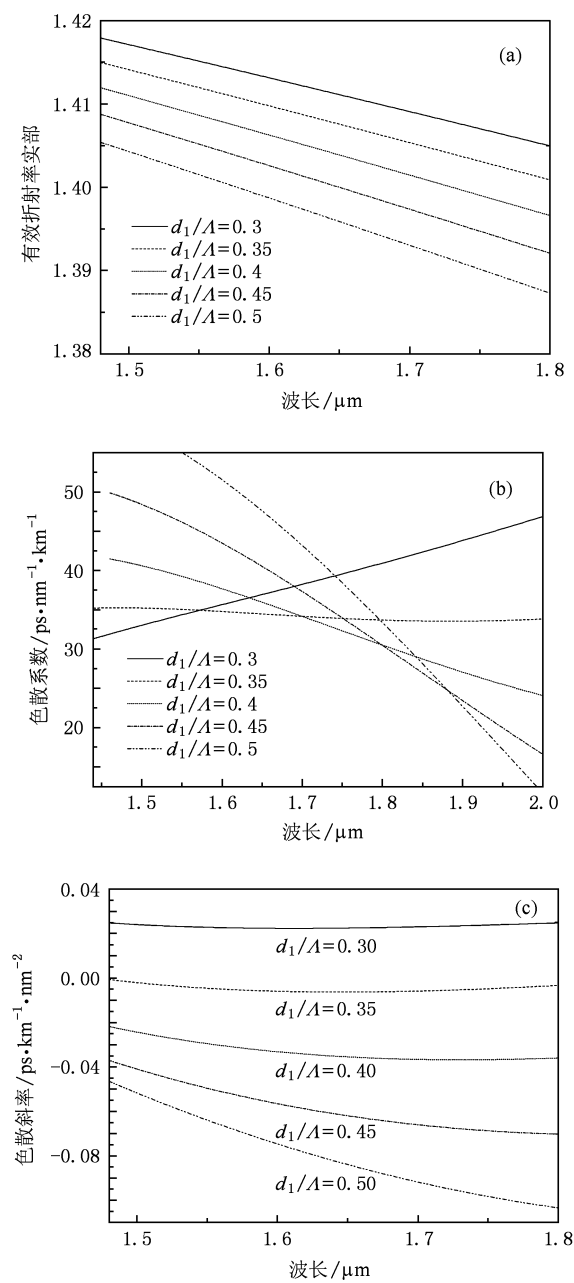


图3 $\Lambda = 1.7\text{ }\mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.3\text{ }\mu\text{m}$, $d_2 = 1.12\text{ }\mu\text{m}$, $d_1/\Lambda = 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50$ 时, 各参数随波长变化曲线 (a) 基模有效折射率实部, (b) 色散系数, (c) 色散斜率

化分界点. 在 $1.44\text{--}1.65\text{ }\mu\text{m}$ 波段范围内, 随着 d_1 的增大, 色散系数也随之增大; 在 $1.65\text{--}2.0\text{ }\mu\text{m}$ 波段范围内, 与传统 PCF 相同^[13], 增大最内层空气孔的直径 d_1 , 色散系数在高波段处逐渐变小. 而由图 4(b) 可以看出, 在同一波长处, 随着 d_1 的增大, 色散斜率变小, 但变化率几乎相同. 而且 d_1 在 $\pm 1\% \text{--} \pm 5\%$ 变化时, 色散斜率的绝对值的变化范围不超过 $0.01\text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$, 这为设计具有平坦色散特性的 DC-HYPCF 提供了很好的理论依据.

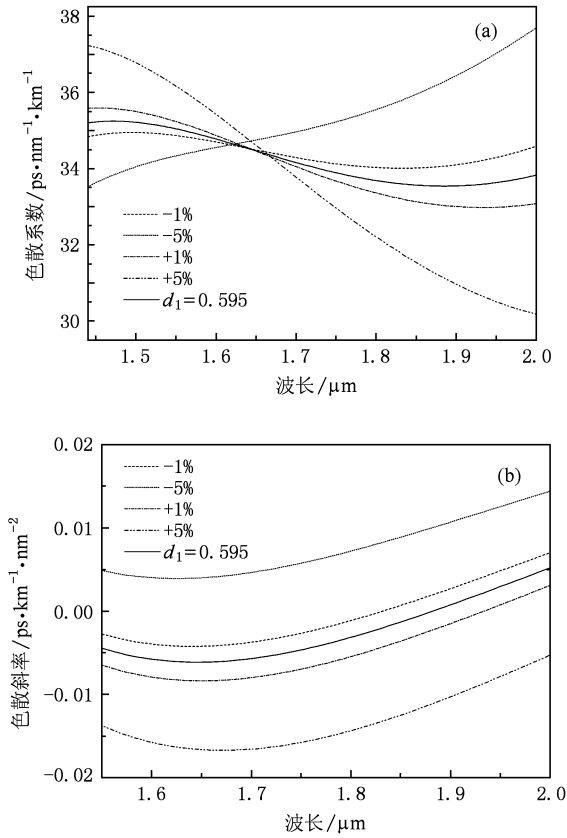


图4 $\Lambda = 1.7 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.12 \mu\text{m}$ 时, 当 $d_1 = 0.595$, 且 d_1 在 $\pm 1\% \sim \pm 5\%$ 变化时, 各参数随波长变化曲线
(a) 色散系数, (b) 色散斜率

