

钛宝石激光器 9.5 fs 脉冲输出中的 啁啾镜色散补偿*

王胭脂¹⁾²⁾ 邵建达^{1)†} 董洪成¹⁾²⁾ 晋云霞¹⁾ 贺洪波¹⁾ 易葵¹⁾
范正修¹⁾ 宋有建³⁾ 胡明列³⁾ 柴路³⁾ 王清月³⁾

1)(中国科学院上海光学精密机械研究所,中国科学院强激光材料重点实验室,上海 201800)

2)(中国科学院研究生院,北京 100049)

3)(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,天津大学,天津 300072)

(2010年1月13日收到;2010年3月21日收到修改稿)

根据钛宝石激光器的要求,实验设计了中心波长 800 nm 带宽 200 nm 的啁啾镜,在 700—900 nm 波长范围内提供约 -60 fs^2 群延迟色散(group delay dispersion, GDD). 采用双射频离子束溅射方法进行制备,用实验室搭建的白光干涉仪进行色散性能测试,从测试结果可以看出,制备的啁啾镜的性能和设计值符合得比较好. 制备得到的非成对啁啾镜在钛宝石激光谐振腔中进行色散补偿,锁模后分别获得了 12 fs 和 9.5 fs 的激光脉冲输出. 这是目前报道的使用国产啁啾镜获得的最短的飞秒激光脉冲输出.

关键词: 啁啾镜, 群延迟色散, 色散补偿, 钛宝石激光器

PACS: 81.15.Ef, 78.67.Pt

1. 引言

自从 20 世纪 90 年代掺钛蓝宝石锁模激光器发明以来,超短脉冲激光器就进入了固体飞秒激光器时代,目前钛宝石激光器是发展最好的飞秒激光器,在飞秒激光加工、制造、医学与激光约束核聚变等领域有着重要的研究和应用价值^[1-3]. 对于钛宝石激光器来说,超短脉冲的产生依赖于腔内群延迟色散的补偿^[4]. 与传统的色散补偿器件光栅和棱镜对相比,啁啾镜^[5-8]具有可重复性高、对光路不敏感、结构简单紧凑等优点,越来越多的被应用到激光器中,成为 10 fs 以下超短脉冲激光器必不可少的色散补偿元件. Pervak^[9]2007 年设计和制备了波长范围 400—1200 nm 带宽 800 nm 的啁啾镜对获得了近 3 fs 的激光输出脉冲. 国内中科院上海光机所^[10-14]、北京大学、天津大学^[1]、中科院物理所等单位都开展了相关的研究. 北京大学^[15,16]在啁啾镜设计和测试上做了很多工作,提出了多镜优化的设

计思想和一种全新的由相位测量群延迟色散(group delay dispersion, GDD)的方法. 谢徐东等^[17,18]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,赵研英等基于成对补偿的全啁啾镜的钛宝石激光器得到了 7 fs 的输出脉冲^[19]. 但是这些结果都是使用国外的啁啾镜,国内还没有制备得到的啁啾镜用在激光器中进行色散补偿的相关报道.

我们设计、制备得到了波长范围 700—900 nm 的啁啾镜,并且采用实验室搭建的白光干涉仪进行了测试,测试结果表明制备得到的啁啾镜和设计值符合得比较好. 制备所得的非成对啁啾镜补偿钛宝石谐振腔内色散获得了 9.5 fs 的脉冲输出,这是目前报道的使用国产啁啾镜获得的最短的飞秒激光输出脉冲,也是国内首个从设计、制备到测试能全部独立完成的实验室.

2. 啁啾镜的设计和制备

腔内的色散主要来自钛宝石晶体,实验用的钛

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB806002)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: jdshao@mail.shenc.ac.cn

宝石激光器谐振腔中的晶体,在中心波长 800 nm 处,晶体垂直厚度 2.3 mm(通光方向 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 fs^2 . 根据谐振腔内色散补偿量的要求,我们设计了 GDD 约为 -60 fs^2 的啾啾镜. 图 1 所示是设计的啾啾镜的多层膜结构,有 52 层,分别选择 Ta_2O_5 和 SiO_2 做为高(2.04@800 nm)和低(1.48@800 nm)折射率材料,膜层厚度 20—900 nm,在 700—900 nm 波长范围内提供 -60 fs^2 的 GDD,平均反射率 99.4%(如图 2 所示).

