

近红外宽带发光掺铋石英光纤的研制

吴金东^{1,2} 陈丹平³ 卢卫民¹ 张立永¹ 吴兴坤² 邱建荣⁴

(¹ 浙江富通光纤技术有限公司, 浙江 富阳 311422; ² 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
³ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ⁴ 华南理工大学光通信材料研究所, 广东 广州 510640)

摘要 采用改进化学汽相沉积(MCVD)与溶液掺杂结合的方法探讨了掺铋石英光纤预制棒的制备工艺, 研制了具有红外宽带发光特性的掺铋 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$ 光纤。研究了不同掺铋浓度与氧气浓度条件下制备的预制棒的光谱特性。掺铋预制棒切片在 532 nm 和 808 nm 光激发下, 产生中心波长为 1146 nm, 半峰全宽为 204 nm 与中心波长为 1281 nm, 半峰全宽为 250 nm 的近红外发光。控制的光纤在 808 nm 光激发下, 产生了中心波长为 1265 nm, 半峰全宽为 280 nm 的近红外发光; 在 976 nm 光激发下, 观察到光纤产生中心波长为 1125 nm, 半峰全宽为 460 nm 的超宽带近红外发光。光纤与预制棒的发光存在明显差异。通过控制预制棒制备工艺可以使铋掺杂光纤的发光满足实用的需要。

关键词 光纤光学; 铋掺杂光纤; 近红外发光; 溶液掺杂; 改进化学汽相沉积; 预制棒制备

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0406003

Fabrication of Bi-Doped Silica Fibers with Near Infrared Broadband Emission

Wu Jindong^{1,2} Chen Danping³ Lu Weimin¹ Zhang Liyong¹ Wu Xingkun² Qiu Jianrong⁴

¹ Zhejiang Futong Optical Fiber Technology Co., Ltd., Fuyang, Zhejiang 311422, China

² State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

³ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

⁴ Institute of Optical Communication Materials, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract The modified chemical vapor deposition (MCVD) and solution-doping method is applied to the fabrication of Bi-doped silica optical fiber preforms. Bi-doped $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$ fibers with near-infrared broadband emission are realized. The characteristic spectra of preforms with different Ge-codoped concentrations fabricated under various oxygen fluxes are experimentally investigated. The luminescence spectra from slices of fabricated preforms show an emission at 1146 nm with full width at half maximum (FWHM) of 204 nm when the preform is excited at 532 nm, and an emission at 1281 nm with FWHM of 250 nm when the preform is excited at 808 nm, respectively. The luminescence spectra of corresponding fibers show an emission at 1265 nm with FWHM of 280 nm when the preform is excited at 808 nm, and an emission at 1125 nm with the broadest FWHM of 460 nm when the preform is excited at 976 nm, respectively. The differences in emission between preform and fiber can be manipulated through controlling fabrication process of preform, so that the Bi-doped fiber with a suitable fluorescence and laser performance may be obtained.

Key words fiber optics; Bismuth-doped fiber; near infrared luminescence; solution doping; modified chemical vapor deposition; preform fabrication

OCIS codes 060.2280; 060.2290; 160.2290; 160.2540

收稿日期: 2010-09-30; 收到修改稿日期: 2010-11-15

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等方面的研究。

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等方面的研究。

E-mail: xingkunwu@zj165.com

1 引言

近年来,以网络互联协议(IP)为主流的数据业务爆炸式地增长,提出了巨大的信息传输带宽需求,光纤放大器如掺铒光纤放大器(EDFA)、掺镨光纤放大器(PDFA)和掺铊光纤放大器(TDFA),工作带宽较窄,已不适应高速大容量通信传输的发展要求,探索与研制可以覆盖 1.2~1.6 μm 整个光通信波段的宽带光纤放大器的工作变得十分重要。日本研究人员发现了掺杂在 SiO_2 玻璃中的 Bi 离子在 1100~1600 nm 波段具有半峰全宽波段为 200~300 nm 的近红外发光^[1],在 800 nm 激光的抽运激发下,实现了位于 1.3 μm 波段的光放大^[2]。由于在通信波段和石英通信光纤兼容的光纤增益材料较为稀少,这一特殊的光学特性引起了人们极大的关注。之后,人们采用坩埚熔融法制成了一系列铋掺杂的玻璃材料,如二氧化硅、二氧化锗、磷酸盐以及硼酸盐玻璃,大多数研究主要关注于这些铋掺杂块体玻璃材料的近红外发光特性^[3~14]。在新型宽带放大器、调谐光纤激光器应用中^[15~23],采用改进化学汽相沉积(MCVD)与溶液掺杂工艺^[24~26]制成的掺铋石英光纤更具实用前景而倍受重视,然而有关掺铋石英光纤制作工艺的研究报道却较少。

