

具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计

徐闵喃 周桂耀 陈成 侯峙云 夏长明 周概 刘宏展 刘建涛 张卫

Analysis of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay

Xu Min-Nan Zhou Gui-Yao Chen Cheng Hou Zhi-Yun Xia Chang-Ming Zhou Gai Liu Hong-Zhan Liu Jian-Tao Zhang Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 234206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低差分模式时延少模光纤的有限元分析及设计

[Finite element analysis and design of few mode fiber with low differential mode delay](#)

物理学报.2015, 64(6): 064212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064212>

拉锥型啁啾光纤光栅滤波器的研究

[Study on tapered chirped fiber grating filter](#)

物理学报.2013, 62(21): 214213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214213>

V型高双折射光子晶体光纤超连续谱产生的实验研究

[Supercontinuum experimental study of V-type photonic crystal fiber with high birefringence](#)

物理学报.2013, 62(21): 214212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214212>

微结构芯大模场平顶光纤及其传输特性分析

[Investigation on large-mode-area flat-topped optical fiber with microstructured core and its transmission characteristics](#)

物理学报.2013, 62(17): 174211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.174211>

微纳光纤端面反射特性的实验测量方法

[Measurement of end-face reflection property of micro-nano fibers](#)

物理学报.2013, 62(14): 144216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144216>

具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计*

徐闵喃 周桂耀[†] 陈成 侯峙云 夏长明 周概 刘宏展
刘建涛 张卫

(华南师范大学, 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东高校特种功能光纤工程技术研究中心, 广州 510006)

(广东省微结构功能光纤与器件工程技术研究中心, 广州 510006)

(2015年6月30日收到; 2015年8月2日收到修改稿)

针对光纤空分复用及模分复用传输系统中大容量和耦合串扰问题, 本文提出了一种具有四模式特性低串扰及大群时延的大容量多芯微结构光纤, 通过有限元法计算该光纤电磁场分布进而对其他参数进行分析. 结果表明: 合理的选定光纤结构参数, 可使得该光纤在C+L波段内同时实现19芯的LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂四个偏振模式的传输. 同时, 利用空气孔对电磁场较好的隔离作用来优化芯间串扰并得到较大的模式差分群时延及较为平坦的色散. 此外, 这种结构的光纤制作简单, 在短距离大容量的信息传递系统中具有重要应用.

关键词: 微结构光纤, 多芯光纤, 低串扰, 大群时延

PACS: 42.81.-i, 42.79.Sz, 47.11.Fg, 42.81.Dp

DOI: 10.7498/aps.64.234206

1 引言

随着光纤通信系统的迅速发展, 为提高数据传输容量, 基于少模光纤(FMF)和多芯光纤(MCF)的空分复用(SDM)技术及模分复用(MDM)技术等已得到广泛关注^[1-4]. 光纤通信系统中采用的模式复用技术将少模光纤中传输的有限个稳定模式作为独立信道来传递信息. 相比于单模光纤, 大大提高了传输容量和传输速率. 较多模光纤, 通过改变少模光纤的各结构参数, 可简单方便的控制模式数量, 降低模式间的串扰和控制色散, 减少长距离的传输损耗^[5]. 多芯光纤的每个纤芯传输的不同模式相互独立, 并且各模式相互正交, 可实现高速、大容量传输, 具有结构设计灵活, 非线性效应较弱等优点^[6]. 但是, 受限于光纤的尺寸, 纤芯之间的间隔不能太大, 各个纤芯中的模式易于相互叠加耦合, 模间串扰比较大. 目前, 实现低串扰独立型的

多芯光纤主要有利用纤芯周围加辅助孔的孔辅助型多芯光纤或利用掺杂等方法使光纤各个纤芯周围形成低折射率沟道的下陷层多芯光纤, 利用沟道结构能将能量很好的限制在纤芯内, 从而降低模间串扰^[7,8].

