

文章编号: 0258-7025(2010)02-0362-05

短腔磷酸盐玻璃光纤激光器及其输出特性

孟 莉 潘政清 耿建新 蔡海文 方祖捷 叶 青 瞿荣辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 利用 1 cm 长钕共掺高掺磷酸盐玻璃光纤制成直线型短腔光纤激光器, 获得单频窄线宽、较大功率的激光输出。测量了输出功率随激光器热沉温度变化的特性; 激光器热沉温度控制在 11 °C 时, 斜率效率可达 24%; 抽运功率为 415 mW 时, 输出功率可达 79 mW。光谱测试显示在 1534 nm 单纵模工作, 边模抑制比 (SMSR) 大于 50 dB。用零差法测得线宽为 4.5 kHz。用低精细度法布里-珀罗 (F-P) 干涉方法, 测量了磷酸盐玻璃光纤的折射率和热光系数分别为 1.5195 和 $-5.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 并测得激光器在高抽运功率下斜率效率降低, 输出功率呈亚线性上升的特性。对这一现象及其温度关系进行了定性分析和讨论。

关键词 激光器; 磷酸盐玻璃光纤激光器; 短腔; 输出特性

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0362

A Short-Cavity Phosphate Glass Fiber Laser and Its Output Characteristics

Meng Li Pan Zhengqing Geng Jianxin Cai Haiwen Fang Zujie Ye Qing Qu Ronghui

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

Abstract A 1 cm Er/Yb codoped phosphate glass fiber is used to make a short linear cavity fiber laser to get single-frequency, narrow line width and large power output. Relation of the output power to heat sink temperature is measured. When the heat sink temperature is stabilized at 11 °C, the slope efficiency is 24%; and its output power reaches 79 mW under pump power of 415 mW. The output spectrum shows single longitudinal mode operation at 1534 nm with side mode suppressing ratio (SMSR) above 50 dB. Homodyne measurement gives its line width as narrow as 4.5 kHz. By taking the glass fiber as medium of a low finesse Fabry-Perot (F-P) cavity, refractive index and optic-thermal coefficient of the phosphate glass fiber is measured to be 1.5195 in 1530 ~ 1550 nm band and $-5.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. It is found that the slope efficiency decreases at higher pump power range and the output power increases sub-linearly. This phenomenon and its relation to temperature are discussed qualitatively.

Key words lasers; phosphate glass fiber laser; short cavity; output characteristics

1 引 言

单纵模光纤激光器在光纤通信、光纤传感和作为大功率激光器系统种子光源等方面具有重要的发展前景^[1~3]。为了加大纵模间隔, 保证激光器无跳模运转, 采用短腔是一个有效途径。常规稀土掺杂石英光纤由于溶解度低, 短腔难以获得足够的增益。钕共掺磷酸盐玻璃光纤具有高的稀土离子可溶性, 掺杂浓度比石英光纤高 2 个数量级, 可以采用直

线短腔结构实现高功率输出, 解决缩短腔长与提高功率的矛盾。因此, 基于高掺磷酸盐玻璃的单频光纤激光器已经成为光纤激光器领域的新热点。有文献报道在 2003 年利用增益系数为 5 dB/cm 的钕共掺磷酸盐玻璃光纤实现了可以输出最大功率为 100 mW, 线宽小于 2 kHz 的分布布拉格反射 (DBR) 光纤激光器^[2], 该激光器使用的钕共掺磷酸盐玻璃光纤长 2 cm。2008 年, 潘政清等^[4]利用增益系数

收稿日期: 2009-03-02; 收到修改稿日期: 2009-05-18

基金项目: 中国科学院创新基金 (CXJJ-09-S15) 资助项目。

作者简介: 孟 莉 (1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: mengli@siom.ac.cn

导师简介: 蔡海文 (1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光器件及系统方面的研究。

E-mail: hwcai@siom.ac.cn (通信联系人)

为4.2 dB/cm的钕共掺磷酸盐玻璃光纤构建了腔长约为2.8 cm的直线腔激光器,实现输出最大功率100 mW,线宽20 kHz。

目前,国内外关于高掺杂磷酸盐玻璃的单频光纤激光器的文献都侧重于介绍这种光纤激光器的结构及特性,对这种光纤激光器的深入研究和详细讨论,还有很多工作要做;激光器性能的进一步提高,还有大的发展前景。在文献[4]中对磷酸盐光纤激光器报道的研究工作的基础上,本文利用华南理工大学提供的钕共掺高掺杂浓度磷酸盐玻璃光纤,将激光器的腔长缩短到1 cm,获得了79 mW的输出功率,光谱测试表明良好的单纵模运转特性,边模抑制比(SMSR)大于50 dB;零差法测试得到激光线宽为4.5 kHz。本文测量了光纤的热光系数,并对其输出特性的温度关系做进一步的测量和讨论。

