

下陷层辅助单模光纤的弯曲损耗研究

张子阳^{1,2} 任国斌^{1,2} 周定安^{1,2} 吴家梁^{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 随着光纤到户网络的逐渐普及, 弯曲不敏感光纤受到了越来越多的关注。对下陷层辅助弯曲不敏感光纤进行了系统的研究。在带有下陷层的弯曲不敏感光纤中, 下陷层的折射率差、下陷层的宽度以及下陷层至芯层的距离是影响弯曲损耗的三个重要参数。结合上述三个参数, 系统研究了光纤半径以及涂覆层折射率对弯曲损耗的影响。研究表明, 通过改变光纤半径可以有效降低弯曲损耗; 在特定的弯曲半径下, 当涂覆层折射率增大时可以有效减小光纤的弯曲损耗。这些结论对弯曲不敏感光纤的设计及制造具有指导意义。

关键词 光纤光学; 弯曲不敏感光纤; 弯曲损耗

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.020605

Study on Bending Losses of Trench-Assisted Single Mode Optical Fiber

Zhang Ziyang^{1,2} Ren Guobin^{1,2} Zhou Ding'an^{1,2} Wu Jiali^{1,2}

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

²Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract With the development of fiber-to-the-home (FTTH) network, bend-insensitive fiber (BIF) has attracted more and more attention. We focus on bending losses of the trench-assisted bend-insensitive optical fiber. For the trench-assisted bend-insensitive fiber, the refractive index difference of trench, the width of trench and the distance between the core and trench are three important parameters which could influence the bending loss. Combining the three parameters, we investigate the impact of fiber radius and refractive index of the coating layer on the bending losses. It is shown that: bending losses can be effectively reduced by changing the radius of the fiber; with refractive index of the coating layer increasing, the bending losses of the fiber could be effectively reduced for certain bending radius. The conclusion is of significance for designing and manufacturing of bend-insensitive fibers.

Key word fiber optics; bend-insensitive fiber; bending loss

OCIS Codes 060.2280; 060.2310; 060.2430

1 引言

随着全球光通信行业的迅速发展, 目前光纤到户 (FTTH) 网络逐步普及。受复杂应用场合的影响 (如街道、楼宇、拐角), 光纤在安装及使用过程中不可避免地会出现弯曲的现象 (如在拐角处布线), 这就对光纤的弯曲敏感性提出了新的要求。为应对新的现实需求, 国际电信联盟 (ITU) 出台了关于弯曲不敏感光纤的规格和标准, 并将此类光纤定义为 G.657 光纤^[1]。目前改善光纤的弯曲损耗特性可以有以下几种方案: 在光纤包层中引入 6 个空气孔来降低弯曲损耗^[2], 在光纤纤芯周围引入纳米空气孔来减小弯曲损耗^[3], 引入下陷层来降低弯曲损耗^[4-5]。由于具有与现有标准单模光纤 (G.652 光纤) 的兼容性更好、与单模光纤的熔接更为方

收稿日期: 2013-10-28; 收到修改稿日期: 2013-10-30; 网络出版日期: 2014-01-14

基金项目: 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: 张子阳 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光学方面的研究。E-mail: 11120201@bjtu.edu.cn

导师简介: 任国斌 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤光学、光纤非线性、特种光纤及器件等方面的研究。

E-mail: gbren@bjtu.edu.cn (通信联系人)

便等方面的优点,目前下陷层辅助弯曲不敏感单模光纤应用最为广泛^[4-6]。

1997年,Faustini等^[7]提出了采用微扰理论计算单模光纤弯曲损耗的方法,并对简单结构下只有单一包层的单模光纤的弯损情况进行了计算。Watekar等^[4-5]对多包层光纤的几个重要参数对弯曲损耗的影响进行了系统分析。2013年,Fini等^[8]提出将光纤包层的折射率做成非对称的,以此来减小在特定方向上弯曲所产生的损耗,同时这种情况下光纤具有很好的抑制高模的特性。

