

全固态微结构弯曲不敏感型光纤研究

龚天翼¹ 陈明阳¹ 周 骏² 张永康³

(¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 宁波大学理学院, 浙江 宁波 315211)
³ 东南大学机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要 提出一种新型弯曲不敏感光纤:在阶跃光纤的包层中引入微结构,排布低折射率介质柱以降低弯曲损耗,通过在纤芯外侧设置低折射率环形区以去除高阶模,通过保持环形区和纤芯的折射率差以保证光纤的低连接损耗。采用有限元法分析了光纤的基模弯曲损耗和高阶模的束缚损耗。采用光束传播法分析了微结构光纤与普通单模光纤的连接损耗。计算结果表明:这种新型光纤的弯曲损耗不仅满足 G.657 A1 标准的要求,且与标准单模光纤的连接损耗小于 0.08 dB。

关键词 光纤光学; 弯曲损耗; 连接损耗; 模场直径; 有限元法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s105003

Analysis of All-Solid Microstructured Bend-Insensitive Optical Fiber

Gong Tianyi¹ Chen Mingyang¹ Zhou Jun² Zhang Yongkang³

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
² Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China
³ School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract A novel bend-insensitive optical fiber is proposed. Low-index rods are included in the cladding to reduce the bending loss, and low refractive index ring surrounding the core is used to remove the higher-order mode. Index-contrast between the core and the low-index ring is conserved to ensure low splicing loss in standard single-mode optical fiber. The bending loss of the fundamental mode and the confinement loss of the higher-order mode are investigated by the finite-element method. The splicing losses between the bend-insensitive optical fiber and the single-mode optical fiber are investigated by the beam propagation method. The results show that the bending loss of the proposed fiber can meet the G.657 A1 standard and the splicing loss between the bend-insensitive optical fiber and the single-mode optical fiber is less than 0.08 dB.

Key words fiber optics; bending loss; splicing loss; mode field diameter; finite element method

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.4005

1 引 言

光纤到户 (FTTH) 是指将光网络单元延伸至普通住宅用户。FTTH 能提供巨大的带宽,使数据、语音和视频的三网融合成为可能。而且对于网络运营商来说,FTTH 增强了物理网络对数据格式、速

率、波长和协议的透明性,放宽了对环境条件和供电等要求,简化了维护和安装。光纤到户是解决从互联网主干网到用户桌面的“最后一公里”瓶颈现象的最佳方案。

在 FTTH 建设中,由于光缆经常需要被安放在

收稿日期: 2013-06-25; **收到修改稿日期**: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(10904051)、江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目、“应用非线性科学与技术”浙江省重中之重学科开放基金项目(xkz12003)

作者简介: 龚天翼(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: guangxingongtiany@126.com

导师简介: 陈明阳(1976—),男,博士,副教授,主要从事微结构光纤及其应用等方面的研究。

E-mail: miniyong@163.com(通信联系人)(中国光学学会会员号: S0420113135)

拥挤的管道中或者经过多次弯曲后被固定在接线盒和插座等具有狭小空间的线路终端设备中,对于普通光纤来说,这必然带来较大的弯曲损耗。根据FTTH应用的特点,人们提出采用弯曲不敏感单模光纤^[1]以解决此问题。相应的,国际电信联盟ITU-T也提出了弯曲不敏感单模光纤的标准,即G.657光纤标准。

