

非零色散位移光纤的制造新工艺研究

吴金东^{1,2} 李庆国¹ 吴雯雯¹ 孙可元¹ 陈海斌¹ 李 强¹ 吴兴坤²

(¹成都富通光通信技术有限公司, 四川 成都 611731
²浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 介绍了一种新的改进化学气相沉积法(MCVD)+气相轴向沉积法(VAD)预制棒制备工艺,该工艺按照归一化波导结构进行工艺设计和参数控制,即采用 MCVD 法制备归一化结构参数轴向一致的芯棒,然后采用 VAD 法轴向沉积相应的外包层,从而得到波导结构轴向均匀一致的预制棒。采用新工艺实验研究了非零色散位移光纤的制造过程,成功制造了波导结构均匀的光纤预制棒,有效地利用预制棒的锥度增加有效长度,光纤的生产效率提高约 15%,节省了成本。详细分析了该工艺方法的三个关键环节:芯棒归一化结构制备,芯棒收缩比的设定,VAD 松散体沉积。研究结果对非零色散位移光纤的生产具有实际的指导意义。

关键词 光纤光学;光纤预制棒;改进化学气相沉积法;气相轴向沉积法;非零色散位移光纤

中图分类号 TN818 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0806008

Study of Novel Fabrication Process for Non-Zero Dispersion-Shifted Fibers

Wu Jindong^{1,2} Li Qingguo¹ Wu Wenwen¹ Sun Keyuan¹ Chen Haibin¹

Li Qiang¹ Wu Xingkun²

(¹ Chengdu Futong Optical Communication Technologies Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611731, China)
(² State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A novel preform fabrication process for non-zero dispersion-shifted fibers using hybrid modified chemical vapor deposition (MCVD)+ vapor axial deposition (VAD) technique is presented. The new design concept of the hybrid process is based on the normalized waveguide structure of the fiber, whereby fabricating core preforms with homogeneous normalized waveguide using MCVD process and out-cladding using axis control technique via VAD process to realize a homogeneous waveguide along axis of the preform. The manufacturing process of non-zero dispersion-shifted fibers is experimentally studied and the results show that preforms with homogeneous waveguide are fabricated successfully, with effective use of the taper of the preforms to increase the preform length, achieving about 15% increase of fiber production efficiency and cost reduction. Three key procedures in the hybrid fabrication process are discussed in detail, including the fabrication of normalized structure, the initialization of constriction ratio of core preform and the soot deposition via VAD process. The results provide a useful guideline for practical fabrication of non-zero dispersion-shifted fibers.

Key words fiber optics; optical fiber preform; modified chemical vapor deposition; vapor axial deposition; non-zero dispersion-shifted fiber

OCIS codes 060.2280; 060.2400; 060.2270; 060.2290; 160.2290

1 引 言

随着语音、数据、图像等 IP 业务的迅猛发展,高

速超大容量和更高性价比的光网络成为迫切需求。提高单信道传输速率与信道容量的密集波分复用

收稿日期: 2011-03-30; 收到修改稿日期: 2011-04-30

作者简介: 吴金东(1968—),男,博士研究生,主要从事新型光纤的设计与制备方面的研究。E-mail: wjd3699@sina.com

导师简介: 吴兴坤(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信技术与器件方面的研究。

E-mail: xingkunwu@163.com

(DWDM)技术是光传输领域发展的主流趋势。近年来,单波道 40 Gb/s 的商用网络和 100 Gb/s 网络的发展成为热点,许多新技术不断涌现,以抵抗色度色散、偏振模色散、非线性效应等传输损伤,提高信号的频谱效率^[1~8]。非零色散位移光纤(G. 655 和 G. 656 光纤)是适用于 DWDM 传输技术而发展的光纤,具有优异的色散特性,不但适合 40 Gb/s 传输系统,而且适应部署新一代 100 Gb/s 光网络,具有广泛应用^[9,10]。G. 655 和 G. 656 光纤的折射率剖面需要特殊设计,波导结构较为复杂,制作工艺技术难度高,其价格相对较贵,有较高的利润空间^[11~13]。

