

文章编号: 0253-2239(2010)11-3215-06

基于国产啾啾镜色散补偿的近 10 fs 钛宝石 激光器锁模特性的研究

宋有建¹ 胡明列^{1*} 王胭脂^{2,3} 邵建达² 晋云霞² 柴路¹ 范正修² 王清月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, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 报道了一种基于国产非成对设计的啾啾镜作为腔内色散补偿的钛宝石激光器, 在 93.7 MHz 的重复频率下, 得到了平均功率为 120 mW 的稳定的锁模脉冲输出, 经腔外色散补偿, 得到了最窄 9.7 fs 的脉冲宽度。通过调节腔内光楔的插入量, 研究了锁模光谱与自相关曲线随腔内净色散的演化过程。基于非线性薛定谔方程的分步傅里叶算法对激光器建立了数值模型, 数值模拟的参数选取均与实验中完全一致, 利用 10 阶泰勒展开模拟啾啾镜的色散曲线振荡, 获得了谐振腔零色散点附近锁模的动力学过程, 并分析了啾啾镜的高阶色散对脉冲宽度压缩的限制。

关键词 激光器; 钛宝石激光器; 飞秒; 啾啾镜; 高阶色散

中图分类号 TN248.3⁺5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3215

Studies on Mode-Locking Features of Sub-10-fs Ti:Sapphire Oscillator with Domestic Chirped Mirrors for Intra-Cavity Dispersion Compensation

Song Youjian¹ Hu Minglie¹ Wang Yanzhi^{2,3} Shao Jianda²
Jin Yunxia² Chai Lu¹ Fan Zhengxiu² Wang Qingyue¹

¹ *Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

² *Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

³ *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China*

Abstract A Ti:sapphire laser with domestic un-paired chirped mirror for intracavity dispersion compensation is reported. Ultrashort optical pulses with mode-locked pulse output power of 120 mW are generated at a repetition rate of 93.7 MHz. The pulse duration as short as 9.7 fs is achieved after extracavity dispersion compensation. The spectrum and pulse autocorrelation trace evolution with intracavity dispersion are investigated by adjusting the insertion of intracavity wedge. A numerical model of the Ti:sapphire laser is also built based on the split-step Fourier method for solving nonlinear Schrödinger equation. The parameters used in the simulation are the same as in experiment. 10 order of Taylor series are used for modeling oscillation of the dispersion curve of chirped mirror. The mode-locking dynamics in the vicinity of zero cavity dispersion is achieved, and the restriction of higher-order dispersion on pulse duration compressing is also analyzed.

Key words lasers; Ti:sapphire laser; femtosecond; chirped mirror; high-order dispersion

收稿日期: 2010-01-15; 收到修改稿日期: 2010-03-10

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327604, 2011CB808101)、国家 863 计划(2007AA03Z447)、国家自然科学基金(61078028, 60838004, 60978022)、教育部科学技术研究重点项目(108032)、全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(2007B34)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

作者简介: 宋有建(1981—), 博士, 主要从事光纤及固体飞秒激光技术的实验等方面的研究。E-mail: yjsong@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn.

1 引 言

从钛宝石激光器中直接产生周期量级的超短激光脉冲在光学频率标准^[1]、高次谐波产生阿秒脉冲^[2]和时间分辨的光谱学^[3]等领域有着重要的应用。利用啁啾多层介质膜反射镜进行精确的色散控制可以扩展钛宝石激光器的应用范围,实现小型化、低成本和运转稳定的周期量级飞秒激光光源,这引起了国际上广泛的关注。2008年,H. M. Crespo等^[4]基于成对补偿的全啁啾镜结构,从钛宝石激光器中直接获得了4.9 fs小于两个光学周期的超短激光脉冲输出,其光谱宽度超过一个倍频程。国内的诸多单位也开展了周期量级的钛宝石振荡器的研究^[5~10],谢旭东等^[7]利用啁啾镜与棱镜对结合补偿色散,得到了8.5 fs的超短脉冲输出,赵研英等^[8]基于全啁啾镜的结构将这一纪录刷新为7 fs。然而,这些实验均基于国外的啁啾镜。与此同时,北京大学、中国科学院上海光学精密机械研究所和天津大学等单位开展了啁啾镜国产化的进程^[11~14]。陈玲玲等^[13]设计了三啁啾镜成对补偿的结构,使得高重复频率、小型化和直接输出倍频程光谱的钛宝石激光器成为可能。本文基于中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜中心独立设计,镀制的啁啾镜^[14]进行钛宝石激光器内腔色散补偿,实现了最窄9.7 fs的超短激光脉冲,系统地研究了基于这种啁啾镜锁模的钛宝石激光器的运转特性,并利用数值模拟的方法分析了啁啾镜的高阶色散对激光器获得的最窄脉冲宽度的限制。

