

文章编号: 0258-7025(2007)09-1174-04

78 fs 被动锁模掺 Er³⁺ 光纤激光器

宋方¹, 徐文成¹, 陈伟成¹, 申民常¹, 冯杰², 刘颂豪¹

(华南师范大学¹ 信息光电子科技学院光子信息技术广东省重点实验室, ² 物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 用性能稳定的 976 nm 激光二极管(LD)作为抽运光源,利用非线性偏振旋转(NPR)作为可饱和吸收体,实现了环形腔结构的被动锁模掺 Er³⁺ 光纤激光器。在抽运功率为57 mW时,通过调节与波长无关的全光纤在线偏振控制器,获得了谱线宽度为40.8 nm,中心波长1544.0 nm,脉冲宽度为78 fs的稳定飞秒脉冲激光,其重复频率为11.18 MHz,平均输出光功率为5.4 mW,单个脉冲能量为0.5 nJ,峰值功率为6200 W。

关键词 激光器;光纤激光器;飞秒脉冲;被动锁模;环形腔

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

78 fs Passively Mode-Locked Er³⁺-Doped Fiber Ring Laser

SONG Fang¹, XU Wen-cheng¹, CHEN Wei-cheng¹,
SHEN Min-chang¹, FENG Jie², LIU Song-hao¹

¹Key Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information Photoelectric Science & Technology,
²School of Physics & Telecommunication Engineering,
South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract A passively mode-locked fiber ring laser with a small segment of Er³⁺-doped fiber as gain medium, pumped by stable 976 nm laser diode (LD) and mode-locked by the nonlinear polarization rotation (NPR) technique, was successfully achieved. When the laser was pumped at 57 mW, stable mode-locked pulses centered at 1544.0 nm with 40.8 nm spectral bandwidth and 78 fs pulse width were obtained at the repetition rate of 11.18 MHz by modulating the wavelength-independent all-fiber on-line polarization controller. The output power of the laser was 5.4 mW, the pulse energy was about 0.5 nJ and the peak power was 6200 W.

Key words lasers; fiber laser; femtosecond pulse; passively mode-locked; ring cavity

1 引言

社会信息量的增加,高速率大容量通信网络的建立,使得超短脉冲光源在高比特率传输的光纤通信系统中发挥着重要作用。其中,工作中心波长在1550 nm的飞秒脉冲掺 Er³⁺ 光纤激光器由于其体积小、成本低、易与其他光纤设备兼容等独特优点而受到人们的广泛关注^[1~7],同时其产生的稳定飞秒脉冲在光纤传感、光学测量、生物医学等诸多领域具有重要的应用前景。目前,国内外针对掺 Er³⁺ 光纤激

光器的研究热点主要集中在如何获得高能量、高重复频率、窄脉冲宽度的激光脉冲输出^[8~13]。

本文报道了采用高掺杂 Er³⁺ 光纤,利用非线性偏振旋转(NPR)作为可饱和吸收体的掺 Er³⁺ 光纤环形腔激光器的实验结果。与报道过的采用相同结构的掺 Er³⁺ 光纤激光器相比,该激光器能够产生谱线宽度40.8 nm,脉冲宽度达78 fs的超短脉冲,同时起振抽运阈值功率低、工作稳定、能量高,而且该激光器输出的锁模脉冲完全没有频谱边带,光谱十分平滑。

收稿日期:2006-12-18;收到修改稿日期:2007-03-26

基金项目:广东省自然科学基金(04010397)资助项目。

作者简介:宋方(1982—),男,河北人,硕士研究生,主要从事光纤激光器、高码率光通信方面的研究。

E-mail:songfangdbv@sohu.com

导师简介:徐文成(1965—),男,安徽人,教授,博士生导师,目前研究方向为光纤激光器及其在高码率光通信系统中的应用。E-mail:xuwch@scnu.edu.cn(通信作者)

2 实验装置与原理

图 1 为掺 Er³⁺ 光纤环形腔激光器的实验装置图。实验所用的掺 Er³⁺ 光纤长度为 2.5 m, 吸收系数为 12.5 dB/m, 数值孔径为 0.22。为了减小损耗, 将 976 nm 激光二极管 (LD), 980 nm/1550 nm 波分复用器 (WDM) 及掺 Er³⁺ 光纤直接焊接, 同时整个环形腔中均采用全光纤器件, 以保证光在全光纤环境下连续运转而不受外界环境的影响。其中, 976 nm 激光二极管在经过波分复用器后的最大输出功率为 300 mW。PD-ISO 为特别订制的偏振相关光纤隔离器, 一方面保证腔内激光的单方向运转, 一方面对光强起到滤波作用。PC 为利用光纤弹光效应的全光纤在线偏振控制器, 用于改变光纤的双折射, 从而改变光纤内传输光的偏振态; output coupler 为输出耦合器, 耦合比为 90:10, 其中 10% 端为输出端口。光纤环形腔总长度为 21 m。在输出端分别采用 Anritsu MS9710C 光谱分析仪, Tektronix 示波器, FR-103XL 自相关仪来对输出脉冲的光谱、重复频率、脉冲宽度进行直接测量。