3.3. 色散随 d_2 和波长 λ 的变化关系

同样, 为了进一步检验所设计光纤实际制备后的色散效果, 将光纤拉制过程中可能引起的直径变动^[12]也考虑进来, 使 d_2 在 $\pm 1\%$ 之间变化. 由图 5 (a) 可以看出, 当 d_2 在 $\pm 1\%$ 之间变化时, 此混合双包层 PCF 在 $1.44 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段, 色散曲线有较大变化. 不难看出, d_2 增大 1% 时, 色散系数随之向上平移, 色散曲线形状变化较小, 这为进一步设计色散系数可调的 PCF 提供了依据. 由图 5 (b) 可以看出, 在同一波长处, 随着 d_2 的增大, 色散斜率变小, 但变化率几乎相同. 通过数值模拟发现, 内包层空气孔 d_1 对混合双包层 PCF 色散特性的影响更大, 因为模场主要在内包层传输, 故本文对 d_2 的作用不做过多考虑.

3.4. 色散随 Λ 和波长 λ 的变化关系

由图 6 (a) 可以看出, 固定 $\Lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$, $d_1 =$

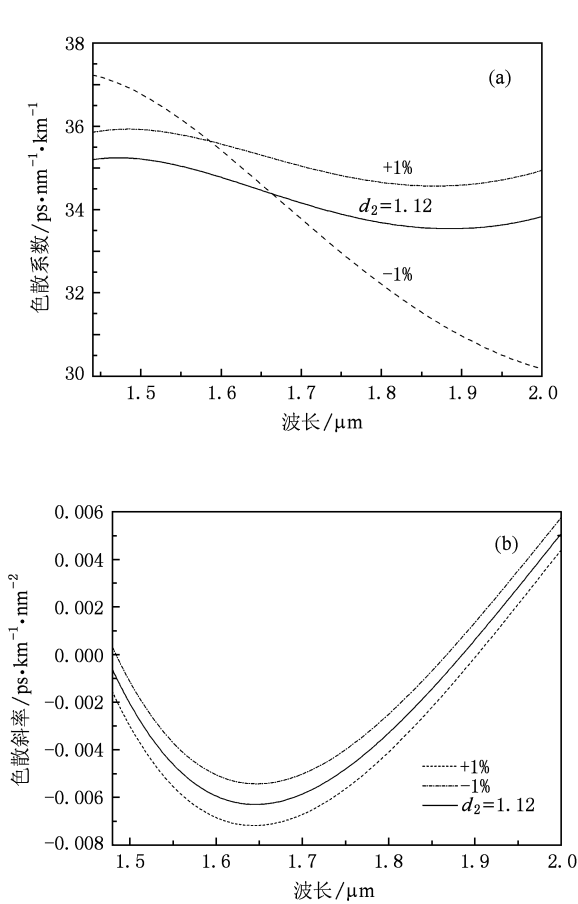


图5 $\Lambda = 1.7 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.595 \mu\text{m}$ 时, 当 $d_2 = 1.12 \mu\text{m}$, 且 d_2 在 $\pm 1\%$ 变化时, 各参数随波长变化曲线
(a) 色散系数, (b) 色散斜率

$0.595 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.12 \mu\text{m}$ 不变, 当 Λ 分别为 $1.5, 1.6, 1.7 \mu\text{m}$ 时, 在 $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段, 色散系数随波长的增大而逐渐减小. 但是, 随着 Λ 的增大, 可以发现当 $\Lambda = 1.7 \mu\text{m}$ 时, 色散曲线趋于平坦, 故本文选取 $\Lambda = 1.7 \mu\text{m}$ 为混合双包层 PCF 的设计参数. 由图 6 (b) 可以看出, 随着 Λ 的增大, 限制损耗随波长的变化趋近于零. 实验发现, 当 $\Lambda = 1.7 \mu\text{m}$ 时, 在 $1.44 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段, 限制损耗小于 0.005 dB/km , 而 PCF 目前一般为 20 dB/km , 这样的损耗值相对于传统 PCF (规则结构) 已经降低了很多. 但是我们这里所说的损耗主要是指由结构参数决定的限制损耗, 在实际制备中, 由于设备和工艺上的限制, 难免会引入由于结构缺陷而产生的泄漏损耗^[14]. 由于计算时间限制, 本文只模拟了内五层结构. 若考虑层数较多的情况, 则其设计形式会更加多样, 有可能在较宽波段范围内达到超平坦色散, 而且其损耗也会进一步降低, 甚至可忽略不计.

