

基于超宽带铋铒共掺光纤光源的光纤光栅传感

李春生¹, 颜玢玢¹, 王大朋¹, 林锦锋¹, 崔亚男¹, 桑新柱¹, 王葵如¹,
罗艳华^{2,3}, 彭纲定³, 罗映祥⁴

¹北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;

²东华大学纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201600;

³新南威尔士大学电气工程与通信学院光子学与光通信实验室, 悉尼 2052, 澳大利亚;

⁴重庆三峡学院电子与信息工程学院, 重庆 404000

摘要 为开发低成本且性能稳定的超宽带光源,研究了基于铋铒共掺光纤(BEDF)的超宽带光源的输出光谱特性。当使用830 nm激光器抽运时,输出光谱覆盖了整个O、E、S、C、L波段,半峰全宽达525 nm。将该BEDF超宽带光源应用于波分复用光纤光栅传感系统,实现了O波段和C波段的应力传感。实验结果表明,将BEDF超宽带光源应用于大规模光纤光栅传感网络,可大幅度提高传感系统的复用容量。

关键词 传感器; 超宽带光源; 掺铋光纤; 光纤光栅传感

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0110003

Fiber Bragg Grating Sensing by Ultra-Broadband Light Source Based on Bismuth-Erbium Co-Doped Fiber

Li Chunsheng¹, Yan Binbin¹, Wang Dapeng¹, Lin Jinfeng¹, Cui Yanan¹,
Sang Xinzhu¹, Wang Kuiru¹, Luo Yanhua^{2,3}, Peng Gangding³, Luo Yingxiang⁴

¹State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

²State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, Donghua University, Shanghai 201600, China;

³Laboratory of Photonics & Optical Communications, School of Electrical Engineering & Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia;

⁴College of Electronic and Information Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China

Abstract In order to develop both cheap and stable ultra-broadband light sources, the output spectral characteristics of ultra-broadband light source based on Bismuth-Erbium co-doped fiber (BEDF) are investigated. With the 830 nm lasers as pump, the output spectrum covers the whole O-, E-, S-, C-, L-bands and the full width at half maximum (FWHM) reaches 525 nm. With the application of BEDF ultra-broadband light source in wavelength division multiplexing fiber Bragg grating (FBG) sensing system, the strain sensing at O band and C band is realized. Experimental results indicate that the application of BEDF ultra-broadband light sources to large-scale FBG network

收稿日期: 2016-09-14; 收到修改稿日期: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(61405014,61520106014)、纤维材料改性国家重点实验室(东华大学)开放课题(LK1502)、信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)基金(IPOC2014B010, IPOC2016ZT07)、重庆市教委科技项目(KJ131125)

作者简介: 李春生(1992—),男,硕士研究生,主要从事光纤放大器方面的研究。E-mail: lichunsheng@bupt.edu.cn

导师简介: 颜玢玢(1981—),女,博士,讲师,主要从事新型光电子器件、光纤通信、三维显示等方面的研究。

E-mail: yanbinbin@bupt.edu.cn(通信联系人)

can greatly increase the multiplexing capacity of the sensing system.

Key words sensors; ultra-broadband light source; Bi-doped fiber; fiber Bragg grating sensing

OCIS codes 280.4788; 060.2310; 300.6280

1 引 言

基于复用技术,利用光纤光栅(FBG)可以组建传感网络,从而实现准分布式传感。基于光纤光栅的传感检测系统已广泛应用于民用基础设施建设、交通运输、石油化工、航空航天和生物医学等实际工程领域^[1-5]。光纤光栅传感系统的复用技术主要包括波分复用(WDM)技术、时分复用(TDM)技术、空分复用(SDM)技术以及混合复用技术。其中,光纤光栅天然的波长选择性使得 WDM 技术成为最理想、最简单的复用方式。目前,WDM 技术也是最成熟的传感组网技术^[6-7]。但是 WDM 的复用容量受到光源带宽的限制,无法满足未来大型结构监测的要求。

