

文章编号: 0258-7025(2003)11-0965-04

# 利用光纤环镜进行优化的掺镱光纤激光器

迟荣华, 吕可诚, 陈胜平, 李乙钢, 董孝义

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

**摘要** 提出了利用光纤环形镜和高反射率光纤光栅做腔镜的 F-P 腔掺镱光纤激光器的优化设计结构。光纤环形镜的宽带反射特性使抽运光能够充分被介质吸收, 提高激光器的转化效率; 其反射率可调特性容易得到最佳耦合输出比, 当光纤长度改变时, 不必更换输出腔镜就可以得到最佳功率输出。光纤长度 7 m, 抽运功率 51 mW 时, 激光器输出功率为 5.65 mW, 斜率效率为 19%。与其他结构光纤激光器相比, 这种优化结构效率更高。

**关键词** 激光技术; 光纤激光器; 光纤环形镜; 光纤光栅; 最佳耦合输出比

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Optimization of Ytterbium Doped Fiber Laser Using Fiber Loop Mirror

CHI Rong-hua, LÜ Ke-cheng, CHEN Sheng-ping, LI Yi-gang, DONG Xiao-yi

(Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** Simple and efficient F-P Yb-doped fiber laser with fiber tunable reflectivity loop mirror and fiber Bragg grating as cavity mirrors is brought forward. A polarization controller is twined in the loop mirror and the optimum output ratio can be obtained easily, and the trouble of selection of different reflectivity output mirror is avoided. Also fiber loop mirror has wideband reflective spectrum, which can improve the pump efficiency and give more output power. The output power of 5.65 mW, slope efficiency of 19% are obtained when pump power is 51 mW and fiber length is 7 m.

**Key words** laser technique; fiber laser; fiber loop mirror; fiber Bragg grating; optimum output ratio

### 1 引 言

掺镱光纤激光器具有很宽的吸收谱和发射谱, 可以采用不同波长的抽运源, 在 970~1200 nm 波段获得激光, 并可进行宽带调谐<sup>[1]</sup>。同时它不存在激发态吸收、浓度淬灭和多声子跃迁等消激发过程, 能获得很高的能量转化效率。由于以上的优点及广阔的应用前景, 近年来掺镱光纤激光器引起了人们的关注。但是该波段目前还没有应用到通信波段, 相应的光纤光栅不容易得到, 所以大多数掺镱光纤激光器还都是采用二色镜做腔镜<sup>[2]</sup>, 二色镜的缺点是与掺镱光纤耦合起来比较困难, 损耗比较大。而且即使有了 1060 nm 的光栅, 也不容易得到各种反

射率的光纤光栅。针对目前掺镱光纤激光器研究较少, 相应的光纤器件匮乏的实际情况, 我们提出了一种用反射率可调的光纤环形镜做输出腔镜的简单灵活的 F-P 腔结构掺镱光纤激光器。通过理论计算得到, 不同光纤长度对应不同的最佳耦合输出比。环形镜的反射率可调, 很容易得到激光最佳耦合输出比, 当光纤长度改变时, 采用反射率可调的环形镜做输出镜不必更换输出镜, 就可以得到最大功率输出。与通常采用的两个高反射率的光纤光栅或一端用高反射率光纤光栅, 另一端用光纤端面反射的腔结构相比较, 我们提出的优化结构能够更好地利用抽运光, 输出功率和斜率效率都比较高。

收稿日期: 2002-06-25; 收到修改稿日期: 2002-12-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(编号: 6103700)资助课题。

作者简介: 迟荣华(1973—), 女, 山东莱阳人。南开大学物理学院光电信息科学系在读博士生, 研究方向为激光光电子学和现代光通信技术。E-mail: chironghua@eyou.com

## 2 掺镱单模光纤激光器输出特性

线形腔掺镱单模光纤激光器的斜率效率和阈值分别表示为<sup>[3]</sup>

$$\eta = \frac{\eta_q \epsilon_2 (1 - R_2)}{T_{\text{eff}}} [1 - e^{(\alpha_s - \alpha_p)L} (\epsilon R)^{-\delta}] \quad (1)$$

$$P_p^{\text{th}} = \frac{\hbar \nu_p A_{\text{eff}} [\alpha_s L - \ln(\epsilon R)]}{\tau_2 \sigma_s^c \Gamma_s [1 - e^{(\alpha_s - \alpha_p)L} (\epsilon R)^{-\delta}]} \quad (2)$$

