

滤波位置相关的全正色散掺 Yb^{3+} 锁模光纤激光器的实验研究*

欧阳春梅 柴路[†] 赵慧 胡明列 宋有建 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2009 年 4 月 30 日收到; 2009 年 9 月 11 日收到修改稿)

采用非线性偏振旋转锁模, 构建了一种全正色散掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器. 在该激光腔内采用了 10 nm 带宽的光纤滤波器提供附加的自振幅调制. 通过改变滤波器在腔内的位置, 实验证明了滤波器位置对高啁啾脉冲的整形过程起到重要的作用. 在 320 mW 的抽运功率下, 最终获得平均功率为 92.2 mW, 脉冲重复频率为 26.6 MHz, 脉冲宽度为 6.2 ps 的稳定脉冲输出, 单脉冲能量达 3.5 nJ 的优化结果. 通过数值模拟与实验结果的验证表明, 两者相符很好.

关键词: 锁模光纤激光器, 全正色散, 滤波效应, 高啁啾脉冲

PACC: 4255N, 4260D, 4280W

1. 引 言

近年来, 超短脉冲锁模光纤激光器^[1-3] 以其高效率、低阈值、可调谐、紧凑型、可用激光二极管 (LD) 抽运和高性价比等优势成为研究的一个热点, 并已经走向市场, 逐渐取代固体超短脉冲激光器. 然而, 随着超短脉冲激光技术应用领域的扩展, 对脉冲能量的要求也越来越高. 为了实现高能量、高峰值功率的超短脉冲, 激光器的结构和锁模运转机制得到了越来越多的关注. 提高超短脉冲光纤激光器脉冲能量的传统方法是使激光器运转在正色散区域, 通过展宽脉冲来降低峰值功率, 从而控制激光器的非线性特性^[4]. 呼吸型的光纤激光器可以产生从几十皮焦到几纳焦的脉冲能量^[5-7]. 自相似脉冲的提出为进一步提高脉冲能量开辟了新的途径, 这种运转方式产生的单脉冲能量可高达 10 nJ^[8,9]. 采用包层抽运的自相似锁模激光器可产生 20 nJ 的脉冲能量^[10]. 近年来, 在没有采用任何色散补偿元件的全正色散 (ANDi) 光纤激光器中得到了稳定的锁模运转^[11]. 在这种激光器中需要采用频谱滤波元

件来稳定锁模运转. 因为在高啁啾脉冲激光器中脉冲能量受到非线性偏振旋转 (NPE) 锁模机制的限制, 即当脉冲宽度较宽时, NPE 引入的自相位调制效应较弱, 很难使锁模自启动, 而且脉冲能量较高时, NPE 的过饱和效应限制了能量的进一步提高. 但是, 可以在腔内引入频谱滤波机制来提供附加的自振幅调制, 补偿 NPE 因脉冲展宽而削弱的振幅调制特性, 也可以在一定程度上弱化 NPE 的过饱和, 这样可以达到进一步提高脉冲能量的目的. 频谱滤波是通过切除高啁啾脉冲中低频的脉冲前沿和高频的脉冲后沿使脉冲窄化, 在实验中可以通过多种手段来实现. Buckley 等^[12] 采用刀口来控制高啁啾脉冲在掺 Yb^{3+} 锁模光纤激光器中的整形过程. Chong 等^[13] 在腔内插入双折射滤波片引入频谱滤波效应, 在没有色散补偿的情况下, 得到的脉冲能量高达 20 nJ. 今年, Kieu 等^[14] 在 ANDi 光纤激光器中采用双包层掺 Yb^{3+} 光纤作为增益介质, 得到了 31 nJ 的脉冲能量. 在这些高啁啾脉冲激光器中, 频谱滤波的引入提高了脉冲能量, 但是都没有讨论过滤波器在腔内的位置对激光输出的影响. 本文采用 10 nm 带宽的光纤滤波器提供自振幅调制, 使高啁啾脉

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB806002, 2010CB327604)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA03Z447)、国家自然科学基金 (批准号: 60978022, 60838004)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20070056083, 20070056073)、教育部科学技术研究计划重点项目 (批准号: 108032) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-07-0597) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

