

文章编号: 0253-2239(2010)07-1904-06

Yb³⁺ 掺杂磷酸盐玻璃光纤与 1.06 μm 单频激光器的研制

钱 奇 杨中民*

(华南理工大学光通信材料研究所特种功能材料教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要 超短线性腔是实现单频激光稳定输出的最简单的结构, 针对石英玻璃光纤掺杂离子浓度低、输出功率小的缺点, 选择对稀土离子具有较高溶解度的磷酸盐玻璃作为增益介质, 研究了 Yb³⁺ 掺杂磷酸盐玻璃 (P₂O₅-B₂O₃-K₂O-BaO-Al₂O₃-Nb₂O₅-Sb₂O₃) 的光谱特性, 解决了 Yb₂O₃ 高浓度掺杂和提高 Yb³⁺ 荧光寿命的问题。实验表明磷酸盐玻璃对 Yb₂O₃ 溶解度摩尔分数可达 6% (质量分数为 15.5%); 通过除水技术, Yb³⁺ 离子²F_{5/2} 能级的寿命达到 1.84 ms。在此基础上采用管棒法拉制出了磷酸盐玻璃单模光纤, 通过光栅选频, 利用 1.4 cm 光纤实现了中心波长 1063.5 nm, 功率 51.6 mW 的单频激光输出。

关键词 光学材料; 磷酸盐玻璃; Yb³⁺ 离子; 光纤激光器; 单频

中图分类号 TQ171.35 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.1904

Yb³⁺-Doped Phosphate Glass Fiber and 1.06 μm Single-Frequency Fiber Laser

Qian Qi Yang Zhongmin

(Key Laboratory of Specially Functional Materials of Ministry of Education, Institute of Optical Communication, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract Ultra-short linear cavity is the simplest configuration to achieve stable single-frequency laser output. In order to increase the rare-earth doping concentration we choose phosphate glass as the laser gain medium. The spectroscopic properties of heavily Yb³⁺-doped phosphate glasses (P₂O₅-B₂O₃-K₂O-BaO-Al₂O₃-Nb₂O₅-Sb₂O₃) have been investigated for developing 1064 nm single-frequency fiber laser. The experimental results show that the molar fraction solubility of Yb₂O₃ in this phosphate glass system is up to 6% (mass fraction 15.5%). Based on the reaction atmosphere process, the OH⁻ groups can be removed effectively and the fluorescence lifetime of the ²F_{5/2} state of Yb³⁺ ion in phosphate glass reaches 1.84 ms. The Yb³⁺-doped phosphate glass fiber has been drawn by the rod-in-tube technique. A continuous-wave single frequency laser with 51.6 mW laser output at 1063.5 nm is achieved in a 1.4 cm phosphate glass fiber through a narrow bandwidth Bragg grating.

Key words optical materials; phosphate glass; Yb³⁺ ions; fiber laser; single frequency

1 引 言

单频(或单纵模)光纤激光器因其具有极大的相干性,在激光雷达、激光测距、光传感和超远距离探测以及相干通信等领域有着强烈需求^[1~3]。目前对于单频激光器的研究主要集中在半导体单频激光

器、单频固体激光器和单频光纤激光器,与其它技术相比,光纤激光器由于体积小、结构紧凑以及易于控制等优点而备受关注。利用光纤实现激光的单频输出主要基于两种结构:1)环形腔结构,这种结构目前存在的主要问题是激光易于跳模,不易实现激光波

收稿日期: 2010-04-21; 收到修改稿日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(60977060, 50872036)、广东省自然科学基金(9451064101002988)、中国博士后科学基金(20090450857)和浙江大学硅材料国家重点实验室开放基金(SKL2008-9)资助课题。

作者简介: 钱奇(1967—),男,博士,主要从事光学材料方面的研究。E-mail: qianqi@scut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yangzm@scut.edu.cn

