

基于增益诱导光纤激光器的实验研究及理论分析^{*}

王孺然^{1 2)} 刘雪明¹⁾† 宫永康^{1 2)} 胡晓鸿^{1 2)} 王屹山¹⁾ 卢克清¹⁾

1) 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 8 月 17 日收到, 2008 年 11 月 27 日收到修改稿)

利用非线性偏振旋转技术, 实现了正色散掺铒光纤激光器的自启动锁模, 产生了一种新型的增益诱导孤子脉冲输出. 该类型脉冲的光谱近似为矩形, 半高全宽光谱宽度可达 19 nm 以上, 脉宽为皮秒量级. 增益诱导孤子脉冲的形成是增益饱和、光谱滤波效应、腔内色散和各种非线性效应共同作用的结果. 同时还分析了脉冲啁啾特性及峰值功率等参数. 当抽运功率增加时, 该激光器还可以实现双脉冲模式下运转.

关键词: 光纤激光器, 增益诱导孤子, 啁啾

PACC: 4260, 4260D

1. 引言

近年来, 光纤激光器由于其具有结构简单、成本低廉且调节简便和稳定性良好等优点, 得到了广泛的研究和发展. 光纤激光器的一个基本应用是产生飞秒超短脉冲, 而飞秒激光在医学、超精细微加工、高密度信息储存和记录方面都有着广泛的用途和很好的发展前景. 以前的研究工作主要集中在传统的负色散孤子光纤激光器方面^[1, 2]. 近期基于正色散掺 Yb³⁺ 光纤激光器的研究已得到了较大的发展^[3-6]. 掺 Er³⁺ 光纤可以产生波长为 1550 nm 附近的光脉冲, 能够广泛应用于光纤通信系统. Tang 等人, 提出了一种新型的正色散被动锁模掺 Er³⁺ 光纤激光器, 并将其命名为增益诱导孤子 (gain-guided soliton pulse, GGSP) 激光器^[7]. 此种激光器和传统的孤子激光器输出相比, 有着完全不同的特性. 其输出脉冲光谱近似为矩形, 并且具有很大的正啁啾. Gao 等也进行了相似的研究^[8]. 在我们的实验中, 得到了 3 dB 光谱宽度大于 19 nm 的稳定 GGSP 脉冲输出. 此结果超过了文献 [7] 和 [8] 所报道的数值, 而且光谱更为平滑, 脉宽更窄, 脉宽为皮秒量级. 该激光器不仅可以在普通脉冲输出状态下工作, 还可以产生多脉冲输出. 本文将基于这种新型的增益诱导孤子激光器

的实验结果, 进行性能研究和理论分析.

2. 实验装置

增益诱导孤子激光器的典型结构如图 1 所示.

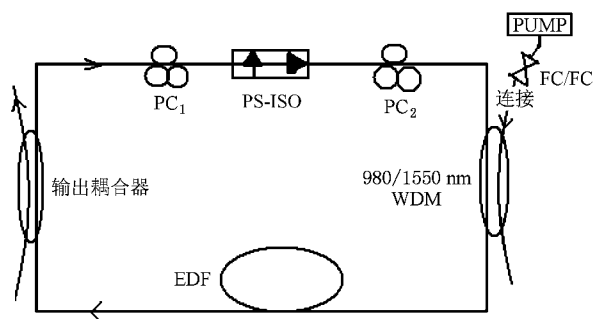


图 1 增益诱导光纤激光器结构图

由图 1 可以看出, 增益诱导孤子激光器 (GGSP 激光器) 装置构造与色散管理光纤激光器基本相同. 抽运源采用工作波长为 980 nm 的单色激光源, 其最大输出功率为 500 mW, 通过一个 980 nm/1550 nm 的波分复用器 (WDM) 对一段 20 m 长 EDF (1550 nm 处色散参数 D 为 -42 ps/(nm·km)) 进行抽运. 偏振相关隔离器 (PS-ISO) 的作用是抑制后向反馈、保证环形腔激光器单向运转. 偏振控制器 (PC₁) 的作用是调节激光器的偏振态. 实验中采用光谱分析仪测量

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10874239, 10604066) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: liuxm@opt.ac.cn

输出激光的光谱,经过光电信号转换用 LeCroy 公司生产的 11GHz 宽带数字示波器观察其脉冲序列;用自相关仪测量输出光脉冲的宽度.输出耦合器为 10% 输出.连接用单模光纤(SMF)总长度为 3.8 m,在 1550 nm 处其色散参数 D 为 17 ps/(nm·km).总腔长为 23.8 m,因此该激光器工作基频为 8.72 MHz;腔内总色散量为 0.99 ps².