冲激光器稳定运转,并通过研究滤波器在腔内的位置与激光输出特性的关系,找到了 ANDi 锁模光纤激光器中的最佳滤波位置,从而实验证明了在该类激光器中滤波器放置位置也是一个重要因素。

2. 实验装置

为了控制激光器的非线性特性,提高超短脉冲光纤激光器的脉冲能量,必须使激光器运转在较高的正色散区域. 实验装置如图 1 所示. 采用波长为 980 nm 的单模光纤(SMF)耦合输出的 LD 作为抽运源,最大抽运功率为 320 mW;抽运光通过 980/1064 的波分复用器(WDM)耦合到增益光纤(GF)中,GF

为高掺杂浓度的单模掺 Yb^{3+} 光纤;腔内其余的光纤元件为 HI 1060 型 SMF,其中 GF 前面的 SMF 长度总和约为 6 m,为激光器提供较大的正常色散;为了避免累积过多的非线性相移,GF 后面的 SMF 不宜过长,这里约为 1.3 m;因为 GF 掺杂浓度较高,所以选择 0.42 m 长;计算得到的腔内净色散约为 $+0.2 \text{ ps}^2$;腔内采用两个四分之一波片(QWP)和一个半波片(HWP)控制光波的偏振态和偏振分束棱镜(PBS)的输出耦合比,实现 NPE 锁模;并采用 1064 nm 的光纤隔离器,使腔内光波实现单向传输. 为了得到自启动且稳定的被动锁模运转,在高啁啾的 ANDi 光纤激光器中接入了一个波长为 1064 nm 的光纤频谱滤波器(SF),3 dB 带宽为 10 nm.

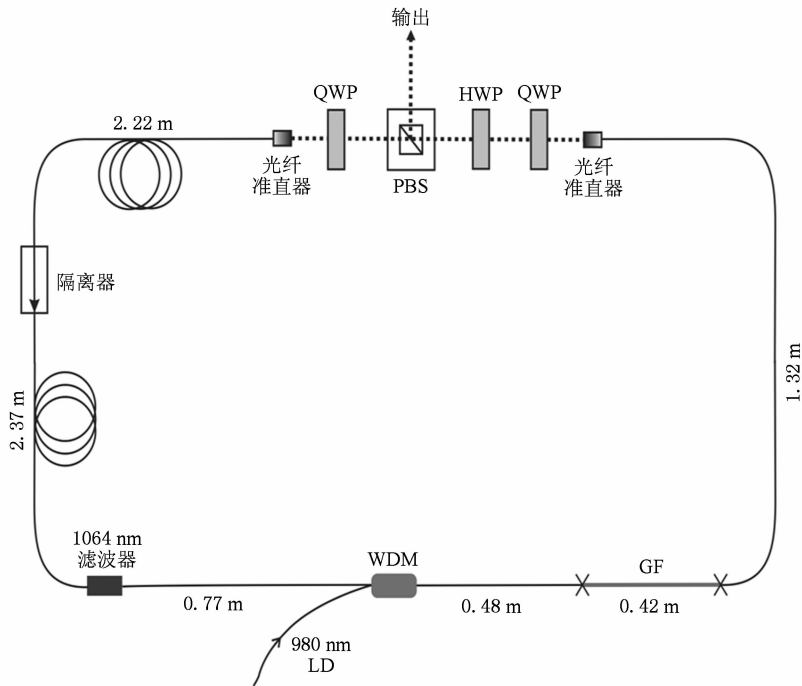


图 1 ANDi 光纤环形激光器实验装置示意图

在本文研究的激光器腔内,由于没有采用任何提供负色散的器件,所以该激光器的结构更简单紧凑、成本较低. 由于腔内脉冲具有较高的正啁啾, NPE 的锁模自启动受到限制,而且它的过饱和效应也限制了脉冲能量的提高. 所以在该激光器腔内引入了一个 SF,通过其对高啁啾脉冲的频谱整形,为该激光器提供了附加自振幅调制机制. 滤波器的放置位置对激光器的最终输出特性有重要影响,这是构建一台光纤激光器应该普遍关注的问题. 所以本文的研究重点放在该类激光器中 SF 的位置效应,目的在于找到 SF 在 ANDi 光纤激光器中最佳位置

的一般规律.

