

30-35

第4卷第5期
1996年10月光学 精密工程
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5
October, 1996

飞秒掺钛蓝宝石激光脉冲的 产生与放大实验研究

王屹山 陈国夫

TN248.1

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

A 摘要 采用3 mm长的钛宝石短棒和改进的非对称Z型折叠腔结构进行自锁模实验, 采用石英棱镜对作为腔内色散补偿元件, 在氩离子激光器输出5 W泵浦下, 实现低阈值泵浦自锁模运转。在腔内不加任何调制元件的情况下实现软光闸锁模, 获得最短脉冲15 fs, 光谱宽度80 nm, 输出平均功率400 mW。同时以此钛宝石激光器作为振荡器采用12 mm长的钛宝石棒进行飞秒啁啾脉冲再生放大实验, 获得重复率5 kHz, 单脉冲能量166 μJ的结果, 放大脉冲光谱宽度为26 nm。

关键词: 自锁模钛宝石激光器; 色散补偿; 飞秒啁啾脉冲; 再生放大

1 引言

近年来自锁模钛宝石激光器已成为近红外波段一种重要的飞秒超短脉冲光源, 由于其吸收和发射频谱宽、易于泵浦、易于产生超短脉冲、可调谐、输出功率高、工作稳定而获得广泛和重视和应用。目前国际上已应用此技术获得8.5 fs的脉冲^[1], 国内的报道为19 fs^[2], 我们采用上海光机所生产的高浓度钛宝石及相干公司的氩离子激光器进行自锁模钛宝石激光器的实验研究, 获得了15 fs的结果, 这也是迄今为止国内已报导的最新结果。同时进行的钛宝石飞秒脉冲啁啾再生放大获得了单脉冲能量166 μJ, 光谱宽度26 nm的结果。本文作要报道这次实验过程及结果, 并进行理论上和简单分析。

2 基本原理

克尔透镜锁模技术主要是利用强光束通过增益介质(钛宝石)所产生的非线性效应而形成的一种锁模技术。当一束光通过介质时, 介质的折射率可表示成:

$$n = n_0 + n_2 I$$

式中 n_0 为介质的弱光作用下的折射率, n_2 称为介质的非线性折射率系数。如果入射光束为高斯光束, 则介质折射率的变化也为高斯函数形式:

收稿日期: 1996年8月5日

$$\Delta n = \frac{2n_2 I(t)}{\pi \omega^2} \exp[-2(\frac{r}{\omega})^2]$$

对于钛宝石 $n_2 = 3 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{W}$, ω 是高斯光束的 $1/e$ 振幅光束半径, $I(t)$ 为光脉冲的瞬时光强, r 为垂直光束的离轴距离。此时介质等效于类透镜光元件, 如 $n_2 > 0$, 介质等效于一种正透镜, 对于入射光有会聚效应, 这就是克尔透镜自聚焦效应。这种自聚焦效应的腔内的强度损耗调制元件结合在一起构成一种快饱和吸收体效应而实现克尔透镜锁模。常用的强度损耗调制元件是指人为地在腔内加的一个损耗调制器(狭缝), 这称为硬光阑, 所谓软光阑就是指聚焦的泵浦光束形成的光阑。

3 实验装置及腔内结构参数

实验对标准的四腔镜像散补偿 Z 形折叠腔加以改进, 如图 1 所示。

实验光路总腔长为 1.664 m, 非对称分布, $M1M4 > M2M3$, 长臂 0.94 m, 短臂 0.63 m, $M3, M4$ 是曲率半径为 10 cm 的凹面镜, 对 750~940 nm 为全反宽带介质膜 ($R = 99\%$), 对氩离子光高透 ($T = 98\%$)。 $M1, M2$ 为平面高反腔镜, 对 750~940 nm 保持全反的宽带介质膜 ($R > 98\%$)。在各种产生小于 30 fs 的激光器中, 为使输出镜的带宽尽可能宽, 一般采用低透过率输出镜 ($< 3\%$)。为获得极短光脉冲, 应尽可能使激光腔的带宽足够宽。为了