宽带光源是波分复用传感系统中的重要器件之一,在工程应用中主要采用稀土掺杂放大自发辐射(ASE)光源和发光二极管^[8],但是它们的带宽受自身特性的限制,一般都小于 100 nm。利用光子晶体光纤制作的超连续光源在 400~1700 nm 范围内具有超宽带光谱^[9],但较高的价格及存在的稳定性问题限制了其广泛应用,因此便宜且稳定的超宽带光源亟待研究。最近的研究表明,掺铋光纤(BDF)和铋钕共掺光纤(BEDF)在近红外波段表现出了超宽带荧光特性,有望用于制备超宽带光源。该光源可实现整个近红外通信波段的宽带传感,并为高速率通信提供服务^[10-12]。

本文对新型 BEDF 超宽带光源进行了研究,在 830 nm 半导体激光器(LD)抽运情况下,BEDF 光源在 980~1630 nm 范围内实现了超宽带光谱输出,其半峰全宽(FWHM)可达 525 nm。将 BEDF 超宽带光源应用于波分复用光纤光栅传感系统,利用 1286.4,1304.5,1528.5,1544.8 nm 的 FBG 实现了 O 波段和 C 波段的应力传感。

2 实 验

2.1 铋钕共掺光纤

实验中所使用的 BEDF 是由澳大利亚新南威尔士大学采用改进化学气相沉积法和原位溶液掺杂技术制成的,在标准大气压下各组成成份的原子数分数分别为 26.69%(Si),0.42%(P),0.148%(Bi),0.05%(Er),0.3%(Al)和 1.259%(Ge),光纤的纤芯直径为 3.0 μm 。其中,Er 的加入不但可以实现 BEDF 在 C+L 波段的发光,还可以增强 Bi 在 O 波段的发光功率^[12]。研究表明,可根据掺杂的基质元素对 Bi 活性中心(BAC)进行分类^[13]。其中,与 Ge 相关的 BAC 在 1000~1600 nm 范围内没有荧光辐射^[13],但是对 1600~1800 nm 波段的荧光辐射可能会有贡献,此处加入 Ge 主要是用来控制纤芯折射率,加入 Al 可以增加二氧化硅中稀土离子的溶解度以减少聚类^[14],同时 Al 也能有效构建 BAC-Al^[15]。

2.2 实验装置

实验装置如图 1 所示,其中 OSA 为光谱仪。光纤光栅受应变的一端被强力胶固定在刚性支架上,托盘悬挂在光纤光栅另一端,在托盘中放置一元硬币对光纤光栅施加轴向应力,图 1(b)只给出了 FBG2 受应力时的情况。FBG4 受应力情况时,4 根 FBG 的连接顺序不变,装置图类似。实验使用的 BEDF 长度为 9 cm,熔接机(80S,Fujikura,日本)采用自动熔接模式,将 BEDF 两端与普通单模跳线熔接在一起。BEDF 与普通单模光纤模场的不匹配会导致较大的熔接损耗,因此选择熔接损耗较小的样品进行实验研究,熔接机显示 BEDF 两端的熔接损耗都为 0.07 dB。使用 830 nm 的 LD 作为抽运源,利用普通单模跳线将其与功率计直接相连,测量得到的实测功率 P_{real} 与抽运源面板的屏显功率 P_{dis} 呈近似的线性关系,有 $P_{\text{real}} = 0.605 \times P_{\text{dis}}$,文中所提的抽运功率均采用屏显功率 P_{dis} 。使用测量范围为 600~1700 nm 的光谱分析仪(AQ6370C, YOKOGAWA,日本)测量 BEDF 宽带光源的输出光谱,同时将其用作波分复用传感系统的探测装置。图 1(b)中 4 根串联光纤光栅 FBG1、FBG2、FBG3 和 FBG4 在室温下的布拉格波长分别为 1286.4 nm(O 波段)、1304.5 nm(O 波段)、1528.5 nm(C 波段)和 1544.8 nm(C 波段)。