长的调谐^[4];2)线性腔结构,这种结构需要缩短增益光纤长度,增大激光纵模间隔,从而实现单频激光输出^[5,6]。国内外一些研究机构和公司利用稀土离子掺杂的石英玻璃光纤作增益介质,通过线性腔结构成功实现了单频激光的输出,但由于石英玻璃对稀土离子溶解度低,仅达 10¹⁹/cm³ 量级,激光输出功率最大仅为几个毫瓦,虽然通过放大技术可以使激光的输出功率达到瓦级,但激光强度噪声和相位噪声很高,直接限制了其在相干技术中的应用。为了提高光纤的增益系数,需要增大光纤中稀土离子的含量。在众多的氧化物玻璃系统中,磷酸盐玻璃对稀土离子具有较高的溶解度、较长的荧光寿命和较小的非线性系数,已成为一种重要的激光基质材料并得到广泛的应用^[7~10]。并且,已有研究显示,磷酸盐玻璃具有较大的光致暗化阈值^[11]。这些特性都显示出磷酸盐光纤是一种富有潜力的制备单频光纤激光器的增益材料。

本文基于 1.06 μm 波段单频光纤激光器的需求,以前期优化后的磷酸盐激光玻璃组分为基础,研究了 Yb³⁺ 掺杂磷酸盐玻璃的光谱特性,并在此基础上,拉制出了单模磷酸盐光纤。为验证 Yb³⁺ 掺杂磷酸盐玻璃光纤的激光输出能力,搭建了 1.06 μm 窄线宽单频光纤激光器实验平台,实现了最大功率为 52 mW 的连续激光输出。

2 实验及测试

磷酸盐玻璃的摩尔组成为:(71-x)P₂O₅-29(B₂O₃-K₂O-BaO-Al₂O₃-Nb₂O₅-Sb₂O₃)-xYb₂O₃ (x=2,3,6,分别命名为 PYB1,PYB2,PYB3)。玻璃制备所用原料为分析纯的 P₂O₅,K₂CO₃,BaCO₃,B₂O₃,Al(OH)₃,Nb₂O₅,Sb₂O₃,以及纯度为 99.999% 的 Yb₂O₃。按比例称取混合料,在陶瓷研钵中充分研磨混合,放入铂坩埚并置于 1250 °C 硅碳棒电炉中熔化 20 min 后,采用反应气氛法(RAP)对玻璃进行除水。将除水后的均质玻璃液浇铸在钢模上成型,再移入退火炉中退火。退火后的玻璃经切割、研磨后,加工成 10 mm×10 mm×1.2 mm 双面抛光试样。其中,PYB3 玻璃加工成厚度分别为 0.2,0.4,1.2 和 6.6 mm 的 4 种样品。

玻璃的吸收光谱采用 Perkin-Elmer Lambda-900 UV/VIS/NIR 光谱仪测定,测量范围为 800~1320 nm。荧光光谱采用法国 Jobin Yvon 公司的 TRIAX320 型荧光光谱仪测量,用 InGaAs 探测器探测荧光。采用 940 nm 激光二极管(LD)为抽运

源;Yb³⁺ 离子²F_{5/2} 能级荧光寿命测量是由示波器记录荧光衰减波形曲线,再将此曲线进行拟合得到。所有测量均在室温下进行。

采用管棒法制备了磷酸盐光纤预制棒,使用日本 TDR-2 型光纤拉制塔在 670 °C 拉制出了单模磷酸盐玻璃光纤。

3 结果和讨论

3.1 Yb³⁺ 掺杂磷酸盐玻璃光谱性质

图 1 给出了室温时掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃的吸收光谱。由图可知,Yb³⁺ 离子²F_{7/2}→²F_{5/2} 跃迁吸收带包含 3 个吸收峰,峰值分别位于 914 nm(10941 cm⁻¹),954 nm(10480 cm⁻¹),974 nm(10267 cm⁻¹),这些吸收峰对应 Yb³⁺ 离子²F_{7/2} 基态能级的最低 Stark 态到²F_{5/2} 激发态能级三个不同 Stark 态之间的跃迁。其中 974 nm 处的吸收峰为最强峰,对应²F_{7/2} 和²F_{5/2} 两能级的最低 Stark 能级间的跃迁。