尽管具有下陷层的低弯损单模光纤已经被广泛研究,但是目前的研究还主要集中在三个主要参数上(即下陷层的折射率差、下陷层的宽度、下陷层至芯层的距离),而光纤半径以及涂覆层的折射率对弯曲损耗的影响还没有被系统的研究。本文将研究上述三个重要参数对光纤弯曲损耗的影响,继而研究光纤半径和涂覆层折射率这两个参数对光纤弯曲损耗的影响。

2 多包层光纤弯曲损耗的计算

对于多包层光纤,单一包层单模光纤的弯曲损耗计算公式将不再适用。本节介绍多包层光纤弯曲损耗的计算方法。对于长度为 L 的单模光纤,其弯曲损耗的计算公式为

$$L_s = 10 \lg[\exp(2\alpha L)], \quad (1)$$

式中 α 是弯曲损耗常数,它的大小由光纤的结构、弯曲半径以及光的波长决定。对弯曲损耗的研究主要将集中在对 α 的计算上。

图1给出了带有下陷层的弯曲不敏感光纤的结构示意图,其中芯层半径为 a ,芯层与下陷层距离为 b ,下陷层宽度为 c ,下陷层与涂覆层之间的距离为 d ,芯层相对于包层的折射率差为 Δ_c ,下陷层相对于包层的折射率差为 Δ_t ,涂覆层相对于包层的折射率差为 Δ_1 ,根据微扰理论^[7,9],弯曲光纤的包层中的场可以表示为

$$\Psi_q(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [D_q(\zeta)B_i(X_q) + H_q(\zeta)A_i(X_q)] \exp(-i\zeta y) d\zeta, \quad (2)$$

式中 X_q 代表每一层的半径, A_i 和 B_i 是艾里函数, D_q, H_q 为 q 层艾里函数展开系数,并且有

$$X(x, \zeta) = \left(\frac{R}{2k^2 n_q^2} \right)^{2/3} \left[\beta^2 + \zeta^2 - k^2 n_q^2 \left(1 + \frac{2x}{R} \right) \right], \quad (3)$$

式中 β 为传播常数, n_q 为第 q 层的折射率, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, R 为弯曲半径。

对于最外层(假设为第 N 层) D_N 和 H_N 有, $H_N = -iD_N(\zeta)$,根据任意两层之间场的连续性,可递推得到 $D_1(\zeta) = GH_1(\zeta)$,其中 G 为比例系数进而得到

$$H_1(\zeta) = \frac{\pi}{\{GB_i[X_2(x, \zeta)] + A_i[X_2(x, \zeta)]\}(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2}} \exp[-a(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2}], \quad (4)$$

式中 $\gamma = (\beta^2 - k^2 n_2^2)^{1/2}$,进而得出

$$2\alpha = -2 \frac{\kappa}{2\pi\beta V^2 K_1^2(a\gamma)} \operatorname{Im} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} H_1(\zeta) A_i[X_2(0, \zeta)] d\zeta \right\}, \quad (5)$$

式中 K 为第二类变形 Bessel 函数, $V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, $\kappa = k^2 n_1^2 - \beta^2$ 。