3. 实验结果和原理分析

在文献[9]中指出,GLE 方程(Ginzburg-Landau equation)在正色散和负色散条件下都存在解析解.对于具有有限增益带宽的增益介质,当色散为较大的正值时,其稳态解为带有较大啁啾的双曲正割型脉冲.由于啁啾的存在,导致脉冲的不同部分的频率发生了变化.在光谱滤波作用下,这些不同频率成分将经历不同的放大.该文对于脉冲光谱,啁啾,脉宽和色散之间的限制关系进行了数值模拟.结果显示,当介质色散为负且接近于 0 时,GLE 方程的解为微弱啁啾的脉冲,并且其脉宽较小.这种情况对应于常规孤子激光器的孤子脉冲;当介质色散为正时,色散值越大时,其脉冲的啁啾值越大.同时,其脉冲宽度也越大.与此同时,除色散参数外,脉冲宽度和啁啾值还受到光谱滤波限制.唯有三者符合确定的数值关系时候,可以得到该条件下 GLE 的稳态解.因此,对于激光腔总色散为正的情况,在增益、光谱滤波效应和各种非线性共同作用下,也有可能形成稳定的锁模脉冲输出.

在实验中,通过调节两个偏振控制器的偏振状态,当抽运功率超过一定阈值时,可以获得稳定的自启动锁模脉冲输出.在我们的试验中,可以实现自启动的最低抽运功率仅为 70 mW,远低于文献[7]的结果.当抽运功率为 98 mW 时,实验中测得输出脉冲典型光谱图和脉冲序列图以及脉冲自相关谱分别见图 2、图 3 和图 4.

对于我们的实验而言,最初的噪声脉冲随着抽运功率的增高而得以放大,当其进入 Er³⁺ 光纤之后,在 SPM 效应的作用下,将产生正的频率啁啾,而腔内的色散为较大的正值,导致光谱逐渐向两侧加宽.与此同时,脉冲宽度和啁啾量也随之增加.而由于啁啾脉冲在增益放大介质中将经历增益窄化等作用^[10],因此脉冲光谱在其加宽过程中将受到有效增益带宽限制而不会无限加宽.对应之下,脉冲脉宽亦

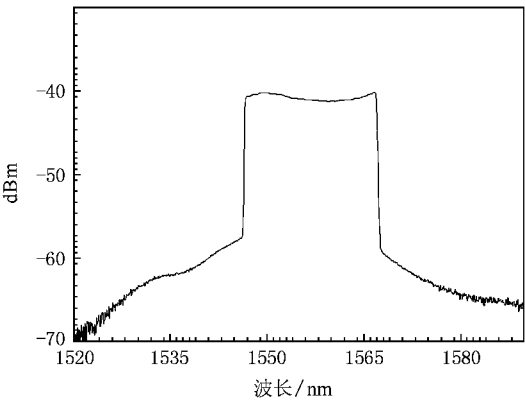


图 2 GGSP 激光器输出脉冲光谱

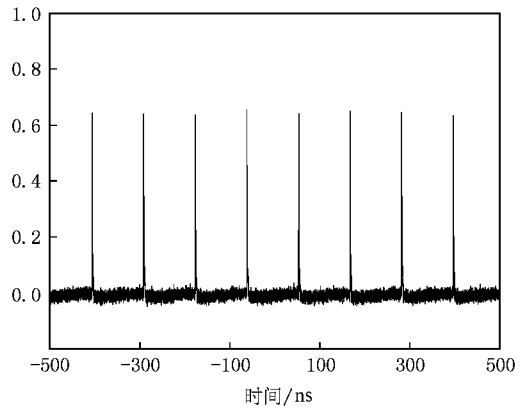


图 3 GGSP 脉冲序列图(示波器)