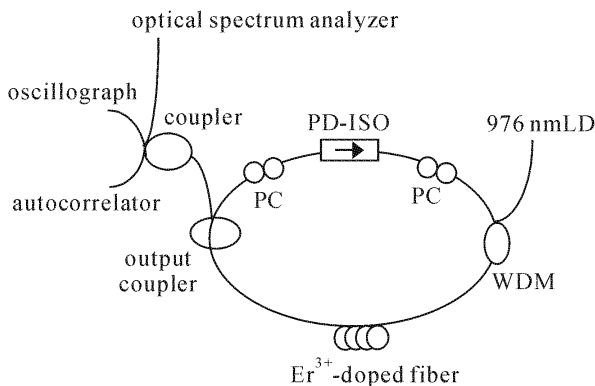


图 1 掺 Er³⁺ 光纤环形腔激光器的实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of Er³⁺-doped fiber ring laser

光纤环形腔激光器非线性偏振旋转锁模的工作原理^[14]是:由偏振相关光纤隔离器出来的线偏振光在经过第一个全光纤在线偏振控制器后变为椭圆偏振光,该椭圆偏振光可以被认为两个相互垂直的、具有不同强度的线偏振光的合成。当椭圆偏振光经过掺 Er³⁺ 光纤得到增益放大时,由于光纤的非线性效应(Kerr 效应),使得两个相互垂直的偏振分量经过相同长度的光纤所产生的非线性相移不同,从而使椭圆偏振光的偏振态发生改变。第二个光纤偏振控制器的作用主要是调整光脉冲的偏振方向与偏振相关光纤隔离器的偏振方向一致,从而使得光脉冲的峰值经历最小的损耗而通过,而光脉冲的两翼经历了较大的损耗而被削掉,导致光脉冲发生窄化。

光脉冲在腔内往返多次后变窄,其作用相当于可饱和和吸收体,最终实现锁模脉冲激光输出。

考虑单程环路中,若光纤线性损耗与增益较小,描述光纤环形激光器的锁模动力学方程为^[15]

$$\left[-j\psi + (g - \alpha) + \frac{g}{\Omega_g} \frac{d^2}{dt^2} + jD \frac{d^2}{dt^2} + (\gamma - j\sigma) |A|^2 \right] A = 0, \quad (1)$$

式中 A 为脉冲慢变包络振幅; ψ 为光脉冲的非线性相移, α 为单程线性损耗, g 为增益系数, Ω_g 为增益带宽, D 为光纤色散系数, γ 为光纤中非线性偏振旋转效应产生的自幅度调制系数, σ 为非线性自相位调制系数。(1) 式存在的解析解为

$$A = A_0 [\text{sech}(t/\tau)]^{(1+j\eta)}, \quad (2)$$

式中 η 为啁啾参数, τ 为归一化的脉冲宽度。将(2)式代入(1)式进行化简,可以求得脉冲的啁啾参量与脉冲宽度的具体表达式为

$$\eta = -\frac{3}{2} \frac{\sigma D_n - \gamma}{\sigma + \gamma D_n} \pm \left[\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma D_n - \gamma}{\sigma + \gamma D_n} \right)^2 + 2 \right]^{1/2},$$

$$\tau = \frac{-2D_n - 3\eta + D_n \eta^2}{\sigma}, \quad (3)$$

式中 $D_n = (\Omega_g^2/g)D$ 为归一化色散参量。(3) 式表明,利用非线性偏振旋转锁模技术实现的光纤激光器,其输出脉冲不可能为变换极限脉冲,而是啁啾脉冲,因为 $\eta \neq 0$ 。激光器输出的脉冲宽度 τ 不仅与脉冲自相位调制效应(σ),非线性偏振旋转效应产生的自幅度调制效应(γ)有关,而且与光纤环形腔总净色散有关。在一定的抽运功率下,仔细调节偏振控制器,以使环形腔中的非线性效应(自相位调制效应和自幅度调制效应)与光纤色散达到平衡,获得最短的脉冲输出。因此,将实验设定参数代入(3)式中,其中,光纤环形腔平均色散为 $\beta_2 = -19 \text{ ps}^2/\text{km}$ ($D = 14.82 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$),掺铒光纤增益带宽为 60 nm(1520~1580 nm),同时设定自幅度调制系数 $\gamma = 1$,非线性自相位调制系数 $\sigma = 4$,得到该环形腔激光器理论上能够获得的最短脉冲输出约为 43 fs。

