

文章编号: 0253-2239(2004)02-190-5

光纤光栅选频环形腔掺 Yb³⁺ 光纤激光器*

宁 鼎

(中国电子科技集团公司第 46 研究所, 天津 300220)

黄榜才 李朝辉 苏红新 吕可诚 袁树忠 董孝义

(南开大学光子学中心, 天津 300071)

摘要: 采用自行研制的掺 Yb³⁺ 单模光纤和新颖的全光纤连接方案, 实现了 1060 nm 窄线宽、环形腔光纤激光器的成功运转。从理论和实验上探讨了耦合器输出比对激光器输出性能的影响, 对不同光纤长度所构成的激光器进行了实验研究, 发现在现有实验条件下 12 m 为最佳长度。入纤抽运阈值功率约为 30.2 mW, 当入纤功率达最大值 42.8 mW 时, 得到最大激光输出 7.5 mW, 半峰全宽 ≤ 0.2 nm, 相对于入纤抽运功率的斜率效率为 61.7%。

关键词: 导波与光纤光学; 光栅选频; 掺镱光纤; 环形腔光纤激光器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Ring Cavity Yb³⁺-Doped Fiber Laser with Frequency Selecting by Fiber Bragg Grating

Ning Ding

(The 46 Institute, Chinese Electronics Technology Group Inc., Tianjin 300220)

Huang Bangcai Li Zhaohui Su Hongxin Lu Kecheng Yuan Shuzhong Dong Xiaoyi

(Photonics Center, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 10 September 2002; revised 2 April 2003)

Abstract: A ring cavity laser operating at 1060 nm with narrow FWHM is realized by using a novel and all-fiber scheme. Yb³⁺-doped single-mode fiber is made by authors. The output characteristics of the Yb³⁺-doped fiber laser are discussed theoretically and experimentally. Optimal fiber length is found to be 12 m through the fiber laser experiments with different lengths of Yb³⁺-doped fiber. The threshold of launched pump power is 30.2 mW. When launched pump power is 42.8 mW, the maximum laser output is 7.5 mW with a FWHM ≤ 0.2 nm. The slope efficiency is 61.7% with respect to the launched pump power.

Key words: guided wave and fiber optics; frequency selecting by grating; Yb³⁺-doped fiber (YDF); ring cavity fiber laser

1 引 言

掺 Yb³⁺ 光纤(YDF)有着较宽的吸收和增益光谱,而且无激发态吸收、波长的可调谐范围大。由于

以上诸多优点,用掺 Yb³⁺ 光纤制作的光纤激光器(YDFL)在惯性约束核聚变的前端系统,以及在其他许多领域中存在着巨大的应用价值。因此,近年来掺 Yb³⁺ 光纤激光器成为新的研究热点。

在光纤激光器中,环形腔与线形腔两种方案比较而言,前者具有阈值低、不存在空间烧孔效应(有利于实现单频输出)等优点。人们对掺 Er³⁺ 光纤(EDF)环形腔激光器已经做了较为深入的研

* 国家自然科学基金(69877006)、天津市自然科学基金(003600911)资助课题。

E-mail: ningding@eyou.com

收稿日期:2002-09-10; 收到修改稿日期:2003-04-02

究^[1~3],内容涉及到:激光器输出特性与增益介质长度的关系、激光器输出耦合比最佳范围等。而对于环形腔掺 Yb³⁺ 光纤激光器的研究报道较少,陈柏等对环形腔与直腔掺 Yb³⁺ 光纤激光器曾做过比较研究^[4]。

本文主要对环形腔掺 Yb³⁺ 光纤激光器的相应问题进行了数值计算和实验研究。我们采用自行研制的掺 Yb³⁺ 光纤制成了结构新颖的环形腔光纤激光器,测量了不同长度的掺 Yb³⁺ 光纤所构成激光器