另一方面,Bi 离子在 SiO_2 玻璃中的发光机理至今尚不清楚,目前有多种解释: Bi^{1+} 和 Bi^{2+} ^[5,10,11], Bi^{5+} ^[1] 离子; Bi_2 和 Bi_2^- 团簇^[7,12,27]; BiO 分子^[9] 以及 $\{[\text{AlO}_{4/2}]^-, \text{Bi}^+\}$ 构造^[15]。最近, I. Razdobreev^[28] 和 V. G. Truong^[29] 分别采用 MCVD 工艺研究了芯层材料组成为 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 和 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 的掺铋预制棒和光纤的近红外发光特性,观察到光纤拉丝可引起 1.3 μm 波段发射光谱变化现象,这种明显变化有可能使得制备用于 1.3 μm 波段的高性能掺铋光纤变得困难,影响掺铋光纤在通信波段的许多应用,值得关注。此外,进一步研究材料组成与制备工艺条件对近红外发光性能的影响,还将为探讨铋的发光机理提供新的依据。综合文献的研究结果,我们认为,优化芯层材料组成,如共掺杂锗、磷等,结合预制棒制备工艺条件,如疏松体烧结,沉积管塌缩的气氛等,都有可能改进铋离子的存在状态(价态与配位环境),从而调整并获得所希望的优异光学性能,满足新型宽带放大器与光纤激光器的发展需要。本文报道了不同掺锗摩尔分数与氧气体积分数条件下预制棒的光谱特征,研制了具有近红外宽带发光特性的掺铋 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$ 光纤。

2 光纤的制备

首先采用 MCVD 工艺结合溶液掺杂法制备了一系列铋掺杂 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$ 预制棒。关键的制备环节为:1)内包层沉积,用常规方法沉积多层组成为 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-F}$ 的内包层,以防止沉积管中的杂质扩散到芯层中;2)疏松芯层沉积,采用反向沉积和预烧结办法沉积多孔疏松芯层,控制好疏松层的孔隙度与均匀度。通过调节 SiCl_4 , GeCl_4 和 POCl_3 的载气体流量来控制芯层的组分及折射率;3)溶液浸泡,取下沉积管,注入配制好的 $\text{BiCl}_3\text{-AlCl}_3$ 溶液,使 $\text{Bi}^{3+}\text{-Al}^{3+}$ 均匀地吸附在疏松芯层上;4)脱水烧结,沉积管重新安装到车床用 N_2 吹 30 min,通入 Cl_2 同时逐步升高温度至 1000 $^\circ\text{C}$ 进行脱水干燥,充分去除疏松层中含有的水分。干燥之后的沉积管通入 $\text{O}_2\text{-He}$,在 1800 $^\circ\text{C}$ 将疏松层烧结透明;5)沉积管塌缩成棒,继续通入 $\text{O}_2\text{-He}$,增大氢氧火焰在 2200 $^\circ\text{C}$ 下快速地将沉积管熔缩成透明的预制棒。通过调整 $\text{O}_2\text{-He}$ 比例控制氧气体积分数条件, $\text{BiCl}_3\text{-AlCl}_3$ 溶液中 $\text{Bi}^{3+}\text{-Al}^{3+}$ 的浓度不变,分别为 0.4 mol/L, 1.2 mol/L, 以保持预制棒中相同的 Bi-Al 掺杂摩尔分数。预制棒工艺条件:样品 1, 2, 3 的氧气体积分数相同,但组成中锗摩尔分数依次降低,分别为 2.13%, 1.35% 和 0.6%;样品 4, 5, 6 的组成相同,氧气体积分数依次减少,分别为 33%, 20% 和 17%。

