

铋铈共掺石英光纤的制备与近红外发光特性研究

何涛, 文建湘**, 王骞, 庞拂飞, 陈振宜, 王廷云*

上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

摘要 利用改进化学气相沉积(MCVD)工艺结合原子层沉积(ALD)掺杂技术制备铋铈共掺石英光纤(BEDF), 对其进行熔融拉伸处理, 研究其近红外发光特性。实验结果表明, 随着拉伸长度增加, BEDF 的透射谱强度下降, 同时, 在 980 nm 抽运光激发下, 铋活性中心(BACs)在 940 nm 和 1100 nm 波段处荧光的强度随着拉伸长度的增加而明显增强, 当拉伸长度为 1.5 cm 时, 分别增加 8.2 dB 和 9.7 dB。经熔融拉伸处理后, 仅 4.9 cm 长的 BEDF 的荧光强度增强, 这可能是因铋离子的价态变化和铋活性中心浓度的下降所致。这对研究铋相关发光材料在近红外波段的发光机理, 提升发光中心的发光效率具有重要的意义。

关键词 光纤光学; 光谱学; 熔融拉伸处理; 铋/铈共掺光纤; 石英光纤

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1006004

Fabrication and Near-Infrared Luminescent Properties of Bismuth/Erbium Co-Doped Silica Fiber

He Tao, Wen Jianxiang**, Wang Qian, Pang Fufei, Chen Zhenyi, Wang Tingyun*

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract The bismuth/erbium co-doped silica fiber (BEDF) is fabricated by combination of modified chemical vapor deposition (MCVD) technology with atomic layer deposition (ALD) doping technique. The melt stretching treatments are carried out, and its near-infrared luminescence characteristics are studied. The experimental results show that the transmission spectrum intensity of BEDF is decreased with the increase of the stretching length. At the same time, the luminescence intensities at 940 nm and 1100 nm ascribing to bismuth-related active centers (BACs), under the 980 nm pumping, are obviously increased with the increase of the stretching length, and when the stretching length is 1.5 cm, they are enhanced by 8.2 dB and 9.7 dB, respectively. After stretching treatments, the luminescence intensity enhancement of the 4.9 cm-long BEDF may result from the change of valence states of bismuth ions and the decrease of concentrations of BACs. These findings are of great significance for studying the near-infrared luminescent mechanism of bismuth related luminescent materials and improving the luminescent efficiency of luminescent centers.

Key words fiber optics; spectroscopy; melt stretching treatment; bismuth/erbium co-doping fiber; silica optical fiber

OCIS codes 060.2310; 300.6280; 060.2290

1 引 言

近年来, 无水峰光纤的出现使得 1200 ~ 1700 nm 波长范围内传输损耗降低, 拓宽了可使用的通信窗口范围, 而传统稀土掺杂放大器的增益带宽不能更宽的光波分复用系统的需求。

2001 年, Fujimoto 等^[1]报道了掺铋石英材料的宽带发光特性, 引起了国内外研究人员的广泛关注。目前, 通过改变基质材料和抽运波长等条件, 掺铋材料在 900 ~ 1800 nm 波段陆续实现超宽带近红外(NIR)、覆盖整个低损耗通信窗口的荧光^[2-4], 成为该波段最有前途的活性介质之一。掺铋材料作为使

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-05-09; 录用日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61520106014, 61475096, 61422507, 61635006)、上海市科学技术委员会资助项目(15220721500)

* E-mail: wenjx@shu.edu.cn; ** E-mail: tywang@shu.edu.cn

用最广泛的增益发光介质^[5-6],和铋共掺有望提高发光效率,克服掺铒光纤放大器增益带宽的固有限制,使得铋铒共掺石英光纤(BEDF)在光纤通信系统中具有广阔的应用前景。