当前,光纤预制棒的生产多采用“两步法”混合工艺技术,即先制造芯棒,形成决定光纤光学性能的折射率剖面,然后采用不同技术制造决定光纤成本的外包层,以增加单根预制棒的拉丝长度,提高生产效率,降低光纤生产成本^[14]。

改进的化学气相沉积(MCVD)工艺和等离子化学气相沉积(PCVD)工艺对折射率剖面控制精确,适合制造具有复杂折射率剖面的光纤,如 G. 655 和 G. 656 光纤^[15,16]。在制造有源掺杂光纤方面,MCVD 工艺更具灵活性而得到广泛应用^[17~21]。这两种工艺同属于管内法,沉积时两端由于反向而形成锥度,如几何锥度(沉积厚度分布不均匀)和光学锥度(折射率分布不均匀)。沉积锥度效应影响芯棒的纵向均匀性,减少了芯棒的有效长度,降低了光纤的生产效率。一般通过优化工艺参数和改进控制等方式,可以适当抑制由锥度效应引起的不均匀性。但是,对于 G. 655 一类光纤而言,芯层剖面采用多层结构的设计,减小锥度效应需要更复杂的参数调整与工艺控制技术,增大了工艺难度。本文介绍了一种新的 MCVD+气相轴相沉积法(VAD)混合预制棒工艺,按照归一化波导结构进行工艺设计与控制,利用 MCVD 法精确控制 G. 655 芯棒折射率剖面及其轴向分布,利用 VAD 法轴向控制外包层沉积,以有效地利用沉积锥度部分,增加预制棒的长度,提高光纤的均匀性和生产效率。

2 MCVD+VAD 混合工艺

MCVD+VAD 混合工艺的主要流程如图 1 所示。按照新工艺流程,实验研究了 G. 655 光纤的制造工艺。光纤剖面采用六分层设计,如图 2 所示^[22]。其结构参数 $\Delta(\%)$ 和 $R(\mu\text{m})$ 分别为:core1, 0.60, 3.6; core2, 0.40, 7.4; clad1, -0.05, 12.6; clad2, 0.23, 18; clad3, -0.08, 20; clad4, 0, 125。为

了体现光纤结构的几何特征,方便工艺计算与控制,按 core1 的直径(R_1)作归一化处理,即各层归一化直径 $R_{Ni} = R_i/R_1$ ($i = 1 \sim 5$),得到归一化尺寸:1, 2.06, 3.50, 5.00, 5.56, 34.72。

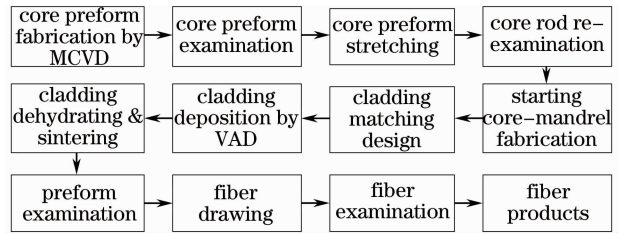


图 1 MCVD+VAD 工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of MCVD+VAD technique

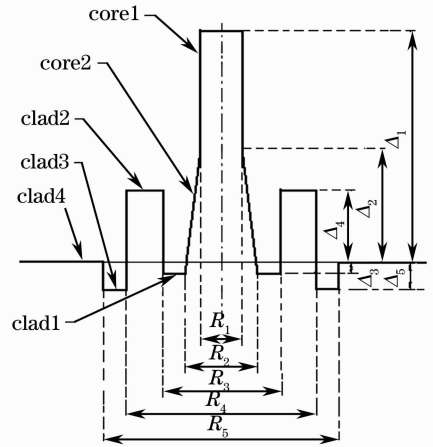


图 2 光纤折射率剖面

Fig. 2 Refractive index profile for the fiber

在 MCVD 芯棒制造中,采用外径 33 mm,壁厚 2 mm,长度 1100 mm 的进口合成石英管为基管,从内向外的芯层到包层分别沉积 2,16,4,5,3 层。为简化工艺验证实验的控制,基于 MCVD 工艺沉积的自然锥度效应,在其他工艺参数保持相同的情况下,主要通过调节喷灯的移动速度实现芯部 1~5 层结构参数的均匀化控制,即在光纤设计范围内,芯棒折射率与归一化尺寸沿轴向保持一致。经预制棒分析仪测试合格后,将芯棒延伸到设定外径,测试其剖面结构参数的轴向分布,并将其制成 VAD 沉积靶棒。依据光纤结构计算得到需要沉积的外包层分布曲线。按照曲线设定 VAD 沉积的提升速度,同步沉积对应的松散体外包层,经脱水烧结得到结构参数符合设计且轴向均匀的预制棒。检测合格的预制棒拉丝得到 G. 655 光纤。

