

文章编号: 0258-7025(2010)11-2879-06

铋镓铝共掺的高浓度掺铒石英基光纤的研制及其特性

彭 健 刘利松 傅永军 魏 淮 郑 凯 简水生

(北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 高浓度的掺铒光纤在光传输以及光纤相关器件中都发挥着重要的作用。结合改进化学气相沉淀法(MCVD)的特点,采用“在线”溶液掺杂法制备预制棒,并对采用改进的石墨炉加热的 MCVD 法制备铋镓铝共掺的掺铒石英基光纤预制棒的工艺进行了讨论。特别探讨了疏松层沉积温度的重要性以及铋元素的作用机理,并给出了最佳沉积温度为 1560 °C~1600 °C。利用仪器对制得的光纤进行了测试,给出了光纤的吸收谱、光纤预制棒芯子的扫描电子显微镜(SEM)图像以及用电子探针显微分析仪(EPMA)测得的光纤中各物质的含量,其中在 1530 nm 处得到的最高吸收系数为近 60 dB/m,并利用光纤吸收谱估算得出铒离子浓度约为 $3.84 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。

关键词 光纤光学;掺铒光纤;高浓度;石英基光纤;沉积温度

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2879

Fabrication and Characteristics of Bi^{3+} - Ga^{3+} - Al^{3+} Codoped High Concentration Er^{3+} -Doped Silica-Based Fiber

Peng Jian Liu Lisong Fu Yongjun Wei Huai Zheng Kai Jian Shuisheng

(Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract High-concentration erbium-doped fiber plays a very important role in optical transmission and related devices based optical-fiber. On the grounds of characteristic of modified MCVD technique, the preforms were manufactured by "online" solution doping technique. The fabrication process of Er^{3+} - Bi^{3+} - Ga^{3+} - Al^{3+} codoped fiber by using modified furnace round heating MCVD was discussed. Especially, the depositing temperature of porous core layer was very significant, the best value was 1560 °C ~ 1600 °C. The action mechanism of bismuth was also discussed. The effect of increasing concentration of Er^{3+} by codoped Bi^{3+} , Ga^{3+} and Al^{3+} was analyzed. The core areas performances were detected by scanning electron microscope (SEM) and the mole ratio of different ingredients of fabricated fibers were measured by electro-probe micro analyzer (EPMA). The highest absorption coefficient at 1530 nm was about 60 dB/m. The concentration of Er^{3+} in the fiber was about $3.84 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$.

Key words fiber optics; erbium-doped fiber; high concentration; silica-based fiber; depositing temperature

1 引 言

近年来,高浓度掺铒光纤放大器(EDFA)和激光器得到了广泛的关注,与传统的低浓度掺铒光纤放大器和激光器相比,高浓度 EDFA 可以大大缩短 EFPA 的长度,降低 EDFA 的成本。对于纯石英基

掺铒光纤来说,由于玻璃网络结构对于铒离子来说很致密,铒离子很难均匀进入石英玻璃网络,纯石英基光纤中的铒离子浓度很难提高。当石英玻璃中的铒离子摩尔分数超过 5×10^{-4} 时就会产生团簇现象,从而导致铒离子的浓度猝灭,因此必须改变石英

收稿日期: 2010-01-12; 收到修改稿日期: 2010-04-30

基金项目: 国家 863 计划(2008AA01Z215)、国家自然科学基金重点项目(60837002)和国家自然科学基金(60807013)资助课题。

作者简介: 彭 健(1982—),男,博士研究生,主要从事特种掺杂光纤制作和应用等方面的研究。

E-mail: pengjian@live.com

导师简介: 简水生(1929—),男,中国科学院院士,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: shuishengjian@bjtu.edu.cn

