

文章编号: 1000-5862(2012)02-0124-03

# 超短脉冲“8”字形被动锁模掺铒光纤激光器

陈志宇, 唐志杰, 桑明煌\*

(江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)

摘要: 利用非线性放大环形镜被动锁模方法对锁模光纤激光器进行实验研究, 引入色散管理方法, 实现了“8”字形掺铒光纤激光器的自启动被动锁模, 在 1 550 nm 波段上得到了光谱宽度 16 nm、脉宽为  $1.77 \times 10^{-13}$  s 的超短脉冲输出. 泵浦功率在 300 mW 时, 激光器实现了重复频率为 19.7 MHz, 平均输出功率 12 mW 的锁模脉冲输出. 整个激光腔为全光纤结构, 而且操作简单, 锁模输出状态下的激光器可以在光学平台上稳定运行数小时.

关键词: 被动锁模; 光纤激光器; 非线性放大环形镜; 超短脉冲

中图分类号: TN 248

文献标志码: A

## 0 引言

光纤激光器被称作激光领域的新兴技术, 近年来成为科学研究领域的热点, 其发展和应用得到了社会各界的广泛重视. 工作中心在 1 550 nm 的飞秒掺  $Er^{3+}$  光纤激光器, 其波段恰好与通讯光纤最低损耗窗口相匹配而备受青睐, 而且在医学、探测诊断、军事等方面也有广泛的应用前景.

被动锁模是实现光纤激光器锁模的重要方法. 被动锁模是一种全光非线性技术, 区别于主动锁模方法, 其腔内无需使用调制器等有源器件就可实现超短锁模脉冲输出. 被动锁模光纤激光器是建立在光纤的非线性效应基础上的, 如 GVD、SPM、XPM 等. 实现被动锁模的方法通常有 3 种: 第 1 种是将半导体饱和吸收体放入谐振腔中; 第 2 种是通过 NALM 或者 NOLM 使光纤产生非线性克尔效应实现快速开关, 从而使激光器进入锁模状态; 第 3 种是通过偏振控制的方法, 利用非线性偏振旋转效应实现锁模脉冲输出. 国外很早就开展了这方面的研究并取得了很大的成果<sup>[1-3]</sup>, 其中英国人 Richardson 在 1991 首次使用了非线性放大环形镜(NALM)结构的光纤激光器, 通过 200 mW 功率 980 nm 的泵浦源, 得到重复频率为 50 MHz、脉宽为  $3.2 \times 10^{-13}$  s 的脉冲<sup>[4]</sup>. K.Tamura 等在 1993 年最早使用非线性偏振旋转效应(NPR)被

动锁模方法实现  $7.7 \times 10^{-14}$  s 的超短脉冲输出<sup>[5]</sup>. 在国内, 对锁模激光器的研究也取得了巨大进步<sup>[6-8]</sup>, 其中上海交通大学邓定桓等 2009 年在 1 550 nm 波段上用展宽脉冲全光纤激光器实现  $50 \times 10^{-14}$  s 无波分裂的高能量脉冲输出<sup>[9]</sup>.

本文主要分析利用非线性放大环形镜的非线性传输特性, 提出“8”字形结构的被动锁模掺铒光纤激光器. 实验过程中激光谐振腔结构被不断优化, 引进色散管理, 最终得到飞秒量级的激光脉冲输出. 整个实验的腔结构实现全光纤化, 自启动锁模实现后便可以保持稳定运行.

## 1 实验装置与原理

本实验采用由一个非线性放大环形镜(NALM)和一个线性光纤环组成的“8”字形腔结构的被动锁模光纤激光器, 如图 1 所示. 在非线性放大环形镜环中, 980 nm 的泵浦光由半导体二极管激光器(LD)输出并用一个 980/1 550 波分复用器(WDM)耦合进谐振腔; 能量的输出依靠线性腔中的一个 20% 的输出耦合器(Output Coupler). 除了用于产生增益的 12 m 长掺铒光纤(EDF)外, “8”字形腔内其余的传输光纤及尾纤均是普通单模光纤. 偏振控制器  $PC_1$  和  $PC_2$  以及偏振无关隔离器(Isolator)组成激光器的锁模器件, 偏振无关隔离器用于抑制从 NALM 出来的反射光, 实现光在

