

高稳定性、高质量脉冲压缩飞秒光纤激光系统研究

连富强 樊仲维 白振岍 刘一州 林蔚然 张晓雷 赵天卓

Femtosecond fiber laser for high-stability and high-quality pulse compression

Lian Fu-Qiang Fan Zhong-Wei Bai Zhen-Ao Liu Yi-Zhou Lin Wei-Ran Zhang Xiao-Lei Zhao Tian-Zhuo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 164207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米银六角阵列在掺氧氮化硅中的局域表面等离激元共振特性仿真

Simulation of localized surface plasmon resonance of hexagonal Ag nanoarrays and amorphous oxidized silicon nitride

物理学报.2015, 64(17): 177301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177301>

Au 纳米颗粒和 CdTe 量子点复合体系发光增强和猝灭效应

Enhancement and quenching of photoluminescence from Au nanoparticles and CdTe quantum dot composite system

物理学报.2015, 64(16): 167301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167301>

复合金属光栅模式分离与高性能气体传感器应用

Split modes of composite metal grating and its application for high performance gas sensor

物理学报.2015, 64(14): 147302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.147302>

径向偏振光下的长焦、紧聚焦表面等离激元透镜

Plasmonic lens with long focal length and tight focusing under illumination of a radially polarized light

物理学报.2015, 64(9): 097301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097301>

十字结构银纳米线的表面等离极化激元分束特性

Surface plasmon polaritons splitting properties of silver cross nanowires

物理学报.2015, 64(9): 097303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097303>

高稳定性、高质量脉冲压缩飞秒光纤激光系统研究*

连富强¹⁾²⁾ 樊仲维^{1)†} 白振忞¹⁾ 刘一州³⁾ 林蔚然¹⁾
 张晓雷⁴⁾ 赵天卓¹⁾

1)(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(北京大学, 北京 100871)

4)(北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100190)

(2015年2月27日收到; 2015年3月20日收到修改稿)

报道了一款用于眼科手术的高稳定性、高质量脉冲压缩飞秒光纤主振荡功率放大系统. 振荡器采用混合腔方式增加了光纤双折射, 改善了非线性偏振旋转锁模在低重复频率下无法自启动的缺点, 提高了飞秒光纤激光器自启动锁模的稳定性. 研究了脉冲预啾啾与飞秒脉冲压缩质量的关系, 通过实验证明了光纤放大器的入射脉冲保持负的预啾啾状态可以得到最好的脉冲压缩结果. 实验最终实现了满足自启动锁模条件的重复频率 19.4 MHz、平均功率 1.2 W、脉冲宽度 183 fs 的激光脉冲, 目前这台激光器是国内首台具有自主知识产权并应用于动物角膜实验的飞秒光纤激光器.

关键词: 超快光学, 被动锁模, 可饱和吸收, 啾啾

PACS: 42.60.-v, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.64.164207

1 引言

目前国际飞秒激光眼科治疗仪中采用的激光器多为国外生产的固体激光器, 如美国加利福尼亚 IntraLase 公司生产的钕玻璃激光器, 这种飞秒固体激光器对环境温度要求很高, 体积大, 移动后必须重新调整光路, 非常不便^[1,2]. 光纤飞秒激光器以其低成本、易集成、无水冷的特点, 已逐渐成为此领域的研究热点^[3-6], 并且随着近年来飞秒光纤激光器的稳定性和脉冲能量的不断提高, 使其同样可以应用于眼科治疗仪中. 从临床医学的 LASIK 手术效果来看, 眼科的手术更加倾向于重复频率小于 20 MHz、脉冲宽度小于 200 fs 的高能量激光脉冲. 啾啾脉冲放大技术 (CPA) 是飞秒光纤激光获得高脉冲能量的一个重要的技术手段, 利用这种

技术, 激光脉冲在功率放大的过程中可以避免不利因素, 如自相位调制、受激拉曼散射等. 康奈尔大学的 Kuznetsova 和 Wise^[7] 以重复频率 60 MHz 的飞秒光纤激光器作为 CPA 的振荡器, 利用声光调制器将振荡器的重复频率降低, 采用光子晶体光纤对降频的脉冲进行功率放大, 获得了高脉冲能量的飞秒脉冲. 土耳其比尔肯特大学的 Mukhopadhyay 等^[8] 采用重复频率 43 MHz 的飞秒光纤振荡器, 利用 CPA 技术同样也获得了高脉冲能量的飞秒脉冲.