2 实验装置

钛宝石激光振荡器的结构如图1所示。激光器采用全固态的倍频 Nd:YVO₄ 激光器 (Verdi V5, Coherent) 作为抽运源,其输出波长为 532 nm,最大输出功率为 5 W。抽运光由焦距为 75 mm 的透镜 L 聚焦至钛宝石晶体。钛宝石晶体的掺杂质量分数为 0.25%,以布儒斯特角插入至光路中,其垂直厚度为 2.3 mm,通光长度为 2.645 mm,一个腔循环周期内在 800 nm 的波长处产生的群延迟色散量为 307 fs²。为了防止钛宝石晶体内部的热积累影响激光运转性能,通过循环水冷却晶体。两个平凹双色镜 M1, M2 作为谐振腔的腔镜,对 532 nm 的抽运光的透射率大于 97%,对 700~870 nm 波段的激光的反射率大于 99.9%,其曲率半径 $R=75$ mm,分别以 6.6° 的折叠角(入射光线与法线的夹角)离轴放置,可以完全补偿布儒斯特角放置的钛宝石晶体引入的像散。平面反射镜 M5 与耦合输出镜 OC 作为端镜,分别构成色散补偿臂 (M2~M5) 与耦合输出臂 (M1-OC)。其中 M5 对激光高反,在 700~870 nm 波段的反射率大于 99.9%,输出耦合镜在 650~950 nm 波段的透射率为 1.5%。在谐振腔的色散补偿臂引入一对啁啾镜作为色散补偿,并插入一对石英尖劈微调腔内色散。啁啾镜由中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜中心设计、镀制,未采用成对设计,在 700~900 nm 波段的平均反射率为 99.4%,每次反射可以实

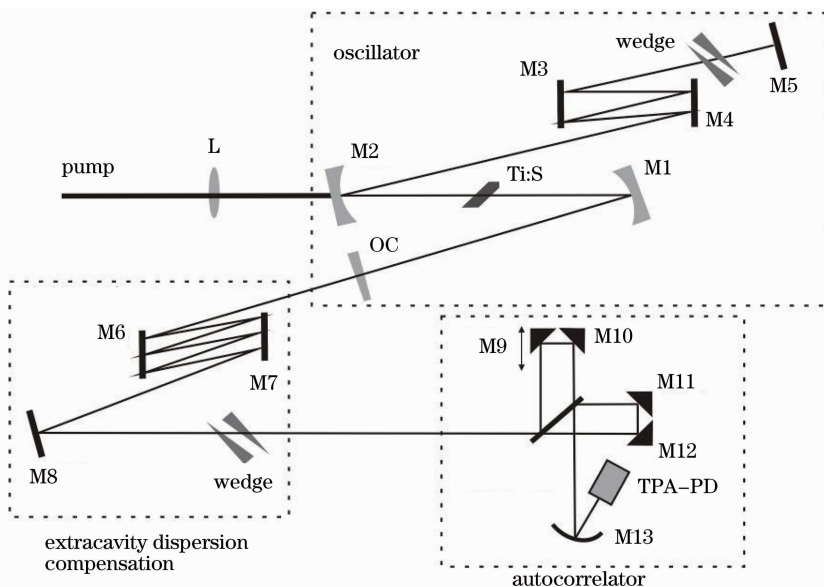


图1 钛宝石振荡器、腔外压缩及脉冲测量系统的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of Ti:sapphire laser oscillator, extra-cavity compression and pulse duration measurement system