然而,BEDF中铋相关的 NIR 发光机理仍不明确,这显然限制了基于铋活性中心的相关光器件性能的优化。到目前为止,已在实验和理论方面针对 NIR 发光机理做了一些研究。在共掺有锆和铝离子的铋掺杂石英材料中观察到宽带 NIR 发光现象,认为其发光中心的形成与锆和铝等“共掺剂”有关,并将发光中心在 920 nm 和 1100 nm 发出的荧光分别归因于锆相关的铋活性中心(BAC-Ge)^[7-8]和铝相关的铋活性中心(BAC-Al)^[9-10]。然而,在铋玻璃中掺入不同的共掺剂,发现在不含锆和铝的铋掺杂石英中也发现类似的发光行为^[11-14],认为这些锆和铝等“共掺剂”不是铋掺杂材料 NIR 荧光的直接贡献者^[15]。后来,通过辐照和退火^[16-19]等后期处理的方法,从铋离子自身展开了研究,将 NIR 荧光归因于低价态铋离子,如 Bi⁺、Bi⁰和 Bi-clusters 等。但是在一些存在不同价态铋离子的玻璃材料中并没有出现 NIR 发光^[20]的现象,认为铋离子自身并不是 NIR 发光的来源。近年来,通过研究掺铋材料中 NIR 荧光和氧缺陷的关系,将 NIR 发光归结于低价铋离子和氧缺陷共同作用^[21-23]的结果。其中,共掺剂会对 NIR 发光中心^[15-16,24]的形成起到促进作用。尽管对于铋相关的 NIR 发光中心的结论有很多,但是目前还没有得到直接实验结果的证实,甚至部分

结论是相互排斥的,发光机理仍存在争议。

本文利用改进化学气相沉积(MCVD)结合原子层沉积(ALD)工艺制备 BEDF,对其进行熔融拉伸处理,研究了不同拉伸长度对透射光谱及荧光光谱的影响,并进一步对 940 nm(BAC-Ge)和 1100 nm(BAC-Al)的发光机理进行研究。

2 实 验

实验使用的 BEDF 是由 MCVD 工艺结合 ALD 掺杂技术制备而成的。MCVD 工艺和 ALD 掺杂技术主要包括以下几部分:1)将高纯度 O₂和 SiCl₄混合气体通入高纯石英玻璃管中,经高温加热处理,使混合气体发生化学反应,生成亚微米级的 SiO₂疏松体沉积在石英管内表面,在管内表面经多次重复,沉积为一定厚度的 SiO₂疏松层,然后在高温下半玻璃化;2)利用 ALD 掺杂技术,分别将铋、铒及铝离子的前驱体通入管内,与去离子水发生化学反应,生成铋、铒与铝离子的氧化物,并根据沉积厚度控制掺杂离子的浓度;3)利用 MCVD 将高纯度 O₂、GeCl₄和 SiCl₄混合气体通入管内,沉积一定厚度的 SiO₂和 GeO₂;4)高温塌缩,将其收缩成一根实心掺杂光纤预制棒;5)将光纤预制棒拉制成光纤。制备流程如图 1(a)所示,其中,ALD 掺杂技术主要是利用掺杂源的前驱体(有机铬合物掺杂铋、铒与铝源的前驱体),与氧源前驱体(去离子水)发生化学反应,生成掺杂离子的氧化物并沉积在基管内表面,如图 1(b)所示,其中铋、铒与铝源的前驱体为三(2,2,6,6-四

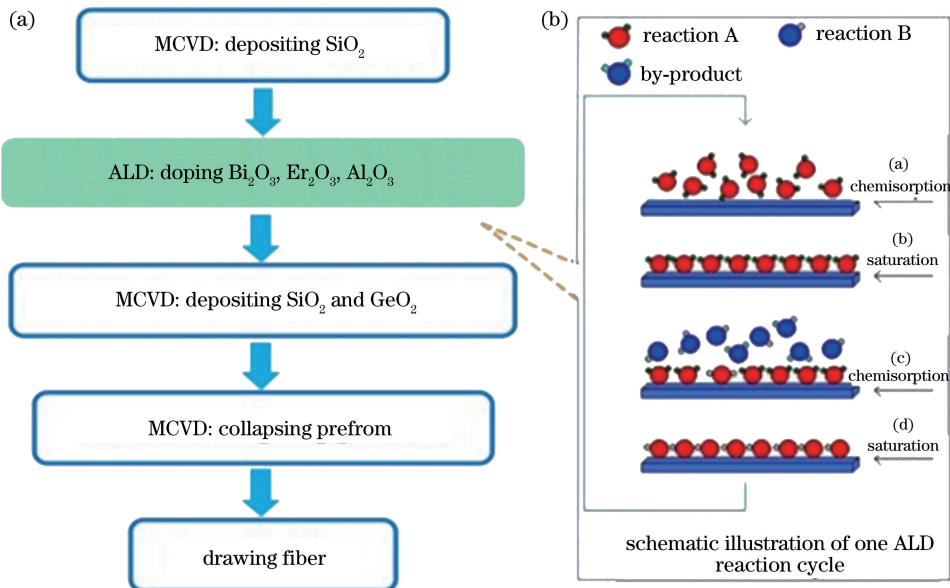


图 1 BEDF 制备流程图。(a)制备流程;(b)ALD 沉积反应原理

Fig. 1 Preparation flow chart of BEDF. (a) Preparation process of BEDF; (b) reaction of ALD deposition