上述飞秒光纤激光器的方案都是先产生高重复频率的脉冲, 然后用声光或电光调制器将重复频率降到 20 MHz 甚至更低, 然后进行功率放大, 这样不仅增加了系统的成本和复杂程度, 还降低了系统的效率. 如果直接增加非线性偏振旋转 (NPE) 锁模光纤激光器的腔长, 将重复频率降低到 20 MHz

* 中国科学院光电研究院自主部署项目——雏鹰计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: aofiberlaser@126.com

偏振拍长, 因此光纤内不可控制的双折射对振荡器的锁模影响较小, 但非保偏光纤的长度不可以无限制地减少, 因为会影响掺镜光纤对抽运光的高效吸收, 这也决定了掺镜光纤长度不可以小于 4 m, 而保偏光纤的长度不能大于 5 m. 透射光栅与准直器 O2 之间的 $\lambda/2$ 波片是保证脉冲的线性偏振态与保偏光纤的慢轴重合, 消光比测试结果大于 200 : 1, 掺镜光纤采用了正向抽运的方式, 锁模的启动是通过调整 $\lambda/4$ 波片 (紧邻准直器 O1) 和 $\lambda/2$ 波片 (紧邻准直器 O2) 来完成.

光纤放大器采用芯径 10 μm 的掺镜双层包层光纤 (吸收系数与振荡器采用的增益光纤相同), 抽运源为多模光纤输出的高功率半导体激光器, 增益光纤长度为 2.2 m, 抽运光同样是通过合束器导入到增益光纤中, 在功率放大过程中 SPM 会引入非线性啁啾, 而脉冲的非线性啁啾无法通过最后光栅对 (grating-pair) 直接进行色散补偿, 这会导致飞秒激光脉冲无法压缩到最优的结果, 为了解决这一问题, 在功率放大前端引入了预色散补偿组件, 如图 1 中的虚线内所示, 其由单光栅和两只对称的角镜构成, 混合腔光纤振荡器输出的锁模脉冲首先经过一个偏振相关的隔离器, 然后入射到预色散补偿组件, 激光脉冲经过水平和垂直两个方向角镜的反射可以四次通过光栅, 通过这种方式光束折转衍射, 利用单光栅便可以实现光栅对同样的色散补偿目的. 本实验采用了 Lightsmyth 公司生产的透射式光栅, 其线密度是 1000 lines/mm, 一级衍射的 Littrow 角度是 31° , 激光入射角度在 $31^\circ \pm 5^\circ$ 范围时光栅的单次衍射效率大于 94%, 此时光栅预色散补偿组件总的衍射效率是 78%. 振荡器输出的锁模脉冲在经过预色散补偿组件的预啁啾作用后, 激光脉冲由正啁啾转变为负啁啾状态, 随后具有负啁啾的激光脉冲被耦合进入增益光纤中. 在增益光纤正色散环境的影响下, 脉冲由负啁啾状态逐渐补偿为零啁啾状态, 零啁啾的激光脉冲具有最高的峰值功率, 在经过增益光纤的功率放大后会引入强的 SPM, 这会抵消光纤放大器中无法通过色散补偿来消除的三色色散 [7], 消除脉冲压缩后的基座, 实现高质量的脉冲压缩.