现 -60 fs^2 的平均色散补偿量^[14], 每面反射镜上反射两次, 一个腔循环周期内提供约 -480 fs^2 的反常色散。石英尖劈顶角为 2° , 最薄处为 0.2 mm , 以布儒斯特角插入至光路中。谐振腔两臂的长度不对称, 耦合输出臂的长度 60 cm , 色散补偿臂的长度 100 cm 。整个振荡器系统搭建在具有极低热膨胀系数的殷钢合金底板上, 使激光器具有稳定的重复频率。同时振荡器密封在有机玻璃罩内, 以避免空气扰动对锁模稳定性的影响。

3 实验结果

固定 3.5 W 的抽运功率, 调节 M2 与钛宝石晶体之间的距离, 可以找到激光器的两个分裂的稳区, 这是由谐振腔两臂不对称所引起的, 在外稳区(对应于较大的 M2 与钛宝石晶体之间的距离)得到最高平均功率为 200 mW 的连续波输出。接下来寻找锁模的位置。激光器的锁模机制基于克尔透镜锁模(KLM); 由横向克尔效应导致的光束强烈自聚焦与有限增益孔径(“soft” gain aperture, 软光阑)共同作用产生自振幅调制, 等效于快可饱和吸收体。对于软光阑锁模的情况, 在外稳区的内边缘处可以获得最大的自振幅调制效应^[15]。在该位置附近, 轻推 M5, 可以实现稳定的锁模运转, 锁模的平均功率为 120 mW 。利用射频波段的频谱分析仪(Agilent 8560E)测量的激光器锁模的一次谐波功率谱如图 2 所示。选择频率窗口宽度为 200 kHz , 分辨率带宽(RBW)为 300 Hz , 视频带宽(VBW)为 300 Hz 。其噪声抑制比达到 85 dB , 反映了稳定的单脉冲锁模运转, 其振幅波动小于 0.27% 。

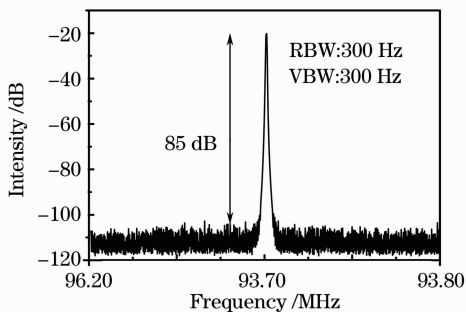


图 2 钛宝石激光振荡器输出的锁模脉冲序列的一次谐波功率谱

Fig. 2 First harmonic of the power spectrum of the mode-locked-pulse train emitted from the Ti:sapphire laser oscillator

直接输出的脉冲带有正啁啾, 为得到变换极限的脉冲, 利用一对啁啾镜 M6, M7 与另一对石英尖劈进

行腔外色散补偿, 如图 1 所示。啁啾镜(Nanolayers, 德国)采用成对设计, 每次反射可以在 $700 \sim 900 \text{ nm}$ 波长范围内实现 -60 fs^2 的平坦的反常色散。每面镜子经 3 次反射, 通过优化尖劈对的插入量得到最窄脉冲。利用实验室自制的自相关器测量压缩后的超短激光脉冲, 自相关器的结构如图 1 所示。M9, M10, M11, M12 均为银镜, M9 与 M10 置于压电陶瓷上作为延迟线, 合束后的光场经凹面镜 M13 聚焦至双光子吸收光电二极管(TPA-PD), 基于二阶非线性响应产生相关信号, 连接示波器显示相关曲线。

