

文章编号: 0258-7025(2004)02-0133-04

# 一种实用化的高功率低噪声波长连续可调 光纤激光器

贾宝华, 盛秋琴\*, 陈凯, 韩军, 董孝义

(南开大学物理科学学院光电信息科学系, 天津 300071)

**摘要** 报道了一种基于光纤光栅(FBG)的高功率可调谐环形腔掺铒光纤激光器。该激光器由980 nm激光二极管(LD)抽运,在1562 nm波段获得了线宽小于0.04 nm的激光输出,调谐范围可达4.6 nm,输出波长复现性误差小于0.08 nm。由于铒光纤选择了最佳长度,并在光纤环路中引入两个隔离器抑制噪声,提高了信噪比,激光器输出的最大功率可达4.28 mW,此时功率稳定性为 $\pm 0.03$  dB,斜率效率为7.3%。

**关键词** 光电子学; 环形腔光纤激光器; 光纤光栅; 掺铒光纤; 可调谐

中图分类号 TN 248 文献标识码 A

## A Practical Wavelength Continuously Tunable Fiber Laser with High-Powered and Low-Noise

JIA Bao-hua, SHENG Qiu-qin, CHEN Kai, HAN Jun, DONG Xiao-yi

(Department of Photoelectricity Information Science of Physics Institute, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** A high-powered tunable Er-doped fiber ring laser, based on FBG (fiber Bragg grating), is reported in this article. It was pumped by 980 nm-laser diode. The line width of the output laser was less than 0.04 nm in 1562 nm band, and the tunable span was 4.6 nm. The reappearance error was less than 0.08 nm. By way of the selection of the optimum length of the Er-doped fiber and the introduction of the double isolators, the signal to noise ratio was improved. As a result, the maximum output power of the laser was 4.28 mW, while the stability of the power was 0.03 dB, and slope efficiency was 7.3%.

**Key words** optoelectronics; fiber ring laser; fiber Bragg grating (FBG); Er-doped fiber; tunable

### 1 引言

基于光纤光栅(FBG)的光纤激光器是光纤通信系统中一种非常有前途的光源,它的优点主要体现在:1) 稀土掺杂光纤激光器利用光纤光栅能非常准确地确定波长,成本很低;2) 用作增益的稀土掺杂光纤制作工艺比较成熟,稀土离子掺杂过程简单,光纤损耗小,插入损耗低;3) 石英的热系数很小,激光振荡波长十分稳定;4) 光纤光栅激光器具有波导式光纤结构,可以在光纤芯层产生较高的功率密度,光

纤结构具有较高的面积-体积比,因而散热效果好;与标准通信光纤的兼容性好,可采用多种光纤元件,减小了对块状光学元件的需求和光路机械调谐的不便,极大地简化了光纤光栅激光器的设计及制作;5) 宽带是光纤通信的主要发展趋势之一,而光纤光栅激光器可以通过掺杂不同的稀土离子,在380~3900 nm的宽带范围内实现激光输出,波长选择容易且可调谐;6) 高频调制下的频率啁啾效应小,抗电磁干扰;7) 光纤激光器的阈值很低<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2002-07-09; 收到修改稿日期: 2002-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60137010)。

作者简介: 贾宝华(1977—),女,南开大学物理科学学院光电信息科学系硕士研究生,主要从事光纤光栅及光纤通信系统方面的研究工作。

\* 通信联系数据: 南开大学物理学院, E-mail: shengqq@nankai.edu.cn

由于有以上的优点,光纤激光器,尤其是可调谐光纤激光器一直是近年来的研究热点<sup>[2]</sup>。本文研制了一种高功率、低噪声、波长连续可调的光纤激光器,用一种简便小巧的悬臂梁对光纤光栅进行调谐,实现了窄线宽可调谐激光输出。由于我们利用数学模型选择了最佳的铒光纤长度(增益相对大,损耗相对小),并通过添加隔离器的方法抑制了噪声,该光纤激光器具有功率高、阈值低、线宽窄、性能稳定等优点。针对其唯一的问题——功率在长波方向有所下降进行了分析并给出了合理的解释。

## 2 设计原理

光纤光栅悬臂梁调谐装置如图 1 所示,光纤光栅固定在 65 mm 长的悬臂梁上,梁为直线型,横截面不变,其一端固定,另一端为自由端,可随步进装置移动。步进装置采用螺纹调节器进行细微调谐,螺纹间距为 0.75 mm,自由端横向移动范围为 ±5 mm。

