

文章编号: 0258-7025(2002)11-0965-04

# 光纤光栅选频掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器

宁 鼎<sup>1,3</sup>, 李朝辉<sup>1</sup>, 苏红新<sup>2</sup>, 黄榜才<sup>2</sup>, 丁 镭<sup>1</sup>, 吕可诚<sup>2</sup>, 袁树忠<sup>1</sup>, 董孝义<sup>1</sup>

(南开大学<sup>1</sup> 现代光学研究所, 物理学院, 天津 300071; <sup>2</sup> 信息产业部电子第 46 研究所, 天津 300220)

**摘要** 以波分复用器(WDM)光纤光栅和自行研制的掺 Yb<sup>3+</sup> 单模光纤, 采用新颖的全光纤连接方案, 实现了 1060 nm 窄线宽、线形腔激光器的成功运转。对不同长度掺镜光纤(YDF)所构成的激光器进行了实验研究, 发现 9 m 为最佳长度。入纤抽运阈值功率约为 30 mW, 当入纤功率达到最大值 42.8 mW 时, 得到最大激光输出 8.8 mW, 半宽 < 0.5 nm, 相对于入纤抽运功率的斜率效率为 70.4%。

**关键词** 光栅选频, 掺镜光纤, 光纤激光器

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Yb<sup>3+</sup>-doped Fiber Laser with Frequency Selecting by Fiber Bragg Grating

NING Ding<sup>1,3</sup>, LI Zhao-hui<sup>1</sup>, SU Hong-xin<sup>2</sup>, HUANG Bang-cai<sup>2</sup>,  
DING Lei<sup>1</sup>, LÜ Ke-cheng<sup>2</sup>, YUAN Shu-zhong<sup>1</sup>, DONG Xiao-yi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Modern Optics Institute, <sup>2</sup>Physics Science Academy, Nankai University, Tianjin 300071)  
(<sup>3</sup>Electronic 46th Institute, Ministry of Information Industry, Tianjin 300220)

**Abstract** Using a novel, all-fiber structure composed of WDM, fiber grating and home-made Yb<sup>3+</sup>-doped single-mode fiber, the F-P cavity laser operating at 1060 nm with narrow-FWHM is realized. Optimal length to be 9 m are found through the experiment for different length of the YDF. The threshold of launched pump power is 30 mW. When launched pump power is 42.8 mW, the maximum laser output is 8.8 mW with a FWHM < 0.5 nm. The slope efficiency is 70.4% with respect to the launched pump power.

**Key words** frequency selecting by grating, Yb-doped fiber, fiber laser

## 1 引 言

掺 Yb<sup>3+</sup> 石英光纤的能级结构相对来说比较简单, 在室温下 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 与 <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 两能级产生 Stark 分裂, 形成两个能级族。通过选择工作波长合适的抽运源, 能够实现 1010 ~ 1160 nm 之间的准四能级跃迁<sup>[1,2]</sup>。由于其具有以下特点: 增益带宽宽、波长可调谐范围大、无激发态吸收以及无浓度淬灭等, 因此掺 Yb<sup>3+</sup> 石英光纤激光器已引起了人们广泛的研究兴趣<sup>[2~5]</sup>。以半导体激光器(LD)抽运的、全光纤化的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器, 结构小巧、紧凑, 在惯性约束核聚变激光驱动器的前端系统等领域有潜在的应用前景。

## 2 光纤光栅选频的原理

对于均匀周期光纤布拉格(Bragg)光栅(FBG), 通过耦合模理论进行系统的理论分析<sup>[6]</sup>, 可以得出: 在其反射光谱中, 以 Bragg 波长为中心的反射峰 3 dB 带宽(FWHM)的表达式如下

$$\Delta\lambda = \lambda_{BS} \left[ \left( \frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}} \right)^2 + \left( \frac{\Lambda}{L} \right)^2 \right]^{1/2}$$

其中  $\Delta n$  为折射率调制的深度,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $\Lambda$  为光栅的周期,  $L$  为光栅长度。反射的中心波长  $\lambda_B = n_{\text{eff}}\Lambda$ 。对于反射率接近 100% 的强光栅,  $s \approx 1$ ; 对弱光栅来说,  $s \approx 0.5$ 。

收稿日期: 2001-08-14; 收到修改稿日期: 2002-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(69877006)及天津市自然科学基金(003600911)资助项目。

作者简介: 宁鼎(1959—), 男, 信息产业部电子第 46 研究所高级工程师, 博士, 主要从事光纤放大器、激光器以及特种光纤的研究。E-mail: ningding@eyou.com