甲基-3,5-庚二酮酸)铋(III)、三(2,2,6,6-四甲基-3,5-庚二酮酸)铟和三甲基铝。

利用电子探针显微分析仪(EPMA, JEOL JXA-8100, 法国)对光纤预制棒掺杂组分进行测量分析^[25], 铋、铟和铝离子的原子分数分别为 0.12%, 0.02% 和 0.01%。拉制的 BEDF 的纤芯直径约 7.9 μm , 包层直径约 125 μm , 且芯层与包层折射率差为 0.87%, 如图 2 所示。

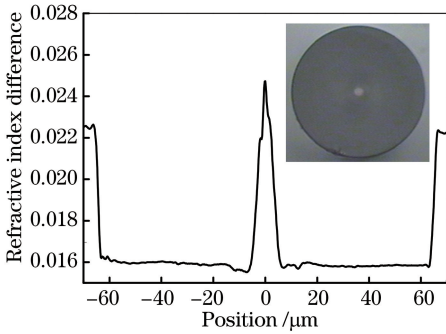


图 2 BEDF 的端面和折射率分布图

Fig. 2 Cross-section and refractive index distribution of BEDF

利用熔融拉锥机(FBT, OB-612, 上海欧波光电科技有限公司)对 BEDF 作拉伸处理, 研究不同拉伸长度下光纤的透射光谱和荧光光谱特性。首先, 取 3.4 cm 的 BEDF, 剥除涂覆层, 将其两端分别与两段单模光纤(SMF)熔接, 然后将两单模光纤分别固定在两拉伸台上, 调节间距, 使 BEDF 处于两拉伸台中间。在熔融拉伸过程中, 火炬(heater)以 5000 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的速度沿着光纤来回移动, 并对 BEDF 加热, 火炬的最大移动长度为 3.2 cm; 与此同时, 拉伸台以 120 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的速度将光纤向两侧拉伸, 每次的拉伸长度为 0.3 cm。启动拉伸后, 每当光纤被拉长 0.3 cm 时, 拉伸台将会停止一次, 同时, 火炬收起, 加热停止。然后, 在室温下测试光纤的透射光谱和荧光光谱特性。其中, 加热火炬为氢氧焰。图 3(a) 为透射光谱测试系统, 白光光源(WLS, AQ4305)直接接入光纤样品, 待测光纤的另一端连接光谱仪(OSA, Yokogawa AQ-6315C)。图 3(b) 为荧光光谱测试系统, 980 nm 抽运光经耦合器(coupler)进入待测光纤样品, 样品的另一端插入甘油(glycerin), 反向荧光光谱则由光谱仪进行记录。

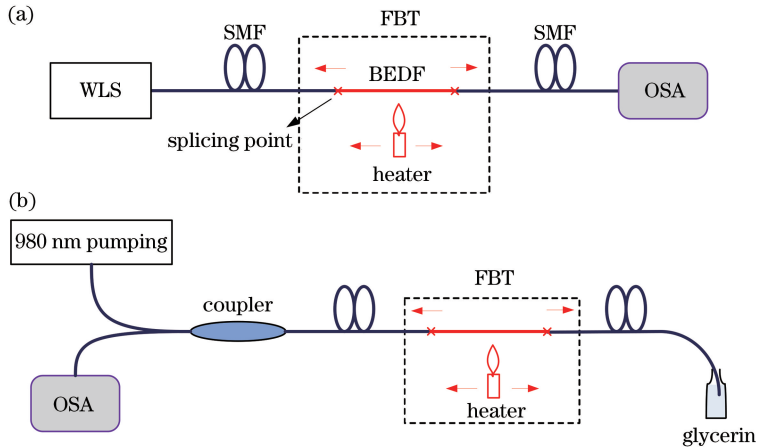


图 3 光谱测试系统。(a)透射光谱测量;(b)荧光光谱测量

Fig. 3 Spectrum testing systems. (a) Transmission spectra measurement; (b) luminescence spectra measurement