模式差分群时延(MDGD)是影响基于FMF的MDM系统设计的重要因素之一. MDGD是由于在少模光纤中不同模式具有不同的有效折射率而形成的模式间的时延, 即少模光纤中支持传输的各个导模在光纤中以不同的传播速度传输一段距离后出现时延^[9]. 具有小MDGD的少模光纤模间串扰较大, 而具有大MDGD的少模光纤, 其较小的模间耦合有利于抑制少模光纤传输过程中的模式串扰及非线性传输损伤, 能保证各个模式信道传输相对独立^[10]. 2011年澳大利亚墨尔本大学提出一种具有大MDGD的双模掺锗阶跃型折射率光纤, 应用于多路SDM系统中^[11]. 近期, 微结构光纤

* 国家自然科学基金(批准号: 61377100, 61575066)、国家自然科学基金重大仪器专项项目(批准号: 61527822)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20134407120014)和广东省自然科学基金项目(批准号: S2013040015665)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zguyao@163.com

(PCF) 由于其高非线性、高双折射性、色散可调等优良光学特性备受关注^[12]. 因此, 设计一种工程上比较容易实现的具有大MDGD的少模多芯微结构光纤具有一定的意义.

本文提出了一种具有低串扰、大模式差分群时延、四模式的十九芯微结构光纤. 结合微结构光纤的优良特性, 通过数值方法计算模式的截止条件, 使每个独立纤芯能够支持四种模式传输, 并将光纤直径控制为与标准单模光纤相匹配的125 μm. 采用空气孔隔离的方式, 将光束很好地限制在纤芯内, 合理的改变光纤结构参数, 降低芯间串扰及模式间串扰, 并利用模式间较大的相对折射率差提高MDGD值. 数值模拟结果表明, 相比于近期出现的多芯光纤, 该光纤在包层直径小的情况下包含更多的纤芯, 并有更小的芯间串扰和较大的MDGD. 此外, 该光纤的制备只需调节六边形结构的几何尺寸而不需采用气相沉积法, 降低了工艺的难度.

2 光纤结构的设计

2.1 光纤结构

四模式十九芯微结构光纤横截面如图1所示, 光纤的包层空气孔呈等边六边形排布, 光纤每个纤芯均可看作由六边形排列的空气孔所包围, 十九个纤芯也呈六边形排布. 其中空气孔直径为 d , 相邻空气孔间距为 Λ , 定义相对空气孔径 $f = d/\Lambda$, 石英包层直径为125 μm, 折射率为 n_{cl} , 纤芯材料折射率为 n_{co} , 芯包折射率差 $\Delta n = n_{co} - n_{cl}$.

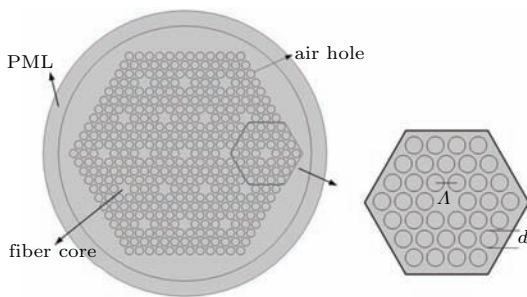


图1 四模式十九芯微结构光纤横截面结构示意图
Fig. 1. Cross section of the proposed 4-mode PCF with 19 cores.

2.2 十九芯四模微结构光纤的设计

用来表征十九芯四模微结构光纤的结构参量有: 空气孔间距 Λ 、相对空气径大小 $f = d/\Lambda$. 首

先, 光纤单芯结构中可传输的模式数目的截止条件可由归一化频率决定^[3]:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}, \quad (1)$$

其中 a 为纤芯的有效半径. 考虑到满足四个模式与五个模式传输的 V 值之间差距较大, 而四个模式更便于控制, 选定该光纤支持四个模式(LP₀₁, LP₁₁, LP₁₂, LP₀₂)传输, 则归一化截止频率需满足: $3.8 < V < 5.1$. 其次, 为保证该光纤在C+L波段能稳定传输前四阶偏振模式, 即满足LP₃₁的截止波长需低于1530 nm, LP₀₂的截止波长需低于1625 nm. 通过利用微结构光纤的等效近似和归一化 V 值可计算PCF的结构参数^[13]. 此外, 由图1看出由于该光纤包含十一层空气孔, 要使其与单模光纤相匹配, 则空气孔直径需小于5.435 μm. 通过大量的数值模拟, 如图2所示, 黄色区域为满足该微结构光纤的所有 f 值和 Λ 值. 为确定光纤的结构, 我们对各结构参数对于芯间串扰和模式群时延的影响进行分析讨论.

