

文章编号: 0258-7025(2007)09-1208-04

# 保偏光纤激光器的实验研究

任广军<sup>1,2,3</sup>, 姚建铨<sup>1,2,3</sup>, 王 鹏<sup>1,2,3</sup>, 张 强<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 天津 300072

<sup>2</sup> 天津大学光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072; <sup>3</sup> 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072

**摘要** 从耦合波方程出发, 对掺钕光纤激光器输出功率沿光纤的分布进行了数值模拟, 并对掺钕光纤激光器所需要光纤的最佳长度进行了分析。以 808 nm 半导体激光器为抽运源, 掺钕双包层保偏光纤为增益介质, 使用对 808 nm 高透, 1060 nm 高反的二色镜和垂直切割的光纤端面(4% 的非涅耳反射)构成法布里-珀罗(F-P)光学谐振腔, 对保偏光纤激光器进行了实验研究。实验中测量了掺钕光纤的荧光光谱, 并就不同抽运电流对激光器输出功率和偏振特性进行了研究, 在波长 1060 nm 处得到了 7.5 W 的激光输出, 斜率效率为 56%。

**关键词** 激光技术; 光纤激光器; 掺钕保偏光纤; 偏振

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Experimental Study on Polarization-Maintaining Fiber Laser

REN Guang-jun<sup>1,2,3</sup>, YAO Jian-quan<sup>1,2,3</sup>, WANG Peng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Laser and Opto-Electronics, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>3</sup> Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** By means of numerical analysis, based on the coupling wave function, the distribution of pump and output laser power along the fiber has been researched, and the optimal fiber length is calculated. The experimental research of the Nd<sup>3+</sup>-doped polarization-maintaining fiber laser is reported, which is pumped by 808 nm semiconductor laser. The dichroic mirror of high transission (HT) at 808 nm and high reflection (HR) at 1060 nm is employed to construct the Fabry-Perot (F-P) cavity with the vertically-cut fiber cross section (Fresnel reflectivity of 4%). The influences of pump current on output power and polarization characteristic of the laser are studied. The fluorescence spectrum of Nd<sup>3+</sup>-doped fiber is measured. The maximum output power of the laser is 7.5 W at 1060 nm, and the slope efficiency is 56%.

**Key words** laser technique; fiber laser; Nd<sup>3+</sup>-doped polarization-maintaining fiber; polarization

## 1 引 言

光纤激光器以其结构简单紧凑、体积小、工作稳定可靠、无须调试、光束质量好、易于集成等特点, 一直被人们认为是固体激光技术实用化的最佳选择。保偏光纤是在单模光纤纤芯的两侧加上足够的应

力, 使光纤在截面上的两互相垂直方向上产生大的传播常数差, 也即高的双折射, 从而实现其保偏性能<sup>[1,2]</sup>。它是研制军用光纤陀螺及其他相干光传感器的优选元件。保偏光纤主要结构有: 熊猫型光纤, 领结型光纤, 椭圆包层型光纤, 椭圆芯光纤等, 其中熊猫型保偏光纤因具备诸多优点而深得用户青睐。

收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(10474071)和高等学校博士学科点专项科研基金(20040056010)资助项目。

作者简介: 任广军(1963—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事光纤激光器、放大器以及偏光技术方面的研究工作。

E-mail: rgj1@eyou.com

导师简介: 姚建铨(1939—), 男, 上海人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为激光技术与非线性光学频率变换技术。E-mail: jqyao@tju.edu.cn

人们通常采用保偏光纤和附加的偏振器件共同作用, 或者在光纤上刻蚀布拉格光栅作为偏振选择元件的手段来实现保偏光纤激光器, 如冯新焕等提出了一种基于保偏光纤中布拉格光栅的波长间隔可调的可开关双波长掺铒光纤激光器<sup>[3~5]</sup>, 对于直接利用双包层掺杂保偏光纤实现保偏光纤激光器, 国内外对这方面的报道很少, 因而对这方面的研究具有积极的意义。本文利用熊猫型双包层掺铒保偏光纤为增益介质, 对掺铒光纤激光器进行了数值模拟, 并对保偏光纤激光器及其输出激光的偏振特性进行了实验研究。