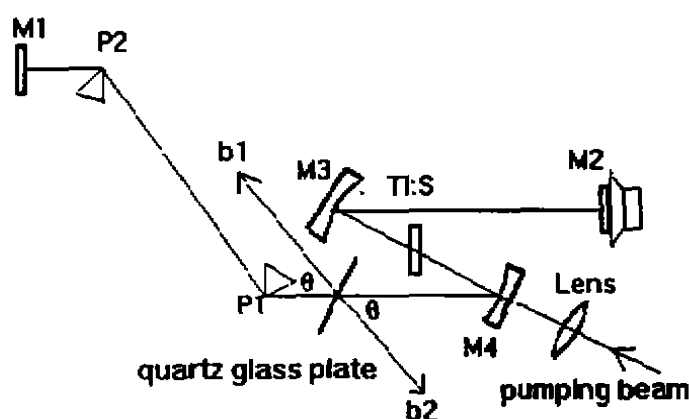


图 1 自锁模钛宝石激光器结构

Fig. 1 Schematic of SML Ti:S laser

了克服因部分发射膜的带宽限制, 我们提出使用平面高反腔镜 $M1$ 代替低输出耦合腔镜。这样我们的激光腔便成为带宽达 190 nm 的宽带激光腔。为获得激光输出, 在腔内插入 1 mm 厚的石英玻璃片, 使其法线与入射光线成一小角度 θ , 由于此薄片的一面镀有增透镜, 最终可由此薄片的另一面反射耦合出方向相反的两路钛宝石光。这一技术简单地解决了蒸镀宽带部分发射薄膜的技术难题, 给极短的光脉冲产生创造了条件。 $P1$ 和 $P2$ 为一对布儒斯特角切割的石英色散补偿棱镜。激光棒是上海光机所生长的高浓度钛宝石短棒, 长为 3 mm, 布氏角切割, 对全线氩离子泵浦光吸收率为 70%, 采用的泵浦是相干公司生产 INNOVR300 系列的 308 氩离子激光器, 泵浦功率为 5 W。采用的聚焦透镜焦距为 70 mm, 棱镜间距为 45 cm, 钛宝石激光像散补偿角为 13° , 泵浦光对钛宝石, 钛宝石光对两个棱镜均以布氏角入射。

实验证明, 连续钛宝石光泵浦域值为 1 W, 当泵浦光功率为 5 W 时, 钛宝石连续输出为 400 mW, 玻璃片每一面反射输出 200 mW。仔细调节腔内各元件, 当获得连续输出最大时, 通过加在 $M2$ 上的扬声器起振, 轻微调节 $M3$ 到钛宝石棒的距离和棱镜 $P2$ 的位置, 即可实现锁模。锁模脉冲可稳定工作数小时。当锁模稳定时, $M3$ 到钛宝石棒面的距离为 49 mm, $M4$ 到钛宝石棒面的距离为 50 mm, 锁模脉冲的重复频率为 90.14 MHz。