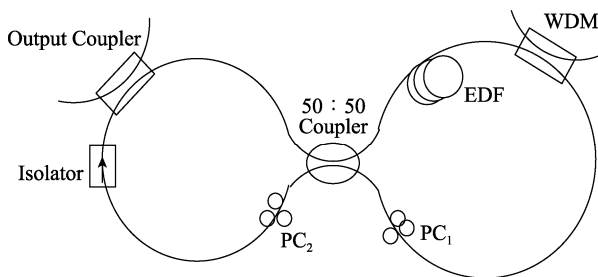
收稿日期: 2011-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60807014)资助项目.

作者简介: 桑明煌(1967-), 男, 江西德安人, 教授, 硕士, 主要从事光纤方面的研究.

线性环中的单向传输. 光的偏振态可以由偏振控制器调节, 这样可以使激光器实现稳定锁模. 输出口经过分光器连接到示波器、光电探测器、自相关仪和光谱分析仪等可以用以检查锁模情况和脉冲形状.

在图 1 中, 光经过 3 dB 的中央耦合器(50 : 50)后被分成等幅度而反向传输的 2 束光. 由于掺铒光纤被不对称放置于靠近中央耦合器的地方, 使得两路光在进入环形镜后并不是被同步放大的. 因此, 这 2 列光在 NALM 内反向传输一圈后的结果是使它们获得了不同的非线性相移, 并且位相差伴随着脉冲的色散形状而变化. 正是基于这种非线性效应, 使得非线性放大环形镜产生一种类似快速可饱和和吸收体的作用, 脉冲的峰值能量将被透射, 而前后沿因为功率过小会被反射掉. 这样脉冲在 NALM 内每循环一次就会被窄化一次, 多次循环后输出脉冲将获得很大程度的窄化. 利用这种基于 NALM 的被动锁模机制, 在实验中调节  $PC_1$  和  $PC_2$ , 使脉冲高能部分产生接近于  $\pi$  的相移而被透射, 从而获得锁模脉冲. 值得一提的是, 光纤非线性效应的响应速度可以远大于可饱和和吸收体, 达到飞秒量级<sup>[10]</sup>.



EDF 为掺铒光纤, WDM 为 980/1 550 波分复用器, Isolator 为偏振无关隔离器,  $PC_1$  和  $PC_2$  为偏振控制器, Output Coupler 为输出耦合器, 中央耦合器为 3 dB 耦合器(50 : 50).

图 1 “8”字形结构被动锁模掺铒光纤激光器的原理图

## 2 实验结果与讨论

从二极管激光器输出的 980 nm 泵浦光通过 WDM 进入激光器右边 NALM 内, 偏振相关隔离器使激光脉冲在透过中央耦合器后在左侧线性环中单向传输. 调高泵浦功率达到锁模阈值后, 调节偏振控制器  $PC_1$  和  $PC_2$  便可以得到稳定的锁模脉冲输出. 为了尽可能减小腔内光纤连接损耗, 提高泵浦吸收效率, 长度较短的高掺杂掺铒光纤和具有小插入损耗的光纤器件将是比较合适的选择. 选用 8~12 m 左右的“8”字形腔都能比较容易地实现锁模状态并能保持稳定运行, 过长或过短都不利于锁模. 实验中, 调

节偏振控制器时, 同时观察自相关仪和光谱分析仪, 发现输出脉冲宽度变化范围在几百飞秒以内. 并且随着偏振控制器的调节, 脉冲信号强度会发生显著的变化. 激光器实现锁模后, 保持偏振控制器及激光腔结构不变时, 工作平台的振动或者拨动光纤等外界因素并不影响锁模的稳定性, 即使此时降低泵浦功率到 60 mW, 锁模状态仍然能保持, 并没有出现失锁现象. 实验过程中由于采用色散管理的方法优化了激光腔, 可以观察到拥有平滑而稳定自相关曲线的单脉冲, 其脉宽要窄于  $3 \times 10^{-13}$  s.

