

窄线宽高信噪比可调谐掺 Er^{3+} 光纤激光器*

赵德双¹ 刘永智¹ 王秉中² 张长命¹ 黄绣江¹

(1 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2 电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

摘 要 基于偏振态调谐原理, 利用多个偏振控制器在环形腔掺 Er^{3+} 光纤激光器中实现了连续可调谐、窄线宽、高信噪比的单频激光输出. 连续调谐宽度达 22 nm (1538~1560 nm), 3 dB 谱线宽度小于 0.1 nm, 光信号-自发辐射噪音比大于 45 dB, 最大输出功率约 1 mW. 在 10~50 mW 泵浦功率范围内, 输出功率波动幅度小于 1 dB. 在室温下, 工作数十个小时, 中心波长漂移小于 0.05 nm.

关键词 光纤激光器; 可调谐; 偏振; 环形腔; 掺铒激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

波长可调谐单频光纤激光器在光通信系统、光传感系统及高精度光谱分析测量仪器系统中有着十分广阔的应用前景, 因此, 近年来得到了快速的发展. 目前, 大多数可调谐光纤激光器基本上都采用 F-P 标准具、M-Z 干涉仪及光纤 Bragg 光栅等波长调谐器件^[1~3]. 虽然这些器件具有滤波特性好、调谐准确度高, 然而它们都存在结构复杂、插入损耗大、不便于集成等缺点. 相对而言, 利用偏振态实现波长可调谐的光纤激光器^[5~8]具有结构简单、腔体损耗小、泵浦阈值低, 且易实现全光纤集成等优点. 1998 年, D. Zhou 等^[4]利用偏振态调谐原理, 在以半导体放大器作为增益介质的环形腔光纤激光器中获得了谱线宽度为 0.1 nm, 边模抑制比为 38 dB、调谐范围为 28 nm 的连续波输出. 2002 年, 国内杨石泉等^[4]通过调整偏振控制器, 在 L 波段实现了调谐范围 45 nm, 线宽 0.3 nm, 信噪比 30 dB 的激光输出.

基于偏振态调谐原理, 本文报道了一个全光纤连续可调谐、窄线宽的掺 Er^{3+} 环形腔光纤激光器. 此激光器采用两个偏振控制器(共 6 个波片)和一个起偏器作为腔内滤波器件, 并通过调整偏振控制器实现可调谐. 与以前相关文献报道的结果相比^[5~8], 此光纤激光器线宽窄、信噪比高、阈值低、输出功率平坦、稳定性好.

1 实验装置及工作原理

偏振态调谐光纤激光器实验装置如图 1. 激光器腔体主要由掺 Er^{3+} 光纤、两个偏振控制器(PC1、PC2)、在线偏振器(P)、隔离器(ISO)、980/1550 nm

波分复用器(WDM)和输出耦合器(OC)组成. 抽运源为高稳定带尾纤的半导体二极管激光器(LD), 中心输出波长为 980 nm, 最大输出功率约为 80 mW, 输出功率波动小于 0.5 mW. 钕纤长度 1.5 m, 掺杂浓度 3160 ppm, 模场半径 5.7 μm , 数值孔径 $\text{NA}=0.25$, 对 980 nm 的吸收系数为 15 dB/m. 隔离器是用来保证信号光在环形腔体中单向传输, 其隔离度大于 40 dB, 回波损耗大于 60 dB. 两个偏振控制器(PC1、PC2)都是通过器件尾纤绕制而成, 因此, 避免了体型偏振器件或单独偏振控制器所引入的插入损耗以及连接损耗, 对降低泵浦阈值起到非常重要的作用. 在线偏振器 P 具有起偏和检偏作用, 其与两个偏振控制器(PC1、PC2)一起共同组成一个波长选择器件. 耦合输出器 OC 的耦合比为 99:1, 其中 1% 为输出端口. 输出信号分别送入光谱仪、光功率计进行进行频谱和功率测量. 光谱仪型号为 AQ6319, 最小分辨率带宽为 0.01 nm, 测量范围为 600~1700 nm. 整个激光器为全光纤结构, 未采用任何保偏光纤, 总腔体长度约 14 m.