降低光纤弯曲损耗的一种简单有效的方法是减小纤芯的尺寸,即减小光纤的模场直径,这种方法制造工艺简单,但其与普通单模光纤的匹配较差,连接损耗较大。另一种常见的低弯曲损耗光纤是包层折射率凹陷光纤^[2],这种光纤采用在包层区域增加一个低折射率凹槽的方法来减小光纤的弯曲损耗,同时保证光纤高阶模被有效地泄漏出去。它可以在对光纤的基模模场分布干扰较小的前提下,获得低弯曲损耗传输。微结构光纤^[3-6]也可以实现低弯曲损耗^[7-8]的光传输,例如,在常规单模光纤纤芯周围的包层中排布空气孔,即所谓孔助光纤^[9-14]。由于包层中的空气孔折射率低,使得这种光纤具有较高的折射率差从而显著减小弯曲损耗。但这种光纤需要较精确地控制熔接过程,以减小其连接损耗,同时,由于空气孔的存在,活动连接会比较困难。Li等^[15]最近报道了一种具有极低弯曲损耗特性的新型光纤,这种光纤有一个纳米尺寸的微环结构。在1550 nm波长、弯曲半径为5 mm处其弯曲损耗小于0.01 dB。此外,光纤的其他光学参数也都与标准单模光纤完全兼容。

本文提出一种新的弯曲不敏感单模光纤设计思路:通过在普通光纤包层中引入一圈低折射率的介质柱,实现降低光纤的弯曲损耗;通过降低纤芯及其周围材料的折射率来有效地去除高阶模,并保持光纤纤芯及周围区域与普通单模光纤折射率分布的相似性,从而实现与普通单模光纤的低损耗连接。由于不需要引入空气孔,因而可以有效地降低光纤制作的难度与光纤连接时的复杂度。

2 光纤结构与计算方法

为保证与普通单模光纤的低损耗连接,采用与普通阶跃光纤相似的纤芯结构,同时,在包层增加低折射率介质柱来降低光纤的弯曲损耗。由于低折射率介质柱的引入会导致高阶模的出现,为此,通过降低纤芯及其周围的环形区的折射率来降低纤芯的折射率。此时纤芯与环形区的折射率差保持不变,而光纤的基模主要在纤芯及环形区传输,这有利于保

持光纤的基模与普通单模光纤的相似性,从而有效降低光纤的连接损耗。

光纤结构如图1所示。该光纤包括纤芯、低折射率环、低折射率介质柱以及基质材料。纤芯为高折射率介质柱,位于低折射率环内;6个中心连线呈正六边形的低折射率介质柱位于低折射率环的外侧。光纤的主要结构参数如下:纤芯、低折射率环、低折射率介质柱、基质材料的折射率分别 n_1, n_2, n_3, n_4 ;纤芯半径为 a ,低折射率环宽度为 h ,低折射率介质柱的周期为 Λ 、直径为 d 。

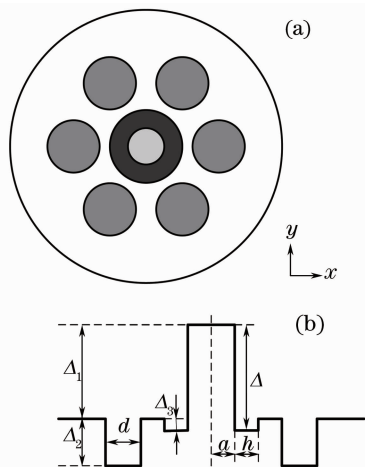


图1 光纤结构示意图。(a) 截面图;
(b) 沿x轴方向折射率分布图

Fig. 1 Fiber structure. (a) Cross-section view;
(b) refractive index profile along x-axis direction

采用有限元法来分析低弯曲损耗光纤的传输特性。有限元网格的数量取50000左右,光纤外侧需设置理想匹配层(PML)边界条件^[16-18],如图2所示。PML层与纤芯中心的间距为200 μm,PML层的厚度取为20 μm。PML层为有耗介质,其作用是将辐射到光纤边界上的能量吸收掉,减少能量在边界的反射。

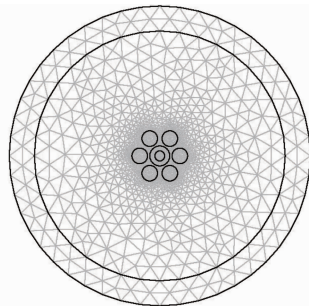


图2 有限元法计算时的边界条件及光纤网络划分示意图
Fig. 2 Schematic of boundary condition and meshing grids of fiber when using finite-element method calculation

