

低差分模式时延少模光纤的有限元分析及设计

姜珊珊 刘艳 邢尔军

Finite element analysis and design of few mode fiber with low differential mode delay

Jiang Shan-Shan Liu Yan Xing Er-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 064212 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.064212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

一种与标准单模光纤高适配的低弯曲损耗光子晶体光纤

[A high-compatibility low-bending-loss photonic crystal fiber with standard single mode fiber](#)

物理学报.2013, 62(10): 104217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104217>

低差分模式时延少模光纤的有限元分析及设计*

姜珊珊 刘艳† 邢尔军

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(2014年7月3日收到; 2014年9月11日收到修改稿)

针对少模光纤展开研究, 利用 Comsol 软件计算其模场分布、有效折射率, 进而分析光纤的差分模式时延. 通过分析不同结构参量对模式数量和差分模式时延的影响, 设计出了两种低差分模式时延的少模光纤, 即带有外下陷的渐变式光纤和多阶少模光纤. 波长在 1530—1570 nm 范围内, 带有外下陷的渐变式光纤支持四模传输, LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式的差分模式时延的绝对值小于 $0.015 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$; 多阶少模光纤支持两模传输, LP_{11} 的差分模式时延低于 $0.185 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$. 两种少模光纤均具有良好的差分模式时延特性, 适于在模分复用技术中应用.

关键词: 模分复用, 少模光纤, 差分模式时延

PACS: 42.81.-i, 42.79.Sz

DOI: 10.7498/aps.64.064212

1 引言

单模光纤传输系统容量始终无法突破它固有的香农极限. 为了使通信系统容量能进一步提高, 基于少模光纤的模分复用技术 (mode division multiplexing, MDM) 应运而生^[1]. 利用少模光纤中有限的正交模式作为独立信道进行信息传送, 以成倍地提升系统传输容量^[2]. 由于少模光纤的模式具有比较大的模场面积, 因此其非线性容限也很高, 这样既提高了光传输系统的容量, 又避免了非线性效应对系统的干扰. 理论上, 利用 MDM 技术, 少模光纤可以实现 N 个独立的导模的传输. 适合应用于模分复用系统的高性能的少模光纤的研究与设计目前已成为光纤通信领域的又一研究热点.

差分模式时延 (differential mode delay, DMD) 是评判少模光纤传输性能的重要参数. 少模光纤中, 不同的模式具有不同的有效折射率, 导致模式间存在时延. DMD 需要利用多输入多输出均衡来补偿, 从而增加均衡复杂性. 为减小均衡复杂

性, 方法有两个: 使用具有小 DMD 的少模光纤和使用具有正负 DMD 的光纤来补偿 DMD^[3,4]. 2012 年, Grüner-Nielsen 等^[5] 设计了带有外下陷的渐变式两模光纤, DMD 为 $0.076 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$. 2013 年, 文献^[6] 设计了一种带有外下陷的渐变式四模光纤, 波长在 1530 nm 处三个高阶模的 DMD 为 -0.049 , -0.258 , $-0.168 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$, 文中还分析了多阶两模光纤, DMD 低至 $2.49 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$.

本文设计了两种少模光纤, 即带有外下陷的渐变式光纤和多阶 (multi-step-index, MSI) 少模光纤. 综合考虑光纤损耗和 DMD 的大小, 通过合理改变光纤的结构和参数, 降低 DMD, 控制光纤模式数量, 使设计出的少模光纤具有更优越的差分模式时延特性. 在 1530—1570 nm 的波长范围内, 带有外下陷的渐变式光纤支持四模传输, LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式的 DMD 的绝对值均小于 $0.015 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$; MSI 光纤支持两模传输, LP_{11} 的差分模式时延低于 $0.185 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$. 与文献^[5, 6] 所设计的光纤相比, 本文设计的光纤的 DMD 及其斜率更小; 两种光纤结构均比较简单, 易于拉制.

* 北京高等学校青年英才计划项目 (批准号: YETP0530) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2013JBM005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yanliu@bjtu.edu.cn

2 少模光纤的特性分析

2.1 有限元方法

本文利用了 Comsol 软件分析少模光纤的特性. Comsol 软件可通过有限元方法精确地计算导模的传输特性, 可靠地估算模场特性, 如有效折射率、场分布、截止波长. 在有限元方法中, 由标量波动方程来分析导模的性质.

$$\nabla^2 \Phi + k_0^2 [n^2(x, y) - n_{\text{eff}}^2] \Phi = 0, \quad (1)$$

其中, k_0 是真空中波数, n_{eff} 是有效折射率, $n(x, y)$ 是光纤横截面的折射率分布. 给定光纤结构和折射率参数, 根据方程 (1) 就能惟一确定 $n(x, y)$, 从而计算出 n_{eff} . 把研究区域划分成三角形网格, 因为三角形子区间的计算格式是最为简单的, 三角形元素越小, 场域的分割就越细, 计算的精度就会越高. 因而在实际应用中是按精度的要求来决定场域内各处三角形元素的大小, 把求解连续的变分方程问题离散化为求解线性方程组, 再利用给定的边界条件就可以解出本征值. 本文采用有限元方法研究分析了少模光纤的模式特性, 如电场分布、有效折射率及 DMD 等 [7].

