

双包层掺 Yb^{3+} 光纤环形脉冲激光形成研究*

杨玲珍 陈国夫 王屹山 赵卫

(中国科学院西安光学精密机械研究所,瞬态光学技术国家重点实验室,西安 710068)

摘要 对采用环形腔结构,由偏振敏感的光隔离器构成超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤激光器输出的动力学特性进行了数值模拟.模拟表明:在没有进行色散补偿的掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器中,采用非线性偏振旋转的附加脉冲锁模技术,通过改变偏振控制器的方向,可以使激光器工作在不同的区域.实验用 976 nm 的半导体激光器作为泵浦源,通过调整偏振控制器,实验观测到掺 Yb^{3+} 环形激光器工作在稳态和自脉动状态,其脉动的周期由光纤激光器腔长决定.

关键词 光纤激光技术;环形腔;掺 Yb^{3+} 光纤

中图分类号 TN245 **文献标识码** A

研究,实验结果与数值模拟相符.

0 引言

光纤激光器以其体积小、重量轻、可靠性高、光-光转换效率高、光束质量好等诸多特点,在光通信、医学、生物学等各个领域得到了越来越广泛的应用.长期以来, Yb^{3+} 离子最重要的应用只是作为一种溴化离子(也就是激光激活离子)与其它稀土元素离子共同掺杂, Yb^{3+} 离子吸收泵浦光子的能量后,把能量传递给其它受主离子,如 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 离子共掺的光纤中, Yb^{3+} 离子并不直接发生能级跃迁而产生激光,而仅仅只是作为一个能量传递工具^[1,2].以掺 Yb^{3+} 石英光纤作为激光增益介质的光纤激光器最近几年获得了迅速的发展,这主要是由于光纤中 Yb^{3+} 离子的吸收截面很高,没有激发态吸收,转换效率高、宽的增带带宽,而且容易产生超短脉冲,掺 Yb^{3+} 光纤激光器具有很高的增益,其增益带宽可支持小于 30 fs 的变换极限脉冲^[3].利用在光纤中的非线性偏振旋转充当快速可饱和吸收体产生的超短脉冲激光器,已报道的利用掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器产生的最短脉冲为 65 fs^[4].由于在 1 μm 附近石英光纤呈现很强的正色散,通常为产生更短的超短脉冲必须对其进行色散的补偿,色散补偿的器件通常是光栅对或棱镜对.采用包层泵浦技术很容易获得高功率激光的输出,可产生单脉冲能量 nJ、 μJ 量级的超短光脉冲^[5],因此采用 Yb^{3+} 光纤可产生高功率的超短光脉冲.本文报道了利用 976 nm 半导体激光器泵浦的掺 Yb^{3+} 光纤环形腔产生超短脉冲的动力学过程进行了数值模拟,并进行了实验

1 实验装置及原理

图 1 为掺 Yb^{3+} 光纤环行超短脉冲激光器的实验装置图.超短脉冲激光器由 976 nm 的半导体激光器、980/1060 nm 波分复用器(WDM)、双包层掺 Yb^{3+} 光纤、输出耦合器(OC)、偏振敏感的光隔离器(ISO)和偏振控制器(PC)组成.本文采用的半导体激光器波长为 976 nm,内部置有光纤 Bragg 光栅结构,使得泵浦光源具有高的稳定性和更低的噪声干扰,避免了由于半导体光源模块的温度,而引起其输出波长漂移的情况.偏振敏感的光隔离器为保证腔内激光的单方向运转,又可以抑制当腔内功率较高时引起的一些非线性影响.偏振控制器是利用光纤的弹光效应改变光纤中的双折射,控制光纤中光波的偏振态.超短脉冲的工作原理为:采用 976 nm 的泵浦激光经过 WDM 耦合进入光纤环中,经过掺 Yb^{3+} 光纤中进行增益放大,经过多次循环在腔内达到稳定的状态,在环形腔内,脉冲的成形主要由一个初始光脉冲(由噪声引起)经历与偏振有关的隔离器后成为一个线偏振光,线偏振光经过一个 $\lambda/4$ 波片后变成一个椭圆偏振光,椭圆偏振光可以被分解成两个相互垂直的、具有不同强度的线偏振光,这两个线偏振光在沿非线性 Kerr 介质(光纤)中传输时将积累不同的非线性相移,致使光脉冲的峰值比光脉冲的前后沿经历更多的非线性相移,调整在 ISO 前的偏振控制器,即 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 波片使得光脉冲的偏振方向与偏振有关的隔离器的偏振方向同向,使脉冲的峰值经历最小损耗而通过,而使光脉冲的前后两翼压缩从而发生光脉冲锁模窄化,其作用相当于可饱和吸收体的作用.在实验过程中采用这种原理的环形光纤激光器可以通过简单的调节波片的位置而使激光器工作在不同的状态.由于掺 Yb^{3+} 石