3 实验结果与分析

混合腔飞秒光纤振荡器的输出功率随抽运功率线性增加, 如图 2 所示. 在抽运功率达到 1.6 W 之前, 振荡器一直保持连续光输出, 此时最大的输

出功率是 280 mW; 当抽运功率增加到 1.7 W 时, 振荡器开始产生稳定的重复频率为 19.4 MHz 的锁模脉冲, 如图 2 中的插图所示; 稳定锁模时的输出功率与前一阶段连续光输出功率相比有所下降, 由原来的 280 mW 下降到 210 mW, 损失掉的 70 mW 功率是由于 NPE 旋转引入的偏振相关的损耗导致的. 当振荡器处于连续光状态, NPE 并没有完全实现其饱和行为, 此时振荡器无法抑制掉脉冲两翼的偏振态, 所以激光器处于低损耗、高功率输出但无法锁模的状态, 随着光纤内激光功率的增加, 不同的偏振态积累了不同的非线性相移, 当 NPE 可以抑制掉脉冲两翼的偏振态时激光器便实现了高损耗、低功率的稳定锁模状态, 在抽运功率达到 2 W 之前, 光纤振荡器可以保持稳定的锁模状态, 没有脉冲分裂的发生, 此时对应最高的单脉冲能量是 15.5 nJ.

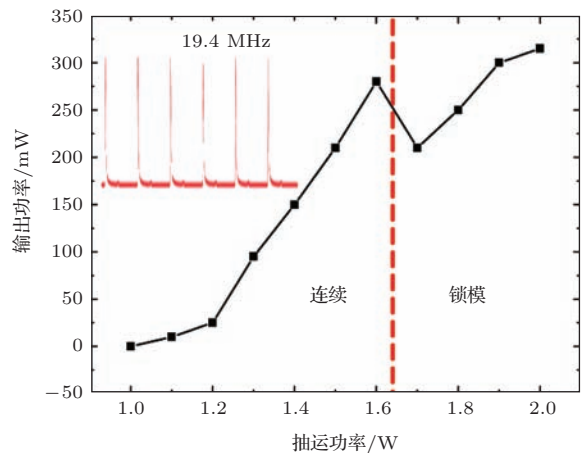


图 2 振荡器输出功率随抽运功率的变化 (插图为例锁模脉冲序列)
Fig. 2. Oscillator output power vs. pump power, inset: Mode-locked pulse.

振荡器输出的锁模脉冲光谱图如图 3 所示, 采用分辨率为 0.02 nm 的日本横河光谱分析仪测得的锁模激光的中心波长为 1049 nm, 3 dB 的光谱带宽为 3.88 nm, 该飞秒混合腔光纤振荡器工作在全正色散状态, 因此输出的激光光谱并没有明显的 Kelly 边带, 在光谱的中心位置出现了次峰, 说明此时的锁模脉冲受到较强的 SPM 调制, 导致了光谱的展宽.

光纤振荡器输出脉冲宽度是 4.1 ps, 如图 4 中的实线所示, 此时将振荡器输出的 4.1 ps 激光脉冲直接注入到光纤放大器中进行功率的放大 (不经过图 1 虚线内的预色散补偿组件), 在放大器的抽运功率 5.6 W 时光纤放大器的输出功率达到 2.1 W, 利用线密度为 1000 lines/mm 的光栅对进行脉冲压

缩, 得到压缩后的输出功率为 1.2 W, 测量此时的脉冲宽度如图 4 中的虚线所示, 为 380 fs, 并且自相关曲线伴有明显的基座, 说明锁模脉冲在经过光纤放大器后发生了严重的畸变和展宽. 导致这一问题有两方面原因: 首先, 锁模脉冲在经光纤放大器功率放大的过程中由于 SPM 作用会引入非线性啁啾, 这部分啁啾无法通过最后光栅对的色散补偿来抵消, 因此对脉冲进行了展宽, 影响了脉冲的压缩质量; 其次, 光纤的三阶色散会引起飞秒脉冲的畸变, 表现为在飞秒脉冲沿附近会形成振荡结构, 进而演变成脉冲沿的拖尾, 这种情况形成了自相关曲线中的基座.

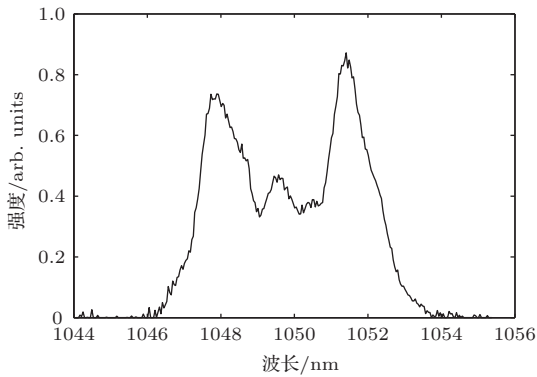


图 3 振荡器输出的锁模脉冲光谱

Fig. 3. Mode-locked optical spectrum for the Yb-oscillator.

