

Er³⁺/Yb³⁺ 共掺杂芯-包异质型磷酸盐玻璃光纤赵昕¹ 张杰^{1,2} 陈敏¹ 林海^{1,2} 李长敏¹(¹大连工业大学无机非金属材料研究所, 辽宁 大连 116034)
²香港城市大学电子工程系, 香港 九龙 999077

摘要 通过高温熔融法制备了 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐纤芯玻璃, 设计并熔制了组分相异的纤包玻璃, 采用棒管法拉制 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺芯-包异质型磷酸盐玻璃光纤, 并对光纤开展增益测试。在 980 nm 波长的激光激发下, 当激发功率为 457.1 mW 时, 在 1535.7 nm 波长处获得 32.3 dB 的相对增益和 15.0 dB 的内增益, 光纤的内增益系数达 2.6 dB/cm。

关键词 光纤光学; 磷酸盐玻璃光纤; 芯-包异质; 光学增益; 钕镱共掺

中图分类号 TN913.7; TQ171; O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.050601

Er³⁺/Yb³⁺ Codoped Core-Cladding Heterogeneous Phosphate Glass FiberZhao Xin¹ Zhang Jie^{1,2} Chen Min¹ Lin Hai^{1,2} Li Changmin¹

¹*Institute of Inorganic Nonmetal Materials, Dalian Polytechnic University,
Dalian, Liaoning 116034, China*

²*Department of Electronic Engineering, City University of Hongkong, Giulong, Hongkong 999077, China*

Abstract Er³⁺/Yb³⁺ codoped phosphate glass is prepared using a high-temperature melting method. The cladding glass with different compositions has been designed and prepared, and the rod-in-tube technique is employed in fabricating Er³⁺/Yb³⁺ codoped core-cladding heterogeneous glass fiber. Under the excitation of 980 nm wavelength laser, when the pumping power increases to 457.1 mW, the relative and internal gains of the optical fiber are 32.3 and 15.0 dB at 1535.7 nm, and a maximum internal gain-coefficient of 2.6 dB/cm is achieved.

Key words fiber optics; phosphate glass fiber; core-cladding heterogeneity; optical gain; Er³⁺/Yb³⁺ codoping

OCIS codes 060.2390; 160.5690; 230.2285

1 引言

近年来, 掺铒光纤放大器(EDFA)已广泛应用于 C 波段(1530~1565 nm)光通信传输窗口的信号放大^[1~5]。在稀土掺杂玻璃光纤基质中, 磷酸盐玻璃通过分子网络连接成长的开放式结构, 使激活离子有较大的受激发射截面和较高的稀土离子溶解度, 引起人们极大的研究热情^[6~14]。对于掺铒磷酸盐玻璃光纤, 一定范围内增大 Er³⁺ 掺杂浓度可使增益系数提高, 采用 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺更可进一步提高抽运光的吸收和利用效率, 从而提高 EDFA 的光学净增益, 缩短光纤放大器长度^[15~28]。

在光纤的设计中, 数值孔径(NA)是衡量光纤传输光信号能力的重要参数, 大的 NA 值可以获得较高的光耦合效应, 较小的 NA 值有利于保证光信号以单模形式传输。广泛应用于光信号传输系统的康宁 SMF-28 单模光纤的数值孔径和光纤芯径分别是 0.14 和 9.0 μm, 这种设计有利于信号光的单模传输并降低传输损耗。相似的设计理念应用于特种光放大光纤中需要纤芯和纤包的相对折射率、软化温度和析晶趋势的相对匹配。通常情况下, 在纤芯玻璃中掺杂稀土元素即可调整光纤的相对折射率, 满足光信号的传输要求, 然而在特定情况下, 需采用芯-包异质型结构提升光纤设计的自由度, 从而有利于获得理想的 NA 值。

收稿日期: 2010-12-03; **收到修改稿日期**: 2010-12-11

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20041067)资助课题。

作者简介: 赵昕(1968—), 男, 副教授, 主要从事光电子材料与器件等方面的研究。E-mail: wjs@dlpu.edu.cn

本文设计并制备了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺芯-包异质型磷酸盐 (LBLAP) 玻璃光纤, 由于钡盐的加入可明显提高磷酸盐玻璃的折射率及光学品质, 因此通过添加适量的偏磷酸钡调整纤芯玻璃的折射率使光纤具备合适的 NA 值。通过对光纤的结构和增益性能的研究, 证实了芯-包异质型多组分玻璃光纤具备可操作性和实用性。