3. 实验结果

当滤波器在腔内的位置如图 1 所示时,抽运功率增加到 150 mW,开始出现调 Q 锁模. 继续增加抽运功率到 190 mW 时,调整波片的偏振方向,实现了稳定的连续锁模. 利用上升时间为 200 ps 的高速响应光电二极管和采样频率为 4 GHz 的示波器探测的锁模脉冲序列如图 2 所示. 脉冲重复频率为 26.6 MHz.

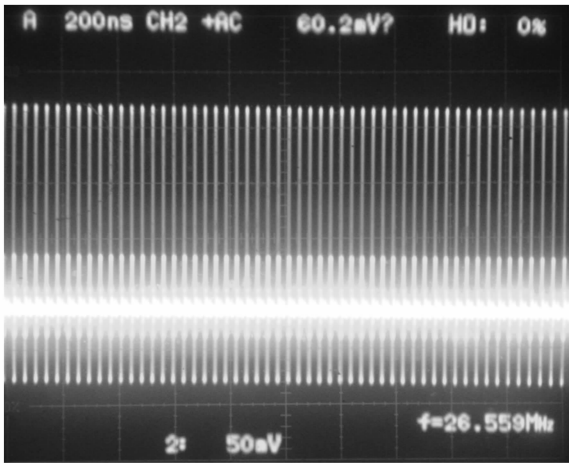


图2 激光器处于单脉冲运转状态下的锁模脉冲序列

继续增加抽运功率到最高值 (320 mW), 调整波片得到的锁模输出平均功率达 92.2 mW, 单脉冲能量为 3.5 nJ. 激光器输出脉冲的光谱如图 3 所示. 从图 3 可以看到, 光谱的中心波长在 1065 nm 处, 3 dB 带宽约 4.2 nm. 另外还可以看到, 光谱边缘较陡, 并且有尖峰结构, 符合滤波作用下得到的典型的脉冲光谱特性^[12-14].

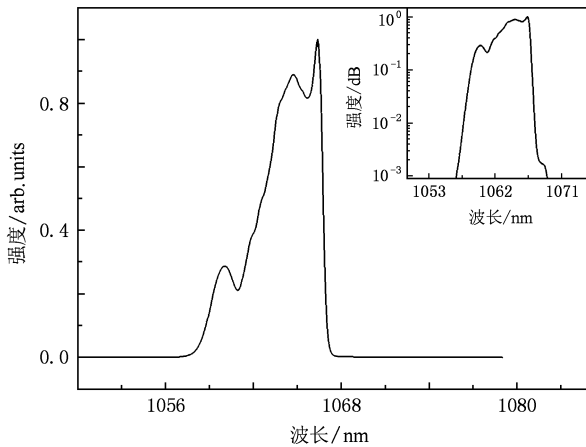


图3 激光器输出的脉冲光谱 内插图是对数坐标下的光谱

锁模脉冲的自相关曲线如图 4 所示. 通过拟合发现, 高斯型脉冲的宽度约为 6.2 ps, 时间带宽乘积为 6.9, 是变换极限的 15.6 倍, 所以该 ANDi 光纤激光器输出的脉冲具有较高的正啁啾.

ANDi 激光器中的自由光路仅有 13 cm, 光脉冲绝大部分时间是在光纤中传输, 所以受周围环境的影响很小, 如敲击光学平台也不会对锁模造成影响. 重新打开激光器, 只需恢复抽运功率就可以得到稳定的锁模运转. 为了进一步测量该激光器的噪

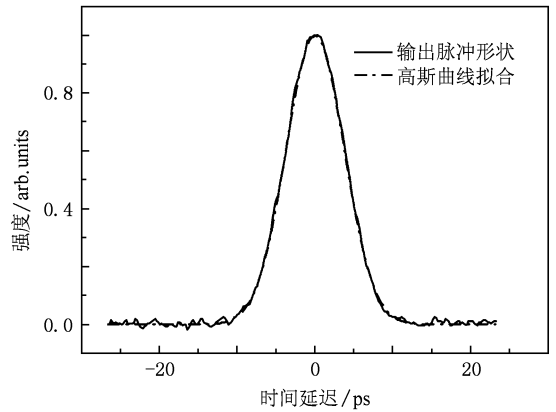


图4 激光器输出脉冲的自相关曲线

声特性, 采样频谱分析仪测量脉冲信号的射频 (RF) 频谱, 所得结果如图 5 所示. 测量过程中, 选取频率范围为 200 kHz, 分辨带宽为 300 Hz. 很明显, 该激光器稳定性较高, 信噪比可达 80 dB. 此外, 测量得到的振幅噪声扰动只有 0.06%, 在 6 Hz—30 kHz 频率范围内的时间抖动约为 200 fs.