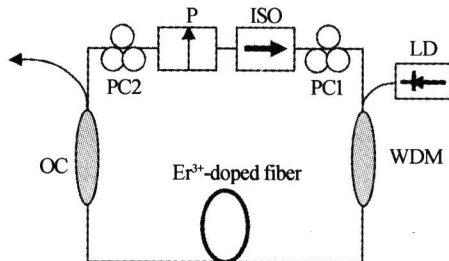


图 1 可调谐光纤激光器实验装置
Fig. 1 Experimental setup of tunable fiber laser

两个偏振控制器(PC1、PC2)和在线偏振器 P 组成的波长选择机制可描述如下: 设从 P 出来的线性偏振光用 Jones 矢量 $P(\theta)$ 表示, θ 为该线性偏振光相对于参考系水平轴之间的夹角. 线性偏振光在腔体循环过程中, 由于两 PC 的偏振变换和光纤随机线性双折射作用, 其偏振态不可避免地要发生改

* 国防预研基金(51402040203DZ02)资助项目
Tel: 028-83202342 Email: deshuanzhao@vip.sina.com
收稿日期: 2005-01-06

变,并且与波长相关.因此,当不同波长的信号再次透过起偏器时,就会在起偏器的偏振相关损耗下表现出不同的透射率,这样,就形成了一个全光纤双折射偏振滤波器.利用 Jones 矩阵分析理论,信号光循环一周后的场强透射率的特性为

$$T(\lambda) = |P^*(\theta)M_{PC2}(\lambda)M_f(\lambda)M_{PC1}(\lambda)P(\theta)| \quad (1)$$

式中, $M_{PC1}(\lambda)$, $M_{PC2}(\lambda)$ 和 $M_f(\lambda)$ 分别为 PC1,PC2 以及两控制器之间光纤的 Jones 偏振变换矩阵, $P^*(\theta)$ 为 $P(\theta)$ 的哈密顿共轭矢量.从式(1)中可以清楚地看出,信号光的透射频谱不仅与 P 的偏振角度 θ 有关,而且还与偏振控制器以及光纤的双折射特性密切相关.

依据激光器自激振荡理论,激光器谐振特性与增益特性应满足^[5]

$$T(\lambda)e^{G(\lambda)L}T_{\text{eff}} = 1 \quad (2)$$

$G(\lambda)$ 代表波长为 λ 的信号光增益系数, L 为增益介质长度, T_{eff} 为腔体线性损耗.式(2)表明,激光器输出中心波长主要取决于腔内滤波器透射谱特性,一般情况下,为滤波器透射峰值所对应的波长.而从前面的分析中可知,偏振控制器 PC1、PC2 不仅会影响腔体的透射频谱 $T(\lambda)$,而且还会改变其透射峰值中心波长.因此,通过调节偏振控制器也就可以实现激光器输出中心波长的调谐.

2 实验结果及分析

实验中,各个器件均采用全光纤器件,彼此之间裸纤熔接,避免了体型光学器件较大的插入损耗,以及高双折射光纤与普通光纤之间芯径不匹配带来的连接损耗.因此,整个腔体插入、连接损耗小、泵浦阈值低.当调节泵浦 LD 激光器的泵浦光功率到 3.0 mW 时,光纤激光器基本上起振.

在光纤激光器起振后,调整好 PC1 的三个控制环和 PC2 两侧的两个控制环后保持不变.然后调节 PC2 中间光纤环使其偏转角度在一定范围内进行变化,即可获得 10 nm 连续调谐宽度激光输出,波长范围在 1540~1550 nm.如果同时调节 PC2 的其它两个偏振控制环,则可以得到 20 nm(1538 nm~1560 nm)的连续调谐范围,如图 2.从图 2 中可以看出,在整个调谐范围内,中心波长的峰值功率波动幅度小于 0.5 dB,光信号-自发辐射噪音比高于 45 dB,谱线宽度窄于 0.1 nm(3 dB 线宽).相比单偏振控制结构的激光器^[5~8],信噪比以及谱线宽度都有很大的提高.这是因为,对于双折射偏振干涉滤波器而言,波片的增加,可以有效地提高滤波器的精细度.

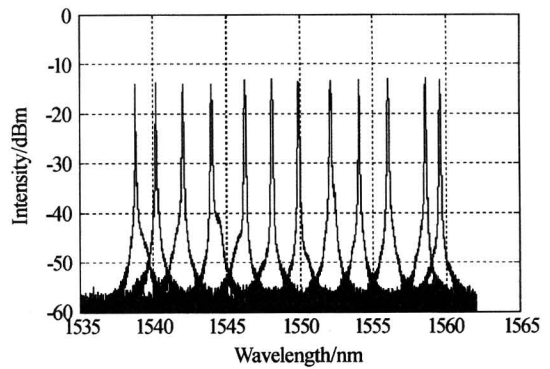


图 2 连续调谐输出频谱($P_p = 15 \text{ mW}$)

Fig. 2 Continuous tuning spectra($P_p = 15 \text{ mW}$)

图 3 为激光器在不同泵浦功率下各中心波长所对应的峰值功率.从图中可以看出,在不同泵浦功率下,激光器可调谐宽度基本保持不变,中心波长输出峰值功率随着泵浦功率增加而增加,谱线宽度随泵浦功率增加而变宽.在同一泵浦功率下,处于不同中心波长的峰值功率基本上保持不变,最大波动幅度不超过 1 dB.在功率增加的情况下,激光线宽出现了增大趋势.这是由于泵浦功率增强时,处于中心波长两侧的临近纵模会因获得较大的增益而出现放大,从而造成频谱线宽加宽.但在同一泵浦功率下,线宽随中心波长变化不是很大.

