

下陷层参数对掺氟下陷层多芯光纤特性的影响分析

郑斯文^{1,2} 任国斌^{1,2*} 林 桢^{1,2} 简 伟^{1,2} 简水生^{1,2}

(¹ 北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; ² 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 系统地研究了带有掺氟下陷层的多芯光纤中不同下陷结构参数对串扰特性及模场面积的影响。研究表明, 通过调整下陷层的结构参数, 在不牺牲低串扰特性的前提下, 这种多芯光纤可以实现大的有效面积。另外, 详细讨论了下陷层的结构参数对光纤色散及色散斜率的影响, 并针对光纤色散问题在实验上得到了验证。分析表明这种低串扰、大有效面积掺氟下陷层多芯光纤在大容量、高功率光纤通信系统中具有重要的潜在应用价值。

关键词 光纤光学; 多芯光纤; 数值模拟; 掺氟下陷层; 大模场面积; 低串扰; 色散

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1006001

Influence of Trench Parameters on the Characteristic of Trench-Assisted Multi-Core Fiber

Zheng Siwen^{1,2} Ren Guobin^{1,2} Lin Zhen^{1,2} Jian Wei^{1,2} Jian Shuisheng^{1,2}

¹ Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
² Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The effects of different trench parameters on the crosstalk and the mode area in the trench-assisted multi-core fiber are investigated systematically. Simulations suggest that low crosstalk and/or large mode area can be achieved by adjusting the trench parameters. Furthermore, the effects of different trench parameters on the dispersion characteristic are discussed, and the dispersion characteristics of the structures are verified experimentally. These characteristics suggest that the large-mode-area low-crosstalk trench-assisted multi-core fiber can be an important potential candidate for practical applications.

Key words fiber optics; multi-core fibers; numerical simulation; trench-assisted; large-mode-area; low crosstalk; dispersion

OCIS codes 060.2280; 060.2310; 060.4005

1 引 言

光纤传输容量日益增长的需求推动着高功率光通信的发展。为了克服系统的容量限制, 多芯光纤(MCF)近年来被广泛地研究^[1-2]。MCF的低串扰特性在空分复用(SDM)传输中是必不可少的。为了抑制串扰已经提出了不同的解决方案^[3-5]。另一方面, 为了增加系统的传输容量、克服非线性效应,

对增大光纤模场面积 A_{eff} 的要求也十分重要。然而低串扰特性和大模场面积二者存在此消彼长的关系。因此, 在保持大有效面积的同时降低串扰将是亟待解决的问题。用于串扰抑制的带有掺氟下陷层的多芯光纤(TA-MCF)也可以用来增大有效面积^[6], 这种 MCF 在普通纤芯的基础上增加了一层掺氟下陷层, 必然使 MCF 的性能受到影响, 导致其

收稿日期: 2013-03-26; **收到修改稿日期**: 2013-05-15

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328206)、国家自然科学基金(61178008, 61275092)、中央高校基本科研业务费专项基金(2011RC050)

作者简介: 郑斯文(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事光纤通信、新型特种光纤及相关器件等方面的研究。

E-mail: 08111025@bjtu.edu.cn

导师简介: 简水生(1929—), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤传感、光纤有源无源器件和光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@center.bjtu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: gbren@bjtu.edu.cn

性能与之前不同,而下陷层由于可以用于增大 A_{eff} 和串扰抑制,因而需对其参数进行系统研究与分析,从而同时实现低串扰、大 A_{eff} 的目的。近年来国外针对这种 MCF 展开了大量的研究^[7-9],但关于下陷层不同参数(如下陷层宽度及下陷层折射率等)对 MCF 性能的影响,以及下陷参数如何优化从而在保持纤芯密集分布和大模场面积的同时实现低串扰的研究还未见报道。此外增大 A_{eff} 的缺点是会同增大微弯损耗及色散,因此,在考虑增大 A_{eff} 的同时必须注意色散问题。关于这种光纤的色散研究虽然已有人提出^[10],但其只针对下陷层位置进行了分析,并且其 A_{eff} 很小,并未在实现大 A_{eff} 基础上研究下陷参数对色散的影响。