其中,  $\eta_q = \lambda_p / \lambda_s$  为量子效率,  $\epsilon = \epsilon_1 \epsilon_2$ ,  $R = R_1 R_2$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  反映腔内器件的插入和连接等损耗,  $R_1$ ,  $R_2$  分别表示激光器的前后腔镜的反射率.  $T_{\text{eff}} = (1 - \epsilon_2^2 R_2) + (1 - \epsilon_1^2 R_1) \epsilon_2^2 R_2 / \epsilon R$  代表有效的输出透过率.  $\delta = \Gamma_p \sigma_p^a / \Gamma_s \sigma_s^c$  代表饱和功率比, 其中,  $\Gamma_{s(p)}$  分别为信号波长和抽运波长的限制因子,  $\sigma_s^c$ ,  $\sigma_p^a$  表示信号和抽运光的发射(吸收)横截面,  $\alpha_s$ ,  $\alpha_p$  表示信号光和抽运光的传输损耗系数,  $A_{\text{eff}}$  代表有效截面积,  $\tau_2$  为亚稳态能级的弛豫时间,  $L$  为掺镱光纤长度.

光纤激光器输出功率表示为

$$P_s^{\text{out}} = \eta (P_p^{\text{in}} - P_p^{\text{th}}) \quad (3)$$

将(1),(2)两式代入(3)式得到如下关系

$$P_s^{\text{out}} = \frac{\eta_q \epsilon_2 (1 - R)}{T_{\text{eff}}} [1 - e^{(\alpha_s - \alpha_p)L} (\epsilon R)^{-\delta}] \times \left[ P_p^{\text{in}} - \frac{\hbar \nu_p A_{\text{eff}} [\alpha_s L - \ln(\epsilon R)]}{\tau_2 \sigma_s^c \Gamma_s [1 - e^{(\alpha_s - \alpha_p)L} (\epsilon R)^{-\delta}]} \right] \quad (4)$$

根据上面的公式我们得到光纤长度不同时, 激光输出功率与输出镜反射率的关系如图 1 所示. 可见, 当光纤长度比较长, 大约 20 m 时, 输出腔镜的最佳反射率比较小, 用光纤 4% 的端面反射就比较好. 但是当光纤长度不太长时, 只有反射率大一些, 抽运光才能被充分吸收, 激光输出功率比较高. 在光纤长度为 7 m 时, 输出腔镜的最佳反射率为 65%

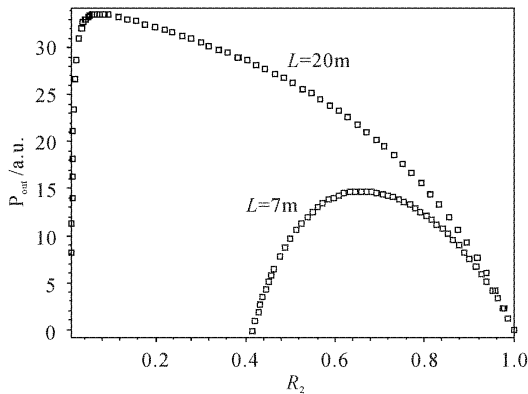


图 1 光纤长度不同时输出功率随输出镜反射率的变化关系

Fig. 1 Output power versus reflectivity of output mirror with different fiber length

左右.

## 3 实验装置

实验装置如图 2 所示. 中心波长为 976 nm 的抽运光经过 980/1060 的 WDM 耦合进掺镱光纤, 实验中所用的增益光纤为掺镱单模光纤, 长度为 7 m, 纤芯直径为 5.05  $\mu\text{m}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  离子掺杂浓度为  $6 \times 10^{-4}$ , 数值孔径  $\text{NA}=0.14$ , 光纤对 976 nm 抽运光的吸收系数为 3.5 dB/m. 激光器谐振腔由反射率可调的光纤环镜和高反射率的光纤光栅构成. 光纤环镜是一个宽带反射镜并且反射率可调, 由对 1060 nm 波长分束比为 45:55 的耦合器构成. 作为激光器选频元件的光纤光栅刻在 Flexor 1060 光纤上, 光栅中心反射波长为 1060.35 nm, 反射率为 99%, 光栅透射谱的 3 dB 线宽约为 0.8 nm. 激光从图中所示的 2 端输出. 谐振腔内所有的光纤都是焊接在一起的, 焊点损耗均低于 0.05 dB.