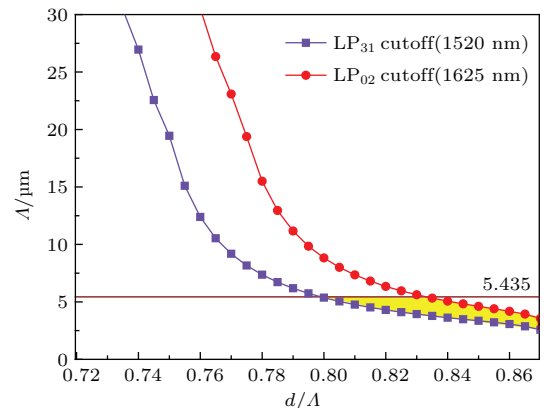


图2 (网刊彩色) C+L波段四模式 d/Λ 与 Λ 关系图
Fig. 2. (color online) 4-mode MC-PCF design for C+L band.

2.3 结构参数对芯间串扰的影响

MCF中必须考虑芯间串扰和模式串扰的影响. 通常, 当同一纤芯中两个模式间的有效折射率差(Δn_{eff})大于 10^{-3} 时模式串扰可以忽略^[14]. 少模MCF中耦合长度和串扰是重要参数, 可用耦合模理论(CMT)对相邻两芯之间的耦合长度和串扰进行分析^[15]. 对于低耦合模式, CMT较其他理论可更合理的计算分析耦合长度(L_c). 两芯之间的归一化能量可通过 $\sin^2(\pi z/(2L_c))$ 得到, 其中 z 为传播长度. 耦合长度(L_c)与耦合系数(C)有如下关系: $L_c = \pi/2C$, 可看出 L_c 随 C 的增大而减小, 二

者成反比关系. L_c 可用来评估多芯光纤的芯间串扰 [16]. 最新研究表明, 由于分布在单个纤芯中的电磁场被相邻空气孔更好的限制, 使得电磁场之间的叠加小, 当隔离孔的占空比大于 0.65 时相邻纤芯间串扰小于折射率沟道方式的芯间串扰, 通过调节光纤的结构参数, 如孔直径、孔间距以及折射率差等, 可以降低耦合系数 C 的大小, 从而优化芯间串扰 [7,17].

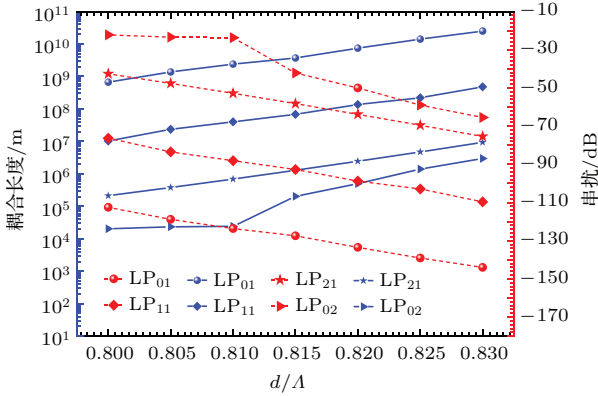


图3 (网刊彩色) $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 时, 相邻芯间耦合长度及串扰随 d/Λ 的变化曲线

Fig. 3. (color online) Coupling length (L_c) and crosstalk of vector modes between adjacent rings as d/Λ when $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$.