由上可知,均匀光纤 Bragg 光栅的基本特性是以 Bragg 波长为中心的窄带光学滤波器,具有优异的选频作用。通过增加纤芯有效折射率或者在适当的长度上写入尽可能多的光栅条纹数(  $L/\Lambda$  ),可使反射带由宽变窄。如果在光纤激光器中采用光纤光栅作为腔镜来选频,较易得到线宽窄、功率高并且噪声低的激光输出。

### 3 实验

#### 3.1 激光器的构成

光纤激光器的结构如图 1 所示。由 LD 发出的抽运光,经过波分复用器(WDM)的端口 1 输入到与端口 3 相连的掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤(YDF)中,用一只 FBG 做腔镜,起反馈和选频的作用,它与 WDM 端口 2 的菲涅耳反射(约 4%)构成 F-P 腔,产生的激光从 WDM 的端口 2 输出。全光纤连接,接头损耗  $\leq 0.04$  dB。由 LP-3A 量热型光功率计测量输出功率、光栅光谱仪测量输出光谱(波长最小分辨率为  $0.1$  nm)。

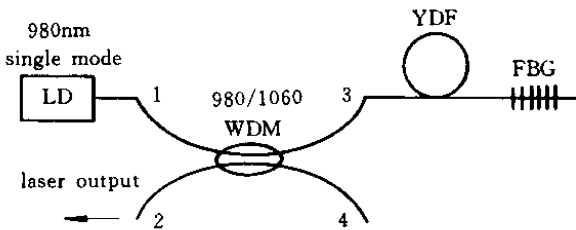


图 1 激光器结构图

Fig.1 Sketch map of the laser

其中,带尾纤的 LD 是中心波长为  $980$  nm 的商用产品。考虑到 YDF 在  $976$  nm 的吸收峰很窄( $\text{FWHM} \sim 8$  nm),为了提高 YDF 对抽运光的吸收效率,通过调节 LD 的温度来调节抽运光的中心波长。当控温电压从  $1.46$  V 提高到  $2.10$  V 时(降低节温),抽运光中心波长从  $980$  nm 向短波长移动  $2$  nm。图 2 中箭头方向为中心波长的移动方向,经调整后  $976$  nm 波长下的抽运光功率提高了  $10$  dBm。WDM 由厦门安特公司提供,  $980/1060$  nm 双波长,插入损耗  $\leq 0.08$  dB。当从端口 3 注入  $980$  nm 光功率时,由端口 1 输出,与端口 2 之间的隔离度为  $20.5$  dB;当注入  $1060$  nm 光功率时,由端口 2 输出,与端口 1 之间的隔离度为  $21$  dB。YDF 的有关参数如下:截止波长  $\leq 900$  nm,模场直径为  $5.0 \pm 0.5$

$\mu\text{m}$ ,掺  $\text{Yb}^{3+}$  浓度为  $0.24\text{wt.}\%$ 。FBG 的透射谱见图 3,中心波长为  $1060$  nm,反射率为  $20.6$  dB,相当于  $> 99\%$ ,FWHM 约为  $0.5$  nm。

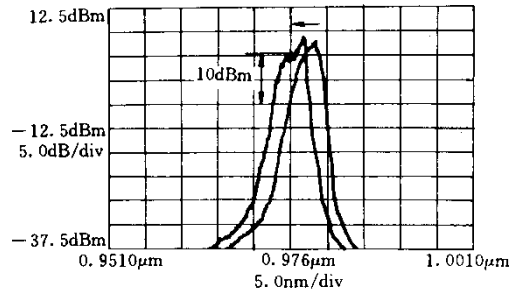


图 2 980 nm LD 的输出功率谱

Fig.2 Spectrum of the 980 nm LD

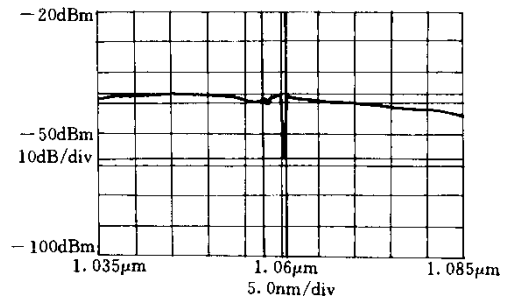


图 3 光纤布拉格光栅的透射谱

Fig.3 Transmissive spectrum of the FBG

#### 3.2 实验与结果

首先,将  $20$  m YDF 的一端与 WDM 的端口 3 连接,在另一端用光谱仪观测其荧光光谱(图 4)。由图可知: $\text{Yb}^{3+}$  离子的荧光光谱较为平坦,以  $1078$  nm 为中心,  $3$  dB 带宽达  $61.2$  nm。如果选用反射波长合适的 FBG 选频就可得到所需波长下的激光,还可以利用可调谐 FBG 制成宽波长范围的可调谐光纤激光器。