采用预制棒综合分析仪(美国 Photon Kinetics 公司的 PK2600 型)测量折射率分布。预制棒切割为 1 cm 厚度的切片,两面抛光用于光学测试。预制棒切片的近红外荧光光谱测试采用荧光光谱仪(Zolix Corp 公司的 SBP300 型),以 InGaAs 作为探测器(850~1700 nm), 808 nm 和 532 nm 激光器作为激发光源。其透射光谱采用光谱仪(Ocean Optics 公司的 QE-65000 型), 5W 氙灯为光源。采用常规的拉丝设备(石墨炉, Ar 气氛)拉制光纤,光纤的芯层和包层直径分别控制在 10 μm 和 125 μm , 以便于光学测试。光纤样品的透射光谱采用光谱仪(Ando 公司的 AQ6315A 型),其近红外荧光光谱采用光谱仪(Agilent 公司的 8163B 型), 808 nm 和 976 nm 激发光源为激光二极管光源。

3 结果与讨论

图 1 为一组相同氧气体积分数条件下掺铋预制棒的折射率分布曲线,由于样品 1, 2, 3 芯层锗的掺杂摩尔分数逐渐降低,芯层折射率呈下降的变化。

图 2 为相应预制棒切片 350~1100 nm 的透射光谱。为了便于比较,对 3 个样品在 1100 nm 处的吸收谱强度进行了归一化处理。从图中看出,从可见光到近红外区,样品的透射谱线存在 3 个主要的吸收带,具有以下特征:3 个样品在 540 和 680 nm 波段有吸收带;与样品 1 和样品 3 相比,样品 2 在 680 nm 波段的吸收更强,在 400~600 nm 波段吸收不仅增强而且变宽。此外,与样品 2,样品 3 曲线特征明显不同的是,在 750~850 nm 波段范围,样品 1 出现一个弱吸收带的特征(用竖立箭头标注)。这 3 个吸收带与文献[30,31]中铋掺杂玻璃材料位于 500,700 和 800 nm 附近的特征吸收相对应,可以归于铋激活离子对应的跃迁。铋离子掺杂玻璃的发光性质源于铋离子的 s-s 跃迁,其受铋离子的价态与周围环境的影响^[32,33]。从三者相对强度的变化可以推测起源于不同状态的铋。制备工艺中样品 1,2,3 样品的氧气体积分数相同,但组成中锆含量依次降低,其主要对铋离子的周围环境产生影响,导致吸收峰位与强度随锆含量不同而改变。从变化趋势推测可能 540,680 和 780 nm 的吸收分别基于 Ge(Si)-O-Bi-O-Si(Bi), Ge(Si)-O-Bi-O-Si 和 Ge-O-Bi-O-Ge 等不同网络组团中 Bi 的吸收。具体还需要进一步探讨。