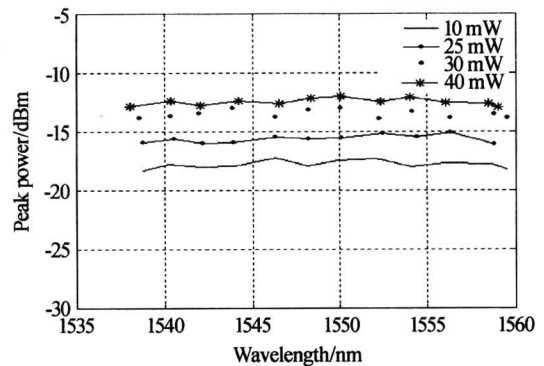


图 3 不同泵浦功率下峰值功率

Fig. 3 Peak power at different pump power

图 4 是中心波长为 1550 nm 处的耦合输出光功率与泵浦光功率之间的对应关系.二者基本上呈线

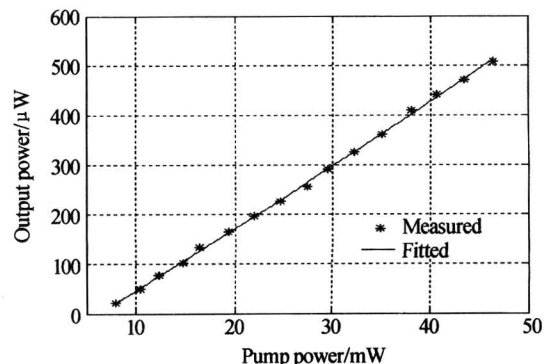


图 4 输出功率与泵浦功率之间的变化关系

Fig. 4 Relation between output power and pump power

性关系变化,斜效率约为 1.5%. 由于所有波长输出功率以及峰值幅度基本相同,所以在整个调谐范围内,不同波长的斜效率基本相同. 与其他调谐光纤激光器相比,此激光器为全光纤结构,不会引入像 F-P 标准具、声光调谐滤波器等调谐器件与光纤之间的耦合损耗. 因此,在相同泵浦和耦合输出条件下,此激光器比其他类型可调谐光纤激光器有更高的输出功率和斜效率. 当泵浦功率为 70 mW 时,激光器输出功率可达 1 mW.

图 5 为在不同时刻测量出的光谱曲线,每隔一个小时记录一次频谱,共记录 10 次. 从图中可以看出,输出光的中心波长几乎不发生漂移,并且峰值功率也非常稳定. 在数十个小时工作期间内,中心频谱最大偏移量仅为 0.05 nm,峰值功率最大波动值小于 0.3 dB. 由此可见,此光纤激光器在室温下可以很好地进行长时间稳定工作. 尽管光纤随机双折射特性以及环境的变化会对激光器稳定性产生一定的影响,但这种环境因素对偏振态调谐光纤激光器来说,影响并不是很大. 这是因为偏振控制器对随机偏振具有一定的相位补偿功能. 因此,采用偏振态调谐可以确保激光器输出中心波长及其峰值功率保持稳定.

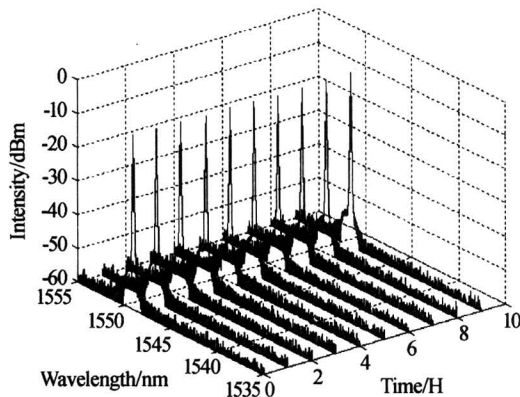


图 5 中心波长为 1549 nm 光谱稳定性考察
Fig. 5 Stability of spectra centered at 1549 nm

3 结论

本文利用多个偏振控制器级联以及偏振态调谐原理,在环形腔掺铒激光器中实现窄线宽、高信噪比、功率输出平坦、稳定性好的连续可调谐单频激光输出. 其调谐范围可达 22 nm、谱线宽度小于 0.1 nm,信噪比高于 45 dB. 在整个调谐范围内,谱线宽度以及峰值功率波动幅度小、平坦性好.

