

少模光纤模式差分群时延的设计与优化

谢意维 付松年 张海亮 唐 明 沈 平 刘德明

(华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 基于少模光纤(FMF)的模分复用(MDM)传输系统,模式差分群时延(MDGD)是影响系统设计的关键因素之一。考虑实际光纤制备工艺,数值分析了阶跃折射率(SI)光纤、渐变折射率(GI)光纤、带有外下陷包层的阶跃型光纤和带有外下陷包层的渐变型光纤中不同的 MDGD 特性。在支持四个导模条件下,优化设计得到两种不同折射率剖面分布的四模光纤,分别具有较大的 MDGD($LP_{11}, LP_{12}, LP_{02}$ 与 LP_{01} 的 MDGD 分别是 4.65, 10.02, 11.73 ps/m)和较小的 MDGD($LP_{11}, LP_{12}, LP_{02}$ 与 LP_{01} 的 MDGD 分别是 $-0.049, -0.258, -0.168$ ps/m)。制备了阶跃折射率分布的少模光纤,其实测基模的损耗为 0.23 dB/km(1550 nm)和 0.37 dB/km(1310 nm)测量及分析结果证明其能够支持 MDM 应用。

关键词 光纤光学;模分复用;少模光纤;折射率剖面;模式差分群时延

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906010

Design and Optimization of Mode Differential Group Delay for Few-Mode Fiber

Xie Yiwei Fu Songnian Zhang Hailiang Tang Ming Shen Ping Liu Deming

(National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract In mode division multiplexing (MDM) transmission system using few-mode fiber (FMF), mode differential group delay (MDGD) is one of the key factors that influence the system performance. Considering the practical fiber fabrication technique, the MDGD characteristics between different modes of step-index (SI) fiber, graded-index (GI) fiber, trench-assisted SI fiber, and trench-assisted GI fiber are numerically investigated. Under the condition of supporting four modes, two optimized refractive index profiles of FMFs with high and low MDGDs are presented. The high MDGDs of $LP_{11}, LP_{12}, LP_{02}$ versus LP_{01} are 4.65, 10.02, 11.73 ps/m, respectively; while low MDGDs of $LP_{11}, LP_{12}, LP_{02}$ versus LP_{01} are $-0.049, -0.258, -0.168$ ps/m, respectively. We fabricate and characterize the FMF with a SI profile, whose loss of fundamental mode is 0.23 dB/km at 1550 nm and 0.37 dB/km at 1310 nm. The measurement and analysis results indicate that it can be used for future MDM transmission system.

Key words fiber optics; mode division multiplexing; few-mode fiber; refractive index profile; mode differential group delay

OCIS codes 060.2280; 060.2270

1 引 言

随着波分复用(WDM)、偏振复用(PDM)、相干接收和多维多阶调制等技术的广泛使用,单模光纤的传输容量已经快速地接近其香农极限^[1]。光纤通信网络规模不断扩展、容量快速增长、业务日益丰富,寻求新型高速大容量光传输机理已成为未来光

通信网络面临的重大挑战。模分复用(MDM)传输技术利用少模光纤(FMF)各个模式间的正交性,将每一个模式视为独立的信道加载信号,形成多输入多输出(MIMO)通道,可以提高系统容量和频谱效率。少模光纤是指通过合理设计光纤使有限个模式被激励并传输。这样,相比于单模光纤,少模光纤可

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-04-24

基金项目: 国家 863 计划(2012AA011301)、国家自然科学基金(61275069)

作者简介: 谢意维(1990—),女,硕士研究生,主要从事模分复用通信系统方面的研究。E-mail: xyw@hust.edu.cn

导师简介: 付松年(1975—),博士,教授,主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: songnian@mail.hust.edu.cn (通信联系人)