为了在保持纤芯密集分布和大 A_{eff} 的同时,考虑低串扰的要求,本文研究了 TA-MCF 中不同下陷参数对芯间串扰(XT, δ_{XT})及模场面积 A_{eff} 的影响。结果显示通过调整下陷参数,在不牺牲串扰的前提下这种光纤可以实现大的 A_{eff} 。另外,考虑到增大 A_{eff} 会牺牲一定的色散性能,详细分析了下陷参数对色散的影响,并在实验上得到了验证。

2 均匀七芯光纤串扰理论公式

提出了一种由 7 个完全相同的纤芯组成的均匀多芯光纤。每个纤芯模场分布都相对独立,假设每个纤芯只支持基模传输。当入射光从中心纤芯 1 输入时,外部纤芯 2~7 的串扰可由(1)式得到^[11]:

$$\delta_{\text{XT}} = 10 \lg \left[\frac{1 - \exp(-7hz)}{1 + 6\exp(-7hz)} \right], \quad (1)$$

式中 h 为功率耦合系数, z 为传输长度。功率耦合系数 h 的表达式为

$$h = \frac{1}{\sqrt{7}} \frac{2C_{12}^2}{\pi \sqrt{\left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{2}\right)^2 + C_{12}^2}}, \quad (2)$$

式中 β_1, β_2 为纤芯 1, 2 的模式传播常数, C_{12} 为模式互耦合系数。互耦合系数 C_{mn} 表示纤芯 m 和纤芯 n 在纤芯 n 横截面上模场的空间重叠^[12]。

3 下陷参数对 TA-MCF 特性的影响

TA-MCF 单个纤芯的折射率分布如图 1 所示。光纤每个纤芯周围外加一层折射率下陷层,图中深灰色部分代表光纤纤芯,浅灰色部分代表下陷层。由于纤芯周围存在一层折射率下陷层,远离纤芯处的电场将被抑制,因而相邻纤芯电场间的重叠积分变小,这样就在一定程度上抑制了串扰。表征七芯

光纤的结构参量有:芯间距为 d ,假设包层半径为 $125 \mu\text{m}$,包层折射率 $n_{\text{cl}} = 1.444$,7 个相等的纤芯半径为 a_n ,纤芯与包层的折射率差为 $\Delta_n = \Delta = n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}$,工作波长为 λ 。由于光纤在实际制作中不可能做到 7 个纤芯完全相同,在制作时会不可避免地引入不确定因素而导致制造误差,从而使得折射率差 Δ_n 或者纤芯半径 a_n 产生偏差。因而这里假设纤芯半径的相对制造误差为 $\delta a_n/a_n = 0.2\%$ (由于随着误差绝对值的增大,串扰随之降低^[11],而实际制造误差一般要远远大于此值,因而能确保实际串扰低于理论结果),即在计算时首先确定纤芯 1 的半径 a_n ,则纤芯 2 半径为 $(1+0.2\%) \times a_n$ 。之后再根据两纤芯的结构参数进行模拟计算。本文系统研究了下陷参数对芯间串扰 δ_{XT} 、模场面积 A_{eff} 及色散的影响,对低串扰、大 A_{eff} 多芯光纤的研制具有指导意义。

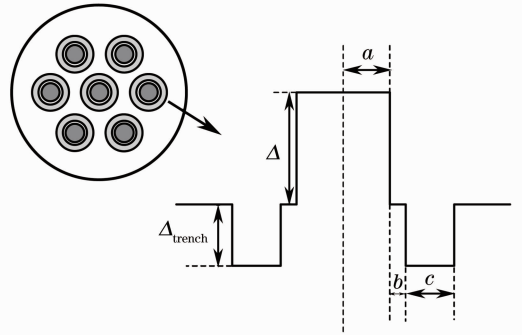


图 1 TA-MCF 单个纤芯的折射率分布图
Fig. 1 Designed refractive index profile of each TA-MCF core

