

文章编号: 1002-2082(2006)03-0220-05

# 飞秒被动锁模环形腔掺 $\text{Er}^{3+}$ 光纤激光器

赵德双<sup>1</sup>, 刘永智<sup>1</sup>, 王秉中<sup>2</sup>, 张长命<sup>1</sup>, 黄绣江<sup>2</sup>

(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:** 在考虑增益、损耗、群速度色散、自相位调制、快速可饱和吸收体等各种参数同时作用情况下, 分析了非线性偏振旋转效应自启动锁模机理, 研究了腔体参数与锁模脉冲之间的关系, 并给出飞秒被动锁模环形腔掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤激光器实验原理。实验采用性能稳定的 980 nm 半导体激光器作为抽运源, 高掺杂短长度掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤作为增益介质, 利用非线性偏振旋转锁模技术, 得到了稳定的飞秒自起振锁模光脉冲。抽运功率为 23 mW 时, 激光器输出锁模脉冲中心波长 1 552 nm, 3 dB 带宽为 7.6 nm, 重复频率 14.0 MHz, 平均输出功率 0.43 mW, 自起振锁模泵浦阈值功率 11.5 mW, 并观测到了稳定的高阶锁模脉冲输出。该激光器与报道过的相同结构光纤激光器相比, 自起振泵浦阈值低、脉冲能量高、稳定性好, 且频谱边带幅度小。

**关键词:** 光纤激光器; 光孤子; 被动锁模; 飞秒脉冲; 掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤

中图分类号: TN253; TH248

文献标志码: A

## Femtosecond passively mode-locked $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring laser

ZHAO De-shuang<sup>1</sup>, LIU Yong-zhi<sup>1</sup>, WANG Bing-zhong<sup>2</sup>,  
ZHANG Chang-ming<sup>1</sup>, HUANG Xiu-jiang<sup>2</sup>

(1. School of Opto-electronic Information, UESTC, Chengdu 610054, China,

2. School of Physical Electronics, UESTC, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The self-starting mode-locked mechanism of nonlinear polarization rotation and the characteristics of the pulses were theoretically investigated with various parameters taken into account, such as gain, loss, group velocity dispersion, self-phase modulation and fast absorber. A fiber ring laser with a small segment of highly  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber as gain medium, which is pumped by 980 nm LD laser and mode-locked by using the nonlinear polarization rotation technique, is successfully demonstrated for the generation of femtosecond pulses. When the laser was pumped at 23 mW, stable mode-locked pulses centered at 1 552 nm with 7.6 nm bandwidth and an average output power of 0.43 mW was successfully obtained at the repetition rate of 14.6 MHz. The threshold power of the self-starting mode-locked pumping is about 11.5 mW. The high-order stable mode-locked pulses were also observed experimentally. Compared to the fiber lasers with the similar structures reported previously, the laser presented here has the advantages of very low self-starting pumping threshold, high pulse-energy, small spectral sideband and better stability.

**Key words:** fiber laser; optical soliton; passively mode-locked; femtosecond pulse;  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber

收稿日期: 2005-01-11; 修回日期: 2006-01-12

基金项目: 国防预研基金资助(51402040203DZ02)

作者简介: 赵德双(1974—), 男, 河南新县人, 电子科技大学博士研究生, 主要从事超短脉冲光纤激光器、放大器及超快光纤光学研究。E-mail: deshuangzhao@vip.sina.com

