

文章编号: 0253-2239(2009)06-1471-05

G.657 光纤的制备及其性能

张立永 刘 利 陈海斌

(富通集团有限公司, 浙江 富阳 311422)

摘要 G.657 光纤具有优异的弯曲损耗不敏感性能,被认为是诸如光纤到户 (FTTH) 等局域网和接入网系统的首选产品,因此,该光纤的研究倍受重视。提出了一种采用全合成工艺制造 G.657 光纤的方法,详细探讨了芯层和第一包层区的厚度 (a 、 b) 及其折射率差 (Δ_1 、 Δ_2) 与光纤性能之间的关系。研究表明,当 a 的取值在 $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 之间, b 的取值在 $0.5\sim 1.9\ \mu\text{m}$ 之间, Δ_1 的取值在 $0.0034\sim 0.0045$ 之间, Δ_2 的取值在 $-0.0006\sim 0$ 之间时,可制得满足 ITU-T G.657. A 标准的光纤;当 a 的取值在 $2.8\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 之间, b 的取值在 $0.8\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 之间, Δ_1 的取值在 $0.0058\sim 0.0072$ 之间, Δ_2 的取值在 $-0.0016\sim -0.0008$ 之间,可制得满足 ITU-T G.657. B 标准的光纤。且该光纤在结构上相对简单,无特殊设计的沟、槽、孔,因此制作工艺相对容易、稳定,易于推广和应用。

关键词 光纤光学; G.657 光纤; 全合成工艺

中图分类号 TN818 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1471

Fabrication and Properties of G.657 Fibers

Zhang Liyong Liu Li Chen Haibing

(Futong Group Co., Ltd., Fuyang, Zhejiang 311422, China)

Abstract G.657 fibers are regarded as the first choice for local net and access net such as Fiber to the home (FTTH) systems for their excellent property of bend-insensitive loss. Therefore, this kind of fiber is highly discussed in recent years. A method of fully synthetic process was introduced to fabricate G.657 fibers, and the relation between attributes of fiber and the size of core a and cladding b difference of refractive index of core (Δ_1) and cladding (Δ_2) were discussed in detail. As a result, when a is between $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$, b is between $0.5\sim 1.9\ \mu\text{m}$, Δ_1 between $0.0034\sim 0.0045$ and Δ_2 between $-0.0006\sim 0$ fibers complying with the standard of ITU-T G.657. A are obtained, while a is between $2.8\sim 3.2.0\ \mu\text{m}$, b is between $0.8\sim 2.1\ \mu\text{m}$, Δ_1 between $0.0058\sim 0.0072$ and Δ_2 between $-0.0016\sim -0.0008$ fibers complying with the standard of ITU-T G.657. B are obtained. Structures of the fibers are simple without special dips, grooves or holes, and therefore easy to fabricate, spread and use.

Key words fiber optics; G.657 optical fiber; fully synthetic process

1 引 言

近年来,全球通信业持续发展,推动光纤需求量的快速增长。光纤到户 (FTTH) 受复杂应用场合的影响 (多为街道、楼宇、拐角等),接入点多,且因布线时的悬拉、折弯因素等影响,光纤存在弯曲的现象很多,这对光纤的弯曲性能提出了更高的要求。常规 G.652 光纤的模场直径约为 $9.2\ \mu\text{m}$,由于受到弯曲损耗和机械应力的影响,使用中一般要求光纤弯曲半径不能小于 $30\ \text{mm}$,难以在室内沿墙壁布线以及将光纤余长绑成像电源线一样的小束。国际

ITU 组织于 2006 年 12 月正式出台了关于弯曲不敏感光纤光缆的规格和标准,并将此类光纤光缆定义为 G.657 光纤光缆^[1]。G.657 光纤光缆主要特性就是容许更小的弯曲直径,能更好的满足局域网和接入网 (如 FTTH) 的施工要求。

改善光纤的弯曲性能可以从改善光纤的结构着手。如藤仓公司先是提出了 FutureGuide® -SR15 和 FutureGuide® -SR15E 抗弯损光纤,分别对应于 ITU-T G.652. B 光纤和 ITU-T G.652. D 光纤。这些光纤的最小允许弯曲半径达到 $15\ \text{mm}$,相对于普

