

超宽光谱掺钛蓝宝石飞秒激光器时域频域特性的实验研究*

谢旭东¹⁾²⁾ 王清月¹⁾ 王 专¹⁾ 张伟力¹⁾³⁾ 柴 路^{1)†}

¹⁾天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室,教育部光电信息技术科学重点实验室,天津 300072)

²⁾中国工程物理研究院激光聚变研究中心,绵阳 621900)

³⁾俄克拉荷马州立大学电气与计算机工程系,激光与光子学研究中心,斯蒂尔沃特 OK 74078)

(2004 年 9 月 22 日收到,2004 年 12 月 9 日收到修改稿)

系统地研究了超宽光谱 ($\Delta\lambda > 100\text{nm}$) 情况下掺钛蓝宝石飞秒激光振荡器时域和频域特性,观测到腔内光谱从 40nm 带宽的 sech^2 型演化至 180nm 带宽的多峰结构,以及脉冲在时域相应的成型过程.实验表明随着光谱的加宽,脉冲的变窄主要体现在其中部,而脉冲底部并未变窄,其包含的能量反而相对增加.

关键词:掺钛蓝宝石激光器,飞秒脉冲,超宽光谱,时频特性

PACC: 4260, 4280W, 4265J

1. 引言

自 1991 年 Spence 实现克尔透镜锁模(Kerr-lens mode locking, KLM)的钛宝石振荡器并输出 60fs 超短脉冲以来^[1],科学家们就不断致力于挑战钛宝石激光器的极限^[2-4],可以直接从振荡器产生两个光学周期以内的超短脉冲^[5],该脉冲宽度已经很接近钛宝石晶体增益光谱的傅里叶变换极限的脉冲宽度^[6].使用被动同步的方法甚至可输出亚飞秒的脉冲^[7].理论表明越窄的脉冲需要越宽的光谱支持,因此,目前振荡器中的光谱越来越宽^[8],光谱宽度已经达到一个倍频程^[9].在超宽光谱情况下,时域和频域如何变化,它们与哪些参数有关,是一个至关重要的问题.本文给出在超宽光谱情况下,掺钛蓝宝石飞秒激光器时域和频域特性的系统实验结果.

2. 实验系统

实验所用振荡器采用典型的四镜折叠 X 型腔(图 1),球面腔镜的曲率半径 100mm,激光镜全为宽带介质膜啁啾反射镜(Nanolayers GmbH),每次反射

提供群延迟色散(group delay dispersion, GDD)为 -45fs^2 .宽带输出耦合镜(output coupler, OC)的透过率 3.5%(Nanolayers GmbH).钛宝石晶体厚 2.3mm 布儒斯特角切割(中科院上海光机所提供),腔内一次往返的材料色散为 307fs^2 (800nm 处),啁啾镜 5 次反射提供 -225fs^2 的补偿.一对间距 200mm 的熔融石英棱镜置于腔的长臂端提供连续可调的负色散(-60fs^2 — -200fs^2),腔外一对相同的棱镜与啁啾镜一起用于补偿输出光束的空间啁啾和预补偿自相关器内光学元件的色散.

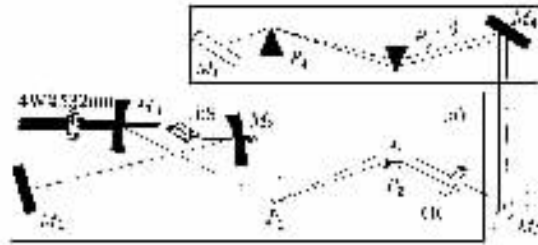


图 1 钛宝石激光器示意图: M_1 — M_4 啁啾镜, M_5 , M_6 保护银镜; Ti:S 钛宝石晶体, P_1 — P_4 熔融石英棱镜, OC 输出耦合镜, 平台(a)内构成谐振腔, 含棱镜对的一臂长 770mm, 另一臂长 550mm, 平台(b)腔外补偿

* 国家自然科学基金(批准号: 60278003, 60178007), 国家重点基础研究计划(“973”计划)(批准号: G1999075201-2, 2003CB314904), 国家高技术研究发展计划“863”基金(批准号: 2003AA311010), 高等学校优秀青年教师教学及研究奖励基金资助的课题.