以使用 MDM 技术来扩充单根光纤传输容量,同时由于有效面积的增加,使非线性效应致传输损伤减少;相比于多模光纤,少模光纤可以控制模式个数,优化模间耦合和损耗参数。2011 年, Bell 实验室首次报道了基于少模光纤的长距离 MDM 传输系统,采用 MIMO 均衡技术,利用 3 个模式信道(LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b}), 每个信道的传输速率为 40 Gb/s, 在 96 km 长的少模光纤上实现了无误码传输^[2]。2013 年, Bell 实验室利用包括 MDM 和高密度波分复用(DWDM)的多维复用技术,利用 6 个模式信道(LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} , LP_{02}), 每个信道的传输速率为 4.1 Tb/s, 在 177 km 长的少模光纤上实现了无误码传输^[3]。故少模光纤在当今高速大容量光纤通信传输系统中扮演着重要的角色。目前, 基于少模光纤的 MDM 系统一般有两种实现方式。2011 年, 贝尔实验室提出采用低模式差分群延时(MDGD, τ_{MDGD})的少模光纤, 配合接收端的 MIMO 算法对几乎同时到达的各模式信号进行空间分集接收均衡, 消除各模式信道间串扰, 少模光纤 LP_{11} 与 LP_{01} 之间的 MDGD 约为 0.06 ps/m^[4]。但这种方案中少模光纤的模式耦合不可预测, 长距离传输时, MIMO 均衡算法的复杂度及可靠性都难以确定。与此相反, 具有高 MDGD 的少模光纤, 模式耦合串扰低, 各个模式信道传输相对独立。通过优化阶跃折射率(SI)光纤参数也可以获得大 MDGD, 计算结果显示 LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} 与 LP_{01} 模式间 MDGD 分别为 4.4, 8.5, 7.2 ps/m^[5]。澳大利亚墨尔本大学的科研人员提出了一种掺错阶跃折射率分布的光纤, 实际制备的两模光纤的 LP_{11} 与 LP_{01} 间 MDGD 为 3 ps/m^[6]。但大 MDGD 限制了 MIMO 均衡算法的应用, 必须在发送端或接收端利用可调光时延单元进行补偿^[7]。随着光纤制备工艺的日益成熟, 简单阶跃型光纤已经不能满足 MDM 传输的需要, 各种折射率剖面结构的光纤陆续提出。为了提高光纤的抗弯曲性, William 等^[8]首次提出了一种外下陷包层结构的波导, 之后, 不少研究者实验证明带有外下陷包层结构的光纤的确具有弯曲不敏感性^[9-10]。随着 MDM 的发展, 为了在 MDM 系统中应用 MIMO 均衡技术, Grüner-Nielsen 等^[11]采用带有外下陷包层渐变分布折射率(GI)剖面结构, 实现了 LP_{11} 和 LP_{01} 之间 MDGD 为 0.076 ps/m, 低损耗的两模光纤。考虑实际光纤制备工艺, 本文比较了折射率阶跃光纤、渐变光纤、带有外下陷包层的阶跃型光纤和带有外下陷包层的渐变型光纤四种少模光纤

的 MDGD 特性。通过优化折射率剖面结构和光纤参量, 分别获得了具有较大 MDGD(LP_{11} , LP_{12} , LP_{02} 与 LP_{01} 的 MDGD 分别是 4.65, 10.02, 11.73 ps/m) 和较小 MDGD(LP_{11} , LP_{12} , LP_{02} 与 LP_{01} 的 MDGD 分别是 -0.049, -0.258, -0.168 ps/m) 的少模光纤, 同时还具有弯曲不敏感性和大有效面积的优点。实际制备了一种支持 4 个模式的阶跃分布少模光纤, 其损耗接近于单模光纤并具有大 MDGD 和大有效面积特性, 可满足 MDM 传输系统的需要。

2 不同折射率分布下模式差分群时延特性

由于少模光纤中支持传输的各个导模在光纤中传播速度不同, 传播一段距离后各个模式信道间的光信号会出现时延, 即产生模式群时延^[12]。它可表示为

$$\tau = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk_0} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda}, \quad (1)$$

其中 λ 为波长, v_g 为群速度, c 为真空中的光速, 传播常数 $\beta = n_{\text{eff}} \cdot k_0$, n_{eff} 为模式的有效折射率, k_0 是自由空间的光波波数。不同模式通过一段固定长度的光纤所需时间不同, 因此高阶模与基模之间的 MDGD 表达式为

$$\tau_{MDGD} = \tau(LP_{mm}) - \tau(LP_{01}). \quad (2)$$

对于不同折射率剖面结构的光纤, 先利用 Comsol 软件求出不同波长下各个模式的有效折射率, 再根据(1)式和(2)式用 Matlab 软件求出不同模式与基模的 MDGD。考虑带有外下陷包层结构光纤的设计, 图 1(a)和(b)分别为带有外下陷包层的阶跃型和渐变型的双包层光纤结构, 图 1(c)为少模光纤截面图。图 1(a)和(b)中, 最中间的部分为芯层, 围绕芯层的环为内包层, 围绕内包层的环为下陷包层, 围绕下陷包层的环为外包层, r_1 为纤芯半径, r_2 为内包层半径, r_3 为外包层半径, Δ_1 为纤芯与外包层折射率差, Δ_2 为下陷包层和外包层的折射率差。