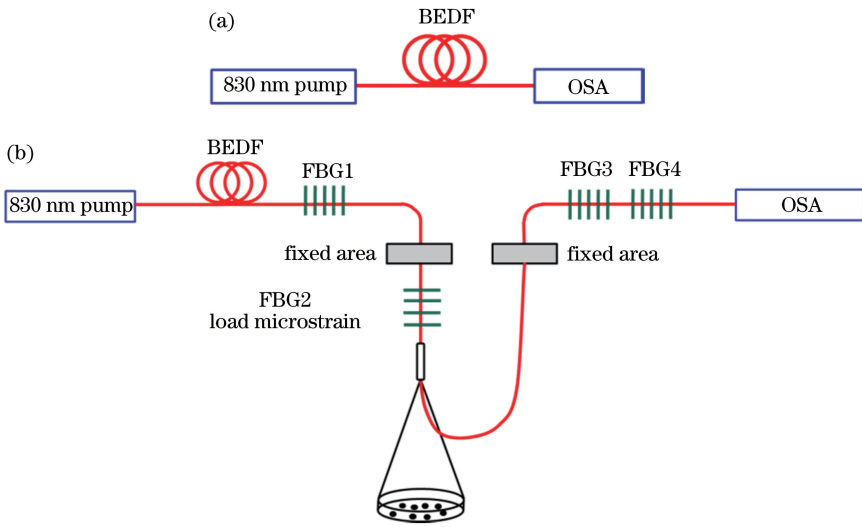


图 1 (a) BEDF 超宽带光源输出光谱测量装置;(b)基于 BEDF 超宽带光源的光纤光栅(FBG)传感系统
 Fig. 1 (a) Setup for measuring output spectrum of ultra-broadband light source based on BEDF;
 (b) fiber Bragg grating (FBG) sensing system with ultra-broadband light source based on BEDF

3 结果及分析

3.1 BEDF 超宽带光源

图 2 所示为 830 nm LD 抽运下的 BEDF 超宽带光源的输出光谱特性。其中,图 2(a)是在光谱仪分辨率为 2 nm、抽运功率为 80 mW 的情况下得到的输出光谱图。可以看出,输出光谱的范围为 980~1630 nm,光谱强度位于-63~-58 dBm 之间(不平坦度小于 5 dB),3 dB 荧光谱范围为 1039~1564 nm,FWHM 达到 525 nm,此 BEDF 宽带光源的强度已经达到常规宽带白光源的水平。实验中,抽运功率的大小和 BEDF 的长度在一定程度上限制了超宽带光源的光谱强度。如图 2(a)所示,830 nm LD 抽运时,该 BEDF 宽带光源

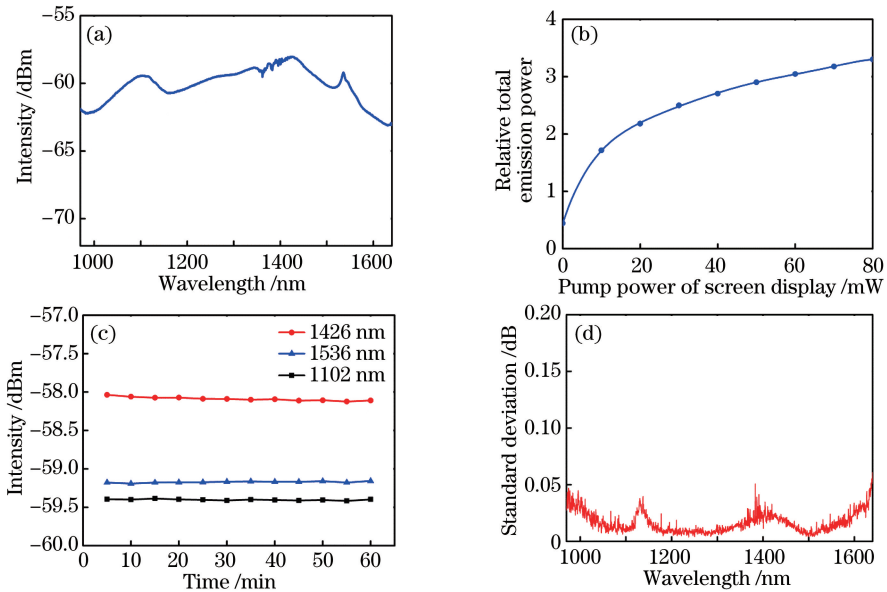


图 2 830 nm LD 抽运情况下,BEDF 超宽带光源输出光谱特性。(a)输出光谱;(b)输出光谱相对总功率随抽运功率的变化;
 (c)输出光谱在各峰值波长处的稳定性;(d)整个输出光谱的标准差