2 实 验

制备 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 芯-包异质型光纤的原料是高纯 LiPO_3 、 $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ 、 La_2O_3 、 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 、 P_2O_5 、 Er_2O_3 和 Yb_2O_3 , 纤芯和纤包玻璃的摩尔组分分别是 $12\text{Li}_2\text{O}-4\text{BaO}-2\text{La}_2\text{O}_3-16\text{Al}_2\text{O}_3-66\text{P}_2\text{O}_5$ (LBLAP) 和 $16\text{Li}_2\text{O}-2\text{La}_2\text{O}_3-16\text{Al}_2\text{O}_3-66\text{P}_2\text{O}_5$ (LLAP)。LBLAP 玻璃中 Er_2O_3 和 Yb_2O_3 掺杂量均为基质质量的 2%。按上述计量比称取适量药品置于 $1280\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温炉中熔化 3 h, 然后将熔融的玻璃倒在铝质模具上。玻璃成型后, 置于马弗炉中于 $480\text{ }^\circ\text{C}$ 退火 2 h, 之后随炉冷却至室温。将获得的玻璃样品粗磨后两面抛光以供测试用。测得 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 玻璃密度为 $2.81\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 推算出 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的离子数密度分别为 $1.702\times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 和 $1.652\times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 。

用 Metricon 2010 型棱镜耦合仪测得纤芯玻璃在 632.8 nm 和 1536 nm 波长处的折射率分别是 $n_{\text{core}-1}=1.53737$ 和 $n_{\text{core}-2}=1.52336$, 纤包玻璃在两个测试波长处的折射率分别是 $n_{\text{cladding}-1}=1.53174$ 和 $n_{\text{cladding}-2}=1.51762$ 。通过公式 $\Delta n = \frac{2(n_{\text{core}} - n_{\text{cladding}})}{n_{\text{core}} + n_{\text{cladding}}} \times 100\%$ 可知纤芯和纤包玻璃在 1536 nm 波长处的相对折射率为 0.37%。玻璃样品在其他任意波长的折射率可以通过柯西公式 $n = A + B/\lambda^2$ 计算, 其中 $A_{\text{core}} = 1.52050\text{ nm}^2$, $B_{\text{core}} = 6756.9\text{ nm}^2$, $A_{\text{cladding}} = 1.51473\text{ nm}^2$, $B_{\text{cladding}} = 6809.9\text{ nm}^2$ 。 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 和 LLAP 玻璃的热膨胀曲线和差热曲线分别由 PCY 高温卧式膨胀仪和 WCR-2D 型差热分析仪测得。

利用棒管法制备 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤的过程如图 1 所示。首先利用铝质模具浇铸外径为 15.1 mm 的 LLAP 玻璃圆棒, 用台式钻机配备直径为 4 mm 的玻璃开孔器对长度为 10 cm 的 LLAP 玻璃棒钻孔。将经过磨制的直径约 4 mm 的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 玻璃棒与钻孔后的 LLAP 玻璃棒套接, 然后安装在光纤拉丝塔内, 在 $560\text{ }^\circ\text{C} \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间内利用光纤拉丝机拉制成外径为 4 mm 的玻璃棒。为使纤芯和纤包玻璃的直径比达到单模光纤拉制的范围, 拉制后的细玻璃棒再次与经过钻孔的 LLAP 玻璃棒组装, 并置于光纤拉丝塔内在相同条件下进行二次拉丝, 制备出 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 玻璃光纤。

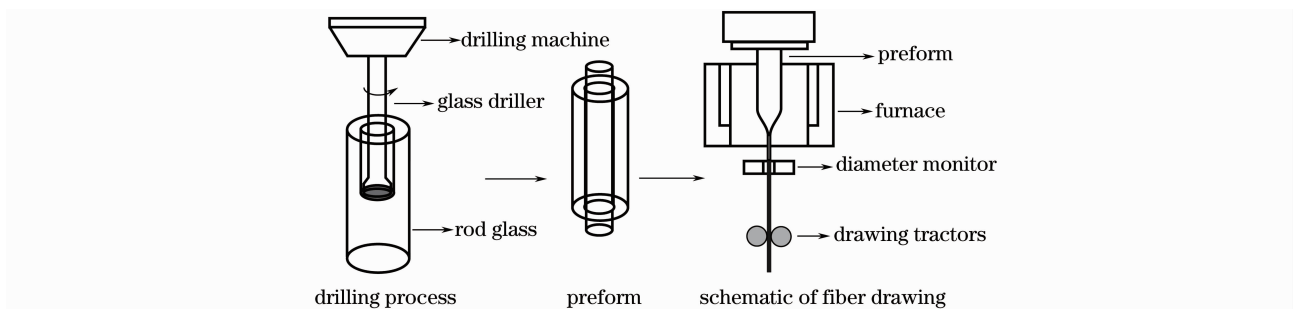


图 1 棒管法制备 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 玻璃光纤过程

Fig. 1 Schematic of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped LBLAP glass fiber preparation by rod-in-tube technique