3 光纤特性分析

3.1 弯曲损耗分析

首先确定未引入低折射率介质柱和低折射率环时纤芯的基本参数。这里选取一个与 G. 652 单模标准光纤, 即与标准单模光纤相匹配的阶跃光纤。阶跃光纤有关参数如下: 纤芯材料为掺杂的石英, 纤芯半径为 $4 \mu\text{m}$, 纤芯折射率为 1.44902; 包层材料为纯石英, 折射率为 1.44402。光纤在 1310 nm 波长处的光纤模场直径为 $8.7 \mu\text{m}$ 。其模场直径满足 ITU-T G. 652 单模光纤标准, 即当光波长为 1310 nm 时, 其模场直径在 $8.6 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 之间。

然后, 加入 6 个直径为 d 、周期为 Λ 的微结构低折射率介质柱, 以实现低弯曲损耗。这里采用了低折射率介质柱, 降低了采用空气孔以后, 光纤与普通石英单模光纤熔接时, 需要对熔接进行精确控制的要求, 以及含空气孔的光纤在制作时需控制空气孔尺寸和精度的难度。基于低折射率介质柱的理论与实验研究已经有相关的报道^[19-21]。

图 3 给出了低折射率介质柱直径 d 与光纤基模弯曲损耗的关系曲线。这里取光波长为 1550 nm, 低折射率介质柱的周期 $\Lambda = 16 \mu\text{m}$, 折射率 $n_3 = 1.43402$, R 为光纤的弯曲半径。由图 3 可知, 光纤基模的弯曲损耗随着 d 的增大而减小。而随着弯曲半径的减小, 光纤弯曲损耗显著增大, 这体现在不同的弯曲半径下的光纤弯曲损耗的数量级不同。为保证光纤的弯曲损耗满足要求, 取 $d = 12.5 \mu\text{m}$ 。在此参数下, 当弯曲半径为 15 mm 时, 其弯曲损耗为 0.0024 dB/m , 未成缆时的每匝光纤的弯曲损耗为 $2.26 \times 10^{-4} \text{ dB}$, 该弯曲损耗达到了 G. 657 A2 标准的要求。但此时光纤有高阶模存在, 例如在 1310 nm 波长处, 其 LP_{11} 模的束缚损耗为

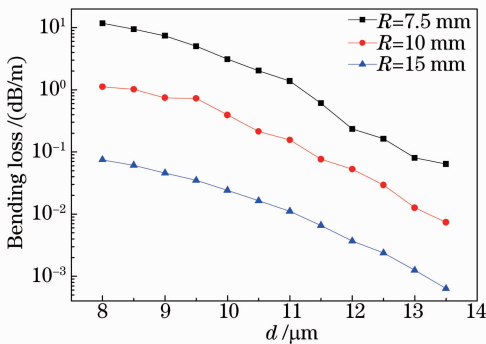


图 3 光纤基模的弯曲损耗随低折射率介质柱直径 d 变化的曲线图

Fig. 3 Bending loss of fundamental mode as function of diameter of low-index rod d

0.18 dB/m 。因此, 需要考虑去除光纤中的高阶模。

3.2 高阶模损耗分析

对于阶跃型光纤而言, 其传输模式的数量可由归一化频率 V 的值得出: $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}$ 。其中, a 、 λ 、 n_{core} 、 n_{clad} 分别为光纤的纤芯半径、光波长、纤芯折射率和包层折射率。根据光纤理论, 对单模光纤而言, 其 V 值在工作波长范围内均应小于 2.405。3.1 节中在普通光纤中加入 6 个低折射率柱, 此时光纤的包层相当于是由基质材料和低折射率介质柱组成的, 包层等效折射率低于基质材料, 即 n_{clad} 减小, 从而导致其 V 值变大, 导致高阶模的出现。因此, 需要采取措施以去除高阶模。这里, 通过同时降低纤芯和纤芯周围一层材料的折射率的方法, 来提高高阶模的损耗, 从而实现等效的单模传输。纤芯折射率降低, 导致高阶模的束缚损耗增大, 从而可以去除高阶模。由于纤芯与折射率环的折射率差保持不变, 可以使光纤基模的模场形状基本保持不变, 从而保证光纤与普通光纤的低损耗连接。