## 引言

光纤激光器以掺稀土元素的光纤作为增益介质,克服了传统固体激光器体积大、质量大、结构松、可靠性差等缺点,可以产生 ps 到 fs 量级的超短脉冲,实现全光纤集成,因此近年来引起人们的广泛关注。目前,已分别在 Nd<sup>3+</sup>、Tm<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> 等光纤中获得了飞秒光脉冲输出<sup>[1-3]</sup>。超短脉冲产生方法主要有被动锁模<sup>[4]</sup>、主动锁模<sup>[5]</sup>和主被动锁模<sup>[6]</sup>。主动锁模调制能力有限,限制了锁模脉冲的脉冲宽度,通常脉冲宽度为 ps 量级。被动锁模是利用光纤或其他器件中的非线性光学效应实现锁模工作的,激光器结构简单,不需要插入任何调制元件,在一定条件下可以实现自启动锁模运转,产生宽度极窄的 fs 量级锁模脉冲。其中,利用非线性偏振旋转<sup>[7-10]</sup>(NPE, nonlinear polarization evolution)工作的被动锁模光纤激光器已被证实是迄今为止最为简便有效的超短脉冲光源,再加之其波长可调谐,因此应用广泛。1992年, K. Tamura<sup>[7]</sup>利用非线性偏振旋转被动锁模技术,在掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器中获得了脉宽 452 fs、重复速率 42 MHz 的稳定锁模脉冲输出,自起振阈值为 100 mW。2002年, Gong Y. 等<sup>[8]</sup>报道了脉宽 298 fs, 自起振阈值约 70 mW 的脉冲。自 20 世纪 90 年代末以来,国内在锁模光纤激光器方面也取得了不少进展,1999年,刘东峰、陈国夫等<sup>[9]</sup>报道了自起振阈值 14 mW、脉宽 269 fs 的稳定锁模脉冲。2004年,天津大学王肇颖等<sup>[10]</sup>采用 NPE 锁模,获得了平均输出功率 0.3 mW、重复速率 13.9 MHz、脉冲宽度 1.5 ps 的自起振被动锁模脉冲输出,其自起振阈值在 80 mW 左右。

本文在全面考虑各种腔体参数的情况下,对非线性偏振旋转锁模光纤激光器的锁模原理以及脉冲输出特性进行了较为详细的分析,并采用高掺杂短长度掺 Er<sup>3+</sup> 光纤作为增益介质以及采用非线性偏振旋转进行锁模,获得了稳定的飞秒锁模光脉冲。

## 1 实验装置与原理

被动锁模环形腔掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器实验装置如图 1 所示。其腔体主要由高掺杂浓度掺 Er<sup>3+</sup> 光纤、光纤起偏器(P), 光纤隔离器(ISO)、2 个光纤偏振控制器 PC1 和 PC2、980 nm/1 550 nm 波分复用器(WDM)和输出耦合器(OC1)组成。依据 C. Barnard 理论, 掺杂浓度较高时,不仅可以缩短增益光纤长度,而且有利于提高泵浦的吸收效率,降低激光阈值。对于锁模激光器来说,减小增益光纤长度,还可以有效地降低增益光纤所产生的各种非线性效应。因此,实验采用高掺杂浓度掺 Er<sup>3+</sup> 光纤

作为激光器增益介质,其长度为 0.5 m,掺杂浓度为  $3.16 \times 10^{-3}$ ,模场半径  $5.7 \mu\text{m}$ ,数值孔径  $\text{NA} = 0.25$ ,对 980 nm 的吸收为 15 dB/m;抽运源为高稳定带尾纤的半导体二极管,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,输出耦合器分束比为 90 : 10,其中 10% 为输出。为尽量降低腔体插入损耗和连接损耗,整个激光器全部采用全光纤器件,并使裸纤熔接,总长度约为 14 m,对应基阶脉冲重复速率为 14.6 MHz。

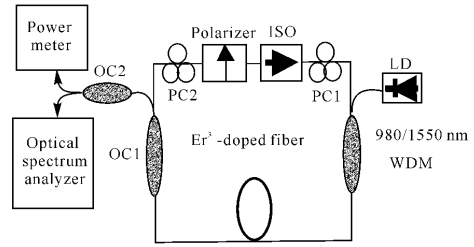


图 1 锁模光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of mode-locked fiber laser