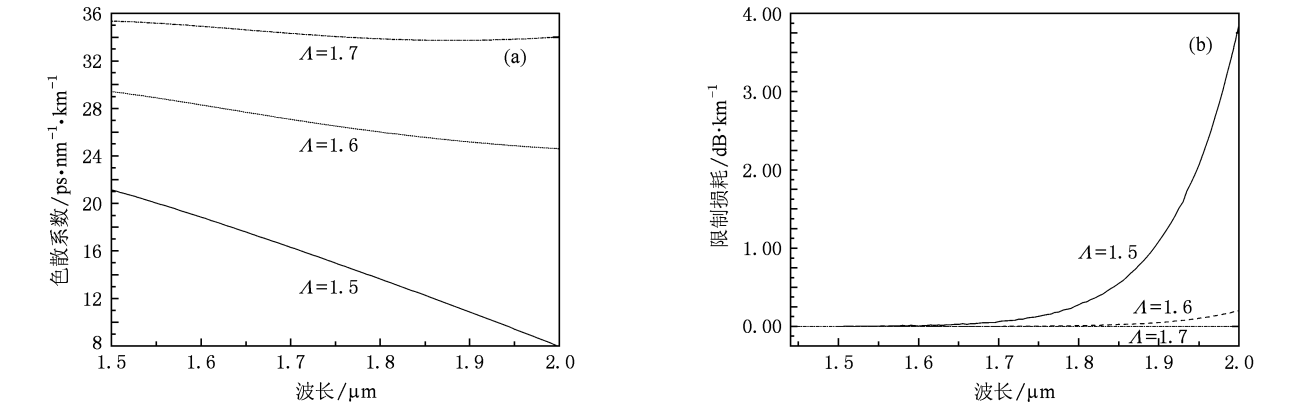


图6 $\Lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.595 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.12 \mu\text{m}$ 时, 各参数随波长变化曲线 (a) 色散系数, (b) 限制损耗

3.5. 色散随 d_1, d_2 和波长 λ 的变化关系

由图 7(a) 可以看出, 当 d_1, d_2 同时在 $\pm 1\%$ 之间变化时, 此混合双包层 PCF 在 $1.44\text{--}2.0 \mu\text{m}$ 波段, 色散曲线的变化趋势基本相同, 色散的最大变化范围没有超过 $2.25 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$. 但值得注意的是, 当 d_1, d_2 同时减小 1% 时, 色散曲线

趋于平坦, 而且在 $1.44\text{--}2.0 \mu\text{m}$ 之间色散变化绝对值仅为 $1.25 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 实现了平坦色散的特性. 由图 7(b) 可以看出, 色散斜率变化较小, 且变化率几乎相同. 这为进一步设计出色散更为平坦的混合双包层 PCF 做好了铺垫, 也为此种混合双包层 PCF 的实际制备的可行性提供了较好的理论依据.

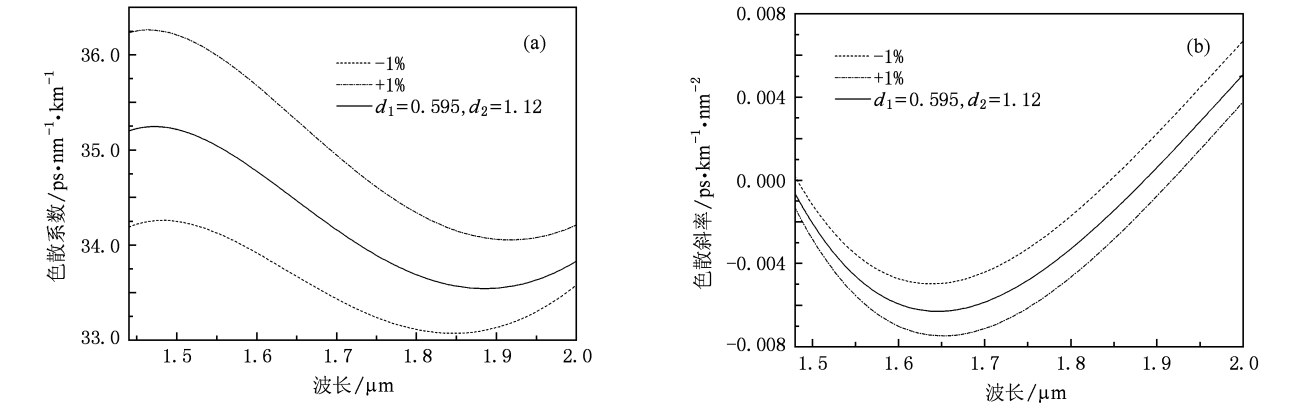


图7 $\Lambda = 1.7 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 1.3 \mu\text{m}$, 当 $d_1 = 0.595 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.12 \mu\text{m}$ 时, d_1, d_2 同时发生 $\pm 1\%$ 变化时, 各参数随波长变化曲线 (a) 色散系数, (b) 色散斜率