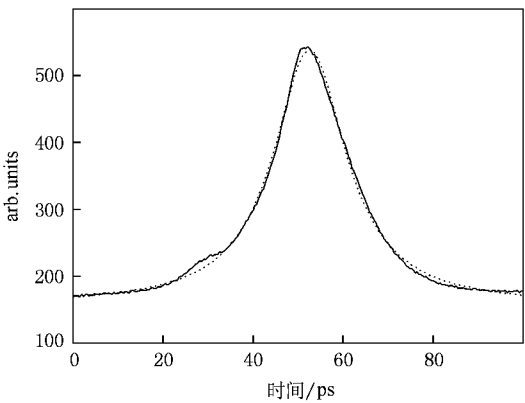


图 4 GGSP 输出脉冲自相关谱(虚线为拟合曲线)

会进行有限展宽.当脉冲传播进入 PC 及偏振相关隔离器之后,在等效可饱和吸收体作用下,光谱宽度和脉宽由于脉冲边翼被消除而进一步减小.该过程循环进行,直至初始输入脉冲在腔内运转一周后,光谱和脉宽等特性参数在上述各种效应作用下能够恢复到原来的水平,此时激光器将形成稳定的锁模脉

冲输出. 综上所述, GGSP 脉冲的形成是超短脉冲在符合激光腔边界条件下, 腔内正色散, 光纤非线性效应, 增益窄化和增益饱和等效应共同作用并达到平衡的结果^[3,7].

由图 2 可以看出其光谱具有陡峭的前后沿, 这和其他的正色散锁模激光器具有类似的特征^[3-6]. 而光谱具有明显的 3 dB 谱宽限制, 这是由于 SPM 效应引起的光谱展宽受到腔内的有效光谱增益带宽限制所致. 由于该激光器的色散量为较大的正值 (0.99 ps²), 因此, 带有正啁啾的脉冲在 SPM 效应作用下, 光谱将有较为明显的加宽. 图 2 中 3 dB 光谱宽度可达 19.2 nm.

经过测量, 图 2—4 对应脉冲输出平均功率为 1.24 mW, 其 3 dB 谱宽取 19.2 nm, 中心波长为 1558 nm. 单脉冲能量 $Q_{\text{single}} = \frac{P_{\text{avg}}}{F} T$, 其中 P_{avg} 表示脉冲的平均功率, F 表示脉冲重复频率, T 表示标准时间单位. 经过计算可知 Q_{single} 为 0.14 nJ. 由自相关谱可知, FWHM 脉宽为 16.4 ps, 如取高斯拟合, 其脉宽为 12.9 ps. 此脉宽值脉冲峰值功率 $P_{\text{peak}} = \frac{P_{\text{avg}}}{F \cdot t}$, 其中 t 表示脉冲宽度, 经计算 P_{peak} 为 11.0 W. 时间带宽积 $N_{\text{TBP}} = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2} t$, 其中 c 为真空中光速, $\Delta\lambda$ 为 3 dB 光谱宽度, λ 为脉冲中心波长. 经过计算可知时间带宽积为 30.6. 由于 GGSP 激光器的输出耦合器位于掺铒光纤之后, 腔内有强烈的非线性效应且色散为较大的正值, 因此输出的脉冲带有很大的正啁啾, 导致时间带宽积较大.

实验中, 我们还研究了光谱随抽运功率变化的关系. 保持 PC 偏振态不变, 将抽运功率从 139 mW 降低至 59 mW, 光谱 3 dB 宽度随之降低, 见图 5.