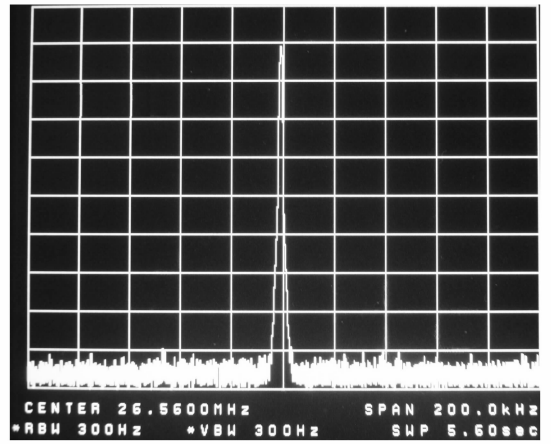


图5 激光器输出脉冲的 RF 频谱形状

为讨论 SF 在腔内的位置对激光输出脉冲特性的影响, 我们在实验中有目的地改变 SF 在腔内的位置, 同时保证 GF 前后的 SMF 长度保持不变. 当 SF 位于 GF 后面时, 调整波片的偏振角度, 得到的最高锁模输出功率为 71.2 mW, 单脉冲能量为 2.7 nJ. 输出脉冲光谱和自相关曲线如图 6 所示. 从自相关曲线可以看到, 输出脉冲宽度没有变化, 但是脉冲形状变为双曲正割型, 光谱形状也发生了改变. 这些变化不仅与 SF 的位置有关, 还与波片的偏振角度相关. 当改变 SF 在腔内位置到光纤隔离器前面并靠近光纤准直元件时, 调整波片后得到最高锁模

输出平均功率为 84 mW, 单脉冲能量为 3.2 nJ. 对应的输出光谱和自相关曲线如图 7 所示. 此时, 输出脉

冲形状仍然是高斯型, 但脉冲宽度变为 6.9 ps, 光谱中心部分强度增大.