的激光特性,并对输出耦合器分光比对激光器输出性能的影响做了初步的探讨。

2 基本理论与数值计算

本文主要讨论掺 Yb³⁺ 光纤激光器的长波长跃迁,在理论上属于准四能级系统。根据 Barnard 的理论^[5],环形腔光纤激光器的斜率效率和抽运阈值功率分别可由以下两个公式表示:

$$\eta = \frac{\eta_q \epsilon_2(k) P_S^{IS}}{T_{\text{eff}} P_S^{CS}} \left\{ 1 - [G_{\text{max}}(\epsilon - \epsilon k)] - \frac{P_S^{CS}(\lambda_S)}{P_S^{IS}(\lambda_P)} \right\}, \quad (1)$$

$$P_P^{\text{th}} = \frac{\hbar \nu_P P_S^{CS} [\alpha_S L - \ln(\epsilon - \epsilon k)]}{1 - [G_{\text{max}}(\epsilon - \epsilon k)] - P_S^{CS}(\lambda_S)/P_P^{IS}(\lambda_P)}, \quad (2)$$

其中 $\eta_q = \lambda_P/\lambda_S$ 为量子效率, λ_P, λ_S 分别为抽运光波长和激光波长; $\epsilon = \epsilon_1 \epsilon_2, \epsilon_1, \epsilon_2$ 分别为考虑了调谐元件损耗、光纤与反射镜耦合损耗后,腔在输入、输出端的单程透过率; k 代表环形腔输出耦合器的输出耦合比; $T_{\text{eff}} = 1 - \epsilon k$ 为有效的输出透过率。 P_S^{IS} 是表示由激光引起的激光吸收饱和的物理量, P_S^{CS} 是表示由抽运光引起的抽运光吸收饱和的物理量, P_P^{IS} 是表示由抽运光引起的激光吸收饱和的物理量。定义

$\delta = P_S^{CS}(\lambda_S)/P_P^{IS}(\lambda_P)$ 为饱和功率比,最大增益 $G_{\text{max}} = \exp[(\alpha_P/\delta - \alpha_S)L]$,其中 α_S 为激光损耗系数, α_P 为抽运光损耗系数, L 为腔长。

由于(1)式、(2)式中含有 P_S^{IS}, P_S^{CS} 和 P_P^{IS} ,既增加了复杂性而且各个物理量之间的关系模糊。根据四能级光纤激光器饱和功率的定义,可以将上述公式进一步简化为

$$\eta = \frac{\eta_q \epsilon_2 k}{T_{\text{eff}}} \{ 1 - \exp[(\delta \alpha_S - \alpha_P)L] (\epsilon - \epsilon k)^{-\delta} \}, \quad (3)$$

$$P_P^{\text{th}} = \frac{\hbar \nu_P A_{\text{eff}} [\alpha_S L - \ln(\epsilon - \epsilon k)]}{\tau_2 \sigma_S^e \Gamma_S \{ 1 - \exp[(\delta \alpha_S - \alpha_P)L] (\epsilon - \epsilon k)^{-\delta} \}}, \quad (4)$$

根据光纤激光器斜率效率的定义,激光器的输出功率为

$$P_S^{\text{out}} = \eta (P_P^{\text{in}} - P_P^{\text{th}}), \quad (5)$$

将(3)式、(4)式代入(5)式,可以得到

$$P^{\text{out}} = \frac{\eta_q \epsilon_2 k}{T_{\text{eff}}} \{ 1 - \exp[(\delta \alpha_S - \alpha_P)L] (\epsilon - \epsilon k)^{-\delta} \} \left\{ P_P^{\text{in}} - \frac{\hbar \nu_P A_{\text{eff}} [\alpha_S L - \ln(\epsilon - \epsilon k)]}{\tau_2 \sigma_S^e \Gamma_S \{ 1 - \exp[(\delta \alpha_S - \alpha_P)L] (\epsilon - \epsilon k)^{-\delta} \}} \right\}, \quad (6)$$

若取上能级寿命 $\tau_2 = 0.76 \text{ ms}$, $\sigma_S^e = 0.25 \text{ pm}^2$, $\delta = 2.5, L = 12 \text{ m}, P_P^{\text{in}} = 200 \text{ mW}, \alpha_S = 0.0046 \text{ m}^{-1}, \alpha_P = 0.4 \text{ m}^{-1}$,将各已知参量代入(6)式,可以计算出环形腔掺 Yb³⁺ 光纤激光器的输出功率与耦合器的输出耦合比之间的关系(见图 1)。

数值计算的结果表明:在环形腔结构的掺 Yb³⁺ 光纤激光器中,输出耦合器的分光比对激光输出特性影响很大,过低或过高的分光比都会限制激光输出,仅当选择一个合适的分光比时才能得到较大的激光输出功率。比较而言,分光比在 50%~90% 的范围内较为理想,在相同的抽运功率下会得到较大