3.1 下陷参数对芯间串扰 δ_{XT} 及模场面积 A_{eff} 的影响

表征 TA-MCF 的下陷参量有:下陷层宽度 c 、下陷层折射率差 $\Delta_{\text{trench}} = n_{\text{clad}} - n_{\text{trench}}$ 及下陷层距离纤芯的位置 b 。为了确保光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处单模传输,截止波长 λ_c 必须小于 $1.55 \mu\text{m}$,通常要求 λ_c 不大于 $1.26 \mu\text{m}$ 。图 2 给出了 $\lambda_c = 1.26 \mu\text{m}$ 时串扰 δ_{XT} 及 A_{eff} 随下陷参数的变化关系。图 2(a)~(c) 的下陷参数分别固定为: $b = 3 \mu\text{m}$, $\Delta_{\text{trench}} = 0.004$; $c = 11 \mu\text{m}$, $b = 3 \mu\text{m}$; $c = 12 \mu\text{m}$, $\Delta_{\text{trench}} = 0.0025$ 。假设纤芯参数:芯间距 $d = 50 \mu\text{m}$,纤芯与包层折射率差 $\Delta = 0.003$ 。由于串扰是随传输长度 z 的增加而增大的[如(1)式所示],为了研究结构参数对串扰的影响,必须固定传输长度 z 。而实际多芯光纤用作传输时往往要求其传输距离越远,串扰越低越好。因此计算时取 $z = 1 \text{ km}$ 处的串扰进行分析。图 2 表明,随着 $c, \Delta_{\text{trench}}$ 的增加串扰 δ_{XT} 单调递减。而随着 b 的变化 δ_{XT} 存在极小值,此时的 b 即为低串扰的最佳

值 b_{opt} 。因此在实际制作多芯光纤时,为了降低串扰可以选择大的 c 、大的 Δ_{trench} 以及靠近 b_{opt} 的 b 值。此外, A_{eff} 随 c 、 Δ_{trench} 的增加而减小,随 b 的增加而增大。因此若想要大的 A_{eff} , 则需选择小的 c 、小的

Δ_{trench} 以及大的 b 值。综上所述,实际制作中若想要大的 A_{eff} , 则下陷层在纤芯所占的比例越小越好(小的 c , 小的 Δ_{trench}); 若想要低的 δ_{XT} , 则下陷层在纤芯所占的比例越大越好(大的 c , 大的 Δ_{trench})。