3 结果与分析

3.1 熔融拉伸处理对铋铟共掺石英光纤透射光谱的影响

熔融拉伸处理前, BEDF 的长度和直径分别为 3.4 cm 和 124.1 μm , 其透射光谱如图 4 所示。在 600~1700 nm 的波长范围内, 存在 4 个明显的损耗峰, 分别位于 642, 790, 970, 1525 nm。通过与商用掺铟光纤损耗谱对比^[25], 可以判定 642 nm 和 1525 nm 的损耗是由铟离子引起的, 而 790 nm 和

970 nm 处的损耗是由铋活性中心和铟离子共同作用导致的。经熔融拉伸处理后, 4 个损耗峰的强度都随着 BEDF 拉伸长度的增加而减弱, 而且在 692 nm 和 1376 nm 波段处出现了两个新的损耗峰。根据文献^[9, 26], 692 nm 处出现的损耗峰可能是源于 Bi^{2+} 对应的跃迁。这意味着, 经熔融拉伸处理, 在 BEDF 中出现了更多的 Bi^{2+} 离子, 导致 692 nm 损耗增加。而 1376 nm 损耗峰是由氢氧焰加热时引入的 OH^- 所致。

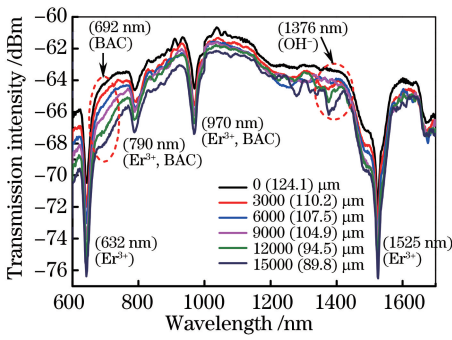


图 4 BEDF 在不同拉伸长度(直径)时透射光谱特性
Fig. 4 Transmission spectra of BEDF at different stretching lengths (diameters)

3.2 熔融拉伸处理对铒钇共掺石英光纤荧光特性的影响

3.4 cm 的 BEDF 在 980 nm 抽运光源(中心波长为 965 nm)不同抽运功率激发下产生的荧光光谱如图 5 所示。当抽运功率为 4 mW 时,铒活性中心和钇离子产生的荧光覆盖 900~950 nm、975~1250 nm 和 1350~1700 nm 波段。随着抽运功率增加,越来越多铒和钇活性中心的基态粒子被抽运到激发态,产生更强的荧光,荧光光谱强度随之增强。但是随着抽运功率的继续增强,荧光光谱强度的升高趋势却变得平缓。当抽运功率达到 113 mW 及 300 mW 时,荧光强度基本不变,1100 nm 和 1527 nm 的荧光强度趋于饱和,如图 5 插图所示。这是由于当光纤长度不变,也就是在光纤内铒和钇活性中心总数保持不变的情况下,铒和钇活性中心的基态粒子基本被抽运完毕^[27],达到了饱和状态,荧光也达到了饱和状态。

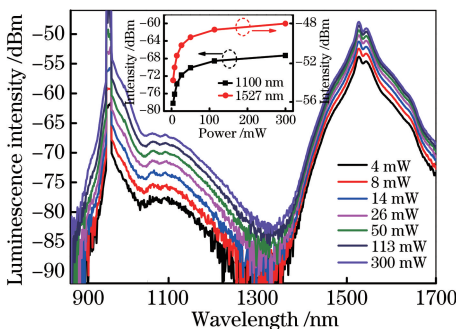


图 5 不同抽运功率下 BEDF 的荧光光谱特性
Fig. 5 Luminescence spectra of BEDF under different pumping powers

但是经过熔融拉伸处理,荧光光谱的强度发生了改变。经不同长度拉伸后,长度为 3.4 cm,直径为 123.8 μm 的 BEDF 在 980 nm 抽运光激发下产生的荧光光谱如图 6 所示。其中,980 nm 抽运光源