## 2 光纤激光器数值模拟和分析

图 1 为光纤激光器的理论模型。设光纤长度为  $L$ , 纤芯掺杂  $\text{Nd}^{3+}$  离子的浓度为  $N_0$ , 抽运光从  $z = 0$  处耦合入光纤内包层, 沿内包层正向传播, 在到达  $z = L$  处经输出镜反射后再反向传播, 分别用  $P_p^+(z)$  和  $P_p^-(z)$  表示沿正反两个方向传播的抽运光的功率分布函数,  $P_s^+(z)$  和  $P_s^-(z)$  表示沿正反两个方向传播的运转光的功率分布函数,  $R_1$  和  $R_2$  分别为前端镜和后端镜对运转光的反射率,  $R_3$  为后端镜对抽运光的反射率<sup>[6,7]</sup>。

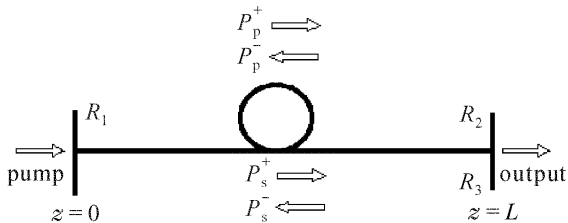


图 1 光纤激光器简化示意图  
Fig. 1 Schematic of fiber lasers

从光纤激光器的速率方程出发可得到信号光和抽运光的传播特性表达式<sup>[8~10]</sup>

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_s [\sigma_{as} N_0(z) + (\sigma_{as} + \sigma_{es}) N_2(z)] P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z), \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{ap} N_0(z) + (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z)] P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

(1), (2) 式联立构成微分方程组, 边界条件为

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L), \\ P_p^-(L) = R_3 P_p^+(L).$$

利用 MATLAB 软件求解该方程组的数值解, 通过改变方程中某个参量的值可分析该参量与激光

器最终输出功率的关系。

所用的掺  $\text{Nd}^{3+}$  光纤激光器的相关参数为:  $\lambda_p = 808 \text{ nm}$ ,  $\lambda_s = 1060 \text{ nm}$ ,  $\sigma_{as} = 1.4 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_{es} = 2.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_{ep} = 2.5 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_{ap} = 2.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $A = 1.96 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ ,  $N = 4.33 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_s = 5 \times 10^{-5}$ ,  $\Gamma_s = 0.82$ ,  $\Gamma_p = 16 \times 10^{-4}$ ,  $\alpha_p = 3 \times 10^{-5}$ ,  $R_3 = 0.04$ ,  $v = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $R_1 = 0.98$ ,  $\tau = 0.34 \times 10^{-3} \text{ s}$ ,  $R_2 = 0.04$ ,  $n_1 = 1.45$ ,  $n_0 = 1.474$ 。

利用方程(1), (2)及边界条件, 数值计算了抽运功率  $P_p^+(0) = 20 \text{ W}$ , 光纤长度  $L$  分别为  $10 \text{ m}$ ,  $15 \text{ m}$ ,  $20 \text{ m}$ ,  $25 \text{ m}$  和  $50 \text{ m}$  时的抽运功率及输出激光功率沿光纤分布的理论曲线, 如图 2 所示。从图 2 (a) 中可以看出, 随着光纤长度  $L$  的改变, 正向传播抽运光的功率在开始几米 (大约  $10 \text{ m}$ ) 内迅速下降, 说明被光纤的掺杂  $\text{Nd}^{3+}$  离子所吸收, 超过  $10 \text{ m}$  以后抽运光功率变化比较缓慢, 当光纤长度大于  $30 \text{ m}$  时, 正向输出的抽运光功率几乎为零, 说明几乎全部被光纤中的掺杂  $\text{Nd}^{3+}$  离子所吸收, 反向传输抽运光的功率很小。光纤长度小于  $10 \text{ m}$  时, 正向传播的激光在光纤内的功率分布曲线随  $L$  变化比较显著, 当光纤长度增大到  $20 \text{ m}$  时, 激光强度基本达到最大。若继续增加光纤长度, 输出激光的功率反而下降。可见存在一个最佳的光纤长度值使得输出激光达到最大的强度。对应于以上的参数, 从图中可获得对