2.2 DMD

由于少模光纤中支持的各个导模在光纤中的传输速度不同, 传输一段距离后各个模式信道间的光信号会出现时延, 即产生 DMD. LP_{uv} 模式的

DMD 以 LP_{01} 模式的 DMD 作为参考 [8], 定义为

$$\text{DMD}_{\text{LP}_{\text{uv}}}(\lambda) = [\bar{n}_{\text{g}}^{\text{LP}_{\text{uv}}}(\lambda) - \bar{n}_{\text{g}}^{\text{LP}_{01}}(\lambda)]/c, \quad (2)$$

其中 λ 是波长, c 是光在真空中的传播速度, $\bar{n}_{\text{g}}^{\text{LP}_{\text{uv}}}$ 是群折射率.

$$\bar{n}_{\text{g}}^{\text{LP}_{\text{uv}}} = \bar{n}^{\text{LP}_{\text{uv}}} - \lambda \cdot [d\bar{n}^{\text{LP}_{\text{uv}}}/d\lambda], \quad (3)$$

其中 $\bar{n}^{\text{LP}_{\text{uv}}}$ 是有效折射率.

3 少模光纤的结构设计

3.1 带有外下陷的渐变式少模光纤

带有外下陷的渐变式少模光纤的折射率差与半径的关系如图 1 所示 [9]. 折射率差 Δn 是光纤半径 ρ 的函数, 定义为 $\Delta n(\rho) = [n(\rho) - n_{\text{cl}}]/n(\rho)$, 其中 $n(\rho)$ 是半径在 ρ 的折射率, n_{cl} 是包层折射率.

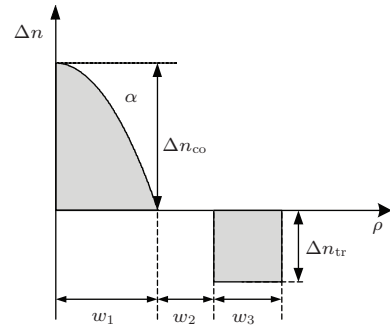


图 1 带有外下陷的渐变式光纤的折射率分布

折射率分布可以表示为

$$n(\rho) = \begin{cases} n(0) [1 - \Delta n_{\text{co}}(\rho/w_1)^\alpha], & |\rho| < w_1, \\ n_{\text{cl}}, & w_1 \leq |\rho| < w_1 + w_2 \\ n_{\text{cl}}/(1 - \Delta n_{\text{tr}}), & w_1 + w_2 \leq |\rho| < w_1 + w_2 + w_3, \\ n_{\text{cl}}, & |\rho| \geq w_1 + w_2 + w_3, \end{cases} \quad (4)$$

其中, α 是折射率指标数, w_1 是纤芯半径, w_2 是纤芯到包层下陷的距离, w_3 是下陷的宽度的, $\Delta n_{\text{co}} = \Delta n(0)$, Δn_{tr} 是下陷与包层的折射率差. 与文献 [6] 中的设计不同, 本文选择了较小的 Δn_{co} , 较大的芯径. 下陷部分的设计主要为减小光纤损耗, 不作为控制 DMD 的主要参数变量 [10].

3.2 MSI 光纤

由于普通阶跃光纤简单的折射率分布, 不能获得低 DMD. 与文献 [6] 所设计的光纤相比, MSI 光纤具有更复杂的结构. 由于 DMD 与折射率分布的相关性强, MSI 光纤可以更好地控制 DMD. MSI 的折射率分布如图 2 所示.

图2中, a_1 代表内纤芯半径, r_1 代表外纤芯半径, r_2 代表纤芯中点到下陷的内边缘的距离, w 代表下陷的长度, Δ_1 代表内纤芯和包层的相对折射率差, Δ_2 代表外纤芯和包层的相对折射率差, Δ_t 代表下陷和包层的相对折射率差, Δ_d 是 Δ_2 与 Δ_1 之差^[11]. 在下面的部分, 我们分析讨论这些参数与DMD的关系, 设计出低DMD的少模光纤.