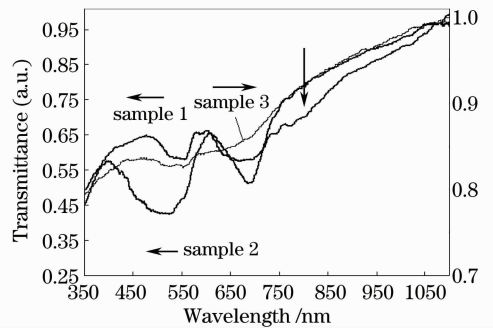


图 2 样品 1,2,3 的透射光谱

Fig. 2 Transmittance spectra of samples 1,2,3 preforms

图 3(a)是样品 1,2,3 掺铋预制棒切片 808 nm 光激发下的荧光谱线,表明样品具有近红外发光,随着掺锆摩尔分数降低,发光强度从样品 1 到样品 3 依次减弱,且发光中心波长产生蓝移,说明锆的掺杂浓度对该发光特性有影响。其中样品 1 近红外发光的中心波长为 1294 nm,半峰全宽为 274 nm。图 3(b),(c)是相同锆的掺杂摩尔分数,不同氧气体积分数条件下预制棒切片样品在 532 nm 和 976 nm 激发下的荧光光谱,在 1100 nm 波段观测到近红外发光。由于制备样品 4,5,6 的氧气体积分数逐渐降低,如图 3(b)所示,中心波长出现蓝移,实验中也观测到发光强度从样品 4 到样品 6 呈增强的趋势,表明该发光特性受氧气体积分数影响。该组样品在 808 nm 光激发下没有观测到近红外发光。比较两组实验测量结果,表明预制棒发光特性与锆的摩尔分数与氧气体积分数均有关,提高锆的摩尔分数有利于 1300 nm 波段的近红外发光,降低氧气体积分数有利于 1100 nm 波段的近红外发光。受实验条件的局限,上述发光特性及变化的机理尚不清楚,但是可以推断,在所得的样品中铋离子形成了至少两种类型的近红外发光中心,分别对应 1100 nm 和 1300 nm 波段的近红外发光,从氧气体积分数和锆摩尔分数对发光特性的影

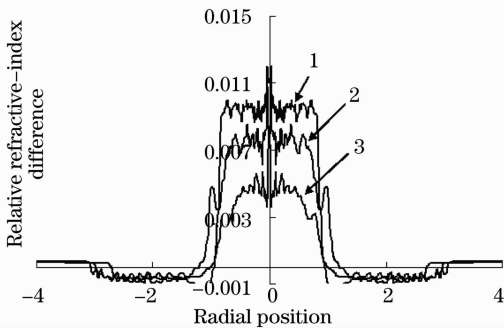


图 1 预制棒折射率分布图

Fig. 1 Refractive index profile of fabricated preforms

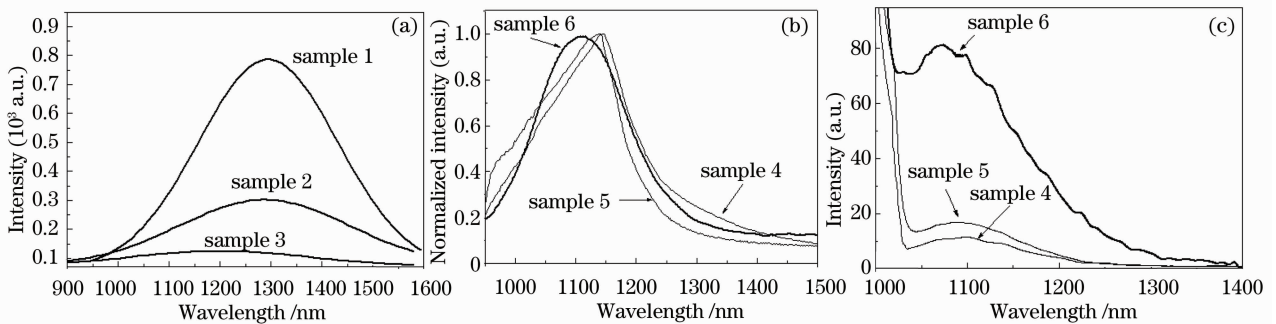


图 3 预制棒切片的发光谱线。(a)样品 1,2,3 在 808 nm 激发下,(b)样品 4,5,6 在 532 nm 激发下,(c)样品 4,5,6 在 976 nm 激发下
Fig. 3 Luminescence spectra of preforms of (a) samples 1,2,3 excited at 808 nm, (b) sample 4,5,6 excited at 532 nm, (c) sample 4,5,6 excited at 976 nm

响分析,推测 1100 nm 波段荧光可能与第二配位层为 $\text{Si}(\text{Al})(\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Si}, \text{Al}]\})$ 有关,1300 nm 波段荧光与第二配位层为 $\text{Ge}(\text{Al})(\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Ge}, \text{Al}]\})$ 位置相关。

基于上述实验结果,适当减少样品 1 的氧气体积分数条件,制备了样品 7 预制棒。图 4 是样品 7 预制棒所拉制光纤的透射谱线。光纤存在 4 个明显的吸收峰 1,2,3,4 和 1 个弱吸收带 5,分别位于 460,520,600,680 nm 和 800~900 nm 波段,其中吸收峰 2 和 3 可与图 2 中样品 1 预制棒切片的 520 和 680 nm 吸收峰对应,弱吸收带 5 与样品 1 的 750~850 nm 波段的弱吸收特征对应。