利用非线性偏振旋转效应实现被动锁模,获得短脉冲的工作原理是:由起偏器形成的线偏光在通过第 1 个偏振控制器 PC1 后被转换成椭圆偏振光,可以认为椭圆偏振光是强度不同的左旋与右旋圆偏振光的合成;当 2 个旋转方向相反的圆偏振光在腔体中传播时,在光纤的非线性效应(Kerr 效应)作用下会产生不同的非线性相移。由于非线性相移量与光脉冲光场强度有关,因此经过腔体传输一周后,脉冲部位不会因强度不同而累积不同的非线性相移量。由于其对应的 2 圆偏振分量相移量不同,在相干叠加后合成的矢量偏振态则会产生不同程度的偏振旋转。当它再次通过起偏器时,因脉冲不同部位的偏振态不同,可引发出一个偏振相关自幅度调制可饱和吸收体效应,进而实现锁模脉冲窄化,形成超短脉冲。第 2 个光纤偏振器 PC2 主要用于调整不同非线性相移干涉后光脉冲的偏振方向,使光脉冲峰值以较小的损耗通过起偏器,即光脉冲峰值通过隔离器并反复经过腔内增益放大,光脉冲变得越来越强,而光脉冲的前后沿却越来越弱,最后形成稳定的超短光脉冲。与半导体可饱和吸收体或光子晶体光纤锁模相比,由全光纤偏振控制器和起偏器构成的非线性偏振旋转锁模机制不仅避免了非光纤结构元器件较大的插入损耗以及与光纤耦合连接所引起的连接损耗,而且保全了激光器全光纤结构,稳定性好、可靠性高。为了研究其锁模特性,采用如下锁模方程<sup>[11]</sup>:

$$j\Psi U = (g-l)U + \left(\frac{1}{\omega_g^2} + jD\right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} U + (\gamma - j\delta) |U|^2 U \quad (1)$$

式中,  $U$  为归一化电场包络;  $\Psi$  为光脉冲每循环 1 周所经历的相移;  $g$  为增益系数;  $l$  为单通线性损耗;  $\omega_g$  为增益带宽;  $D$  为群速度色散系数 (GVD, group velocity dispersion);  $\gamma$  为光纤中 NPE 效应所产生的自幅度调制系数 (SAM, self-amplitude modulation);  $\delta$  为非线性自相位调制 (SPM, self-phase modulation) 系数。假设锁模方程具有以下形式的稳态解析解:

$$U(t) = U_0 \operatorname{sech}^{(1+j\beta)}(t/\tau) \quad (2)$$

式中,  $\beta$  是啁啾系数;  $\tau$  是脉冲宽度。引入以下归一化参量:

$$D_n = \beta_2 \omega_g^2 \quad (3)$$

$$\gamma_n = E \omega_g^2 \tau_0 \gamma / 6 \quad (4)$$

$$\delta_n = E \omega_g^2 \tau_0 \delta / 6 \quad (5)$$

$D_n, \gamma_n$  和  $\delta_n$  分别为归一化色散量、自幅度调制系数和自相位调制系数;  $\tau_0$  为参考脉冲宽度;  $E = 2U_0^2 \tau$  为脉冲能量。将以上各归一化参量和稳态解析解代入锁模方程 (1) 中, 便可以得到以下脉冲参数:

$$\beta = -\frac{D_n \gamma_n + \delta_n \tau}{1 + D_n^2 \tau_0} \quad (6)$$

$$\tau_n = -\frac{3}{2} (k^2 \gamma_n - k D_n) + \sqrt{\left[\frac{3}{2} (k^2 \gamma_n - k D_n)\right]^2 + 2k^2} \quad (7)$$

$$s = (1 - \beta^2) - 2\beta D_n \quad (8)$$

$$g_n = g - l \quad (9)$$

式中,  $k \equiv (1 + D_n^2) / (D_n \gamma_n + \delta_n)$ ;  $\tau_n = \tau / \tau_0$  为归一化脉冲宽度;  $s$  为稳定性参数;  $g_n$  为净增益系数。

图 2(a) 为脉冲宽度随群速度色散 GVD、自相位调制系数 SPM 之间的变化关系。从图 2(a) 中可以看出, 在非线性系数  $\gamma \neq 0$  情况下, 随着归一化色散系数  $|D_n|$  不断减小, 脉冲宽度逐渐变窄; 当色散接近于零时, 可以获得最短脉冲。