对于折射率阶跃分布的光纤来说, 为了支持 4 个模式(LP_{01} , LP_{11} , LP_{12} , LP_{02})传输, 归一化截止频率范围为 $3.8 < V < 5.1$ 。考虑到光纤有效面积和弯曲不敏感性, 设定光纤芯-包层折射率差值为 5.5×10^{-3} , 纤芯半径为 $9.5 \mu\text{m}$, 此时 $V = 4.87$ 。为了讨论方便, 对于带有外下陷包层的光纤, 分析中统一使用参量 $(r_3 - r_2)/r_1 = 2$ 。图 2(a)~(d)分别表示阶跃光纤、带有外下陷包层的阶跃型光纤、渐变光纤和带有外下陷包层的渐变型光纤的 MDGD 随波长变化曲线。此时设定带有外下陷包层光纤 $r_2/r_1 =$

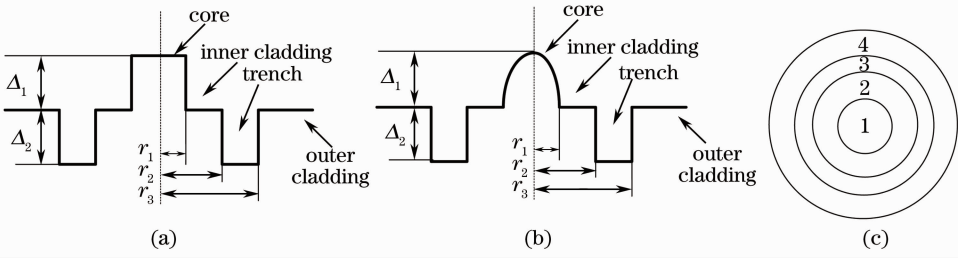


图 1 (a) 带有外下陷包层的阶跃型光纤；(b) 带有外下陷包层的渐变型光纤；(c) 截面示意图
Fig. 1 (a) Trench-assisted SI fiber; (b) trench-assisted GI fiber; (c) sectional view

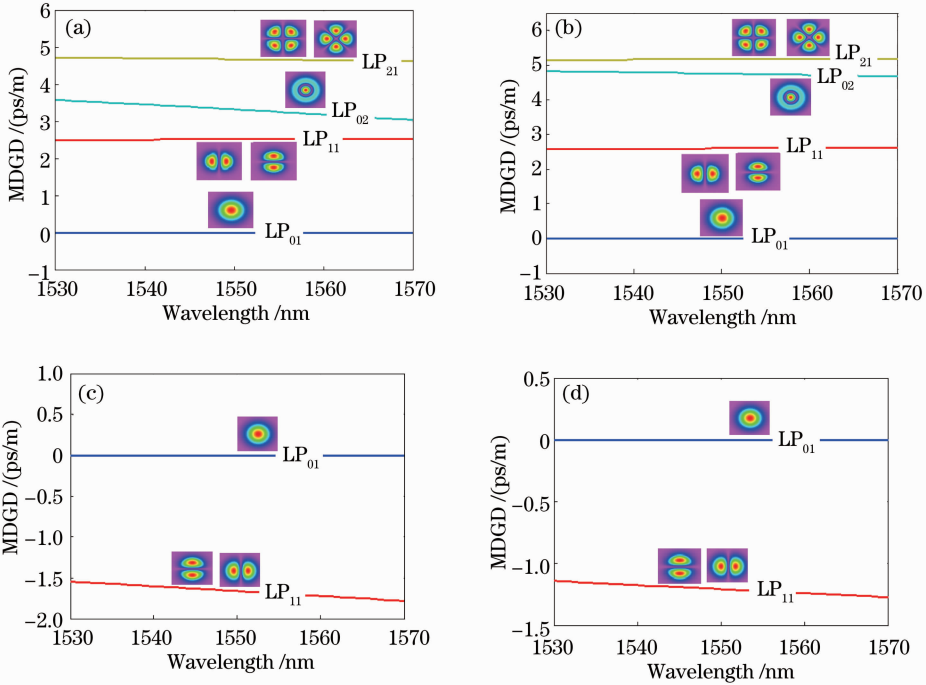


图 2 4 种光纤中各种模式的 MDGD 随波长变化的曲线。(a) 阶跃光纤；(b) 带有外下陷包层的阶跃型光纤；(c) 渐变光纤；(d) 带有外下陷包层的渐变型光纤

Fig. 2 Simulated MDGD between different modes of four fibers versus wavelength. (a) SI fiber; (b) trench-assisted SI fiber; (c) GI fiber; (d) trench-assisted GI fiber