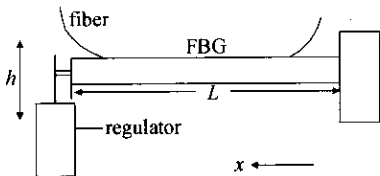


图 1 悬臂梁光纤光栅调谐装置示意图  
Fig. 1 Schematic of FBG tuning device with cantilever beam

若将光纤光栅粘贴在梁上距固定端  $x$  处,并假定其与梁之间为刚性连接,则由材料力学和光纤光栅知识可得 FBG 的相对波长变化为<sup>[3]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \frac{(L - x)zP}{EI} \quad (1)$$

其中  $P_e$  为有效弹光系数  $P_e = 0.22$ <sup>[4]</sup>  $L$  为梁的长度  $z$  为 FBG 距中性面的距离  $E$  为材料的杨氏模量,  $I$  为梁的惯力矩  $P$  为作用在 FBG 自由端的力  $\lambda_B$  为 FBG 的中心波长。梁在受载荷作用时,作用点的位移为<sup>[5]</sup>

$$h = \frac{PL^3}{3EI} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式并整理得 FBG 反射波长随  $h$  的变化为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e) \frac{3(L - x)z}{L^3} \lambda_B h \quad (3)$$

当 FBG 粘贴于梁上时,上式中除  $\Delta\lambda_B$  和推进量外的

各个参数都是固定的,因此由(3)式可得  $\Delta\lambda_B$  与推进量成线性关系。

光纤激光器的原理图如图 2 所示,980 nm LD 激光经 980/1550 nm 合波器进入铒光纤,铒光纤的长度是经过数学模拟精确选择的最佳长度<sup>[6]</sup>,其后的隔离器的作用是减小端面反射引起的激光输出的不稳定。耦合器的最佳耦合比 30:70<sup>[7]</sup>是根据理论计算及实验结果选择的。光纤光栅作为反馈选频元件,其中心波长为 1562.57 nm,反射率为 96%,半宽度为 0.17 nm,粘贴前后其中心波长和半宽均无变化,并且在调谐过程中无啁啾。耦合器的一端与波分复用器(WDM)相连形成环路作为光纤激光器的反馈回路。

实验中所用的抽运源是单纵模激光二极管(LD),其中心波长为 980.452 nm,尾纤的最大输出功率为 80 mW。输出激光光谱及  $P-I$  曲线如图 3 所示。由于尾纤中引入了光纤光栅,LD 输出激光的线宽较窄(0.359 nm),而且功率稳定。从图 4 可以看出其  $P-I$  曲线的线性度很好,方差为 0.0005。