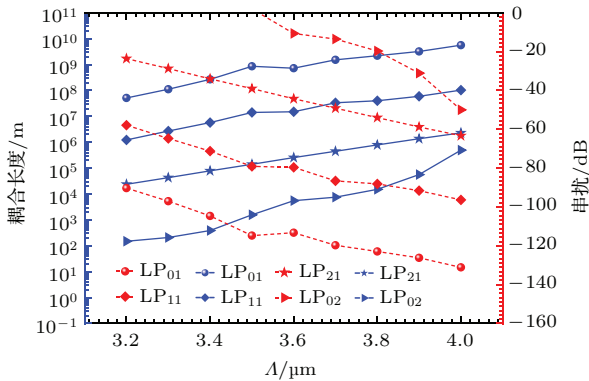


图4 (网刊彩色) $f = 0.86$ 时, 相邻芯间耦合长度及串扰随 Λ 值的变化曲线

Fig. 4. (color online) Coupling length (L_c) and crosstalk of vector modes between adjacent rings as Λ when $f = 0.86$.

为得到光纤各个结构参量对串扰的影响关系, 采用单因子变量法对光纤结构进行分析. 显然, 当随着 d/Λ 增大以及 Λ 值变大时, 可以有效的抑制芯间串扰 [17]. 考虑到容忍度问题, 根据图 2, 选定 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$, 模拟并计算不同的 f 值下的耦合长度和串扰; 亦选定 $f = 0.86$, 模拟并计算不同 Λ 值下的耦合长度和串扰. 如图 3 所示, 左侧蓝色坐标轴表示耦合长度, 右侧红色坐标轴表示传播长度为 1 km 时的串扰, 在 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 时, 随着 f 值的增

大, L_c 基本呈线性上升趋势, 串扰基本呈线性下降趋势. 如图 4 所示, 在 $f = 0.86$ 时, 随着 Λ 值的增大, L_c 基本呈线性上升趋势, 串扰基本呈线性下降趋势.

2.4 结构参数对群时延的影响

MDGD 的表示式为 [18]

$$\tau = \frac{1}{\nu_g} = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk_0}, \quad (2)$$

其中, ν_g 为群速度, c 为真空中的光速, 传播常数 $\beta = n_{\text{eff}} k_0$, k_0 是自由空间的光波波数. 高阶模与低阶模式之间 MDGD 可通过下式计算 [19]:

$$\tau_{\text{MDGD}} = \tau(\text{LP}_{mn}) - \tau(\text{LP}_{01}). \quad (3)$$

结合 2.3 中所讨论的结构参数对芯间串扰的影响, 选取相同的结构参数变量并讨论其对 MDGD 的影响. 如图 5 和图 6 所示, 随着波长增大, 各种模式的

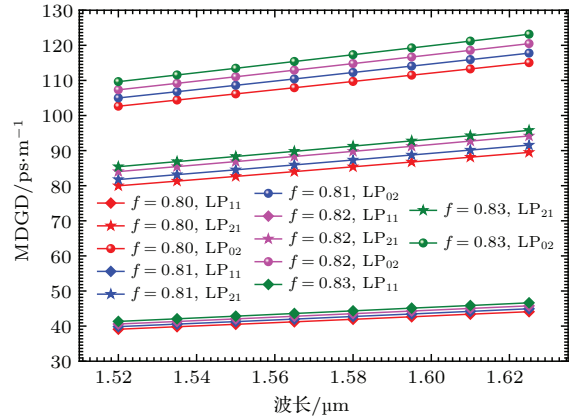


图5 (网刊彩色) $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 时, 不同 f 值下各种模式的 MDGD 随波长的变化曲线

Fig. 5. (color online) Wavelength dependence of the MDGD of modes with various f when $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$.

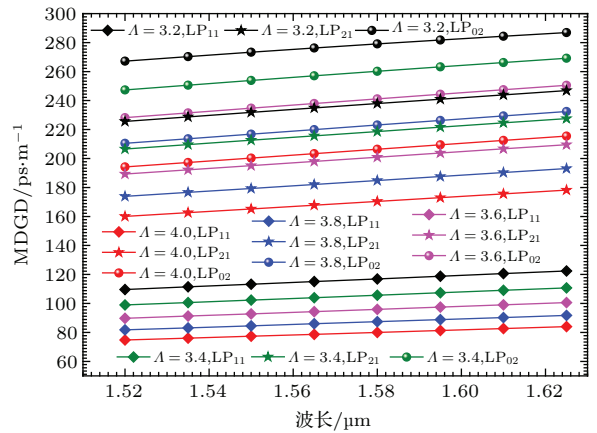


图6 (网刊彩色) $f = 0.86$ 时, 不同 Λ 值下各种模式的 MDGD 随波长的变化曲线

Fig. 6. (color online) Wavelength dependence of the MDGD of modes with various Λ when $f = 0.86$.