1.5, $\Delta_1/\Delta_2 = 2$ 。由于设定的 $3.8 < V < 5.1$, 阶跃型光纤可以实现四模传输。对于折射率渐变型光纤, 模式的归一化截止频率 \bar{V} 约为 $\bar{V} = V \left(1 + \frac{2}{g}\right)^{1/2}$ ^[12], 其中 V 为阶跃光纤的归一化截止频率, g 为渐变光纤折射率分布函数的指数值。因此对于平方率分布渐变光纤 ($g = 2$), 模式归一化截止频率比阶跃光纤大, 当 $V = 4.87$ 时, 只能实现 LP_{01} 和 LP_{11} 的传输。而对于带有外下陷包层的阶跃型光纤, 模式的归一化频率 $V_1 = k_0 a \sqrt{n_{\max}^2 - n_{\min}^2}$ ^[13], n_{\max} 和 n_{\min} 分别为光纤剖面折射率分布的最大和最小值。从图 2 中可以看出在 1550 nm 处, 对于阶跃型光纤, 3 个高阶模 ($LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$) 与基模的 MDGD 分别是 2.523, 4.804, 3.814 ps/m。带有外下陷包层的阶跃型光

纤的三个高阶模与基模的 MDGD 分别是 2.594, 5.185, 4.751 ps/m。对于渐变光纤和带有外下陷包层的渐变型光纤而言, LP_{11} 与基模的 MDGD 分别是 -1.663 ps/m 和 -1.285 ps/m。因此可以得出结论: 对于这 4 种不同折射率剖面结构, 当光纤结构参数相同时, 带有外下陷包层的阶跃型光纤的 MDGD 最大, 而带有外下陷包层的渐变型光纤的 MDGD 的绝对值最小。

3 不同结构下模式差分群时延特性

3.1 带有外下陷包层的阶跃型光纤

当工作波长为 1530 ~ 1570 nm, $\Delta_1/\Delta_2 = 2$, $r_1 = 9.5 \mu\text{m}$, $\Delta_1 = 5.5 \times 10^{-3}$, 光纤内包层半径 r_2 和外包层半径 r_1 的比值分别为 1.2, 1.5, 2 时, 带有外

下陷包层的阶跃型光纤的 LP_{11} 与 LP_{01} 的 MDGD 和普通阶跃光纤的比较如图 3(a) 所示。从图中可明显看出, 不论 r_2 和 r_1 的比值多大, 带有外下陷包层的阶跃型光纤 MDGD 都比普通阶跃光纤的要大, 且 r_2/r_1 比值越小, 带有外下陷包层的阶跃型光纤的 MDGD 就越大。由于 r_1 为一固定值, r_2/r_1 比值越小, 即 r_2 越小, MDGD 就越大, 且文中 $(r_3 - r_2)/r_1 = 2$ 固定, r_2 越小, 意味着 r_3 也越小, MDGD 才能增大。图 3(b) 是当纤芯和外包层折射率差 Δ_1 与下陷包层和外包层折射率差 Δ_2 的比值不同时 ($r_1 = 9.5 \mu\text{m}$, $r_2/r_1 = 1.5$, $\Delta_1 = 5.5 \times 10^{-3}$), 带有外下陷包层的阶跃型光纤与普通阶跃光纤的 LP_{11} 模和 LP_{01} 模之

间的 MDGD 随波长变化曲线。 Δ_1/Δ_2 比值越小, 则带有外下陷包层的阶跃型光纤 MDGD 越大, 其中 $\Delta_1 = 5.5 \times 10^{-3}$ 为一固定值, Δ_1/Δ_2 比值越小, 意味着 Δ_2 越大, 则 MDGD 越大。而且, 无论 Δ_1/Δ_2 为多大, 其 MDGD 都大于普通阶跃光纤的结果。图 3(c) 为当 r_1 为 8, 9, 10 μm 时, 带有外下陷包层的阶跃型光纤的 MDGD 随波长变化曲线 ($r_2/r_1 = 1.2$, $\Delta_1/\Delta_2 = 1$, $\Delta_1 = 8 \times 10^{-3}$), 可以看出, 纤芯半径越大, 模式的 MDGD 越大。在 $r_2/r_1 = 1.2$, $\Delta_1/\Delta_2 = 1$, $r_1 = 8 \mu\text{m}$ 光纤结构参数条件下, 在图 3(d) 中可以看出, 纤芯-包层折射率差越大, MDGD 就越大。