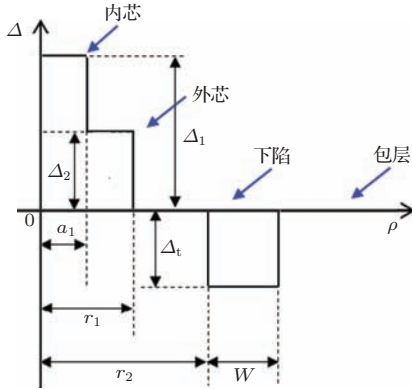


图2 多阶少模光纤的折射率分布

4 少模光纤的参数设计

4.1 带有外下陷的渐变式少模光纤

α 约为2时, DMD值较小, 故 α 取值1.5到2.5. 下陷的设计主要为了减小光纤损耗. 由于深的下陷使得光纤难以拉制, Δn_{tr} 取值应大于 -0.005 . 同样, 宽的下陷会使制造成本增加, w_3 限制在 w_1 内. w_2 的设计是为了使下陷远离纤芯, 减小对纤芯的影响, 取值小于 $w_1/2$ ^[9]. Δn_{co} 过小, 光纤制造难度较大; Δn_{co} 过大, 使得光纤的DMD增大. 故 Δn_{co} 取值0.001—0.005. w_1 和 Δn_{co} 的设计受归一化频率 V 的限制.

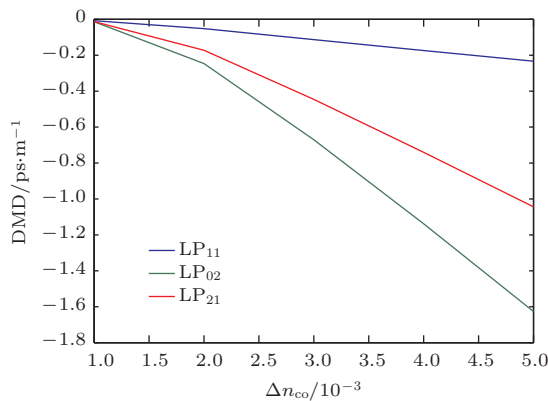


图3 (网刊彩色) 相同归一化截止频率下, 各模式差分模式时延随最大芯包层折射率差 Δn_{co} 的变化

为分析 V 和 Δn_{co} 对DMD的影响, 固定 V 值, 分析不同 Δn_{co} 和 w_1 对DMD的影响. 如图3所示, 当 V 一定时, Δn_{co} 越大, DMD 的绝对值越大. 当 Δn_{co} 取值0.001—0.0015时, DMD 趋近于0.

Δn_{co} 分别设定为0.001, 0.0012, 0.014, LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂ 模式的DMD与波长的关系分别如图4(a), (b), (c). 由图可见, 当 Δn_{co} 为0.001时, 波长在1530—1570 nm 范围内, 可以得到低且平稳的DMD.

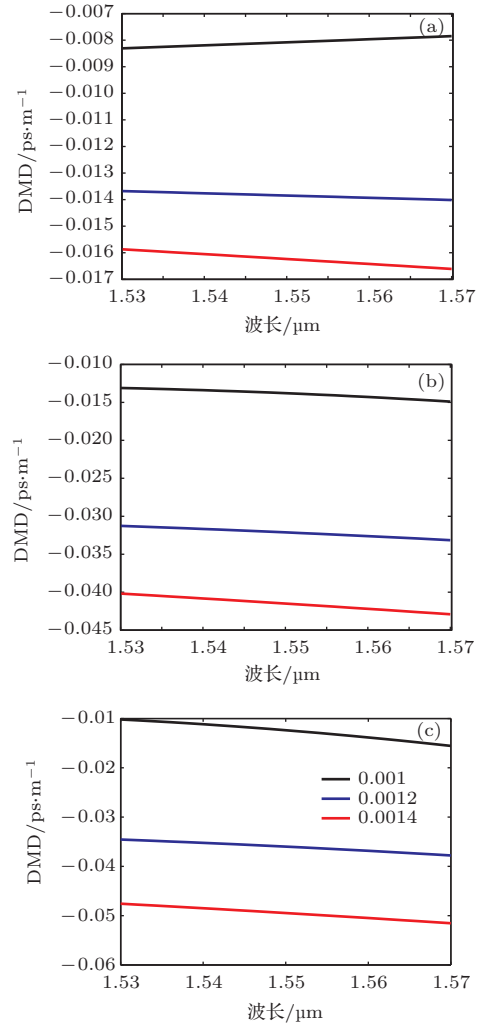


图4 (网刊彩色) 不同最大芯包层折射率差 Δn_{co} 下, 带有外下陷的渐变式少模光纤各模式差分模式时延随波长的变化 (a) LP₁₁ 模式; (b) LP₂₁ 模; (c) LP₀₂ 模

为设计四模光纤, V 取值5.8—7.2. 当 Δn_{co} 选为0.001时, 根据(5) 式确定 w_1 范围为24—28. 由图5可以看出, DMD 的绝对值随着 w_1 的增大而减小.