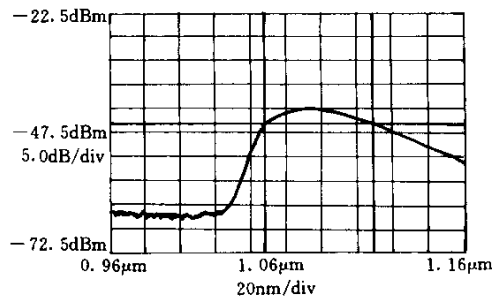


图 4 20 m YDF 的荧光光谱

Fig.4 Fluorescence spectrum of 20 m YDF

然后,在  $20$  m YDF 尾端连接一个 FBG 构成线形腔结构。利用其在  $1060$  nm 波长下高达  $99\%$  的

反射率,反馈激光能量并选频,由 WDM 端口 2 测量激光光谱和激光输出特性。对 20 m~7 m 之间,不同长度的 YDF 所构成的激光腔体进行了实验测量,发现激光的中心波长与 FBG 的反射中心波长重合,为 1060 nm。FWHM 很窄,均小于 0.5 nm。图 5 给出了 10 m、9 m 和 8 m YDF 在最大入纤抽运功率(42.8 mW)条件下的输出光谱,在激光波长 1060 nm 的峰高分别为:10.52、78.58 和 8.60  $\mu$ W。虽然,光谱仪给出的功率值仅作参考,但从相对的数量级上可以作出以下判断:9 m YDF 产生的激光最强为最佳长度,而 10 m 和 8 m YDF 激光较弱,不在最佳状态。图 6 给出 10 m 和 9 m YDF 激光器的激光

输出特性比较。其中 9 m YDF 的入纤抽运阈值功率约为 30 mW,当入纤功率达到最大值 42.8 mW 时,得到最大激光输出 8.8 mW,相对于入纤抽运功率的斜率效率为 70.4%。而 10 m YDF 的相应参数分别为:33 mW、4.6 mW 和 48%。其中,入纤抽运功率是通过测量与 WDM 端口 3 相连的短段(0.09 m)YDF 的输出功率获得的,由于 0.09 m 仅为 9 m YDF 长度的 1%,其吸收可以忽略不计。图 7 为 9 m YDF 的激光输出光谱,激光的中心波长为 1060 nm,FWHM 约为 0.4 nm。输出激光的空间模式为基横模。