收稿日期: 2008-08-12; 收到修改稿日期: 2008-08-30

基金项目: 国家科技部基金 (2007BAE39B02) 资助项目。

作者简介: 张立永 (1976—), 博士, 高级工程师, 主要从事通信材料与技术的研究。E-mail: pfzly@fso.com.cn

通单模光纤的 30 mm 的弯曲半径,缩小了一半。藤仓又提出一种孔助弯曲不敏感光纤,该光纤在弯曲半径为 5 mm、1550 nm 波长下的弯曲损耗为 0.012 dB/圈,模场直径(1550 nm)为 7.8 μm ,截止波长为 1.28 μm 。虽然该光纤模场直径略小于 C-SMF,但通过电弧使孔助光纤与 C-SMF 截面相匹配,使得平均熔接损耗达到 0.05 dB,其衰减性能也达到 C-SMF 的水平,1.30 μm 和 1.55 μm 的衰减为 0.50 dB/km 和 0.28 dB/km^[2,3]。德拉克公司描述的沟助 BendBrightXS 光纤既符合 G. 657. A 标准又符合 G. 657. B 标准,最小弯曲半径位于 1~10 mm 区间,而且当采用合适的程序与 C-SMF 的平均熔接损耗低于 0.05 dB^[4,5]。美国康宁推出的一种基于 nanoStructuresTM 技术的新型弯曲不敏感光纤——ClearCurveTM。该光纤不仅与 G. 652. D 完全兼容,而且抗弯曲性能比 G. 657. B 规定值高出 10 倍^[6]。富通公司则设计出一种超细的低水峰抗弯损光纤,该光纤的裸光纤只有 80 μm ,涂敷后也只有 140 μm 左右,其抗弯曲性能相当优异,最小允许弯曲半径可达 5 mm^[7]。这些光纤在不同领域均已得到了应用^[8~10]。

上述提及的各种方法,分别通过改进光纤的结构、折射率剖面等不同的方式对光纤的弯曲性能进行了改进,但其中很多都难以满足 ITU. TG. 657 规定的其他传输性能的要求,如文献[2, 7]所述的光纤在几何结构上不满足 G. 657 的要求。而有些能满足传输要求的光纤则结构相对复杂,实现的工艺难度大、制造成本高,如文献[3]在光纤结构中引入了孔,文献[4, 5]引入了沟槽,文献[6]更是引入了纳米气孔。本文介绍了一种结构相对简单(引入了折射率凹陷,但避免了孔、沟、槽等复杂的结构)、工艺相对容易,同时又能满足国际 ITU. T 组织提出的 G. 657 系列光纤标准的新型弯曲不敏感单模光纤,并对制造该光纤的全合成工艺进行了研究探讨。

2 G. 657 光纤的制备

本文采用全合成制备方法来制备 G. 657 光纤。采用轴线气相沉积法制造芯棒,以外部气相沉积法制造外包层的工艺来制造光纤预制棒。参照光纤预制棒的结构图(如图 1)。在沉积芯层区 1 时,在原料 SiCl_4 中掺杂一定量的 GeCl_4 使芯层折射率达到特定的要求;在沉积第一包层区 2 时,在原料 SiCl_4 中掺杂一定量的 CF_4 使 2 层折射率

也达到特定的要求;在沉积第二包层区 3 时,使用纯 SiCl_4 原料。通过控制喷灯流量和沉积时间使 1、2 和 3 层厚度沉积达到特定值,从而获得所需的光纤预制棒。然后再在拉丝塔上对该预制棒进行纺丝。纺丝时通过控制拉丝速度、滴头温度等将裸光纤直径控制在 $125 \pm 0.7 \mu\text{m}$ 。在拉丝过程中,分别在裸光纤外涂敷两层硬度不同的丙烯酸树脂,第一层树脂的厚度约 38 μm ,杨氏模量约为 1.1 MPa,弹性模量约为 1.6 MPa;第二层树脂的厚度约 22 μm ,杨氏模量约为 700 MPa,弹性模量约为 1200 MPa,使得成品光纤的直径为 $242 \pm 7 \mu\text{m}$,即得所需的光纤^[11]。