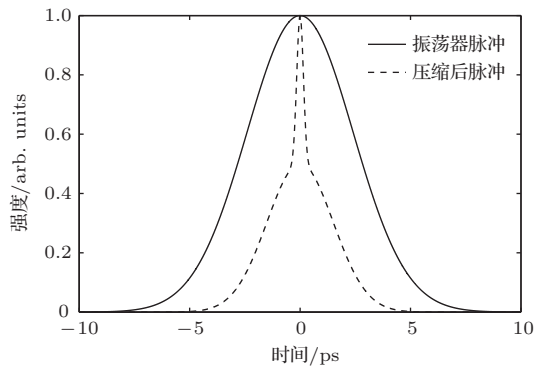


图 4 振荡器输出的自相关脉冲(实线)和经过光栅对压缩后输出功率 1.2 W 的自相关脉冲(虚线)

Fig. 4. Autocorrelation trace of the oscillator (solid line) and the compressed pulse of power 1.2 W (dashed line).

为了解决上述脉冲压缩的问题, 提高脉冲压缩的质量, 我们需要抑制在功率放大过程中引入的非线性啁啾以及正三阶色散, 因此我们可以利用光栅引入负色散对功率放大前的脉冲进行预啁啾作用来抵消掉一部分由 SPM 引入的非线性啁啾. 根据

Treacy 理论^[12]对光栅色散的计算可以得到光栅对的群延迟色散 β_2 :

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^3}{2\pi c^2 d^2 \cos^3(\gamma - \theta)}, \quad (1)$$

(1) 式中 d 是光栅对的中心距离, $\gamma - \theta$ 是激光脉冲对光栅的入射角度. 由 (1) 式可知光栅可以补偿正群速度色散, 振荡器输出的脉冲经过光栅的色散补偿后其出射的脉冲宽度 T_1 为

$$T_1 = T_0 \left[\left(1 + \frac{C \cdot 4 \ln 2 \cdot \beta_2 \cdot b}{T_0^2} \right)^2 + \left(\frac{4 \ln 2 \cdot \beta_2 \cdot b}{T_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

(2) 式 T_0 是入射脉冲的宽度, b 是光栅对的中心距离, C 是入射脉冲的啁啾量. 利用 (1) 和 (2) 式可以模拟锁模脉冲在经过光栅预啁啾作用后的脉冲宽度, 如图 5 所示. 图 5 中实线模拟了采用线密度 1000 lines/mm 的光栅对振荡器输出的 4.1 ps 脉冲预压缩后的结果, 当光栅中心间距 60 mm 时, 脉冲宽度被压缩为 1.3 ps; 随着光栅间距的增加脉冲宽度逐渐减少, 当光栅中心间距为 90 mm 时, 脉冲宽度被压缩到最小为 400 fs, 此时将振荡器输出的锁模脉冲注入到图 1 中虚线内的预色散补偿组件内, 通过两对角镜和单光栅的组合可以实现光栅对的色散补偿功能. 脉冲宽度为 4.1 ps 的锁模脉冲在经过预色散补偿组件后其脉冲宽度如图 5 中的虚线所示, 最小值为 500 fs, 此时脉冲的总啁啾量近似为零(含剩余少量的非线性啁啾), 随着光栅间距的增加, 光栅将提供过量的负色散补偿, 脉冲开始展宽, 此时的脉冲表现为负啁啾. 整体来看两条曲线的重合度较高, 证明了光栅预色散补偿理论分析的正确性.