图 (2)b 为啁啾随色散、自相位调制系数之间的变化关系。在负色散和有限非线性自相位调制参数共同作用下, 啁啾很小, 接近于零。但在正色散区, 随着色散系数增大, 脉宽和啁啾也增大, 自相位调制系数越大, 增加速度越快。

图 (2)c 为脉冲稳定性随色散、自相位调制系数之间的变化关系。其中正半轴代表稳定区, 负半轴代表非稳定区。从图 2(c) 可以看出, 此时, 激光器稳态性能处于最低点, 无法形成稳定的锁模脉冲输出。脉冲输出不稳定是由于脉宽太窄, 自幅度调制强度太弱, 脉冲净增益小于连续噪声的增益造成

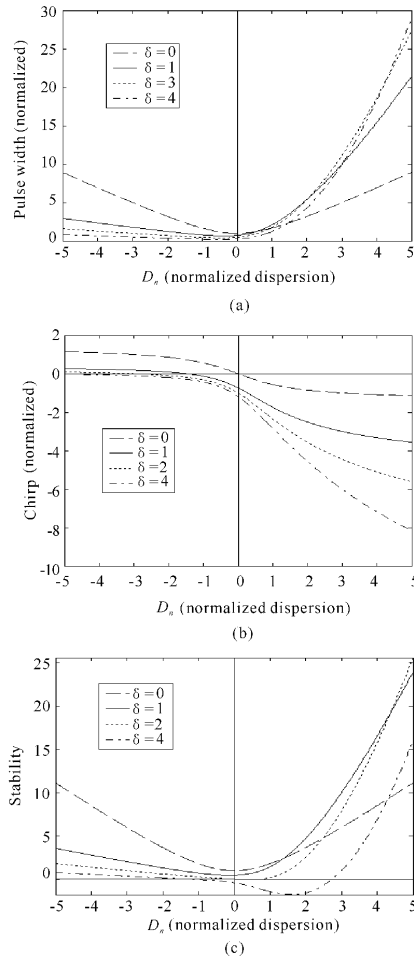


图 2 在  $\gamma_n=2$  时, GVD 与 SPM 对脉冲宽度、啁啾和稳定性的影响

Fig. 2 The effects of GVD and SPM on pulse duration, chirp and stability when  $\gamma_n=2$

的。还可以看出, 不论在正色散区还是负色散区, 当自相位调制系数较小时, 激光器都处于稳定区, 即激光器可以形成稳定的锁模脉冲输出。但是, 随着 SPM 系数的增加, 激光器在正色散区间开始脱离稳态区, 这意味着激光器难以实现锁模。在负色散区间, 尽管 SPM 增加不会使激光器脱离稳定区, 但 SPM 作用过强则会导致孤子脉冲分裂, 从而出现多脉冲现象。

综合以上分析可以看出, 输出脉冲的脉宽、啁啾、带宽和稳定性主要由 APM、SPM 作用和 GVD 等参数共同决定。因此, 要使激光器实现稳定锁模, 则必须全面权衡腔体各参数之间的关系。笔者在综

合考虑腔体各种参数之间的相互制约关系时,通过精心设计,利用非线性偏振旋转锁模机制实现了稳定的超短脉冲锁模输出。

## 2 实验结果与讨论

由于整个光纤激光器为全光纤结构,并且选用了插入损耗小的光纤器件和较短的高掺杂掺 Er<sup>3+</sup> 光纤,而且通过熔接工艺将各个器件相互连接,因此,整个腔体插入,连接损耗小、泵浦吸收效率高、自起振阈值低。当泵浦功率达到 11.5 mW 时,激光器可实现自起振锁模振荡。锁模脉冲建立后,将泵浦功率降至 7.9 mW 时仍可以维持锁模状态。当调节偏振控制器处于最佳状态时,可以观察到在 10~25 mW 之间,光纤激光器能长时间以基阶锁模状态稳定工作。正常情况下工作平台的一般振动不影响其锁模质量及稳定性,不会出现失锁现象。