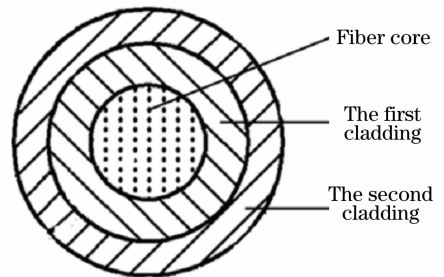


图 1 光纤预制棒的剖面结构示意图
Fig. 1 Cross section profile of optical prefab

3 光纤的结构和性能探讨

制备得到的光纤的折射率剖面结构如图 2 所示。其中芯层区 1 的折射率差 Δ_1 、第一包层区 2 折射率差 Δ_2 分别用以下公式计算得到:

$$\Delta_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (1)$$

$$\Delta_2 = \frac{n_2 - n_0}{n_2}, \quad (2)$$

式中 n_0 为纯 SiO_2 的折射率, n_1 为芯层区的折射率, n_2 为第一包层的折射率。

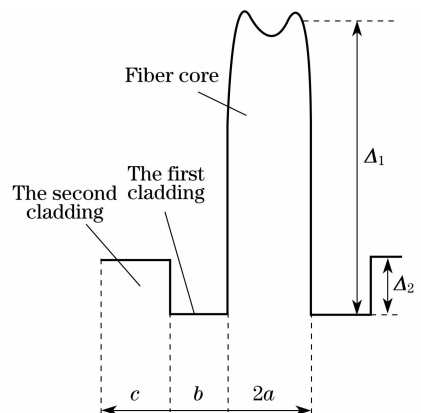


图 2 光纤的折射率剖面示意图
Fig. 2 Refractive index profile of the optical fiber

如前所述, 光纤的芯层折射率差和厚度、包层的折射率差和厚度都是影响光纤光学性能的关键性因素^[11]。

文中除特别说明外, 光纤的折射率均系指在 0.6328 μm 波长下的值。

3.1 芯层厚度与光纤性能的关系

图 3 所示分别为光纤芯层厚度 a 与光纤的模场直径(d_{mf})、截止波长 λ_c 以及 β 值(β 值定义为 d_{mf} 与 λ_c 的比值, 是描述光纤弯曲性能的特征参量, β 值越小, 光纤的弯曲性能越好)之间的关系曲线。

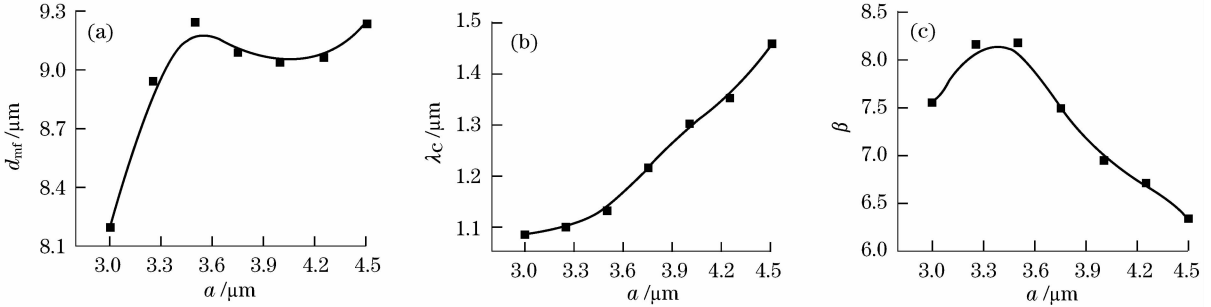


图 3 光纤芯层厚度与光纤的 d_{mf} (a)、 λ_c (b) 以及 β 值(c)之间的关系曲线

Fig. 3 Transmission properties of d_{mf} (a), λ_c (b), β (c) as a function of fiber core radius

由图可见, 在一定范围内, 光纤的 d_{mf} 随着 a 的增加呈现出先迅速增加后逐渐趋于平坦的变化关系; 截止波长对光纤芯层的厚度变化相当敏感, 其随着 a 的增加基本上呈现快速增加的趋势; 而 β 值则在 $a < 3.5 \mu\text{m}$ 时随 a 的增大而增大, 当 $a > 3.5 \mu\text{m}$ 时随 a 的增大而不断减小。为使光纤具有较小的 β 值, 也即具有较好的弯曲性能, 应使光纤的厚度尽可能的离开该曲线的峰值位置。在本文研究的范围内, 为得到满足 ITU. T G. 657. A 标准的光纤, a 的取值在 $3.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 之间较好; 为得到满足 ITU. T G. 657. B 标准的光纤, a 的取值在 $2.8 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 之间较好。