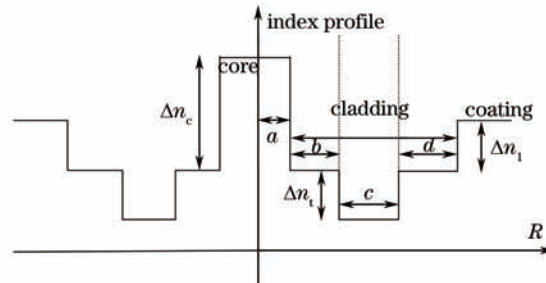


图1 带有下陷层的单模光纤结构示意图

Fig.1 Diagram of trench-assisted single mode optical fiber

这种算法的优势在于不仅可以计算单一包层光纤的弯曲损耗,还可以计算具有复杂折射率分布的多包层光纤的弯曲损耗。

3 各参数对弯曲损耗的影响

3.1 b 、 c 、 Δ_1 三个参数对弯曲损耗的影响

首先计算带有下陷层的单模光纤中的三个重要参数(即 b 、 c 、 Δ_1)单独在一定范围内变化的情况下,波长分别为 1550 nm 和 1310 nm 时的弯曲损耗。在接下来计算中除某参数单独变化外其他参数设定如下:弯曲半径为 5 mm, $a=4.1 \mu\text{m}$, $b=8 \mu\text{m}$, $c=12 \mu\text{m}$, $\Delta_c=0.005$, $\Delta_1=-0.005$, 包层折射率 $n_{\text{clad}}=1.444$, 光纤半径为 $62.5 \mu\text{m}$, 涂覆层折射率差 $\Delta_1=0.006$ 。

在图 2~4 中,可见 1310 nm 波段相比 1550 nm 波段具有更好的抗弯损特性,这是由于 1310 nm 波段的模场直径更小,可以更好的束缚住光,在弯曲时产生的损耗较低。在图 2 中可见当 b 变化时弯曲损耗存在优化点,在此优化点之后损耗迅速增加,在达到最大值之后弯损开始出现周期性振荡^[10],这点与文献[4]中的结论不同。在实际生产中增大 b 的值不仅会增加制造成本,而且容易造成高峰耦合峰的形成,在弯曲不敏感光纤的结构优化过程中应尤其注意避免这种高峰共振耦合峰的形成。

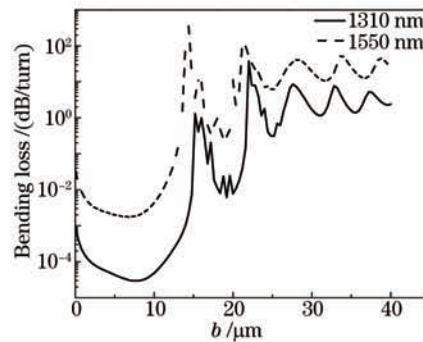


图 2 弯曲损耗与参数 b 之间的关系

Fig.2 Bending loss as a function of b

在图 3、图 4 中弯曲损耗随 c 和 Δ_1 的变化而单调变化。图 3 中弯曲损耗随 c 的增加而减少,当 c 达到一定值之后 ($15 \mu\text{m}$) 再增加其长度,弯曲损耗的减少不显著,并且在实际生产中由于工艺的限制,下陷层宽度不宜过大。

图 4 中弯曲损耗随下陷层折射率差的增大而不断减小,同图 3 中的 c 相似,由于工艺的限制,下陷层折射率差无法过小,故在下面的计算中一般取其为 0.005 左右就可以很好地降低弯曲损耗。