图 3 给出了当泵浦功率为 23 mW 时从示波器上拍摄到的稳定锁模脉冲波形。光脉冲的重复频率为 14.6 MHz,最大平均输出功率约 0.43 mW,与其对应的单脉冲能量约 30 pJ。从输出脉冲波形图可以看出,脉冲间隔基本相等,幅度基本相同,输出波形十分稳定。对应锁模光脉冲的光谱曲线如图

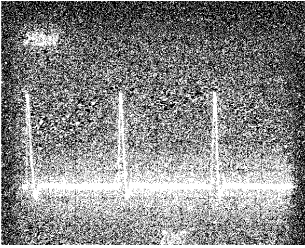


图 3 锁模脉冲序列

Fig. 3 Mode-locked pulse sequence

4 所示。其中心波长为 1 551 nm,光谱带宽为 7.6 nm。从图 4 可以看出,频谱边带抑制特性较好,抑制比高达 20 dB 左右。频谱边带<sup>[12]</sup>产生的原因是,孤子在腔内循环时,由于受到增益放大和耦合输出损耗等因素的影响,其峰值功率出现周期性变化。在这种情况下,孤子脉冲为了维持稳定的脉冲输出状态,将一部分能量转化成色散波的形式辐射出去,色散波在满足相位匹配的条件下,相干加强,便形成了频谱边带。通过调整偏振控制器,对频谱边带进行一定程度的抑制,但并不能够完全消除,并且还会对输出脉冲频谱宽度产生一定的影响。在实验中观测到,在一定的泵浦功率下,偏振控制器偏振状态不同,输出脉冲频谱宽度亦不同,其最小宽度为 5 nm,最大宽度可达 8.5 nm。由于实

验条件的限制,无法对锁模脉冲宽度进行自相关测量,因此,在近似变换极限 sech 脉冲函数假设条件下,其最窄脉冲宽度约 300 fs。

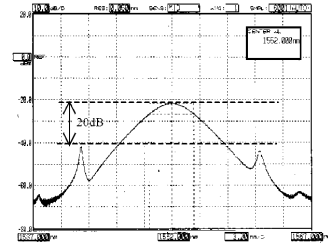


图 4 锁模脉冲序列对应的光谱图

Fig. 4 Mode-locked pulse sequence corresponding to spectrum

当泵浦功率超过 25 mW 时,孤子脉冲发生分裂,并形成多脉冲输出。这是由于腔内能量过高,造成孤子能量的量化引起的。一般情况下,分裂后的多脉冲簇仍以腔内往返时间为周期,但其脉冲幅度和脉冲间隔无规则变化。通过适当调整偏振控制器的偏振状态,可以使激光器形成稳定的高阶谐波锁模脉冲输出,如图 5 所示。与图 3 相比,除了脉冲速率不同之外,脉冲波形基本类似于基阶重复速率锁

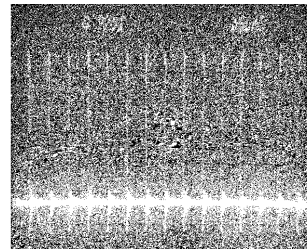


图 5 高阶锁模脉冲序列

Fig. 5 High order mode-locked pulse sequence

模。在基阶锁模情况下,脉冲重复速率主要取决于激光器腔长。由于光纤激光器需要足够的增益才能起振,因此,以掺稀土元素光纤作为增益介质的光纤激光器腔长不可能设计得很短,一般情况下都大于 6 m(重复速率约 40 MHz)。如果激光器仅工作在基阶锁模状态下,则锁模脉冲速率太低,难以应用到高速通信与信号处理系统中。因此,采用高阶谐波锁模是提升被动锁模光纤激光器脉冲重复速率的一个最有效的办法。

## 3 结论

从理论上分析了非线性偏振旋转锁模机理,并详细研究了各种腔体参数如色散、自相位调制、饱和和吸收体、增益、损耗等对输出锁模脉冲特性的

影响,成功地研制出低阈值自起振掺 Er<sup>3+</sup> 光纤环形激光器的被动锁模激光器,获得了重复频率 14.6 MHz,中心波长 1 551 nm 的稳定的飞秒锁模脉冲。与此同时,还观测到了稳定的高阶谐波锁模脉冲输出。该激光器为全光纤结构,自起振阈值低,频谱边带幅度小,工作稳定性好。