实验测得的激光器输出的锁模脉冲的光谱与腔外压缩后的相关曲线如图 3 所示。图 3(a) 给出了输出光谱随腔内尖劈插入量增加的演化过程。当劈尖插入深度较小时, 输出光谱较窄, 如图 3(a) 中曲线 1 所示, 其中心波长为 810 nm , 其形状接近于高斯型, 光谱的不对称是由啁啾镜的高阶色散引起的, 腔外压缩后的脉冲宽度为 15 fs 。逐渐增加尖劈的插入量, 光谱不断展宽, 受到增益带宽与啁啾镜色散补偿带宽的限制, 主要体现为短波光谱成分逐渐被激发, 在图 3(a) 中曲线 2 的位置处, 得到了干涉相关曲线如图 3(b) 所示, 其半峰全宽之上包含 7 个条纹, 这对应于脉冲强度包络的半峰全宽度内有 4 个光学周期。图中虚线给出了理想的 10.5 fs 的双曲正割脉冲的干涉自相关曲线的包络, 可以很好的与实测自相关曲线吻合。进一步增加尖劈对的插入量, 谐振腔的净色散量进一步接近零色散, 光谱出现了明显的 3 峰结构, 如图 3(a)-3 所示, 其压缩后的干涉自相关曲线如图 3(c) 所示, 半峰全宽以上的条纹数明显有从 7 个减少至 5 个的趋势, 其半峰全宽以上可以与 9.7 fs 的双曲正割函数吻合, 而相关曲线的底部吻合得较差。这是因为腔内实际运转的脉冲并非绝对的双曲正割形, 另一方面, 高阶色散不能被啁啾镜补偿, 从而使脉冲产生宽的基底。同时发现测量的自相关曲线开始呈现出一定的不对称, 这是由于自制的自相关器的 1:1 分束片仅有一个表面镀有介质膜, 从而导致经 M11, M12 反射的光路比经 M9, M10 反射的光路多穿过一次分束片的厚度, 本质上相当于互相关, 在脉冲宽度很窄的情况下 ($\tau < 10 \text{ fs}$) 会使显示的相关曲线呈现不对称。进一步增加尖劈的插入量, 光谱中开始出现 CW 成分, 锁模变得不稳定。继续增加插入量, 净色散量呈现正常色散, 锁模重新变得稳定, 但光谱的形状发生突变, 具有陡峭的两沿, 光谱宽度也明显变窄, 这是正色散锁模的典型特征。

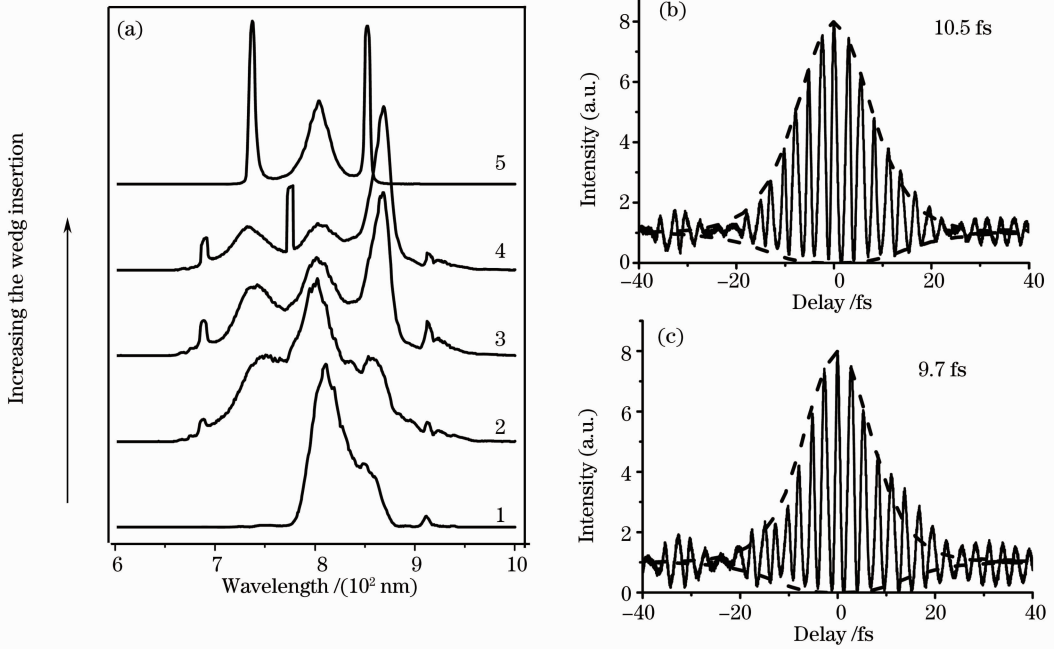


图3 实验测得的钛宝石输出脉冲的时域与频域特性

Fig. 3 Experimentally measured pulse characteristics of the Ti:sapphire laser in time domain and frequency domain