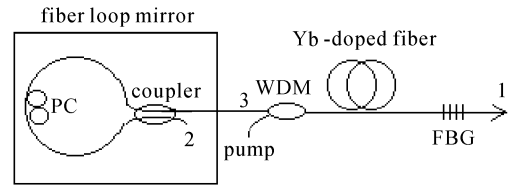


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experiment setup

将 1060 nm 的光纤耦合器的两个同向输出端熔接起来就构成一个光纤环形镜. 如果在光纤环形镜内人为地引入双折射, 通过对引入双折射的控制, 可以实现对光纤环形镜传输特性的调节. 实验中用 10 m 长的 H1060 光纤缠绕偏振控制器, 使偏振控制器的两个环对应 1060 nm 的激光分别为  $\lambda/2$  和  $\lambda/4$  波片. 引入偏振控制器调节光纤环镜输出特性的工作原理可简述如下: 入射到耦合器的光进入光纤环后分为顺时针和逆时针传输的两束光, 其中越过耦合器的光将有  $\pi/2$  的位相延迟, 两束光绕环一周后重新返回耦合器发生干涉, 然后从端口 2 和端口 3 输出. 设耦合器的分束比为  $k : (1 - k)$ , 假定光纤耦合器的功率耦合系数与偏振无关, 则含有偏振控制器的光纤环的反射率和透射率函数为<sup>[4]</sup>

$$R = 4k(1 - k)(1 - \gamma)^2 \exp(-2a) \times [1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(\phi/2)]$$

$$T = (1 - \gamma)^2 \exp(-2a) \{1 - 4k(1 - k) \times [1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(\phi/2)]\} \quad (5)$$

其中,  $\gamma$  为耦合器的插入损耗,  $\phi$  为光纤波片的相位延迟,  $\theta$  为光纤波片快轴与  $x$  轴的夹角,  $a$  为光纤环中的传输损耗。当  $k = 0.5$  时, 忽略光纤的传输损耗和耦合器的损耗, 光纤环镜的反射率可以从  $0\% \sim 100\%$  之间变化。实验中, 光纤耦合器的插入损耗为  $0.2 \text{ dB}$ , 考虑到光纤环形镜中光纤焊接损耗, 光纤环中光传输损耗约为  $0.2 \text{ dB}$ , 将  $k = 0.45$  代入(5)式, 则含  $\lambda/2$  波片的光纤环形镜的反射率从  $0\% \sim 82.2\%$  之间变化(图 3)。另外, 实验中光纤环镜同时是一个宽带反射镜, 图 4 中给出偏振控制器不同状态下 ( $\theta$  不同) 对应的反射谱。从图中看出, 无论偏振控制器处于何种状态, 光纤环镜都有一个从  $480 \sim 1600 \text{ nm}$  较宽的反射谱。考虑插入损耗和传输损耗, 光纤环镜对应  $1060 \text{ nm}$  激光有最大反射率  $82.2\%$ , 对  $976 \text{ nm}$  的抽运光的反射率为  $76\%$ 。光纤环镜的宽带反射特性使它不仅反射激光, 而且反射抽运光, 从而使抽运光能够充分被介质吸收, 提高光-光转换效率。它的这种优势在增益光纤长度不太长, 用其他结构抽运光无法被充分吸收的情况下体现得更为明显。

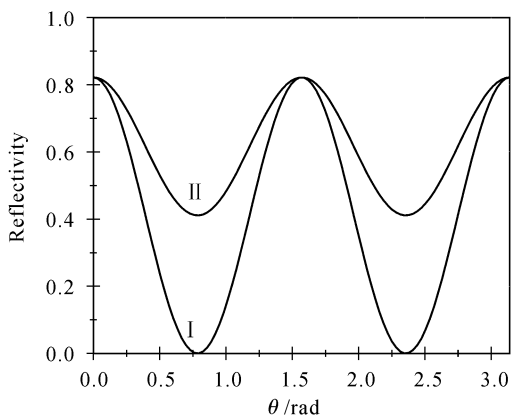


图 3 加入波片后环镜的反射率可调特性  
( I :  $\lambda/2$  波片; II :  $\lambda/4$  波片)