玻璃网络的结构来提高铟离子的掺杂浓度。

降低铟离子团簇率是高浓度掺铟光纤制作的难点,也一直是人们的研究热点。通过选择合适的基质材料可以实现低团簇率的高浓度铟离子掺杂。常见的几种基质材料有磷酸盐玻璃^[1,2]、氟化物玻璃^[3]、亚碲酸盐玻璃^[4]、碲酸盐玻璃^[5,6]、铋基玻璃^[7,8]等。但在光纤通信系统中,上述基质的掺铟光纤由于与石英光纤熔接困难等原因难以应用于实际,而石英基掺铟光纤具有与传统光纤兼容性好、熔接损耗小、耐热性好等优点。掺铝对 EDFA 的增益谱平坦和展宽具有明显的作用,同时对提高光纤中的铟离子浓度有很大作用。随着铋掺杂浓度提高,光纤预制棒纤芯容易出现析晶现象,这样会大大提高掺铟光纤的背景损耗,降低掺铟光纤的性能。本文通过实验研究发现,掺入适量的镓可以有效地抑制析晶现象,并研制出了铋镓铝共掺的高浓度掺铟光纤。

2 光纤的制备

2.1 光纤的制备步骤

采用化学气相沉积法(MCVD)工艺以及溶液掺杂法制备高浓度掺铟石英基光纤。具体过程简述如下^[9,10]:

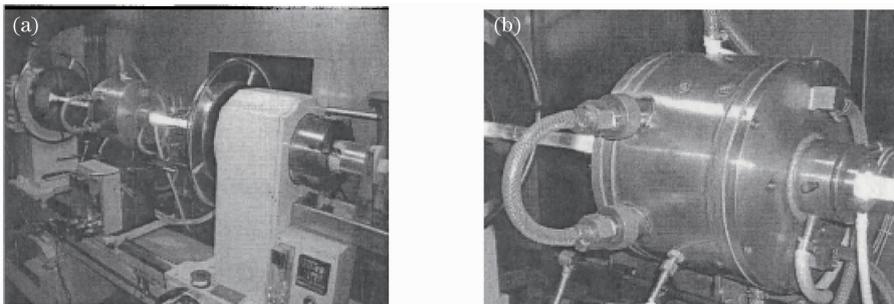


图 1 (a)改进的 MCVD 车床, (b)石墨电炉

Fig. 1 (a) Modified MCVD lathe, (b) graphite electric furnace

首先将规格为长 40 mm 的 Hearsaus 管(内径 15 mm,外径 18 mm)两段接上合适长度的普通石英玻璃管作为实验管。然后将实验管通过氢氟酸泡洗、去离子水冲洗以及高纯氮吹干等清洁步骤后架到 MCVD 车床上,在 1700 °C 左右下通入氧气对 Hearsaus 管的内壁进行抛光处理。之后沉积两到三层纯硅阻挡层,阻挡层的作用是防止 Hearsaus 管壁的杂质如氢氧根离子向纤芯方向的扩散而导致光纤的损耗变大,并且通常阻挡层的损耗比 Hearsaus 管要小。在沉积过阻挡层后,按照设定的参数沉积疏松芯层。沉积过程中,石墨炉运动的方向与通入

1)用 MCVD 工艺制作光纤的内包层;

2)低温沉积疏松芯层。疏松芯层必须在适应的温度下沉积;

3)将疏松层浸泡在事先配制好的稀土离子溶液中一段时间,使稀土离子均匀地吸附在疏松芯层上;

4)脱水以及熔化疏松芯层。在适应的温度下通入高纯氯气、氧气的混合气体对预制棒进行干燥脱水处理,并升温使疏松芯层熔化至透明;

5)将温度升至 2000 °C 以上,经过两到三遍的缩棒过程使得石英管缩至成预制棒;

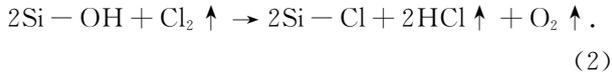
6)预制棒加工处理和拉丝。对通过以上步骤制得的预制棒进行套棒处理,使之满足设计的芯包比的尺寸要求。最后将处理后的预制棒拉制成光纤。

2.2 具体实验操作

实验中所用到的自行设计的车床如图 1(a)所示,与传统的 MCVD 车床不同的是采用了石墨炉加热,见图 1(b)。相较于氢氧火炬,石墨炉加热有利于提高光纤预制棒的纵向均匀性,并且可以通过调节加在石墨发热体上的功率来精确控制石墨炉的温度,这在对温度精度要求较高的疏松层沉积过程优势尤为明显。升温时为了保持发热体的稳定性,要缓慢均匀升温,从 0 °C 到 1600 °C 大约需要 20 min。