Fig. 2 Output spectral characteristics of ultra-broadband light source based on BEDF when 830 nm LD used as pump.
 (a) Output spectrum; (b) variation of relative total emission power with pump power; (c) stability of output spectrum at each peak wavelength; (d) standard deviation of the whole output spectrum

的输出光谱主要有三个辐射峰,其中 1110 nm 和 1420 nm 波段的辐射峰由 Bi 产生,分别源自 BAC-Al 和 BAC-Si,1535 nm 波段的辐射峰由 Er³⁺ 的电子跃迁产生^[16]。从实验结果可以看出,加入 Er 元素后,可以使 BEDF 在 C+L 波段产生辐射;加入 Bi 元素后,可以使 BEDF 在 1000~1500 nm 超宽带波段产生辐射。

图 2(b)给出了 BEDF 宽带光源输出光谱在 980~1630 nm 波段的相对总功率与抽运功率之间的关系,相对总光谱强度随抽运功率的增加而增加。作为宽带光源,其稳定性很重要。图 2(c)和图 2(d)均为 BEDF 宽带光源的稳定性测试结果,测量总时间为 1 h,每 5 min 记录一组数据,抽运功率为 80 mW(忽略抽运源输出功率抖动的影响)。结果显示,BEDF 宽带光源输出光谱在各峰值波长处的稳定性很好,整个带宽范围内输出光谱的标准差小于 0.05 dB。

在 830 nm LD 抽运的情况下,BEDF 光源在近红外通信波段表现出了超宽带光谱输出特性,并且输出光谱具有较好的平坦性和稳定性。将 BEDF 光源应用于基于波分复用技术的光纤光栅传感系统中,可显著提高传感系统的复用容量。

3.2 基于 BEDF 超宽带光源的 FBGs 传感阵列测量

在室温及不加载应力的情况下,利用 BEDF 超宽带光源,分别测量 FBG1、FBG2、FBG3 和 FBG4 以及 4 根 FBG 串联的透射谱。图 3(a)、(b)分别是 FBG1 和 FBG2 的透射谱,其布拉格波长分别为 1286.4 nm 和 1304.5 nm,位于 O 波段(1260~1360 nm)。图 3(c)和(d)分别是 FBG3 和 FBG4 的透射谱,布拉格波长分别为 1528.5 nm 和 1544.8 nm,位于 C 波段(1530~1565 nm)。图 3(e)是 4 根 FBG 串联之后的透射谱,各光纤光栅在各自波段的透射峰与单个光纤光栅接入时的情况一致。测量透射谱时,光谱仪的分辨率很低(2 nm),因此测量得到的各 FBG 的透射峰深度较小。实验中采用的 4 根 FBG 的布拉格波长各不相同,且两根位于 O 波段,两根位于 C 波段,但利用一个 BEDF 超宽带光源就可实现波长相差甚远的 4 根 FBG 的复用。