经过对偏振控制器  $PC_1$  和  $PC_2$  适当的调节后, 在实验中成功地让激光器获得了稳定的锁模状态. 并且在自相关仪上观察到了较平滑且没有基座的单个锁模脉冲自相关曲线, 如图 2 所示. 这是这得益于在实验中选择了长度为 11 m 左右的光纤, 同时引入了色散管理. 经测量, 锁模脉冲的半高宽度(FWHM)为  $276 \times 10^{-15}$  s, 在脉冲的形状为双曲正割的情况下, 我们便得到了脉冲宽度为  $1.77 \times 10^{-13}$  s 的超短脉冲输出. 实验中使用了最大扫描范围为  $1.75 \times 10^{-10}$  s 的自相关仪(Femtochrome FR-103XL). 图 3 显示的是实验中得到的锁模脉冲序列图, 它通过光电探测器在示波器(DS 系列示波器)上读出. 可以发现其脉冲顶点清晰、脉冲序列比较整齐、幅度基本相同、脉冲间隔相等, 这说明光纤激光器处于稳定而良好的锁模状态. 实验测得脉冲序列周期为  $5.08 \times 10^{-9}$  s, 重复频率为 19.7 MHz.

图 4 为  $1.77 \times 10^{-13}$  s 脉冲输出下对应的光谱图, 其光谱宽度为 16 nm, 工作中心波长在 1 560 nm 附近(使用的是 ENDO AQ-6315E 光谱仪), 由此可以计算出时间带宽比为 0.349. 在稳定锁模情况下, 将泵浦功率锁定在 300 mW, 得到的激光器输出功率为 12 mW. 激光器谐振腔往往具有比较大的实际损耗, 基于光纤激光