4 数值模拟

钛宝石激光器获得极限脉冲输出的锁模动力学过程由色散管理孤子模型描述^[16]:激光器在零色散点附近锁模的状态下,脉冲在谐振腔内周期性的展宽与压缩支持非线性布洛赫波的产生,脉冲成型由哈密顿过程决定,软光阑只是起到启动锁模并抑制连续波(CW)产生的作用。在这种锁模机制下,有限增益带宽并不是限制光谱展宽的主要因素,腔镜的反射带宽决定了激光器输出脉冲的光谱,并最终决定了得到的极限脉冲宽度。色散管理模型只考虑了二阶色散的影响,在零色散点附近,高阶色散的作用会非常明显,尤其是本文中利用非成对设计的啾啾镜进行色散补偿的情况,高阶色散尤为严重,体现为二阶色散的振荡。为了更深入的讨论这种情况下钛宝石激光器是否可以获得变换极限的脉冲宽度,并为啾啾镜的优化设计提供理论指导,为钛宝石激光器建立了数值模型,利用计算机模拟锁模的动力学过程。

激光器由5部分组成,钛宝石晶体的正常色散与非线性效应,可饱和吸收体,耦合输出,空气及劈尖对的正常色散,及啾啾镜的反常色散。数值模拟的参数选取均与实验中完全一致,各阶色散系数均由800 nm的中心波长处的泰勒展开得到。数值模拟过程中,以白噪声作为种子光,使其相继通过腔内

元件。每完成一次腔循环周期,就把从最后一个器件输出的信号光与该循环的输入信号光做比较,直至实现自洽,代表激光器实现稳定锁模。

超短脉冲被聚焦至钛宝石晶体中传输需要考虑克尔效应,正常色散及增益带宽的限制,其传输过程用非线性薛定谔方程描述:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} - \frac{i}{24}\beta_4 \frac{\partial^4 A}{\partial T^4} + i\gamma|A|^2 A + \frac{g}{2}A.$$

利用分步傅里叶算法求解。对于亚10 fs脉冲,需要考虑到其四阶色散,其各阶色散系数为: $\beta_2 = 58 \text{ fs}^2/\text{mm}$, $\beta_3 = 42 \text{ fs}^3/\text{mm}$, $\beta_4 = -15.5 \text{ fs}^4/\text{mm}$,非线性系数 $\gamma = 1 \text{ MW}^{-1}$, $g = g_0 / (1 + E_{\text{pulse}}/E_{\text{sat}})$, g_0 为小信号增益,具有抛物线型的频率依赖关系,增益带宽设为120 nm, E_{pulse} 为脉冲能量, E_{sat} 为增益饱和能量,通过改变 g_0 与 E_{sat} 可以调节激光器的腔内脉冲能量。

钛宝石晶体的横向克尔效应与有限抽运光孔径的结合等效于快可饱和吸收体,为了编程的方便,将钛宝石晶体的可饱和吸收效应独立考虑,用透射率函数 $T = 1 - l_0 / [1 + P(\tau)/P_{\text{sat}}]$ 简化软光阑的快可饱和吸收效应, l_0 为非饱和损耗,取5%, $P(\tau)$ 为脉冲瞬时功率, P_{sat} 为饱和功率,取50 kW。耦合输

出率设为 5%，包含了实际的耦合输出与谐振腔内的所有损耗。

数值模拟的过程中，固定尖劈对的插入量为 1 mm，其各阶色散系数为： $\beta_2 = 36.1 \text{ fs}^2/\text{mm}$ ， $\beta_3 = 27.4 \text{ fs}^3/\text{mm}$ ， $\beta_4 = -11.4 \text{ fs}^4/\text{mm}$ 。为对于亚 10 fs 的脉冲传输，空气的色散对脉冲的展宽作用很明显，取传输长度为 1.5 m，其各阶色散系数为： $\beta_2 = 21.3 \text{ fs}^2/\text{m}$ ， $\beta_3 = 9.9 \text{ fs}^3/\text{m}$ ， $\beta_4 = 1.2 \text{ fs}^4/\text{m}$ 。