4. 结 论

综合以上的设计、模拟和分析, 通过改变混合双包层光子晶体光纤的结构参数可以实现其在宽波段范围内保持低损耗和平坦色散的传输特性. 实现了色散绝对值在 $1.44\text{--}2.0 \mu\text{m}$ 的波段内变化仅为 $1.25 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 的平坦色散特性, 并使所设计的光纤在 $1.44\text{--}2.0 \mu\text{m}$ 的宽波

段范围内具有小于 0.005 dB/km 的低限制损耗特性. 平坦色散有利于实现非线性光学中的相位匹配, 孤子脉冲的产生和传输, 宽广且平坦的超连续谱的产生等. 而低损耗则可以增大光纤的传输效率, 为其实现实用化提供了一定的理论依据. 不可否认, 由于此种混合双包层 PCF 结构的特殊性, 其在制作工艺上可能会存在着毛细管堆棒的复杂性等问题, 目前正在考虑用改进的堆叠法制作 PCF, 改善制作工艺.

- [1] Wei D B, Zhou G Y, Zhao X T, Yuan J H, Meng J, Wang H Y, Hou L T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3011 (in Chinese) [魏东宾、周桂耀、赵兴涛、苑金辉、孟 佳、王海云、侯蓝田 2008 物理学报 **57** 3011]
- [2] Kaijage S F, Namihira Y, Hai N H, Begum F, Razzak S M A, Kinjo T, Miyagi K, Zou N Y 2009 *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** 52401
- [3] Im S J, Husakou A, Herrmann J 2009 *Opt. Express* **17** 13050
- [4] Li S G, Liu X D, Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1873 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1873]
- [5] Li S G, Xing G L, Zhou G Y, Hou L T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 238 (in Chinese) [李曙光、邢光龙、周桂耀、侯蓝田 2006 物理学报 **55** 238]
- [6] Knight J C, Russell P S J 2002 *Science* **296** 276
- [7] Zhao X T, Hou L T, Liu Z L, Wang W, Wei H Y, Ma J R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2275 (in Chinese) [赵兴涛、侯蓝田、刘兆伦、王 伟、魏红彦、马景瑞 2007 物理学报 **56** 2275]
- [8] Razzak S M A, Namihira Y, Begum F 2007 *Electron. Lett.* **43** 615
- [9] Kaneshima K, Namihira Y, Zou N, Higa H, Nagata Y 2006 *IEICE Trans. Electron.* **E89-C** 830
- [10] Saitoh K, Koshiba M, Hasegawa T, Sasaoka E 2003 *Opt. Express* **11** 843
- [11] Razzak S M A, Namihira Y 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 1909
- [12] Reeves W H, Knight J C, Russell P S J, Roberts P J 2002 *Opt. Express* **10** 609
- [13] Poletti F, Finazzi V, Monro T M, Broderick N G R, Tse V, Richardson D J 2005 *Opt. Express* **13** 3728
- [14] Chen M Y 2007 *Opt. Express* **15** 12498

Dispersion characteristic of a new hybrid cladding photonic crystal fiber^{*}

Cui Yan-Ling^{1)†} Hou Lan-Tian¹⁾²⁾

1) (Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (Key Laboratory of Metastable Material Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 6 May 2009; revised manuscript received 22 July 2009)

Abstract

Based on multi-pole method theory, a kind of hybrid cladding photonic crystal fiber (PCF) is designed. It has been shown theoretically that it is possible to obtain flattened dispersion character of dispersion absolute value $1.25 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ within the wave band of $1.44 \text{ } \mu\text{m}$ to $2.0 \text{ } \mu\text{m}$ by altering four structure parameters of the five-ring hybrid cladding in the PCF (namely the diameter of the inner ring hole, the diameter of the outer four ring holes, the pitch of the hexagon and the pitch of the octagon). Moreover, value simulation results show that in the PCF low confinement loss of 0.005 dB/km in the $1.44\text{—}2.0 \text{ } \mu\text{m}$ wavelength range can be achieved.

Keywords: photonic crystal fiber, multi-pole method, flattened dispersion, confinement loss

PACC: 4280M, 4281D, 8120J

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2003CB314905), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60637010) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2003AA311010).

[†] E-mail: hero_8281@yahoo.com.cn