3 结果与讨论

实验制备的 G. 655 芯棒外径为 19~20 mm,有

效长度约 950 mm。芯棒中 1~5 层直径沿轴向分布曲线如图 3 所示。虽然芯棒存在明显锥度,但是 1~5 层直径的变化趋势相同,归一化几何参数分布曲线如图 4 所示,在工艺控制许可的范围内均匀一致,说明各层的结构参数均达到设计要求,而折射率参数波动较小,证明芯棒 1~5 层的波导结构沿轴向是相同的。由于外包层松散体烧结后引起芯棒轴向缩短而径向增粗的变化,烧结后预制棒的实际芯包层比例的控制必须考虑收缩效应的影响。芯棒收缩比 η 定义为烧结后的长度与起始长度比。经过反复测试,芯棒的 η 实验值为 0.78,由此推算出预制棒外径和外包层曲线。将芯棒延伸,其平均外径 17.86 mm,长度为 1180 mm,其中 1160 mm 制成 VAD 沉积靶棒进行外包层沉积。根据 VAD 外包层沉积与提升速度的关系,设定 VAD 提升速度。通过提升速度控制外包层沉积,之后脱水烧结得到预制棒,平均外径为 67.7 mm,长度约 900 mm。经过检测,芯棒内各层比例保持不变,预制棒的结构可简单地以 clad3 与外径来表示,其分布曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,尽管预制棒外径的锥度依然存在,但是其光学结构是均匀的,意味着拉成 125 μm 光纤后,其光学性能将是均匀的。预制棒共拉成光纤 240 km,平均分成 24 盘光纤进行测试。光纤的各项指标都满足产品要求,主要性能指标:1530,1550,1565,1625 nm 的色散(D)均值分别为 2.598,4.067,5.164,9.651 ps/(nm \cdot km),零色散斜率(D_{S0})为 0.074 ps/(nm $^2\cdot$ km),零色散波长(λ_0)为 1493 nm,截止波长(λ_c)为 1316 nm,模场直径(D_{MF})为 9.53 μm 。图 6 是所拉光纤的 D_{MF} 、 λ_0 、 λ_c 、 D_{S0} 和 D 的分布,横坐标对应光纤长度。可见光纤的性能均匀性高,由于有效利用了锥度部分,预制棒的长度增加约 14%,光纤的生产效率增加了近 15%。