4 实验结果及分析

我们采用自制的干涉自相关仪测量脉宽,测量系统如图 2 所示

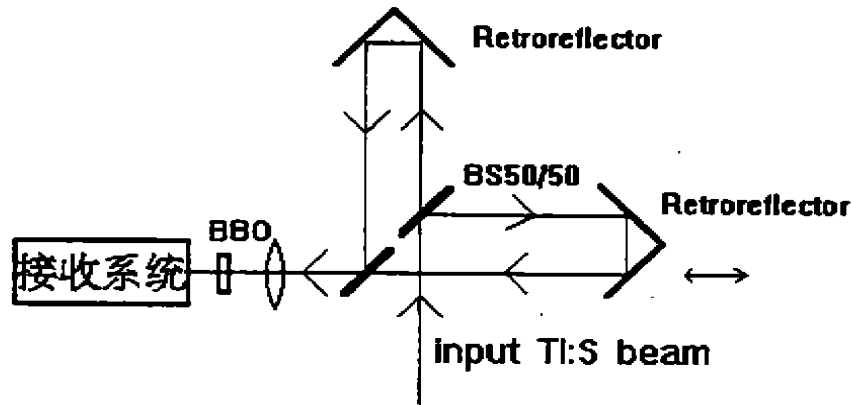


图 2 共线自相关仪测量系统

Fig. 2 Measurement system of collinear self-correlation



图 3. (a) 脉冲的干涉自相关曲线

Fig. 3 (a) Self-correlation curve of pulse

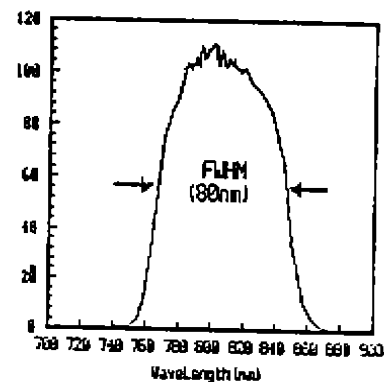


图 3. (b) 脉冲的光谱曲线

Fig. 3(b) Spectrum curve of pulse

图 3. (a)为最短脉冲的干涉自相关曲线,图 3. (b)为同时测量的最短脉冲的光谱曲线。由图可知最短脉宽 15 fs,中心波长 800nm,谱宽 80nm,时间带宽乘积 $\Delta\nu \cdot \Delta t = 0.563$,大于双曲线正割脉冲的变换极限 0.315,说明补偿尚未达到最佳化,实际这样的谱宽可支持 8.4 fs 的脉冲,实验还证明,锁模域值为 2 W,在 5.5 W 泵浦下,锁模输出平均功率为 400 mW。

理论分析可知,能产生短脉冲主要是自相位调制(SPM)和群速弥散(GVD)补偿的作用。由钛宝石晶体的光克尔效应产生的自相位调制使激光频谱展宽,产生正啁啾脉冲。由 SPM 产生的附加频率

$$\delta\omega(t) = \frac{-\partial\Phi(t)}{\partial t} = \frac{L}{2} n_2 k_0 \frac{\partial |E(t)|^2}{\partial t}$$

$\delta\Phi(t)$ 为激光棒的折射率变化产生的附加相移 k_0 为波数, L 为激光棒长度。由于工作频谱 $\Delta\nu$ 越宽, 脉宽 Δt 越窄, 但同时腔内元件引起的群速弥散 GVD 又会使脉冲变宽。因而在腔内加入棱镜对产生负 GVD 而使正啁啾脉冲得到色散补偿, 从而获得短脉冲。但棱镜对主要是补偿二阶色散, 对于三阶色散无法补偿, 从而限制了脉冲的压缩。因而激光腔设计应使三阶色散最小, 这是获得极短脉冲的关键。我们选择石英棱镜就是因为它具有小的三阶色散。我们通过计算^[1], 3 mm 钛宝石棒 $\varphi''=360 \text{ fs}^2$, $\varphi'''=-127 \text{ fs}^3$, 而对于石英棱镜, $\lambda=800 \text{ nm}$ 时, $n=1.454$, $dn/d\lambda=0.1855$, $d^2n/d\lambda^2=0.03754$, $d^3n/d\lambda^3=-0.1426$, $\varphi''=-887.54 \text{ fs}^2$, 对于 SF10, $n=1.71125$, $dn/d\lambda=-0.04958$, $d^2n/d\lambda^2=0.1755 \mu\text{m}^{-2}$, $d^3n/d\lambda^3=-0.9972 \mu\text{m}^{-3}$, $\varphi'''=-7552 \text{ fs}^3$, 是石英的 8.5 倍。计算棱镜间距 $L=40 \text{ cm}$, 由于腔内的其它光学元件存在色散, 实际的补偿长度 $L=45 \text{ cm}$ 。

钛宝石激光器自锁模实验还表明:

(1) 对于短棒来说, 锁模启动比较困难, 因为短棒的自聚焦效应较弱。我们在实验中采用 50Hz 交流源加在扬声器上以增大噪声振荡幅度, 当锁模位置合适时, 即可锁模。

(2) 对于泵浦源氩离子激光器的要求是模式好, 稳定性高。模式好可提高泵浦效率, 稳定性好可维持锁模状态。在实验中我们发现, 当氩离子激光器输出功率随时间下降时, 锁模脉冲稳定性变坏。

(3) 灰尘是影响锁模脉冲稳定性的重要因素, 由于灰尘对激光棒及各个腔镜的影响, 造成腔内功率下降, 达不到锁模脉冲所需的激光功率, 从而造成失锁。为此, 我们把整个激光腔置于一防尘罩下, 并通以氮气。

(4) 锁模脉冲的幅度调制主要是由于腔内功率不够尔造成, 另外棱镜、M3、狭缝等元件的位置不对, 也会造成幅度调制。

(5) 实验中我们发现, M3 的位置对于锁模至关重要, 当 M3 位于离钛宝石棒较远的一个稳定区边缘时, 才会锁模。^[4]