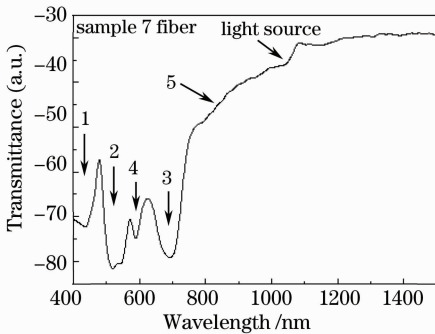


图 4 样品 7 光纤的透射光谱

Fig. 4 Transmittance spectra of sample 7 fiber

测量了样品 7 预制棒切片与光纤在 808,532 和 976nm 光激发下的荧光光谱。如图 5 所示,样品 7 切片在 808 nm 和 532 nm 光激发下分别具有中心波长为 1281 nm,半峰全宽为 250 nm[图 5(a)],中心波长为 1146 nm,半峰全宽为 204 nm[图 5(c)]的近红外发光。在 808 nm 光激发下,样品 7 光纤具有中心波长为 1265 nm,半峰全宽为 218 nm 近红外发光[图 5(b)]。在 976 nm 光激发下,样品 7 光纤具有中心波长为 1125 nm,带侧翼的超宽带发光,半峰全宽达 460 nm[图 5(c)]。在抽运光功率相同时,实验观测到 1265 nm 波长的发光明显较强。从测量结果推断,在样品 7 光纤中铋离子至少共存 $\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Si}, \text{Al}]\}$ 和 $\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Ge}, \text{Al}]\}$ 两类发光位置,其中以 $\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Ge}, \text{Al}]\}$ 发光位置占优势,所以 1300 nm 波段发光较强。在 976nm 激发下,可能 $\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Si}, \text{Al}]\}$ 将能量传递到 $\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Ge}, \text{Al}]\}$ 位,另外可能 976 nm 也激发 $\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Ge}, \text{Al}]\}$ 位发光,荧光谱线出现宽的侧翼峰[图 5(c)],形成半峰全宽达 460 nm 的超宽带发光。可见,若选择合适的抽运光对 $\{\text{Bi}[\text{O}, \text{Ge}, \text{Al}]\}$ 位抽运,样品 7 光纤有望成为一种优异的 1300 nm 波段的放大器与调谐激光器材料。

实验结果表明,光纤与预制棒的发光有些不同,在 808 nm 光激发下,光纤的近红外发光中心波长有些许蓝移;在 976 nm 激发下,光纤中观察到超宽带的近红外发光,而预制棒中没有这样的发光。可以认为光纤拉制过程中 Bi 的价态或配位环境产生了变化。因此通过控制光纤预制棒制备工艺,如氧气体积分数,掺铋摩尔分数等,形成有利于实现不同波段的近红外发光的铋的价态和配位状态的控制。如对于 1100 nm 波段,光纤适宜采用低铋掺杂摩尔分数与在低氧气体积分数条件下制备;对于 1300 nm 及更长波段的应用,光纤适宜增加铋掺杂摩尔分数与高氧气体积分数条件下制备,以满足实际使用的要求。