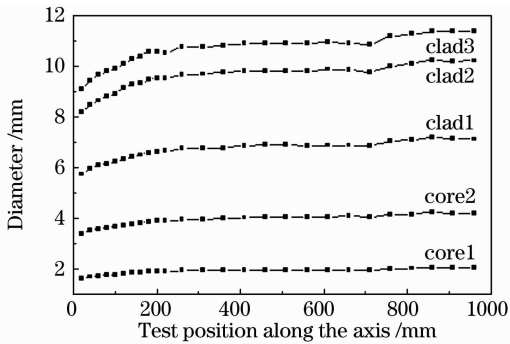


图 3 芯棒 1~5 层直径分布

Fig. 3 Diameter distributions of layers 1~5 in the core preform

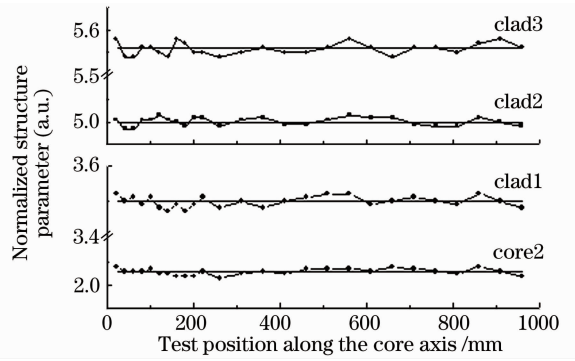


图 4 芯棒归一化结构参数分布

Fig. 4 Normalized structure parameter distributions of the core preform

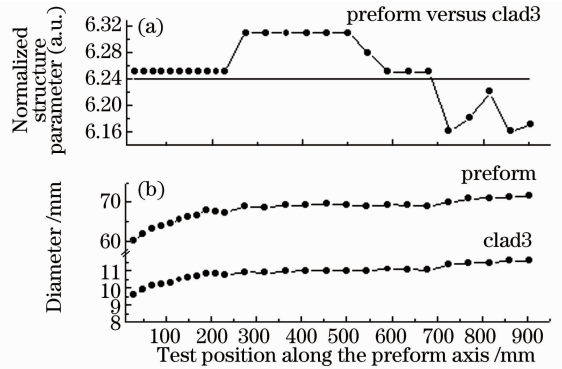


图 5 预制棒和第 3 包层的直径及其比值分布

Fig. 5 Diameter distribution and the ratio between the preform and clad3

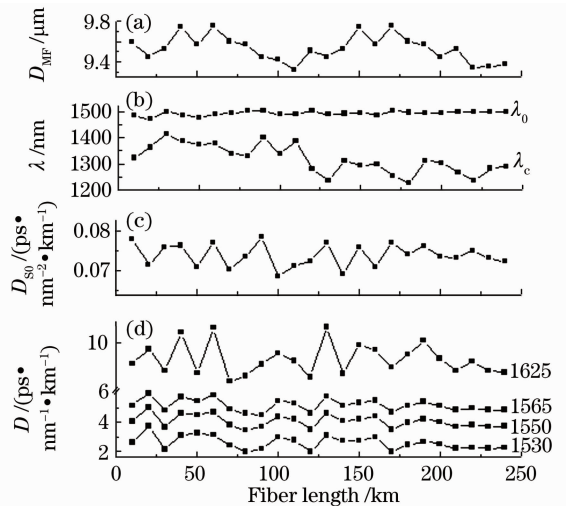


图 6 光纤性能 D 、 λ_0 、 λ_c 、 D_{S0} 和 D_{MF} 分布

Fig. 6 Distributions of D 、 λ_0 、 λ_c 、 D_{S0} and D_{MF} of the fabricated fibers

MCVD+VAD 混合新工艺按归一化的波导结构进行工艺设计和控制,将复杂的锥度控制问题转化为 MCVD 喷灯移动和 VAD 提升等较为简单的控制,增加了预制棒的有效长度,提高了生产效率。

在实际工业化生产中,统计模型是工艺预判、工艺优化与控制常采用的方法。实验研究表明,同样采用统计模型,混合新工艺需要处理好如下技术环节。

3.1 芯棒归一化结构制备

制备具有归一化结构的芯棒是本新工艺的基础。在 MCVD 方法中,对于选定规格的沉积基管(横截面积一定),各种原料的总流量与比例关系将决定沉积锥度的基本特征,其他关键工艺参数,如喷灯的移动速度、沉积温度、管内压力等,对沉积锥度均有影响。因此,在设计 MCVD 工艺参数时应首先对这些参数做综合规划,并在沉积锥度基本特征上进行调整,以利于芯棒的归一化结构均匀一致。实验中采用调节喷灯移动速度的方法,得到归一化结构一致的芯棒,在此基础上,可以运用多种参数共同调节的方法,使芯棒结构均匀性进一步提高。

3.2 η 值的设定

要兼顾控制烧结后成品预制棒的外径和波导结构,即芯层与包层的比例, η 值是工艺设定与控制的关键参数之一。外包层松散体在烧结炉中的致密化过程与松散体堆积密度、芯棒的组成和尺寸、烧结温度、炉膛温度曲线、升温速度、气氛等因素有关,直接影响 η 值。为了得到确定工艺条件下的 η 值,可先预设一个 η 值,根据一套松散体沉积及烧结工艺制度,按照工艺流程制备预制棒,测试预制棒的参数,比较芯棒前后的参数得到初始 η 值。再按照 η 值调整制作参数,测试预制棒波导的实际偏差再用来验证 η 值,如此反复测试,通过逐渐逼近的方法,使预制棒的实际外径和波导与设计目标相等,从而确定该工艺条件下的 η 值。