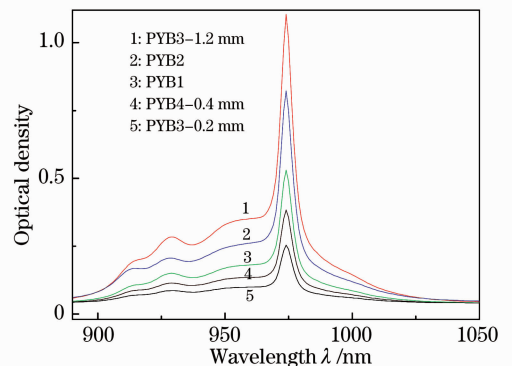


图 1 掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃的吸收光谱
Fig. 1 Absorption spectra of Yb³⁺-doped phosphate glasses

测量获得的玻璃样品光密度曲线包括两部分内容:一是玻璃基体的光吸收;二是片状玻璃样品前后两个表面对探测光的反射。依据对不同厚度玻璃吸收光谱的测量,可获得玻璃基体的光吸收特性。图 2 给出了同组成玻璃在 1310 nm 处吸收光密度随玻璃厚度的变化。由图 2 可看到,玻璃厚度与吸收光密度成线性关系,玻璃越薄,测量的光密度值越小。假定这些同组成的玻璃样品具有相同界面反射率,则将图 2 中拟合直线外延到玻璃厚度为零时的光密度值应为光反射导致的光损耗。对 PYB3 玻璃,反射光密度为 0.03881。将 6.6 mm 厚玻璃样品测量的光密度减去反射光密度,得到 6.6 mm 玻璃基体的吸收光密度值:0.0033,即 0.05 dB/cm。因此可预测以此玻璃为纤芯拉制的光纤在 1310 nm

处的光损耗应约为 0.05 dB/cm。

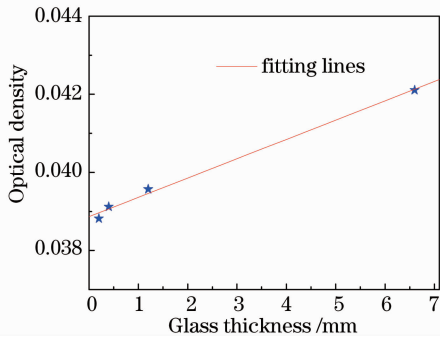


图 2 PYB3 玻璃在 1310 nm 处吸收光密度随玻璃厚度的变化

Fig. 2 Optical density at 1310 nm as a function of glass thickness in PYB3 glass

图 3 为 PYB1, PYB2 和不同厚度 PYB3 玻璃在 940 nm LD 抽运下的荧光光谱。由图可看到, 荧光光谱均包括两个荧光峰, 一个主峰位于 974 nm, 一个次峰位于 1000 nm 附近。随玻璃中 Yb^{3+} 离子浓度增大和玻璃样品厚度增加, 荧光峰强度增强, 并且荧光带的线型也发生改变。图 4 给出了 PYB3 玻璃次/主荧光峰强度比随玻璃样品厚度的变化。图中显示, 玻璃样品厚度增加时, 次荧光峰强度增加的速度比主荧光峰强增加的更快。这主要源于荧光俘获效应^[12]: 玻璃中 Yb^{3+} 离子光吸收带与荧光发射带有较大的重叠, Yb^{3+} 离子能再吸收其自发辐射出的荧光, 导致探测的荧光光谱曲线变型。由于 Yb^{3+} 离子光吸收带相对荧光发射带位于较低波长处, 对低波长荧光再吸收更强。随玻璃厚度增加, 荧光俘获效应增强, 因此次/主荧光峰强度比增大, 并使荧光峰红移。

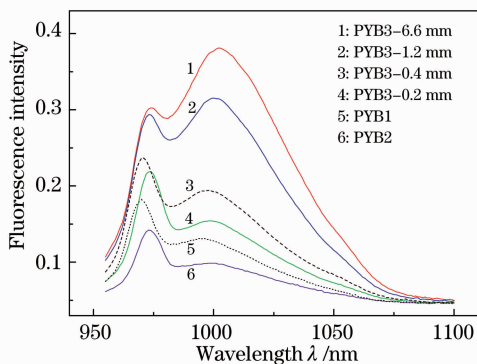


图 3 磷酸盐玻璃在 940 nm LD 抽运下的荧光光谱
Fig. 3 Fluorescence spectra of phosphate glasses excited at 940 nm by LD