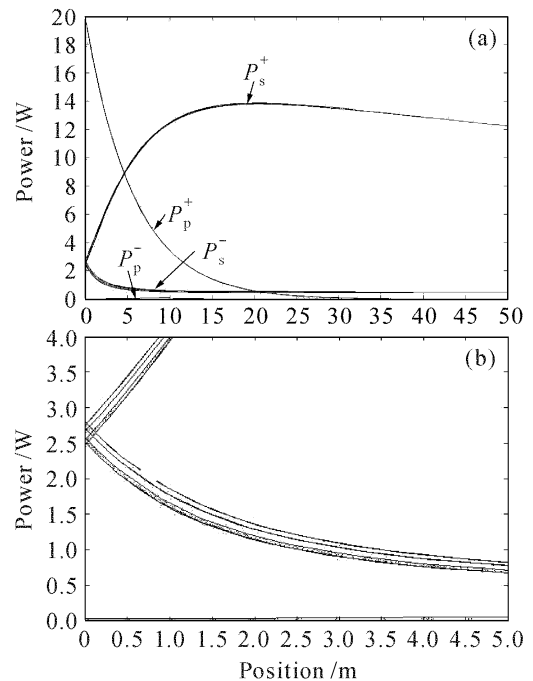


图 2 抽运功率及运转光功率沿光纤的分布曲线(a) 及其局部放大图(b)

Fig. 2 Distribution of pump and output laser power along fiber (a) and its enlarged detail (b)

应于20 W入纤功率时的最佳光纤长度为15 m。

### 3 实验装置

保偏光纤激光器的实验装置如图 3 所示,增益光纤为掺钕的双包层熊猫型保偏(PM)光纤(纤芯直径为5 μm,内包层直径为125 μm),长度为14 m,二色镜(对808 nm的抽运光高透,对1060 nm的信号光高反)和垂直切割的光纤端面(4%的非涅耳反射)构成法布里-珀罗(F-P)光学谐振腔。抽运源为带尾纤输出的多模大功率半导体激光器,输出激光中心波长为808 nm,抽运光经透镜组准直、聚焦后经二色镜耦合进入双包层保偏光纤,激光器的输出光谱特性使用 86142B 型光谱仪探测,输出功率用光功率计测量。

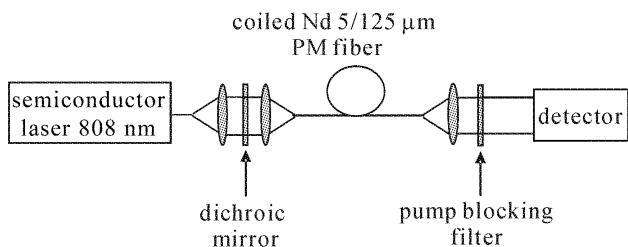


图 3 双包层保偏光纤激光器实验结构

Fig. 3 Experimental setup of double-clad polarization-maintaining fiber laser

### 4 实验结果与分析

利用 0.5 m 长的掺钕保偏光纤测量掺钕光纤的荧光光谱,调整光纤激光器整个系统,用光谱仪探测输出光的光谱,如图 4 所示。由图 4 可以看出,掺钕光纤在1060 nm附近有一个发射峰,并且808 nm的抽运光功率只能被光纤吸收一小部分。然后换上现有 14 m 长的掺钕保偏光纤,并在光路中加入对 808 nm高透,1060 nm高反的二色镜,逐渐增加抽运功率,当抽运电流达到9 A时,开始有激光输出,其峰值在1060 nm附近,随着抽运电流的增加,输出激光逐渐加强,其峰值波长逐渐移向1064 nm附近,当抽运电流达到25 A时,在1092 nm附近出现了第二个峰值,如图 5 所示。由于光纤纤芯很细,随着抽运功率的增高,非线性效应逐渐显著,第二个峰的出现是拉曼频移造成的,若通过镀膜选择合适的谐振镜,就可以得到比较好的双波长激光输出,从而制成双波长输出光纤激光器。