3 实验结果和分析

由高掺杂 Er³⁺ 光纤及其他全光纤器件构成的如图 1 所示的环形腔结构,当耦合进 976 nm 抽运光后,仔细调节在线偏振控制器,很容易在光谱分析仪中观察到几个纳米的稳定输出光谱。激光器自启动锁模振荡阈值抽运功率约为 12 mW。图 2(a), (b) 分别给出了抽运光功率为 57 mW 时由 Anritsu

MS9710C 光谱分析仪观测到的 3 dB 谱线宽度 $\Delta\lambda$ 为 3.5 nm 和 9.4 nm 时线性坐标下的频谱图。可以发现光谱十分平滑和对称,并且在长达 5 h 的观测中,中心波长及谱线宽度没有发生任何漂移,同时在 Tektronix 示波器中也观察到了稳定的脉冲序列,可以断定此时形成了锁模脉冲激光。

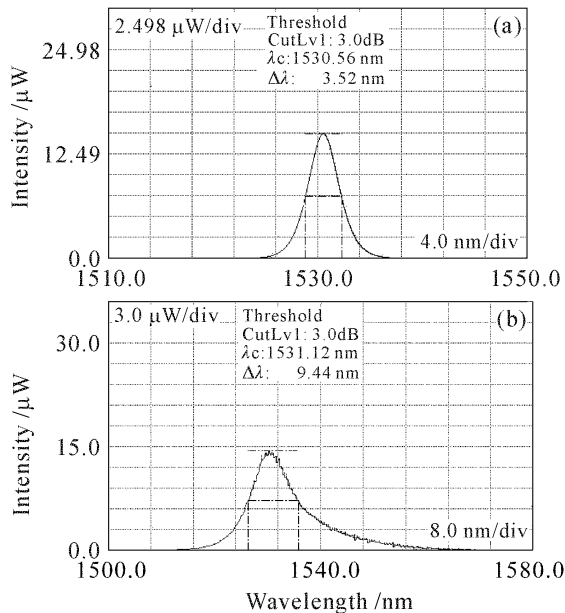


图 2 掺 Er^{3+} 光纤环形腔激光器的输出光谱
Fig. 2 Spectrum of Er^{3+} -doped fiber ring laser

在保持抽运光功率为 57 mW 不变的情况下,继续同向旋转调节偏振控制器,发现随着偏振控制器对腔内光偏振态的改变,光谱慢慢向长波方向展宽,同时中心波长也慢慢向长波方向移动。图 3 为调节偏振控制器过程中用光谱分析仪测得的 3 dB 谱线宽度为 34.2 nm 的频谱。经过耐心细致的调节,最终获得中心波长在 1544.0 nm, 3 dB 谱线宽度为 40.8 nm 的频谱。光纤激光器工作非常稳定,在 3 h 的持续观察中,发现其中心波长基本不漂移。图 4 给出了谱线宽度为 40.8 nm 时对数坐标和线性坐标下的频谱图,图中清楚地显示频谱曲线非常平滑和对称。进一步测量,得到此时光谱的 10 dB 谱线宽度为 68 nm, 20 dB 谱线宽度约为 100 nm。实验中,为了降低脉冲峰值功率在腔内空间上周期性变化引起的频谱边带效应,获得好的频谱特性,一方面调整抽运光功率以使 Er^{3+} 光纤增益均匀,另一方面将增益后的脉冲立即被耦合器耦合出腔外。这样,从整个腔体来看,其脉冲峰值功率不会在空间上形成较大幅度的周期性变化,因而对频谱边带抑制效果较好。在脉冲谱宽为 40.8 nm 时,实验没有观测到频谱边带现象,说明输出脉冲具有非常好的频谱边带抑制。