†E-mail: xll@tju.edu.cn

3. 实验结果及分析

3.1. 光谱演化

当用 4W 倍频 Nd:YVO₄ 激光抽运钛宝石晶体时,振荡器的 CW 输出功率大于 620mW. 选择在上稳区的内边缘锁模,当 CW 激光横向模式为竖立的卵形时轻推腔内棱镜就可以锁模,并且锁模后的光斑呈圆对称形(图 2),光斑直径小于 2mm,锁模功率大于 250mW.

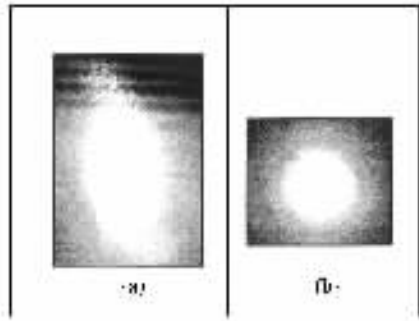


图 2 (a) 振荡器 CW 运转时卵形光斑 (b) 锁模时转换为圆形光斑,直径 < 2mm

当棱镜顶尖刚好插入时,光谱如图 3(曲线 a) 所示. 棱镜剪切掉光谱短波成分,使得光谱中心波长偏长波,频谱较窄呈钟形. 随着棱镜的插入,被剪切掉的短波成分逐渐参与激光振荡,频谱向短波方向扩展,短波的强度增加而长波的强度相应降低,能量分布从长波流向短波,中心波长相应地蓝移,如图 3(曲线 b) 所示. 继续插入棱镜光谱向短波扩展并开始出现双峰结构,如图 3(曲线 c) 所示. 结合调节棱镜所在臂的腔镜,长波强度开始增长形成一个峰,如

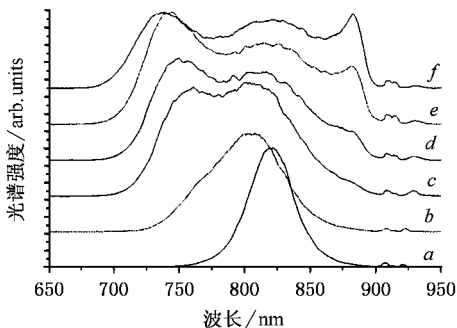


图 3 插入棱镜时光谱演化过程:随棱镜的插入光谱从 A 逐渐演化到 F

图 3(曲线 d, e) 所示. 当调节到最佳位置时得到三峰形宽光谱,如图 3(曲线 f) 所示. 实验得到最宽约 180nm 三峰形光谱,锁模稳定,人为挡掉锁模后再轻推棱镜可以再启动锁模. 再继续插入棱镜时,锁模会变得不稳定并且失去锁模,无法启动.

插入棱镜的过程逐渐消除了棱镜的光谱滤波效应并优化色散补偿,使得光谱扩展,锁模激光脉冲在时间上变窄. 相应的峰值功率增加使得自相位调制 (self phase modulation, SPM) 效应得到加强,光谱进一步展宽,这是一种明显的类孤子 (soliton-like) 过程. 而当棱镜继续插入时,腔内负色散不足以维持类孤子过程而使锁模停止.

3.2. 脉冲时域演化

随着棱镜的插入,光谱滤波效应逐渐消除,SPM 与 GDD 相互作用,使脉冲在时域相应变化. 用啁啾镜与棱镜对相结合在腔外作进一步的色散补偿. 通过条纹分辨的自相关器观测脉冲在时域的演化.

在稳定锁模时让腔内棱镜插入最少,输出光谱与用双曲正割 (sech²) 拟合的光谱非常符合(图 4(a)). 中心波长在 820nm 处,带宽较窄约 40nm,干涉自相关迹 (interferometric autocorrelation trace, IAC) 内条纹较多,脉冲较宽约 28fs,时间带宽积 0.5. 因为此时棱镜插入量少,腔内有足够多的负色散,对输出脉冲而言,此时的负色散一定程度补偿了输出耦合镜和自相关器内的正色散,即使腔外无补偿时实测的 IAC 仍表现出很少的线性啁啾. 脉冲在腔外可以补偿到 19.1fs,时间带宽积 0.34(图 4(b)) 接近该光谱的 18fs 变换极限,时间带宽积 0.32.

再适当插入棱镜时光谱蓝移,带宽增加,形状由 sech² 型变为 Gaussian 型,谱宽 65nm. 脉冲腔外色散补偿到 15.4fs,时间带宽积 0.45 接近于高斯型光谱 0.44 的时间带宽积,如图 5 所示,说明此时色散补偿很好(变换极限 14.4fs,时间带宽积 0.44).