MDGD均呈线性上升趋势. 其中, 如图5所示, 在 Λ 值一定的情况下, 随着 f 值的增大, 各种模式的MDGD均增大. 如图6所示, 在 f 值一定的情况下, 随着 Λ 值的增大, 各种模式的MDGD均减小. 但 Λ 值对模式间MDGD的影响远大于 f 值对其的影响.

3 光纤结构参数的确定及分析

3.1 光纤结构参数的确定

基于以上分析可知, 当 f 增大时, 可以得到较大的MDGD和较低的芯间串扰, 且 Λ 增大时, 可得到较低的芯间串扰, 各种模式的MDGD虽然减小但最小值仍比较大. 结合图2, 该光纤的结构参数可以设定为 $f = 0.86$, $\Lambda = 4 \mu\text{m}$. 此外, 较大的 f 值使得结构中两空气孔间隙较小, 提高了光纤纤芯与包层之间的折射率差, 有效减少了光的泄露, 可得到较小的限制损耗. 此时的 V 值为4.12, 利用有限元法模拟得到的 E_z 方向的模场分布和电矢量分布如图7所示. 基于计算得到电磁场分布, 该结构参数下的光纤, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 的芯间串扰分别为 -131.01 dB , -96.36 dB , -63.32 dB , -49.96 dB , 传播长度一致时该串扰远低于已报道

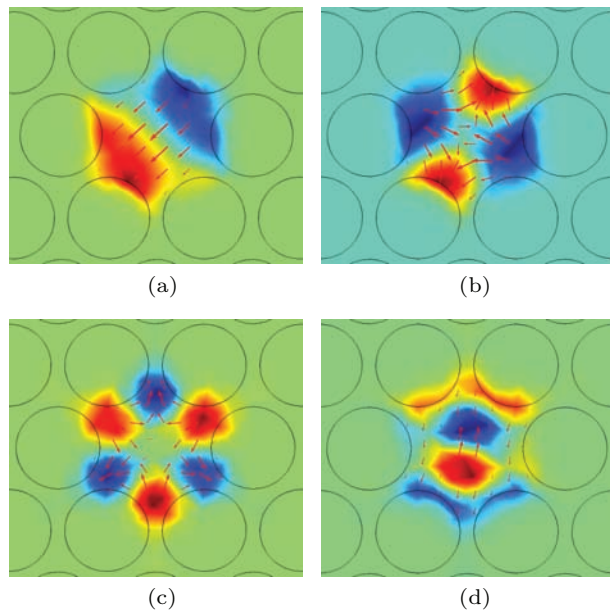


图7 (网刊彩色) 该微结构光纤各模式的模场分布和二维电矢量分布图 (a) LP_{01} 模; (b) LP_{11} 模; (c) LP_{21} 模; (d) LP_{02} 模

Fig. 7. (color online) The mode field distribution and electric vector distribution for each mode of the microstructured fiber (a) the LP_{01} mode; (b) the LP_{11} mode; (c) the LP_{21} mode; (d) the LP_{02} mode.

的孔辅助少模多芯光纤的串扰[7]. 这是因为该光纤结构中空气孔的占空比足够大, 单个纤芯周围的空气孔对其中的电磁场有更加有效的限制, 使电磁场之间的叠加变小. 并且, 各模式MDGD的值均超过 160 ps/m , 均大于已报道的MDGD值[11]. 结合(2)式与(3)式可知模式之间大的有效折射率差 Δn_{eff} 可引起模式间大MDGD. 由于该光纤为微结构光纤, 由空气孔构成的包层折射率较小, 纤芯和包层之间的折射率差 Δn_{eff} 要大于传统光纤, 从而引起较大的MDGD值.