经计算可知, 前面设计的光纤的基模幅值在纤芯外 $4 \mu\text{m}$ 处下降为其中中心峰值的 10%, 因此, 在此区域, 包层的折射率对光纤基模模场的影响较大。为此, 取低折射率环的厚度 $h = 4 \mu\text{m}$, 并在保持纤芯与低折射率环的折射率差 $\Delta = 0.005$ 不变的前提下, 降低纤芯与折射率环的折射率。图 4 给出了波长为 1260 nm 时, LP_{11} 模的 x 偏振和 y 偏振两个模式的束缚损耗随纤芯折射率 n_1 的变化曲线。从图 4 中可以看出, 随着纤芯与低折射率环折射率的下降, 两个偏振模的束缚损耗逐渐增大。当 $n_1 = 1.44782$, $n_2 = 1.44282$ 时, LP_{11} 模的模式损耗大于 20 dB/m 。此时, 由于 LP_{11} 模在传输时的损耗足够大, 光纤实现等效的单模传输, 即光纤的截止波长

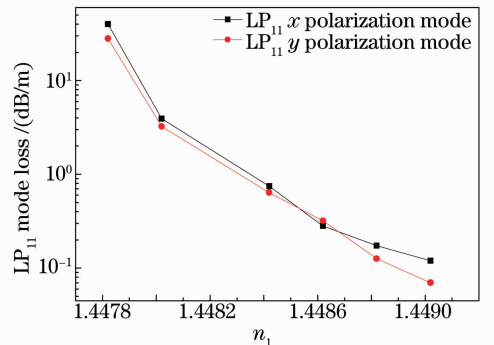


图 4 光纤 LP_{11} 模式损耗随纤芯折射率 n_1 的变化曲线

Fig. 4 Confinement loss of LP_{11} modes as function of index of core n_1

$\lambda_c \leq 1260$ nm, 满足 G. 657 光纤标准要求。

下面考察经调整后的光纤的弯曲损耗特性。图 5 给出了波长为 1550 nm 时, 光纤基模的弯曲损耗随纤芯折射率 n_1 变化的曲线。从图 5 中可以看出, 光纤基模的弯曲损耗随着纤芯与低折射率环折射率的下降而升高。当 $n_1 = 1.44782, n_2 = 1.44282$ 时, 光纤的弯曲损耗达到最大, 此时的弯曲损耗仍然能够达到 G. 657 A1 标准的要求。例如, 弯曲半径为 10 mm 时, 其基模弯曲损耗为 0.71 dB/m, 未成缆时的每匝光纤的弯曲损耗为 0.44 dB, 达到了 G. 657 A1 标准的要求。

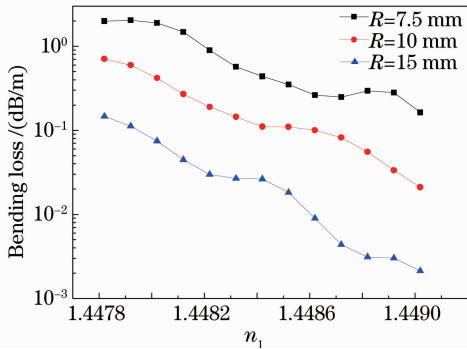


图 5 光纤基模弯曲损耗随纤芯折射率 n_1 的变化曲线

Fig. 5 Bending loss of fundamental mode as function of index of core n_1

3.3 连接损耗分析

图 6 给出了几个不同结构参数下光纤与标准单模光纤的连接损耗曲线。其中, 标准单模光纤的参数与 3.1 节中所述的阶跃光纤一致, 具体为: 纤芯直径为 $8 \mu\text{m}$, 纤芯折射率为 1.44902, 包层折射率为 1.44402。波长为 1310 nm 时, 其模场直径为 $8.7 \mu\text{m}$ 。由图 6 可知, 对于几种不同参数的微结构光纤, 其与标准单模光纤的连接损耗都随着波长的增大而增大, 但连接损耗都较低, 小于 0.04 dB。特