在该 PC 状态下, 激光器的自启动阈值为 75 mW. 降低抽运功率, 仍然可以输出稳定脉冲, 直至 59 mW 时, 脉冲变的十分不稳定, 处于失锁临界状态. 由此可以看出, 随着抽运功率的增加, 光谱是逐渐加宽的. 一直到实现自启动稳定锁模, 此时在增益饱和, 腔内色散和各种非线性效应共同作用下, 光谱变为顶部较平坦的矩形. 在功率单调增加直至自启动的过程中, 无法观察到近高斯形光谱状态, 而在功率降低的过程中才能出现, 这是由于采用 NPR 锁模技术的磁滞作用引起的^[11].

通过调节 PC 状态, 并改变抽运功率, GGSP 激光器还可以实现不同的输出特性. 图 6—8 分别为抽

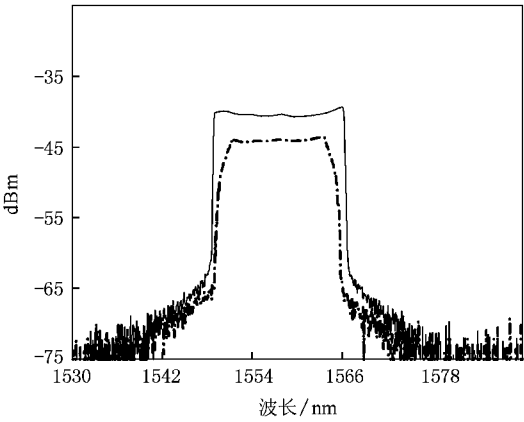


图 5 抽运功率分别为 139 mW(实线)和 59 mW(虚线)时的光谱

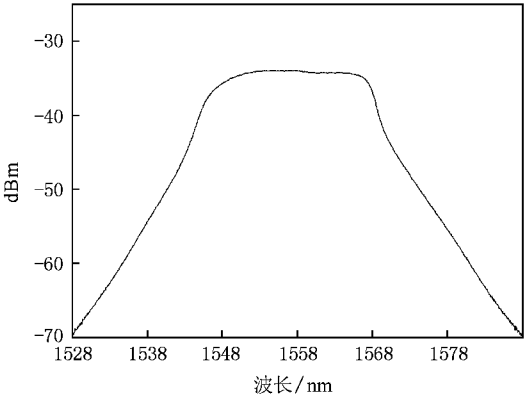


图 6 脉冲光谱图

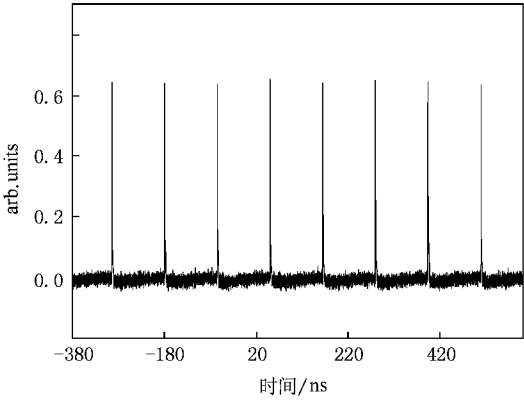


图 7 脉冲序列图(示波器)

运功率 173 mW 时的输出光谱图, 脉冲图和自相关谱线.

相比于前面的实验结果, 当抽运功率增大到一定值后, 此时脉冲的光谱将向两侧进行展宽. 这是由于随着抽运功率增大, SPM 效应和其他各种非线性效应越来越强, 导致了光谱继续加宽, 而此时由于腔

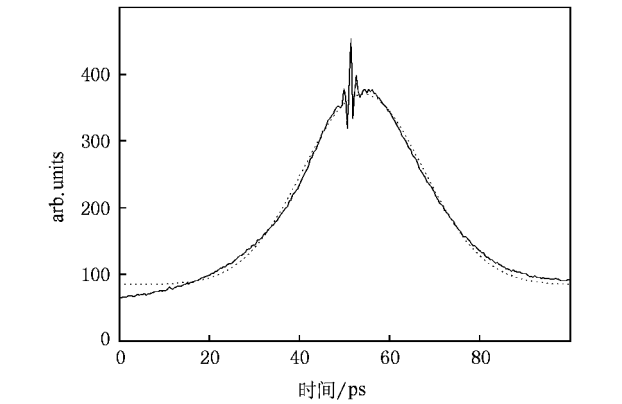


图 8 脉冲自相关谱(虚线为拟合曲线)