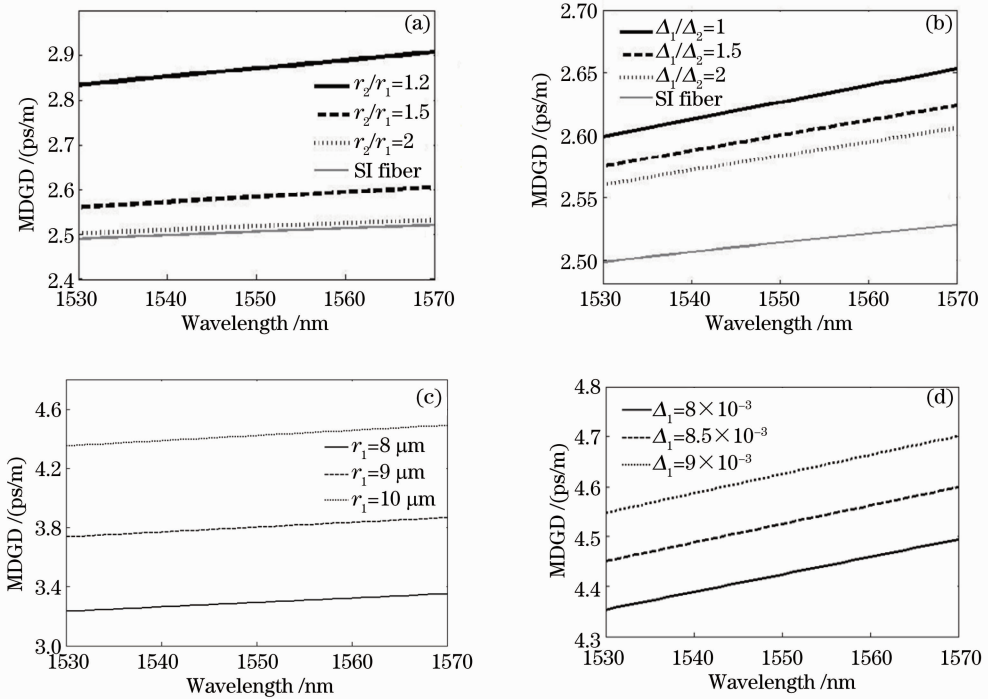


图 3 带有外下陷包层的阶跃型光纤的 LP_{11} 模与 LP_{01} 模的 MDGD 随波长变化曲线及其与阶跃型光纤的对比。

(a) $r_2/r_1 = 1.2, 1.5, 2$; (b) $\Delta_1/\Delta_2 = 1, 1.5, 2$; (c) $r_1 = 8, 9, 10 \mu\text{m}$; (d) $\Delta_1 = 8 \times 10^{-3}, 8.5 \times 10^{-3}, 9 \times 10^{-3}$

Fig. 3 MDGD between LP_{11} and LP_{01} in trench-assisted SI fiber over wavelength compared with SI fiber. (a) $r_2/r_1 = 1.2, 1.5, 2$; (b) $\Delta_1/\Delta_2 = 1, 1.5, 2$; (c) $r_1 = 8, 9, 10 \mu\text{m}$; (d) $\Delta_1 = 8 \times 10^{-3}, 8.5 \times 10^{-3}, 9 \times 10^{-3}$

3.2 带有外下陷包层的渐变型光纤

当工作波长为 1530~1570 nm, r_2 和 r_1 的比值为 1.2, 1.4, 1.6 时, 带有外下陷包层的渐变型光纤的 LP_{11} 模与 LP_{01} 模之间的群时延差和普通渐变光纤的对比如图 4(a) 所示。为了支持 4 个模式传输, 此时纤芯半径是 14 μm , $\Delta_1 = 5.5 \times 10^{-3}$, $\Delta_1/\Delta_2 = 2$ 。带有外下陷包层的光纤 LP_{11} 与基模的群时延差的绝对值比普通渐变光纤的要小, 且 r_2 和 r_1 比值越小, 其绝对值越小。当 $(r_3 - r_2)/r_1 = 2$, r_1 的值固定时, r_2 和 r_1 比值越小, 意味着 r_2 和 r_3 越小, MDGD 的

绝对值就越小。图 4(b) 为当纤芯-外包层折射率差 Δ_1 与下陷包层和外包层折射率差 Δ_2 的比值不同时, 带有外下陷包层的渐变型光纤的 LP_{11} 模与 LP_{01} 模之间的群时延差和普通渐变光纤的比较 ($r_2/r_1 = 1.4$, $r_1 = 14 \mu\text{m}$, $\Delta_1 = 5.5 \times 10^{-3}$)。从图中可明显看出, Δ_1/Δ_2 比值越小, 则带有外下陷包层的渐变型光纤的 MDGD 绝对值越小, $\Delta_1 = 5.5 \times 10^{-3}$ 值固定, Δ_1/Δ_2 比值越小, 意味着 Δ_2 越大, 则 MDGD 的绝对值越小。无论 Δ_1/Δ_2 为多大, 其 MDGD 的绝对值都小于普通渐变光纤。在图 4(c) 中, 比较了当 r_1 为 13,

14, 15 μm 时, 带有外下陷包层的渐变型光纤的 MDGD 随波长变化曲线 ($r_2/r_1 = 1.2, \Delta_1/\Delta_2 = 1, \Delta_1 = 5.5 \times 10^{-3}$), 可以看出, 纤芯半径越大, 模式的 MDGD 的绝对值越小。在 $r_2/r_1 = 1.2, \Delta_1/\Delta_2 = 1,$