Fig. 3 Adjustable-reflectivity of fiber loop mirror  
( I :  $\lambda/2$ ; II :  $\lambda/4$ )

### 4 实验结果与比较

采用光纤环镜做输出耦合镜, 偏振控制器处于某一状态不变, 抽运功率约为  $21.6 \text{ mW}$  时, 开始有激光激射, 中心波长为  $1060.35 \text{ nm}$ 。随着抽运功率的增加, 激光中心波长保持长时间稳定,  $3 \text{ dB}$  线宽为  $0.16 \text{ nm}$ , 激光边模抑制比达到  $40 \text{ dB}$ , 激光典型输出光谱如图 5(a) 所示。此时从光谱仪上没有观察到抽运光, 说明抽运光完全被吸收。通过改变光

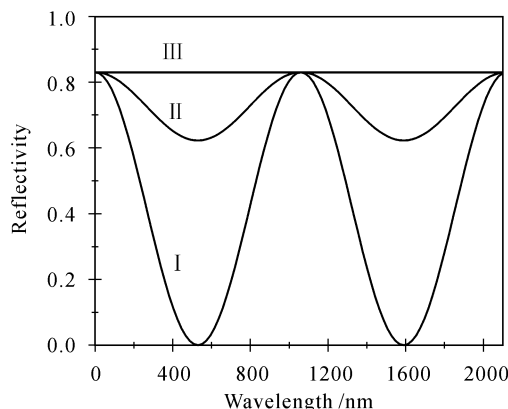


图 4 环镜的宽带反射特性

( I, II, III 分别对应  $\theta = \pi/12, \pi/4, \pi/2$ )

Fig. 4 Wideband reflective spectrum of fiber loop mirror

( I :  $\theta = \pi/12$ ; II :  $\theta = \pi/4$ ; III :  $\theta = \pi/2$ )

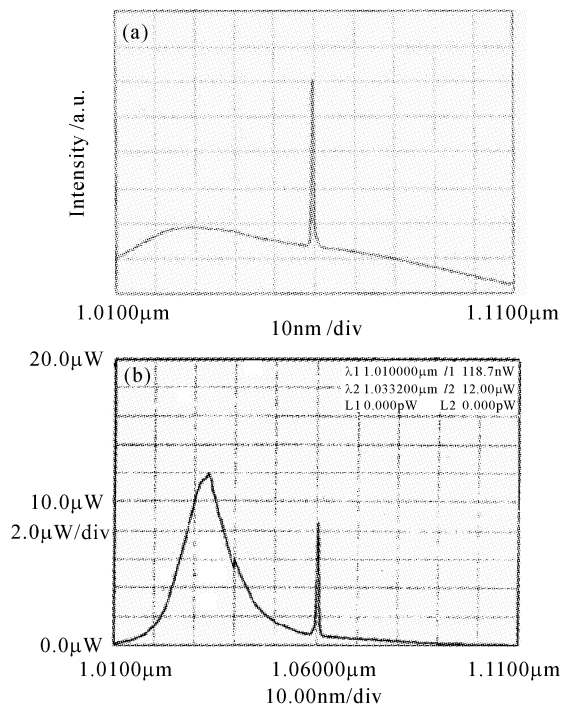


图 5 抽运功率为  $40 \text{ mW}$  时, 激光器的典型输出光谱  
Fig. 5 Typical output spectrum when pump is  $40 \text{ mW}$

(a)  $R = 62\%$ ; (b)  $R = 4\%$

纤环形镜内偏振控制器  $\lambda/2$  波片快轴与  $x$  轴的夹角改变环形镜的反射率, 2 端口输出激光的功率也随着变化。抽运功率为  $40 \text{ mW}$  时, 改变  $\lambda/2$  波片的角度, 激光输出功率从  $0.02 \text{ mW}$  变化到  $3.7 \text{ mW}$ 。偏振控制器固定在某一偏振状态 ( $\theta = \pi/12$ ), 掺镱光纤激光器的输出功率随抽运功率的变化关系如图 6 中曲线 a 所示。从图中可以看出, 该偏振状态下, 激