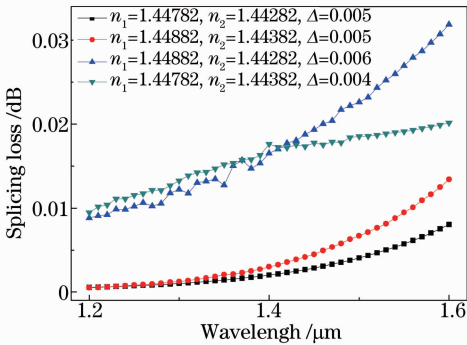


图 6 微结构光纤与标准单模光纤的连接损耗

Fig. 6 Losses between standard single-mode fibers and microstructured fibers

别地, 当纤芯与低折射率环的折射率差 Δ 保持为 0.005 时其连接损耗较小, 而当 Δ 变化时两种光纤的连接损耗会明显增大。图 7 给出了阶跃光纤与 $\Delta = 0.005$ 时微结构光纤在 1310 nm 波长处的径向电场分布图。由图可见, 两者模场分布具有高度的相似性。所以, 当纤芯与低折射率环的折射率差 Δ 与普通光纤的纤芯与包层折射率差相同时, 两种光纤的连接损耗最小。这也说明了引入低折射率环对降低光纤连接损耗的重要性。

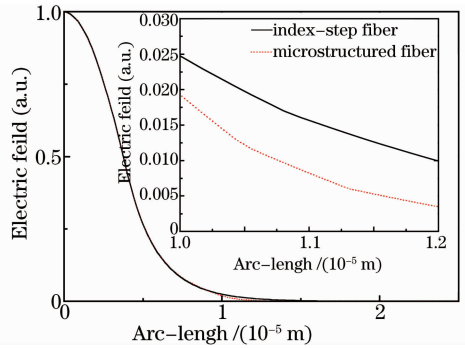


图 7 阶跃光纤与微结构光纤的径向电场分布图

Fig. 7 Radial electric field profile of index-step fiber and microstructured fiber

下面考察光纤与不同模场直径 D 的普通单模光纤的连接损耗情况。由图 8 可知, 微结构光纤与不同模场直径(波长为 1310 nm)的普通单模光纤的连接损耗均小于 0.08 dB。并且, 当两种光纤的模场直径一致(都为 $8.7 \mu\text{m}$)时, 两者的连接损耗最小。这一点与普通光纤的连接损耗理论一致。

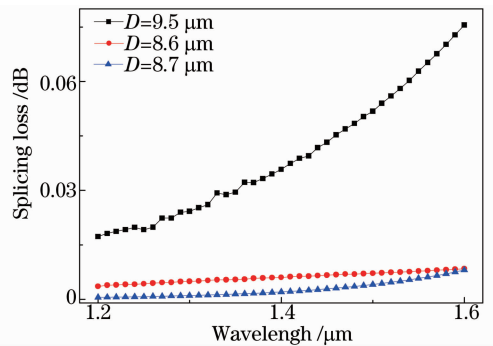


图 8 微结构光纤 ($n_1 = 1.44782, n_2 = 1.44282$) 与不同模场直径的 G. 652 光纤的连接损耗

Fig. 8 Splicing losses between microstructured fiber ($n_1 = 1.44782, n_2 = 1.44282$) and G. 652 fibers with different mode field diameters

4 结 论

提出一种新的弯曲不敏感光纤设计思路: 通过引入低折射率的介质柱以降低光纤的弯曲损耗; 通

过低折射率环以去除引入低折射率介质柱所产生的高阶模；通过同时降低环形区和纤芯折射率，以保证光纤的低连接损耗；通过有限元法和光束传播法验证了光纤的低弯曲损耗和低连接损耗传输特性。这种新型光纤的弯曲损耗满足 G. 657 A1 标准的要求，且与标准单模光纤的连接损耗小于 0.08 dB。