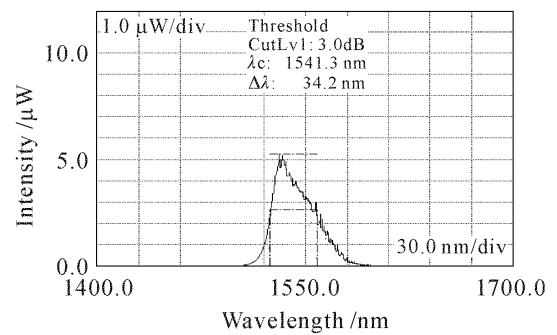


图 3 3 dB 谱线宽度为 34.2 nm 时的输出光谱
Fig. 3 Output spectrum with spectral width of 34.2 nm

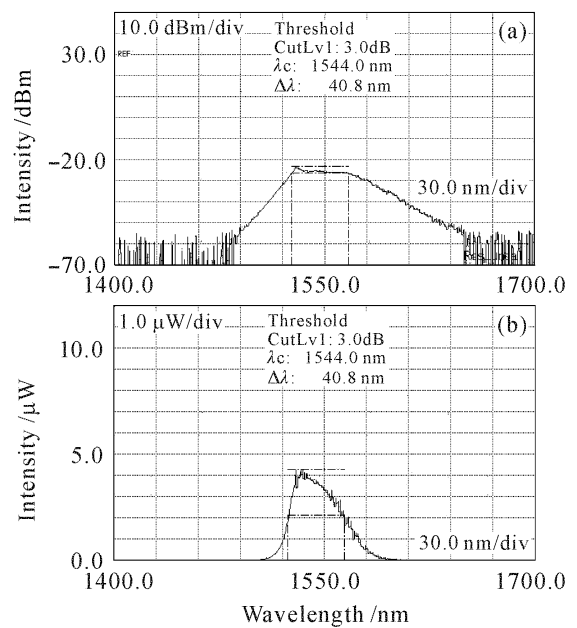


图 4 3 dB 谱线宽度为 40.8 nm 时的输出光谱
(a) 对数坐标; (b) 线性坐标
Fig. 4 Output spectrum with spectral width of 40.8 nm
(a) logarithm coordinates; (b) linear coordinates

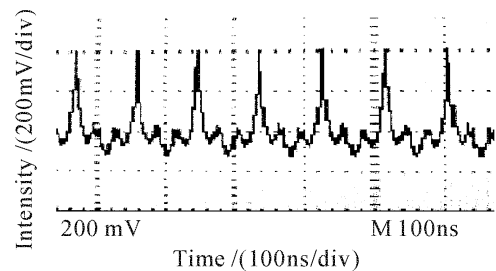


图 5 锁模脉冲序列
Fig. 5 Mode-locked pulse train

为了确定谱线宽度为 40.8 nm 时是否形成了锁模脉冲激光,使用 PIN 光电探测器及 Tektronix 示波器同步监测输出光的时域脉冲特性。图 5 给出了示波器观察到的锁模脉冲序列,整齐而稳定的脉冲序列表明此时形成了很好的锁模脉冲,由示波器测得光脉冲的重复频率为 11.18 MHz。由于 PIN 光电探测器的响应速度限制,造成单脉冲产生基座。

锁模激光器输出脉冲的宽度由 FR-103XL 自相关仪测量。图 6 给出了自相关仪测量的光脉冲二次谐波自相关曲线。图中右上角为自相关仪实际的测量图。由自相关仪测得锁模光脉冲宽度 $\tau_{\text{FWHM}} = 78 \text{ fs}$, 其光谱半峰全宽(FWHM)与光脉冲宽度乘积为 0.40, 这个结果与高斯脉冲的时间带宽乘积 0.441 接近, 因此可以认为激光器输出的是具有一定啁啾的高斯脉冲。从二次谐波自相关曲线还可以看出, 超短脉冲形状光滑而且没有底座, 有利于对脉冲进一步的放大和压缩。同时该实验结果与该环形腔激光器输出的最短脉冲宽度的理论值 43 fs 相比较, 表明了如果进一步优化腔体结构、加强对腔体的非线性控制还可以得到更短的锁模脉冲输出。

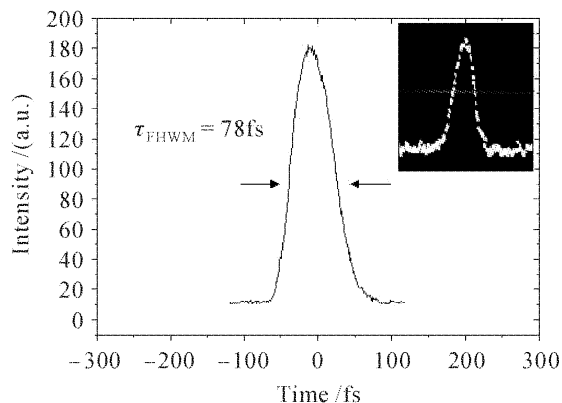


图 6 锁模脉冲自相关曲线

Fig. 6 Autocorrelation of mode-locked pulse

另外, 将输出耦合器的 10% 端接入功率计测得此时输出光的平均功率为 5.4 mW, 得出此时对应的脉冲能量约为 0.5 nJ。输出脉冲的峰值功率为 6200 W。