折射率差 Δ_1 大小对光纤的 d_{mf} 、 λ_c 和 β 值都有较大的影响。随着 Δ_1 的增加, d_{mf} 迅速减小而 λ_c 则相应不断增加。其两者的合成结果是 β 值有明显的下降趋势。为得到较小 β 值的光纤, Δ_1 越大越好。但一味增大 Δ_1 会带来很多负面的效果, 一方面过大的折射率容易在玻璃化中产生错位, 从而导致预制棒内部的应力过大, 使得拉丝断纤维的几率增高; 另一方面, 为保证光纤的其他传输性能如 λ_c , 就必须相应减小光纤的芯层厚度, 从而牺牲了光纤的有效传输面积。实验表明, 为得到满足 ITU. T G. 657. A 标准的光纤 Δ_1 的取值应在 $0.0034 \sim 0.0045$ 之间较好; 为得到满足 ITU. T G. 657. B 标准的光纤 Δ_1 的取值应在 $0.0058 \sim 0.0072$ 之间较好。

3.2 芯层折射率差与光纤性能的关系

由图 4 可见, 在本文研究的范围内, 光纤的芯层

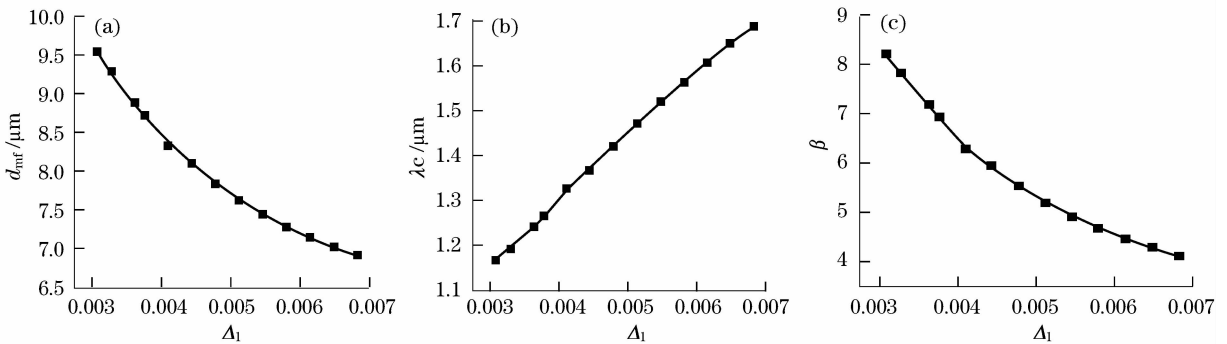


图 4 芯层折射率差 Δ_1 与光纤的 d_{mf} (a)、 λ_c (b) 以及 β 值(c)之间的关系曲线

Fig. 4 Transmission properties of d_{mf} (a), λ_c (b), β (c) as a function of Δ_1

3.3 第一包层厚度与光纤性能的关系

图 5 所示分别为第一包层厚度 b 与 d_{mf} 、 λ_c 以及 β 值之间的关系曲线。

由图可见, 在一定范围内, 光纤的 d_{mf} 随着 b 的

增加而呈现线性减小的趋势, 而截止波长则类似线性的不断增加; 其综合的效果是 β 值随 b 的增加呈快速下降的变化关系。在本文研究的范围内, 为得到满足 ITU. T G. 657. A 标准的光纤, b 的取值应在

0.5~1.9 μm 之间;为得到满足 ITU. T G. 657. B标准的

光纤, b 的取值应在 0.8~2.1 μm 之间。

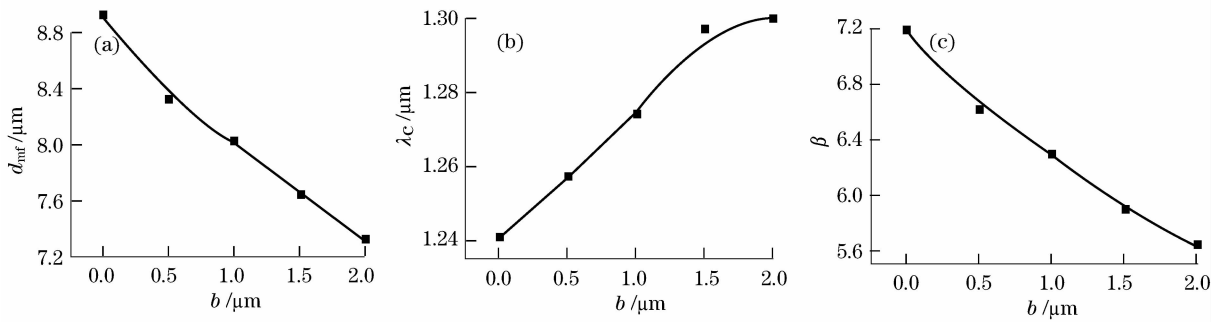


图 5 第一包层厚度与 d_{mf} (a)、 λ_c (b) 以及 β 值 (c) 之间的关系曲线

Fig. 5 d_{mf} (a), λ_c (b), β (c) as a function of thickness of the first cladding