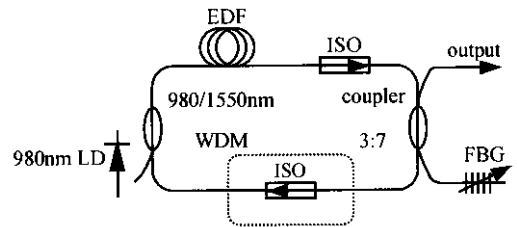


图 2 可调谐环形腔掺铒光纤激光器结构示意图  
Fig. 2 Schematic of tunable Er-doped fiber ring laser

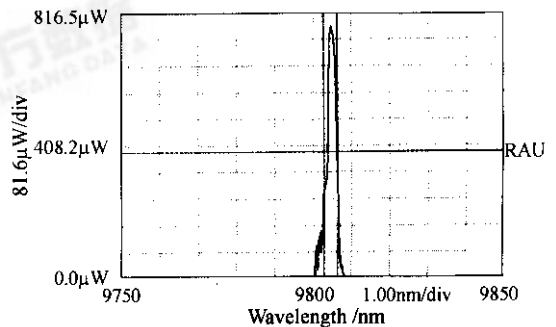


图 3 980 nm LD 输出的激光光谱图  
Fig. 3 Spectrum of the output of 980 nm laser diode

## 3 实验结果

### 3.1 光纤光栅处于自由状态时的实验结果

当光纤光栅处于自由状态时,掺铒光纤激光器(EDFL)的抽运功率与输出功率的关系如图 5 所示,输出激光的线形如图 6 所示。由图 5 可以看到,当

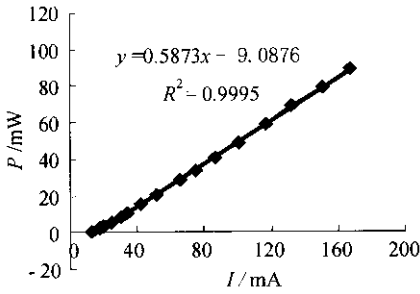


图4 980 nm LD 的 P-I 曲线

Fig.4 P-I curve of 980 nm laser diode

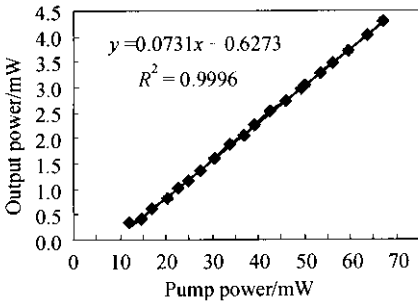


图5 EDFL 抽运功率和输出功率的关系曲线

Fig.5 Curve of the relation between the pump power and the output

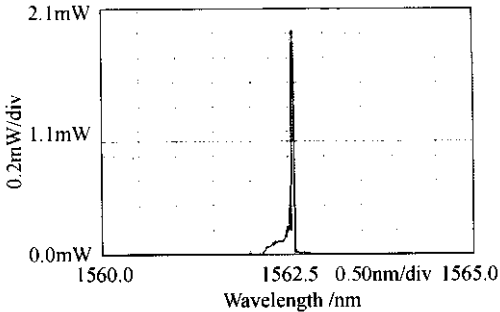


图6 EDFL 输出的激光光谱图

Fig.6 Output spectrum of EDFL

抽运功率为 66.91 mW 时(为了保护 LD 没有选择更高功率),激光器的最大输出功率可达 4.28 mW,功率稳定性为  $\pm 0.03$  dB(时间和温度稳定性),波长稳定性为  $\pm 0.01$  dB,斜率效率达到 7.31%。输出功率的线性度很好,方差为 0.0004。图 6 是抽运功率为 35.28 mW 时输出的激光光谱图,其峰值功率为 1.952 mW,激光的线宽小于 0.04 nm。

### 3.2 实验装置的优化

高速、大容量光纤通信系统对激光器的信噪比提出了更高的要求,因此如何抑制噪声提高掺铒光纤激光器的信噪比成为一个非常重要的问题。实践证明消除激光器自身的放大自发辐射(ASE)噪声即

可达到这个目的。为此,在原有的环形腔激光器的基础上插入了另一个隔离器,如图 2 中虚线部分所示。由于 ASE 在腔内是双向传播的,因此如果没有虚线内的隔离器,环形腔内将有大量的 ASE 沿着与激光振荡相反的方向从耦合器输出,形成噪声。引入的隔离度高达 50dB 的隔离器,几乎可以完全消除反向 ASE 的影响,提高了激光器的信噪比,如图 7 所示。比较 (a) (b) 两图可以发现,引入隔离器后,虽然 ASE 的整体水平被压低,但由于噪声减弱,功率更为集中,因此输出的激光峰值功率反而有所增强,激光线宽被压窄,激光器的信噪比明显提高(达 7.2 dB,由 41.7 dB 提高到 48.9 dB)。

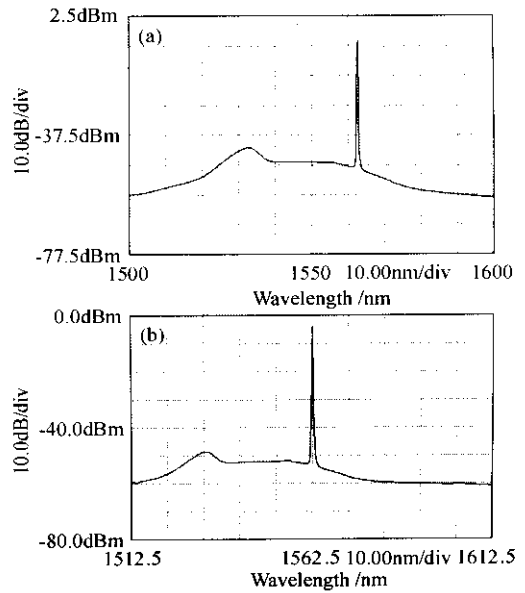


图7 实验装置优化前后激光器输出的激光光谱 (a)加入隔离器前 (b)加入隔离器后

Fig.7 Output spectrum of EDFL before and after the optimization of the instrument

(a) before ISO is added ;(b) after ISO is added

### 3.3 波长连续可调 EDFL 的实验结果

#### 3.3.1 步进装置调谐量和光纤光栅波长变化关系

由(3)式可知光纤光栅中心波长的变化在理论上应与调谐量呈线性关系。实验中利用悬臂梁对光纤光栅进行了 4.6 nm 的调谐(为了在实际使用中保护光栅,因而没有设定大范围的调谐量),调谐量与工作波长之间的关系如图 8 所示。波长的调谐范围为 1560.4 ~ 1565 nm,调谐过程中波长复现性误差小于 0.08 nm,在此调谐范围内调谐量和中心波长呈较好的线性关系,线性拟合度达 0.9989,和理论推导相符。