$$V = \frac{2 * \pi * w_1 * \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}}{\lambda} \quad (5)$$

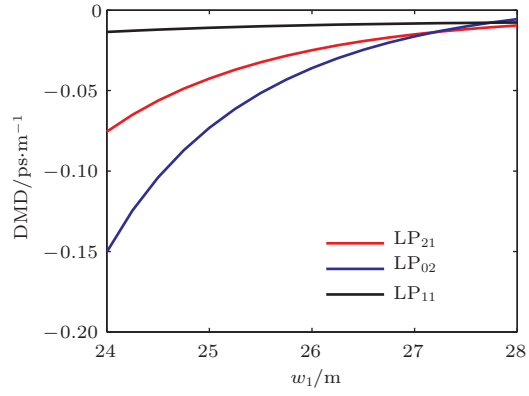


图5 (网刊彩色) 相同最大芯包层折射率差 Δn_{co} 下, 各模式差分模式时延随纤芯半径 w_1 的变化

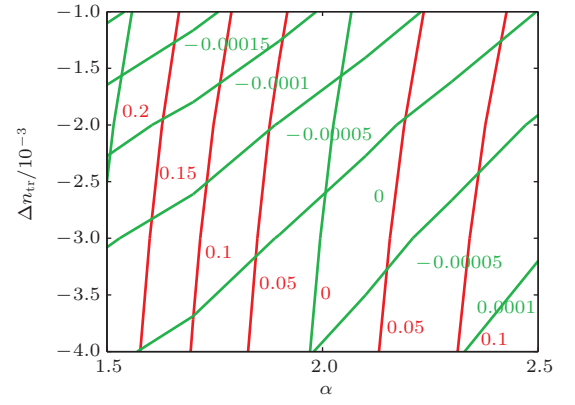


图6 (网刊彩色) LP_{01} 模式的差分模式时延 (红色) 及其斜率 (绿色) 随包层与下陷折射率差 Δn_{tr} 和折射率指标数 α 的变化

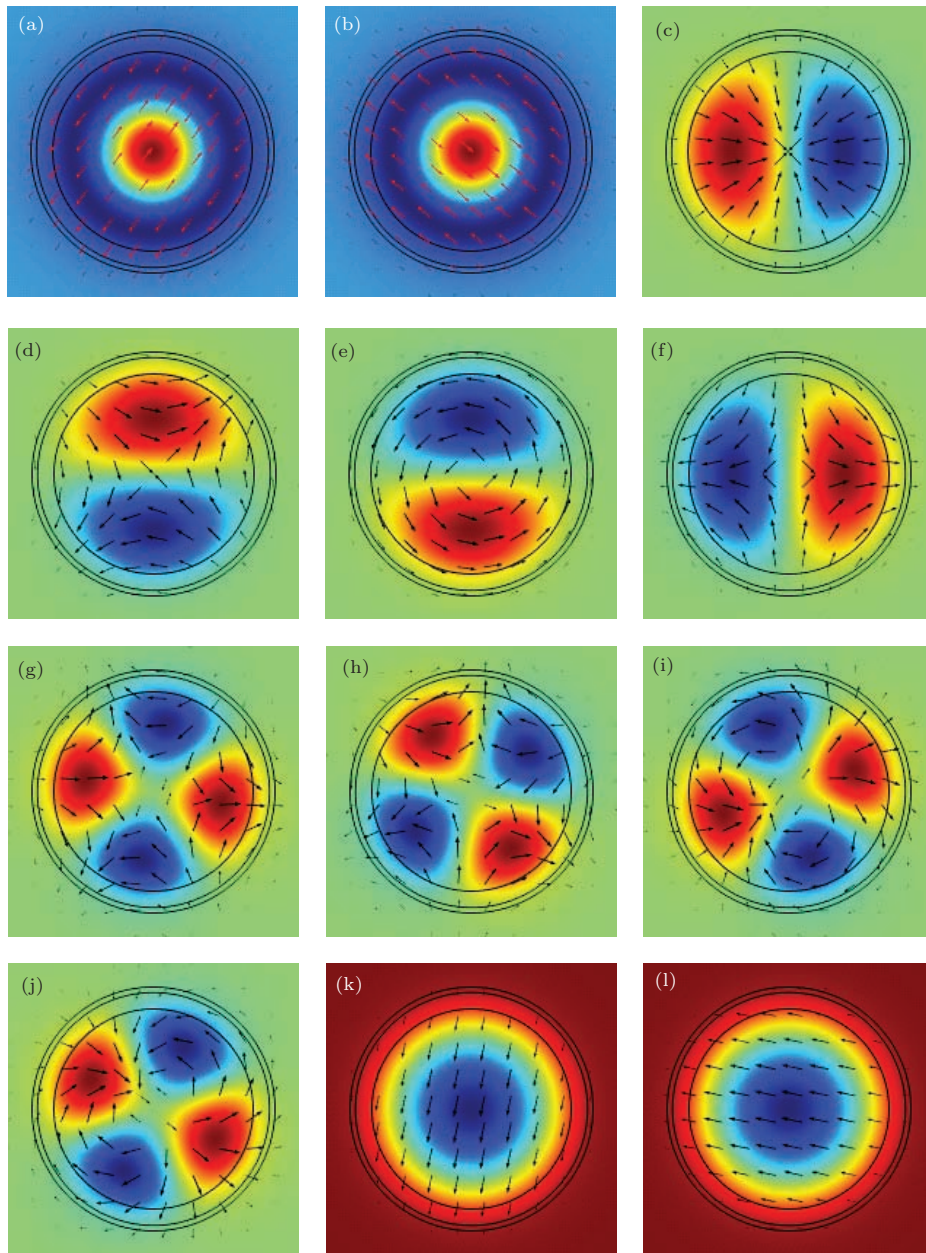


图7 (网刊彩色) 带有下陷的渐变式少模光纤各模式的模场分布和二维电矢量分布 (a), (b) LP_{01} 模式; (c)—(f) LP_{11} 模; (g)—(j) LP_{21} 模; (k), (l) LP_{02} 模式

α 和 Δn_{tr} 对 DMD 值及其斜率的影响如图 6 所示. 为使得 DMD 及其斜率值都较小, α 取值 1.9—2.0 之间, Δn_{tr} 取值 -0.0025 到 -0.003 之间.

根据以上分析, 本文设计了一个 Δn_{co} 为 0.001, w_1 为 27.3, α 和 Δn_{tr} 为 1.96, -0.0028 的四模光纤. 利用 Comsol 软件分析光纤的模式, 得到各模式的模场和电场分布如图 7.

各个模式的 DMD 与波长的关系如图 8 所示, 在 1530—1570 nm 的波长范围内, LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式与 LP_{01} 的有效折射率差大于 0.0005, 且 DMD 的绝对值小于 $0.015 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$. 