2 实验装置

采用的激光器为直线型短腔分布式布拉格反射型结构,如图1所示。激光器采用1 cm长的钕共掺磷酸盐玻璃光纤为增益介质。掺入的离子浓度为 10^{26} m^{-3} 量级。为便于安装固定,光纤镶嵌在一个常规的陶瓷插芯内。激光器谐振腔的两个腔镜由一介质膜高反射镜和光纤光栅组成。反射镜对1535 nm光的反射率高于99.5%。光纤光栅的中心波长1534.39 nm,3 dB带宽0.1 nm,峰值反射率为60%。光纤光栅一端与磷酸盐玻璃光纤作物理接触(Physical Contact,PC)连接,光栅中心点离开有源光纤端点的距离约为9 mm。光纤光栅另一端熔接波分复用器(WDM)。利用976 nm半导体激光器经过WDM对有源光纤进行光抽运。产生的激光由同一WDM输出。经测试,该磷酸盐玻璃光纤在大于100 mW抽运功率下,在增益谱峰值1535 nm处的增益系数为4.2 dB/cm。

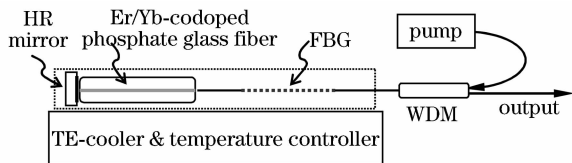


图1 直线腔磷酸盐玻璃光纤激光器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the linear cavity phosphate glass fiber laser

3 实验结果

3.1 输出功率和温度特性

图2,图3分别为在室温(25℃)下未加致冷和

温度控制情况下激光器输出功率随976 nm抽运功率变化的曲线。可以看到,阈值抽运功率为23 mW,在415 mW抽运功率下,输出激光功率为71 mW。阈值以上到约280 mW抽运功率下的斜率效率为21%;在280 mW以上斜率效率下降为9.1%。

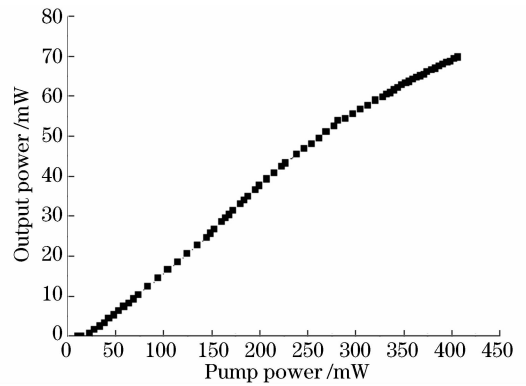


图2 室温下输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Output power versus pump power at room temperature

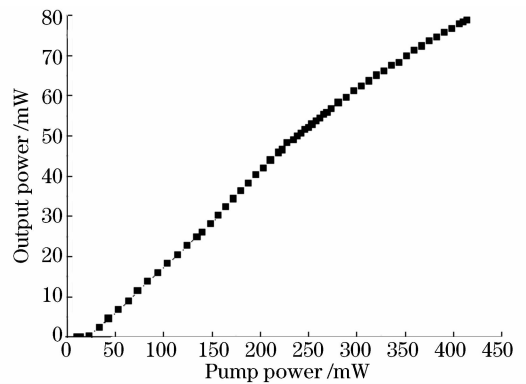


图3 11℃时输出功率随抽运功率的变化

Fig. 3 Output power versus pump power at 11℃

为了查考上述功率饱和现象的原因,在不同温度下对激光器的输出特性进行了测量。发现激光器的阈值抽运功率没有明显变化,但是斜率效率有明显改变,饱和转折点的位置也有所变化。图3为控温在11℃时的功率曲线。可以看到,在415 mW抽运功率下的激光输出为79 mW。饱和点以下的斜率效率提高到24%,饱和点下移到约为260 mW;饱和点以上的斜率效率下降到12%。但是,进一步降低温度时,输出功率和斜率效率呈现下降趋势。图4显示了在一定抽运功率下,输出功率随温度变化的曲线。其纵坐标为输出功率的相对变化量,以每一曲线的最高点为单位做归一化处理。为了避免重叠,不同抽运功率的曲线平移了5%。可以看到输出功率不是随温度单调变化的,而是呈现波动的特