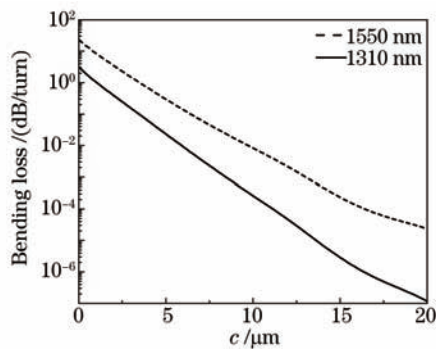


图 3 弯曲损耗与参数 c 之间的关系

Fig.3 Bending loss as a function of c

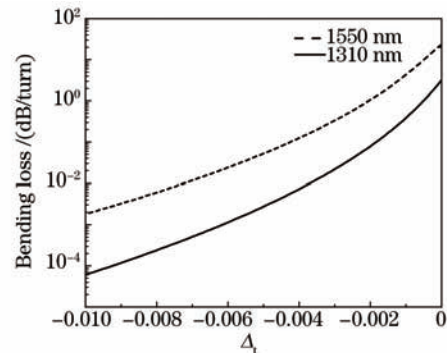


图 4 弯曲损耗与参数 Δ_1 之间的关系

Fig.4 Bending loss as a function of Δ_1

3.2 包层半径对弯曲损耗的影响

分别计算当 d 取 5、15、25、35 μm 时,弯曲半径在 1~10 mm 间的弯曲损耗。计算的结果如图 5 所示,可以看出,在 $d=5 \mu\text{m}$ 时的弯曲损耗要明显低于 $d=25、35 \mu\text{m}$ 时的弯损,与 $d=15 \mu\text{m}$ 时差距较小,不过在 5.5~10 mm 区间 $d=5 \mu\text{m}$ 时的损耗要低于 $d=15 \mu\text{m}$ 时的损耗。G.657 标准要求当弯曲半径为 7.5 mm 时,弯曲损耗要小于 0.03 dB/turn,由图 5 可以看出,4 条曲线在 7.5 mm 处的弯曲损耗小于 0.001 dB/turn,能够很好地满足这一标准。其中包层为 5 μm 时的损耗小于其他三条曲线。因此,总的来说,减小光纤的半径可以起到降

低光纤弯曲损耗的作用。

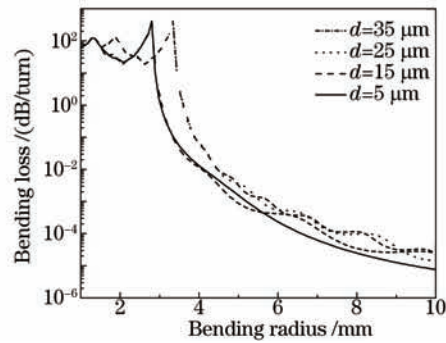


图5 当 d 取不同值时弯曲损耗与弯曲半径的关系

Fig.5 Bending loss as a function of bending radius for different d

图6显示了当 d 在 $0\sim 30\ \mu\text{m}$ 范围内变动时,图2中的最小弯曲损耗的变化情况。可以看出,最小弯曲损耗呈周期性振荡变化,在 $d=2.4\ \mu\text{m}$ 时弯损最大,最大值为 $0.04\ \text{dB/turn}$,在 $d=5.4\ \mu\text{m}$ 时的弯曲损耗最小,为 $0.026\ \text{dB/turn}$ 。图7显示了当 d 在 $0\sim 30\ \mu\text{m}$ 范围内变动时,图2中的最小损耗点出现时对应的 b 值的变化情况。可见 b 值也随着 d 值的变化而出现震荡,在 $d=1.8\ \mu\text{m}$ 处 b 取到最大值 $12.56\ \mu\text{m}$,在 $d=2.4\ \mu\text{m}$ 处 b 取得最小值 $8.63\ \mu\text{m}$ 。由图7可知,可以通过改变 d 值的方式来改变图2中取最小值点的 b 值的位置,从而可在实际生产的过程中控制 b 的大小同时不对弯损造成显著影响。另外,图6和图7中曲线都呈现周期性的振荡特征,这是由于光在包层与涂覆层之间反射导致的^[7]。