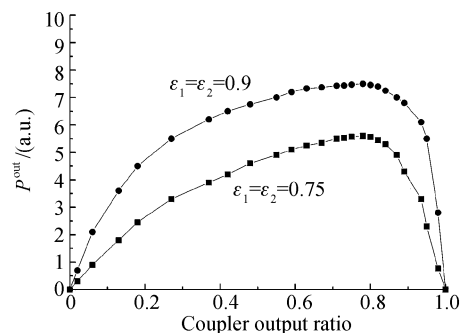


Fig. 1 Relationship of output power and output ratio of the coupler

的激光输出。

3 实验与讨论

光纤激光器的结构如图 2 所示,由抽运光源激光二极管、掺 Yb^{3+} 光纤、光纤布拉格光栅 (FBG)、980/1060 nm 波分复用器 (WDM) 和 1060 nm 光纤耦合器组成。其中,抽运光源是中心波长为 980 nm、带尾纤的激光二极管,掺 Yb^{3+} 光纤对抽运光的吸收系数约 12 dB/m。由激光二极管发出的抽运光,经过波分复用器的端口 1 输入到与端口 3 相连的掺

Yb^{3+} 光纤中,掺 Yb^{3+} 光纤的另一端与耦合器端口 5 相连,经过耦合器的能量分配后,产生激光的一部分由端口 7 输出,另一部分由与端口 8 连接的光纤布拉格光栅反射回去。耦合器的端口 6 与波分复用器的端口 2 相连,构成了闭合环路。而由端口 5 返回的能量只占 5%,这里就不再考虑。在光路中,光纤布拉格光栅作为腔镜起着能量反馈与选频的作用。光路中没有分立光学元件,实现了全光纤化连接,接点附加损耗 ≤ 0.04 dB。

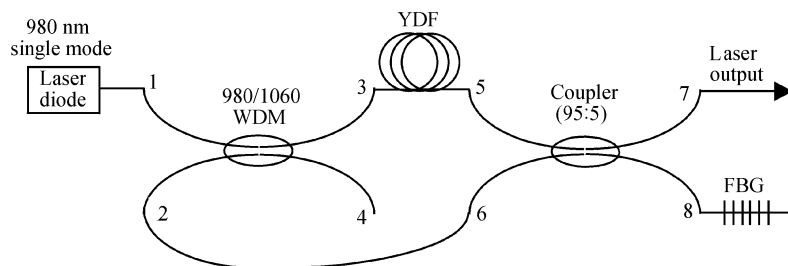


Fig. 2 Sketch map of the YDFL of the ring cavity

3.1 耦合器输出分光比对激光输出特性的影响

由于波长为 1060 nm 的光纤耦合器制作难度大、需求小,没有商品可供选择。我们利用仅有的一只分光比为 95:5 的耦合器,进行了 95% 输出和 5% 输出的实验。

首先选用 20 m 掺 Yb^{3+} 光纤,按照图 2 的环形腔结构进行连接。在耦合器端口 8 上熔接光纤布拉格光栅,使激光器后腔镜处于 5% 反射、95% 输出的

状态,在输出端口 7 观测了环形腔激光器的输出光谱。然后将耦合器 5、6 两端的位置互易、重新连接 (即耦合器端口 5 与波分复用器的端口 2 连接;耦合器端口 6 与掺 Yb^{3+} 光纤的后端连接),使激光器的后腔镜处于 95% 反射、5% 输出的状态,仍在端口 7 观测输出光谱。图 3 给出了在两种状态下激光器的输出光谱,其中图 3(a) 为 95% 输出,图 3(b) 为 5% 输出。