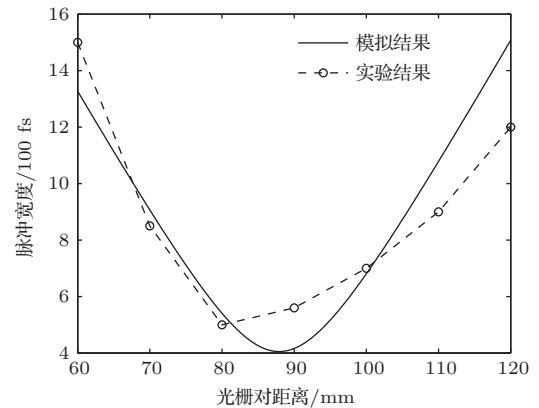


图 5 经过光栅预压缩后的脉冲宽度

Fig. 5. Optical duration of the pre-chirped pulse.

将预压缩后得到的最小脉冲宽度 500 fs 的脉冲注入到光纤放大器中, 经过光纤放大器的功率放大以及最后光栅对的压缩, 系统在输出功率 1.2 W 时的脉冲自相关曲线如图 6(a) 中的实线所示, 脉冲宽度约为 270 fs, 但伴有基座. 与图 4 中虚线相比较可以发现, 经过预色散补偿后的脉冲在功率放大后可以得到更好的脉冲压缩质量 (脉冲宽度更窄, 基座变的不明显), 证明了图 1 中预压缩组件的有效性, 但此时在脉冲自相关曲线的底部还存在基座.

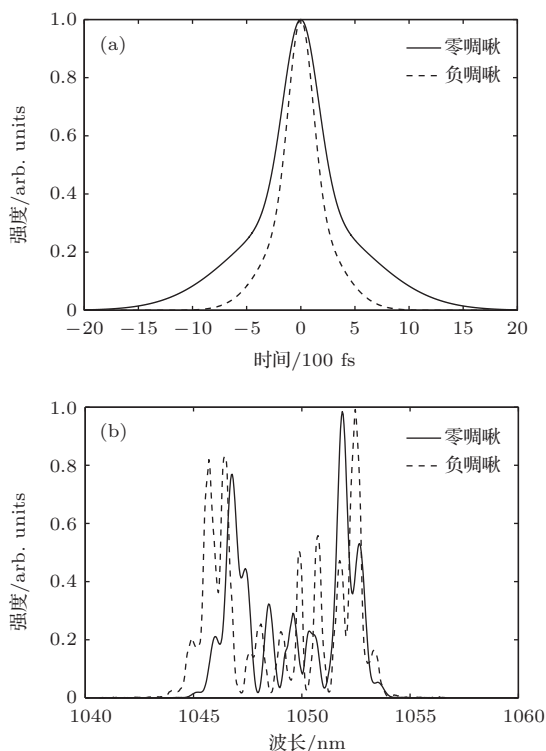


图 6 零啁啾和负啁啾脉冲经功率放大和脉冲压缩后的情况 (a) 脉冲宽度; (b) 光谱宽度
Fig. 6. Pulse of zero pre-chirp and negative pre-chirp after power amplification and pulse compression: (a) autocorrelation trace; (b) spectral bandwidth.

通过调节预色散组件中光栅对的中心间距 (光栅与角镜的距离) 可以发现, 当光栅对的中心间距增加到 100 mm 时 (如图 5 所示), 预压缩组件输出的脉冲将会展宽且脉冲为负啁啾, 将此时的负啁啾脉冲注入到光纤功率放大器中可以得到最好的脉冲压缩质量, 如图 6(a) 中的虚线所示. 此时的脉冲宽度为 183 fs, 脉冲底部的基座得到了很好的控制, 由此证明了注入到光纤放大器的脉冲并不是脉冲宽度越小越好, 而是应该满足负啁啾的特点. 这是因为预压缩组件输出的脉冲在进入光纤放大器后首先要经过合束器中非掺杂光纤的传输, 光纤引入的正啁啾将会与脉冲的负啁啾抵消, 当脉冲传输

到增益光纤起点时恰好变为零啁啾的状态, 此时脉冲宽度达到最小, 经过功率放大后可以实现最高的峰值功率. 同时, SPM 引入的光谱展宽作用也更加明显, 这一点可以通过对比图 6(b) 中的光谱得到证实, 如图中的虚线所示, 具有负啁啾的脉冲在经过功率放大后光谱展宽更宽, 并且在光谱的中心区域具有更多的次峰. 通过图 6 的分析证明了光纤放大器的入射脉冲保持负啁啾状态可以更好地抑制光纤放大器中 SPM 引入的非线性频率啁啾以及光纤的三阶色散, 得到最好的压缩结果. 在实验室温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 情况下, 采用美国相干公司型号 0414K09R 的功率计对激光器输出功率的稳定性进行了长时间的监测, 如图 7 所示. 在连续 6 h 的监测过程中激光器的输出功率保持稳定, 经测量激光器的功率不稳定性 $\text{RMS} < 1\%$.