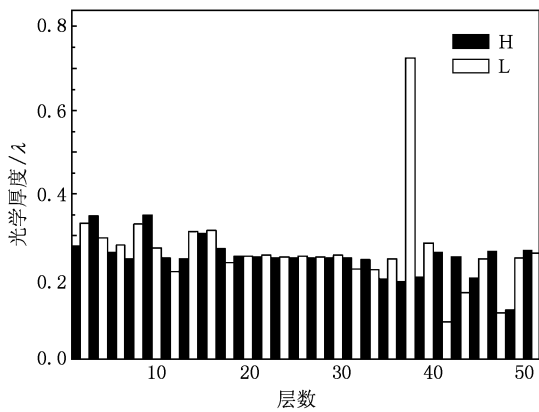


图 1 设计膜系的光学厚度

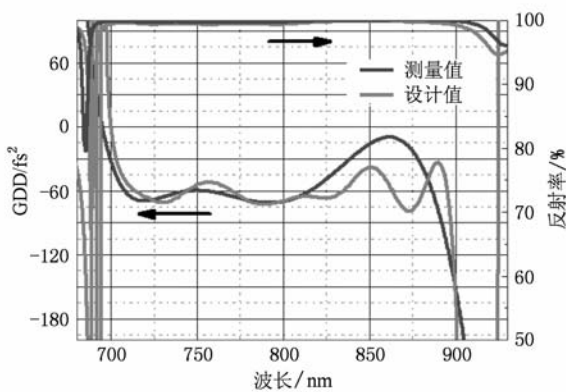


图 2 设计和测量的啾啾镜

啾啾镜负色散性能对制备误差非常敏感,敏感膜层 1 nm 的厚度误差就可能使色散曲线与设计值有很大偏离^[12,13]. 我们采用双射频离子束溅射镀膜机制备啾啾镜,离子束溅射制备的薄膜致密,折射率高,并且采用时间控制,能尽可能减小折射率和膜厚误差,提高控制精度. 镀膜机有两个离子源(16 cm 主源和 12 cm 的辅助源),其中 16 cm 主源溅射产生氩离子束轰击靶材,12 cm 辅助

离子源产生氩离子和 O_2 轰击靶材分子在基片上沉积. 靶材 Ta 和 SiO_2 纯度达到 99.999%, Ta_2O_5 是溅射 Ta 靶材和 99.995% O_2 反应生成. 制备过程中真空度为 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,烘烤温度 80°C ,采用时间控制. 制备得到的啾啾镜通过实验室自行搭建的白光干涉仪进行测试(测试精度 $\pm 8 \text{ fs}^2$),通过分光光度计测量啾啾镜的透射率得到反射率,如图 2 中蓝线所示,可以看出,制备的结果和设计值符合得比较好.

3. 钛宝石激光器振荡器全色散补偿

3.1. 无劈尖和腔外压缩

用制备的啾啾镜补偿钛宝石飞秒激光器谐振腔内的色散,实验结构图如图 3 所示. 全啾啾色散补偿的激光振荡器中,激光器采用 Z 形五镜折叠腔,钛宝石晶体采用布儒斯特角切割,通光长度为 2.645 mm,钛宝石两端放置平凹双色镜 M_1 和 M_2 作为谐振腔的腔镜, M_1, M_2 对抽运光具有很高的透过率,对钛宝石晶体产生的激光具有高反射率,OC 为输出 2% 的耦合镜. 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,最大输出平均功率为 5 W. M_3, M_4 为制备的啾啾镜,激光在谐振腔内单程 4 次通过负色散镜,每个镜子反射 2 次来补偿钛宝石晶体的正色散,啾啾镜提供约 -240 fs^2 的色散补偿. 经过四次补偿后,光谱图和自相关曲线如图 4 所示. 可以看出,输出的光谱宽度为 140 nm,测得的自相关曲线如图 4