根据 McCumber 理论^[13], Yb^{3+} 离子 ${}^2\text{F}_{5/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{7/2}$ 跃迁的发射截面可以根据吸收截面求得:

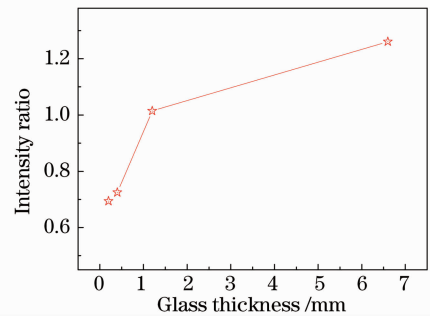


图 4 PYB3 玻璃在 1000 nm 和 974 nm 荧光强度比随玻璃样品厚度变化

Fig. 4 Fluorescence intensity ratio between peaks at 1000 and 974 nm as a function of glass thickness in PYB3 glass

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \exp[(\epsilon - h\nu)/kT], \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数, ϵ 为温度 T 下将一个 Yb^{3+} 离子从基态 ${}^2\text{F}_{7/2}$ 激发到 ${}^2\text{F}_{5/2}$ 能级所需的自由能; 自由能 ϵ 可由文献^[13]的方法求得。 Yb^{3+} 离子吸收截面 σ_a 可根据吸收光谱由下式计算^[14]:

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{2.303 \lg(I_0/I)}{NL}, \quad (2)$$

式中 $\lg(I_0/I)$ 为光密度, L 为玻璃厚度, N 为 Yb^{3+} 离子在玻璃中的浓度。由(1)式、(2)式计算的 Yb^{3+} 离子在本研究的磷酸盐玻璃中和其它玻璃基质中的峰值吸收截面、峰值发射截面和 1064 nm 处发射截面列于表 1 中(其中 Yb^{3+} 离子掺杂的 BB, BZN 和 PNK 玻璃组成分别为 $60\text{B}_2\text{O}_3-29\text{BaO}-1\text{Yb}_2\text{O}_3$ ^[15], $40\text{B}_2\text{O}_3-54\text{ZnO}-5\text{Nb}_2\text{O}_5-1\text{Yb}_2\text{O}_3$ ^[15] 和磷酸盐玻璃^[16])。由表 1 看到, Yb^{3+} 离子的峰值吸收截面、峰值发射截面和 1064 nm 处发射截面随 Yb_2O_3 含量增加没有显示规律的变化, 在误差范围内可近似为常数, 并且 Yb^{3+} 离子在 PYB3 玻璃中的峰值吸收截面、峰值发射截面均显著高于在其它玻璃基质中的相应值。表 1 也展示了不同厚度 PYB3 玻璃吸收和发射截面情况。对具有相同 Yb^{3+} 浓度的玻璃, 随样品厚度增加, 峰值吸收和峰值发射截面呈现降低趋势。在测量较厚玻璃样品光吸收时, 透过玻璃的探测光较弱, 接近光电管的探测限度, 相对降低了 Yb^{3+} 离子峰值吸收强度, 计算获得的峰值吸收截面和峰值发射截面也相应偏低。因此玻璃样品越薄, 计算的吸收和发射截面准确性越高。对摩尔分数为 6%(质量分数 15.5%) 的高掺杂磷酸盐玻璃, 其峰值吸收截面、峰值发射截面和 1064 nm 处发射截面分别为 1.635×10^{-20} , 1.686×10^{-20} 和 $0.973 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。

表 1 玻璃样品厚度、 Yb^{3+} 离子浓度、峰值吸收截面、峰值发射截面和 1064 nm 发射截面Table 1 The glass thickness, concentration of Yb^{3+} ion, peak absorption cross section, peak emission cross section and 1064 nm emission cross section in the Yb^{3+} -doped glasses

Samples	Glass thickness /mm	Concentration of Yb^{3+} ion /($10^{21}/\text{cm}^3$)	Peak absorption cross section /(10^{-20} cm^2)	Peak emission cross section /(10^{-20} cm^2)	Emission cross section at 1064 nm /(10^{-21} cm^2)
PYB1	1.2	0.5043	1.491	1.537	0.305
PYB2	1.2	0.8168	1.460	1.505	0.629
PYB3	0.2	1.5045	1.635	1.686	0.973
PYB3	0.4	1.5045	1.318	1.359	0.870
PYB3	1.2	1.5045	1.354	1.396	0.537
PYB3	6.6	1.5045	0.661	0.685	0.475
BB ^a	2	0.5141	—	0.51	—
BZN ^b	2	0.5152	—	0.69	—
PNK ^c	3	—	0.68	1.09	—