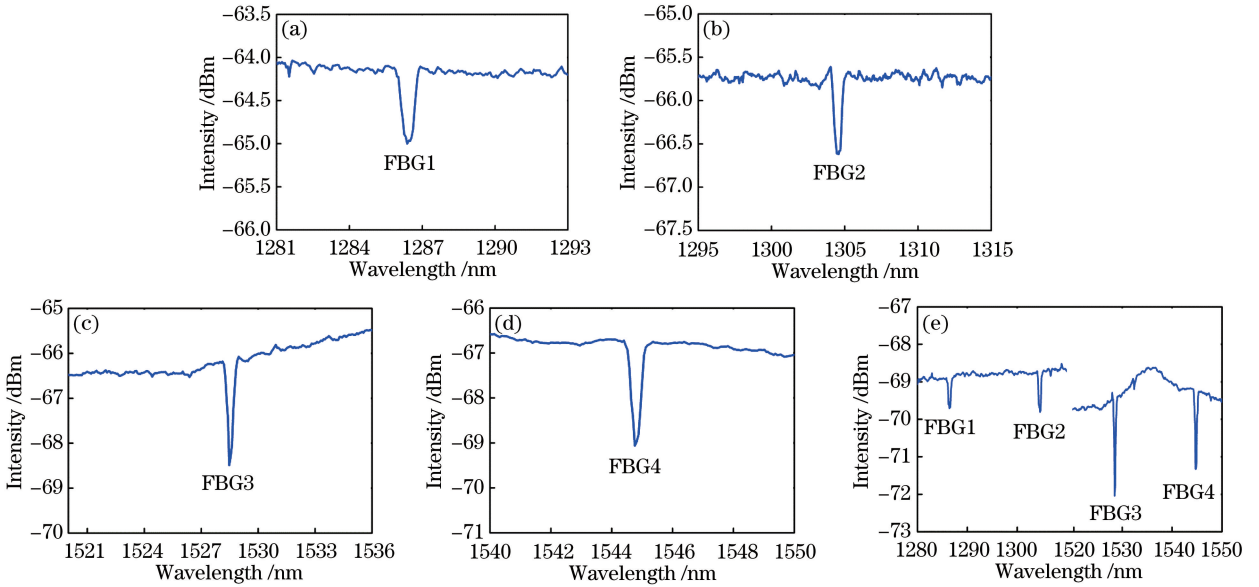


图 3 利用 BEDF 超宽带光源输出光谱得到的透射谱。(a) FBG1;(b) FBG2;(c) FBG3;(d) FBG4;(e) FBG1、FBG2、FBG3 和 FBG4 串联

Fig. 3 Transmission spectra by means of output spectra of ultra-broadband light source based on BEDF.

(a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3; (d) FBG4; (e) series connection of FBG1, FBG2, FBG3 and FBG4

3.3 基于 BEDF 超宽带光源的波分复用应变传感系统

利用 3.2 节所述的 4 根光纤光栅和 BEDF 超宽带光源,构建图 1(b)所示的光纤光栅传感系统,进行应变传感实验。微应变计算公式为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{mg}{SE}, \quad (1)$$

式中 ϵ 为应变, σ 为施加的应力, E 为弹性模量, m 为硬币质量, g 为当地重力加速度, S 为光纤光栅的横截面积。

实验结果如图 4 所示。由图 4(a)可以看出,FBG2 透射峰波长的偏移量与应变呈近似线性关系,线性相关系数为 0.99998,应变灵敏度为 $976.4 \mu\text{m}/\epsilon$ 。在只给 FBG2 施加应力的情况下,其他三根 FBG 透射峰波长不发生偏移,FBG1、FBG3、FBG4 的最大波长抖动值分别为 0.009,0.006,0.002 nm。由此可见,在为每个光纤光栅分配足够宽通道带宽的情况下,该传感系统中各光纤光栅之间的串扰很小。图 4(b)为只对 FBG4 施加应力的情况,结果与只对 FBG2 施加应力类似,FBG4 对应拟合直线的相关系数也为 0.99998,应变灵敏度为 $1150 \mu\text{m}/\epsilon$,FBG1、FBG2、FBG3 的最大波长抖动值分别为 0.01,0.008,0.009 nm,各光纤光栅之间的串扰也很小。

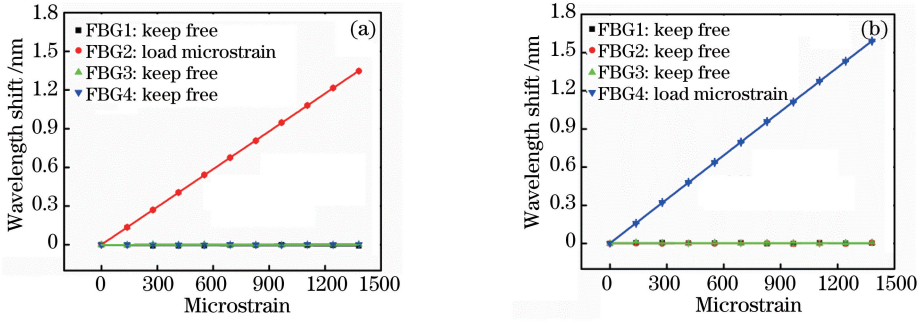


图 4 WDM 光纤光栅的应变传感。(a) 只有 FBG2 施加应力; (b) 只有 FBG4 施加应力

Fig. 4 Strain sensing based on WDM-FBG. (a) Only FBG2 loading microstrain; (b) only FBG4 loading microstrain