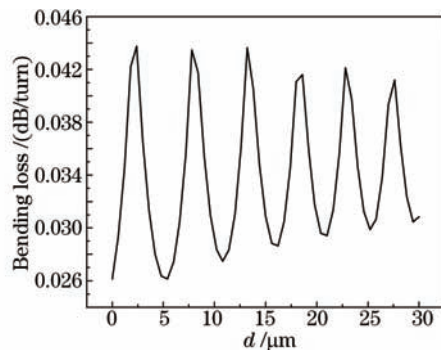


图6 图2中最低弯曲损耗与 d 取值之间的关系

Fig.6 Available minimum bending loss in Fig.2 as a function of d

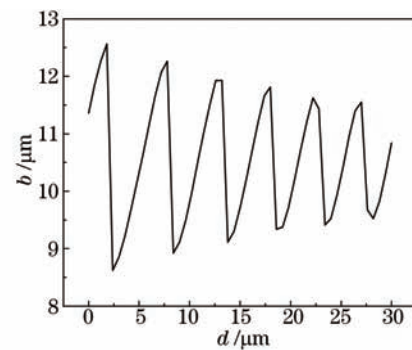


图7 图2中取到最小弯曲损耗时 b 与 d 取值的关系

Fig.7 Optimized b corresponding to the minimum bending loss in Fig.2 as a function of d

3.3 涂覆层折射率对弯曲损耗的影响

图8为包层折射率差 Δ_1 变化时弯曲损耗与弯曲半径的关系,由图中曲线可以看出,弯曲半径在 $1\sim 3\ \text{mm}$ 之间变化时,改变 Δ_1 的值并不能有效地减小弯损,图中三条曲线在这一区间内的值十分接近。在 $3\sim 10\ \text{mm}$ 的区间中,曲线开始出现周期性的振荡,在振荡过程中 $\Delta_1=0.201$ 时的弯损略大于 $\Delta_1=0.401$ 时的弯损,同时这两条曲线在一些区域内的弯损要小于 $\Delta_1=0.001$ 时的弯损。比较弯曲半径为 $5\ \text{mm}$ 时的三条曲线,可以得到 $\Delta_1=0.006$ 时的弯损为 $0.024\ \text{dB/turn}$, $\Delta_1=0.201$ 时弯损为 $8.78\times 10^{-4}\ \text{dB/turn}$, $\Delta_1=0.401$ 时的弯损为 $6.87\times 10^{-4}\ \text{dB/turn}$,由此可见在弯曲半径为 $5\ \text{mm}$ 的前提下提高涂覆层的折射率对弯损的减小有明显效果。

为了分析图8中曲线的变化趋势,分别取弯曲半径为 $5\ \text{mm}$ 和 $7.5\ \text{mm}$ 计算涂覆层折射率差对弯曲损耗的影响,得到图9。在弯曲半径为 $5\ \text{mm}$ 时,增大涂覆层的折射率对降低弯曲损耗有显著作用,弯曲损耗由最大值 $0.0027\ \text{dB/turn}$ 降低至 $7.42\times 10^{-4}\ \text{dB/turn}$,下降72.5%。但是在 $\Delta_1>0.2$ 后,涂覆层折射率对弯损的影响很小,从 $\Delta_1=0.2\sim 0.5$ 区间,弯损由 $9.97\times 10^{-4}\ \text{dB/turn}$ 降低至 $7.42\times 10^{-4}\ \text{dB/turn}$ 。而在弯曲半径为 $7.5\ \text{mm}$ 时,涂覆层折射率差的增大对弯损的减小十分有限。这与图8中的得出的结论吻合,说明涂覆层折射率只有在某些特定的弯曲半径下才会显著影响弯曲损耗。