虽然有效折射率差较大, 但当 DMD 足够小时, 可以通过多输入多输出数字信号处理器来减小模式耦合. 各个模式的 DMD 随波长平稳变化, 且保持较小的值, 能够满足传输条件. 高阶模式的 DMD 要大于低阶模式.

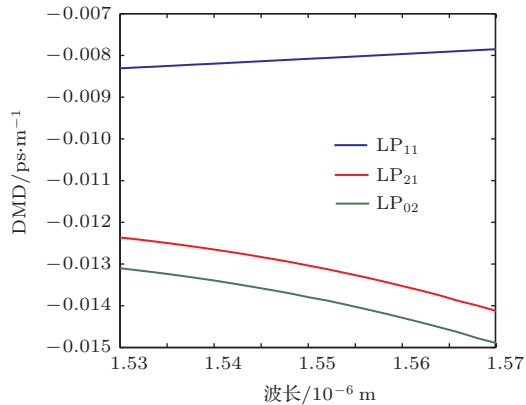


图 8 (网刊彩色) 带有外下陷的渐变式少模光纤各模式差分模式时延随波长的变化

4.2 MSI 光纤

为分析 r_2/r_1 对 DMD 的影响, a_1 设定为 3.9, r_1/a_1 为 2, r_2/r_1 设定为 1.4, 1.5, 1.6, 1.7. DMD 与波长的关系如图 9 所示, 当 r_2/r_1 为 1.6 时, 光纤的 DMD 低且变化量小. 这就保证了光纤在较大的波长范围内, 具有低 DMD.

当波长为 1550 nm 时, r_1/a_1 和 Δ_d 对 DMD 和 DMD 斜率的影响曲线如图 10 所示. 当固定 r_1/a_1 时, 改变 Δ_d 的值, DMD 变化快, DMD 斜率变化缓慢. 而当固定 Δ_d 时, 改变 r_1/a_1 的值, DMD 斜率变化快, DMD 变化缓慢. 为控制 DMD 的值, 选择固定 r_1/a_1 改变 Δ_d 的方式. 由图 10, 当 r_1/a_1 设定为 2, 选择合适的 Δ_d 的范围使得 DMD 和其斜率值较小. Δ_d 选为 -0.0011 到 -0.0015 .

为分析 Δ_d 对 DMD 的影响, 设定 r_2/r_1 为 1.6, r_1/a_1 为 2, Δ_d 设定为 -0.0011 到 -0.0015 . 当 Δ_d 为 -0.0013 时, 光纤可以拥有低的正 DMD 值. 由图 11 可知, r_1/a_1 为 2 时, DMD 可以随着 Δ_d 的变化而变化, 因此可以通过控制 Δ_d 来控制 DMD. 从而证明了 r_1/a_1 设为 2 的合理性.