气流的方向始终相同。接下来就是最关键的溶液掺杂过程,在此使用“在线”溶液掺杂法,即在 MCVD 沉积完包层和疏松层后,采用加料装置从尾管将含有掺杂物离子的溶液加入到沉积用石英管内浸泡疏松层,一段时间后移去残留溶液。该掺杂方法具有操作简单、易于掌握;使用的母溶液少,节省成本——以前实验中使用传统的溶液浸泡法需要 50 mL 以上的溶液,而现在只需要约 10 mL;最重要的是免去了传统掺杂法中需要截断尾管以及重新烧结尾管的工序,避免了过程中引进杂质的可能。其后的重要步骤是除水,目的是尽量降低残留在石英

管中的羟基。除水分为两步,首先在低温 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下只通氧气进行物理除水,该过程可以加速疏松层的干燥,然后在 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右通入氯气、氧气和氦气进行除水,氦气因分子小利于将热量均匀地带入疏松层体内,氯气则与水 and 羟基发生如下反应^[11]:



从而达到除水的目的,最后经过熔化、缩棒、套棒、拉丝等工艺制成掺杂光纤。

其中疏松芯层的沉积温度最为重要,因为其直接影响疏松芯层的致密度,也就影响着纤芯稀土离子的掺杂浓度。疏松芯层的沉积温度对光纤芯部掺铒浓度有很大影响,为了研究疏松芯层沉积温度对掺铒浓度的影响,进行了对比实验。

3 结果和分析

通过多次实验,发现铋离子、镓离子、铝离子以及铒离子之间有一个最佳浓度比,同时为了研究疏松芯层沉积温度对掺铒光纤性能的影响,在保证其他条件尽量不变的情况下,只改变疏松芯层的沉积温度来进行实验,再将所研制的光纤预制棒及相应的光纤进行测量,得到了疏松芯层的沉积温度与铒离子掺杂浓度的关系。

通过以上实验首先制得了四根掺铒光纤预制棒以及相应的光纤,分别称为 P1, P2, P3, P4 以及 H1, H2, H3 和 H4。使用 PK 公司的 PK2210 光纤分析系统分别测量了研制的四种石英基掺铒光纤的吸收谱,结果如图 2 所示。

在制作这四根预制棒的过程中除了沉积温度不一样,其他制备条件基本保持一致。沉积 H1, H2, H3 和 H4 各自疏松芯层时的温度分别为 $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$,

$1580\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由图 2 可明显得出相同的条件下,不同的沉积温度直接影响了制得的掺铒光纤的吸收性能,也即影响了铒的掺杂浓度。这是因为如果沉积温度比较适宜时,沉积到疏松层的二氧化硅颗粒就小,相应地也形成了更为疏松的空隙,因此可以吸收更多的溶液,有利于高浓度掺杂。而且这样的疏松层经过溶液浸泡等后续处理后,制作的预制棒掺杂分布也更均匀,纤芯包层界面上鲜有毛刺。如果沉积温度过高,沉积时的二氧化硅颗粒较大,会使疏松层部分玻璃化,小孔塌陷聚合而导致小孔尺寸分布变宽,这虽然有利于溶液浸泡和吸收,但是会引起预制棒芯区掺杂的不均匀性,甚至会出现析晶现象。如果疏松层沉积温度过低,则由于疏松层的微孔直径变得极小,并且 SiCl_4 和 GeCl_4 的反应率不够高,使得沉积的疏松层太薄,特别是靠近阻挡层的部分与阻挡层的附着性能变小^[12]。这一方面不利于溶液浸泡,另一方面极易使疏松层在脱水和透明化工艺过程中从阻挡层的内壁脱落。因此在疏松芯层的沉积过程中要尽可能地选择最佳温度,从而有效控制疏松层的致密度,使其保持良好的稀土离子掺杂均匀性并且避免析晶现象的发生。实验过程中通过对气流、石墨炉功率、车床转速以及车速的精准控制,尽可能地减小温度波动带来的影响,从而制作出高质量的疏松层。