3.3 VAD 松散体沉积

VAD 包层沉积中轴向控制是实现预制棒外包层匹配的关键技术。按照光纤波导结构和 η 值,延伸后的芯棒外径为 R_6 ,对应预制棒的理论外径设为 D ,则有 $D^2 = 39R_5^2$ 。

理论上外包层为密度 2.2 g/cm^3 的纯石英玻璃,单位长度 ΔL 需要沉积的包层质量为

$$\Delta W = 2.2\pi(D^2 - R_6^2)\Delta L/4. \quad (1)$$

设 VAD 的沉积速度为 $U(\text{g/min})$,棒体提升速度为 $V(\text{cm/min})$,单位长度 ΔL 所沉积的松散体质量为

$$\Delta W = U\Delta L/V. \quad (2)$$

松散体烧结前后质量不变,可得到棒体提升速度关系式 $V=f(U, R_5, R_6)$ 为

$$V = 0.579U/(39R_5^2 - R_6^2). \quad (3)$$

经过反复实验测试,在实验的工艺条件下, U 的统计平均值为 15.5 g/min ,依照(3)式来控制提升速度进行沉积。松散体预制棒烧结后,按收缩比 0.78 变化,得到波导结构均匀的预制棒,拉制的 G. 655 光纤性能均匀一致。实验结果表明,该工艺方法经过进一步的优化和细致改进,可以应用于 G. 655 光纤的制造生产。

4 结 论

非零色散位移光纤预制棒的制造中锥度效应是影响生产效率的重要因素。介绍了一种新的预制棒技术,MCVD+VAD 混合工艺,该工艺按归一化的波导结构进行工艺控制,旨在改进预制棒轴向的光学均匀性,增加有效长度,提高光纤生产效率。在芯棒制造中通过 MCVD 法制备芯层结构轴向均匀的芯棒,通过 VAD 法沿轴向沉积外包层,按照波导结构控制外包层尺寸,从而实现预制棒轴向均匀一致,有效地利用预制棒的锥度,提高光纤生产效率,减低成本。采用新工艺实验研究了 G. 655 光纤的制造过程,成功制得性能均匀的 G. 655 光纤,生产效率提高约 15% 。详细分析了该工艺方法的三个关键环节:芯棒归一化结构制备,芯棒收缩比 η 的设定和 VAD 松散体沉积。研究结果对非零色散位移光纤的生产具有实际的指导意义。

参 考 文 献

- Wen Aijun, Lü Liang, Yang Lei *et al.*. A novel scheme for optical inverse return-to-zero-differential quadrature phase-shift-keying modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2872~2878
文爱军, 吕亮, 杨蕾等. 一种新的光反转归零码-差分正交相移键控调制方案[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2872~2878
- Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi *et al.*. Digitalized optical coherent detection of differential phase shift keying signal and chromatic dispersion compensation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 471~476
冯勇, 闻和, 张汉一等. 差分相移键控信号的数字相干光检测与色散补偿研究与实现[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 471~476
- Wu Lin, Liu Liang, Zhang Fan *et al.*. Experimental study of high-speed differential phase-shift keying signal long-haul transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 54~58
吴琳, 刘亮, 张帆等. 高速率差分相移键控信号的长距离传输实验[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 54~58
- Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi. Digital optical coherent detection of polarization-multiplexed differential phase shift keying signal and analysis of adaptive digital polarization demultiplexing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1268~1273
冯勇, 闻和, 张汉一. 偏振复用差分相移键控信号的数字相干解调与偏振解复用算法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1268~1273