$r = 14 \mu\text{m}$ 光纤结构参数条件下, 从图 4(d) 中可以看出, 纤芯与外包层折射率差越大, MDGD 的绝对值就越小。

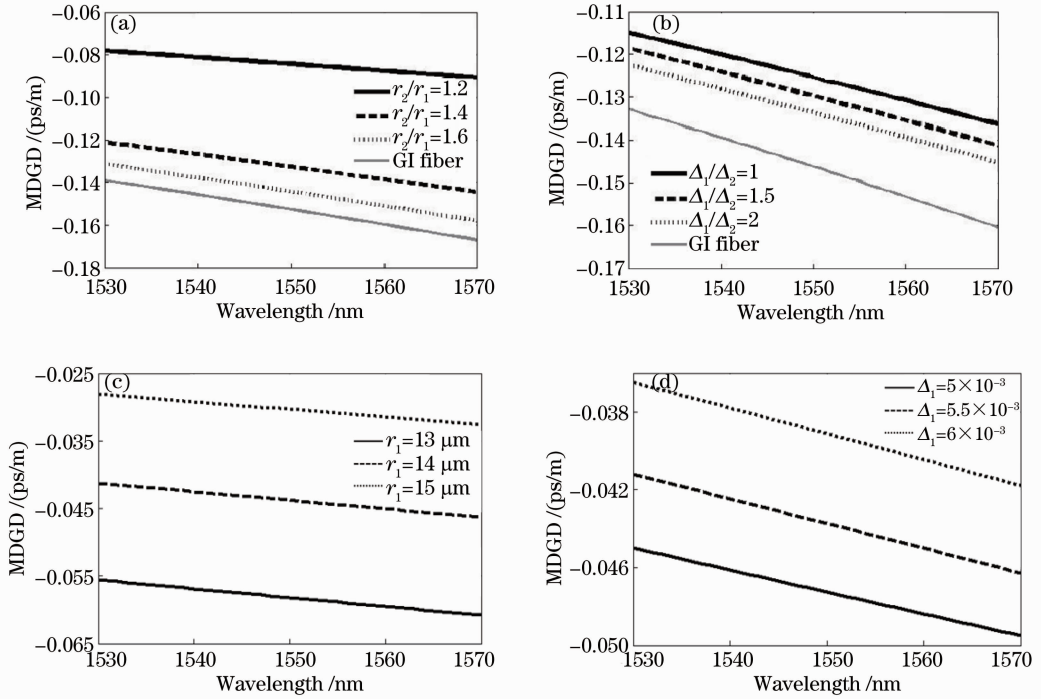


图 4 带有外下陷包层的渐变型光纤的 LP_{11} 模与 LP_{01} 模的 MDGD 随波长变化曲线及其与渐变型光纤的对比。

(a) $r_2/r_1 = 1.2, 1.4, 1.6$; (b) $\Delta_1/\Delta_2 = 1, 1.5, 2$; (c) $r_1 = 13, 14, 15 \mu\text{m}$; (d) $\Delta_1 = 5 \times 10^{-3}, 5.5 \times 10^{-3}, 6 \times 10^{-3}$
 Fig. 4 MDGD between LP_{11} and LP_{01} in trench-assisted GI fiber over wavelength compared with GI fiber. (a) $r_2/r_1 = 1.2, 1.4, 1.6$; (b) $\Delta_1/\Delta_2 = 1, 1.5, 2$; (c) $r_1 = 13, 14, 15 \mu\text{m}$; (d) $\Delta_1 = 5 \times 10^{-3}, 5.5 \times 10^{-3}, 6 \times 10^{-3}$

通过分析可以知道为了获得极大或极小的 MDGD 应该如何设定光纤折射率剖面结构。另一方面, 带有外下陷包层的光纤 r_3 越大或者 Δ_2 越大, 对于光纤的抗弯曲性能的改进就越明显^[13]。综合考虑后, 设定带有外下陷包层的阶跃型光纤纤芯-外包层折射率差值为 8×10^{-3} , 纤芯半径为 $8 \mu\text{m}$,

$(r_3 - r_2)/r_1 = 2, r_2/r_1 = 1.2, \Delta_1/\Delta_2 = 1$, 该光纤 4 个模式 ($LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$) 的 MDGD 随波长的变化如图 5(a) 所示, 从图中可以看出, 此时 3 个高阶模与基模的 MDGD 在 1550 nm 处高达 4.65, 10.02, 11.73 ps/m, 在保证该光纤具有弯曲不敏感性的同时, 还具有大有效面积的优点, 计算可得

