

双色交叉锁模钛宝石飞秒激光器*

王水才 肖东 杨建军 唐建明 关义春
(中科院西安光机所瞬态光学技术实验室, 西安, 710068)

摘要: 文章报导一种能够同步输出两种独立波长脉冲的交叉锁模钛宝石飞秒激光器, 两列光脉冲的中心波长和持续期分别是 804nm, 758nm 及 25fs, 26fs。激光器输出的总平均功率为 200mW。双波长飞秒光脉冲之间的跳动小于 1fs。

关键词: 双波长 交叉锁模 Ti: Al₂O₃ 激光器 同步飞秒光脉冲

A bicolor cross-mode-locked Ti: sapphire femtosecond laser

Wang Shucai, Xiao Dong, Yang Jianjun

Tang Jianming, Guan Yichun

(State Key Lab. of Transient Optics Technology, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: Here we report a cross-mode-locked femtosecond Ti: sapphire laser which operates at the wavelengths of 804nm and 758nm and provides the synchronous pulse outputs with the duration of 25fs and 26fs simultaneously. The total average power of the pulse trains is 200mW. The laser uses the unsymmetrical X^o type resonator, and obtained higher operation stability.

Key words: two wavelength cross-mode-locked Ti: sapphire laser synchronous femtosecond pulse

一、引言

交叉锁模钛宝石(Ti: Al₂O₃)飞秒激光器的发展受到了广泛的关注^[1,2,3],在光物理、光化学、生命科学及其相关的交叉学科研究中,超快时间分辨光谱学是很重要的检测实验手段。利用可调谐的两路脉冲进行激光探测是超快时间分辨光谱学的通用方法,如利用两台钛宝石锁模激光器同步输出的两路光,一路作为泵浦光,另一路作为探测光,就可以进行吸收光谱或荧光光谱实验。这样两束光同步精度不是很高,跳动比较大,达皮秒(10⁻¹²s)量级。如果将泵浦或探测光中一路采用基波倍频光,其光谱范围受到很大限制。最近利用可调谐的自锁模 Ti: Al₂O₃ 激光器,通过双狭缝耦合研制出了双波长飞秒激光器^[4,5],得到了高度重视。该类激光器最大优点是可选择的双波长飞秒光束,两不同波长光脉冲之间跳动可以小到 10fs(10⁻¹⁵s)。这样就可将超快时间分辨光谱的时间分辨率做到同样数量级,将有利于超快过程研究超精细光谱结构。我们进行高等植物光合作用原初反应超快速动力学研究就需要这种光源。为此,我们研制出了一种双色交叉锁模 Ti: Al₂O₃ 飞秒激光器,有比较满意的特性。

二、设计原理

双色交叉锁模 Ti: Al₂O₃ 飞秒激光器不同于一般可调谐自锁模钛宝石激光器,由于要同步

* 国家攀登计划“飞秒激光技术与超快过程”中项目。

输出两束飞秒脉冲序列,因此在腔内同时有两个光路,钛宝石晶体内有两个交叉的自聚焦效应通道。在输出耦合器的内侧用两个小孔狭缝选光分束,腔内损耗增加了很多,设法降低激光阈值就成了技术路线的关键。

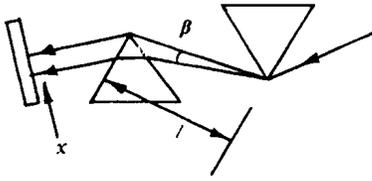


Fig. 1 Configuration of the intracavity prism pair included in the Bi-color Ti: Al₂O₃ laser cavity