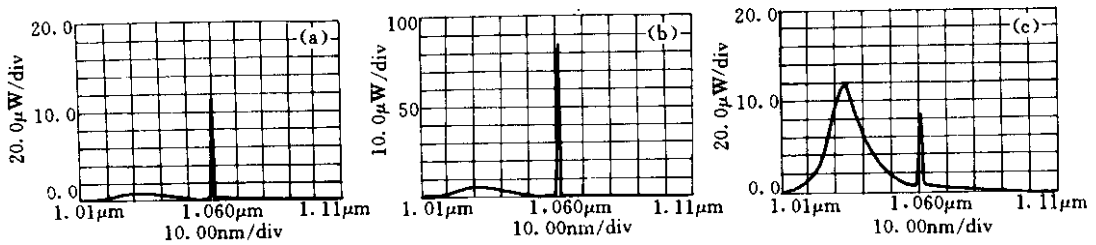


图 5 (a) 10 m、(b) 9 m 和 (c) 8 m YDF 的激光光谱比较

Fig.5 Comparison of laser spectrum of 10 m, 9 m and 8 m YDF

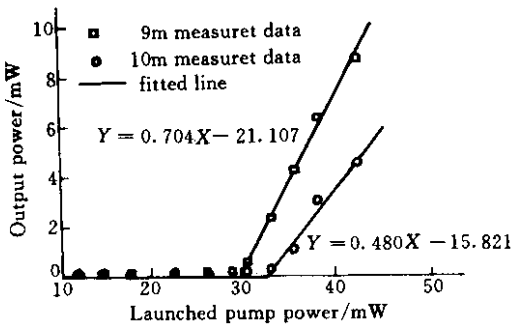


图 6 10 m 和 9 m YDF 的激光输出特性

Fig.6 Laser output of 10 m and 9 m YDF

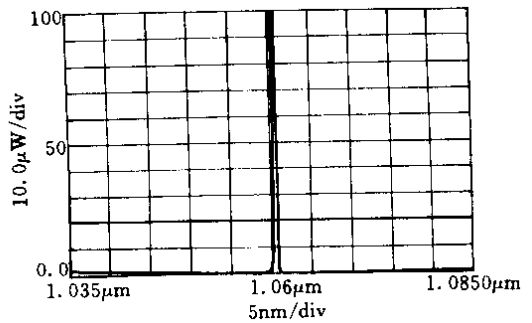


图 7 9 m YDF 激光器的激光输出光谱

Fig.7 Laser output spectrum of 9 m YDF laser

### 4 分析与结论

在以前的工作中<sup>[2-5]</sup>,YDF 线形腔激光器普遍采用二向色镜作腔镜。因此,激光的 FWHM 较宽,通常为 ~3 nm。本文的工作中,使用了一个反射率高达 99%,FWHM ≤ 0.5 nm 的 FBG 作腔镜,利用其窄带滤波器特性来选频。所以,只有以 1060 nm 为中心、极窄的波长范围内的受激辐射光才能得到反馈,并在腔中形成激光。使得 1060 nm 激光输出的 FWHM 压窄至 0.4 nm,比二向色镜作腔镜的方案降低了近一个数量级。

越大则最佳光纤长度越长。当抽运光功率一定,增益光纤长度增大到某一数值时,抽运光将被完全吸收。若增益光纤长度超过这一数值,将有一段光纤没有得到抽运,这段光纤将对信号激光产生损耗,使激光输出降低、FWHM 变宽。若增益光纤长度小于这一数值,抽运光没有被完全吸收,激光输出也不能达到最大。因此,当抽运光功率一定时,存在一个最佳光纤长度。从不同长度 YDF 激光器的实验数据来看,当 YDF 的长度为 9m 时具有较小的入纤抽运阈值功率、最大的激光输出功率和斜率效率。因此,可以认为:使用自行研制的 YDF 在现有实验条件

最佳光纤长度与抽运光功率有关,抽运光功率

下, 9 m 是线形腔 YDF 激光器的最佳长度。

由实验得到的入纤抽运阈值功率比较高, 分析认为: 是因为激光器的腔内损耗较高造成的。腔内损耗主要来自 WDM 器件和作为输出腔镜的光纤自然解理面(反射率约为 4%), 因输出腔镜的反射率太小, 故激光器表现为一个高损耗腔。

在今后的实验中, 如果采用中心波长与 YDF 吸收峰的中心波长(976 nm)互相重合的抽运光源, 则 YDF 对抽运光的利用效率会进一步提高, 从而提高 1060 nm 的激光输出功率。

由于采用了形式新颖的、全光纤连接的 YDF 激光器线形腔方案, 不仅避免了复杂的光路调整、减小了系统各部分的耦合损耗, 而且结构小巧、紧凑, 对温度与震动的稳定性好, 使得 YDF 激光器的研究朝着实用化的方向迈出了重要的一步。

#### 参 考 文 献

1 R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper *et al.*.

Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7):1049 ~ 1056

2 D. C. Hanna, R. W. Percival, I. R. Perry *et al.*. An ytterbium-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from 1.010  $\mu\text{m}$  to 1.162  $\mu\text{m}$  and three-level operation at 974 nm [J]. *J. Mod. Opt.*, 1990, **37**(4): 517 ~ 525

3 C. J. Mackechnie, W. L. Barnes, D. C. Hanna *et al.*. High power ytterbium( $\text{Yb}^{3+}$ )-doped fiber laser operating in the 1.12  $\mu\text{m}$  region [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 52 ~ 53

4 Hua Renzhong, Chen Lanrong, Lu Qirong *et al.*. Operation of a ytterbium-doped fiber laser pumped by Ti:sapphire laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(9): 781 ~ 784 (in Chinese)

5 Chen Bai, Chen Lanrong, Fan Wei *et al.*. Study of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped ring and line cavity fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(2): 116 ~ 118 (in Chinese)

6 Jin Fahong, Dong Xiaoyi, Liu Zhiguo *et al.*. Theoretical analyses of fiber Bragg gratings [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1996, **25**(9): 809 ~ 812 (in Chinese)