4 结 论

研究了采用高掺杂 Er³⁺ 光纤, 利用非线性偏振旋转技术实现被动锁模的掺 Er³⁺ 光纤环形腔激光器。通过调节在线偏振控制器, 获得了自起振飞秒锁模脉冲输出。该激光器与报道过的采用相同结构的激光器相比, 能够产生短于 100 fs 的超短脉冲, 同时起振抽运阈值低, 工作稳定, 而且完全没有频谱边带。若进一步优化腔的结构、减小腔长及能量损耗, 并进行色散补偿, 可获得重复频率更高、能量更大、脉冲更窄的激光输出。同时, 实验中获得的输出光谱平滑而稳定, 没有任何频谱边带现象, 其具体原因还需要进一步的分析研究。产生如此高能量超短脉冲的掺 Er³⁺ 光纤激光器, 不仅为研究光纤非线性效

应及其他光学现象提供了良好的光源, 而且在光通信和光传感领域中也将会有很好的应用前景。

参 考 文 献

- Xinyong Dong, P. Shum, N. Q. Ngo *et al.*. Effects of active fiber length on the tunability of erbium-doped fiber ring lasers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(26):3622~3627
- M. Tang, X. L. Tian, P. Shum *et al.*. Four-wave mixing assisted self-stable $4 \times 10 \text{ GHz}$ actively mode-locked erbium fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(5):1726~1730
- Sun Guoyong, Qu Ronghui, Yang Jing *et al.*. Study on stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser at room temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6):821~824
孙国勇, 瞿荣辉, 杨 敬 等. 室温下稳定的多波长掺铒光纤激光器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6):821~824
- He Hucheng, Yang Lingzhen, Wang Yuncai. C-band wavelength tunable erbium doped fiber laser with polarization control [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1597~1600
贺虎成, 杨玲珍, 王云才. 偏振控制 C 波段波长可调谐掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1597~1600
- H. A. Haus, E. P. Ippen, K. Tamura. Additive-pulse mode locking in fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(1):200~208
- Xinhuan Feng, Hwa-yaw Tam, P. K. A. Wai. Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18):8205~8210
- J. Wu, D. Y. Tang, L. M. Zhao *et al.*. Soliton polarization dynamics in fiber lasers passively mode-locked by the nonlinear polarization rotation technique [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **74**(4):046605-1~046605-7
- K. Tamura, H. A. Haus, E. P. Ippen. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fiber ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24):2226~2228
- K. Tamura, L. E. Nelson, H. A. Haus *et al.*. Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(2):149~151
- Ying-Tsung Lin, Gong-Ru Lin. Dual-stage soliton compression of a self-started additive pulse mode-locked erbium-doped fiber laser for 48 fs pulse generation [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10):1382~1384
- Liu Dongfeng, Chen Guofu, Wang Xianhua. Self-starting passively mode-locked Er³⁺-doped fiber ring soliton laser [J]. *Science in China (Series A)*, 1999, **29**(7):656~661
刘东峰, 陈国夫, 王贤华. 自起振被动锁模掺 Er³⁺ 光纤环形腔孤子激光器的实验研究[J]. *中国科学(A 辑)*, 1999, **29**(7):656~661
- Wang Zhaoying, Wang Yongqiang, Lin Ran *et al.*. Widely tunable self-starting passively mode-locked Er-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):905~907
王肇颖, 王永强, 林 冉 等. 宽可调谐自起振被动锁模掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8):905~907
- Zhao Deshuang, Liu Yongzhi, Wang Bingzhong *et al.*. High-energy femtosecond Er³⁺-doped fiber laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(8):922~925
赵德双, 刘永智, 王秉中 等. 高能量飞秒脉冲掺 Er³⁺ 光纤激光器[J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(8):922~925
- Gong Yandong, Shum Ping, Tang Dingyuan. 298 fs passively mode-locked ring fiber soliton laser [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2002, **32**(5):329~333
- H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen. Structures for additive pulse mode locking [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(10):2068~2076