- 5 Pei Li, Ning Tigang, Qi Chunhui *et al.*. Research on PMD compensation of CFBG in high speed optical communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 142~146
裴丽, 宁提纲, 祁春慧等. 高速光通信系统光纤光栅色散补偿的偏振模色散研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 142~146
- 6 Liu Liang, Wu Lin, Zhang Fan *et al.*. Experimental study of the hybrid transmission of 42.8 Gb/s differential phase shift keying and 9.95 Gb/s on-off keying signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 676~680
刘亮, 吴琳, 张帆等. 差分相移键控和开关键控信号的混合传输实验[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 676~680
- 7 Wang Tiecheng, Yao Xiaotian, Wan Musen *et al.*. Effect of the polarization dependent loss on the orthogonality of channels in polarization division multiplexing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 879~883
王铁城, 姚晓天, 万木森等. 偏振相关损耗对偏振复用系统信道正交性的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 879~883
- 8 Zhang Xiaoguang. Development and progress of mitigation and compensation techniques for optical fiber polarization mode dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 525~539
张晓光. 光纤偏振模色散的缓解与补偿技术与进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 525~539
- 9 Li Mingjun, A. Danied. Optical transmission fiber design evolution[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(9): 1079~1092
- 10 Wu Jindong, Chen Lihua, Li Qingguo *et al.*. Dispersion-optimized optical fiber for high-speed long haul DWDM transmission[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(20): 3538~3546
- 11 Zhang Xiaoping, Tian Xiangqing. Analysis of waveguide dispersion characteristics of W I- and W II-type triple-cladding single-mode fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 581~586
张晓萍, 田祥庆. 三包层 W I 和 W II 型单模光纤波导色散特性的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 581~586
- 12 Kato M., Kurokawa K., Miyajima Y.. A new design for dispersion shifted fiber with effective area larger than $100 \mu\text{m}^2$ and good bending characteristics[C]. *Optical Fiber Communication*, 1998. 301~302
- 13 Zhang Liyong, Wu Xingkun, Yang Rongjin. A differential iteration solution to chromatic dispersion of optical fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2079~2082
张立永, 吴兴坤, 羊荣金. 光纤色散性能的微分迭代解法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2079~2082
- 14 Zhang Liyong, Wu Xingkun, Yang Junyong *et al.*. Study of optical preforms manufacture via complete synthetic technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2392~2395
张立永, 吴兴坤, 杨军勇等. 全合成法光纤预制棒制造研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2392~2395
- 15 Catherine K. W. Cheung, David F. Fletcher, Geoffrey W. Barton. A computational fluid dynamics model for co-deposition of silica and germania in the MCVD process[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2010, **356**(1): 24~31
- 16 Jiang Xiaoqiang, Wang Ruichun. Non-zero dispersion-shifted optical fibers with low nonlinearity for large capacity and long-haul transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 893~896
蒋小强, 王瑞春. 大容量长距离传输用低非线性效应非零色散位移光纤[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 893~896
- 17 Feng Gaofeng, Wu Jun, Pan Jin *et al.*. Fabrication and characterization of Yb^{3+} doped silica glass preforms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 820~822
冯高锋, 吴钧, 潘晋等. 掺铋石英光纤预制棒的制备与表征[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 820~822
- 18 Huang Bangcai, Yi Yongqing, Duan Yunfeng *et al.*. Fabrication of Er-Yb co-doped double-clad fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 339~342
黄榜才, 衣永青, 段云峰等. Er-Yb 共掺双包层光纤的研制[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 339~342
- 19 Peng Jian, Liu Lisong, Fu Yongjun *et al.*. Fabrication and characteristics of Bi^{3+} - Ga^{3+} - Al^{3+} co-doped high concentration Er^{3+} -doped silica-based fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2879~2884
彭健, 刘利松, 傅永军等. 铋镓铝共掺的高浓度掺铒石英基光纤的研制及其特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2879~2884
- 20 Wu Jindong, Chen Danping, Lu Weimin *et al.*. Fabrication of Bi-doped silica fibers with near infrared broadband emission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406003
吴金东, 陈丹平, 卢卫民等. 近红外宽带发光掺铋石英光纤的研制[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406003
- 21 Jindong Wu, Danping Chen, Xingkun Wu *et al.*. Ultra-broad near-infrared emission of Bi-doped SiO_2 - Al_2O_3 - GeO_2 optical fibers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(7): 071601
- 22 Wu Jindong, Wu Xingkun, Lu Weimin *et al.*. Improved fiber design and fabrication of non-zero dispersion-shifted fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2692~2697
吴金东, 吴兴坤, 卢卫民等. 非零色散位移光纤的改进设计及制造[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2692~2697