设定涂覆层折射率为1.55后,重新计算 b 与弯曲损耗的关系,可以得到图10中虚线所示的曲线,实线为

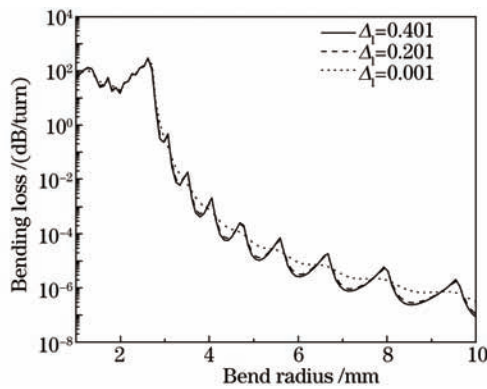


图8 涂覆层折射率差 Δ_1 取不同值时弯曲损耗与弯曲半径的关系

Fig.8 Bending loss as a function of bending radius for different Δ_1

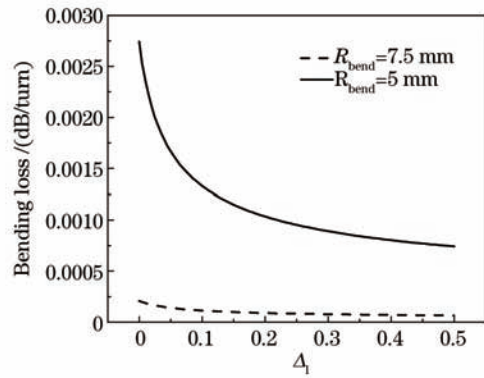


图9 弯曲半径取不同值时弯曲损耗与涂覆层折射率差的关系

Fig.9 Bending losses as a function of Δ_1 for different bend radius

未改变前的关系曲线。图中虚线在 $b=7.95 \mu\text{m}$ 处取得最小弯曲损耗 $1.35 \times 10^{-5} \text{ dB/turn}$, 相比之下, 实线部分在 $b=7.65 \mu\text{m}$ 处取得的最小弯曲损耗为 $2.92 \times 10^{-5} \text{ dB/turn}$ 。仅由此图中的两条曲线可以看出, 随着 Δ_1 的增大, 图2中最小弯曲损耗减小, 相应地, 取到最小弯曲损耗点处的 b 值增大。

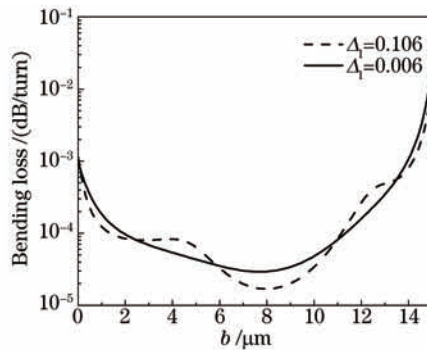


图10 当涂覆层折射率差 Δ_1 为不同值时弯曲损耗与 b 的关系

Fig.10 Bending loss as a function of b for different Δ_1

为了进一步研究图2中的最小值点随 Δ_1 的变化趋势, 计算得到图11和图12。图11为当 Δ_1 变化时图2中最小弯曲损耗的变化情况, 由图中曲线可以看出, 当 Δ_1 变大时曲线整体呈单调下降趋势, 但下降的快慢有所不同。当 Δ_1 处于 $0 \sim 0.15$ 区间时, 曲线下降快速, 最小弯曲损耗由 $2.48 \times 10^{-3} \text{ dB/turn}$ 下降至 $1.18 \times 10^{-3} \text{ dB/turn}$, 弯曲损耗下降52%。当 Δ_1 由0.15增大至0.5时, 最小弯曲损耗下降趋势缓慢, 由 $1.18 \times 10^{-3} \text{ dB/turn}$ 下降至 $7.4 \times 10^{-4} \text{ dB/turn}$ 。由此可见, 初始时增大涂覆层折射率对弯曲损耗有较大的影

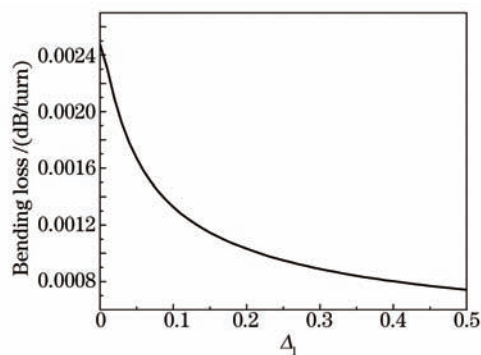


图11 图2中最小值点与涂覆层折射率差 Δ_1 的关系曲线
Fig.11 Available minimum bending loss in Fig.2 as a function of Δ_1

