

# 基于光纤光栅的高功率光纤激光器\*

胡贵军<sup>1,2</sup> 潘玉寨<sup>1</sup> 郭玉彬<sup>2</sup> 张亮<sup>1</sup> 张军<sup>1</sup> 王立军<sup>1</sup>

(1 中科院长春光学精密机械与物理研究所激发态开放实验室, 长春 130022)

(2 吉林大学通信工程学院, 长春 130012)

**摘要** 分析了光纤光栅的选频原理以及光纤光栅基高功率光纤激光器的阈值特性和输出特性. 采用紫外写入的光纤光栅做谐振腔, 研制了全光纤结构的高功率光纤激光器, 泵浦阈值为186mW, 最大输出功率1.78 W, 斜率效率59%, 实验结果与理论分析基本吻合.

**关键词** 光纤激光器; 光纤光栅; 高功率; 双包层

**中图分类号** TN248; TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

制备合适的光学谐振腔是高功率光纤激光器实用化的关键技术之一. 通常, 可以采用二色镜或在光纤端面镀膜构成谐振腔<sup>[1,2]</sup>, 这两种方法给泵浦光的耦合以及光纤激光器的封装都带来很大困难, 不利于光纤激光器的实用化和商品化. 另外也可以采用光纤光栅做谐振腔<sup>[3,4]</sup>. 光纤光栅是一种低损耗器件, 具有非常好的波长选择特性, 光纤光栅的采用简化了激光器的结构, 同时提高了激光器的信噪比和可靠性, 窄化了线宽, 提高了光束质量, 而且, 通过应力调节可以进行波长调谐. 采用光纤光栅做谐振腔可以将泵浦源的尾纤经锥形光纤与增益光纤有机地熔接为一体, 避免用二色镜和透镜组提供激光反馈带来的损耗, 从而降低光纤激光器的阈值, 提高输出激光的斜率效率. 因此, 采用光纤光栅做谐振腔不仅使光纤激光器的结构简单、紧凑, 而且大大提高了泵浦光的耦合效率, 有利于实用化. 本文分析了光纤光栅的选频原理, 并采用紫外写入的光纤光栅做谐振腔, 研制了全光纤结构的高功率光纤激光器, 最大输出功率为1.78 W, 斜率效率59%.

## 1 光纤光栅的选频原理分析

图1是周期为 $\Lambda$ 的光纤布喇格(Bragg)光栅的结构示意图. 当入射光波长满足 Bragg 反射条件时, 部分正向传输的光波被耦合为反向传输模, 并沿

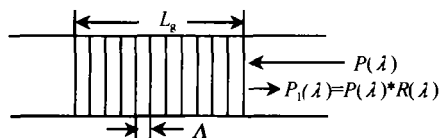


图1 光纤光栅结构  
Fig.1 Schematic diagram of fiber grating

原光路返回. 在弱耦合条件近似下, 光纤光栅的反射率可以表示为<sup>[5]</sup>

$$R(\lambda) = \begin{cases} \frac{k^2 \sinh^2(SL_g)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL_g) + S^2 \cosh^2(SL_g)} & (k^2 > \Delta\beta^2) \\ \frac{k^2 \sin^2(QL_g)}{\Delta\beta^2 - k^2 \cos^2(QL_g)} & (k^2 < \Delta\beta^2) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $L_g$  为光纤光栅的长度,  $k$  为耦合系数,  $S = (k^2 - \Delta\beta^2)^{1/2}$ ,  $Q = (\Delta\beta^2 - k^2)^{1/2}$ ,  $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = 2n\pi/\lambda - 2n\pi/\lambda_B$ ,  $\lambda$  为光波波长,  $\lambda_B = 2n\Lambda$  为布喇格光栅的中心波长.

两根中心波长相同的布喇格光纤光栅和一段增益光纤便构成高功率光纤激光器的线形谐振腔, 如图2所示,  $P_+(Z)$  和  $P_-(Z)$  分别为沿正反两个方向传播的激光. FBG1为输入光栅, 对泵浦光是透明的. 泵浦光经 FBG1 进入增益光纤, 在增益光纤中形成粒子数反转产生受激发射光. 再经 FBG1 和 FBG2 共同构成的谐振腔进行选频, 得到所需波长的激光输出.