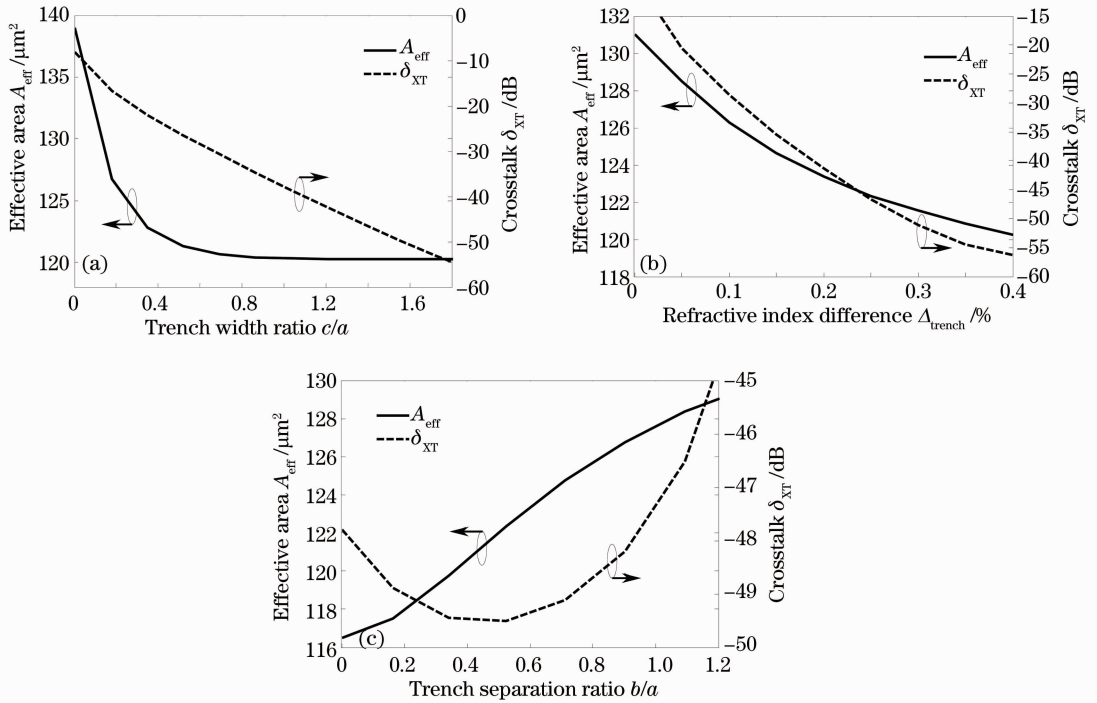


图2 有效面积 A_{eff} 和芯间串扰 δ_{XT} 随下陷参数的变化曲线。(a) 下陷层相对宽度 c/a ;
(b) 下陷层折射率差 Δ_{trench} ; (c) 下陷层相对位置 b/a

Fig. 2 Relationship between A_{eff}/δ_{XT} and the trench parameters. (a) Trench width ratio c/a ;
(b) refractive index difference Δ_{trench} ; (c) trench separation ratio b/a

3.2 截止波长 λ_c 对有效面积 A_{eff} 及芯间串扰 δ_{XT} 的影响

图2研究了固定 $\lambda_c = 1.26 \mu\text{m}$ 的情况,图3研究了不同 λ_c 对 A_{eff} 及串扰 δ_{XT} 的影响。固定工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 假设纤芯结构参数: 芯间距 $d = 50 \mu\text{m}$, 纤芯与包层折射率差 $\Delta = 0.003$, 纤芯半径 a_n 由截

止波长 λ_c 确定,通过改变纤芯结构参数 a_n 以达到不同截止波长的要求。图3分别给出了 A_{eff} 和串扰 δ_{XT} 随 λ_c 的变化关系。为了对比,图中给出了传统阶跃多芯光纤(SI-MCF)的变化曲线。图中表明, A_{eff} 随 λ_c 的增加而增大,串扰 δ_{XT} 随 λ_c 的增加而减小。在同一 λ_c 下,与 SI-MCF 相比,TA-MCF 可以

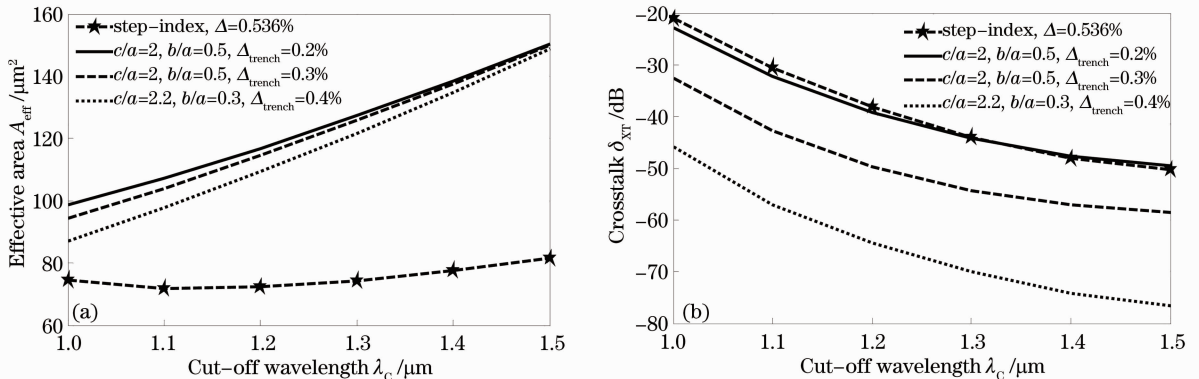


图3 (a)有效面积 A_{eff} 和(b)串扰 δ_{XT} 随截止波长 λ_c 的变化曲线

Fig. 3 Cut-off wavelength λ_c versus (a) the effective area A_{eff} and (b) the crosstalk δ_{XT}

