

# 超短脉冲掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器实验研究\*

杨玲珍<sup>1,2</sup> 陈国夫<sup>1</sup> 王屹山<sup>1</sup> 赵卫<sup>1</sup> 熊红军<sup>1</sup> 丁广雷<sup>1</sup> 程昭<sup>1</sup>

(1 西安光学机械精密研究所瞬态光学与技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2 太原理工大学理学院应用物理系, 太原 030024)

**摘要** 报道了掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器产生超短脉冲的实验研究. 超短脉冲激光器抽运源采用波长为 976 nm 的半导体激光器, 采用非线性偏振旋转相加脉冲锁模技术, 通过调节偏振控制器的方向, 实现了掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器的稳定锁模输出, 获得了最大输出功率为 7.02 mW, 脉冲激光光谱宽度为 6 nm, 重复频率为 13.7 MHz.

**关键词** 光纤激光技术; 超短脉冲; 环形腔; 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤激光器同半导体激光器和大型激光器相比, 具有体积小、成本低、易于实现全固化等优点而备受青睐, 受光纤通信技术发展的需求牵引, 掺 Er<sup>3+</sup> 光纤超短脉冲激光光源得到了很大的发展<sup>[1,2]</sup>. 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤吸收谱宽, 抽运波长与激光输出波长非常接近, 量子效率高达 80%, 且不存在激发态吸收, 光转换效率高. 在高掺杂情况下, 也不出现浓度淬灭, 而且 Yb<sup>3+</sup> 吸收带在 0.9 - 1.0 μm 波长范围, 可与半导体抽运源有效耦合, 其增益带宽可支持小于 30 fs 的变换极限脉冲<sup>[3]</sup>, 最近几年也得到研究者很大的重视. 以掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤为增益介质产生和放大的超短脉冲激光器和放大器, 在超快光学、超快生物学、超快光谱学、光纤通信等领域有着重要的应用. 利用在光纤中的非线性偏振旋转来充当快速可饱和吸收体产生超短脉冲, 已报道的利用掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形激光器产生的最短脉冲为 65 fs<sup>[4]</sup>. 采用包层抽运技术很容易获得高功率激光输出, 可产生单脉冲能量 μJ 量级的超短光脉冲<sup>[5]</sup>, 因此采用 Yb<sup>3+</sup> 光纤可产生高功率的超短光脉冲. 本文报道了利用 976 nm 半导体激光器抽运的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形腔产生稳定锁模超短脉冲的实验研究. 在腔体净群色散为正的条件下, 采用非线性偏振旋转相加脉冲锁模技术, 实现了皮秒脉冲激光的锁模输出. 这种锁模脉冲可直接进行脉冲的放大, 从而有效的避免超短脉冲放大过程中非线性效应的影响, 通过外腔压缩, 可实现飞秒脉冲的输出.

## 1 实验装置及原理

图 1 为掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤超短脉冲激光器的实验装置图. 超短脉冲激光器抽运源采用波长为 976 nm 的半导体激光器. 偏振敏感的光隔离器 (ISO) 即可以保证腔内激光的单方向运转, 又可以抑制一些非线性影响 (如布里渊背向散射). 偏振控制器 PC1 和 PC2 是通过调节对光纤圈的旋转来控制光纤中光波的偏振态. OC1、OC2 为光纤激光器的耦合输出端口. 对于环形腔激光器来说, 描述其腔内光脉冲演化的动力学方程是改进的非线性 Schrödinger 方程  $\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - i|U|^2 U = \frac{G_0 L_D}{1 + p/p_{sat}} \left( U + \frac{1}{\omega_b^2 T_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \right)$ , 从一个幅度较小的光脉冲, 经历 SPM/XPM、GVD 和掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤增益介质、增益饱和及有限带宽的共同作用, 再结合可饱和吸收体的自振幅调制作用, 在腔内经过几百次循环后, 最终达到稳态. 在掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤超短脉冲激光器中其快速可饱和吸收体的自振幅调制作用是利用光纤的非线性偏振旋转特性来实现的. 非线性偏振旋转相加锁模机制可以理解为: 在脉冲成形的初始阶段, 由噪声引起幅度较小的光脉冲经过与偏振敏感的光隔离器后成为线偏振光, 线偏振光经过 PC1 (λ/4) 后成为椭圆偏振光, 椭圆偏振光可以被分解为两个相互垂直的、具有不同强度的线偏振光, 由非线性 Kerr 效应对不同强度的偏振光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, 相互垂直的线偏振光在 PC2 (λ/4 + λ/2) 合成椭圆偏振光, 并发生旋转, 通过调整 PC2 的位置, 使得光脉冲峰值损耗最小而通过偏振敏感的光隔离器, 而光脉冲的前后两翼被抑制, 从而实现光脉冲窄化. 偏振有关的光隔离器结合 PC1 和 PC2, 利用光纤非线性 Kerr

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60137010)、中科院知识创新重点项目 (项目号: 40001043) 资助项目  
Tel: 029-88484268 Email: yanglingzhen2002@163.com  
收稿日期: 2004-01-02

效应可实现锁模,利用光纤的非线性偏振旋转特性产生自起振相加锁模超短脉冲,从而使激光器工作在锁模状态. OC1(95:5)耦合器作为激光器的输出,用 OC2(97:3)耦合器分别监测和测量光谱和脉冲在时域的输出,通过简单调节波片的位置,可使激光器处于锁模状态.