Haus 主方程 (Haus' master equation) 预言 KLM 激光器内运转的脉冲是 sech² 型,而对于 10fs 以下的激光器,基于色散管理孤子 (dispersion-managed solitons) 理论的更精确模型预言腔内光谱形状为高斯型或超高斯型^[10]. 随着棱镜的插入,棱镜的光谱滤波效应逐渐消除,色散补偿也逐渐得到进一步优化,所以光谱展宽并保持良好的质量,脉冲时域的可补偿特性也很好. 如图 6 所示,此时实测光谱带宽 100nm,脉冲宽度 12.6fs,时间带宽积 0.6,而该光谱

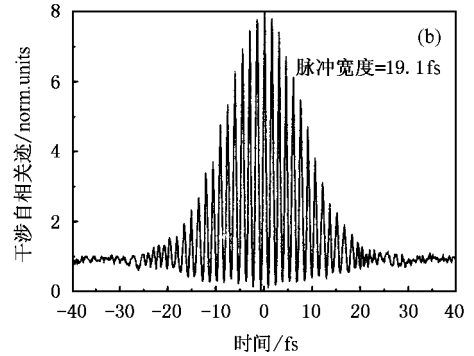
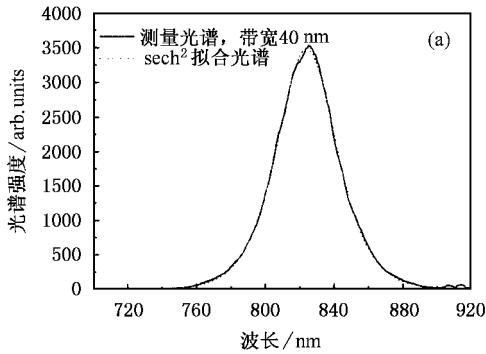


图4 棱镜插入量最少时 (a) 带宽 40nm 的 sech^2 型光谱 (b) 实测干涉自相关迹, 脉冲半极大全宽度 (FWHM) 19.1fs, 接近其光谱变换极限的脉冲宽度 18fs

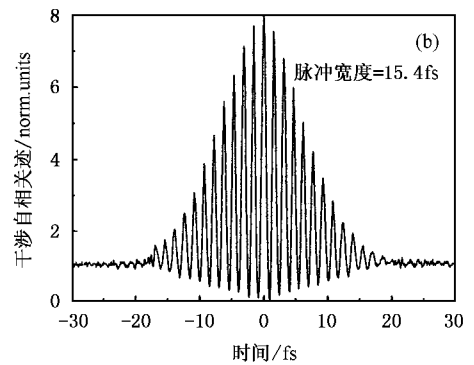
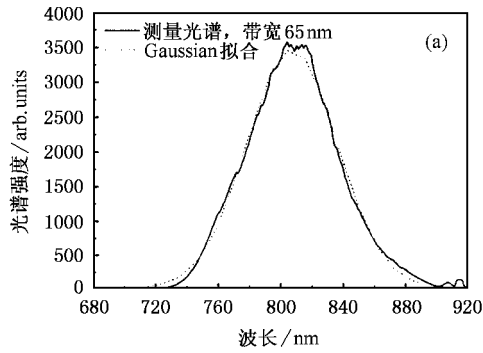


图5 适当增加棱镜插入时 (a) 光谱由最初的 sech^2 型转变为高斯型, 光谱宽度由 40nm 增加到 65nm (b) 实测 IAC, 脉冲宽度 15.4fs, 接近其光谱变换极限的脉冲宽度 14.4fs

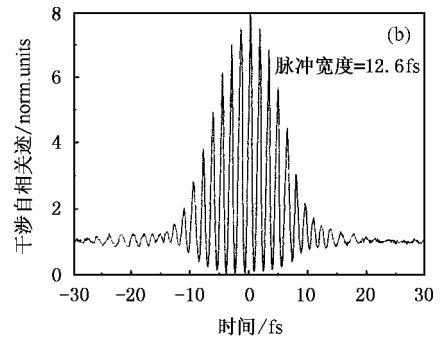
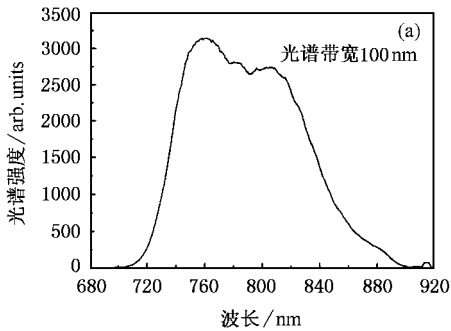