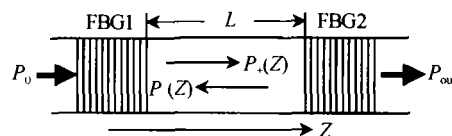


图2 光纤光栅谐振腔  
Fig.2 Schematic diagram of fiber grating Fabry-Perot cavity

由式(1)可知, 光纤光栅的反射率与光波的波长有关, 其反射谱如图3所示. 当光波波长偏离光纤光栅的中心波长时, 反射率下降, 偏离程度越大, 反射率降低越严重. 只有波长接近光纤光栅中心波长的光波才能在谐振腔内形成反馈, 实现光放大, 得到稳定的激光输出. 对于高功率光纤光栅型光纤激光器, FBG2 起到选择激光波长和输出耦合器的作用, 产生的激光波长由 FBG2 反射谱中最高点所决定, 而输出激光的线宽取决于 FBG2 反射谱的带宽. 因此, 通过选择 FBG 的中心波长和控制其反射峰的

\* 中科院创新基金资助  
Tel: 0431-5171693 Email: huguijun@sina.com  
收稿日期: 2002-05-19

带宽,可以实现对不同波长光波的选择,并能够获得窄线宽的激光输出.

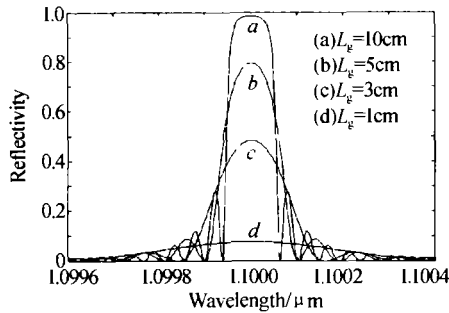


图3 光纤光栅的反射谱  
Fig. 3 Reflection spectrum of fiber grating

### 2 光纤激光器的输出特性

设 FBG1 和 FBG2 对激光光的反射系数分别为  $R_1$  和  $R_2$ ,增益光纤的长度为  $L$ ,则线形腔掺镱双包层光纤激光器的泵浦阈值和输出光功率可以表示为<sup>[6]</sup>

$$P_{th} = \frac{\sigma_a^p \eta_p N_1 L - \beta}{1 - \exp(-\beta)} P_p^s \quad (2)$$

$$P_{out} = \frac{(1 - R_2) P_p^s}{1 - R_2 + \sqrt{R_2/R_1} - \sqrt{R_1 R_2}} \cdot \left[ \frac{P_0}{P_p^s} (1 - \exp(-\beta) - \beta + \sigma_a^p \eta_p N_1 L) \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \right] \quad (3)$$

其中

$$\beta = \frac{\sigma_a^p \eta_p N_1}{\sigma_a^s + \sigma_e^s} (\sigma_e^s L + \frac{\ln R_1 R_2}{2 N_1 \eta_s});$$

$$P_p^s = \frac{hcA}{(\sigma_a^p + \sigma_e^p) \tau \eta_p}; \eta_p = \frac{S_d}{S_{ic}} \quad (4)$$

式中,  $P_0$  为输入的泵浦光功率,  $N_1$  为纤芯的掺杂浓度,  $\lambda_s$  和  $\lambda_p$  为激光光和泵浦光的波长,  $S_d$  为纤芯的横截面积,  $S_{ic}$  为内包层的横截面积,  $\sigma_a^s$  和  $\sigma_e^s$  分别为激光光的吸收和发射截面,  $\sigma_a^p$  和  $\sigma_e^p$  分别是泵浦光的吸收和发射截面,  $h$  为普朗克常数,  $A$  为纤芯的有效面积.

图4给出了不同光纤长度下泵浦阈值与 FBG2 反射率( $R_2$ )间的关系,计算所选参量分别为<sup>[7]</sup>  $\sigma_a^s = 1.0 \times 10^{-26} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_e^s = 2.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_a^p = 2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_e^p = 2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ,  $\lambda_s = 1099 \text{ nm}$ ,  $\lambda_p = 970 \text{ nm}$ . 可以看出,增益光纤长度对光纤激光器的泵浦阈值影响较大,随着光纤长度的增加,泵浦阈值明显变大. 在特定光纤长度下,泵浦阈值随  $R_2$  的增大而减小. 图5所示为输出光功率随光纤长度变化的情况,结果表明,当增益光纤长度较小时,输出功率随光纤长度变化很明显,而当光纤达到某一长度时,输出功率趋于饱和,光纤的最佳长度在 20 m 左右;对于特定的光纤长度,输出功率随着  $R_2$  的增加而降低. 图6为

不同  $R_2$  条件下(光纤长度为 20 m),输出光功率与泵浦光功率之间的关系曲线,可见,  $R_2$  增大,光纤激光器的斜率效率随之降低.