利用 HP86140B 光谱分析仪 (OSA) 对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤进行增益测试, 带尾纤的单模 980 nm 激光器作为激发光源, HP8168F 可调谐激光器 (可调谐范围为 $1480 \sim 1590\text{ nm}$) 作为信号源, 通过 $980/1550\text{ nm}$ 波分复用耦合器对信号光和抽运光进行耦合。

3 结果与讨论

3.1 纤芯和纤包玻璃的热学性质

图 2 所示为当升温速率为 $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 时 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 和 LLAP 玻璃的差热曲线, 左上角插图为玻璃的热膨胀曲线。玻璃的转变温度 T_g , 软化温度 T_s 和析晶起始温度 T_x 分别标示于图中。通过膨胀

曲线得到 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 和 LLAP 玻璃在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的平均膨胀系数分别是 $7.32\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 和 $7.76\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。纤芯和纤包玻璃的 T_g 分别为 $522\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $516\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_s 分别为 $579\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $568\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明纤芯和纤包玻璃的转变温度和软化温度相匹配, 适合光纤拉制。 T_x 与 T_g 之差 (ΔT) 是常用的权衡玻璃热稳定性的指标, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 和 LLAP 玻璃的 ΔT 分别为 $228\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $151\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明纤芯与纤包玻璃均具有较宽的光纤拉制温度区域, 适用于棒管法制备光纤。

3.2 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤的结构性质参数

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤的数值孔径可表示为

$$d_{\text{NA}} = \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2}, \quad (1)$$

式中 n_{core} 和 n_{cladding} 分别是纤芯和纤包的折射率。在 $1.536\text{ }\mu\text{m}$ 波长处得到 NA 的值为 0.132。康宁 SMF-28 单模光纤的 NA 值为 0.14, 本文中 LBLAP 光纤的 NA 值与 SMF-28 光纤接近。对于单模光纤来说, NA 值表明光纤从光源收集光的能力, 较大的 NA 值可以提高传输光的耦合效应, 较小的 NA 值有利于光的单一模式传输, 所以合适的 NA 值有利于提高单模光纤的增益特性。康宁 SMF-28 光纤纤芯和纤包的外径分别为 $9.0\text{ }\mu\text{m}$ 和 $125\text{ }\mu\text{m}$, 通过 LBLAP 和康宁 SMF-28 光纤在显微镜照片中光纤尺寸比例可估算出 LBLAP 光纤的纤芯和纤包外径分别为 $9.9\text{ }\mu\text{m}$ 和 $141\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 3 是将 $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 波长激光耦合到 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤中, 在光纤输出端通过红外摄像机捕捉到的低亮度的近场模式图。由图可知, 光斑接近于圆形, 未观察到基模以外的低阶模式出现, 因此没有明显的实验证据支持 $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 信号光在 LBLAP 光纤中以多模形式传播。

3.3 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤的光学增益

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤的 OSA 光谱曲线如图 4 所示。曲线 1 为无抽运光下 1535.7 nm 波长信号光的光谱强度; 曲线 2 为信号光放大的自发辐射 (ASE) 光谱; 曲线 3 为 ASE 和功率为 457.1 mW 的 980 nm 激光抽运下测得的 1535.7 nm 信号光的强度。通过 OSA 曲线, 光纤的相对增益可以表示为

$$G_{\text{R}} = 10\lg[(P_{\text{Sig}(\text{pump on})} - P_{\text{ASE}})/P_{\text{Sig}(\text{pump off})}], \quad (2)$$

式中 $P_{\text{Sig}(\text{pump on})}$ 和 $P_{\text{Sig}(\text{pump off})}$ 分别是加载抽运光和无抽运光源两种情况下光纤输出端的信号功率, P_{ASE} 是放大的自发辐射功率。