#### 3.3.2 输出激光的功率特性

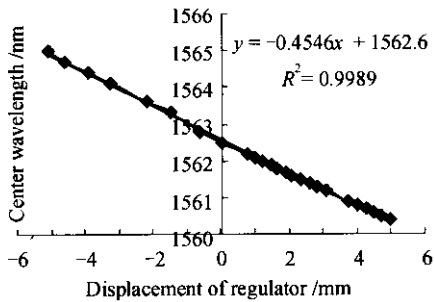


图 8 调谐装置的推进量与 FBG 中心波长的关系曲线

Fig. 8 Relationship between the displacement of regulator and the center wavelength of the FBG

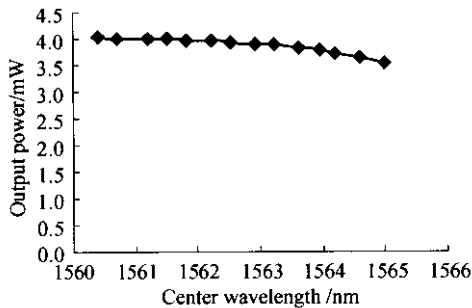


图 9 激光器输出功率随中心波长的变化

Fig. 9 Relationship between the output power and the center wavelength of FBG

当抽运功率为 63.5 mW 时,在上述调谐范围内,激光器输出激光的半宽始终保持在 0.04 nm 以下,输出功率随波长的变化关系如图 9 所示。从该图可见,当光纤光栅的中心波长小于 1563 nm 时,输出功率的稳定性较好,为  $\pm 0.02$  dB;当中心波长大于 1563 nm 时,输出功率稳定性迅速恶化,并且越往长波方向,功率下降越多。这是因为所选择的光纤光栅的中心波长为 1562.5 nm,从图 7 中不难

发现,1562.5 nm 短波方向的铒光纤的增益谱较为平坦,而大于这个波长的区域增益迅速下降。因此,向长波方向调谐后,光纤光栅的中心波长处于 ASE 谱的下降沿是导致输出激光功率下降的直接原因。

### 3.3.3 优化 EDFL 性能的几个途径

1) 提高抽运源的输出功率,并使其尽可能多地耦合进光路; 2) 优化 EDF 长度,使输出光的增益尽量大,带宽尽量宽,并且要比较平坦; 3) 选择反射率高,半宽度窄的光纤光栅,并且其中心波长最好在 1550 nm 附近,处于铒光纤增益谱的平坦区; 4) 插入第二个隔离器可以有效地抑制噪声,提高信噪比; 5) 减小器件的插入损耗和光路的连接损耗; 6) 光纤光栅闲置的一端用匹配液匹配可以有效地消除端面反射的影响,使输出激光稳定。

### 参 考 文 献

- 1 Ning Ti-gang, Zhang Jin-song, Pei Li *et al.*. Overview of fiber grating lasers [ J ]. *Study on Optical Communications*, 2000, **99**( 3 ) : 38 ~ 42
- 2 Guo Yubin, Kikuchi Kazuro. Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser based on fiber Bragg grating [ J ]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**( 7 ) : 581 ~ 585  
郭玉彬, 菊池和朗. 基于光纤 Bragg 光栅的掺铒光纤激光器 [ J ]. *中国激光*, 2000, **A27**( 7 ) : 581 ~ 585
- 3 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**( 8 ) : 1442 ~ 1463
- 4 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fibre grating high pressure sensor [ J ]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**( 4 ) : 398 ~ 399
- 5 G. B. Hocker. Fiber-optic sensing of pressure and temperature [ J ]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**( 9 ) : 1445 ~ 1448
- 6 Jia Baohua, Sheng Qiuqin, Shi Kebin *et al.*. Study on amplification of spontaneous emission of Er-doped fiber both in theory and experiment [ C ]. *SPIE*, 2001, **4594** : 70 ~ 77
- 7 Feng Dejun, Kai Guiyun, Ge Chunfeng *et al.*. The output characteristics of optical fiber grating ring cavity laser [ J ]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**( 9 ) : 832 ~ 834  
冯德军, 开桂云, 葛春风等. 光纤光栅环形腔激光器的输出特性 [ J ]. *光子学报*, 1999, **28**( 9 ) : 832 ~ 834