3.2 光纤特性的分析

采用全矢量有限元法, 边界条件为完美匹配层(PML), 分析该光纤的模式特性, 同时计算模式间有效折射率差 Δn_{eff} , 群折射率(n_g)及色散等重要参数. 如图8所示, 左侧蓝色坐标轴及相应曲线表示该光纤各模式的有效折射率, 右侧红色坐标轴及相应曲线表示该光纤各模式的有效折射率差. 对于微结构光纤而言, 纤芯和包层之间的折射率差要大于传统光纤 Δn_{eff} , 因此, 微结构光纤的模间串扰要小于传统光纤的模间串扰. 从图中可以看出, 在C+L波段内, 各模式有效折射率保持相对稳定, 各模式与基模的有效折射率差较大且远大于 10^{-3} , 因此, 同一个纤芯中的模式间串扰可以忽略. 由(2)式可知, MDGD的大小与有效折射率 n_{eff} 有关, 大的 n_{eff} 值引起较大的MDGD值. n_g 作为影响光波在光纤中传播速度的重要参数如图9所示, 模式越高, n_g 值越大, 光波在光纤中的传播速度越慢, n_g 值明显大于 n_{eff} , 与较大的MDGD值相符合.

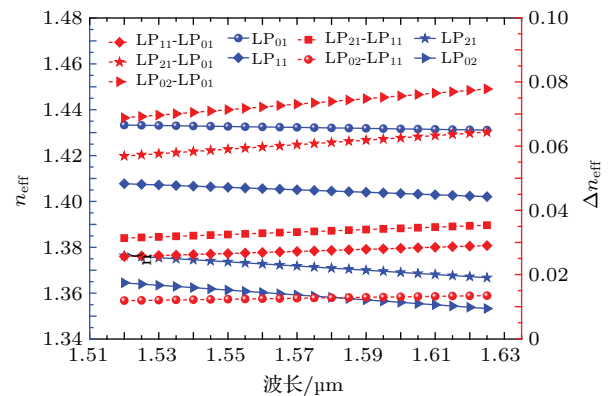


图8 (网刊彩色) 各模式有效折射率及各模式与基模间有效折射率差随波长的变化曲线

Fig. 8. (color online) Wavelength dependence of the effective refractive index (n_{eff}) and n_{eff} difference of all supported modes.

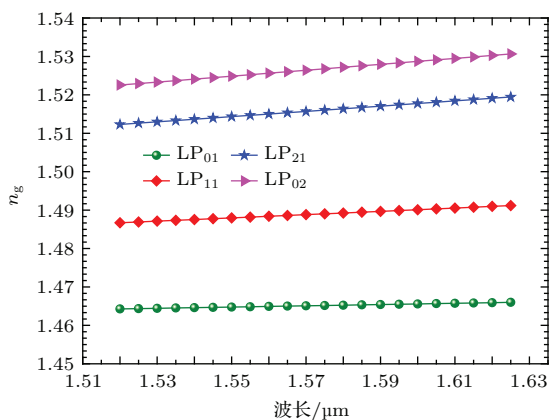


图9 (网刊彩色) 各模式群折射率随波长变化的曲线
Fig. 9. (color online) Wavelength dependence of the group index of all the modes.

色散是光纤的固有特性之一, 微结构光纤的总色散可表示为^[20]

$$D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_\omega(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2} - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2}, \quad (4)$$

其中 $D_m(\lambda)$ 为材料色散, $D_\omega(\lambda)$ 为波导色散, λ 为光纤中传输光的波长, c 为真空中的光速. 计算该结构参数光纤的总色散分布如图 10 所示, 在 C+L 波段, 色散近零且平坦分布. PCF 的色散不仅取决于孔间距, 也与占空比有关. 从色散斜率角度来分析, 当孔间距较小(即代表较大的占空比)时, 色散斜率值较小, 色散曲线较为平坦^[21]. 在占空比较大的情况下, 导模被极强地限制在纤芯区域, 色散值随着空气孔的减小而减小^[22]. 该微结构光纤结构取值 $f = 0.86$ 和 $\Lambda = 4 \mu\text{m}$ 较一般微结构光纤小, 因此总色散近零且趋于平坦分布. 此外, 该光纤的六边形结构包层相对于传统光纤更有利于对色散曲线的优化.