实验中，由于啁啾镜的二阶色散具有振荡，这相当于引入了很强的高阶色散。不失一般性，在数值模拟的过程中考虑啁啾镜在 700~900 nm 波段的单次反射的平均色散为 $-60 \text{ fs}^2/\text{m}$ ，在 $\pm 15 \text{ fs}^2/\text{m}$ 之间波动，这与文献[14]中的啁啾镜的色散测量曲线基本吻合。为模拟这种情况，至少取到啁啾镜的 10 阶色散，得到的各阶色散系数分别为： $\beta_2 = -60.36 \text{ fs}^2/\text{m}$ ， $\beta_3 = -61.47 \text{ fs}^3/\text{m}$ ， $\beta_4 = 339.82 \text{ fs}^4/\text{m}$ ， $\beta_5 = 27996 \text{ fs}^5/\text{m}$ ， $\beta_6 = -2.976 \times 10^5 \text{ fs}^6/\text{m}$ ， $\beta_7 = -7.36 \times 10^6 \text{ fs}^7/\text{m}$ ， $\beta_8 = 1.41 \times 10^8 \text{ fs}^8/\text{m}$ ， $\beta_9 = -9.84 \times 10^7 \text{ fs}^9/\text{m}$ ， $\beta_{10} = -8.29 \times$

$10^9 \text{ fs}^{10}/\text{m}$ 。

利用这个数值模型对比了仅考虑啁啾镜的二阶色散与考虑其全部 10 阶色散的情况下得到的钛宝石激光器的输出状态。数值模拟的过程中，通过调节反常色散量改变腔内净色散，这与实验中啁啾镜的色散量是固定的，通过改变劈尖的插入量调节腔内色散等效。仅考虑啁啾镜的 2 阶色散，每次反射共产生 -60.36 fs^2 的反常色散，3.7 次啁啾镜的反射得到的脉冲经腔外 2 阶色散补偿可以得到最窄的脉冲宽度，其脉冲的光谱，脉冲形状及瞬时频率如图 4(a)、(c) 所示。图 4(a) 中同时给出了谐振腔内的净 2 阶色散(GDD)。如图 4(c) 所示，经腔外色散补偿，得到了傅里叶变换极限脉冲，其脉冲宽度为 7.8 fs。在这一锁模运转状态下，引入啁啾镜的全部 10 阶色散，同样实现了稳定的锁模。这种情况下得到的脉冲的时域与频域特性如图 4(b)、(d) 所示。谐振腔内的净色散如图 4(b) 所示。图 4(d) 给出了经腔外 2 阶色散补偿，得到的傅里叶变换极限脉冲，其脉冲宽度为 9.4 fs。