图 5 为通过 (2) 式计算的光纤放大器在不同波长下的相对增益, 当激发功率 457.1 mW 时测得 5.8 cm 长的光纤在 1535.7 nm 波长处的相对增益为 32.3 dB 。 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤的内增益 G_{INT} 可以表示为^[29]

$$G_{\text{INT}} = G_{\text{R}} - \alpha_{\text{P}} - \alpha_{\text{A}}, \quad (3)$$

式中 G_{R} 为光纤的相对增益, α_{P} 和 α_{A} 分别为信号光的传输损耗和吸收损耗。利用截断法测得光纤在 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 波长处的传输损耗为 0.08 dB/cm , 该损耗值可近似看作光纤在 C 波段的传输损耗, 1535.7 nm 信号光波长下测得光纤的吸收损耗为 16.8 dB , 因而在此波长处 5.8 cm 长的光纤总损耗 (吸收损耗和传输损耗)

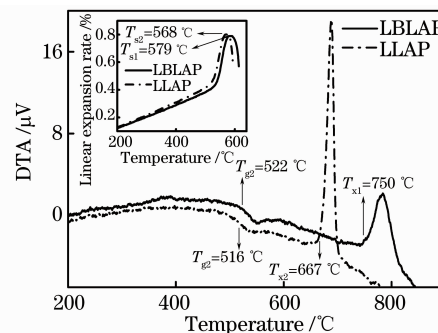


图 2 LBLAP 和 LLAP 玻璃的差热曲线和热膨胀曲线
Fig. 2 Differential thermal analysis traces and thermal expansion curves of LBLAP and LLAP glasses

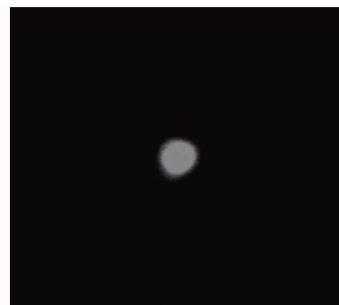


图 3 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 玻璃光纤的近场模式图
Fig. 3 Near-field mode patterns of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped LBLAP glass fiber

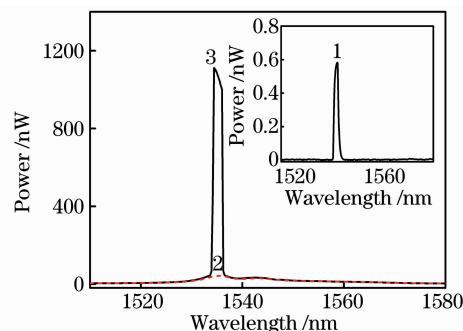


图 4 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 玻璃光纤的 OSA 曲线
Fig. 4 OSA curve of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped LBLAP glass fiber

为 17.3 dB。图 6 为通过(3)式得到的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤在 1505~1590 nm 波段的内增益,在 1535.7 nm 波长处光纤的最大内增益为 15.0 dB,其增益系数为 2.6 dB/cm,高于 Er^{3+} 掺杂的氟化物(ZBLAN)和铝硅酸盐玻璃光纤,与文献报道的磷酸盐玻璃光纤的增益系数接近^[30~32],表明 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺芯-包异质型光纤实现了信号光的有效放大。

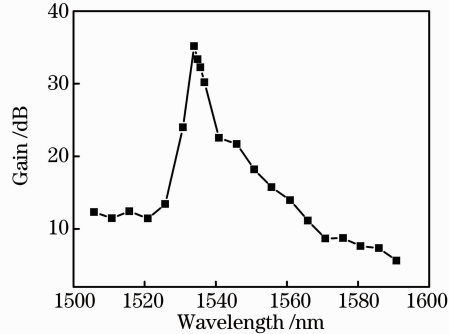


图 5 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 玻璃光纤在不同信号波长处的相对增益(激发功率为 457.1 mW, 光纤长度为 5.8 cm)

Fig. 5 Relative gain versus signal wavelength under 457.1 mW pump power in a 5.8 cm-long $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped LBLAP glass fiber

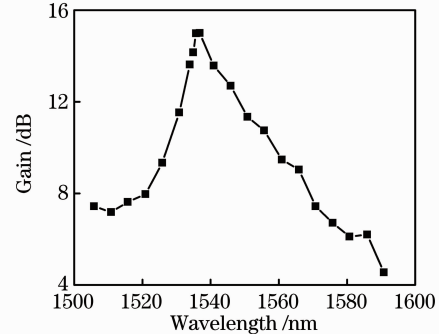


图 6 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 玻璃光纤在不同波长信号处的内增益(激发功率为 457.1 mW, 光纤长度为 5.8 cm)