的抽运功率固定为 300 mW,能使 3.4 cm 长的 BEDF 中铒和钇活性中心的基态粒子基本被抽运完毕,达到饱和状态。然而,经过一次熔融拉伸处理后,900~950 nm 和 1000~1250 nm 波段的荧光强度开始上升,而 975~1000 nm 和 1440~1700 nm 的荧光强度则是下降的。随着拉伸长度的继续增加,975~1000 nm 和 1440~1700 nm 波段的荧光强度基本保持不变,900~950 nm 和 1000~1250 nm 波段的荧光强度持续上升。从图 5 中可以看出 900~1700 nm 波段的荧光光谱的强度都随着抽运功率增加而增加,而在拉伸过程中 975~1000 nm 和 1440~1700 nm 波段的荧光强度是下降的,900~950 nm 和 1000~1250 nm 波段的荧光强度则是上升的,根据铒和钇活性中心的经典发射规律^[9-10],可以判定中心位于 940 nm 和 1100 nm 波段荧光的发光中心分别是 BAC-Ge 和 BAC-Al,而中心在 975 nm 和 1525 nm 的荧光则是由 Er³⁺ 离子的电子跃迁(⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2}, ⁴I_{11/2}→⁴I_{15/2})产生的。当拉伸长度为 1.5 cm,即光纤长度为 4.9 cm 时,BAC-Al 在 1100 nm 的荧光强度基本达到了饱和,相对于未拉伸的 BEDF 增加了 9.7 dB,而 BAC-Ge 在 940 nm 的荧光强度增加 8.2 dB,且其荧光强度还有继续增加的趋势,如图 6 插图所示。

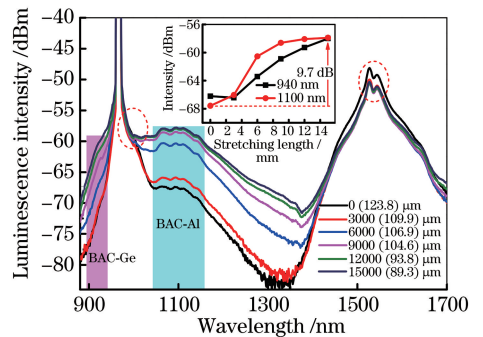
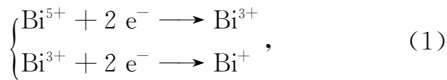


图 6 BEDF 在不同拉伸长度(直径)时荧光光谱特性
Fig. 6 Luminescence spectra of BEDF at different stretching lengths (diameters)

1) BAC-Al(1100 nm):在 BEDF 中掺入铝离子后产生中心波长在 1100 nm 附近的发射带^[7,9],并将其归属于 BAC-Al。同样,在不含铝元素的掺铒材料中也出现了类似的荧光,将其归因于 Bi³⁺ 的电子跃迁^[11,28]。虽然铝离子不是影响发光中心的根本因素^[15],但是在掺铒材料中掺入铝离子,会使 Bi³⁺ 单元与附近的 [AlO_{4/2}]⁻ 四面体铝单元的电荷平衡^[24],促进 1100 nm 波段的发光中心的形成。

因为光纤制备过程中光纤经过高温处理,铒离

子将以不同价态形式(Bi^0 、 Bi^+ 、 Bi^{2+} 、 Bi^{3+} 和 Bi^{5+})存在^[20],而熔融拉伸过程中,由于铝离子的存在,铋离子的价态从高价向低价态转移^[17,20],即



由此推测,因为低价态铋离子增多,形成更多 BAC-Al,从而导致 1100 nm 处的荧光增强。

2) BAC-Ge(940 nm):在 BEDF 中共掺铋后出现中心为 950 nm 的荧光带^[9-10],并将其归属于 BAC-Ge。同样,在不含铋的掺铋材料中也产生了类似的荧光,并将其归属于 Bi^+ 的电子跃迁^[12-13]。但是在掺铋材料中掺入铈离子,会促进铋发光中心所需的氧缺陷的形成^[22,29-30],然后与低价铋离子结合,促进 BAC-Ge 发光中心的产生。

同样,在熔融拉伸处理过程中,低价态铋离子增多,会形成更多 BAC-Ge 发光中心,从而导致 940 nm 波段处的荧光强度增加。但是,当拉伸长度达到 1.5 cm 时,可以看出 BAC-Al 在 1100 nm 波段处的荧光强度达到了饱和,而 BAC-Ge 在 940 nm 波段处的荧光强度却还有进一步增强的趋势。导致这种现象的主要原因可能是,纤芯中的铈离子在熔融拉伸处理过程中存在扩散效应,铈离子会向包层处扩散,进一步与低价铋离子结合,促进 BAC-Ge 发光中心的形成。