为了更好地分析沉积疏松层的温度对其剖面结构以及掺杂溶液离子的影响,将缩棒后得到的四根预制棒的切片在电子显微镜(SEM)下做了观察,并用电子探针显微分析仪(EPMA)检测了光纤中各物质的含量,分别如图 3 和表 1 所示。图 3 中白色部分表示的是高折射率的纤芯区域,黑色部分是包层区域,并且它们的纤芯直径约为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。从图 3 可以看出, P2 的疏松层最好,因为沉积温度比较适应所以纤芯包层界面的“毛刺”较短不明显,且图形规则、均匀。这也是 H2 光纤吸收谱高的重要原因; P3 疏松层的“毛刺”也不多,但由于制作中的工艺问题导致其界面不均匀。H3 光纤的吸收谱也是相对较高的;对于 P1 和 P4 的预制棒横截面,可以看出纤芯包层界面的“毛刺”比较明显,从而影响了对掺杂溶液的浸泡和吸收,因此它们相对应光纤的吸收谱也较低。同样从表 1 可知, H2 光纤中铒离子的含量最高, H3 光纤次之,这从另一个方面说明了在同样条件的情况下,疏松层沉积温度对最后制成的掺铒光纤的吸收特性有着重要的影响。注意到铋离子和镓离子的含量在最后制得光纤中的含量非常低

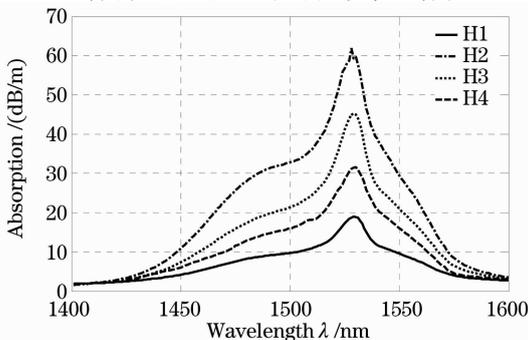


图 2 四种掺铒光纤的吸收谱

Fig. 2 Absorption spectrum of four EDFs

(铍离子几乎不存在),这是因为掺杂物氯化铍和氯化镓的沸点分别为 447 °C 和 201 °C,它们在高温氯

气除水后基本都挥发掉了。

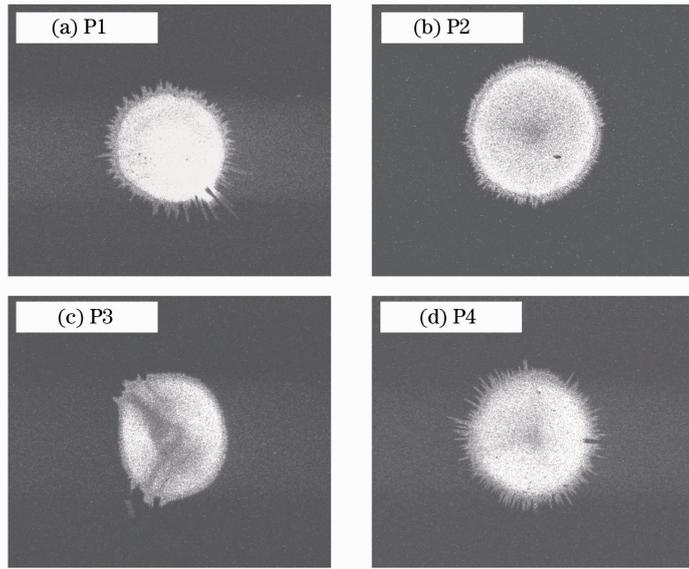


图 3 四根预制棒的横截面图

Fig. 3 Cross sections of the four preforms

表 1 铍镓铝共掺的掺铒石英基光纤中各元素的摩尔分数

Table 1 Mole ratios of Al, Ga, Bi, Ge and Er in

Er³⁺-Bi³⁺-Ga³⁺-Al³⁺ co-doped silica fiber

	Al/%	Ga/%	Bi/%	Er/%	Ge/%
H1	5.58	0.00	0.06	0.72	1.55
H2	5.37	0.00	0.37	2.25	1.42
H3	5.16	0.00	0.35	1.78	0.78
H4	4.37	0.00	0.00	1.12	1.02