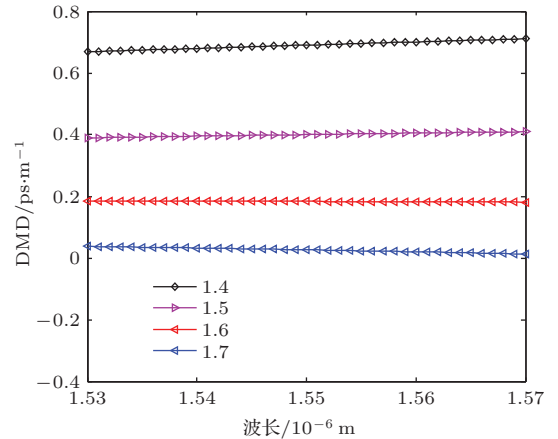


图 9 (网刊彩色) 不同 r_2/r_1 下多包层少模光纤的 LP_{11} 模式差分模式时延随波长的变化

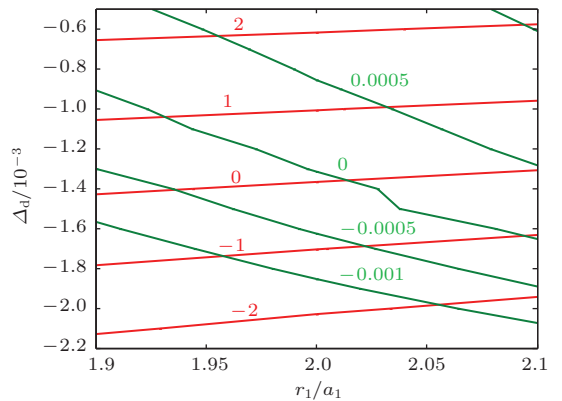


图 10 (网刊彩色) LP_{11} 模式差分模式时延 (红色) 及其斜率 (绿色) 随内外芯半径之比 r_1/a_1 和内外芯折射率差 Δ_d 的变化

根据以上分析, r_2/r_1 , r_1/a_1 , w/r_1 , Δ_d 可以设定为 1.6, 2, 0.0013, 分析 a_1 和 Δ_1 对 DMD 大小和模间有效折射率差的影响, 进而选择合适的 a_1 和 Δ_1 . 如图 12 所示, 当 Δ_1 取值 0.0042—0.00462 时, DMD 的绝对值小于 $0.2 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$, 且有效折射率差大于 0.0022. DMD 随 a_1 的变化不明显, 下面会做进一步分析.

为选择合适的 a_1 大小, r_2/r_1 , r_1/a_1 , w/r_1 , Δ_d , Δ_1 设定为 1.6, 2, 0.2, 0.0013, 0.00455. a_1 分别取值 3.7—4.1. 由图 13 可知, 当 a_1 设定为 3.9, 4.0, 4.1 时, 光纤的 DMD 低而且变化量很小.