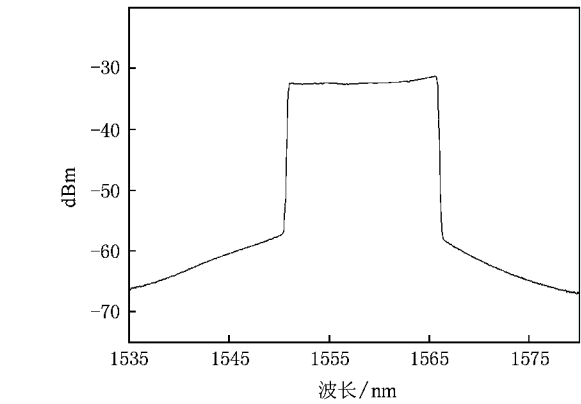


图 9 双脉冲输出光谱图

内光谱滤波和动态增益饱和的影响,光谱的不同成分将经历不同的放大,其中央部分达到饱和之后将不再升高,而是向两侧进行展宽.光谱的展宽对应于脉冲能量的增大,脉冲宽度也随之增加.实验中测得该脉冲输出平均功率为 2.28 mW,3 dB 光谱宽度达到 22.0 nm.经过计算,其单脉冲能量为 0.26 nJ.自相关谱显示脉冲的 FWHM 为 30.5 ps,如取高斯拟合结果,则脉宽为 22.3 ps.可知此时脉冲峰值功率为 11.7 W,时间带宽积为 60.7,大于常规工作状态.从时间带宽积的大幅增大,反映出脉冲啁啾值的迅速增大.这是由于抽运功率增加,腔内各种非线性效应增强,而腔内色散为正,导致啁啾积聚增大^[6].图 8 的自相关谱带有尖刺结构,这是由于正啁啾很大的脉冲在经过具有负色散的单模连接光纤作用之后,形状发生了畸变.

重新调节 PC 工作状态并改变抽运功率,该 GGSP 激光器还可以实现双脉冲输出,图 9 和图 10 为抽运功率为 301 mW 时的双脉冲输出光谱和脉冲序列图.

从图 9 可以看出,双脉冲状态下的光谱和初始单脉冲状态的光谱形状是相同的,都是较规则的矩形.其 3 dB 光谱宽度约为 15 nm.而从示波器上(图 10)可以看出,两个脉冲的强度也是相同的,说明其脉冲能量相同.双脉冲的形成,是由于采用 NPR 技术锁模的激光器受到峰值功率箝制效应(peak power clamping effect)引起的^[12].PC 的调节状态和抽运功率决定了腔内相位延迟值的设置;当相位延迟设置为较小值且处于腔正反馈区时,随着抽运功率的增加,脉冲能量也随之增大;当脉冲峰值功率达到正反馈条件限制而产生箝制效应的阈值时,继续增大抽运功率原始脉冲将不再放大,此时背景色散波将得

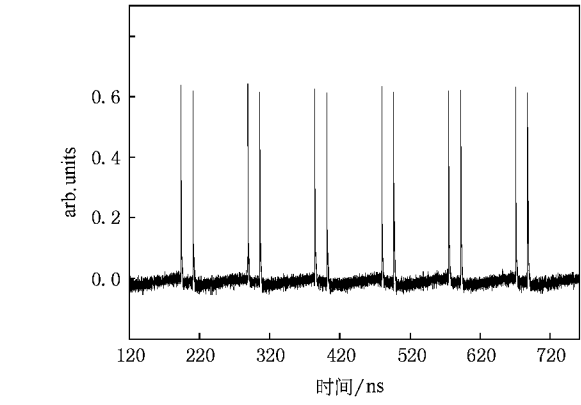


图 10 双脉冲输出脉冲序列图(示波器)

到增益放大,而其中符合腔内振荡条件的随机信号能够获得稳定增益并形成锁模输出.由于腔内有效增益带宽较窄,因此新产生的脉冲在时域上易与背景色散波分开.新生脉冲与原始脉冲互相竞争互相影响,当两者的光谱、脉宽和脉冲能量等特性变为一致时,便以稳定的双脉冲状态在腔内共同传输.由于两个脉冲的形成机理是相同的,因此其光谱特性和初始单脉冲状态也相同.