5 钛宝石飞秒脉冲啁啾再生放大和压缩技术的实验研究

我们使用氩离子激光器泵浦的自锁模钛宝石激光器产生的飞秒脉冲做种子源, YAG 调 Q 倍频激光器做泵浦源进行飞秒啁啾再生放大与压缩的实验研究。图 4 为实验的结构框图。

图中振荡器种子源就使用图 1 的钛宝石激光器结构。为防止在放大过程中的非线性效应对元件的损伤, 种子脉冲在进入放大器之前先进行展宽, 放大之后再压缩到 fs 级。我们在实验中采取常用的光栅双通结构作为展宽器, 原始无啁啾的飞秒光脉冲通过这种结构后, 产生正啁啾, 同时脉冲展宽到皮秒量级。当脉冲经放大后, 再进入到标准的光栅对结构中, 这样脉冲的正啁啾得到补偿, 恢复到原来的飞秒量级。在实际运用中, 常以凹面镜

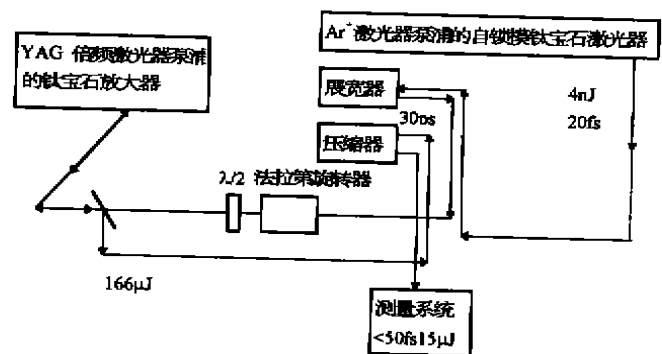


图 4 钛宝石飞秒脉冲啁啾再生放大器的结构框图

Fig. 4 Schematic of Ti:S femtosecond chirped pulse regenerative amplifier.

代替透镜,这样既可以减小损耗,使结构紧凑化,而且可以减小由于透镜色散而造成的影响,图5为使用凹面镜的常用光栅对展宽器和压缩器双通结构。

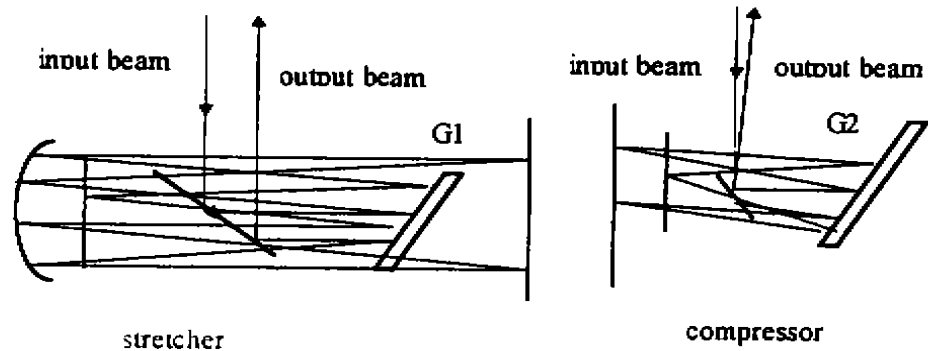


图5 展宽器和压缩器结构

Fig. 5 Schematic of the stretcher and compressor

其中镀金光栅 $12001/\text{mm}$,假设入射光脉冲 $t_{\text{in}}=30\text{ fs}$,脉冲需要展宽的倍数 $\frac{t_{\text{out}}}{t_{\text{in}}}=1000$,可以计算出展宽器和压缩器中的有效距离均为 6.6 cm 。运用条位相机测出宽后的脉冲宽度为 24 ps ,和计算符合很好。为防止放大出的脉冲对振荡器有反馈作用,从而造成振荡器输出不稳定,我们在放大器之前加入法拉第旋转器和 $\lambda/2$ 波片。放大器结构如图6所示。