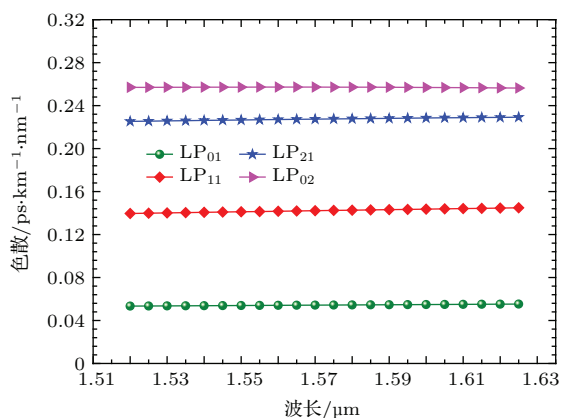


图 10 (网刊彩色) 各模式色散随波长变化的曲线
Fig. 10. (color online) Wavelength dependence of the dispersion parameter of all the modes.

4 结 论

串扰和MDGD是决定少模多芯光纤的重要参数. 本文提出一种新型四模式特性的19芯大容量微结构光纤, 综合比较各结构参数下的芯间串扰和模式差分群时延后确定具体参数, 使得该光纤同时具有低串扰、大模式差分群时延及平坦色散等优良特性, 适用于短距离大容量的信息传递系统中. 此外, 这种光纤制作材料均为石英材料, 不需要采用复杂的气相沉积法, 利用普通的堆拉法便可实现光纤的制作. 该光纤不仅可满足未来大容量高可靠光纤传输系统的需求, 在制作相应高功率器件方面也具有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Sójka L, Pajewski L, Iliwa M, Mergo P, Benson T M, Sujecki S, Bere P E 2015 *Opt. Commun.* **344** 71
- [2] Lars G N, Yi S, Jeffrey W N, Dan J, Kim G J, Robert L, Bera P 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 3693
- [3] Sillard P, Bigot A M, Boivin D, Maerten H, Provost L 2011 *European Conference and Exposition on Optical Communications*, July, 2011 p1
- [4] Agruzov P M, Dukel K V, Ilichev I V, Kozlov A S, Shamrai A V, Shevandin V S 2010 *Quant. Electron.* **40** 254
- [5] Qin W, Li S G, Xue J R, Xin X J, Zhang Lei 2013 *Chin. Phys. B* **22** 074213
- [6] Zheng S W 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [郑斯文 2014 博士学位论文(北京: 北京交通大学)]
- [7] Xia C, Rodrigo A C, Bai N, Enrique A L, Daniel M A, Axel S, Martin R, Jesus L M, Eduardo M, Zhou X, Li G 2012 *IEEE Photonic Tech. L* **24** 1914
- [8] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, Sasaki T, Sasaoka E 2011 *Opt. Express.* **19** 16576
- [9] Jiang S S, Liu Y, Xing E J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 064212 (in Chinese) [姜姗姗, 刘艳, 邢尔军 2015 物理学报 **64** 064212]
- [10] Yao S C, Fu S N, Zhang M M, Tang P, Shen P, Liu D M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 144215 [姚殊畅, 付松年, 张敏明, 唐明, 沈平, 刘德明 2014 物理学报 **63** 144215]
- [11] Li A, Al A A, Chen X, Shieh W 2011 *Opt. Express.* **19** 8088
- [12] Li D M, Zhou G Y, Xia C M, Wang C, Yuan J H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044209
- [13] Kunimasa S, Masanori K 2005 *Opt. Express.* **13** 267
- [14] Salsi M, Koebele C, Sperti D, Tran P, Mardoyan H, Brindel P, Bigo S, Boutin A, Verluise F, Sillard P, Bigot A M, Provost L, Charlet G 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 618
- [15] Mothe N, Bin P D 2009 *Opt. Express.* **17** 15778