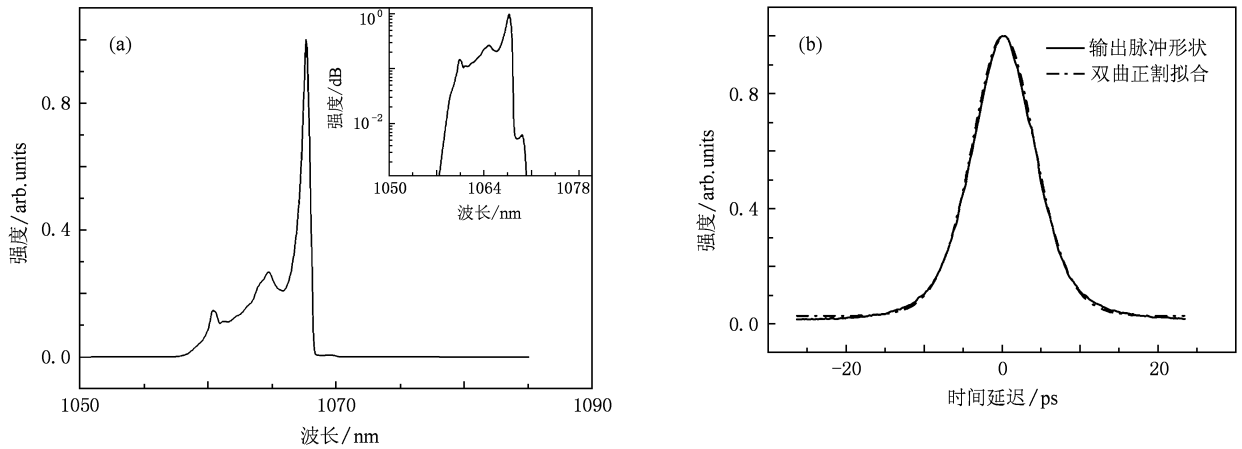


图 6 当 SF 在 GF 后面时, 激光器输出脉冲特性 (a) 脉冲光谱, (b) 脉冲自相关曲线

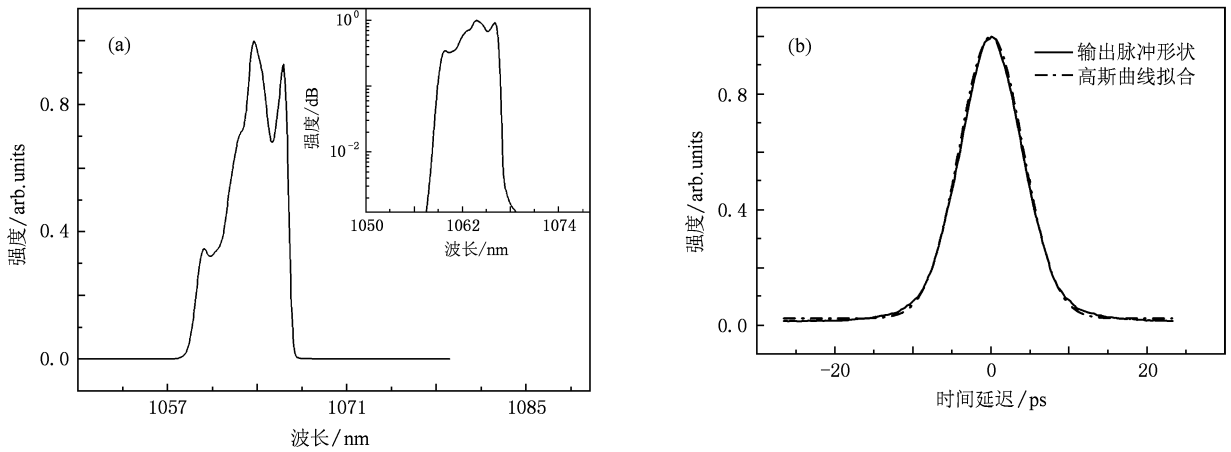


图 7 当 SF 在隔离器前面时, 激光器输出脉冲特性 (a) 脉冲光谱, (b) 脉冲自相关曲线

比较 SF 在腔内三个不同位置时所得到的锁模脉冲输出特性可以发现, 当 SF 在 GF 前面 (图 1) 时得到的输出脉冲特性最佳, 即获得的脉冲功率最高, 脉冲能量最大.

4. 数值模拟

为了解释 SF 位置优化实验结果, 我们采用分步傅里叶方法数值研究了在实验中考虑的 SF 三个不同位置条件下, 该激光器中脉冲能量和脉冲宽度在腔内各个元件中的动力学演变过程, 结果如图 8 所示. 数值模拟中 NPE 锁模机制可等效于快速可饱和吸收体 (SA); SF 的频谱滤波作用采用高斯型的

滤波函数表示. 从图 8(a) 可以看到: 当 SF 靠近 GF 前面时, 在光脉冲在腔内传输过程中, 脉冲经过 SF 前面较长的 SMF 时积累了大量的正啁啾, 脉冲宽度大幅度展宽; 这时在 SF 的作用下, 脉冲前沿的低频率成分和后沿的高频率成分被部分切掉, 因此脉冲变窄; 在随后的短 SMF 中, 脉冲又稍微被展宽; 在 GF 段, 由于光谱增益的作用使脉冲中部比两翼 (高、低频部分) 的增益大, 故宽度变窄, 但是由于增益带宽 (数值计算考虑了 40 nm 增益带宽) 和光纤色散的展宽效应影响, 使之逐渐抵消了脉冲的窄化; 当脉冲经过 GF 后面的 SMF 时, 脉冲继续被展宽; 经过 SA 时, 可饱和吸收作用进一步压缩了脉冲宽度. 另外, 在图 8(a) 中也给出腔内脉冲能量的动