实际操作过程中,通过多次制作铍镓铝共掺的掺铒光纤,并比对分析每次测试的数据,得到了掺铒光纤在 1530 nm 处的吸收系数与沉积温度的关系,如图 4 所示。从图中可以看出,当疏松层温度低于 1300 °C 时,疏松层与阻挡层内壁附着力较差,容易在后续的工艺中脱落;当疏松层温度高于 1800 °C

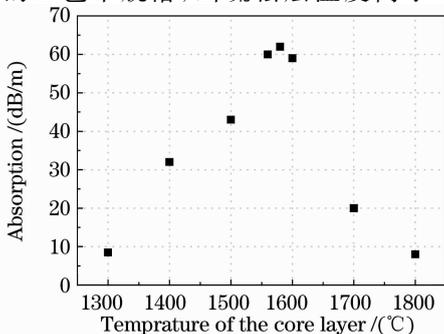


图 4 1530nm 处的吸收系数随疏松层温度变化的关系

Fig. 4 Relationship between absorption coefficient at 1530 nm and the deposition temperature of porous core layer

时,容易产生析晶现象。对于给定的掺杂溶液离子浓度,疏松层沉积温度在 1560 °C ~ 1600 °C 范围内时制作出的铍镓铝共掺的掺铒石英基光纤在 1530 nm 波长处的吸收系数均超过了 50 dB/m,且具有较好的重复性,因此确定 1560 °C ~ 1600 °C 是制作疏松层的最佳温度。

通过光吸收系数 α 和铒离子吸收截面 σ ,重叠积分因子 Γ 和总铒离子浓度 N_0 的关系式来估算总的铒离子浓度^[13]

$$\alpha(\lambda) = \sigma(\lambda)\Gamma(\lambda)N_0, \quad (3)$$

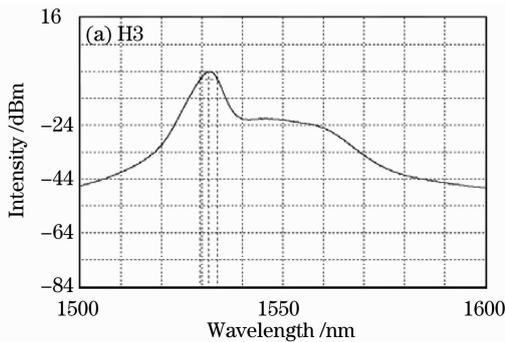
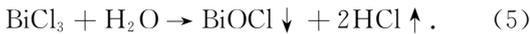
且有

$$\alpha(1/\text{m}) = \frac{\alpha(\text{dB}/\text{m})}{4.343}. \quad (4)$$

从图 2 读得 H2 光纤 1550 nm 处的吸收系数是 30 dB/m,铒离子 1550 nm 处吸收截面值取 $3 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 。当掺铒区与纤芯重合时,重叠积分因子 $\Gamma(\lambda)$ 即为掺铒光纤(EDF)的功率限制因子,再根据单模光纤模式理论可计算得到 1550 nm 处的功率限制因子^[14],即掺铒光纤的重叠积分因子约为 0.6。最后计算得到最佳疏松层沉积温度下制得的光纤中铒离子浓度为 $3.84 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。

为了更好地说明掺铍有利于提高掺铒光纤中铒离子在光纤中的溶解度并有效地抑制了铒离子团簇,对比了此前在其他掺杂组分一样的情况下,没有掺铍制得的掺铒光纤与光纤 H3 各自的自发辐射(ASE)谱。实验装置如图 5 所示。实验中在保持抽