同时实现大 A_{eff} 和低串扰 δ_{XT} 。当 λ_c 为 $1.4 \mu\text{m}$ 时, TA-MCF 的 A_{eff} 可以达到 $138.5 \mu\text{m}^2$, 串扰 δ_{XT} 可以低至 -74 dB 。如果 λ_c 增加到 $1.5 \mu\text{m}$, A_{eff} 可以超过 $150 \mu\text{m}^2$, 而 δ_{XT} 可以更低, 约为 -76 dB 。计算表明当光纤传输 10 km 时 δ_{XT} 约为 -68 dB , 传输 100 km 时 δ_{XT} 约为 -60 dB , 而 A_{eff} 可以保持在 $140 \sim 150 \mu\text{m}^2$, 与目前的多芯光纤相比^[3,6,13], 不仅 A_{eff} 增加了 $50 \sim 70 \mu\text{m}^2$, 而且串扰降低了 $15 \text{ dB} \sim 25 \text{ dB}$ 。综上所述, 这种多芯光纤通过增加 λ_c 可以在改善串扰的同时增大 A_{eff} 。

3.3 下陷参数对色散及色散斜率的影响

增大光纤有效面积的缺点是会增大其色散, 因此, 在考虑增大 A_{eff} 的同时必须注意光纤的色散问题。固定 $\lambda_c = 1.26 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.003$, 研究各下陷参数

对色散的影响。图 4 给出了波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 色散随各下陷参量的变化曲线。图 4(a) 中可以看出, 当固定 b 和 Δ_{trench} 时色散随 c 的增加而增大, 当增加到某一程度时不再变化; 并且这种变化趋势随 b 的增加而减小, 即 c 对色散的影响能力随 b 的增加而减小。图 4(b) 中可以看出, 当固定 c 和 b 时, 色散随 Δ_{trench} 的增加而单调增加; 且 b 越小, 变化趋势越明显, 而 c 越大变化趋势越明显; 总体上 b 的改变对变化趋势的影响更大一些。图 4(c) 中可以看出, 当固定 c 和 Δ_{trench} 时, 色散随 b 的变化趋势随着 c 的不同而不同; 当 c 较小时, 随着 b 的增加色散呈先增加后减小的趋势; 随着 c 的增大, 色散随 b 的增加呈单调递减的趋势; 并且这种变化趋势随 c 的增大而增大。

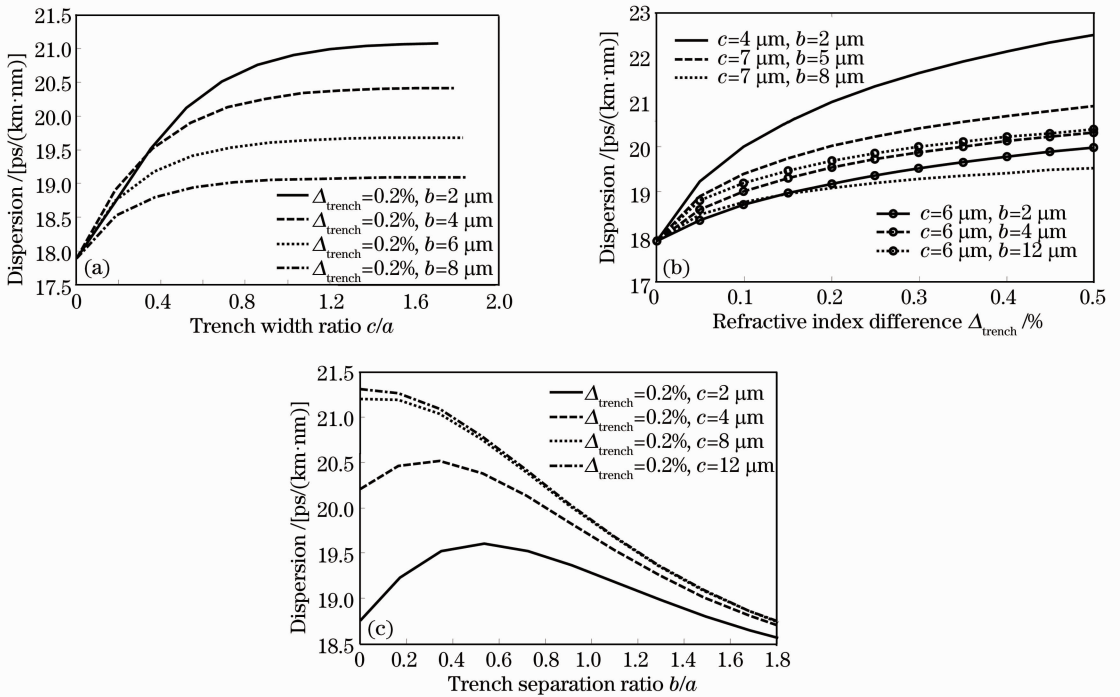


图 4 光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的色散随下陷参数的变化曲线。(a)下陷层相对宽度 c/a ; (b)下陷层折射率差 Δ_{trench} ; (c)下陷层相对位置 b/a