此外,还设计了一组仅用熔融拉锥机的加热器对 BEDF 进行加热处理的实验,相当于一个高温快退火过程。随着快退火处理的进行,BAC-Ge 和 BAC-Al 在 940 nm 和 1100 nm 波段处的荧光强度快速增加后趋于饱和,其荧光强度增强的最大值始终低于熔融拉伸处理导致的荧光强度增加的最大值。而且,继续对 BEDF 进行多次快退火处理,940 nm 和 1100 nm 波段处的荧光强度开始缓慢下降,这时对其进行熔融拉伸处理,其荧光强度得到进一步提升。这可能是因为光纤变长,单位长度内的铋发光中心的浓度降低,从而提高了铋活性中心的发光效率。

4 结 论

采用 MCVD 工艺结合 ALD 掺杂技术制备 BEDF,其纤芯直径约 7.9 μm ,包层直径约 125 μm ,且芯层与包层折射率差为 0.87 %。利用熔融拉锥机对 BEDF 作拉伸处理,研究不同拉伸长度下,BEDF 的透射光谱和荧光光谱特性,并对其 NIR 发光机理进行了分析。实验结果表明,随着拉伸长度

的增加,光纤透射光谱在 692 nm 波段处出现了新的损耗峰(Bi^{2+});同时,在 980 nm 抽运光激发下,940 nm(BAC-Ge)和 1100 nm(BAC-Al)波段处的荧光强度随着拉伸长度的增加而明显增强,当拉伸长度为 1.5 cm 时,分别增强 8.2 dB 和 9.7 dB。经熔融拉伸处理后的 BEDF 荧光强度的增强可能是因为低价态铋离子增多,与铈和铝相关的氧缺陷结构结合形成更多的 BAC-Ge 和 BAC-Al 发光中心。此外,随着拉伸长度的增加,铋离子发光中心的浓度将会降低,发光效率会提高。因熔融拉伸处理的方式与拉丝过程非常类似,有望通过调节铋掺杂光纤的拉丝过程实现 NIR 波段荧光增强的效果。这对研究掺铋材料在 NIR 波段的发光机理,并提升铋离子活性中心的发光效率具有重要的意义。下一步,将结合 BEDF 的微结构特性,从掺杂浓度和纳米颗粒的变化情况分析熔融拉伸处理对 BEDF 的影响,研究其 NIR 发光机理。

参 考 文 献

- [1] Fujimoto Y, Nakatsuka M. Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(3B): L279-L281.
- [2] Dianov E M. Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers [J]. Light: Science & Applications, 2012, 1: e12.
- [3] Firstov S, Alyshev S, Melkumov M, *et al.* Bismuth-doped optical fibers and fiber lasers for a spectral region of 1600-1800 nm[J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6927-6930.
- [4] Li C S, Yan B B, Wang D P, *et al.* Fiber Bragg grating sensing by ultra-broadband light source based on bismuth-erbium co-doped fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0110003.
李春生, 颜纷纷, 王大朋, 等. 基于超宽带铋铒共掺光纤光源的光纤光栅传感[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0110003.
- [5] Li Y, Li K Q, Jin J. Influence of erbium-doped fiber's radiation effects on output characteristics of fiber source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1206003.
李彦, 黎珂钦, 金靖. 掺铒光纤辐射效应对光纤光源输出特性的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1206003.
- [6] Zang Q, Deng X, Liu J, *et al.* Optimization design for bidirectional Er-doped fiber amplifier used in long distance optical frequency transfer link [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0306006.
臧琦, 邓雪, 刘杰, 等. 用于长距离光学频率传递链路的双向掺铒光纤放大器的优化设计[J]. 光学学