#### 参考文献:

- [1] GOMES L A, ORSILA L, JOUHTI T, *et al.* Pico-second SESAM-based ytterbium mode-locked fiber lasers [J]. IEEE J Selected Topics in Quant Electron, 2004, 10(1):129-136.
- [2] MYOUNG S O, HEE S P, BYOUNG Y K. Optical frequency-domain reflectometry based on wavelength-swept mode-locked fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(2):266-268.
- [3] KUAROD K, TAKAKURA H. Mode-locked ring laser with output pulse width of 0.4 ps [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(6):1018-1022.
- [4] JENNIFER O J, KUTZ J N, SANDSTED B. Theory and simulation of the dynamics and stability of actively modelocked lasers[J]. IEEE J Quant Electron, 2002, 38(10):1412-1419.
- [5] SEONG N H, KIM D Y. A new figure-eight fiber laser based on a dispersion-imbalanced nonlinear op-

tical loop mirror with lumped dispersive elements [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(4): 459-461.

- [6] PENG Can, YAO Min-yu, ZHANG Hong-ming, *et al.* 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser[J]. 中国激光, 2003, 30(2):101-104.
- [7] TAMURA K, HAUS H A, IPPEN E P. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fiber ring laser[J]. Electron Lett, 1992, 28(24):2226-2227.
- [8] GONG Yan-dong, SHU Ping, TANG Ding-yuan. 298 fs passively mode-locked ring fiber soliton laser [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 32(5):329-333.
- [9] 刘东峰,陈国夫,王贤华. 自起振被动锁模掺 Er<sup>3+</sup> 光纤环形腔孤子激光器的实验研究[J]. 中国科学:A辑, 1997, 29(7):656-661.
- [10] WANG Zhao-ying, WANG Yong-qiang, LIN Ran, *et al.* Self-starting passively mode-locked Er<sup>3+</sup>-doped fiber lasers [J]. 光电子·激光, 2004, 15(3):295-298.
- [11] HAUS H A, IPPEN E P, TAMURA K. Additive-pulse mode-locking in fiber lasers [J]. IEEE J Quant Electron, 1994, 30(1): 200-208.
- [12] KELLY S M J. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton[J]. Electron Lett, 1992, 28(8):806-807.

## 美国为适应新军事变革的军事转型战略

☆军事转型的策略:通过对各种资源的整合,构建军事上竞争与合作并存的动态系统,增强国家优势,防护薄弱环节,从而保持战略领先的地位。

☆国防战略描述:快速反应,提前采取措施;从其他地区迅速获得增援力量;速战速决,并彻底地击败对手。

☆可能的威胁:虽然美国现在的军事力量占有突出优势,但是仍然必须不断调整和改进自己,因为敌对力量也在不断寻求着能战胜美国的策略。由于跨地区的不确定性,地区冲突,不发达地区或无政府地区所带来的威胁,随时可能损耗美国的力量。

☆工作突破口:在国防部这样一个错综复杂的部门中,建立一个能及时处理各种情报的机构非常重要。该机构可及时将信息分为 4 个类别:军备力量的威胁、战争威胁、未来挑战威胁、制度危机。对任何一类威胁的疏漏都会危害到美国的力量。

☆军事改造战略:这一战略应集中在 3 个方面:危机战略,战争挑战,如何把握这些挑战所带来的机遇。国防部部长拉姆斯菲尔德提出了 5 个核心:(1)保护关键地区,对付化学武器、生物武器、放射性武器、核武器;(2)在不可接近的地区附近投放和保持力量;(3)拒绝敌人的“避难”;(4)利用好的信息技术,确保情报系统的高效运转并处理好情报;(5)提高跨地域的反应能力。

对美国军事力量的改造将是一个长期的过程,必须坚持以网络为中心这一基本原则。

(智 泉 供稿)