Fig. 4 Dispersion characteristic at $1.55 \mu\text{m}$ at various trench parameters. (a) Trench width ratio c/a ; (b) refractive index difference Δ_{trench} ; (c) trench separation ratio b/a

波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处各下陷参量对色散斜率的影响如图 5 所示, 当 b 较小时, 随着 c 的增加色散斜率先减小后增大, 随着 b 的增大, 色散斜率随 c 的增加而单调增加。当固定 c 和 b 时, 色散斜率随 Δ_{trench} 的增加而单调增加, c 越大变化趋势越明显, 且 c 的改变对变化趋势的影响比 b 的影响更大。对于固定 c 和 Δ_{trench} 的情况, 当 c 较小时, 随着 b 的增加色散斜率先

经历一个极小值; 而后呈先增加后减小的趋势, 而当 c 增大时, 随着 b 的增加色散斜率的极小值逐渐消失, 只呈现先增加后减小的趋势; 并且这种变化趋势随 c 的增大而减弱。

由以上分析可知, 为了保证光纤色散控制在一定范围内, 在不影响大 A_{eff} 及低串扰的前提下, 实际制作时应选择较小的 c 、较小的 Δ_{trench} 以及较大的 b 。

这与增大 A_{eff} 的参数选择规律类似,因此,这种光纤在增大 A_{eff} 的同时并不会使色散增加很多,能够保

证色散控制在一定的范围内。

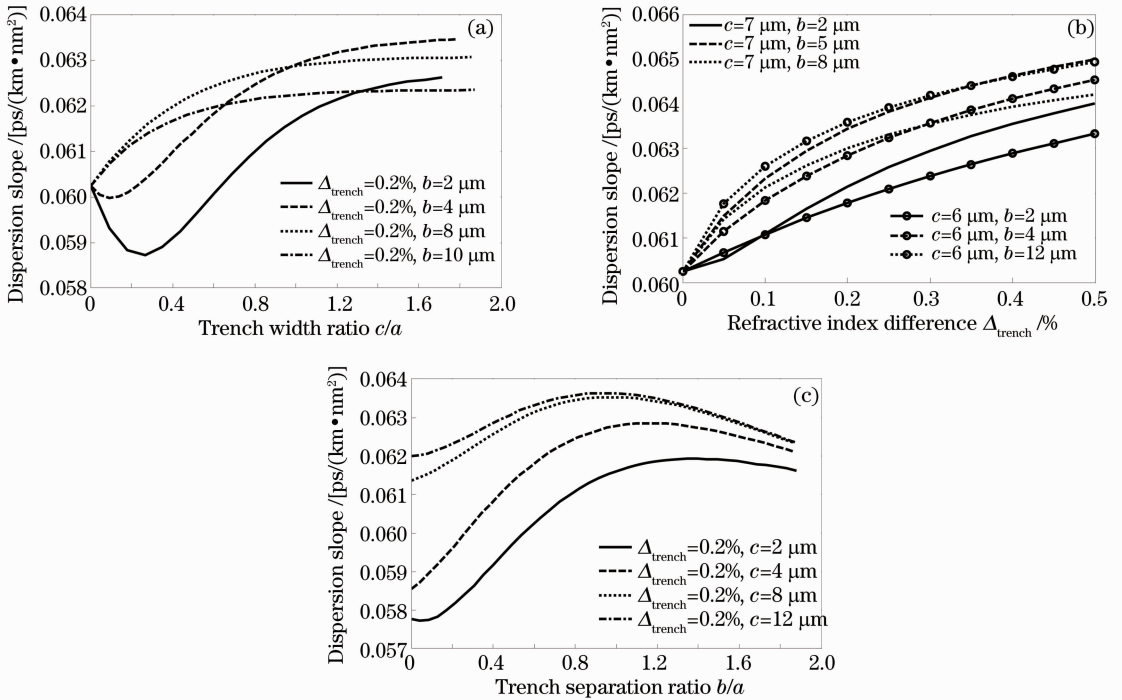


图5 光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的色散斜率随下陷参数的变化曲线。(a)下陷层相对宽度 c/a ; (b)下陷层折射率差 Δ_{trench} ; (c)下陷层相对位置 b/a