图6 继续增加棱镜插入时 (a) 接近超高斯分布的光谱, 其带宽 100nm (b) 实测的 IAC 质量很好

的变换极限 11.5fs, 时间带宽积 0.54. 从实测的 IAC 可以看出此时的 IAC 质量很好, 没有表现出线性及高阶啁啾.

再继续插入棱镜时, 光谱表现出复杂的“多峰”结构, IAC 半宽度干涉条纹减少(半极大全宽度内干涉条纹 7 个), 如图 7 所示. 此时光谱的变换极限是 9fs, 按 158nm 的带宽计算时间带宽积 0.66. 而实测脉冲宽度 10.8fs, 时间带宽积 0.79.

当继续插入棱镜时最终可以将光谱调到最宽, 此时光谱的变换极限脉冲宽度 8fs, 但是变换极限脉冲有明显的基底, 这是由于光谱形状造成的. 不完善的色散补偿, 也就是说光谱相位适当偏离线性, 也可能使脉冲的半极大全宽度减小, 同时会产生脉冲基底. 两种因素的综合作用就导致了图 8 所示的实测 IAC. 虽然此时的干涉自相关的条纹数仍是 7 个, 但是此光谱形状产生的时域脉冲质量已经不好, 降低

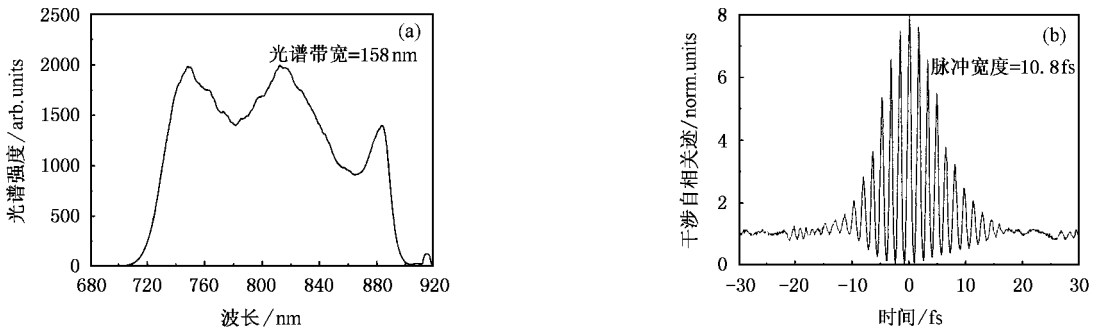


图7 继续增加棱镜插入时(a)多峰结构光谱,带宽 158nm (b)实测 IAC

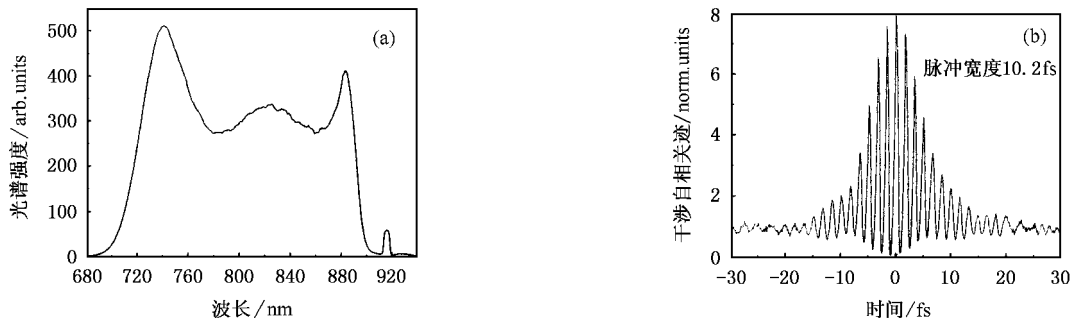


图8 棱镜最大插入量时(a)多峰结构光谱 (b)IAC

脉冲宽度是以牺牲脉冲质量为代价固不可取。

通过实验发现随腔内光谱展宽,脉冲的压缩主要发生在其中部,对此现象我们的解释是脉冲的压缩主要是腔内 SPM 与负 GDD 相互作用的结果,在脉冲的中部其强度随时间的变化最显著,SPM 效应展宽光谱的作用也最强,而脉冲底部的强度与 SPM 效应都很弱,因而脉冲压缩主要发生在脉冲的中部.对该现象的物理图像更深入地阐释需要建立模型作深入地分析,这将是下一步的工作。