参考文献

- 1 崔建民,冯立军,孙雨南,等. 用于 OADM 的声光可调谐滤波器的特性分析. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1430~1433
Cui J M, Feng L H, Sun Y N, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1430~1433
- 2 Zhao C L, Ma N, Liu Z G, *et al.* Tunable wavelength semiconductor laser using a fiber Bragg grating. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(12): 1514~1517
- 3 Huang T C, Chen H X, Li H F, *et al.* A research on tunable liquid crystal Fabry-Perot filter. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1438~1441
- 4 杨石泉,赵春柳,蒙红云,等. 工作在 L-波段的可调谐环形腔掺铒光纤激光器. *中国激光*, 2002, **29**(8): 677~679
Yang S Q, Zhao C L, Meng H Y, *et al.* *Chinese J Lasers*, 2002, **29**(8): 677~679
- 5 Ghera U, Konforti N, Tur M. Wavelength tunability in a Nd-doped fiber laser with an intracavity polarizer. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992, **4**(1): 4~6
- 6 Friedman N, Eyal A, Tur M. The use of the principal states of polarization to describe in a fibre laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, **33**(5): 642~648
- 7 Zhou D, Prucnal P R, Glesk I. A widely tunable narrow linewidth semiconductor fibre ring laser. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(6): 781~783
- 8 Humphrey P D, Bowers J E. Fiber-birefringence tuning technology for an erbium-doped fiber ring laser. *IEEE Photon Technol Lett*, 1993, **5**(1): 32~34

Tunable Er³⁺-Doped Fiber Laser with Narrow Linewidth and High Signal-to-Noise Ratio

Zhao Deshuang¹, Liu Yongzhi¹, Wang Bingzhong², Zhang Changming¹, Huang Xiujiang¹

¹ School of Opto-Electronic Information, UESTC, Chengdu 610054

² School of Physical Electronics, UESTC, Chengdu 610054

Received date: 2005-01-06

Abstract Continuously tunable Er³⁺-doped ring fiber laser with multi-intra-cavity polarization controller has been presented by using the tuning mechanism of polarization controlling. The CW lasing with 22 nm (1538~1560 nm) tunable range, 0.1 nm spectral line-width, 45 dB optical signal-to-ASE-noise ratio have been achieved. When the laser is pumped by different pump power from 10 to 50 mW, the fluctuation of peak power is less than 1dB during the whole tuning range at different center wavelength. The laser also exhibits a very good operating stability with spectral fluctuation of less than 0.05 nm for tens of hours at room environments.

Keywords Fiber laser; Tenability; Polarization; Ring laser; Er³⁺-doped fiber laser



Zhao Deshuang was born in 1974. He graduated from the Department of Physics, Henan Normal University in 1998 and obtained Master Degree from University of Electronic and Science Technology of China (UESTC) in 2001. Now he is going for his Ph. D. at UESTC. His research interests include fiber lasers and ultrafast optical sources.

生物医学光子学中俄双边学术交流

时间: 2006年9月2日~3日 **地点:** 中国·武汉

会议主席: Valery V. Tuchin(国立萨拉托夫大学[俄])

骆清铭(华中科技大学)

已经确认的部分邀请报告人名单(报告题目详见会议网站:

<http://www.hust.edu.cn/pibm2006>)

俄方报告人:

Victor N. Bagratashvili

Anna A. Gavrilova

Valentin M. Gelikonov

Mikhail Yu. Kirillin

Alexey Myakov

Alexander B. Pravdin

Alexander V. Priezhev

Alexander P. Savitsky

Ekaterina A. Sergeeva

Valery V. Tuchin

中方报告人(按姓氏笔划为序):

马辉(清华大学)

孔祥贵(中国科学院长春光机所)

龙勉(中国科学院力学研究所)

邢达(华南师范大学)

刘承宜(华南师范大学)

刘笔锋(华中科技大学)

陆祖宏(东南大学)

赵元弟(华中科技大学)

骆清铭(华中科技大学)

徐可欣(天津大学)

蒋田仔(中国科学院自动化研究所)

程京(清华大学)

曾绍群(华中科技大学)

雷皓(中国科学院武汉物理与数学研究所)

薛平(清华大学)

投稿和注册须知

详情请参照会议网站:<http://www.hust.edu.cn/pibm2006>.

论文摘要截止日期:2006年6月1日. 提交论文摘要时要求注明会议专题.

会议论文将由 SPIE 结集出版,提交论文全文的截止日期:2006年9月5日.

联系方式

地址:湖北省武汉市洪山区珞喻路1037号

华中科技大学武汉光电国家实验室(筹)G201室

邮政编码:430074

电话:+86-27-87792033

传真:+86-27-87792034

电子邮件:pibm@mail.hust.edu.cn

联系人:施华