玻璃在波长 λ 处的增益系数可由下式计算得到^[17]

$$G(\lambda) = \sigma_e(\lambda)N\beta - \sigma_a(\lambda)N(1 - \beta) \quad (3)$$

式中 β 为处于激发态的 Yb^{3+} 粒子数与总 Yb^{3+} 数之比。由于 1064 nm 处 Yb^{3+} 离子的吸收截面近于零,因此 $G(1064 \text{ nm}) \approx \sigma_e(1064 \text{ nm})N\beta$ 。对于单频光纤激光器,谐振腔极短,仅数厘米长,在高功率 LD 抽运下易实现高的粒子数反转。因此,在 $\beta=0.9$, Yb_2O_3 摩尔分数含量为 6% ($1.5045 \times 10^{21}/\text{cm}^3$) 时, 1064 nm 处的最高增益系数可达 1.32 cm^{-1} 。

玻璃中稀土离子激发态能级寿命是决定激光玻璃性能的一个重要指标,提高稀土离子的荧光寿命不仅能有效提高抽运光效率,而且能降低激光器的热效应。因此提高稀土离子寿命,并准确测量,是掺稀土激光材料研究的一项重要内容。

玻璃中 Yb^{3+} 离子激发态能级寿命可表示为

$$1/\tau_m = 1/\tau_r + \omega_{nr}, \quad (4)$$

式中 τ_m 为测量的荧光寿命, τ_r 为辐射寿命, ω_{nr} 为无辐射弛豫率。玻璃的无辐射弛豫率关系到玻璃基质的最大声子能量、稀土离子无辐射跃迁间的能量差和玻璃中 OH^- 基团含量。由于研究已选定玻璃基质和稀土离子,提高镱离子寿命的途径是去处玻璃中的 OH^- 。

磷酸盐玻璃由于引入磷组分的 P_2O_5 具有强吸水特性^[18],使玻璃中常含有大量的 OH^- 。在稀土掺杂的玻璃中, OH^- 基团严重淬灭稀土离子。由于 OH^- 的振动频率在 $2700 \sim 3700 \text{ cm}^{-1}$ 之间,比玻璃中其它的结合键振动频率要高得多,只需几个 OH^- 基的振动声子即可使激发的 Yb^{3+} 离子产生无辐射弛豫。处于羟基附近激发态的 Yb^{3+} 离子快速无辐

射弛豫到基态,其它的 Yb^{3+} 离子通过共振能量转移又将能量传递给它并且迅速流失。因此每个在羟基附近的 Yb^{3+} 离子不仅自身失去了功能,并且形成能量漏斗,通过共振能量转移把 OH^- 基团的危害成倍放大,使玻璃中 Yb^{3+} 离子具有较大的 ω_{nr} , 测量寿命降低。当重掺杂 Yb_2O_3 时,此现象尤为严重。本实验的磷酸盐玻璃中 Yb_2O_3 掺杂浓度高,因此有效去除磷玻璃中的羟基提高 Yb^{3+} 离子 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级的寿命成为实验的关键所在之一。

实验表明,未经除水处理的 PYB3 玻璃,其 Yb^{3+} 离子 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级的荧光寿命仅为 0.1 ms ,通过采用反应气氛法 (RAP)^[19,20] 在玻璃熔制过程中对玻璃进行除水处理。图 5 给出了 PYB3 玻璃中 Yb^{3+} 离子 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级的荧光寿命随玻璃厚度变化。从图可见,随玻璃厚度增加,荧光寿命增长,并与玻璃厚度成线性关系。这种在玻璃组成、 Yb^{3+} 离子浓度和玻璃制备工艺均相同的玻璃上测量荧光寿命的差异同样联系到 Yb^{3+} 离子荧光俘获效应。如前所述,由于