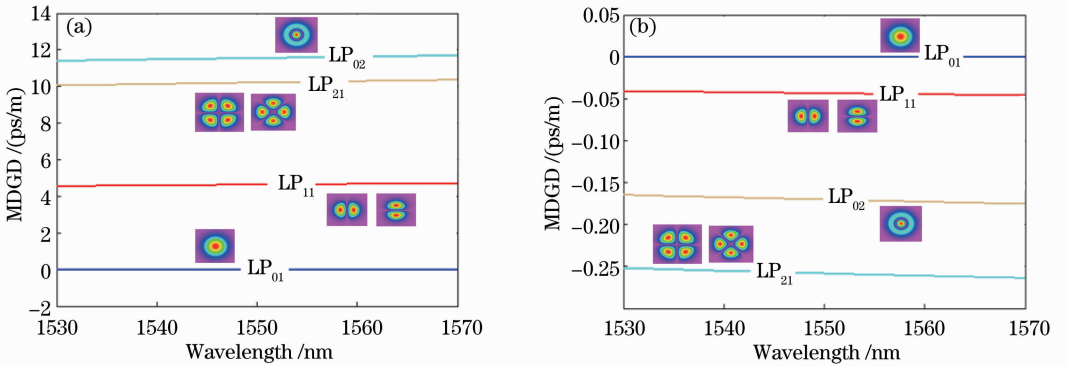


图 5 优化得到的 (a) 带有外下陷包层的阶跃光纤和 (b) 带有外下陷包层的渐变光纤 4 种模式差分群时延随波长变化的曲线
 Fig. 5 Differential group delay difference of four-mode (a) trench-assisted SI fiber and (b) trench-assisted GI fiber with different optimal refractive index profiles as a function of wavelength

LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂ 的有效面积分别为 108, 93, 94, 113 μm²。而设定芯-包层折射率差值为 5.5 × 10⁻³, 纤芯半径为 14 μm, (r₃ - r₂)/r₁ = 2, r₂/r₁ = 1.2, Δ₁/Δ₂ = 1 时, 带有外下陷包层的渐变型光纤的 MDGD 如图 5(b) 所示, 3 个高阶模与基模的 MDGD 在 1550 nm 处仅有 -0.049, -0.258, -0.168 ps/m, 计算可得 4 个低阶模的有效面积高达 171, 152, 148, 151 μm²。

4 少模光纤制备与测试

考虑阶跃折射率分布的工艺成熟性, 根据以上分析, 在长飞公司协助下, 制备了 3 km 阶跃型分布少模光纤, 其中芯层半径为 9.5 μm, 芯包层折射率差为 5.5 × 10⁻³。当工作波长为 1550 nm 时, 归一化截止频率 V = 4.87, 能够支持 4 个低阶模式传输。由于目前还没有商用的模式复用和解复用器, 因此测量中将单模光纤输出的激光(1550 nm 或 1310 nm), 对准少模光纤一端的纤芯中心, 这样可以有效地激励出基模, 减少高阶模式的能量^[14]。经过 3 km 传输后, 将少模光纤的输出直接耦合到光功率计, 测量输出光功率数值。实测基模的损耗为 0.23 dB/km (1550 nm) 和 0.37 dB/km (1310 nm), 与标准单模

光纤的损耗相差不大。通过折射率剖面分析仪测量可以得到少模光纤折射率分布曲线, 如图 6(a) 所示。对阶跃分布的少模光纤初步测量结果显示该光纤的芯径数值, 纤芯-包层折射率差及折射率剖面分布与本文理论设计基本符合, 且基模传输损耗和单模光纤近似, 基本达到设计优化的目的。由于缺乏商用仪器对 MDGD 进行测量, 因此只能在实测折射率剖面分布的基础上, 计算得到四模光纤基本参数如表 1 所示, 其中导模的截止波长 λ_c 为

$$\lambda_c = \frac{2\pi a n_1}{V_c} \sqrt{2\Delta}, \quad (3)$$

式中 V_c 为不同模式的归一化截止频率, a 为光纤纤芯半径, n₁ 为纤芯折射率, Δ 为相对折射率^[15]。由于不同模式对应的归一化截止频率不同, 就可以分别求出每个模式的截止波长。可以看出 4 个模式的截止波长都比较大, 在通信波段可以支持 4 个导模传输, 各个模式的有效面积大, 同时模式之间的 MDGD 也较大, 可有效地支持 MDM 传输系统应用。此外, 由于长飞公司带有下陷包层结构的弯曲不敏感单模光纤(G. 657)已经商业化量产, 故下一步工作将是制备带有外下陷包层的少模光纤。