图 6 是输出激光在1060 nm和1092 nm附近的光谱图,可以看出1060 nm附近光谱的带宽接近

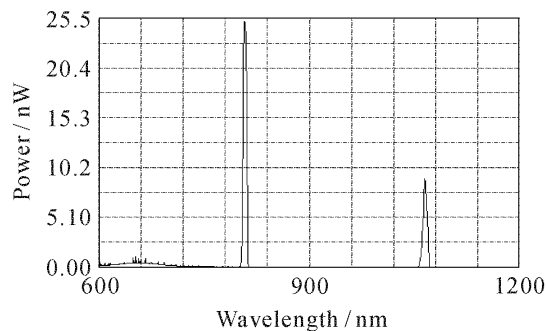


图 4 掺钕光纤的荧光光谱图

Fig. 4 Fluorescence spectrum of Nd<sup>3+</sup>-doped fiber

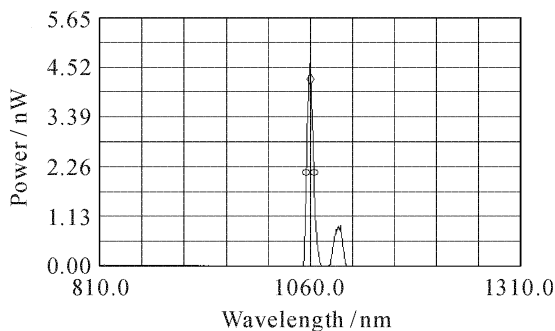


图 5 光纤激光器输出光谱图

Fig. 5 Spectrum of output laser

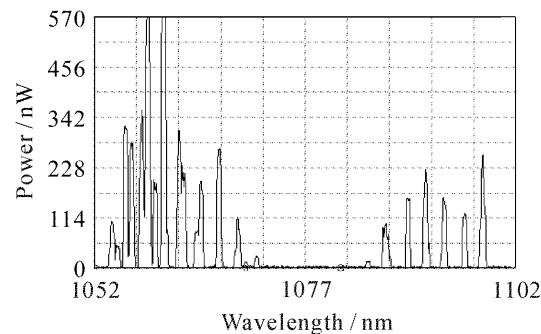


图 6 输出激光 1060 nm 和 1092 nm 附近光谱细微的结构

Fig. 6 Fine structure of spectrum of laser output at 1060 nm and 1092 nm

20 nm,1092 nm附近的光谱带宽亦达到十几纳米,此光纤激光器可作为宽带光源,有较大的应用前景。图 7 是光纤激光器输出功率随抽运电流的变化曲线,随着抽运电流的增加输出激光功率近似直线增加。增大抽运功率,在1060 nm处得到了7.5 W的最大功率输出,斜率效率为 56%。

利用格兰泰勒棱镜测量了输出激光的偏振度,测量时将经准直后的激光通过检偏镜,读出输出激光经过偏振镜后的读数,旋转检偏镜一周,读出两个最大值和两个最小值,求其平均算出最大值  $P_{max}$  和最小值  $P_{min}$ ,代入偏振度的定义式  $DOP = (P_{max} - P_{min}) / (P_{max} + P_{min})$ ,从而计算出输出激光的偏振