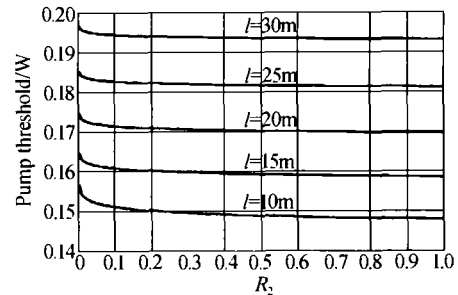


图4 泵浦阈值与  $R_2$  间的关系曲线  
Fig. 4 Threshold pump power as a function of  $R_2$

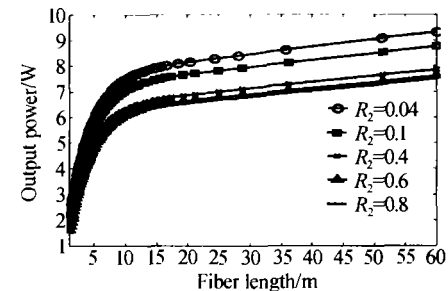


图5 输出光功率与光纤长度的关系  
Fig. 5 Output power as a function of fiber length

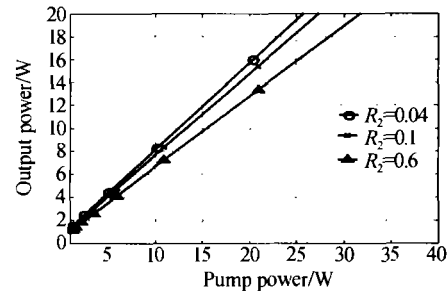


图6 输出功率与泵浦功率间的关系  
Fig. 6 Output power as a function of pump power

由图5,6可知,在某一光纤长度下,小的  $R_2$  将有利于提高光纤激光器的斜率效率和输出光功率. 而由图3又知,光纤光栅的反射率越小,其反射谱的宽度越宽. 因此,选择低反射率的 FBG2,虽然可以获得较大的斜率效率和高的激光输出,但很难得到窄线宽的激光输出. 提高 FBG2 的反射率,虽然降低了斜率效率,减小了输出光功率,但通过控制 FBG2 的反射谱宽度,可以实现窄线宽的激光输出. 因此,以较少的能量损失换取窄线宽输出,使光纤激光器的综合指标最佳,更具有实用性.

### 3 实验结果

实验装置如图7所示. 泵浦源为大功率 LD 光纤输出模块,输出光纤直径为 400  $\mu\text{m}$ ,输出中心波长为 970 nm. 双包层增益光纤为 Fibercore 公司生产的 CP1100 光纤,纤芯直径 5  $\mu\text{m}$ ,数值孔径  $NA = 0.15$ ,内包层为梅花型,数值孔径  $NA = 0.22$ ,光纤长

度为 20 m. 在实验中采用了锥形光纤, 实现了光纤之间的低损耗连接, 锥形光纤的长度为 2 m, 传输效率 90%. 光纤光栅采用相位掩模法在双包层光敏光纤上制作而成, 然后与双包层增益光纤熔接在一起. 输入光栅 FBG1 的中心波长为 1099 nm, 对泵浦光的透过率大于 99%, 对 1099 nm 波长光的反射率大于 99%. FBG2 的反射率为 60% (在波长 1099 nm 处).