*国家自然科学基金(批准号:60137010)、中科院创新项目(项目号:40001043)资助项目
Tel:029-88484268 Email:yanglingzhen2002@163.com
收稿日期:2003-05-13

英光纤在 1 μm 附近呈现很强的正色散,如果不采用色散补偿,在光纤腔内所获得脉冲的脉宽较宽.

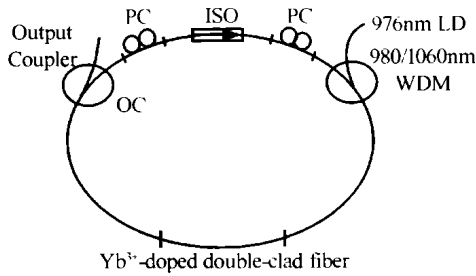


图 1 掺 Yb³⁺ 光纤环形激光器的实验装置
Fig. 1 The experiment setup of Yb³⁺-doped laser

2 超短脉冲的数值模拟

一个实际超短脉冲光纤激光器中包含有分布的 SPM/XPM、GVD 和增益介质(光纤)的增益、增益饱和以及有限带宽的共同作用. 因此对一个实际的掺 Yb³⁺ 光纤激光器的数值模拟必须包含所有这些作用(为了数学计算方便,我们忽略 XPM 的作用).

对于环形腔激光器来说,描述其腔内光脉冲的演化动力学方程是一个改进了的非线性 Schrödinger 方程. 归一化后的方程为^[6]

$$\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - i|U|^2 U = \frac{G_0 L_D}{1 + p/p_{sat}} \left(U + \frac{1}{\omega_b^2 T_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \right)$$

$$L_D = \frac{T_0^2}{\beta_2} z = \frac{Z}{L_D} \omega_b = \frac{c \Delta \lambda}{\lambda^2} p_0 = \frac{\beta_2}{\gamma T_0^2}, T_0 = 1 \text{ ps}, \lambda_0 = 1053 \text{ nm},$$

$$\Delta \lambda = 40 \text{ nm}, \gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}}, G_0 = 20, \beta_2 = 30 \text{ ps}^2/\text{km}. \text{ 可饱和吸收体的作用在数值模拟中通过两个信号光场之间的相干处理. 在数值模拟过程中,光偏振有关的隔离器的作用矩阵为 } [X] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 第一个 } \lambda/4$$

$$\text{波片的作用矩阵为 } QWP_{XY}(\alpha_1) = \frac{1-i}{2}$$

$$\begin{bmatrix} i + \cos 2\alpha_1 & \sin 2\alpha_1 \\ \sin 2\alpha_1 & i - \cos 2\alpha_1 \end{bmatrix}, \text{ 第二个 } \lambda/4 \text{ 波片作用矩$$

$$\text{阵为 } QWP_{XY}(\alpha_2) = \frac{1-i}{2} \begin{bmatrix} i + \cos 2\alpha_2 & \sin 2\alpha_2 \\ \sin 2\alpha_2 & i - \cos 2\alpha_2 \end{bmatrix},$$

$$\lambda/2 \text{ 波片的作用矩阵为 } HWP_{XY}(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 & -\cos 2\theta_1 \end{bmatrix} \text{ 共同作用来调节进入光纤前与从光纤输出后的偏振状态. 种子光脉冲是一个宽度为 } 1 \text{ ps 的幅度较小的光脉冲,模拟在连续背景上(连续光场下)的一个噪声脉冲. 从偏振有关的隔离器 } ([X]) \text{ 出来的种子光脉冲(仅有 } X \text{ 方向)与 } \lambda/4 \text{ 波片相互作用 } (QWP_{XY}(\alpha_1)) \text{ 后, (从 } QWP_{XY}(\alpha_1) \text{ 波$$

片出来的种子光脉冲变成两个相互垂直的、不同强度的线偏振光),然后经历腔内的克尔效应、SPM 效应、掺 Yb³⁺ 光纤增益、带宽限制元件的作用,接着再经另一个 λ/4 (QWP_{XY}(α₂)) 和 λ/2 (HWP_{XY}(θ₂)) 波片的作用后,最后经过偏振敏感的光隔离器,在腔内完成一个完整的循环. 循环过程如图 2 所示,两个检偏器和 ISO 起偏振敏感的隔离器的作用,从第一个 λ/4 波片 QWP_{XY}(α₁) 出来的两个不同强度和相互垂直的线偏振光在腔内增益光纤中传输放大时,采用分步傅里叶变换的方法计算. 数值计算采用快速傅里叶变换(FFT 及 IFFT)的算法^[7].