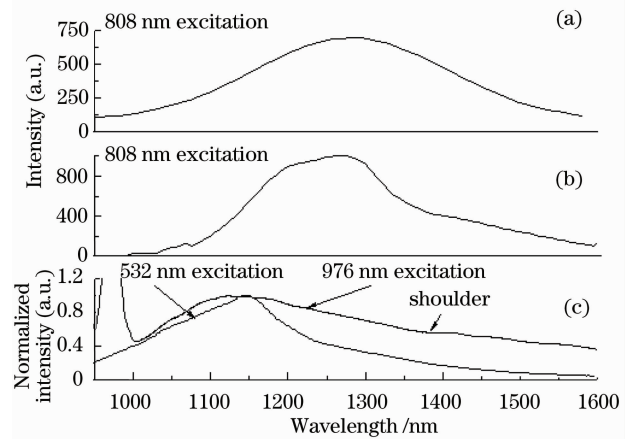


图 5 样品 7 的发光谱线。(a)预制棒在 808 nm 激发下,(b)光纤在 808 nm 激发下($L=45$ cm),(c)光纤在 976 nm 激发下($L=45$ cm),预制棒在 532 nm 激发下
Fig. 5 Spectra of luminescence from sample 7. (a) Preform excited at 808 nm, (b) fiber ($L=45$ cm) excited at 808 nm, (c) fiber ($L=45$ cm) excited at 976 nm, preform excited at 532 nm

4 结 论

采用改进的化学汽相沉积与溶液掺杂结合的方法制备了掺铋 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$ 光纤预制棒,并研究了不同掺铋摩尔分数与氧气体积分数条件下预制棒的光谱。选择适当的铋摩尔分数与氧气体积分数,掺铋预制棒切片在 532 nm 和 808 nm 光激发下,分别获得了具有中心波长为 1146 nm,半峰全宽为 204 nm 与中心波长为 1281 nm,半峰全宽为 250 nm 的近红外发光谱。相应所拉制光纤在 808 nm 光激发下,具有中心波长为 1265 nm,半峰全宽为 218 nm 的近红外发光,在 976 nm 光激发下具有中心波长为 1125 nm,半峰全宽为 460 nm 的超宽带发光。光纤与预制棒的发光存在差异,通过控制预制棒制备工艺可