3.4 第一包层折射率差与光纤性能的关系

图 6 所示为第一包层折射率差 Δ_2 与 d_{mf} 、 λ_c 以及 β 值之间的关系曲线。

由图可见,在本文研究的范围内,随着 Δ_2 的增加, d_{mf} 不断的增加,其变化的速度无特定的规律;当 $\Delta_2 < -0.0008$ 时, Δ_2 和 λ_c 呈线性的对应关系,且随

Δ_2 的增加, λ_c 不断减小;其综合的效果是 β 值随 Δ_2 的增加呈快速下降的变化关系。实验表明,为得到满足 ITU. T G. 657. A 标准的光纤, Δ_2 的取值应在 $-0.0006 \sim 0$ 之间;为得到满足 ITU. T G. 657. B 标准的光纤, Δ_2 的取值应在 $-0.0016 \sim -0.0008$ 之间。

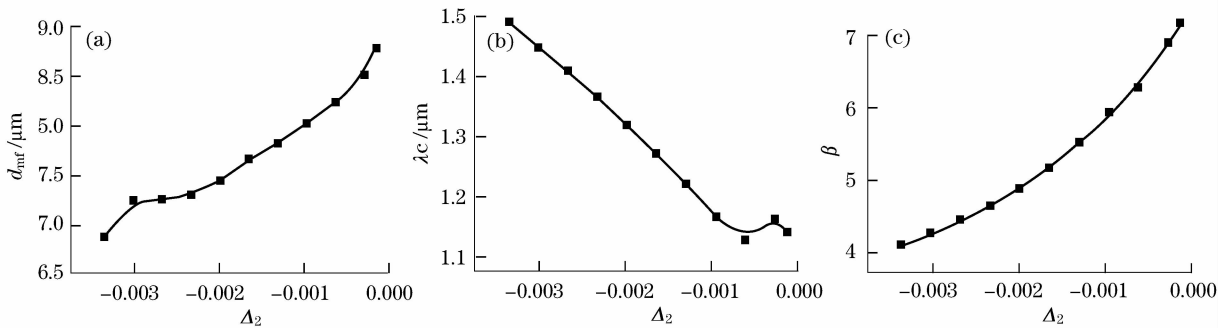


图 6 第一包层折射率差 Δ_2 与 d_{mf} (a)、 λ_c (b) 以及 β 值 (c) 之间的关系曲线

Fig. 6 d_{mf} (a), λ_c (b), β (c) as a function of Δ_2

3.5 G.657 光纤的工艺条件及性能

研究表明光纤的弯曲性能与其 β 值密切相关,随着 β 的增加,光纤的弯曲损耗相应的增加,因此 β 值常用于表征光纤的弯曲性能。为降低光纤对弯曲的敏感性,应尽可能的降低光纤的 β 值,但同时还要满足截止波长、模场直径等其他性能的要求。基于此及上述讨论的结果,本文优化出了两种光纤的结构参数,如表 1 所示。其对应的性能分别如表 2 和表 3 所示。由表 2 和表 3 可见,该两种光纤分别满足 ITU. T G. 657. A 和 B 的标准。

表 1 两种光纤的结构参数

Table 1 Structural parameters of two fibers

Fiber	$a / \mu\text{m}$	Δ_1	$b / \mu\text{m}$	Δ_2
F1	3.72	0.0038	1.10	-0.0004
F2	2.96	0.0065	1.69	-0.0009

表 2 光纤 F1 的性能

Table 2 Attributes of fiber F1

Attribute	Value	Note
Mode-field diameter / μm	8.7	At 1310 nm
Cladding diameter / μm	125.15	Nominally measured
Fiber cut-off wavelength / nm	1289	Nominally measured
Core-concentricity error / μm	0.25	Nominally measured
Cladding non-circularity / μm	0.3 %	Nominally measured
Radius / mm	15 10	
Number of turns	10 1	
Macrobending loss / dB	0.08 0.23	Max. at 1550 nm
	0.71 1.1	Max. at 1625 nm
Proof stress / GPa	0.76	Nominally measured
Chromatic dispersion coefficient S_0 / ps/(nm ² · km)	0.087	at $\lambda_0 = 1313$ nm