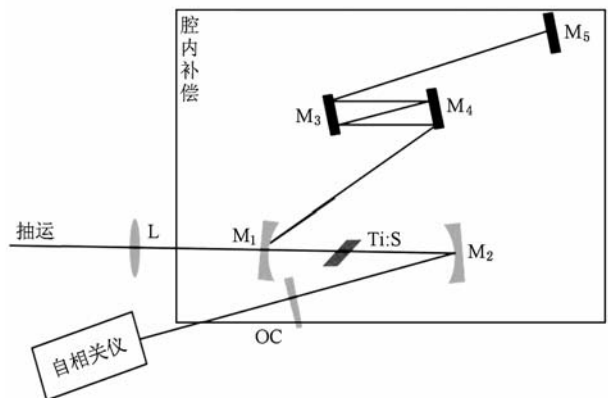


图 3 啾啾补偿钛宝石激光谐振腔内色散结构图(L 为透镜; M_1, M_2 为腔镜; M_3, M_4 为制备的啾啾镜; M_5 为反射镜; Ti:S 为钛宝石晶体; OC 为耦合输出)

(b) 所示,相关器中的延迟线的非线性振荡导致干涉条纹周期有轻微的不均匀. 相关曲线的半高宽之上约有 7 根条纹,并有上升至 9 根的趋势,假设

双曲正割的脉冲形状,脉冲宽度约为 12 fs. 相关曲线两沿有明显的振荡包络,显示输出脉冲有明显的高阶啁啾.

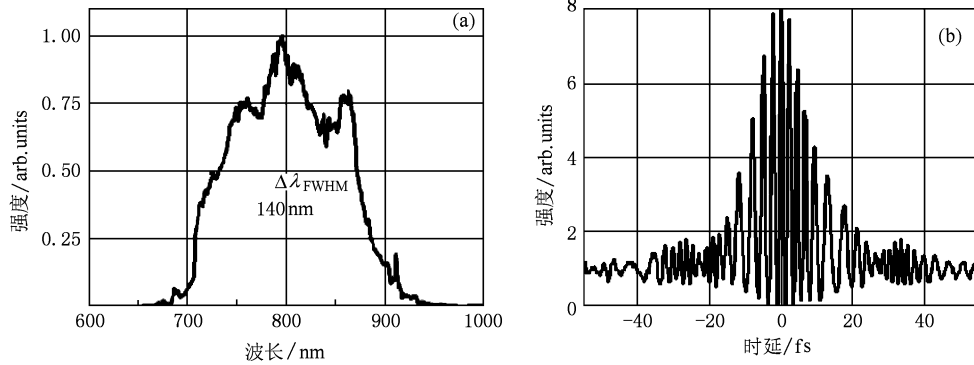


图 4 在钛宝石激光器中用啁啾镜输出的光谱曲线(a)和干涉自相关曲线(b)

3. 2. 加入劈尖和腔外补偿

通过在腔内引入劈尖对,可以更加精确地控制谐振腔的色散图,从而得到更窄的脉冲输出. 石英劈尖顶角为 2° ,最薄处为 0.2 mm,以布儒斯特角插入至光路中. 同时,因为输出镜的材料色散、空气色散以及测量过程中自相关仪的分束片引入的材料色散都会引起脉冲的显著展宽,直接输出的脉冲带有正啁啾,因此为了测量得到所能产生激光脉冲的真实宽度,还必须在腔外进行色散的预补偿,以得到变换极限的脉冲,利用一对啁啾镜 M_6, M_7 与另一对石英劈尖进行腔外色散补偿,如图 5 所示. 每面镜子经 3 次反射,通过优化谐振腔内外劈尖对的插入量得到最窄脉冲. 最终得到的结果如图 6 所示,可以看出,通过插入谐振腔内的劈尖对,激光器的色散图更接近于零色散点,得到的输出光谱呈 3 峰结构,与没有劈尖的情况明显不同,优化得到的相关