- 报, 2017, 37(3): 0306006.
- [7] 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.
- [8] Wen J X, Wang J, Dong Y H, *et al.* Photoluminescence properties of Bi/Al-codoped silica optical fiber based on atomic layer deposition method [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 349: 287-291.
- [9] Yan B B, Luo Y H, Zareanborji A, *et al.* Performance comparison of bismuth/erbium co-doped optical fibre by 830 nm and 980 nm pumping [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(10): 105705.
- [10] Luo Y H, Yan B B, Ding M J, *et al.* Systematical study of up-conversion and near infrared emission of Bi/Er co-doped optical fibre pumped at 830 nm [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 133: 132-139.
- [11] Zheng J Y, Peng M Y, Kang F W, *et al.* Broadband NIR luminescence from a new bismuth doped $Ba_2B_5O_9Cl$ crystal: evidence for the Bi^0 model [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22569-22578.
- [12] Romanov A N, Veber A A, Fattakhova Z T, *et al.* Subvalent bismuth monocation Bi^+ photoluminescence in ternary halide crystals $KAlCl_4$ and $KMgCl_3$ [J]. *Journal of Luminescence*, 2013, 134(3): 180-183.
- [13] Zheng J Y, Tan L L, Wang L P, *et al.* Superbroad visible to NIR photoluminescence from Bi^+ evidenced in $Ba_2B_5O_9Cl:Bi$ crystal [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2830-2835.
- [14] Romanov A N, Veber A A, Fattakhova Z T, *et al.* Spectral properties and NIR photoluminescence of Bi^+ impurity in $CsCdCl_3$ ternary chloride [J]. *Journal of Luminescence*, 2014, 149: 292-296.
- [15] Peng M Y, Zhang N, Wondraczek L, *et al.* Ultrabroad NIR luminescence and energy transfer in Bi and Er/Bi co-doped germanate glasses [J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20799-20807.
- [16] Wen J X, Liu W J, Dong Y H, *et al.* Radiation-induced photoluminescence enhancement of Bi/Al-codoped silica optical fibers via atomic layer deposition [J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29004-29013.
- [17] Xu B B, Zhou S F, Guan M J, *et al.* Unusual luminescence quenching and reviving behavior of Bi-doped germanate glasses [J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 23436-23443.
- [18] Wei S E, Luo Y H, Ding M J, *et al.* Thermal effect on attenuation and luminescence of Bi/Er co-doped fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(1): 43-46.
- [19] Yu P S, Su L B, Guo W, *et al.* Broadband infrared luminescence in Bi-doped silicate glass [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, 464: 34-38.
- [20] Lin G, Tan D Z, Luo F F, *et al.* Linear and nonlinear optical properties of glasses doped with Bi nanoparticles [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, 357(11/12/13): 2312-2315.
- [21] Sporea D, Mihai L, Neguț D, *et al.* γ irradiation induced effects on bismuth active centres and related photoluminescence properties of Bi/Er co-doped optical fibres [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29827.
- [22] Firstov S, Alyshev S, Khopin V, *et al.* Photobleaching effect in bismuth-doped germanosilicate fibers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19226-19233.
- [23] Dvoretiskii D A, Bufetov I A, Vel'miskin V V, *et al.* Optical properties of bismuth-doped silica fibres in the temperature range 300-1500 K [J]. *Quantum Electronics*, 2012, 42(9): 762-769.
- [24] Romanov A N, Haula E V, Shashkin D P, *et al.* On the origin of near-IR luminescence in SiO_2 glass with bismuth as the single dopant. Formation of the photoluminescent univalent bismuth silanolate by SiO_2 surface modification [J]. *Journal of Luminescence*, 2017, 183: 233-237.
- [25] Liu W J, Wen X J, Dong Y H, *et al.* Spectral characteristics of Bi/Er co-doped silica fiber fabricated by atomic layer deposition (ALD) [C] // *Asia Communications and Photonics Conference 2015*, November 19-23, 2015, Hong Kong, China. Washington: Optical Society of America, 2015: ASu2A.46.
- [26] Xie W, Qiu Y Q, Wang Y X. Upconversion fluorescence of bismuth doped silica fibers [J]. *Laser Physics*, 2012, 23(1): 015702.
- [27] Liu P, Liao L, Chu Y B, *et al.* Irradiation and temperature influence on the Bi-doped silica fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 224220. 刘鹏, 廖雷, 褚应波, 等. 掺 Bi 石英光纤的 γ 射线辐照和温度影响特性 [J]. *物理学报*, 2015, 64(22): 224220.
- [28] Meng X G, Qiu J R, Peng M Y, *et al.* Near infrared broadband emission of bismuth-doped aluminophosphate glass [J]. *Optics Express*, 2005, 13(5): 1628-1634.
- [29] Ding M J, Fang J, Luo Y H, *et al.* Photo-bleaching mechanism of the BAC-Si in bismuth/erbium co-doped optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5222-5225.
- [30] Jain S, Duchez J B, Mebrouk Y, *et al.* Thermally-stimulated emission analysis of bismuth-doped silica fibers [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(7): 1361-1366.