光器阈值功率为 21.6 mW,斜率效率为 19%。抽运功率为 51 mW 时,激光输出功率为 5.65 mW。实验中当偏振控制器的  $\lambda/2$  波片从与快轴平行的角度转过大约  $\theta = \pi/12$  或  $\theta = 5\pi/12$  时(从图 3 中看到至少有 4 个角度符合),激光器输出功率最大,把  $\theta = \pi/12$  代入(5)式,得到此时光纤环形镜的反射率为 62%,理论与实验基本一致。

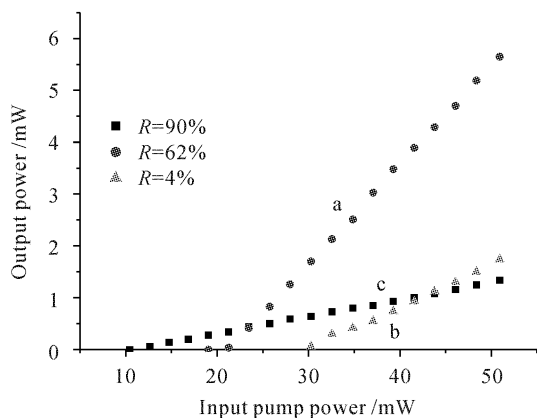


图 6 输出镜反射率不同时掺镱光纤激光器输出特性曲线

Fig. 6 Output characteristics of Yb-doped fiber laser with different output reflectivity

下面是优化后的结构与采用一端用高反射率光纤光栅,另一端用光纤端面反射和两个高反射率光纤光栅的两种腔结构的比较。去掉图 2 中的光纤环形镜,直接由 3 端的光纤端面和光纤光栅构成谐振腔,得到的激光输出功率随抽运功率的变化如图 6 中曲线 b 所示。此时激光阈值比较高,达到 30 mW,斜率效率 8.7%,抽运功率为 51 mW 时,激光输出功率只有 1.74 mW。光谱仪上显示(图 5(b)),激光峰值低于荧光峰值,说明对于 7 m 的光纤长度,4%的端面反射率太低,不能形成足够强的激光,功率计接收到的功率中激光只占非常小的一部分。

在图 2 中 3 端焊接一个中心波长为 1060.35 nm,反射率为 90%的光纤光栅,构成双光栅选频的激光谐振腔结构。从 3 端测量功率得到激光输出特性曲线如图 6 中曲线 c 所示。图中显示,激光器的阈值功率比较低,只有 12.6 mW,斜率效率为 3%,最大抽运功率为 51mW 时,激光输出功率只有 1.34

mW。这是容易理解的,因为两个光栅的反射率都比较高,所以大部分激光留在腔内,只有小部分激光输出,使得激光器阈值较低,但是输出功率不高。

值得一提的是后两种对比结构的实验中,从光谱图中都发现有抽运光存在,说明采用这两种结构,7 m 增益光纤长度都不能够充分吸收抽运光,造成抽运光的浪费,激光转换效率下降。

通过三种线形腔结构的比较表明,利用光纤环形镜做输出腔镜的优化结构明显优于光纤端面做输出腔镜和高反射率光纤光栅做输出腔镜的谐振腔结构,它能够更好地吸收抽运功率,获得较大的激光输出,斜率效率比较高,光-光转换效率比较高。当换用不同长度的掺镱光纤做增益介质时,只需要调节偏振控制器就可以得到对不同长度光纤激光器的最佳耦合输出比,省去了更换输出镜的麻烦。

## 5 结 论

提出了一种基于反射率可调的光纤环形镜和高反射率光纤光栅作腔镜,用国产的掺镱单模光纤做增益介质的简单高效的 F-P 腔掺镱光纤激光器。利用光纤环形镜宽带反射的特点提高了抽运光吸收效率;利用其反射率灵活可调的特点达到最佳耦合输出比。与其他结构的掺镱光纤激光器相比,优化以后的结构能够更加有效地利用抽运光,输出功率相对较高。如果进一步降低腔内损耗,激光输出功率有望得到进一步提高。

## 参 考 文 献

- 1 J. R. Armitage, R. Wyatt, B. J. Ainslie *et al.*. Highly efficient 980 nm operation of an Yb<sup>3+</sup>-doped silica fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(5):298~299
- 2 D. C. Hanna, R. M. 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. Modern Optics*, 1990, **37**(4):517~526
- 3 C. Barnard, P. Myslinski, J. Chrostowski *et al.*. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8):1817~1829
- 4 D. B. Mortimore. Fiber loop reflectors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7):1217~1224