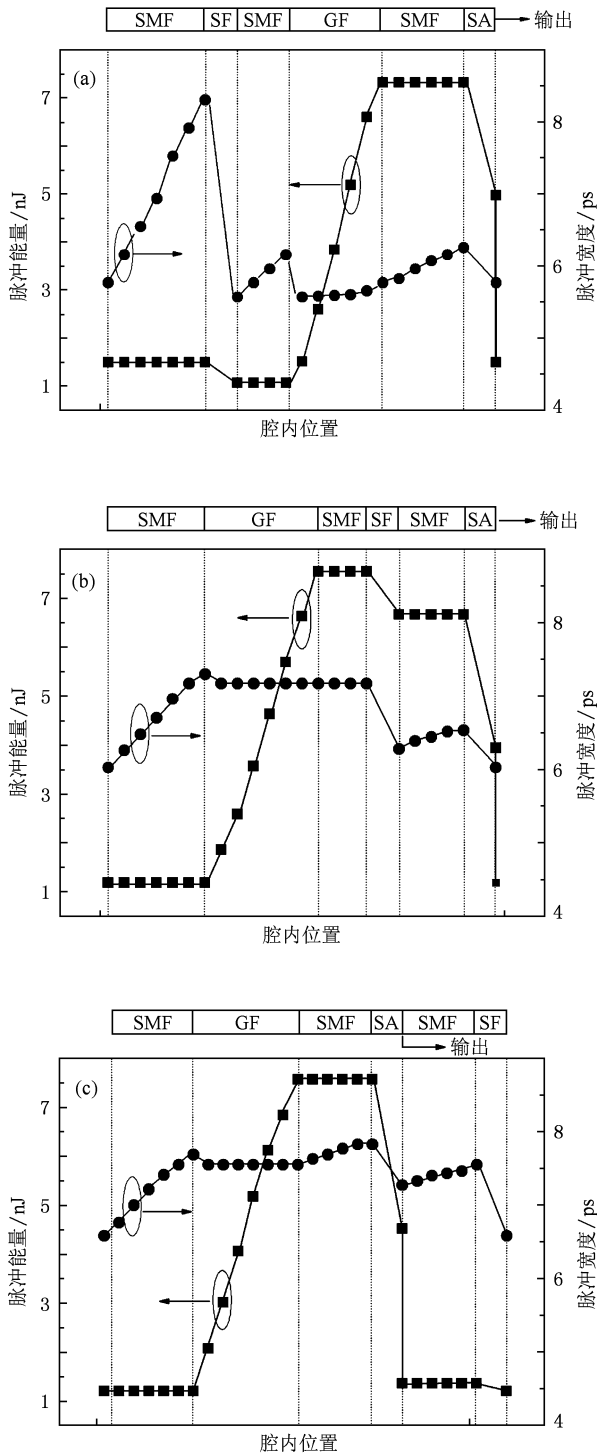


图 8 数值模拟得到的脉冲能量和脉冲宽度在腔内的演变过程 (a) SF 在 GF 前, (b) SF 在 GF 后, (c) SF 在 SA 后

力学过程. 由于光纤较短, 模拟时忽略了光纤的损耗, 所以脉冲在普通光纤中传输时脉冲能量不变. 当脉冲经过 SF 时, 频谱滤波效应使脉冲能量有所降低. 但在掺 Yb^{3+} 的 GF 作用下, 脉冲能量即刻被补偿并逐渐放大. 此后, SA 的吸收作用使脉冲能量又下降到了 5 nJ, 其中 3.5 nJ 的能量被输出腔外. 图 8 (b) 表示当 SF 的位置位于 GF 后面时, 腔内脉冲变化的动力学过程. 结合脉冲能量的变化可以发现, 当 SF 放在 GF 后面时引入的损耗更大, 而且较宽的脉冲使得 SA 的吸收损耗也增大, 因此在输出耦合比不变的情况下输出的脉冲能量也会减小. 在图 8 (c) 中, SF 的位置是在 SA 的后面, 输出的脉冲能量也比 SF 放在 GF 前面低. 比较上述 SF 在腔内三个不同位置的模拟结果, 只有当 SF 处于 GF 前面时才能导致腔内脉冲宽度的剧烈变化, 即脉冲的呼吸比最大, 而处于其余两个位置时腔内脉冲宽度的变化明显减弱, 即脉冲呼吸比下降, 并且腔内脉冲的平均宽度也增大, 不利于非线性效应的积累. 以上数值结果既证明了 SF 的位置选取对腔内脉冲的动力学过程的影响非常明显, 也验证了 SF 在 ANDi 光纤激光器中的最佳位置应在 GF 前面, 这与实验结果相符合.