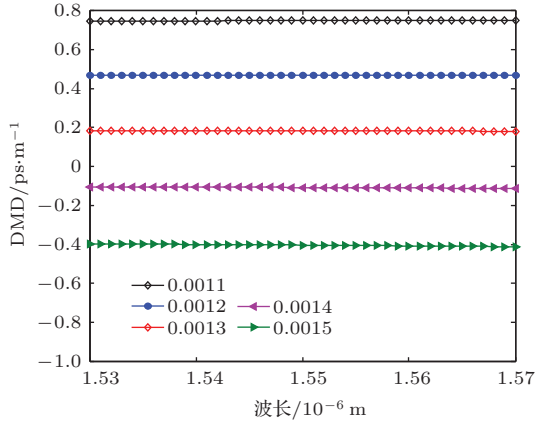


图 11 (网刊彩色) 不同外内芯折射率差 Δ_d 下多阶少模光纤的 LP_{11} 模式差分模式时延随波长的变化

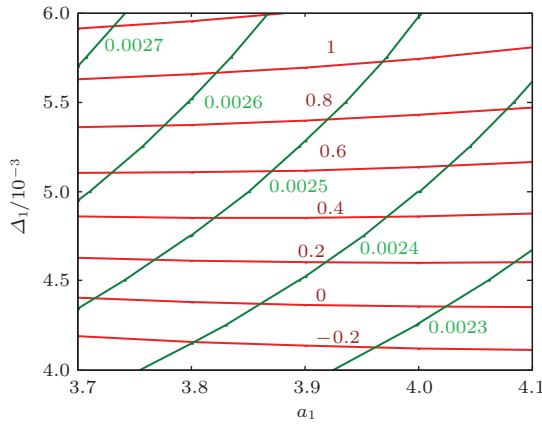


图 12 (网刊彩色) LP_{11} 模式差分模式时延 (红色) 和有效折射率差 (绿色) 随内芯包层折射率差 Δ_1 和内芯半径 a_1 的变化

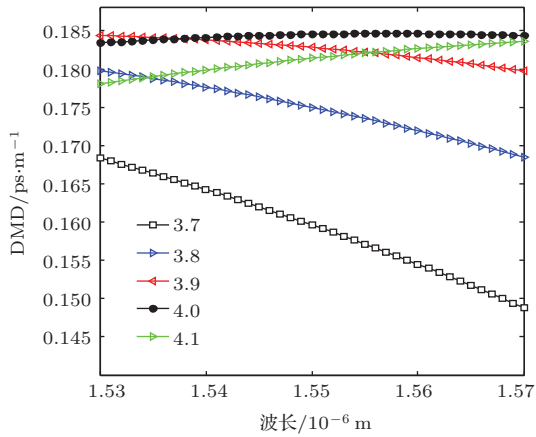


图 13 (网刊彩色) 不同内芯半径 a_1 下多包层少模光纤的 LP_{11} 模式差分模式时延随波长的变化

对于 w/r_1 和 Δ_t 对 DMD 的影响, w/r_1 和 Δ_t 的设计主要是为了减少模式损耗. 随着 r_2/r_1 的增大, 下陷距离纤芯的距离越来越远, w/r_1 和 Δ_t 对 DMD 的影响会越来越小. 可是, 为设计低 DMD

光纤, r_2/r_1 设定为 1.6. 由图 14 所示, 当 w/r_1 大于 0.5 时, 它对 DMD 的影响基本可以忽略. 为得到低 DMD 值和低 DMD 斜率, 选择 w/r_1 为 0.2.

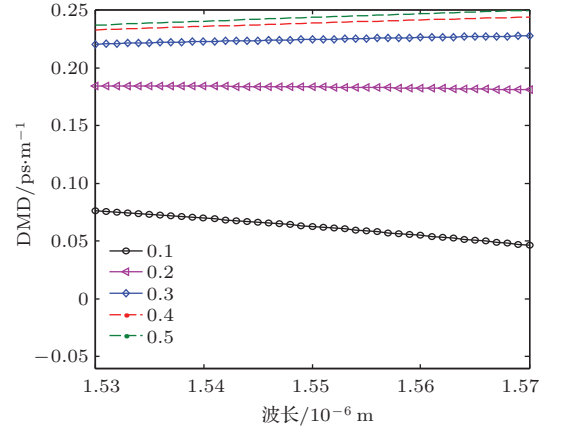


图 14 (网刊彩色) 不同下陷宽度与芯层半径之比 w/r_1 下, 多阶少模光纤的 LP_{11} 模式差分模式时延随波长的变化

在以上分析的基础上, 本文设计了一个两模多包层少模光纤, a_1 , r_2/r_1 , r_1/a_1 , w/r_1 , Δ_d , Δ_1 设定为 4, 1.6, 2, 0.2, 0.0013, 0.00455. 为保证 LP_{11} 模式和 LP_{01} 模式能够稳定地传输, 减少模间耦合, 就要保证大的有效折射率差. 图 15 为两模式的有效折射率与波长的变化, 可以看出两模式的有效折射率差可以保证大于 0.0022. 模式间有效折射率差大, 使得模式间串扰小, 更易形成导模.

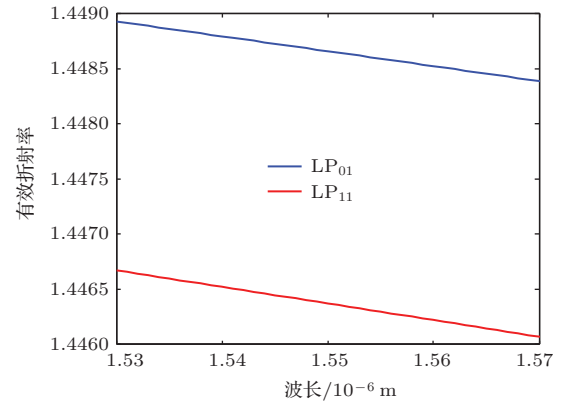


图 15 (网刊彩色) 多阶少模光纤中两模式的有效折射率

LP_{11} 模式的 DMD 随波长的变化如图 16 所示. 由图可见, LP_{11} 的 DMD 小于 $0.184 \text{ ps} \cdot \text{m}^{-1}$, 而且变化率小于 0.0052. 也就是说, LP_{11} 在 1530—1570 nm 波长范围内具有平稳且低的 DMD.