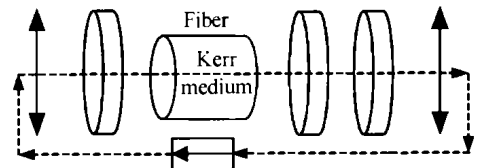


图 2 超短脉冲的工作原理
Fig. 2 The principle of the ultrashort pulse

图 3 为 α₁ = 30°, α₂ = 33.5°, θ₂ = -10° 的脉冲演化过程,从一个幅度较小的光脉冲,经历 SPM/XPM(计算中已忽略 XPM)、GVD 和增益介质(光纤)的增益、增益饱和和有限带宽的共同作用,在腔内经过几百次的循环后,在结合可饱和吸收体的自振幅调制作用,在腔内经过几百次的循环后,最终达到稳态. 图 4 为 α₁ = 20°, α₂ = 41.5°, θ₂ = -10° 的脉冲演化过程,随着波片位置的改变,在相同的初始条件下,光脉冲的工作区域发生了改变. 由噪声引起

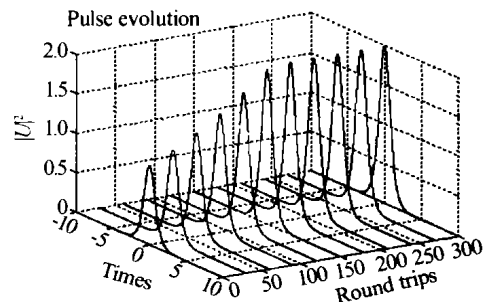


图 3 环形腔内超短脉冲演化
(α₁ = 30°, α₂ = 33.5°, θ₂ = -10°)

Fig. 3 The evolution of ultrashort pulse

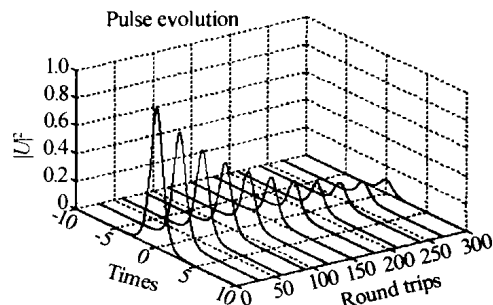


图 4 环形腔内超短脉冲演化
(α₁ = 20°, α₂ = 41.5°, θ₂ = -10°)

Fig. 4 The evolution of ultrashort pulse

的尖脉冲在各种影响作用下,在腔内经过几百次的循环后,最终消失,而使得光纤激光器工作在连续状态下.从模拟过程中表明,激光器的工作状态与偏振的位置有很大的关系,不同的波片位置,将使得激光器工作在不同的区域,这与文献[8]报道的实验结果相一致.因此在环形激光器中通过简单调节波片的位置,即可使得光纤激光器工作在不同的区域.

3 超短脉冲激光器形成动力学实验

将 WDM 与掺 Yb³⁺ 光纤焊接构成图 1 所示的环形结构,并耦合进 976 nm 泵浦激光,掺 Yb³⁺ 光纤激光器采用光纤耦合器作为输出端口(3%),原理图 1 中与偏振敏感的光隔离器结合两个偏振控制器,利用光纤 Kerr 效应可实现锁模,其作用相当于被动锁模中快速可饱和吸收体的作用.利用光纤的非线性偏振旋转特性可产生自起振相加锁模产生超短脉冲,用光电探测器观察光纤激光器在时域的输出特性,在泵浦光一定的情况下,仔细调整光纤偏振控制器 PC 的状态,随着光偏振状态的变化,光纤激光器的输出信号呈现稳定和不稳定两个区域.在不稳定的输出区域,信号变成一些不规则的脉冲,由于采用的是偏振敏感的光隔离器,而隔离器能够有效地消除由于布里渊和喇曼散射引起的非线性影响,光纤激光器输出的这种动态特性是由于光纤激光器的自脉动输出,且观察到这种自脉动具有一定的周期性,其周期由光纤激光器的腔长决定,这种自脉动输出在腔内存在可饱和吸收体的激光器具有的特性,其输出的脉冲图如图 5 所示.在实验中还没有观察到的这种脉冲是不完全锁模脉动.通过进一步的优化腔长,通过对光纤焊接机焊接元器件时仔细操作,以