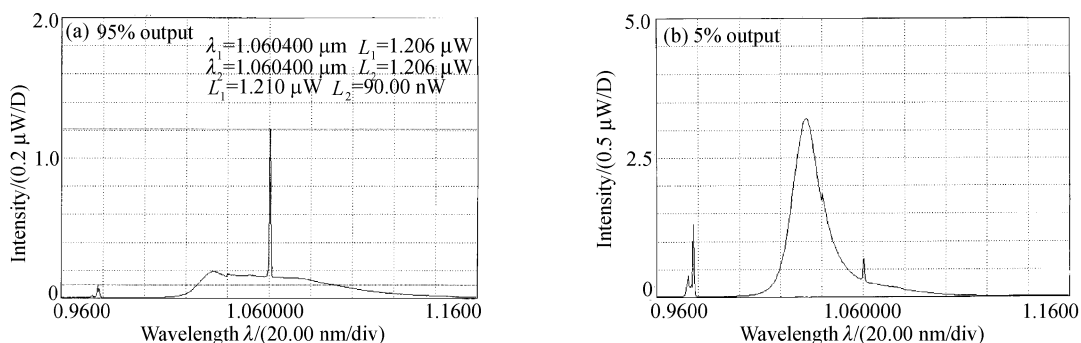


Fig. 3 Comparison of laser spectrum of 95% and 5% coupling ratio

通过对图 3(a) 与图 3(b) 比较可知,当 95% 输出、5% 反馈时,在 1060 nm 波长下产生了较强的激光,其功率量级远远大于 976 nm 的剩余抽运光和背景噪声 (ASE); 当 5% 输出、95% 反馈时,在 1060 nm 处的功率却远小于中心波长为 1030 nm 的荧光峰值,甚至低于剩余抽运光。实验表明:在 95% 输出

的条件下激光输出特性明显优于 5% 输出,这与数值模拟计算的结果是一致的。因此,我们在后面的实验中均采用了 95% 输出的耦合方式。

3.2 不同长度掺 Yb^{3+} 光纤环形腔激光器的比较

为了研究不同长度的掺 Yb^{3+} 光纤对环形腔激光器的阈值、激光输出功率和斜率效率等参量的影

响,我们分别用:18 m、16 m、14 m、12 m、11 m和10 m掺 Yb³⁺ 光纤构成了环形腔结构,测量并比较了它们的激光特性。为了减小连接点附加损耗的影响,使测量结果具有可比性,在实验中保持掺 Yb³⁺ 光纤前端与波分复用器端口 3 的连接状态不变,每次从掺 Yb³⁺ 光纤的后端剪短光纤并重新与耦合器端口 5 焊接。注意端面的制作应平整、清洁无毛刺,应严格控制焊接后接点的附加损耗≤0.03 dB。在这种情况下,不同长度掺 Yb³⁺ 光纤的注入状态是保持不变的。通过降低掺 Yb³⁺ 光纤后端连接点的附加损耗,使其对输出状态的影响最小。

测量的激光中心波长与光纤布拉格光栅的反射中心波长重合,为1060 nm。半峰全宽非常窄,均小于0.3 nm。在六种长度的掺 Yb³⁺ 光纤环形腔激光器中,长度为14 m、12 m和11 m时获得了较强的激光,图 4 给出了这三种长度掺 Yb³⁺ 光纤在最大入纤抽运功率(42.8 mW)条件下的输出光谱。在1060 nm 波长下,三种长度掺 Yb³⁺ 光纤激光器的信噪比分别为:34 dB、46 dB和23 dB,12 m掺 Yb³⁺ 光纤构成的掺 Yb³⁺ 光纤激光器具有最佳的输出信噪比。在三幅图中均观察到波长为976 nm的一个小峰,分析认为:这是经过耦合器后的少量剩余抽运光。