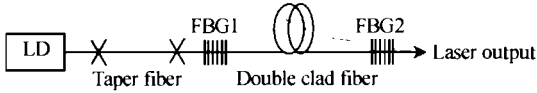


图 7 基于光纤光栅高功率光纤激光器

Fig. 7 High power fiber laser based on fiber grating

光纤激光器输出特性如图 8 所示. 泵浦阈值功率 186 mW, 入纤功率为 3 W 时, 最大输出功率为 1.78 W, 斜率效率为 59%. 由前面的计算可知, 当  $L = 20\text{m}$ ,  $R_1 = 0.99$ ,  $R_2 = 0.6$  时, 激光器的泵浦阈值和

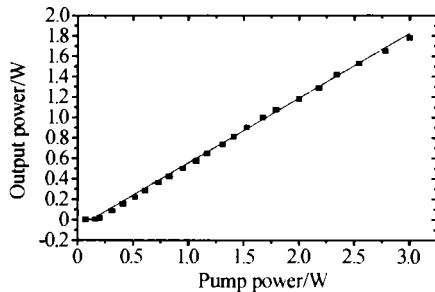


图 8 输出功率与泵浦功率的关系曲线

Fig. 8 Output power as a function of pump power

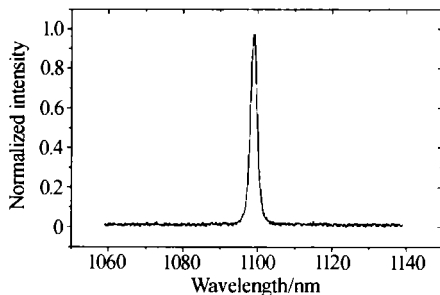


图 9 光纤激光器的输出光谱

Fig. 9 Output spectrum of fiber laser

斜率效率分别为 170 mW 和 64% (如图 4, 6 所示), 可见理论与实验基本吻合. 图 9 所示为光纤激光器的输出光谱, 中心波长 1099 nm, 谱宽为 0.6 nm.

## 4 结论

本文分析了光纤光栅的选频特性, 对基于光纤光栅的高功率光纤激光器的阈值特性和输出特性进行了讨论. 结果表明, 光纤激光器的泵浦阈值随光纤长度的增加而增大, 随  $R_2$  的增大而减小; 在一定的光纤长度下, 斜率效率随  $R_2$  的增大而减小. 采用紫外写入的光纤光栅做谐振腔, 研制了全光纤结构的高功率光纤激光器, 泵浦阈值为 186 mW, 当入纤功率为 3 W 时, 获得最大输出功率为 1.78 W, 斜率效率 59%, 实验结果与理论分析基本吻合.

## 参考文献

- 1 Glas P, Naumann M, Schirmacher A, et al. A high power neodymium-doped fiber laser using a novel fiber geometry. *Opt Communications*, 1997, **141**(9):336 ~ 342
- 2 Dominic V, Maccormack S, Waarts R, et al. 110 W fiber laser. *Electron Lett*, 1999, **35**(14):1158 ~ 1160
- 3 Gapontsev V. Fiber lasers grow in power. *Laser Focus World*, 2002, **38**(8):83 ~ 87
- 4 Kurkov A S, Laptev A Y, Dianov E M, et al.  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fibers and lasers. *Proceeding of SPIE*, 2000, **4083**:160 ~ 169
- 5 Bennion I, Williams J A R, Zhang L, et al. UV-written in-fiber Bragg gratings. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, **28**(2):93 ~ 135
- 6 Lu F, Fan Y, Hu S, et al. Output characteristics of high power double-clad fiber laser. *Proceeding of SPIE*, 2002, **4914**:349 ~ 352
- 7 Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, et al. Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE J Quantum Electronics*, 1997, **33**(7):1049 ~ 1056

## High-power Fiber Laser Based on Fiber Grating

Hu Guijun<sup>1,2</sup>, Pan Yuzhai<sup>1</sup>, Guo Yubin<sup>2</sup>, Zhang Liang<sup>1</sup>, Zhang Jun<sup>1</sup>, Wang Lijun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China

<sup>2</sup> College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

Received date: 2002-05-19

**Abstract** The characteristic of fiber grating for selecting wavelength is analyzed; the threshold and output characteristics of high-power fiber laser are discussed. By using fiber grating as Fabry-Perot cavity, a high-power fiber laser is developed. The threshold pump power is 186 mW, the max. output power is measured as 1.78 W at 1099 nm with absorbed pump power of 3W, the slope efficiency is 59%. Experimental results are in accord with theory.

**Keywords** Fiber lasers; High-power; Fiber grating; Double clad



**Hu Guijun** was born on March 9, 1970, in Liaoning Province, China. He received the B. S. degree and M. S. degree from Northeast Normal University in 1993 and 1996, respectively. He received Ph. D. degree in the Department of Electronic Engineering of Jilin University in 2001. Now he is working as postdoctoral fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests are high power fiber laser.