Fig. 6 Internal gain versus signal wavelength under 457.1 mW pump power in a 5.8 cm long $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped LBLAP glass fiber

4 结 论

制备了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 纤芯玻璃和组分相异的 LLAP 纤包玻璃。热膨胀和差热曲线表明,所设计的纤芯和纤包玻璃的热学性质匹配,可应用于光纤的拉制。采用棒管法成功制备了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺芯-包异质型 LBLAP 玻璃光纤。在 457.1 mW 980 nm 激光的激发下,测得 5.8 cm 长的光纤在 1535.7 nm 波长处的相对增益和内增益分别是 32.3 和 15.0 dB。得到 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤的内增益系数为 2.6 dB/cm,高于 Er^{3+} 掺杂 ZBLAN、磷酸盐和铝硅酸盐玻璃光纤。结果表明, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 LBLAP 光纤放大器实现了 C 波段信号光的有效放大,这种芯-包异质型光纤的实用性尝试为高增益光学放大器的设计提供了更多的自由度。

参 考 文 献

- 1 L. Y. Zhang, N. K. Chen, L. L. Hu *et al.*. High Er^{3+} concentration low refractive index fluorophosphates glass for evanescent wave optical amplifiers[J]. *Physica B*, 2008, **403**(19-20): 3470~3472
- 2 H. Y. Meng, W. Q. Gao, Y. G. Liu *et al.*. The gain and noise figure improvement of reflection L-band erbium-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(1-3): 85~89
- 3 Zhang Xiangqin, Chen Baojiu, Sun Jiashi *et al.*. The composition dependence of spectroscopic properties of Er^{3+} in borate tellurite glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 870~874
张翔清, 陈宝玖, 孙佳石 等. 硼碲酸盐玻璃材料中 Er^{3+} 光谱性质对组分的依赖关系[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 870~874
- 4 H. P. Xia, J. L. Zhnag, J. H. Wang *et al.*. Optical spectroscopy of Er^{3+} and $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ glasses[J]. *J. Rare Earths*, 2006, **24**(4): 408~412
- 5 S. H. Xu, Z. M. Yang, Z. M. Feng *et al.*. Efficient fiber amplifier based on a highly $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped phosphate glass-fiber[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 047806
- 6 J. F. Li, K. L. Duan, Y. S. Wang *et al.*. Modeling and optimizing of high-concentration erbium-doped fiber amplifiers with consideration of ion-clusters[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**(1): 143~149
- 7 Q. H. Nie, L. J. Lu, T. F. Xu *et al.*. Effect of hydroxyl groups on Er^{3+} doped $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses[J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2007, **68**(4): 477~481
- 8 Zhao Shilong, Li Shunguang, Hu Lili *et al.*. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped phosphate glass laser end-pumped by laser diode[J].

- Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 228~229
- 9 X. S. Qiao, X. P. Fan, J. Wang *et al.*. Judd-Ofelt analysis and luminescence behavior of Er^{3+} ions in glass ceramics containing SrF_2 nanocrystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(7): 074302
- 10 Y. H. Liu, Y. J. Chen, Y. F. Lin *et al.*. Energy transfer in Er^{3+} - Yb^{3+} -codoped bismuth borate glasses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(5): 1046~1052
- 11 Zhang Yong, Ren Guozhong, Yang Qibin *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} -doped germanium bismuthate glass[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(5): 999~1002
张勇, 任国仲, 杨奇斌等. Er^{3+} 掺杂的锗铋酸盐玻璃光谱性质的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(5): 999~1002
- 12 Q. Qian, Y. Wang, Q. Y. Zhang *et al.*. Spectroscopic properties of Er^{3+} -doped $\text{Na}_2\text{O-Sb}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2008, **354**(18): 1981~1985
- 13 Sun Jiangting, Zhang Jiahua, Chen Baojiu *et al.*. Preparation and optical properties of Er^{3+} -doped gadolinium borosilicate glasses[J]. *J. the Chinese Rare Earth Society*, 2004, **22**(6): 832~836
孙江亭, 张家骅, 陈宝玖等. 新型掺铒钨硼硅酸盐玻璃的制备和光学性质的研究[J]. 中国稀土学报, 2004, **22**(6): 832~836
- 14 N. Da, Y. B. Qiao, L. Y. Yang *et al.*. High quantum efficiency and high concentration erbium-doped silica glasses fabricated by sintering nanoporous glasses[J]. *J. Rare Earths*, 2006, **24**(6): 761~764
- 15 Chen Haiyan, Dai Jizhi, Yang Yapei *et al.*. Gain and quantum conversion efficiency of Er^{3+} - Yb^{3+} codoped phosphate glass amplifier operating at large signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 351~355
陈海燕, 戴基智, 杨亚培等. Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃放大器的大信号增益与量子效率理论分析[J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 351~355
- 16 S. J. Liu, F. Song, H. Cai *et al.*. Investigation of the roundtrip cavity loss in laser diode pumped erbium: ytterbium-phosphate glass microchip lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(10): 103101
- 17 Zeng Bin, Guan Zhouguo, Lü Jingwen *et al.*. Study on the spectral properties of erbium ytterbium co-doped bismuth phosphate glass[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(4): 348~350
曾彬, 官周国, 吕景文等. 铒镱共掺铋磷酸盐玻璃光谱性能的研究[J]. 激光技术, 2007, **31**(4): 348~350
- 18 Zhou Yaxun, Wang Jun, Chen Fen *et al.*. Preparation and spectral properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ codoped bismuth-germanate glass and the fibers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(2): 208~211
周亚训, 王俊, 陈芬等. $\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ 共掺铋锗酸盐玻璃及其光纤的制备和光谱性质[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(2): 208~211
- 19 Y. H. Liu, Y. J. Chen, Y. F. Lin *et al.*. Effect of Bi_2O_3 on spectroscopic properties and energy transfer in Yb^{3+} - Er^{3+} -co-doped bismuth borate glasses for 1.5 μm optical amplifiers[J]. *Opt. Mater.*, 2008, **30**(12): 1883~1888
- 20 S. Q. Man, E. Y. B. Pun, P. S. Chung. Upconversion luminescence of Er^{3+} in alkali bismuth glass glasses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(4): 483~485
- 21 Chen Baojiu, Wang Haiyu, Qin Weipin *et al.*. Fluoride-oxide glass for high efficiency upconversion from IR to green[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, **20**(3): 257~259
陈宝玖, 王海宇, 秦伟平等. 高效的红外可见上转换氟氧化物玻璃材料[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, **20**(3): 257~259
- 22 Y. H. Wang, C. S. Ma, D. L. Li *et al.*. Effects of pumped styles on power conversion efficiency and gain characteristics of phosphate glass Er^{3+} - Yb^{3+} -co-doped waveguide amplifiers[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, **41**(5): 545~549
- 23 J. Wang, Y. X. Zhou, S. X. Dai *et al.*. Effect of WO_3 on the spectroscopic properties in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped bismuth-borate glasses[J]. *Physica B*, 2007, **400**(1-2): 224~228
- 24 J. H. Zhang, H. Z. Tao, Y. Chen *et al.*. Structure, upconversion and fluorescence properties of Er^{3+} -doped $\text{TeO}_2\text{-TiO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ tellurite glass[J]. *J. Rare Earths*, 2007, **25**(suppl): 108~112
- 25 H. Ping, D. Q. Chen, Y. L. Yu *et al.*. Judd-Ofelt analyses and luminescence of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped transparent glass ceramics containing NaYF_4 nanocrystals[J]. *J. Alloy. Compound.*, 2010, **490**(1-2): 74~77
- 26 Tang Bin, Wang Zheng, Yang Yi *et al.*. Synthesis and luminescence properties of Er^{3+} -doped transparent oxy-fluoride germanate glass ceramics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2344~2349
唐彬, 王政, 羊毅等. 掺铒透明氧氟锗酸盐微晶玻璃的制备及发光性能研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2344~2349
- 27 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

- 28 Chang Jun, Wang Qingpu, Zhang Xinyu *et al.*. S+C band optical amplification in Er^{3+} - Tm^{3+} co-doped fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 66~68
- 29 D. L. Yang, E. Y. B. Pun, H. Lin. Tm^{3+} -doped ion-exchanged aluminum germanate glass waveguide for S-band amplification[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(15): 151106
- 30 Y. Miyajima, T. Sugawa, T. Komukai. 20 dB gain at 1.55 μm wavelength in 50 cm long Er^{3+} -doped fluoride fibre[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(18): 1527~1528
- 31 M. R. X. de Barros, G. Nykolak, D. J. DiGiovanni *et al.*. Performance of a high concentration Er^{3+} -doped aluminosilicate fiber amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(6): 761~763
- 32 C. Jiang, W. S. Hu, Q. J. Zeng. Numerical analysis of concentration quenching model of Er^{3+} -doped phosphate fiber amplifier[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(10): 1266~1271