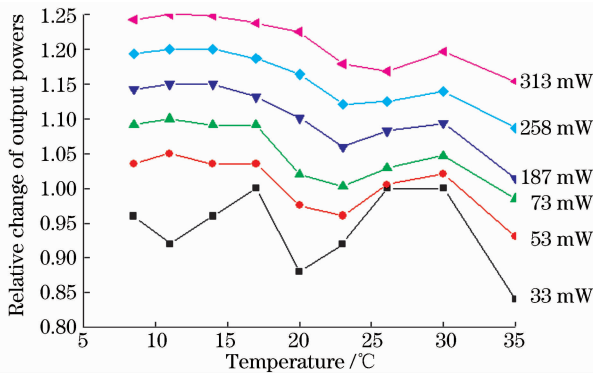
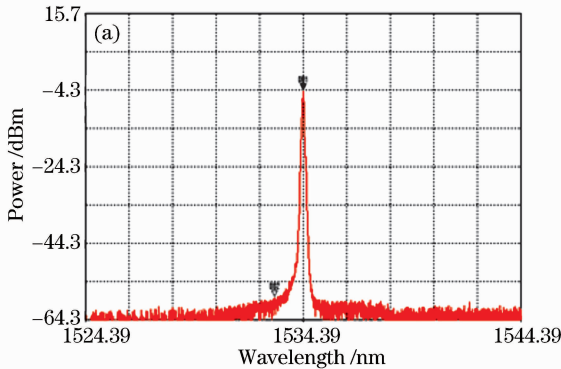


图4 不同抽运功率下输出功率随热沉温度的相对变化
Fig. 4 Relative change of output powers varying with the heat-sink temperature at different pump power levels

性;波动周期与抽运功率有关,大致在 13~20 °C 范围内变化。不同温度下,功率曲线都呈现两段不同斜率的特性,即在高抽运功率下输出功率有饱和的趋势。饱和点的位置随温度也有所变化,但是没有看到单调变化的特性。

3.2 光谱特性

激光器的输出光谱和线宽特性如图 5 所示。实验使用 ANDO 公司的光谱仪 AQ6317C 对激光



光谱进行测试。典型光谱曲线如图 5(a)所示,光谱仪的分辨率设置为 0.02 nm。激光器的中心波长为 1534.39 nm,边模抑制比大于 50 dB。实验测试表明,在不同抽运功率下,激光峰值波长位置基本不变,单纵模特性稳定。

采用零差法测试该激光器的线宽^[5],将一段 25 km长的延时光纤与一段短光纤构成一个马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构,测量得到输出端的拍频信号,如图 5(b)所示。图中实线为 Lorentzian 线型的拟合曲线,显示了峰值下 20 dB处全宽为 90 kHz。根据 Lorentzian 线型的性质可以得到半峰全宽为 20 dB全宽的 1/10,即 9 kHz。差拍线宽为激光器线宽的两倍^[6],由此得到激光器线宽为 4.5 kHz,单频性能良好。

3.3 磷酸盐玻璃光纤的热光系数测量

磷酸盐玻璃的折射率和热光系数与材料制备时的配比及工艺有关,因此需要对所用光纤的热光系数进行测试。采用镶嵌在陶瓷插芯内的磷酸盐玻璃光纤,通过 FC/PC 接头与两条光纤相连,构成一个低精细度的法布里-珀罗(F-P)腔。并将其安放在