1. 利用棱镜对光频滤波扩展光束,双孔狭缝分束限模。按照 Fork 对调节群速弥散的光谱滤波器分析^[7],在对称平面上的空间弥散(见图1)为:

$$\Delta x = - 2l \cos\beta (dn/d\lambda) \cdot \Delta \lambda \quad (1)$$

n 为棱镜材料的折射率,其他参数见图1。

2. 提高增益降低阈值运转。由于在谐振腔内要构成等腔长双回路光束传播,必须开两个狭缝,损耗的光束就很多,如何提高内腔双光束的增益、降低锁模阈值就成了要解决的主要问题。我们对自锁模 Ti: Al₂O₃ 激光器动力学的分析^[6],并结合 Harriscn 等人的低阈值推算^[8,9],泵浦功率可以表示为

$$P = \frac{g_0}{g_{0\text{th}}} \eta_c \frac{\pi h \nu_p}{4\sigma\tau} (T + L_{1,2}) (w_0^2 + w_p^2) \times [1 - \exp(-al)]^{-1} \quad (2)$$

式中, η_c 为泵浦光与钛宝石晶体之间的耦合效率, $h\nu_p$ 为泵浦光子能量, σ 为发射截面, τ 为晶体上能级寿命, T 为耦合器透过率损耗, $L_{1,2}$ 为激光晶体寄生吸收和内腔损耗, w_0 和 w_p 分别表示晶体腔模和泵浦光的束腰半径, a 为频率 ν_p 光的吸收系数, l 为晶体长度, g_0 为来回小信号增益系数, $g_{0\text{th}}$ 为在阈值附近来回小信号增益系数。为使泵浦功率迅速达到阈值泵浦功率,除了尽量降低腔内各种损耗之外,必须使脉动增益大于 CW 运转增益,迅速使 $g_{0\text{th}}$ 增长,有最好的“增益孔”效应。当脉动过程变得很强时,增益随着频率和脉冲强度变化,只有净增益:

$$\Delta g_0(\omega, I) = A(\omega) - 4[g(\omega)/\Delta\omega_g^2 - a(\omega)/\Delta\omega_a^2](\omega - \omega_0)^2 - g(\omega)(I/I_s) > 0 \quad (3)$$

才有很强的脉冲成形效应。 $g(\omega)$ 和 $a(\omega)$ 表示在频率 ω 处的增益和损耗, I 为脉冲光强, I_s 是饱和光强。这样才能有效的降低阈值运转。

三、实验研究及其结果

我们采用的是非对称 X 腔型结构的七腔镜式激光谐振腔,见图2。M₁ 及 M₂ 凹面反射镜的曲率半径 $r = 100\text{mm}$, 在其中心焦轴上放置 $6 \times 20\text{mm/mm}$, 两边为布斯窗切割的掺杂浓度为 0.2% 的钛宝石激光晶体, M₁ 及 M₂ 在 740nm 到 900nm 通带内的反射率大于 99.98%, M₁ 对 488nm, 514nm 及 530nm 光的透过率大于 90%。M₃, M₄ 及 M₇ 为平面反射镜, M₃ 及 M₇ 对 740~900nm 的光反射率大于 99.98%, M₄ 为输出耦合器,透过率在 740~900nm 通带内为 1%。M₅ 及 M₆ 为曲率半径为 100mm 的凹面镜,在 740~900nm 通带内为全反射。放在 M₅ 及 M₆ 共焦处的染料(dye)作为增强自聚焦效应的自启动元件。腔长 1.8m, P₁ 及 P₂ 为 SF₁₀ 玻璃的弥散补偿棱镜,相距 45cm 有较好的内腔弥散补偿。P₁ 及 P₂ 又作为扩谱分束器用, S 为 2.5mm 的双孔狭缝限束器,其中心间距在 100~250 μm 较为合适。L 为泵浦光输入耦合透镜,焦距 $f = 100\text{mm}$ 。NEOCYNINE 染料乙二醇溶液浓度约

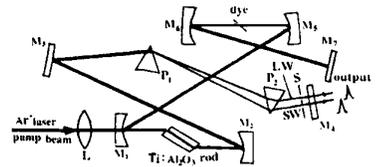


Fig. 2 Schematic of the Bi-color cross-mode locked Ti: Al₂O₃ femtosecond laser cavity