参 考 文 献

- 1 Chen M Y, Li Y R, Zhang Y, *et al.*. Design of dual-mode optical fibres for the FTTH applications[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13 (1): 015402.
- 2 Watekar P R, Ju S M, Han W T. Single-mode optical fiber design with wide-band ultra low bending-loss for FTTH application[J]. *Opt Express*, 2008, 16(2): 1180–1185.
- 3 P S J Russell. Photonic-crystal fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(12): 4729–4749.
- 4 Yao Jianquan, Wang Ran, Miao Yiping, *et al.*. Novel photonic functional devices based on liquid-filling microstructured optical fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101002.
姚建铨, 王 然, 苗银萍, 等. 基于液体填充微结构光纤的新型光子功能器件[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101002.
- 5 Wang Dan, Zheng Yi. Design and numerical investigation of a novel microstructured optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0806003.
王 丹, 郑 义. 一种新型微结构光纤的设计与数值研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0806003.
- 6 Yun Maojin, Liang Jian, Ren Liyong, *et al.*. Design and optimization of slow light photonic bandgap fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0406005.
云茂金, 梁 健, 任立勇, 等. 带隙型光子晶体光纤慢光特性的优化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0406005.
- 7 Liao Suying, Gong Mali. Analysis of mode evolution between straight and curved fiber transition in large mode area fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305006.
廖素英, 巩马理. 大模场光纤直弯过渡中的模场演变分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305006.
- 8 F F Dai, Y G Xu, X F Chen. Tunable and low bending loss of liquid-core fiber[J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(1): 14–17.
- 9 Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiha M. Design and characterization

- of single-mode holey fibers with low bending losses[J]. *Opt Express*, 2005, 13(12): 4770–4779.
- 10 Himeno K, Matsuo S, Guan N, *et al.*. Low-bending-loss single-mode fibers for fiber-to-the-home[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(11): 3494–3499.
- 11 Vu N H, Kim J T, Kim E S, *et al.*. Ultralow bending loss fibers with higher-order mode strippers[J]. *Opt Express*, 2010, 18 (19): 19456–19461.
- 12 Matsui T, Nakajima K, Goto Y, *et al.*. Design of single-mode and low-bending-loss hole-assisted fiber and its MPI characteristics[J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(17): 2499–2505.
- 13 Nakajima K, Shimizu T, Matsui T, *et al.*. Single-mode hole-assisted fiber as a bending-loss insensitive fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, 16(6): 392–398.
- 14 Ieda K, Nakajima K, Matsui T, *et al.*. Characteristics of bending loss optimized hole assisted fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2008, 14(1): 1–9.
- 15 Li M J, Tandon P, Bookbinder D C, *et al.*. Ultra-low bending loss single-mode fiber for FTTH[J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(3): 376–382.
- 16 Saitoh K, Koshiha M. Full-vectorial finite element beam propagation method with perfectly matched layers for anisotropic optical waveguides[J]. *J Lightwave Technol*, 2001, 19(3): 405–413.
- 17 Saitoh K, Koshiha M. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: application to photonic crystal fibers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38(7): 927–933.
- 18 Saitoh K, Koshiha M, Hasegawa T, *et al.*. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion[J]. *Opt Express*, 2003, 11(8): 843–852.
- 19 K Saitoh, Y Tsuchida, L Rosa, *et al.*. Design of all-solid leakage channel fibers with large mode area and low bending loss[J]. *Opt Express*, 2009, 17(6): 4913–4919.
- 20 L Dong, T W Wu, H A McKay, *et al.*. All-glass large-core leakage channel fibers[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(1): 47–53.
- 21 L Dong, H A McKay, L Fu, *et al.*. Ytterbium-doped all glass leakage channel fibers with highly fluorine-doped silica pump cladding[J]. *Opt Express*, 2009, 17(11): 8962–8969.

栏目编辑:王晓琰