5. 结 论

构建了 ANDi 锁模光纤激光器, 并通过研究腔内滤波器的位置对激光输出脉冲的影响, 实验证明了在 ANDi 锁模光纤激光器中最佳滤波位置应位于 GF 的前面. 在 320 mW 抽运功率下, 获得了平均功率为 92.2 mW, 脉冲宽度为 6.2 ps, 单脉冲能量达 3.5 nJ 锁模脉冲序列; 光-光转换效率为 71%. 实验中测量了激光器的噪声特性, 得到的振幅扰动噪声为 0.06%, 在 6 Hz—30 kHz 频率范围内的时间抖动约为 200 fs. 此外, 通过数值模拟讨论了 ANDi 光纤激光器中的脉冲运转特性, 并验证了在实验中获得的最佳滤波位置.

- Chinese) [付圣贵、范万德、张强、王志、李丽君、张春书、袁树忠、董孝义 2004 物理学报 **53** 4262]
- [3] Wang Y G, Ma X Y, Fu S G, Fan W D, Li Q, Yuan S Z, Dong X Y, Song Y R, Zhang Z G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1810 (in Chinese) [王勇刚、马骁宇、付圣贵、范万德、李强、袁树忠、董孝义、宋晏蓉、张志刚 2004 物理学报 **53** 1810]
- [4] Tamura K, Nelson L E, Haus H A, Ippen E P 1993 *Appl. Phys. Lett.* **64** 149
- [5] Cautaerts V, Richardson D J, Paschotta R, Hanna D C 1997 *Opt. Lett.* **22** 316
- [6] Ortac B, Hideur A, Chartier T, Brunel M, Özkul C 2003 *Opt. Lett.* **28** 1305
- [7] Ilday F Ö, Buckley J R, Kuznetsova L, Wise F W 2003 *Opt. Express* **11** 3550
- [8] Buckley J R, Wise F W, Ilday F Ö, Sosnowski T 2005 *Opt. Lett.* **30** 1888
- [9] Ortac B, Plötner M, Schreiber T, Limpert J, Tünnermann A 2007 *Opt. Express* **15** 15595
- [10] An J, Kim D, Dawson J W, Messerly M J, Barty C P J 2007 *Opt. Lett.* **32** 2010
- [11] Chong A, Buckley J, Renninger W H, Wise F W 2006 *Opt. Express* **14** 10095
- [12] Buckley J, Chong A, Zhou S, Renninger W, Wise F W 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1803
- [13] Chong A, Renninger W H, Wise F W 2007 *Opt. Lett.* **32** 2408
- [14] Kieu K, Renninger W H, Chong A, Wise F W 2009 *Opt. Lett.* **34** 593

Experimental study on all-normal-dispersion mode-locked fiber laser with optimal spectral filtering position^{*}

Ouyang Chun-Mei Chai Lu[†] Zhao Hui Hu Ming-Lie Song You-Jian Wang Qing-Yue

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 30 April 2009; revised manuscript received 11 September 2009)

Abstract

Employing nonlinear polarization rotation, an all-normal-dispersion mode-locked fiber ring laser was constructed, in which a fiber filter with 10 nm bandwidth was used in the cavity to provide the additional self-amplitude modulation. The important role of the filter position plays in the high-chirped pulse shaping in the laser has been experimentally demonstrated by choosing different locations of the filter in the cavity. A mode-locked pulse series, with the averaged power of 92.2 mW, output pulse duration of 6.2 ps, and pulse repetition frequency of 26.6 MHz, corresponding to the pulse energy of 3.5 nJ, was obtained in the optimized filter position under a pump power of 320 mW. By the numerical simulation, the propagation dynamics of pulses in the three cases of spectral filter (SF) position in the cavity are obtained and analyzed. The optimal location of the SF is found, which is in agreement with our experimental result.

Keywords: mode-locked fiber laser, all normal dispersion, filtering effect, highly chirped pulse

PACC: 4255N, 4260D, 4280W

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2006CB806002, 2010CB327604), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z447), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978022, 60838004), the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education, China (Grant Nos. 20070056083, 20070056073), the Key Program of Science and Technology Research of Ministry of Education, China (Grant No. 108032) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-07-0597).

[†] Corresponding author. E-mail: lu_chai@tju.edu.cn