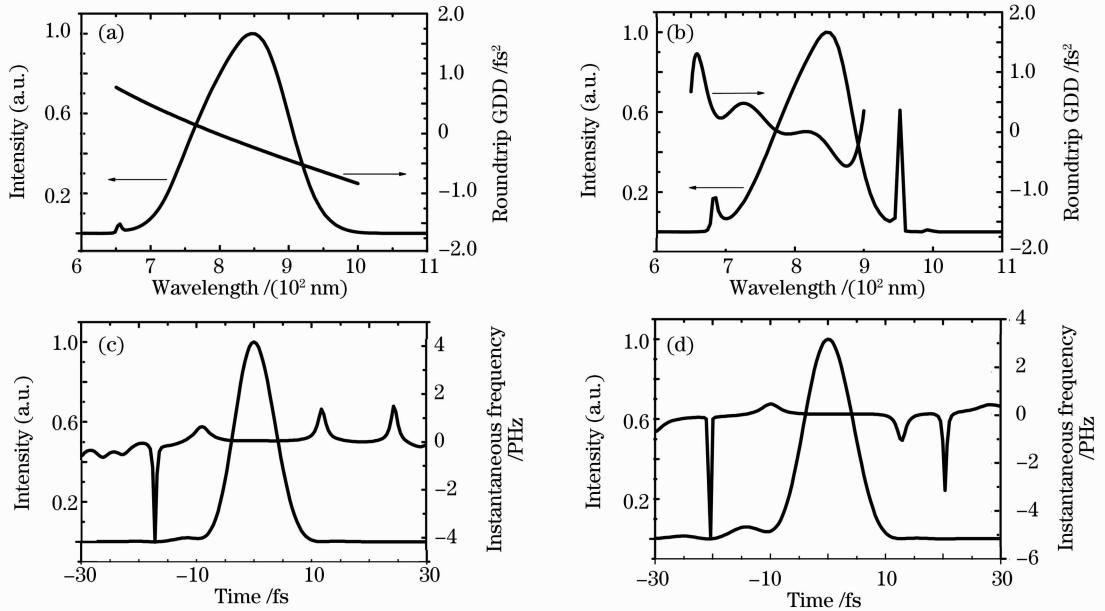


图 4 数值模拟的钛宝石振荡器在不同的谐振腔色散的情况下的输出特性

Fig. 4 Simulated output characteristics of Ti:sapphire oscillator at different cavity dispersions

数值模拟的结果清楚地反映了高阶色散对钛宝石锁模状态的影响。如图 4(a)、(c) 所示，当仅考虑啁啾镜的 2 阶色散补偿的情况下，可以看到腔内的净色散基本上是线性的，即钛宝石晶体与劈尖的 3 阶色散起主导作用，微微的弯曲是由材料的 4 阶色散造成的。3 阶色散使得脉冲光谱的短波成分在一

个谐振腔周期内经历正的群速度色散，为了维持孤子运转，中心波长向长波移动。同时，作为微扰的高阶色散使得孤子辐射色散波，满足谐振增强作用的光谱成分使得光谱的中心波长两侧出现非对称的边带^[17]。在考虑到啁啾镜的高阶色散的情况下，如图 4(b)、(d) 所示，获得的最窄脉冲宽度有所展宽，

经腔外色散补偿,脉冲产生明显的基底,啁啾镜的高阶色散同时使得谐振边带的强度增强,这些现象与实验中得到的最窄脉冲的结果基本吻合。同时模拟了啁啾镜的色散振荡更强烈的情况,此时更难获得窄脉冲,而且不容易得到稳定的自洽状态。

由以上结果可以看出,对于近 10 fs 的超短脉冲的钛宝石激光器,色散管理孤子锁模机制对内腔脉冲成型起决定性作用,有限带宽是限制脉冲压缩的决定因素,啁啾镜的色散曲线的随机振荡控制在 ± 15 nm 附近不会改变锁模状态,其引入的高阶色散会使脉冲质量产生基底,但仍然支持亚 10 fs 的最窄脉冲宽度。从振荡器直接出射的脉冲往往需要进行放大,有基底的脉冲会降低啁啾脉冲放大系统的信噪比,严重限制超短激光脉冲的应用。为了避免脉冲基底的产生,并进一步窄化脉冲宽度,必须成对优化设计啁啾镜,使其在更宽的波长范围内(大于一个倍频程)得到平坦的反常色散曲线。目前,中国科学院上海光学精密机械研究所^[14]和北京大学^[13]等单位都在开展超宽带啁啾镜的成对设计,而中国计量科学院等单位开发的基于小波分析的白光干涉色散测量装置^[18~19]可以实现对啁啾镜的无规振荡的色散曲线的精密测量,为啁啾镜的优化设计与测试提供了有力的支撑。

5 结 论

基于国产非成对设计的啁啾镜作为色散补偿,实现了钛宝石激光器的稳定锁模运转,在 93.7 MHz 的重复频率下,得到了平均功率为 120 mW 的脉冲输出,经腔外色散补偿,得到了最窄 9.7 fs 的脉冲宽度。系统地研究了这种激光器零色散点附近锁模特性,并对激光器建立了数值模型,分析了啁啾镜的高阶色散对锁模动力学过程的影响。