4. 结 论

我们通过实验系统地研究了超宽光谱掺钛蓝宝石飞秒激光器光谱特征与脉冲特性的关系.实验结

果表明,当光谱宽度约 100nm,形状基本为“钟形”时获得 12.6fs 的脉冲,从相关曲线看脉冲底部包含的能量相对很小.当光谱达到 150nm 时,光谱形状为“多峰”型,从相关曲线看半宽度的干涉条纹变少,但是两翼相干条纹略有延伸,说明脉冲底部的能量相对分布略有增加.当光谱达到本振荡器的最宽光谱 180nm 时,光谱仍为“多峰”形状,从相关曲线看,脉冲中部变窄,而两翼相干条纹有明显的延伸,表明脉冲中部在变窄的同时脉冲底部并没有相应变窄的趋势.因此,我们的实验结论是,在超宽光谱掺钛蓝宝石飞秒激光振荡器中随着光谱的加宽,脉冲的变窄主要体现在脉冲的中部,而脉冲底部并未变窄,其包含的能量反而相对增加。

- [1] Spence D E, Kean P N and Sibbett W 1991 *Opt. Lett.* **16** 42
 [2] Wang Q Y *et al* 1997 *Chinese J. Lasers.* **24** 1057 (in Chinese) [王清月等 1997 中国激光 **24** 1057]
 [3] Zhao S H *et al* 1999 *Chinese J. Lasers.* **A26** 294 (in Chinese) [赵尚弘等 1999 中国激光 **26** 294]

- [4] Liao R *et al* 2002 *Chinese Science Bulletin* **47** 345 (in Chinese) [廖睿等 2002 科学通报 **47** 345]
 [5] Morger U *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 411
 [6] Eggleston J M, Deshazer L G and Kangas K W 1998 *IEEE. J. QE.* **24** 1009

- [7] Tian J R *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1200 (in Chinese) 田金荣等 2005 物理学报 **54** 1200]
- [8] Wang Z *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3375 (in Chinese) 王 专等 2004 物理学报 **53** 3375]
- [9] Ell R *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 373
- [10] Haus H A , Fujimoto J G and Ippen E P 1992 *IEEE. J. QE.* **28** 2086

Experimental investigation on temporal and spectral characteristics of femtosecond-scaled ultra-broadband Ti :sapphire oscillator *

Xie Xu-Dong^{1,2)} Wang Qing-Yue¹⁾ Wang Zhuan¹⁾ Zhang Wei-Li^{1,3)} Chai Lu¹⁾†

¹⁾ *Ultrafast Laser Laboratory , School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering , Key Laboratory of Optoelectronic Information and Technical Science , Ministry of Education , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)*

²⁾ *Research Center of Laser Fusion , China Academy of Engineering and Physics , Mianyang 621900 , China)*

³⁾ *School of Electrical and Computer Engineering , Center for Laser and Photonics Research , Oklahoma State University , Stillwater , Oklahoma 74078 , USA)*

(Received 22 September 2004 ; revised manuscript received 9 December 2004)

Abstract

In this letter , we systematically investigated the temporal and spectral characteristic of ultra-broad band Ti :sapphire oscillator in femtosecond regime. Pulse formation in temporal regime was observed while the spectral shape evolved from hyperbolic secant shape into multi-peak one and the bandwidth increased from 40 to 180nm. Experimental results showed that pulse shortening mainly occurred not at its bottom part but at its central section while the spectrum was broadened , and at the same time the relative energy at the bottom part increased.

Keywords : Ti :sapphire oscillator , femtosecond pulse , ultra-broadband spectrum , temporal and spectral characteristic

PACC : 4260 , 4280W , 4265J

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60278003 , 60178007) , the National Key Basic Research Special Foundation (Grant Nos. G1999075201-2 , 2003CB314904) , the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2003AA311010) , the Teaching and Research Award Fund for Outstanding Young Teachers in High Education Institutions of Ministry of Education , China.

†E-mail : ull@tju.edu.cn