运功率一致的情况下,分别测试了各自在 C 波段的 ASE 谱线,如图 6 所示。从图中可以看出,虽然两者的 ASE 谱线形状基本一致,但是 H3 的峰值强度达到了 -4 dBm,而未掺铋的掺铒光纤仅为 -49 dBm,这也从侧面反映了加入铋以后对抑制铒离子团簇起到的作用。铋元素对抑制铒离子团簇的机理,有以下两个方面:第一,铋是一种重金属元素,一般认为在石英基玻璃中加入重金属氧化物,如 Bi_2O_3 ,因为 Bi-O 键的键强比 Si-O 键之间的键强弱得多,所以 Bi-O 键更容易被打开而产生非桥接氧,从而提高了铒离子的掺杂浓度^[15~17];第二,在疏松层浸泡溶液阶段,随着盐酸的挥发, BCl_3 就自然发生水解反应,生成 BiOCl :



由于 BiOCl 是不溶于水的沉淀物,且其在水中是粉末颗粒状,直径不超过 $2 \mu\text{m}$,与疏松层的平均空隙差不多是一个数量级。因此在原有疏松层表面离子吸附基础上,位于疏松层空隙内的 BiOCl 颗粒极大地增大了离子的吸附面积,从而大幅度提高了铒离子、铝离子的吸附量。一般情况下,掺杂溶液中铝离子的浓度是铒离子浓度的 20 倍以上,因此可以保证吸附在 BiOCl 粉末颗粒的铒离子能被铝离子所包围,从而降低光纤中铒离子的团簇率。

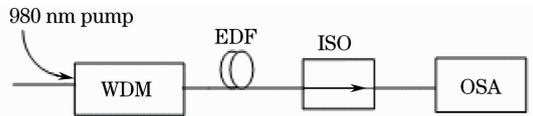


图 5 测试掺铒光纤 ASE 谱的装置

Fig. 5 Setup for measuring ASE spectra of EDF

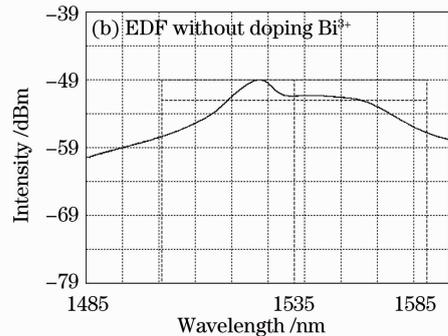


图 6 C 波段的 ASE 谱

Fig. 6 ASE spectrum of C waveband

4 结 论

利用改进的 MCVD 法并结合“在线”掺杂工艺制作了相同浓度配比下的铋镓铒铝共掺的掺铒石英基光纤。通过精准地控制疏松层沉积的温度,制作出了多根光纤预制棒。不管是光纤吸收谱的测量值、预制棒切片截面的 SEM 外观分析还是对相应光纤的 EPMA 成分测量的结果都表明,疏松层的沉积温度对制成光纤的吸收特性非常重要,并且给出最佳的沉积温度应在 $1560 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,在此范围内制作出的光纤在 1530 nm 波长处的吸收系数都在 50 dB/m 以上,且具有很好的重复性。估算得出了具有最高吸收系数的光纤中的铒离子浓度约为 $3.84 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。最后通过分别测试掺铋和未掺铋两种掺铒光纤的 ASE 谱,从侧面反映了铋元素的加入对提高铒离子的溶解度以及抑制铒离子团簇起到的作用,并从两个方面阐述了其中的机理。这种 BiGaErAl 共掺的石英基光纤在制作光纤放大器及光纤激光器方面有着良好的应用前景^[18,19]。