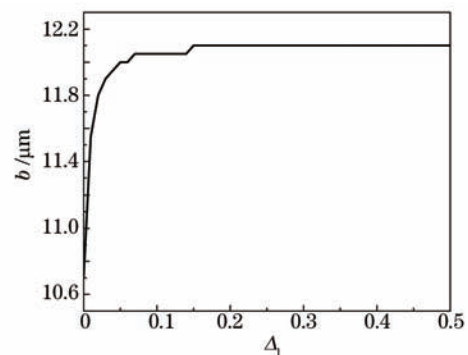


图12 图2中取最小值点时 b 的大小与涂覆层折射率差 Δ_1 的关系曲线
Fig.12 Optimized b corresponding to the minimum bending loss in Fig.2 as a function of Δ_1

响。图12为当 Δ_1 增大时图2中取最小弯曲损耗时相应的 b 的变化情况。图中曲线在 Δ_1 由0增大至0.06时, b 的增长速度较快,由10.7 μm 升至12 μm ,之后 Δ_1 由0.06增大至0.5的过程中 b 的值仅由12 μm 增加至12.1 μm ,在这个区间中 Δ_1 对 b 的影响较之上一个区间有所下降,并且在这个区间中,曲线多处呈阶梯状变化,即在0.05~0.06,0.07~0.14,0.15~0.5这几个区间中 b 的取值相同。

4 结 论

计算分析了带有下陷层的多包层光纤的各个重要参数对弯曲损耗的影响,特别是分析了包层半径和涂覆层折射率对弯损的影响。分析表明:包层的改变可以有效降低弯曲损耗;在特定的弯曲半径下,增大涂覆层折射率有利于降低光纤的弯曲损耗;下陷层至芯层的距离是一个重要参数,其与弯损的关系曲线中存在可优化的最小弯曲损耗,而包层半径和涂覆层折射率这两个参数对这个最小弯曲损耗有重要的影响。本文结论对于弯曲不敏感光纤的设计和制造,特别是光纤涂覆层材料的选取有重要参考价值。

参 考 文 献

- 1 Recommendation ITU-T G.657. Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fiber and Cable for the Access Network[S]. ITU-T Fiber Standard, 2006. 1-15.
- 2 Bing Y, Ohsono K, Kurosawa Y, *et al.*. Low-loss holey fiber[J]. Hitachi Cable Review, 2005, (24): 1-5.
- 3 Li M J. Bend-Insensitive Optical Fibers Simplify Fiber-to-the-Home Installations[OL]. <http://spie.org/x23952.xml?high light=x2402>, 2008-04-21.
- 4 Watekar P R, Ju S, Yoon Y S, *et al.*. Design of a trenched bend insensitive single mode optical fiber using spot size definitions[J]. Opt Express, 2008, 16(18): 13545-13551.
- 5 Watekar P R, Ju S, Htein L, *et al.*. A simple and reliable method to determine LP11 cutoff wavelength of bend insensitive fiber[J]. Opt Express, 2010, 18(13): 13761-13771.
- 6 Goto Y, Nakajima K, Kurashima T. Low bending-loss fiber using cladding diameter optimization[C]. Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) 2012, 2012. 813-814.
- 7 Faustini L, Martini G. Bend loss in single-mode fibers[J]. J Lightwave Technology, 1997, 15(4): 671-679.
- 8 Fini J M, Nicholson J W. Bend compensated large-mode-area fibers: achieving robust single-modedness with transformation optics[J]. Opt Express, 2013, 21(16): 19173-19179.
- 9 Wang Q, Farrell G, Feir T. Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers[J]. Opt Express, 2005, 13(12): 4476-4484.
- 10 Ren G, Lin Z, Zheng S, *et al.*. Resonant coupling in trenched bend-insensitive optical fiber[J]. Opt Lett, 2013, 38(5): 781-783.