参 考 文 献

- 1 L. Yi, X. H. Qi, W. L. Chen *et al.*. Transferring the stability of iodine-stabilized diode laser at 634 nm to radio frequency by an optical frequency comb [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 36~38
- 2 Chen Gao, Chen Jigen, Yang Yujun. Cutoff frequencies analysis of bichromatic high-order harmonic generation spectra [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3255~3259
陈 高, 陈基根, 杨玉军. 双色激光脉冲谐波谱的截止频率分析 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3255~3259
- 3 Jin Bin, Li Tong, Zhou Qingli *et al.*. Investigation of n-Si and p-Si semiconductors by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 337~340
金 彬, 李 彤, 周庆莉 *等*. n 型和 p 型硅半导体材料的太赫兹时域光谱研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 337~340
- 4 H. M. Crespo, J. R. Birge, E. L. Falcão-Filho *et al.*. Noninvasive phase stabilization of sub-two-cycle pulses from a prismless octave-spanning Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(8): 833~835
- 5 Zheng Wei, Wang Qingyue, Zhao Jiangshan *et al.*. Self-starting Kerr-lens mode-locked Ti:Al₂O₃ laser at repetition rates of 20 MHz [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2002, **29**(6): 481~484
郑 玮, 王清月, 赵江山 *等*. 20 MHz 自启动克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光器 [J]. *中国激光*, 2002, **29**(6): 481~484
- 6 W. Z. Lin, R. Liao, J. H. Wen *et al.*. Sub-10-fs pulse generation directly from a KLM Ti:sapphire laser [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(12): 1050~1052
- 7 Xie Xudong, Wang Qingyue, Wang Zhuan *et al.*. Experimental investigation on temporal and spectral Characteristics of femtosecond scaled ultra-broadband Ti:sapphire oscillator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(7): 3159~3163
谢旭东, 王清月, 王 专 *等*. 超宽光谱钛掺蓝宝石飞秒激光器时域频域特性的实验研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3159~3163
- 8 Y. Y. Zhao, P. Wang, W. Zhang *et al.*. Generation of 7-fs laser pulse directly from a compact Ti:sapphire laser with chirped mirrors [J]. *Science in China Series G*, 2007, **50**(3): 261~266
- 9 Q. Zhang, Y. Y. Zhao, Z. Y. Wei. Generation of a sub-10 fs laser pulse by a ring oscillator with a high repetition rate [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044208
- 10 Q. Zhang, Y. Y. Zhao, Z. Y. Wei. Sub-10 fs laser pulses with repetition rate of 1.1 GHz by a Ti:sapphire oscillator [J]. *Chinese Science Bulletin.*, 2009, **54**: 3649~3652
- 11 Wang Xi, Chen Linlin, Yang Weijian *et al.*. New design of chirped mirrors for femtosecond pulse compression [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 89~91
王 希, 陈玲玲, 杨晔健 *等*. 飞秒激光脉冲压缩用啁啾镜新设计方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 89~91
- 12 Zhao Jiangshan, Zhang Zhigang, Chai Lu *et al.*. Optimum design of chirped mirror in the femtosecond pulse laser cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **29**(3): 213~217
赵江山, 张志刚, 柴 路 *等*. 用于飞秒脉冲激光腔内的啁啾镜的优化设计 [J]. *中国激光*, 2001, **29**(3): 213~217
- 13 L. L. Chen, W. J. Yang, X. Wang *et al.*. Integrative optimization of chirped mirrors for intracavity dispersion compensation [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(4): 617~620
- 14 Y. Z. Wang, J. D. Shao, H. C. Dong *et al.*. Design and fabrication of chirped mirror [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(9): 094209
- 15 L. Xu, G. Tempea, A. Poppe *et al.*. High-power sub-10-fs Ti:sapphire oscillators [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**(2): 151~159
- 16 Y. Chen, F. X. Kartner, U. Morgner *et al.*. Dispersion-managed mode locking [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(11): 1999~2004
- 17 Q. Lin, I. Sorokina. High-order dispersion effects in solitary mode-locked lasers: side-band generation [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **153**(4~6): 285~288
- 18 Y. Q. Deng, W. J. Yang, C. Zhou *et al.*. Direct measurement of group delay with joint time-frequency analysis of a white-light spectral interferogram [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(23): 2855~2857
- 19 Y. Q. Deng, W. J. Yang, C. Zhou *et al.*. Wavelet-transform analysis for group delay extraction of white light spectral interferograms [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8): 6038~6043