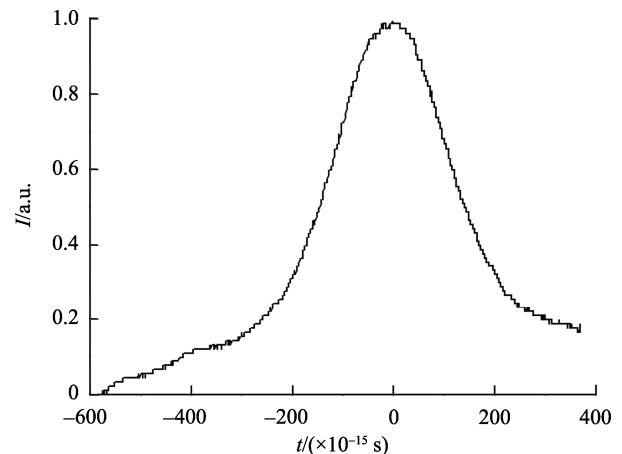


图 2 激光器输出的单脉冲自相关曲线

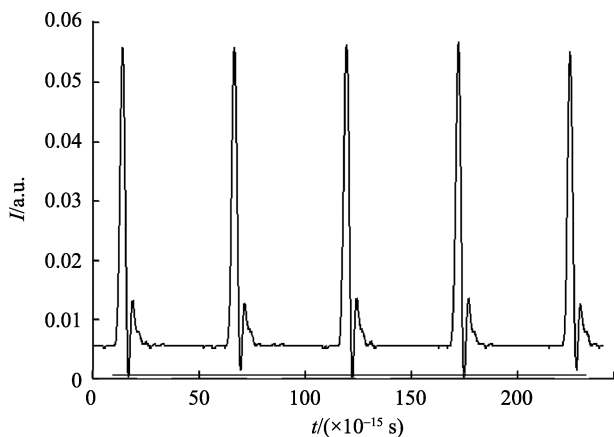


图3 激光器输出的脉冲序列

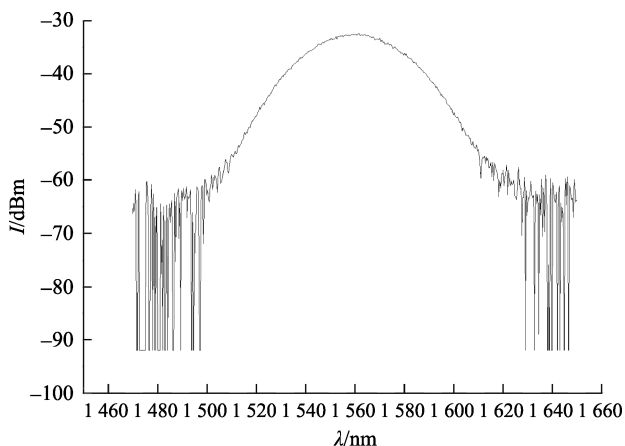


图4 激光器输出的脉冲激光光谱图

器的全光纤结构, 若想得到更大的输出功率, 只要采取一定的措施使谐振腔内的损耗尽可能地减小即可。

在实验中发现, 除了通常低泵浦功率情况下的单脉冲输出状态外, 光纤激光器还会出现多脉冲束缚态, 这种束缚态包含了 2 个以上的脉冲。此时的泵浦功率超 350 mW。进一步的研究表明, 孤子脉冲之所以会产生分裂源于过高的泵浦能量, 而光纤的非线性效应又导致脉冲之间发生相互作用, 在自相关仪上因而能看到主峰附近会出现次峰, 脉冲形状发生明显变化, 此时激光器即处于束缚态多脉冲输出状态<sup>[11]</sup>。并且产生的脉冲个数随能量提高而增多。所以为了避免脉冲分裂以及多脉冲束缚态的出现, 在试验中应小心控制好激光器的泵浦功率值。

### 3 结论

本文主要以基于非线性放大环形镜的“8”字形掺铒光纤激光器为实验对象, 研究其锁模条件及锁

模质量。在实验中选用了具有全光纤腔结构的“8”字形掺铒光纤激光器, 成功地实现了被动锁模自启动, 其锁模状态受外界环境因素的干扰极少, 并通过通过色散管理的方法对谐振腔进行了优化, 最后实验在 1 550 nm 波段上得到了光谱宽度 16 nm、脉宽为  $1.77 \times 10^{-13}$  s 的超短脉冲输出。将泵浦功率下调至 300 mW 时, 激光器输出功率为 12 mW, 重复频率为 19.7 MHz。实验中需注意控制泵浦功率大小, 过高的泵浦功率会导致激光器处于束缚态多脉冲输出状态。实验中的激光器可以实现被动锁模自启动, 锁模输出状态下的激光器也可以在光学平台上稳定运行数小时。通过对实验过程的观察以及对实验结果的分析, 在采取一定的实验措施之后, 所用的掺铒光纤激光器实验平台可以输出更短的超短脉冲, 比如说在激光器中加入一些用以减弱输出脉冲的展宽色散补偿器件, 选取低损耗的单模光纤以及适当掺杂浓度的掺铒光纤, 并且选择合适长度的光纤也有助于超短脉冲的产生。

### 4 参考文献

- [1] Ilday F Ö, Chen J, Kartner F X. Generation of sub-100-fs pulses at up to 200 MHz repetition rate from a passively mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2005, 13(7): 2716-2721.
- [2] Lim H, Ilday F Ö, Wise F W. Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 660-662.
- [3] Nicholson J W, Andrejco M. A polarization maintaining, dispersion managed, femtosecond figure-eight laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8160-8167.
- [4] Richardson, Laming R. 320 fs soliton generation with passively mode-locked erbium fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 27(9): 730-732.
- [5] Tamura K, Ippen E P, Haus H A, et al. 77fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 1993, 18 (13): 1080-1082.
- [6] 王肇颖, 余震虹, 高培良. 8 字形主被动锁模掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2003, 23(11): 1341-1345.
- [7] 马海全, 刘畅, 赵卫. 8 字形腔锁模掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1341-1345.
- [8] 张伟, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性放大环形镜“8”字形腔光纤激光器实验研究 [J]. *光子学报*, 2006, 35(12): 1808-1811.
- [9] 邓定桓, 詹黎, 顾照昶, 等. 50fs 输出的全光纤展宽脉冲激光器 [J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3094-3097.
- [10] Agrawal G P. *Applications of nonlinear fiber optics* [M]. America: Academic Press, 2001.
- [11] Grelu P, Soto-Crespo J M. Multisoliton states and pulse fragmentation in a passively mode-locked fibre laser [J]. *Journal of Optics*, 2004, 6(5): 274-278.