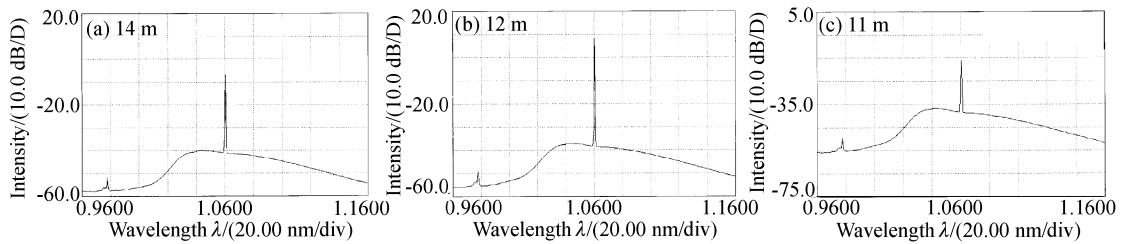


Fig. 4 Laser spectrum of ring cavity YDFL of different length

我们在耦合器的输出端(端口 7),测量了不同长度掺 Yb³⁺ 光纤环形腔激光器的激光输出功率与入纤抽运功率的关系。入纤抽运功率是通过测量与波分复用器端口 3 相连的短段(0.09 m)掺 Yb³⁺ 光纤的输出功率获得的,由于0.09 m小于掺 Yb³⁺ 光纤总长度的 1%,其吸收可以忽略不计。图 5 给出了14 m、12 m和11 m掺 Yb³⁺ 光纤构成激光器的激光输出特性比较。它们的入纤抽运阈值功率分别为:30.9 mW、30.2 mW和33.4 mW,最大激光功率分别为:6.0 mW、7.5 mW和5.3 mW,斜率效率分别为:52.0%、61.7%和56.0%。从这三项指标来看,12 m掺 Yb³⁺ 光纤构成的环形腔激光器获得了最佳激光输出特性:最低的阈值、最大的斜率效率和激光输出功率。

图 6 为 12 m 掺 Yb³⁺ 光纤环形腔激光器的激光输出光谱,激光的中心波长为1060 nm,半峰全宽约为0.2 nm。掺 Yb³⁺ 光纤的结构设计保证了激光器所输出激光的空间模式为基横模。

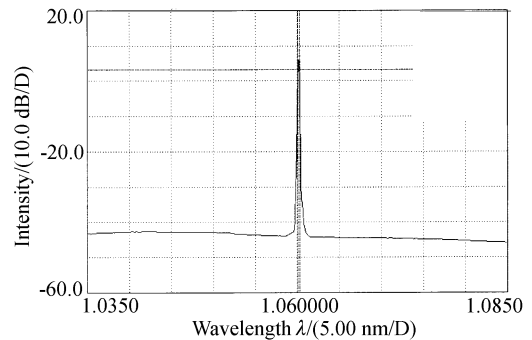


Fig. 6 Laser spectrum of ring cavity YDFL of 12 m

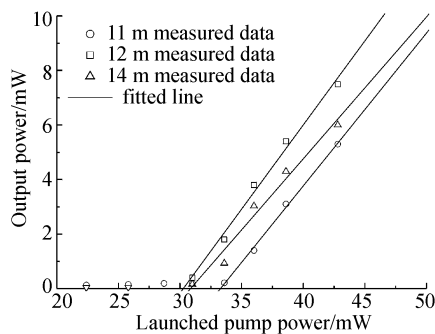


Fig. 5 Comparison of laser characteristics of ring cavity YDFL of different length

结论 我们通过对输出耦合器的不同分光比、以及不同长度掺 Yb³⁺ 光纤所构成环形腔激光器的实验研究,发现:在现有实验条件下,采用 95% 输出耦合比的方式能够获得较好的激光输出特性;选用12 m 掺 Yb³⁺ 光纤构成的环形腔激光器获得了最大的激光输出功率和斜率效率,因此可以认为:使用自行研制的掺 Yb³⁺ 光纤在现有实验条件下12 m为环形腔的最佳长度。

实验得到激光的半峰全宽约为0.2 nm,与掺 Yb³⁺ 光纤线形腔激光器^[6]相比又缩小了一倍,这预

示着:利用光纤光栅选频的环形腔激光器具有更窄的半峰全宽。如果在光纤光栅选频的基础上,进一步采用光纤光栅标准具(其透射峰线宽不大于23 MHz),应能够实现单频输出。如果能够获得高性能的波分复用器和耦合器产品,在现有抽运光源的条件下能够进一步提高激光输出功率,使该激光器更具有实用意义。

参 考 文 献

- 1 Pfeiffer T, Schmuck H, Bulow H. Output power characteristics of erbium-doped fiber ring lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(8):847~849
- 2 Yang Xiufeng, Zhao Donghui, Ge Chunfeng *et al.*. Research on the output characteristics of fiber ring laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9):1193~1196 (in Chinese)
- 3 Feng Dejun, Kai Guiyun, Ge Chunfeng *et al.*. The output characteristics of optical fiber grating ring cavity laser. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(9):832~834 (in Chinese)
- 4 Chen Bai, Chun Lanrong, Fan Wei *et al.*. Study of Yb³⁺-doped ring and line cavity fiber laser. *Chin. J. Laser* (中国激光), 2001, **28**(2):116~118 (in Chinese)
- 5 Barnard C, Myslinski P. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(8):1817~1829
- 6 Ning Ding, Li Zhaohui, Huang Bangcai *et al.*. Yb³⁺-doped fiber laser with frequency selecting by fiber Bragg grating. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(11):965~968 (in Chinese)