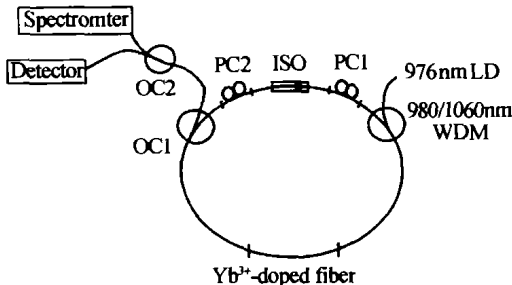


图1 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形激光器的实验装置  
Fig.1 The experiment setup of Yb<sup>3+</sup>-doped laser

## 2 实验结果

将 WDM 与掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤焊接,构成如图 1 所示的环形结构. 用示波器观察光纤激光器在时域的输出特性,在抽运光一定的情况下,仔细调整光纤偏振控制器 PC1 和 PC2 的位置,随着光偏振状态的变化,光纤激光器输出信号的变化呈现稳定和不稳定两个区域. 在不稳定输出区域,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,而隔离器能够有效的消除由于布里渊和拉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形成自脉冲输出,这种自脉冲输出是腔内存在可饱和吸收体激光器具有的特性<sup>[6,7]</sup>. 通过对光纤焊接机焊接元器件时仔细操作,以尽量减小光纤的熔接损耗,降低各个器件的损耗,优化偏振控制器的性能,通过反复多次的调节,当偏振控制器在某一位置时,激光器工作在锁模状态. 图 2 为通过调节波片的位置,使得激光器的输出功率达到最大值时光纤激光器的输出功率. 其输出脉冲如图 3,其周期由光纤激光器的腔长决定,示波器荧光屏上的锁模脉冲串如一幅静止的图画一点也不飘动,这样稳定的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器将会获得广泛应用.

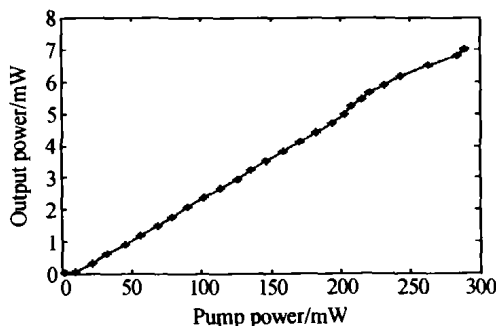


图2 环形激光器的输出功率与泵浦功率的关系  
Fig.2 Output vs input power of Yb<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser

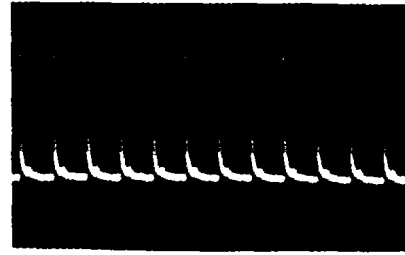


图3 时域的输出锁模脉冲序列  
Fig.3 The mode-locking pulse train in the time domain

由于光电探测器和示波器的相应速度所限,观察到的脉冲比实际脉宽宽的多,考虑变换极限因素,按  $\Delta\nu\Delta t = 0.315$  估计脉冲的宽度为百皮秒量级.

在整个调节的过程中保持抽运功率不变,锁模稳定性及稳定区域、输出脉冲的功率及光谱与偏振控制器位置有很大的关系,通过多次反复的调节可使激光器工作在一个稳定的区域,激光器可以连续工作在锁模状态而无需调整. 采用环形腔结构的超短脉冲激光器不借助外界的微扰而自行由连续态达到脉冲状态. 在光谱图 4 中可以看出激光器的光谱呈现几个对称的尖峰结构,这主要由于在正色散区域非线性自相位调制和群速度色散之间的相互作用引起光谱发生分裂,其源于频率啁啾. 当脉冲在光纤中传输时,群速度色散(GVD)和自相位调制(SPM)都使脉冲产生频率啁啾,由于 GVD 引入的啁啾是线性的,而 SPM 引入的啁啾在整个脉冲内是非线性的,二者复合后的啁啾呈现非线性特性,脉冲的不同部分以不同的速度传输,在正常色散区域内,脉冲前沿附近的红移光传输较快,超越了脉冲前尾部的非红移光;而脉冲的后沿的蓝光则正好相反,在这两种情况下,脉冲前后沿附近都包含了两种不同频率的光,相同频率的光发生相长或相消,从而使得光谱呈现多峰结构,为有效的避免光谱结构的产生,可使激光器处于反常色散区域,在反常色散区域不发生光谱分裂,原因是脉冲的红移部分赶不上传输快的前尾<sup>[8]</sup>.