表 3 光纤 F2 的性能
Table 3 Attributes of fiber F2

Attribute	Value	Note
Mode-field diameter / μm	6.43	At 1310 nm
Cladding diameter / μm	124.76	Nominally measured
Core-concentricity error / μm	0.22	Nominally measured
Cladding non-circularity	0.75%	Nominally measured
Fiber cut-off wavelength /nm	1280	Nominally measured
Radius	15 10 7.5	
Number of turns	10 1 1	
Macrobending loss /dB	0.01 0.03 0.17	Max. at 1550 nm
	0.04 0.13 0.68	Max. at 1625 nm
Proof stress /GPa	0.79	Nominally measured

4 结 论

G. 657. A/B 光纤具有独特的弯曲损耗不敏感性能,是当前诸如 FTTH 等局域网和接入网的最佳选择之一。本文主要研究了全合成光纤工艺中,芯层和第一包层区的厚度(a 、 b)及其折射率差(Δ_1 、 Δ_2)与光纤性能之间的关系,并据此给出了制作 G. 657. A/B 光纤的各工艺参数的取值范围。研究表明,当 a 的取值在 $3.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 之间, b 的取值在 $0.5 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 之间, Δ_1 的取值在 $0.0034 \sim 0.0045$ 之间, Δ_2 的取值在 $-0.0006 \sim 0$ 之间时,可制得满足 ITU. T G. 657. A 标准的光纤;当 a 的取值在 $2.8 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 之间, b 的取值在 $0.8 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 之间, Δ_1 的取值在 $0.0058 \sim 0.0072$ 之间, Δ_2 的取值在 $-0.0016 \sim -0.0008$ 之间,可制得满足 ITU. T G. 657. B 标准的光纤。本文给出的光纤结构相对简单,制作工艺相对容易且稳定性较好,是一种值得推广的制作 G. 657 系列光纤的方法。

参 考 文 献

- ITU-T Recommendation G. 657, Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fibre and Cable for the Access. Network[S]. ITU-T Fiber standard, 2006, 1~15
- Matsuo S, Ikeda M, Himeno K. Bend-insensitive and low-splice-loss optical fiber for indoor wiring in FTTH[C]. *Opt. Fiber Comm. Conf.*, 2004, ThI3
- Matsuo S, Nunome T, Yoshida T *et al.*. Design optimization of trench index profile for the same dispersion characteristics with SMF[C]. *Opt. Fiber Comm. Conf. And The Expo. And Natl Fiber Opt. Engineer. Conf.*, 2007, JWA2
- Montmorillon L, Matthijsse P, Gooijer F *et al.*. Bend-Optimized G. 652D Compatible Trench-Assisted Single Mode Fibers[C]. 55th IWCS, 2006, 342~347
- Montmorillon L, Matthijsse P, Gooijer F *et al.*. Next generation SMF with reduced bend sensitivity for FTTH networks[C]. ECOC, 2006, Mo3. 3. 2
- Li M J. Bend-insensitive optical fibers simplify fiber-to-the-home installations. <http://spie.org/x23952.xml>
- Zhang L Y, Wu X K, Lu W M *et al.*. Design and fabrication of super-fine low water-peak bend-resistant optical fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1648~1651
张立永, 吴兴坤, 卢卫民等. 超细低水峰抗弯损光纤的设计及制作[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1648~1651
- Liu Yazhao, Wang Fujuan, Cai Zhigang *et al.*. Fabrication of two kinds of expanded core lens2Fibers and analysis of mode field diameter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(10):1377~1381
刘娅钊, 王福娟, 蔡志岗等. 两种扩束透镜光纤的研制与模场分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1377~1381
- Dong Xiaowei, Pei Li, Feng Suchun *et al.*. Study and fabrication of all fiber microring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11):1935~1938
董小伟, 裴 丽, 冯素春等. 全光纤型微环谐振器的研制[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11):1935~1938
- Hu Aizi, Rao Yunjiang, Niu Yongchang. A novel tunable L FG gain equalizer based on a bend insensitive fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 30~34
胡爱姿, 饶云江, 牛永昌. 基于弯曲不敏感光纤的长周期光纤光栅可调谐增益均衡器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 30~34
- Zhang Liyong, Wu Xingkun, Yang Junyong *et al.*. Study of optical performs manufacture via complete synthetic technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2404~2408
张立永, 吴兴坤, 杨军勇等. 全合成法光纤预制棒制造的研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2404~2408