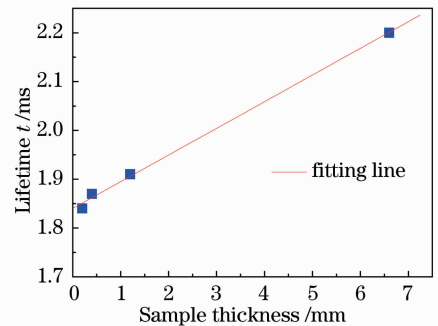


图 5 PYB3 玻璃中 Yb^{3+} 离子 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级测量的荧光寿命随玻璃厚度的变化

Fig. 5 Dependence of the measured fluorescence lifetime of $\text{Yb}^{3+} : ^2\text{F}_{5/2}$ level on PYB3 glass thickness

Yb^{3+} 离子吸收带和荧光发射带的部分重叠,处于激发态的 Yb^{3+} 离子跃迁到基态,发射出光子,此光子能被处于基态的 Yb^{3+} 离子再次吸收,此过程可多次发生。玻璃越厚,光子经历发射-俘获过程次数越多,使荧光强度衰减减缓,导致测量的荧光寿命增长。将图 5 中的寿命拟合直线外延到玻璃厚度为零处时,消除了荧光俘获对寿命的影响,可获得实际的 Yb^{3+} 离子 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级的测量寿命,此值为 1.83 ms,接近 0.2 mm 厚样品的测量寿命(1.84 ms)。即使是扣除荧光俘获效应的寿命,也已大大高于报道的质量分数为 12% 的 Yb_2O_3 掺杂的磷酸盐光纤 1.2 ms 的荧光寿命^[21],表明采用的玻璃除水工艺具有有效的除水效率。

3.2 1064 nm 光纤激光实验

图 6 内插图图为用管棒法拉制的磷酸盐光纤(PYB3 玻璃组成)端面放大图。拉制的掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤纤芯直径为 5.2 μm ,数值孔径(NA)为 0.13,纤芯和包层间偏心度小于 1 μm ,单模光纤截止波长为 960 nm。采用截断法测量的光纤在 1310 nm 损耗为 0.06 dB/cm,此值略高于利用块状玻璃吸收光谱计算的 0.05 dB/cm 的损耗,原因可能在于光纤的纤芯和包层界面缺陷^[22]。

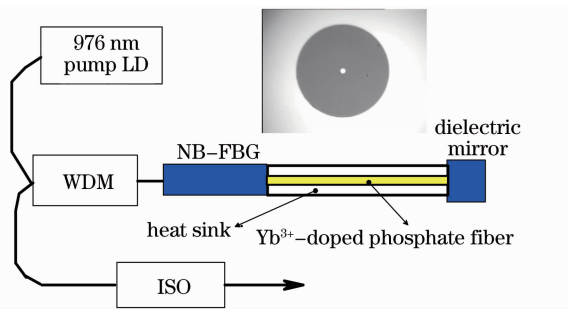


图 6 1064 nm 光纤激光器实验装置,内插图为光纤端面结构

Fig. 6 The experimental setup of 1064 nm phosphate fiber laser. The inset shows the cleaved fiber end

掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤激光器实验装置如图 6 所示。实验采用窄带光纤光栅(NB-FBG)为谐振腔的前腔镜,熔接在 1.4 cm 长的掺 Yb^{3+} 磷酸盐光纤上;以二色镜为后腔镜。NB-FBG 的 3 dB 带宽为 0.06 nm,1064 nm 反射率为 50%;二色镜在 1064 nm 的反射率大于 99%,对 976 nm 光反射率小于 2%。

图 7 显示了输出激光光谱。输出激光的中心,激光的中心波长位于 1063.5 nm。受 OSA 分辨率限制,激光线宽需更精确的测量,如采用零拍法测量输出激光的线宽^[23]。输出激光的边模抑制比