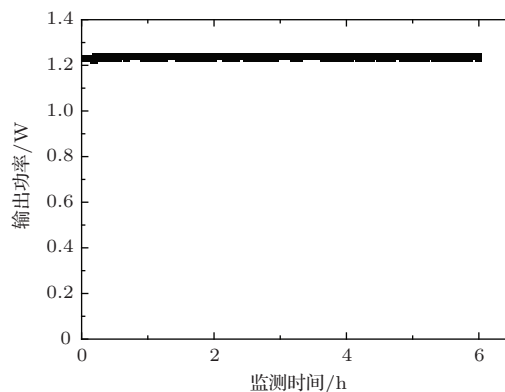


图 7 输出功率稳定性测试
Fig. 7. Output power stability.

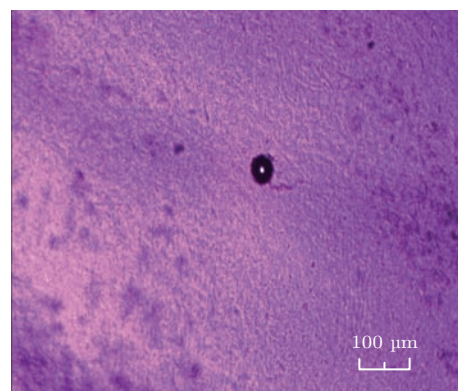


图 8 (网刊彩色) 飞秒激光作用于猪角膜 (标尺每格长度为 100 μm)
Fig. 8. (color online) Femtosecond laser acting on a pig cornea (bar length: 100 μm).

将飞秒光纤系统输出的重复频率 19.4 MHz、平均功率 1.2 W、脉冲宽度 183 fs 的激光作为光源用于猪角膜的切割实验, 实验结果如图 8 所示. 从图 8 中可以看出, 在猪角膜的表面飞秒激光实现了

爆破切割角膜的作用, 临床实验的手术结果证明了该飞秒光纤系统输出的飞秒激光满足动物角膜手术要求.

4 结 论

本文针对眼科手术所需的高稳定性、高质量脉冲压缩的飞秒激光主振荡功率放大系统进行了研究. 通过在谐振腔的特定位置(线性偏振态传输区域)增加大量的光纤双折射, 降低了外界环境对NPE锁模的影响, 实现了低重复频率下光纤激光器NPE锁模自启动. 通过对光纤放大器入射脉冲啁啾的讨论, 并结合实验证明了入射脉冲具有负啁啾可以实现最好的压缩效果. 激光器最终输出重复频率19.4 MHz、平均功率1.2 W、脉冲宽度183 fs的激光脉冲. 相比以往采用常规固体激光器作为眼科手术的光源, 本方案为飞秒眼科手术所需的光源提供了一个新的研究方向.