以使 Bi 的发光满足实用的需要。

参 考 文 献

- 1 Y. Fujimoto, M. Nakatsuka. Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(3B): 279~281
- 2 Y. Fujimoto, M. Nakatsuka. Optical amplification in bismuth-doped silica glass [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(19): 3325~3326
- 3 M. Peng, J. Qiu, D. Chen *et al.*. Bismuth- and aluminum-codoped germanium oxide glasses for super-broadband optical amplification [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(17): 1998~2000
- 4 M. Peng, X. Meng, J. Qiu *et al.*. $\text{GeO}_2 \cdot \text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{M}$ (M=Ga, B) glasses with super-wide infrared luminescence [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2005, **403**(4-6): 410~414
- 5 X. Meng, J. Qiu, M. Peng *et al.*. Near infrared broadband emission of bismuth-doped aluminophosphate glass [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(5): 1628~1634
- 6 B. Denker, B. Galagan, V. Osiko *et al.*. Luminescence properties of Bi-doped boro-alumino-phosphate glasses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **87**(1): 135~137
- 7 B. Denker, B. Galagan, V. Osiko *et al.*. Absorption and emission properties of Bi-doped Mg-Al-Si oxide glass system [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **95**(4): 801~805
- 8 Q. Qian, Q. Y. Zhang, G. F. Yang *et al.*. Enhanced broadband near-infrared emission from Bi-doped glasses by codoping with metal oxides [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104**(4): 043518
- 9 J. Ren, L. Yang, J. Qiu *et al.*. Effect of various alkaline-earth metal oxides on the broadband infrared luminescence from bismuth-doped silicate glasses [J]. *Solid State Communications*, 2006, **140**(1): 38~41
- 10 M. Peng, J. Qiu, D. Chen *et al.*. Super-broadband 1310 nm emission from bismuth and tantalum codoped germanium oxide glasses [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2433~2435
- 11 J. Ren, J. Qiu, D. Chen *et al.*. Infrared luminescence properties of bismuth-doped barium silicate glasses [J]. *J. Mater. Res.*, 2007, **22**(7): 1954~1958
- 12 X. Meng, J. Qiu, M. Peng *et al.*. Infrared broadband emission of bismuth-doped barium-aluminum-borate glasses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(5): 1635~1642
- 13 M. Peng, C. Wang, D. Chen *et al.*. Investigations on bismuth and aluminum co-doped germanium oxide glasses for ultra-broadband optical amplification [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2005, **351**(30-32): 2388~2393
- 14 M. Peng, J. Qiu, D. Chen *et al.*. Broadband infrared luminescence from $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ glasses doped with Bi_2O_3 [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6892~6898
- 15 V. V. Dvoyrin, V. M. Mashinsky, E. M. Dianov *et al.*. Absorption, fluorescence and optical amplification in MCVD Bismuth-doped silica glass optical fibers [C]. Proc. 31st ECOC, 2005, **4**: 949~950
- 16 E. M. Dianov, V. V. Dvoyrin, V. M. Mashinsky *et al.*. CW bismuth fibers laser [J]. *Quant. Electron.*, 2005, **35**(12): 1083~1084
- 17 Y.-S. Seo, Y. Fujimoto, M. Nakatsuka. Optical amplification in the 1300 nm telecommunications window in a Bi-doped silica fiber [C]. CLEO/QELS and PhAST, 2006, CTu16
- 18 V. V. Dvoyrin, V. M. Mashinsky, E. M. Dianov *et al.*. Bi-doped silica fibers: a new active medium for tunable fiber lasers and broadband fiber amplifiers [C]. OFC/NFOEC, 2006, OTuH4
- 19 E. M. Dianov, S. V. Firstov, V. F. Khopin *et al.*. Bi-doped fiber lasers and amplifiers emitting in a spectral region of 1.3 μm [J]. *Quant. Electron.*, 2008, **38**(7): 615~617
- 20 Igor A. Bufetov, Sergey V. Firstov, Vladimir F. Khopin *et al.*. Bi-doped fiber lasers and amplifiers for a spectral region of 1300~1470 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(19): 2227~2229
- 21 V. V. Dvoyrin, O. I. Medvedkov, V. M. Mashinsky *et al.*. Optical amplification in 1430~1495 nm range and laser action in Bi-doped fibers [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 16971~16976
- 22 E. M. Dianov, S. V. Firstov, O. I. Medvedkov *et al.*. Luminescence and laser generation in Bi-doped fibers in a spectral region of 1300~1520 nm [C]. OSA/OFC/NFOEC, 2009, OWT3
- 23 A. A. Umnikov, A. N. Guryanov, A. N. Abramov *et al.*. Al-free core composition bismuth-doped optical fibre with luminescence band at 1300 nm [C]. ECOC 2008, 2, 17~18
- 24 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
冯高峰, 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
- 25 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
- 26 Peng Jian, Liu Lisong, Fu Yongjun *et al.*. Fabrication and characteristics of $\text{Bi}^{3+}-\text{Ga}^{3+}-\text{Al}^{3+}$ Codoped 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
- 27 V. Soklov, V. Plotnichenko, E. Dianov. Origin of broadband near-infrared luminescence in bismuth-doped glasses [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(13): 1488~1490
- 28 I. Razdobreev, L. Bigot, V. Pureur *et al.*. Efficient all-fiber bismuth doped laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(3): 031103
- 29 V. G. Truong, L. Bigot, A. Lerouge *et al.*. Study of thermal stability and luminescence quenching properties of bismuth-doped silicate glasses for fiber laser applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(4): 041908
- 30 M. Peng, J. Qiu, D. Chen *et al.*. Bismuth-doped optical glasses with super-broadband near infrared luminescence [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(12): 16~17
彭明营, 邱建荣, 陈丹平等. 具有超宽带近红外发光的铋激活光子玻璃 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(12): 16~17
- 31 M. Peng, W. Chen, J. Qiu *et al.*. Novel Bismuth-doped luminescent materials for super-broadband fiber amplifiers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(12): 41~45
彭明营, 汪晨, 邱建荣等. 超宽带光纤放大器用的新型铋发光材料 [J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(12): 41~45
- 32 S. Zhou, J. Ruan, J. Qiu. Infrared luminescence mechanism of Bismuth-doped glasses and broadband optical amplification [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(2): 36
周时风, 阮健, 邱建荣. 铋掺杂玻璃的红外发光机理和宽带光放大 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(2): 36
- 33 S. Zhou, J. Ruan, J. Qiu. Novel Bismuth-doped glasses with super-broadband optical amplification [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(2): 29
周时风, 邱建荣. 新型铋掺杂玻璃的超宽带光放大 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(2): 29