Fig. 5 Dispersion slope characteristic at $1.55 \mu\text{m}$ as a function of the trench parameters. (a) Trench width ratio c/a ; (b) refractive index difference Δ_{trench} ; (c) trench separation ratio b/a

3.4 光纤的制备与实验验证

为了对色散的变化规律进行验证,实际制作了几种不同的掺氟下陷层单芯光纤。由于低串扰多芯光纤中的色散问题是针对每根单芯单独讨论,因此制作单芯光纤讨论其色散问题,可以验证多芯光纤色散的变化规律。折射率分布如图 6(a)所示。并利用色散分析仪 CD400 测试了色散随波长的变化曲线,如图 6(b)所示,图中仿真曲线是按照制作的

光纤折射率分布计算的色散分布。图中显示,光纤测量值与理论值基本保持一致,对比理论值,其中 1 号、2 号光纤的测量值有些浮动,经分析可能是由于实际制作的光纤折射率呈近抛物线型分布,而理论结果是按照阶跃型分布近似得出的,因此可能在色散结果上有些许差异,但这并不影响对色散变化规律的验证。图中可以看出,在 $1.55 \mu\text{m}$ 处普通单模光纤 (SMF) 的色散约为 $16.3 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, G657

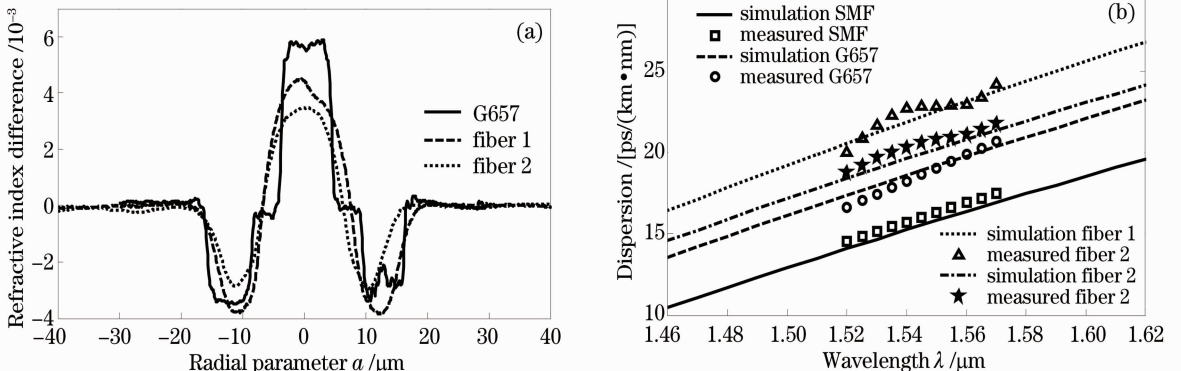


图6 (a)实际制作的光纤折射率分布图;(b)光纤色散随波长的变化曲线

Fig. 6 (a) Refractive index profile of the fabricated fibers; (b) dispersion characteristic of the fabricated fibers

光纤色散约为 $19.0 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, 1 号光纤色散约为 $22.5 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, 2 号光纤色散约为 $20.2 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 。结果表明, 色散的测量值与理论值基本一致, 验证了 3.3 节中对色散变化规律分析结论的正确性。

实验测量了制备的光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的模场面积: 1 号光纤 $A_{\text{eff},1} = 112 \mu\text{m}^2$, 2 号光纤 $A_{\text{eff},2} = 97.4 \mu\text{m}^2$, G657 光纤 $A_{\text{eff},G657} = 70.2 \mu\text{m}^2$ 。理论计算得 1 号光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的模场面积 $A_{\text{eff},1} = 136.06 \mu\text{m}^2$, 2 号光纤 $A_{\text{eff},G657} = 108.36 \mu\text{m}^2$, G657 光纤 $A_{\text{eff},G657} = 67.713 \mu\text{m}^2$ 。可以看出, 1 号和 2 号光纤测量结果略小于理论值, 而 G657 光纤测量值与理论值较接近。这可能是由于 1 号和 2 号光纤折射率呈近抛物线分布, 而理论计算是按阶跃型分布近似得出造成的。但总体来说, 不论测量值还是理论值, 模场面积均满足 $A_{\text{eff},1} > A_{\text{eff},2} > A_{\text{eff},G657}$ 。