4. 结 论

在正色散掺铒光纤激光器中,利用非线性偏振旋转锁模技术,腔内色散、光纤非线性效应、增益窄化和增益饱和等效应共同作用并达到平衡,从而实现了 GGSP 脉冲自启动锁模输出.其输出脉冲光谱具有陡峭的边沿和明显的增益带宽限制,3 dB 光谱宽度超过 19 nm.由于腔内色散量为正,相比于常规负色散孤子激光器,脉冲的宽度更大,为 ps 量级,并

且带有很大的正啾啾. 通过增大抽运功率和调节偏振控制器, 该激光器还可以在双脉冲状态下运转. 本文基于增益诱导孤子激光器的实验研究, 研究了 GGSP 脉冲的产生机理, 并分析了其输出光谱, 脉冲

宽度, 峰值功率, 啾啾特性等参数. 该研究揭示了腔色散对于光纤激光器中脉冲的形成以及其特性有着重要影响, 并有助于提高对于被动锁模光纤激光器的理解与认识.

- [1] Liu W H, Wang Y S, Liu H J *et al* 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 1815 (in Chinese) [刘卫华、王屹山、刘红军等 2006 物理学报 **55** 1815]
- [2] Zhang S M, Wen H, Lv F Y, Zuo X X 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 2192 (in Chinese) [张书敏、温虹、吕福云、左晓雪 2007 物理学报 **56** 2191]
- [3] Lin H H, Lu Z H, Wang J J *et al* 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 5646 (in Chinese) [林宏奂、卢振华、王建军等 2008 物理学报 **57** 5646]
- [4] Chong A, Buckley J, Renninger W H, Wise F W 2006 *Opt. Express* **14** 10095
- [5] Kieu K, Wise F W 2008 *Opt. Express* **16** 11453
- [6] Ruehl A, Prochnow O, Wandt D, Kracht D, Burgoyne B 2006 *Opt. Lett.* **31** 2734
- [7] Zhao L M, Tang D Y, Wu J 2006 *Opt. Lett.* **31** 1788
- [8] Gao W Q, Zheng H *et al* 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1267
- [9] Bélanger P A, Gagnon L, Paré C 1989 *Opt. Lett.* **14** 943
- [10] Wise F W, Chong A, Renninger W H 2008 *Laser & Photon. Rev.* **2** 58
- [11] Kommarov A, Leblond H, Sanchez F 2005 *Phys. Rev. A* **71** 053809
- [12] Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H *et al* 2007 *Opt. Lett.* **32** 1581

Experimental research and theoretical study based on gain-guided soliton pulse fiber laser^{*}

Wang Lei-Ran^{1,2)} Liu Xue-Ming^{1)†} Gong Yong-Kang^{1,2)} Hu Xiao-Hong^{1,2)} Wang Yi-Shan¹⁾ Lu Ke-Qing¹⁾

¹⁾ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

²⁾ Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 17 August 2008; revised manuscript received 27 November 2008)

Abstract

We use nonlinear polarization rotation technology to realize the self-start passive mode-locking in the erbium-doped fiber ring laser of positive dispersion, which can generate a new kind of gain-guided soliton pulse. The laser generates picosecond pulses with a rectangular-shaped spectrum, the FWHM width of which can be greater than 19 nm. The gain-guided soliton formation mechanism may include laser gain, spectral filtering effect, cavity dispersion and other fiber nonlinear effects. In this paper we also study the chirp property, peak power and other parameters of the pulse. With further increasing the pump power, the laser can operate on dual-pulse output mode.

Keywords: fiber laser, gain-guided soliton, chirp

PACC: 4260, 4260D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10874239, 10604066).

[†] Corresponding author. E-mail: liuxm@opt.ac.cn