参考文献

- [1] Kim P, Sutton G L, Rootman D S 2011 *Curr. Opin. Ophthalmol.* **22** 238
- [2] Gualda E J, Vázquez de Aldana J R, Martínez-García M C, Moreno P, Hernández-Toro J, Roso L, Artal P, Bueno J M 2011 *Opt. Express* **2** 2950
- [3] Gao Z Y, Zhu J F, Tian W L, Wang J L, Wang Q, Zhang Z G, Wei Z Y, Yu H H, Zhang H J, Wang J Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 054207
- [4] Huang Z Y, Leng Y X, Dai Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 124210
- [5] Liu H G, Hu M L, Liu B W, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3979 (in Chinese) [刘华刚, 胡明列, 刘博文, 宋有建, 柴路, 王清月 2010 物理学报 **59** 3979]
- [6] Wang S S, Pan Y Z, Gao R X, Zhu X F, Su X H, Qu S L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024209 (in Chinese) [王莎莎, 潘玉寨, 高仁喜, 祝秀芬, 苏晓慧, 曲士良 2013 物理学报 **62** 024209]
- [7] Kuznetsova L, Wise F W 2007 *Opt. Lett.* **32** 2671
- [8] Mukhopadhyay P, K Ozgoren K, Budunoglu I L, Ilday F O 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **15** 145
- [9] Buckley J R, Wise F W, Ilday F O, Sosnowski T 2005 *Opt. Lett.* **30** 1888
- [10] Zhou Y, Chang G Q, Chen H W, Chui P C, Wong K K Y, Kartner F X 2012 *CLEO San Jose* May 6–11, 2012 pCF3L.3
- [11] Chen H W, Lin J K, Huang S W, Schimpf D N, Kartner F X, Chang G Q 2012 *Opt. Express* **20** 28672
- [12] Treacy E B 1969 *IEEE J. Quantum Electron* **5** 454

Femtosecond fiber laser for high-stability and high-quality pulse compression*

Lian Fu-Qiang¹⁾²⁾ Fan Zhong-Wei^{1)†} Bai Zhen-Ao¹⁾ Liu Yi-Zhou³⁾ Lin Wei-Ran¹⁾
Zhang Xiao-Lei⁴⁾ Zhao Tian-Zhuo¹⁾

1) (Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Peking University, Beijing 100871, China)

4) (Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100190, China)

(Received 27 February 2015; revised manuscript received 20 March 2015)

Abstract

We demonstrate a femtosecond fiber master oscillator power amplifier system of high-stability and high-quality pulse compression, which is applied to corneal refractive surgery. The nonlinear-polarization-evolution mode-locking in a hybrid-cavity Yb-fiber oscillator consisting of both polarization-maintaining (PM) and non-PM fibers is demonstrated. In this paper, the PM-fibers introduced into the mode-locked fiber oscillator partially replace non-PM fibers. This alternative approach is conducive to reducing the adverse effect of uncontrolled fiber birefringence, which originates from the on-PM fiber suffering environmental temperature fluctuation and mechanical vibration. Once the length of non-PM fiber is comparable to the fiber beat length, the uncontrolled fiber birefringence caused by environment starts to abate the laser robustness, repeatability, and reliability of mode-locking. The stability becomes notoriously worse for long-cavity Yb-fiber oscillators. The PM-fibers adopted in the mode-locked fiber oscillator could improve the mode-locked stability of nonlinear-polarization-evolution self-started with long-cavity Yb-fiber oscillators. We study the dependence of the compressed pulse quality on the parameters of input pulse pre-chirp injected into the Yb-doped fiber amplifier. Due to the nonlinear-chirp and third order dispersion, the mode-locked pulse shape in time-domain will produce distortion during power being amplified in the Yb-doped fiber amplifier. A diffraction grating to adjust the pre-chirp of the input pulse from positive value to negative value launched into the Yb-doped fiber amplifier is placed between mode-locked Yb-fiber oscillator and Yb-doped fiber amplifier. We vary the pre-chirp by changing the distance between the diffraction grating and triangular prism and then adjust the second grating pair to compress the amplified pulses into its shortest pulse duration of full-width at half maximum measured by an autocorrelator. The experimental results show that the best compression quality of mode-locked pulse occurs at the negative pre-chirp with a measured pulse width of 183 fs. Deviation from this optimum pre-chirp degrades the compressed-pulse quality and features an increased temporal pedestal. The fiber laser produces self-started mode-locking at a repetition rate of 19.4 MHz, an average power of 1.2 W, a pulse width of 183 fs. The homemade femtosecond fiber laser is used to perform surgery on *ex vivo* pig corneas. The surgery shows that the light burst of femtosecond laser in corneal tissues could cut pig corneas, which proves that the femtosecond fiber laser satisfies the surgical operation requirements of animal corneas.

Keywords: ultrafast optics, passive mode locked, saturable absorption, chirp

PACS: 42.60.-v, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.64.164207

* Project supported by the Self-deployment Foal Eagle Program of the Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: aofiberlaser@126.com