4 结 论

本文系统研究了 TA-MCF 不同下陷参量对串扰 δ_{XT} 及模场面积 A_{eff} 的影响。通过调整下陷参数, MCF 的下陷层可以在改善串扰的同时增大 A_{eff} 。在实际制作时为了减小串扰 δ_{XT} 可以选择大的 c 、大的 Δ_{trench} 以及靠近最佳值 b_{opt} 的 b ; 若想要大的 A_{eff} , 则需选择小的 c 、小的 Δ_{trench} 以及大的 b 。研究了截止波长 λ_c 对 A_{eff} 及串扰 δ_{XT} 的影响, 结果表明通过增加 λ_c , A_{eff} 可以增大 $50 \sim 70 \mu\text{m}^2$, 串扰可以降低 $15 \text{ dB} \sim 25 \text{ dB}$ 。另外, 考虑到增大 A_{eff} 会牺牲一定的色散, 通过理论计算和实验结果的对比分析, 讨论了下陷参数对色散及色散斜率的影响。研究表明这种低串扰、大 A_{eff} TA-MCF 在大容量高功率光通信系统中具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 K Mukasa, K Imamura, Y Tsuchida, *et al.*. Multi-core fibers for large capacity SDM [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011. OWJ1.
- 2 Jun Sakaguchi, Yoshinari Awaji, Naoya Wada, *et al.*. 109-Tb/s ($7 \times 97 \times 172$ -Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011.
- 3 Katsuhiko Takenaga, Yoko Arakawa, Shoji Tanigawa, *et al.*. Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011. OWJ4.
- 4 Kunimasa Saitoh, Takashi Matsui, Taiji Sakamoto, *et al.*. Multi-core hole-assisted fibers for high core density space division multiplexing [C]. 15th OptoElectronics and Communications Conference, 2010. 164–165.
- 5 M Koshiba, K Saitoh, Y Kokubun Heterogeneous multi-core fibers; proposal and design principle [J]. IEICE Electron Express, 2009, 6(2): 98–103.
- 6 Katsunori Imamura, Kazunori Mukasa, Ryuichi Sugizaki. Trench assisted multi-core fiber with large A_{eff} over $100 \mu\text{m}^2$ and low attenuation loss [C]. European Conference and Exposition on Optical Communications, 2011. Mo. 1. LeCervin. 1.
- 7 Tetsuya Hayashi, Toshiki Taru, Osamu Shimakawa, *et al.*. Ultra-low-crosstalk multi-core fiber realizing space-division multiplexed ultra-long-haul transmission [C]. CLEO: Science and Innovations, 2012. CTh4G.3.
- 8 Tetsuya Hayashi, Toshiki Taru, Osamu Shimakawa, *et al.*. Low-crosstalk and low-loss multi-core fiber utilizing fiber bend [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2011. OWJ3.
- 9 Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba, Katsuhiko Takenaga, *et al.*. Crosstalk and core density in uncoupled multicore fibers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(21): 1898–1901.
- 10 S Matsuo, T Nunome, T Yoshida, *et al.*. Design optimization of trench index profile for the same dispersion characteristics with SMF [C]. National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. JWA2.
- 11 Katsuhiko Takenaga, Yoko Arakawa, Shoji Tanigawa, *et al.*. An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction [J]. IEICE Transactions on Communications, 2011, E94-B(2): 409–416.
- 12 Katsunari Okamoto. Fundamentals of Optical Waveguides (Second Edition) [M]. Burlington; Academic Press, 2010. 159–164.
- 13 B Zhu, T F Taunay, M F Yan, *et al.*. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network [J]. Opt Express, 2010, 18(11): 11117–11122.

栏目编辑: 王晓球