4 结 论

研究了一种 BEDF 超宽带光源,仅在 830 nm LD 单个抽运的情况下,在 980~1630 nm 近红外通信波段实现了超宽带光谱输出,其 FWHM 达 525 nm,标准差小于 0.05 dB,具有很好的稳定性。实验结果表明,把 BEDF 超宽带光源应用于基于波分复用技术的光纤光栅传感系统,可大幅度提高传感系统的复用容量,构建超大规模传感网络,从而对大型结构进行传感测量。虽然目前 BEDF 宽带光源输出光的强度相对较低,但是随着掺 Bi 光纤制备工艺的改进,BEDF 宽带光源的输出光强有望得到提高。

参 考 文 献

- [1] Chan T H T, Yu L, Tam H Y, *et al.* Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(5): 648-659.
- [2] Rao Y J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, 31(4): 297-324.
- [3] Pang Dandan, Sui Qingmei, Jiang Mingshun. New fiber Bragg grating high temperature sensing network based on diffraction demodulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1105005.
庞丹丹, 隋青美, 姜明顺. 基于衍射解调的新型光纤光栅高温传感网络[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1105005.
- [4] Yang Mu, Liu Xiuhong, Liu Wei, *et al.* Applied research of optical fiber sensor in oil and gas pipe corrosion monitoring [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020604.
杨 牧, 刘秀红, 刘 伟, 等. 光纤光栅传感网络在油气出地管内腐蚀监测的应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020604.
- [5] Luo Tao, Gu Zhengtian. Progress of biological and chemical sensors based on long period grating in photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(11): 34-40.
罗 涛, 顾铮先. 光子晶体光纤光栅在生物和化学传感器领域研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(11): 34-40.
- [6] Berkoff T A, Kersey A D. Fiber Bragg grating array sensor system using a bandpass wavelength division multiplexer and interferometric detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(11): 1522-1524.
- [7] Chen Haiyun, Gu Zhengtian, Gao Kan. Multi-parameter photochemical sensing technology of long-period fiber grating and wavelength division multiplexing[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0205003.
陈海云, 顾铮先, 高 侃. 基于波分复用的长周期光纤光栅光化学多参量传感技术研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(2):

0205003.

- [8] Lee J H, Kim C H, Han Y G, *et al.* Broadband, high power, erbium fibre ASE-based CW supercontinuum source for spectrum-sliced WDM PON applications[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(9): 549-550.
- [9] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [10] Dvoyrin V V, Mashinsky V M, Dianov E M, *et al.* Absorption, fluorescence and optical amplification in MCVD bismuth-doped silica glass optical fibres [C]. 2005 31st European Conference on Optical Communication, Glasgow, 2005: 949-950.
- [11] Luo Y H, Wen J X, Zhang J Z, *et al.* Bismuth and erbium codoped optical fiber with ultrabroadband luminescence across O-, E-, S-, C-, and L-bands[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3447-3449.
- [12] Zhang J Z, Sathi Z M, Luo Y H, *et al.* Toward an ultra-broadband emission source based on the bismuth and erbium co-doped optical fiber and a single 830 nm laser diode pump[J]. *Optics Express*, 2013, 21(6): 7786-7792.
- [13] Bufetov I A, Melkumov M A, Firstov S V, *et al.* Bi-doped optical fibers and fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 111-125.
- [14] Lyytikäinen K J. Control of complex structural geometry in optical fibre drawing[D]. Sydney: University of Sydney, 2004.
- [15] Fujimoto Y, Nakatsuka M. ^{27}Al NMR structural study on aluminum coordination state in bismuth doped silica glass [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2006, 352(21-22): 2254-2258.
- [16] Sathi Z M, Zhang J Z, Luo Y H, *et al.* Spectral properties and role of aluminium-related bismuth active centre (BAC-Al) in bismuth and erbium co-doped fibres[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(5): 1195-1209.