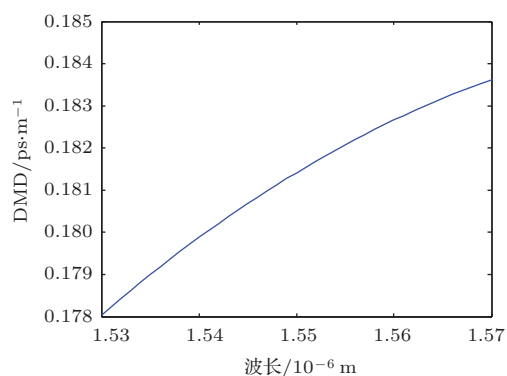


图 16 多阶少模光纤的差分模式时延随波长的变化

5 结 论

DMD 是决定少模光纤性能的重要参数. 本文设计出了两种低差分模式时延的少模光纤, 即带有外下陷的渐变式光纤和 MSI 光纤, 分析了两种光纤的 DMD. 波长在 1530—1570 nm 范围内, 带有外下陷的渐变式光纤支持四模传输, LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 模式的 DMD 的绝对值小于 $0.015 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$; MSI 光纤支持两模传输, LP_{11} 的差分模式时延低于 $0.185 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$. 虽然两种光纤结构不同, 但是都具有良好的 DMD 特性, 都可以用于模分复用, 达到利用不同模式建立不同信道的目的, 使光纤传输容量得到大幅提升.

参考文献

- [1] Chen Y, Zhou G Y, Xia C M, Hou Z Y, Liu H Z, Wang C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014701 (in Chinese) [陈艳, 周桂耀, 夏长明, 侯峙云, 刘宏展, 王超 2014 物理学报 **63** 014701]
- [2] Lin Z, Zheng S W, Ren G B, Jian S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064214 (in Chinese) [林桢, 郑斯文, 任国斌, 简水生 2013 物理学报 **62** 064214]
- [3] Sakamoto T, Mori T, Yamamoto T, Tomita S 2012 *Optical Fiber Communication Conference* Los Angeles, March 4–8, 2012 OM2D.1
- [4] Ferreira F, Fonseca D, Silva H 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 438
- [5] Grüner-Nielsen L, Sun Y, Nicholson J W, Jakobsen D, Jespersen K G, Lingle R, Pálsdóttir B 2012 *J. of Light. Technol.* **30** 3693
- [6] Xie Y W, Fu S N, Zhang H L, Tang M, Shen P, Liu D M 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0906010 (in Chinese) [谢意维, 付松年, 张海亮, 唐明, 沈平, 刘德明 2013 光学学报 **33** 0906010]
- [7] Lee S, Park J, Jeong Y, Jung H, Oh K 2009 *J. of Light. Technol.* **27** 4919
- [8] Yao S C, Fu S N, Zhang M M, Tang M, Shen P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144215 (in Chinese) [姚殊畅, 付松年, 张敏明, 唐明, 沈平, 刘德明 2013 物理学报 **62** 144215]
- [9] Ferreira F, Fonseca D, Fonseca D, Silva H 2013 *J. of Light. Technol.* **32** 353
- [10] Sun Y, Lingle R, McCurdy A, Peckham D, Jensen R, Gruner-Nielsen L 2013 *Photonics Society Summer Topical Meeting Series on IEEE* Waikoloa, HI, July 8–10, 2013 p80
- [11] Tu J, Saitoh K, Takenaga K, Takenaga K, Matsuo S 2014 *Opt. Express* **22** 432

Finite element analysis and design of few mode fiber with low differential mode delay^{*}

Jiang Shan-Shan Liu Yan[†] Xing Er-Jun

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Thecnology,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 3 July 2014; revised manuscript received 11 September 2014)

Abstract

Two different types of few mode fibers (FMFs) are considered: a graded-core with a cladding FMF and a multi-step-index FMF. The characteristics of mode field distribution and the effective index are analyzed based on Comsol software. Then differential mode delay is analyzed. The structure and profile parameters are optimized in order to achieve the lowest possible differential mode delay (DMD). Under the condition of supporting four modes, a graded-core with a cladding FMF is designed. The DMD absolute values of LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} are all below $0.015 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$. Under the condition of supporting two modes, a multi-step-index FMF is designed. The DMD of LP_{11} is $0.185 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}$. The designed fibers have low DMD, which is suitable for mode division multiplexing.

Keywords: mode division multiplexing, few mode fiber, differential mode delay

PACS: 42.81.-i, 42.79.Sz

DOI: [10.7498/aps.64.064212](https://doi.org/10.7498/aps.64.064212)

^{*} Project supported by Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project (Grant No. YETP0530), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2013JBM005).

[†] Corresponding author. E-mail: yanliu@bjtu.edu.cn