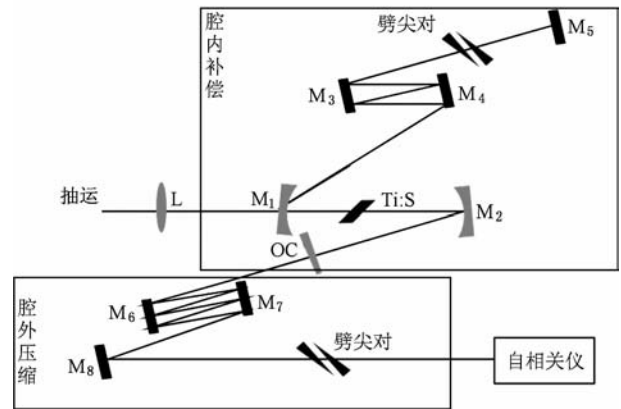


图 5 钛宝石激光器腔内色散补偿和腔外压缩结构图(L 为透镜; M_1, M_2 为腔镜; M_3, M_4, M_6, M_7 为啁啾镜; M_5, M_8 为反射镜;Ti:S 为钛宝石晶体;OC 为耦合输出)

曲线如图 6(b) 所示,为了精确的衡量脉冲宽度,利

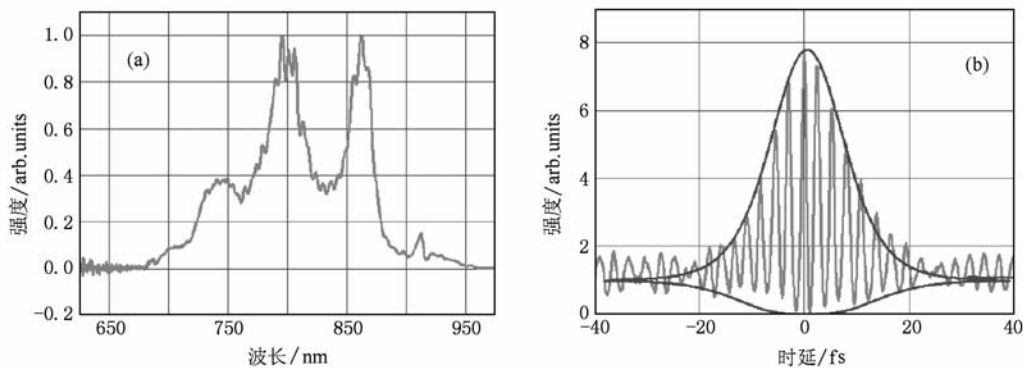


图 6 在钛宝石激光器中用啁啾镜输出的干涉自相关曲线(a)和光谱曲线(b)

用理想的双曲正割函数的自相关包络对实验结果进行拟合,能与9.5 fs的双曲正割函数(蓝色曲线)很好地符合,说明实验中得到了9.5 fs的变换极限脉冲.

因为镜子不是成对设计和使用的,所以会出一些高色散,但是我们通过一次性镀制的非成对啁啾镜获得了比较好的脉冲输出,起到了很好的色散补偿作用,符合期望值,设计、制备和测试及在激光器里的应用也进行相互验证,证明了我们的制备精度能满足啁啾镜制备的需要,得到性能比较好的啁啾镜,我们自己搭建的白光干涉仪的测试能比较准确的反映制备得到的啁啾镜的色散信息.

4. 结 论

700—900 nm 啁啾镜在钛宝石激光谐振腔中进行色散补偿,锁模后获得了12 fs的激光输出脉冲,经过腔外补偿和劈尖优化后得到了9.5 fs的脉冲输出,这是目前报道的国产啁啾镜获得的最短的飞秒激光脉冲输出. 这为独立完成啁啾镜的设计、制备和测试,并且制备出性能更好的啁啾镜奠定了基础. 同时也说明我们制备的非成对的啁啾镜能比较好的满足钛宝石激光器的色散补偿需要,非成对啁啾镜的设计和制备也大大降低了生产和使用成本.