- [16] Takenaga K, Arakawa Y, Tanigawa S, Guan N, Matsuo S, Saitoh K, Koshiba M 2011 *IEICE Trans. Commun. E* **94-B** 409
- [17] Katsuhiko T, Yoko A, Shoji T, Ning G, Shoichiro M, Kunimasa S, Masanori K 2011 *Optical Fiber Communication Conference* 2011 p1
- [18] Liu D M, Sun J Q, Lu P 2008 *Fiber Optics 2*(Beijing:Science Press) p73-93[刘德明, 孙军强, 鲁平 2008 光纤光学 2(北京:科学出版社) 第 73-93 页]
- [19] Xie Y W, Fu S N, Zhang M M, Tang P, Shen P, Liu D M 2013 *Acta. Opt. Sin.* **33** 0906010-1 [谢意维, 付松年, 张海亮, 唐明, 沈平, 刘德明 2013 光学学报 **33** 0906010-1]
- [20] Bao Y J, Li S G, Zhang W, An G W, Fan Z K 2014 *Chin. Phys. B* **23** 104218
- [21] Yang W X, Zhou G Y, Xia C M, Wang W, Hu H J, Hou L T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104222 (in Chinese) [杨旺喜, 周桂耀, 夏长明, 王伟, 胡慧军, 侯蓝田 2011 物理学报 **60** 104222]
- [22] Dai N L, Li Y, Peng J G, Li J Y 2011 *Laser. Opt. Pro.* **48** 010602 [戴能利, 李洋, 彭景刚, 李进延 2011 激光与光电子学进展 **48** 010602]

Analysis of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay*

Xu Min-Nan Zhou Gui-Yao[†] Chen Cheng Hou Zhi-Yun Xia Chang-Ming
Zhou Gai Liu Hong-Zhan Liu Jian-Tao Zhang Wei

(South China Normal University, Guangdong Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Specially Functional Fiber Engineering Technology Research Center of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510006, China)

(Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Microstructured Functional Fibers and Devices, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

(Received 30 June 2015; revised manuscript received 2 August 2015)

Abstract

In this paper, a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay is proposed to solve the large transmission capacity and low crosstalk problems in the mode division multiplexing system. Electromagnetic field distribution, crosstalk, mode differential group delay and dispersion of the fiber are studied by using the full-vector finite element method. To determine the particular parameters of the micro-structured fiber, the performances of the inter-core crosstalk and mode differential group delay (MDGD) are considered comprehensively under different conditions. Simulation results show that this fiber can support four-mode transmission with 19 cores over the whole C+L wavelength band when the cladding diameter is 125 μm . The inter-core crosstalks of LP₀₁ mode, LP₁₁ mode, LP₂₁ mode and LP₀₂ mode are -131.01 , -96.36 , -63.32 , -49.96 dB respectively and the mode differential group delays are high as all of them are more than 160 ps/m. Therefore, compared with the previous work, this fiber has the lower inter-core crosstalk and larger MDGD. Owing to the large index difference between core and cladding, the n_{eff} differences between the linearly polarized modes are all larger than 10^{-3} across the whole operating wavelength band, which is beneficial to low inter-mode crosstalk. Furthermore, the fabrication of this fiber is simple due to its preforming only need stacking technique to adjust the hexagonal structure geometry size without complex modified chemical vapor deposition process involved. The designed fiber can be used in short-distance and large-capacity transmission system, and it has potential applications in making the corresponding high power devices.

Keywords: micro-structured fiber, multi-core fiber, low level crosstalk, high differential group delay

PACS: 42.81.-i, 42.79.Sz, 47.11.Fg, 42.81.Dp

DOI: 10.7498/aps.64.234206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61377100, 61575066), the Major Instrument Project of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61527822), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China (Grant No. 20134407120014), and the Guangdong Natural Science Foundation, China (Grant No. S2013040015665).

[†] Corresponding author. E-mail: zguyao@163.com