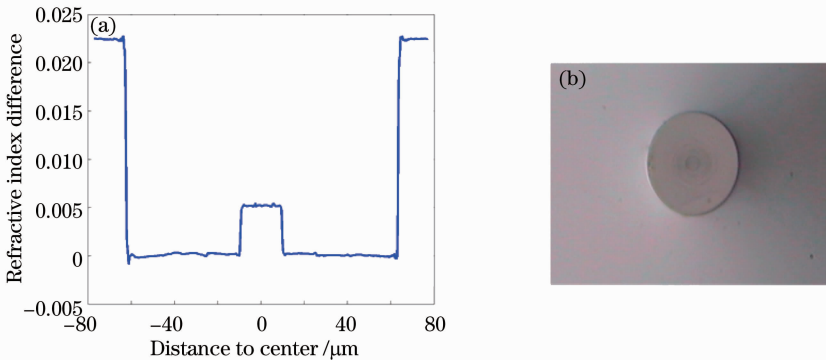


图 6 少模光纤特性。(a) 折射率分布; (b) 截面图

Fig. 6 Fabricated FMF characterization results. (a) Refractive index profile; (b) sectional view

表 1 制备少模光纤的参数

Table 1 Parameters of the fabricated FMF

Parameter	LP ₀₁	LP ₁₁	LP ₂₁	LP ₀₂
n _{eff} at the wavelength of 1550 nm	1.461	1.4592	1.4575	1.4570
Effective area / μm ²	202	195	222	220
MDGD versus LP ₀₁ / (ps/m)		2.523	4.804	3.814
Chromatic dispersion / [ps/(nm·km)]	23.26	24.09	21.81	10
Cutoff wavelength / nm		3144	1989	1977

5 结 论

对于 4 种不同折射率剖面结构的光纤,阶跃分布的少模光纤比渐变分布的 MDGD 大。为了增加 MDGD 数值,可采用外下陷包层阶跃型光纤,且 r_2/r_1 和 Δ_1/Δ_2 越小,半径和纤芯外包层折射率差越大,则 MDGD 就越大。另外,为了减少 MDGD 数值,可采用带有外下陷包层的渐变型光纤,且 r_2/r_1 和 Δ_1/Δ_2 越小,半径和纤芯-外包层折射率差越大,MDGD 的绝对值就越小。实际制备了阶跃折射率分布的少模光纤,测量及分析结果证明其能够支持 MDM 应用。

参 考 文 献

- 1 R J Essiambre, G Kramer, P J Winzer, *et al.*. Capacity limits of optical fiber networks [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(4): 662–701.
- 2 R Ryf, S Randel, A H Gnauck, *et al.*. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing [J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(4): 521–531.
- 3 R Ryf, S Randel, N K Fontaine. 32-bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177-km few-mode fiber [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2013. PDP5A.
- 4 R Ryf, S Randel, A H Gnauck, *et al.*. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2011. PDPB10.
- 5 P Sillard, M Astruc, D Boivin, *et al.*. Few-mode fiber for uncoupled mode-division multiplexing transmissions [C]. 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, 2011. Tu. 5. LeCervin. 7.
- 6 An Li, Abdullah Al Amin, Xi Chen, *et al.*. Transmission of 107-Gb/s mode and polarization multiplexed CO-OFDM signal over a two-mode fiber [J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 8808–8814.
- 7 C Koebele, M Salsi, D Sperti, *et al.*. Two-mode transmission with digital inter-modal cross-talk mitigation [C]. *ECOC Technical Digest*, 2011. Tu. 5. B. 4.
- 8 A R William, N J Summit. Optical Fiber Comprising a Refractive Index Trench [P]. US Patent 4852968, 1989.
- 9 L de Montmorillon, P Matthijsse, F Gooijer, *et al.*. Bend-optimized G. 652D compatible trench-assisted single mode fibers [C]. 55th IWCS, 2006. 342–347.
- 10 P Sillard, S Richard, L A de Montmorillon, *et al.*. Micro-bend losses of trench-assisted single-mode fibers [C]. *European Conference on Optical Communication*, 2010. We. 8. F. 3.
- 11 L Grüner-Nielsen, Y Sun, J W Nicholson, *et al.*. Few mode transmission fiber with low DGD, low mode coupling and low loss [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2012. PDP5A.
- 12 Liu Deming, Sun Junqiang, Lu Ping, *et al.*. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2008. 73–93.
刘德明, 孙军强, 鲁平, 等. *光纤光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2008. 73–93.
- 13 P R Watekar, S Ju, W T Han. Single-mode optical fiber design with wide-band ultra low bending-loss for FTTH application [J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 1180–1185.
- 14 S Schöllmann, C Xia, W Rosenkranz. Experimental investigations of mode group diversity multiplexing on multimode fibre [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2006. OWR3.
- 15 D K Mynbaev, L L Scheiner. *Fiber-Optic Communications Technology* [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall Press, 2000. 104.

栏目编辑: 王晓球