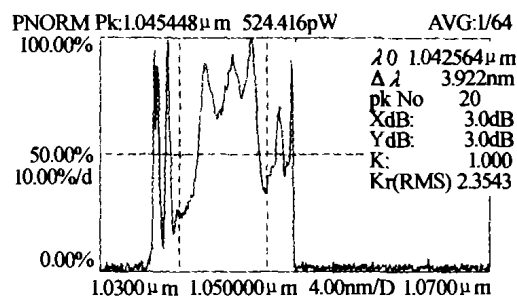


图4 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形激光器的双波长输出光谱  
Fig.4 Two wavelength output spectrum of Yb<sup>3+</sup> fiber ring laser

## 3 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掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤超短脉冲激光器进行了实验

研究. 激光器工作状态与偏振控制器波片位置有很大的关系, 不同的波片位置, 将使得激光器工作在不同的区域. 通过调整偏振控制器, 观测到掺 Yb<sup>3+</sup> 环形激光器工作在稳态和自脉动状态, 当偏振控制器在某一位置时, 激光器实现锁模脉冲输出, 获得最大功率为 7.02 mW, 脉冲激光光谱宽度为 6 nm, 脉冲重复频率为 13.7 MHz. 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补偿. 由于采用环形腔结构, 且非线性偏振旋转的附加脉冲锁模技术来实现锁模脉冲输出. 超短脉冲激光器光纤引入的随机双折射影响其稳定性, 固定光纤的位置不变, 激光器可以实现完全的自启动, 且脉冲锁模工作几周而不发生任何的变化.

### 参考文献

- 1 Guty F, Grelu Ph, Huot N, *et al.* Stabilisation of modelocking in fiber-ring laser through pulse bunching. *Electronics Letter*, 2001, **37**(12): 745 ~ 746
- 2 Galvanauskas A, Fermann M E, Harter D. High power amplification of femtosecond optical pulse in a diode-pumped fiber system. *Optical Letter*, 1994, **19**(16): 1201 ~ 1203
- 3 Cundiff S T, Collins B, Knox W H. Polarization locking in an isotropic, mold locked soliton Er/Yb fiber laser. *Optics Express*, 1997, **1**(1): 12 ~ 20
- 4 Lm H, Ilday F ö, Wise FW. Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control. *Optics Express*, 2002, **10**(25): 1497 ~ 1502
- 5 Cautaerts V, Richardson D J, Paschotta R, *et al.* Stretched pulse Yb<sup>3+</sup>: Silica fiber laser. *Optical Letter*, 1997, **22**(5): 316 ~ 318
- 6 杨玲珍, 陈国夫, 王屹山, 等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 的光纤环形激光器研究. *光子学报*, 2004, **33**(3): 261 ~ 263  
Yang L Z, Chen G F, Wang Y Sh, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 261 ~ 263
- 7 杨玲珍, 陈国夫, 王屹山, 等. 双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 的光纤环形脉冲激光形成研究. *光子学报*, 2004, **33**(4): 389 ~ 392  
Yang L Z, Chen G F, Wang Y Sh, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 389 ~ 392
- 8 G. P. Agrawal 著, 贾东方, 余震虹译. 非线性光纤光学原理及应用. 北京: 电子工业出版社, 2002. 74 ~ 76  
G. P. Agrawal, Translated by Dongfang Jia, Zhenhong Yu. *Nonlinear fiber optics, third edition & Application of nonlinear fiber optics.* Beijing: Publishing house of electronics industry, 2002. 74 ~ 76

## Experimental of Study of Ultrashort Pulse Yb<sup>3+</sup>-doped Fiber Laser

Yang Lingzhen, Chen Guof, Wang Yishan, Zhao Wei, Xiong Hunjun, Ding Guanglei, Cheng Zhao  
*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*

Received date: 2003-12-16

**Abstract** It is reported the experimental study of ultrashort pulse Yb<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser. The Yb<sup>3+</sup>-doped fiber is pumped using a 976 nm semiconductor laser. Using the additive pulse mode-locking based on nonlinear polarization evolution, the Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser achieves stable mode-locking by adjusting the orientation of PC. The maximum output power of the laser is 7.02 mW, at the repetition rate of 13.7 MHz corresponding to ~6nm spectrum width.

**Keywords** Fiber laser technology; Ultrashort pulse; Ring cavity; Yb<sup>3+</sup>-doped 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 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.