10^{-5}M 。所有光学调整架全架在室温温度系数小于 10^{-8} 的殷钢架子上,

钛宝石晶体用自来水冷却。采用氩离子激光器全线泵浦, 在 6.6W 的功率激励下, 双色交叉锁模 Ti: Al_2O_3 激光器有好的运转特性。利用美国光谱物理公司的 409 自相关仪和北京第二光学仪器厂的



Fig. 3 Intensity autocorrelation traces for B+ color cross mode-locked Ti: Al_2O_3 laser
a- short wavelength pulse
b- long wavelength pulse

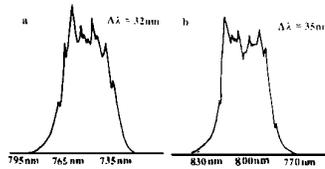


Fig. 4 Spectrums of the dual color pulse for Fig. 3
a- spectrum of the short wavelength pulse
b- spectrum of the long wavelength pulse

WDG500-1 型光栅单色仪进行实时测量, 测得双脉冲序列各自的自相关函数曲线见图 3。相应的双色脉冲光曲线见图 4。如果认为是 sech^2 脉冲波形, 短波长的脉宽为 26fs, 长波长的脉宽为 25fs。短波长的 $\Delta\lambda = 32 \text{nm}$, 长波长的 $\Delta\lambda = 35 \text{nm}$ 。双色脉冲之间的 $\Delta\lambda = 46 \text{nm}$ 。为了检测双色脉冲之间的跳动情况, 我们将 M_7 换为透过率在 740nm 到 900nm 之间为 0.6% 耦合输出镜, 用相关仪测得由 M_7 输出的混合脉冲的互相关自相关函数曲线见图 5。脉冲的半高全宽为 36fs。由图 3 及图 5 看到, 双色脉冲之间的跳动小于 1fs。这样的飞秒激光器是很稳定的。我们采用美国光谱物理公司的 405 功率计测量 M_4 输出耦合器的脉冲功率, 在 M_7 为全反射镜时, 两路输出分别为 100mW。由于采用的是单腔结构, 就是说在腔内循环成形的两路不同波长的光脉冲有相同的腔长, 来回传播的双色脉冲都经过弥散补偿棱镜进行弥散补偿。这样的单腔结构容易调试, 要做到最佳弥散补偿, 可以用两个 P_2 棱镜, 分别进行补偿。

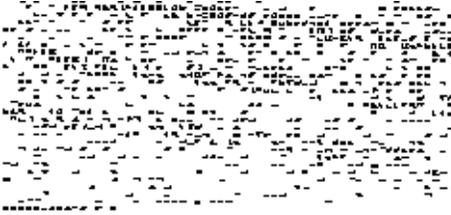


Fig. 5 The curve of cross-autocorrelation about bi-color pulse circulating in cavity

有相同的腔长, 来回传播的双色脉冲都经过弥散补偿棱镜进行弥散补偿。这样的单腔结构容易调试, 要做到最佳弥散补偿, 可以用两个 P_2 棱镜, 分别进行补偿。

参 考 文 献

- 1 Wang S C, Ye T, Cui Y *et al.* Ultrafast Phenomena, M D12- 1, May 1994
- 2 Zhu L, Li P, Sage J T *et al.* Ultrafast Phenomena, TuB5- 2, May 1994
- 3 Dykaar D R, Knox W H, Lopez A S *et al.* SPIE 1994, 2116: 98
- 4 Evans J M, Spence D E, Bums D *et al.* Opt Lett, 1993, 18(13) : 1074
- 5 Barros M R X de, Becker P C. SPIE, 1994; 2116: 37
- 6 Wang S C, Tang J M, Li H *et al.* SPIE, 1994; 2116: 129
- 7 Fork R L. Opt Lett, 1986; 11(10) : 629
- 8 Harrison J, Finch A, Rines D M *et al.* Opt Lett, 1991; 16(8) : 581
- 9 Keller U. Appl Phys, 1994; B58: 347

作者简介: 王水才, 男, 1937 年出生。研究员, 博士生导师。从事飞秒激光技术及超短激光与物质相互作用超快过程的研究。

收稿日期: 1995-09-04 收到修改稿日期: 1996-09-16