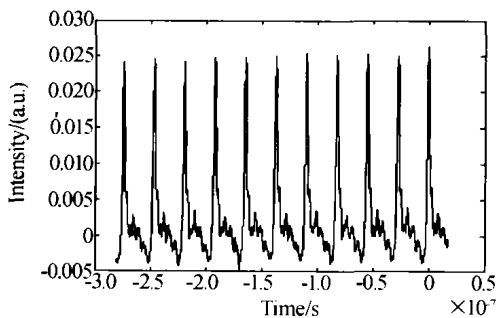


图 5 时域脉冲输出序列

Fig. 5 The output train in the ring laser

尽量减小光纤间的熔接损耗,降低各个器件的损耗,优化偏振控制器的性能,可使激光器工作在锁模状态.

4 结论

本文对采用环形腔结构,由偏振敏感的光隔离器构成的超短脉冲掺 Yb³⁺ 光纤激光器输出动力学特性进行了数值模拟.从模拟结果表明,激光器的工作状态与偏振控制器波片的位置有很大的关系,不同的波片位置,将使激光器工作在不同的区域.实验用 976 nm 的半导体激光器作为泵浦激光,通过调整偏振控制器,观测到掺 Yb³⁺ 环形激光器工作在稳态和自脉动状态,其脉动的周期由光纤激光器的腔长决定,实验结果与数值模拟良好相符.

参考文献

- 1 Zellmer H, Plamann K, Huber G, *et al.* Visible double-clad upconversion fiber laser. *Electronics Letter*, 1998, **34**(6): 565 ~ 657
- 2 Cundiff S T, Collins B, Knox W H. Polarization locking in an isotropic, mode locked soliton Er/Yb fiber laser. *Optics Express*, 1997, **1**(1): 12 ~ 20
- 3 Lm H, Ilday F ö, Wise F W. Femtosecond Ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control. *Optics Express*, 2002, **10**(25): 1497 ~ 1502
- 4 Cauteraerts V, Richardson D J, Paschotta R, *et al.* Stretched pulse Yb³⁺:Silica fiber laser. *Opt Letter*, 1997, **22**(5): 316 ~ 318
- 5 Nckel D, Liem A, Limpert J, *et al.* Fiber based high repetition rate high energy laser source applying chirped pulse amplification. *Optics Communications*, 2001, **190**(1 ~ 6): 309 ~ 315
- 6 Geiser T, Shore K A, Soerensen M P, *et al.* Nonlinear fiber external cavity mode locking of erbium-doped fiber lasers. *Journal of Optical Society American(B)*, 1993, **10**(7): 1166 ~ 1174
- 7 Agrawal G P 著,胡国绎,黄超译.非线性光纤光学.天津:天津大学出版社,1992. 50 ~ 55
Agrawal G P, Translated by Hu G J, Huang C Z. *Nonlinear fiber optics*. Tianjin: Tianjin University Press, 1992. 50 ~ 55
- 8 Hideur A, Chartier T, Brunel M, *et al.* Mode-lock, Q-switch and cw-operation of an Yb-doped double-clad fiber ring laser. *Optics Communications*, 2001, **195**(5 ~ 6): 437 ~ 441

Study of Yb^{3+} -doped Fiber Ring Laser of Ultrashort Pulse

Yang Lingzhen, Chen Guofu, Wang Yishan, Zhao Wei

*State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*

Received date: 2003-05-13

Abstract Numerical simulation of the dynamics characteristics of Yb^{3+} -doped fiber ring laser using the polarization sensitive ISO is reported. The result show that using the additive pulse mode-locking based on nonlinear polarization evolution, the Yb^{3+} -doped ring laser without the dispersion compensation can operate different region by adjusting the orientation of polarize controller. In the experiment, the 976 nm semiconductor laser is used as the pumped power, by adjusting the position of the PC, the Yb^{3+} -doped fiber laser can oscillate at the state of the CW and self pulsation, the period of the self-pulsing is determined by the cavity length of fiber laser.

Keywords Fiber laser technology; Ring cavity; Fiber



Yang Lingzhen was born in Shanxi Province, China. She received the B. S. degree and M. S. degree successively from the Department of the Applied Physics in the Taiyuan University of Technology. Now she is studying for her optics Ph. D. at the State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests are fiber laser generation and amplifier as well as nonlinear fiber optics.