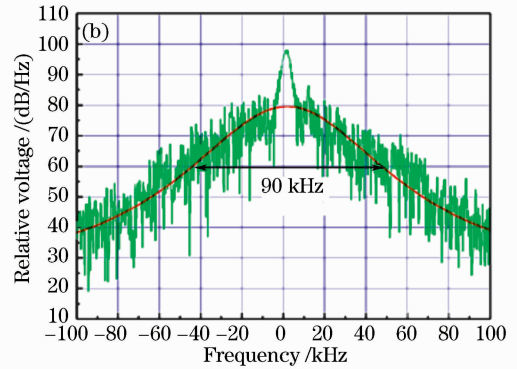


图5 (a) 激光器的输出光谱图;(b) 零拍法测得的频谱图

Fig. 5 (a) Output spectrum; (b) homodyne spectrum

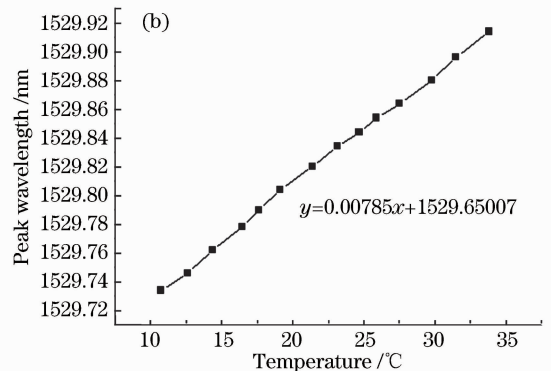
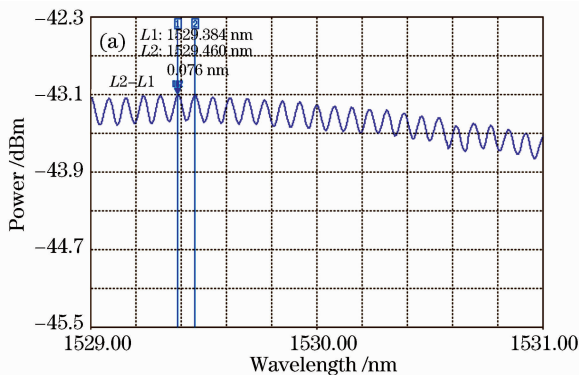


图6 (a) 玻璃光纤的两端面 F-P 干涉光谱;(b) 峰值波长随温度变化的曲线

Fig. 6 (a) Typical spectrum of F-P interference on two facets of glass fiber;

(b) peak wavelength variation with temperature

致冷控温装置中。用放大自发辐射(ASE)作为光源,测量其振荡特性随温度的变化。图 6(a)为一典型的测试曲线。

根据测得的振荡周期,可以计算材料在该波长处的折射率。实验中测得的磷酸盐玻璃光纤在 1530~1550 nm 波段的平均折射率为 1.5195。图 6(b)为某一峰值的波长位置随温度变化的曲线。经拟合可得

$$\frac{d\lambda}{\lambda dT} = \frac{0.00785}{1529.7} = 5.13 \times 10^{-6}, \quad (1)$$

但是这一变化率也包含了 ZrO_2 陶瓷插芯的热膨胀因素。 ZrO_2 陶瓷插芯的热膨胀系数为 $1.05 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [7]。由此可以计算得到,所用的磷酸盐玻璃光纤的热光系数为

$$\eta = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} = -5.4 \times 10^{-6}. \quad (2)$$

4 讨 论

结果表明,短腔有助于光纤激光器获得稳定的单纵模运转。根据激光器的基本原理激光输出的纵模决定于: $n_{Si}l_{Si} + n_P l_P = M\lambda/2$ [8]。式中下标 Si 代表光纤光栅所在的石英光纤, P 代表磷酸盐玻璃。纵模间隔为 $\Delta\lambda = \lambda^2/2(n_{Si}l_{Si} + n_P l_P)$ 。根据实验数据可得本文结构下的纵模间隔为 0.041 nm。采用 0.1 nm 带宽的光纤光栅作为选频滤波器,能够较好地保证单纵模工作。但是,仍然需要光纤光栅反射谱峰值与纵模位置的匹配。当光纤光栅峰值波长位于两纵模中间时,不仅出现模间竞争,不能获得稳定单纵模工作,而且导致输出功率下降。由以上纵模表达式可得,激光纵模随温度的变化为

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} = (a_{Si} + b_{Si})f_{Si} + (a_P + b_P)f_P, \quad (3)$$

式中 $f_{Si} = \frac{n_{Si}l_{Si}}{n_{Si}l_{Si} + n_P l_P} = 0.46$, $f_P = \frac{n_P l_P}{n_{Si}l_{Si} + n_P l_P} = 0.54$ 为两段光纤的百分比,已根据器件的结构和表 1 的数据作了计算。可以得到激光器纵模的温度偏移率为 $0.011 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。此数值与常规石英光纤光栅

表 1 磷酸盐玻璃光纤和石英光纤的温度系数

Table 1 Coefficients of phosphate glass fiber and silica fiber

	Phosphate glass fiber	Silica fiber
Refractive index n	1.52195	1.45
Linear expansion factor $\alpha / (10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C})$	1.05	5.50
Optic-thermal coefficient $b / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$	-5.4	6.3