- [1] Liu H G, Hu M L, Song Y J, Li Y F, Chai L, Wang C Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014215-1
- [2] Che H S 2003 *Laser & Optoelectronics Progress* **40** 5 (in Chinese) [车会生 2003 激光与光电子学进展 **40** 5]
- [3] Bai G 2002 *Laser & Optoelectronics Progress* **39** 41 (in Chinese) [白光 2002 激光与光电子学进展 **39** 41]
- [4] Szipöcs R, Köházi-Kis A 1997 *Appl. Phys. B* **65** 115
- [5] Szipöcs R, Ferencz K, Spielmann C, Krausz F 1994 *Opt. Lett.* **19** 201
- [6] Zavelani-Rossi M, Cerullo G, De Silvestri S 2001 *Opt. Lett.* **26** 1155
- [7] Steinmeyer G 2006 *Appl. Opt.* **45** 1484
- [8] Szipöcs R, Köházi-Kis A, Lakó S 2000 *Appl. Phys. B* **70** (Suppl.) S51
- [9] Pervak V, Tikhonravov A V, Trubetskov M K 2007 *Appl. Phys. B* **87** 5
- [10] Liao C Y, Wu Z B, Fan Z X, Zhang Z G, Hou H H, Shao J D 2006 *Chinese J. Lasers* **33** 238 (in Chinese) [廖春艳、吴祖斌、范正修、张志刚、侯海虹、邵建达 2006 中国激光 **33** 238]
- [11] Wang Y Z, Zhang W L, Fan Z X, Huang J B, Jin Y X, Yao J K, Shao J D 2008 *Chinese J. Lasers* **35** 760 (in Chinese) [王胭脂、张伟丽、范正修、黄建兵、晋云霞、姚建可、邵建达 2008 中国激光 **35** 760]
- [12] Wang Y Z, Shao J D, Jin Y X, Huang J B, He H B, Fan Z X 2009 *Chinese J. Lasers* **36** 1563 (in Chinese) [王胭脂、邵建达、晋云霞、黄建兵、董洪成、贺洪波、范正修 2009 中国激光 **36** 1563]
- [13] Wang Y Z, Shao J D, Dong H C, Zhang W L, Cui Y, He H B, Fan Z X 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 094209
- [14] Wang Y Z, Shao J D, Zhang W L, Wei C Y, Huang J B, Jin Y X, Fan Z X 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 105202
- [15] Chen L L, Yang W J, Wang X, Zhang Z G 2009 *Opt. Commun.* **282** 617
- [16] Deng Y Q, Yang W J, Zhou C, Wang X, Tao J, Kong W P, Zhang Z G 2008 *Opt. Lett.* **33** 2855
- [17] Xie X D, Wang Q Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3159 (in Chinese) [谢旭东、王清月、王专 2005 物理学报 **54** 3159]
- [18] Zhao J S, Zhang Z G 2001 *Chinese J. Lasers* **29** 13 (in Chinese) [赵江山、张志刚、柴路 2001 中国激光 **29** 13]
- [19] Zhao Y Y, Wang P 2007 *Sci. China G* **37** 123 (in Chinese) [赵研英、王鹏、张炜 2007 中国科学 G **37** 123]

Generation of 9.5 fs pulse by use of chirped mirrors in Ti:sapphire laser cavity*

Wang Yan-Zhi¹⁾²⁾ Shao Jian-Da^{1)†} Dong Hong-Cheng¹⁾²⁾ Jin Yun-Xia¹⁾ He Hong-Bo¹⁾ Yi Kui¹⁾
Fan Zheng-Xiu¹⁾ Song You-Jian³⁾ Hu Ming-Lie³⁾ Chai Lu³⁾ Wang Qing-Yue³⁾

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

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

3) (*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*)

(Received 13 January 2010; revised manuscript received 21 March 2010)

Abstract

According to the requirement of Ti:sapphire laser, the optimized chirped mirrors (CM) are designed to provide group delay dispersion (GDD) of around -60 fs^2 with bandwidth 200 nm at a center wavelength of 800 nm. The CMs are manufactured by time controlled ion beam sputtering. The GDD is determined by using a home-built white light interferometer. The measurement results show that the manufactured CM can meet our requirement. By balancing the intra-cavity dispersion with our manufactured chirped mirrors, 12 fs and 9.5 fs pulses have been obtained respectively.

Keywords: chirped mirrors, group delay dispersion, dispersion compression, Ti:sapphire laser

PACS: 81.15.Ef, 78.67.Pt

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB806002).

† Corresponding author. E-mail: jdshao@mail.shenc.ac.cn