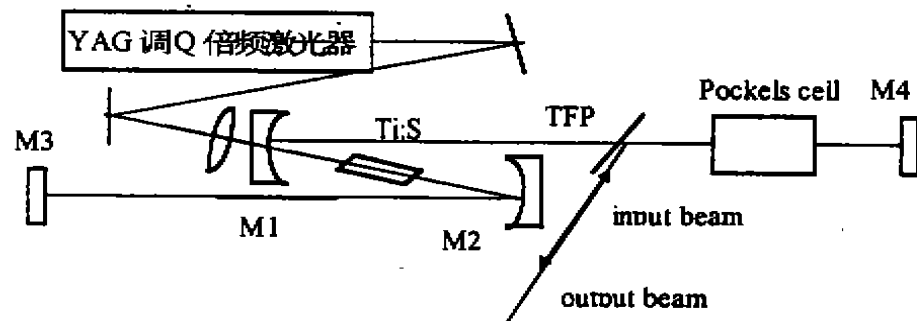


图6 YAG调Q倍频激光器泵浦的钛宝石放大器

Fig. 6 Ti:S amplifier pumped by Q-switch YAG double frequency laser

图中,钛宝石棒 12 mm ,凹面镜 $M1$ 、 $M2$ 焦距为 12.5 cm ,和平面腔镜 $M3$ 、 $M4$ 为均镀有对 $750\text{ nm}-850\text{ nm}$ 保持全反的介质膜,而且 $M1$ 、 $M2$ 对 YAG 倍频光高透,TEP 是单膜偏振片,对水平偏振的光保持有 98% 的透过率,对垂直偏振保持高反。钛宝石棒长为 12 mm ,普克尔盒的作用是选断脉冲。普克尔盒在静态时产生 $\lambda/4$ 效应,经过展宽器的种籽脉冲由普克尔盒上加 $\lambda/4$ 电压选通注入,当放大到一定程度时,再在普克尔盒上加 $\lambda/4$ 电压倒空输出。

实验证明,在 YAG 倍频激光器 4.2 W 泵浦下,放大脉冲能量可达到 $166\text{ }\mu\text{J}$,脉冲重复频率 5 kHz ,光谱宽度 26 nm ,根据双曲正割脉冲的变换极限 0.325 可支持 26 fs 的脉宽。

致谢本项目和到国家攀登计划资助,特此致谢,并感谢上海光机所提供晶体。

感谢赵尚弘博士的大力合作与帮助。

参 考 文 献

- [1] J. Zhou, G. Taft, C. P. Huang et al. sub-10 fs pulse generation in Ti:sapphire, Capabilities and Ultimate Limits. Springer Series in Chemical Phys., 1994, 60, Ultrafast Phenomena X, 39-40
- [2] 林位株等, 自由锁模钛宝石激光器产生 19 fs 脉冲. 光学学报, 1995, 15(8): 1151-1152
- [3] R. L. Fork et al., Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation. Opt. Lett., 1987, 12(7): 483-485
- [4] D. E. Spence et. al, 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. Opt. Lett., 1991, 16(1): 42-44
- [5] G. Cerullo et. al, Self-starting Kerr-lens mode locking of Ti:sapphire laser. Opt. Lett., 1994, 19(14): 1040-1042

Experimental Research of Generation and Amplification of Femtosecond Ti:sapphire Pulse

Wang Yishan, Cheng Guofu

(State Key Lab of Transient Optical and Technology,
Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068)

Abstract

Making Self Mode Locking experiment using the 3 mm Ti:sapphire short rod and the improved asymmetric Z shape folding configuration, with quartz prisms as dispersion compensation element, we achieve low threshold self Mode Locking operation with 5 W pumping Argon power and soft-aperture mode Locking without any modulating element. The pulse duration is 15 fs with 80 nm spectrum bandwidth. The 400 mW average power is obtained. Using the SML Ti:sapphire laser as oscillator, the Ti:sapphire femtosecond chirping pulse regenerative amplification is done. The amplified pulse repetition is 5 kHz, the single pulse energy is 166 μ J. The 26 nm bandwidth supporting 26 fs is obtained.

Key words: SML Ti:sapphire laser, Dispersion compensation, Femtosecond chirped pulse, Regenerative amplification

王屹山 男, 1970年10月出生。1993年7月毕业于西北师范大学物理系, 并获得理学学士学位。1993年9月被推荐到中科院西安光机所攻读硕士学位, 主要从事固体激光器超短脉冲的产生和放大研究。