峰值波长的温度变化率十分接近。两者可以在较大的温度范围内同步变化,获得单纵模运行。

激光器的输出功率随抽运功率变化,在高抽运功率下呈现亚线性上升的特性,是一个值得重视的现象。根据激光器的基本原理,这一现象可能有几个因素需要考虑。一是激光介质的温度效应。在高抽运功率下光纤发热,影响激光效率。从曲线的基本形状在不同温度下没有很大变化的事实来看,材料发热的影响不严重。仔细观察图 2 和图 3 的曲线,在阈值以上饱和点以下的功率曲线,呈现一定的超线性的特征。这是多次测试得到的共同现象,可以说明温升引起激光效率降低的问题不是主要的因素。二是短的腔长没有充分吸收抽运光能量,有一部分抽运光透过介质膜反射镜泄漏出去,降低了对激光输出的贡献。这一可能性是存在的。需要在构建新的器件时考虑进一步的实验验证。为此需要研制更高掺杂浓度的玻璃光纤,以在发挥短腔优点的同时获得更高的输出功率。三是激光器纵模与光纤光栅峰值位置匹配的偏移。功率曲线前段的超线性,可以解释为纵模与光纤布拉格光栅(FBG)峰值间距在这一工作区间逐步缩小。图 4 的实验结果也是这种机理的一种反映。进一步的定量分析,还需要更多的实验手段和实验数据。

5 结 论

介绍了一种新型磷酸盐玻璃光纤激光器,输出单纵模激光,边模抑制比大于 50 dB,线宽为 4.5 kHz。当激光器环境温度控制在 $11 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,激光输出斜率效率可达 24%;抽运功率为 415 mW 时,输出功率可达 79 mW。对磷酸盐玻璃光纤的折射率和热光系数进行了测量,得到磷酸盐玻璃光纤的折射率在 1530~1550 nm 波段为 1.5195,热光系数为 $-5.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。对激光输出随温度变化的特性和功率曲线的饱和特性进行了讨论。为了提高输出功率和能量转换效率,有必要在保证材料光学性质的条件下进一步提高 Er/Yb 的掺杂浓度。

致谢 本文所用材料和部分器件封装工艺获得华南理工大学杨忠民教授研究组的大力支持,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Xue Dong, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. New developments of narrow linewidth fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(5): 31~35

- 薛 东,楼祺洪,周 军 等. 窄线宽光纤激光器进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(5):31~35
- 2 Ch. Spiegelberg, J. Geng, Y. Hu *et al.*. Compact 100 mW fiber laser with 2 kHz linewidth [C]. Optical Fiber and Communications Conference, 2003. PD45
- 3 Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1):87~91
- 肖 浩,李 芳,王永杰 等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(1):87~91
- 4 Pan Zhengqing, Meng Li, Ye Qing *et al.*. 100 mW of Er-Yb codoped phosphate glass fiber laser of single frequency [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12):1996
- 潘政清,孟 莉,叶 青 等. 钕镱共掺磷酸盐玻璃光纤激光器实现 100 mW 单频输出[J]. 中国激光, 2008, **35**(12):1996
- 5 Osamu Ishida. Delayed-self-heterodyne measurement of laser frequency fluctuations [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11):1528~1533
- 6 Amnon Yariv. Optical Electronics in Modern Communications [M]. Edition 5. Chen Heming, Shi Weihua, Zhang Li *et al.* transl., Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2004. 306
- A. 亚力夫. 现代通信电子学[M]. 第五版. 陈鹤鸣,施伟华,张力 等译,北京:电子工业出版社,2004. 306
- 7 <http://detail.cn.china.cn/provide/detail,1398854940.html>
- 8 K. P. Koo, A. D. Kersey. Fiber laser sensor with ultra high strain resolution using interferometric interrogation [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(14):1180~1182

《中国激光》“全固态激光技术”专题 征 稿 启 事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》已于 2009 年 7 月正刊上出版“全固态激光技术”专集,得到了本领域很多院士和知名专家的大力支持,发表了多篇国内知名课题组的全固态激光技术发展前沿领域的文章,反响非常好。应广大专家、作者和读者的要求,《中国激光》计划于 2010 年 7 月继续推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 连续全固态激光器;
- 脉冲全固态激光器;
- 光纤激光器;
- 其他

截稿日期:2010 年 4 月 15 日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: CJL@siom.ac.cn;电话:021-69918427。

《中国激光》编辑部