参 考 文 献

- 1 B. C. Hwang, S. Jiang, T. Luo *et al.*. Performance of high-concentration Er^{3+} -doped phosphate fiber amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3): 197~199
- 2 Dong Qinglei, Zhang Liyan, Hu Lili. Crystallization stability and spectral properties of Yb^{3+} -doped alkaline metal modified fluorophosphates glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2383~2387
董擎雷, 张丽艳, 胡丽丽. 碱金属氟化物对掺 Yb^{3+} 氟磷酸盐玻璃析晶稳定性和光谱性质的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2383~2387
- 3 S. H. Scott, Y. Akasaka, Y. Kubota *et al.*. Transient dynamics of fluoride-based high concentration erbium-cerium codoped fiber amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 425~427
- 4 A. Mori, K. Kobayashi, M. Yamada *et al.*. Low noise broadband tellurite-based Er^{3+} -doped fibre amplifiers [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(9): 887~888
- 5 Chen Bingyan, Liu Yuehui, Chen Dongdan *et al.*. Spectroscopic properties of new erbium-doped tellurite glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(5): 2374~2378
陈炳炎, 刘粤惠, 陈东丹等. 一种新型掺铒碲酸盐玻璃的光谱性质研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(5): 2374~2378
- 6 Zhou Yaxun, Wang Jun, Dai Shixun *et al.*. Effect of Yb^{3+} on infrared and upconversion emission of Er^{3+} -doped tellurite-based glasses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1688~1693

- 周亚训, 王 俊, 戴世勋等. Yb^{3+} 对掺铋碲酸盐玻璃红外和上转换发光的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1688~1693
- 7 Yang Jianhu, Dai Shixun, Wen Lei *et al.*. Spectroscopic properties and thermal stability of a new erbium-doped bismuth-based glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(2): 508~514
- 杨建虎, 戴世勋, 温 磊等. 掺铋碲酸盐玻璃的光谱性质和热稳定性研究[J]. 物理学报, 2003, **52**(2): 508~514
- 8 Zhou Yaxun, Gai Na, Chen Fen *et al.*. Comparative investigation on amplifying performance between 980 nm and 1480 nm pumped bismuth-based EDFA [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 558~563
- 周亚训, 盖 娜, 陈 芬等. 980 nm 和 1480 nm 抽运下铋基 EDFA 放大特性的比较研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 558~563
- 9 Guillaume G. Vienne, Julie E. Caplen, Liang Dong *et al.*. Fabrication and characterization of Yb^{3+} : Er^{3+} phosphosilicate fibers for lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(11): 1990~2001
- 10 Gao Yaming, Feng Guang, Liu Yongjian *et al.*. Manufacture of erbium-doped optical fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 515~519
- 高亚明, 冯 光, 刘永建等. 掺铒光纤的研制[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(3): 515~519
- 11 K. Chida, F. Hanawa, M. Nakahara. Fabrication of OH-free multimode fiber by vapor phase axial deposition[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(11): 1883~1889
- 12 Yi Yongqing, Tian Haisheng, Ning Ding. Study of the influence of the deposition temperature by using the MCVD technique on the rare earth ion concentration of active fiber [J]. *Optical Communication Technology*, 2007, **31**(1): 60~61
- 衣永青, 田海生, 宁 鼎. MCVD 工艺沉积温度对有源光纤掺杂浓度的影响研究[J]. 光通信技术, 2007, **31**(1): 60~61
- 13 C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~283
- 14 Chen Genxiang. The Basis of Lightwave Technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. 30~42
- 陈根祥. 光波技术基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. 30~42
- 15 S. Tanabe, N. Sugimoto, S. Ito *et al.*. Broad-band 1.5 μm emission of Er^{3+} ions in bismuth-based oxide glasses for potential WDM amplifier [J]. *Journal of Luminescence*, 2000, **87-89**: 670~672
- 16 H. Sotobayashi, J. T. Gopinath, E. P. Ippen. 23 cm long Bi_2O_3 -based EDFA for picosecond pulse amplification with 80 nm gain bandwidth[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(19): 1374~1375
- 17 H. Hayashi, N. Sugimoto, S. Tanabe. High-performance and wideband amplifier using bismuth-oxide-based EDF with cascade configurations[J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(3): 282~287
- 18 Ning Tigang, Pei Li, Hu Xudong *et al.*. Dual-wavelength of single polarized fiber laser based on common active fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1868~1871
- 宁提纲, 裴丽, 胡旭东等. 单偏振双波长非保偏有源掺杂光纤激光器[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1868~1871
- 19 Li Jian, Liu Peng, Wang Jing *et al.*. Experiment study on a tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1047~1050
- 李 坚, 刘 鹏, 王 静等. 以环行器和光纤光栅为腔镜的可调谐窄线宽激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1047~1050