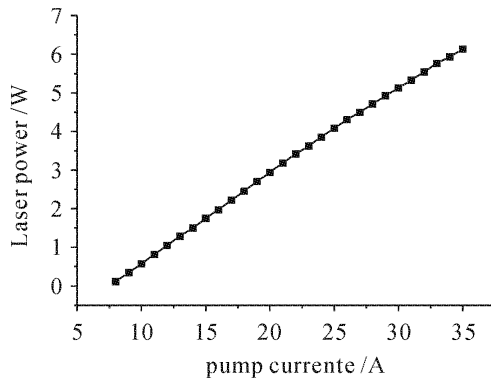


图 7 光纤激光器输出功率曲线图

Fig. 7 Output power curve of fiber laser

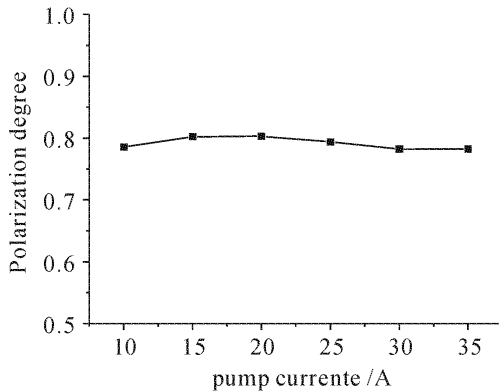


图 8 不同抽运电流下输出激光偏振度

Fig. 8 Polarization degree of output laser versus pump current

度。测出不同抽运功率时输出激光的偏振度,作出了输出激光偏振度与抽运电流的关系曲线,如图 8 所示。从图 8 可以看出,输出激光的偏振度基本保持不变。由于保偏光纤是在单模光纤纤芯的两侧加上足够的应力,使光纤在截面上的两互相垂直方向上产生大的双折射,从而产生保偏作用。在保偏光纤中,双折射效应越强,波长越短,保持传输光偏振态越好,不同的波长经过保偏光纤后对应不同的偏振态。然而,实验中应用的保偏光纤只有十几米长,并且输出多纵模激光的波长相差较小,它们在这一段光纤中偏振态的变化不很明显。在测量输出光偏振度时,选用了不同的输入抽运功率,在还未出现次峰 1092 nm 时测量的偏振度和加大功率出现 1092 nm 次峰后测量的输出激光偏振度变化很小,这与图 8 实验结果一致。

## 5 结 论

从耦合波方程出发,利用 MATLAB 对掺铒光

纤激光器的抽运和输出特性进行了数值模拟。以掺铒双包层保偏光纤为增益介质,利用法布里-珀罗腔对保偏光纤激光器进行了实验研究。实验中测量了掺铒光纤的荧光光谱、输出激光随抽运电流的变化关系以及激光的偏振度,并阐述了偏振度的测量方法。在波长 1060 nm 处得到了 7.5 W 的连续偏振激光输出,斜率效率为 56%。

## 参 考 文 献

- Chen Wei, Li Shiyu, Cheng Yu *et al.*. The technology progress and developing trends of polarization maintaining optical fibers [J]. *Study on Optical Communications*, 2003, (6):54~57  
陈伟,李诗愈,成煜等. 保偏光纤技术进展及发展趋势[J]. 光通信研究, 2003, (6):54~57
- Zhang Likun. Beat length measurement of polarization maintaining optical fiber [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 1997, (6):26~28  
张立昆. 保偏光纤拍长的测量[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1997, (6):26~28
- Feng Xinhuan, Sun Lei, Liu Yange *et al.*. Switchable and spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser using a PM fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):145~148  
冯新焕,孙磊,刘艳格等. 基于保偏光纤光栅的双波长掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(2):145~148
- Seungin Baek, Daniel B. S. Soh, Yoonchan Jeong *et al.*. A cladding-pumped fiber laser with pump-reflecting inner-cladding Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2):407~409
- Zhou Yingwu, Gao Kan, Huang Rui *et al.*. Study on the characteristics of long period grating in polarization maintaining fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1103~1106  
周赢武,高侃,黄锐等. 保偏光纤长周期光栅特性的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(9):1103~1106
- Qiang Zhang, Jianquan Yao, Peng Wang *et al.*. Power distribution in Yb<sup>3+</sup>-doped double-cladding fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6):468~470
- Wu Zilu, Chen Guofu, Wang Xianhua *et al.*. Numerical analysis of Yb<sup>3+</sup> doped double clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2):332~336  
武自录,陈国夫,王贤华等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的数值分析[J]. 光子学报, 2002, **31**(2):332~336
- Wei Wenlou, Yan Ping, Ou Pan *et al.*. Numerical analysis and experimental results of output characteristics for strongly pumped Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser [J]. *Optical Technique*, 2004, **31**(1):13~19  
韦文楼,闫平,欧攀等. 强泵浦下掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器输出特性数值分析和实验研究[J]. 光学技术, 2004, **31**(1):13~19
- Nam Seong Kim, Toshihiro Hamada, Mahendra Prabhu *et al.*. Numerical analysis and experimental results of output performance for Nd-doped double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **180**:329~337
- Zhang Minming, Liu Deming, Wang Ying *et al.*. Single-stage fiber Raman lasers for pumping fiber Raman amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1634~1638  
张敏明,刘德明,王英等. 用于光纤拉曼放大器抽运源的单级光纤拉曼激光器[J]. 光学学报, 2005, **25**(12):1634~1638