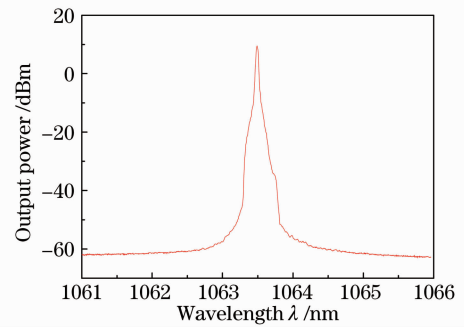


图 7 输出的 1064 nm 激光光谱

Fig. 7 Spectrum of 1064 nm laser output (SMSR) 大于 75 dB,信噪比(SNR)大于 60 dB。

根据激光理论,激光器的频率间隔 $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu = c/2nL, \quad (5)$$

式中 n 为有源光纤的折射率, c 为光速, L 为激光器腔长。依据(5)式计算得频率间隔为 4.7 GHz。输出激光模式由光栅反射谱宽决定,经过计算 NB-FBG 反射谱半峰全宽(FWHM)约为 7.5 GHz,显然该线性腔可以保证谐振腔内只存在一个纵模模式,即实现单纵模激光输出。图 8 显示了不同抽运功率下 1064 nm 激光输出功率。测量得到 1064 nm 光纤激光器的阈值功率为 35 mW。抽运功率达到 556 mW 时,获得 51.6 mW 最大激光功率。

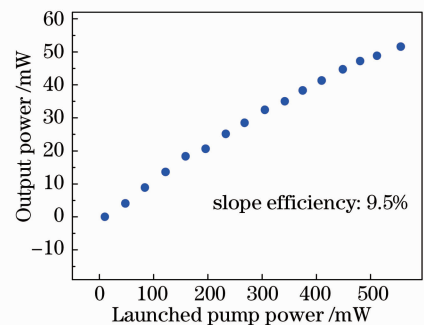


图 8 不同抽运功率下 1064 nm 激光输出功率特性

Fig. 8 Output power characteristics of fiber laser at 1064 nm at different pump power

4 结 论

研究表明,多组分磷酸盐玻璃 $\text{P}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Sb}_2\text{O}_3$ 对 Yb_2O_3 具有较高的溶解度,摩尔分数达 6%(质量分数为 15.5%)。 Yb^{3+} 离子的峰值吸收截面、峰值发射截面和 1064 nm 发射截面分别达 1.635×10^{-20} , 1.686×10^{-20} 和 $9.73 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$ 。由于荧光俘获效应,使荧光发射带红移、发射带宽增宽,并使测量的荧光寿命增长。采用 RAP 除水法,有效去除了玻璃中的 OH^- 基团,使

Yb³⁺ 离子²F_{5/2} 能级荧光寿命提高一个数量级, 达 1.84 ms。利用管棒法拉制了掺 Yb³⁺ 磷酸盐玻璃单模光纤, 在 1.4 cm 光纤实现了中心波长位于 1063.5 nm 的单频激光输出, 最高输出功率为 51.6 mW。

参 考 文 献

- 1 P. Dupriez, A. Piper, A. Malinowski *et al.*. High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9): 1013~1015
- 2 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 3 J. H. V. Price, K. Furusawa, T. M. Monro *et al.*. Tunable, femtosecond pulse source operating in the range 1.06~1.33 μm based on an Yb³⁺-doped holey fiber amplifier[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(6): 1286~1294
- 4 Liang Weiyuan. Optimal design of tunable single frequency fiber laser resonant cavity[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2008. 4~8
梁维源. 可调谐单频光纤激光器谐振腔优化设计[D]. 桂林: 广西师范大学, 2008. 4~8
- 5 W. Guan, J. R. Marciante. Single-polarisation, single-frequency, 2 cm ytterbium-doped fibre laser[J]. *J. Electron. Lett.*, 2007, **43**(10): 558~560
- 6 Wu Bo, Y. Z. Liu, S. A. Liu. Narrow linewidth fiber grating laser and application[J]. *IEEE 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 2006, **13**: 1971~1974
- 7 C. Jiang, H. Liu, Q. Zeng *et al.*. Yb³⁺-phosphate laser glass with high emission cross-section[J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2000, **61**(8): 1217~1223
- 8 L. Norderhaug, T. Olafsen, T. E. Michaelsen *et al.*. Transmission loss characteristics of fluorophosphate optical fibers in the ultraviolet to visible wavelength region[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1997, **215**(1): 11~20
- 9 Dai Shixun, Hu Lili, Liu Zhuping *et al.*. Spectrum and laser properties of ytterbium doped phosphate glass at low temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 627~631
戴世勋, 胡丽丽, 柳祝平等. 低温下掺镱磷酸盐激光玻璃的光谱和激光特性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 627~631
- 10 Zhang Wei, Zhu Jianqiang. Experimental investigation on surface/subsurface damage of Nd-doped phosphate glass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 268~272
张伟, 朱健强. 磷酸盐钕玻璃表面/亚表面损伤特性实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 268~272
- 11 Jiang Xiongwei, Qiu Jianrong, Zhu Chongshan *et al.*. ESR studies and thresholds of femtosecond laser induced darkening in glasses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(5): 871~874
姜雄伟, 邱建荣, 朱从善等. 飞秒激光作用下光学玻璃和激光玻璃的光致暗化及其 ESR[J]. *物理学报*, 2001, **50**(5): 871~874
- 12 Z. M. Yang, Z. H. Jiang, Y. H. Liu *et al.*. Radiative trapping effect of Yb³⁺ ions in lead-germanate glasses[J]. *J. Mater. Sci.*, 2006, **41**(11): 6174~6177
- 13 D. E. McCumber. Theory of phonon-terminated optical masers[J]. *Phys. Rev.*, 1964, **134**(2A): A299~A306
- 14 X. Shen, Q. Nie, T. Xu *et al.*. Optical transitions of Er³⁺/Yb³⁺ codoped TeO₂-WO₃-Bi₂O₃ glass[J]. *Spectrochim. Acta A*, 2005, **61**(9): 2189~2193
- 15 Dai Shixun, Hu Lili, Jiang Zhonghong *et al.*. The spectroscopic characteristics of ytterbium borate laser glasses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 995~999
戴世勋, 胡丽丽, 姜中宏等. 掺镱硼酸盐激光玻璃的光谱性质[J]. *光学学报*, 2000, **20**(7): 995~999
- 16 Jiang Chun, Deng Peizhen, Zhang Junzhou *et al.*. Yb³⁺ oxide glass with high emission cross section[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 2383~2387
姜淳, 邓佩珍, 张俊洲等. 高发射截面掺镱氧化物玻璃[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 2383~2387
- 17 R. Rolli, M. Montagna, S. Chaussedent *et al.*. Erbium-doped tellurite glasses with high quantum efficiency and broadband stimulated emission cross section at 1.5 μm[J]. *Opt. Mater.*, 2003, **21**(4): 743~748
- 18 Y. Yan, A. J. Faber, H. De Waal. Luminescence quenching by OH groups in highly Er-doped phosphate glasses[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1995, **181**(3): 283~290
- 19 Jiang Chun, Gao Wwenyan, Zhuo Dunshui *et al.*. Effect of OH group on laser performance and physical properties of phosphate laser glass[J]. *J. Chinese Ceram. Soc.*, 1998, **26**(1): 97~102
姜淳, 高文燕, 卓敦水等. OH 基对磷酸盐激光玻璃激光性能和物理性质的影响[J]. *硅酸盐学报*, 1998, **26**(1): 97~102
- 20 X. Feng, S. Tanabe, T. Hanada. Hydroxyl groups in erbium-doped germanotellurite glasses[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2001, **281**(1~3): 48~54
- 21 Y. W. Lee, M. J. F. Digonnet, S. Sinha *et al.*. High-power Yb³⁺-doped phosphate fiber amplifier[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2009, **15**(1): 93~102
- 22 Yang Gang, Qian Qi, Yang Zhongming. Surface treatment of P₂O₅-BaO-Al₂O₃-K₂O phosphate laser glass[J]. *J. Inorg. Mat.*, 2010, **25**(2): 196~200
杨刚, 钱奇, 杨中民. P₂O₅-BaO-Al₂O₃-K₂O 磷酸盐激光玻璃的表面处理[J]. *无机材料学报*, 2010, **25**(2): 196~200
- 23 Yu Benli, Qian Jingren, Yang Yinghai *et al.*. Homodyne method for measuring narrow linewidth lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(4): 351~354
俞本立, 钱景仁, 杨瀛海等. 窄线宽激光的零拍测量法[J]. *中国激光*, 2001, **28**(4): 351~354