

多波长可调谐 Ti:Al₂O₃ 飞秒激光器的研究*

王水才 肖 东 杨建军 唐建明 关义春

(中国科学院西安光机所瞬态光学室, 西安 710068)

提要 研制出一种多波长可调谐自锁模 Ti:Al₂O₃ 激光器,能够同步产生二个或三个波长的飞秒脉冲序列,最短脉冲为 48 fs,平均功率为 70 mW,脉冲中心波长间距在 26~49 nm 范围内可变。激光器波长调谐范围为 750~830 nm。

关键词 多波长,可调谐,飞秒光脉冲

1 引 言

随着时间分辨超快光谱技术的发展,需要几路波长不同的同步飞秒光脉冲进行泵浦—探测—检测实验,才能有效地获得超短激光与物质相互作用的信息。象我们在高等植物光合作用原始反应超快速动力学研究中,采用了钛宝石(Ti:Al₂O₃)飞秒激光器同时输出的两束或三束调谐光脉冲,给实验带来了很大的方便。这类激光器可广泛地用于光物理、光化学、光生物学以及相关的交叉学科领域。早期报道的有双波长染料激光器^[1],最近出现可独立调谐的双钛宝石调谐激光器、钛宝石内腔倍频激光器^[2]、内腔倍频参量振荡器^[3]、多孔限束调谐飞秒激光器^[4,5]。本文报道用狭缝限束 Ti:Al₂O₃ 激光器的棱镜调谐输出,得到了多波长飞秒激光脉冲。

2 理论分析

多波长运转飞秒激光器意味着谐振腔内同时要满足几个波长振荡,采用狭缝选择波长将会导致腔内损耗增大。如果用两个狭缝,损耗更大,就必须提高内腔增益或者尽可能地降低激光阈值。按照我们对自锁模钛宝石飞秒激光器的动力学研究^[6],以及 Fork 对超短脉冲光频滤色器的分析^[7],激光系统的净增益为

$$g_0(\omega, I) = A(\omega) - B(\omega)(\omega - \omega_0)^2 + D(\omega)I \quad (1)$$

$$B(\omega) = 4[g(\omega)/\Delta\omega_p^2 - a(\omega)/\Delta\omega_s^2] \quad (2)$$

$$D(\omega) = -g(\omega)/I_s \quad (3)$$

这里 $g(\omega)$ 和 $a(\omega)$ 表示在频率 ω 处的增益和损耗, I_s 为饱和光强, I 为脉冲光强。采用内腔棱镜对进行弥散补偿和分光,见图 1。其各参数之间的关系为

* 国家攀登计划资助项目。

收稿日期: 1995 年 5 月 15 日; 收到修改稿日期: 1995 年 8 月 28 日

$$\Delta x = -2l \cos \beta \frac{dn}{d\lambda} \Delta \lambda \quad (4)$$

n 是 SF₁₀ 棱镜材料的折射率, (4) 式给出间隔为 $\Delta \lambda$ 的两波长之间的空间弥散。由 (1) 和 (2) 式看到, 要尽可能地减小插入损耗, 提高增益和脉冲幅度 $A(\omega)$, g_0 也可表示为

$$g_0 = G_0 \frac{P}{P_{th}} \quad (5)$$

P 为泵浦功率, P_{th} 为阈值泵浦功率, G_0 为在阈值处与来回小信号增益有关的系数。因此尽可能地降低 P_{th} , 提高泵浦功率, 才能使激光器维持正常的锁模运转。按照 (4) 式, 由已知的内腔光束尺寸, 就可以计算出相邻两狭缝间的间隔所对应的波长范围。

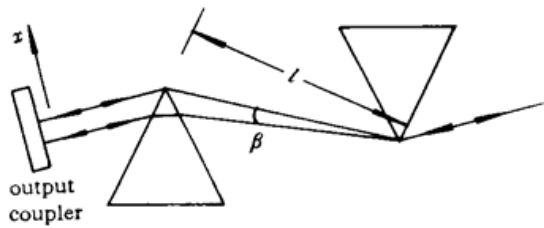


Fig. 1 Configuration of the intracavity prism pair and the parameters

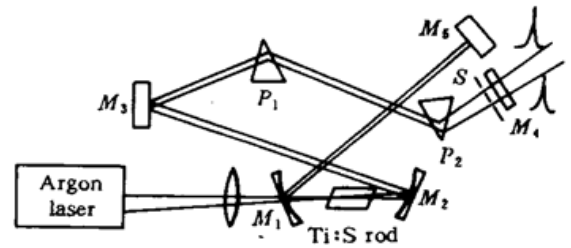


Fig. 2 Schematic of the double wavelength femtosecond Ti : sapphire laser

3 实验设计与结果

我们采用的是非对称 X 形腔型结构, 如图 2。M₁ 及 M₂ 为曲率半径 $r = 100$ mm 的全反射腔镜, 其全反膜带宽为 750~900 nm。M₁ 又为双色膜片, 对 488 nm, 514 nm 及 530 nm 的光有 90% 以上的透过率。M₃ 和 M₅ 为平面反射镜, 在 750~900 nm 范围, 反射率 $R \geq 99.9\%$ 。M₄ 为输出耦合器, 在 750~900 nm 波带范围, 有 1% 的透射率。P₁ 和 P₂ 为 SF₁₀ 布氏棱镜, 用来进行内腔弥散补偿, 两棱镜顶端相距 45 cm。L 是焦距 $f = 10$ cm 的聚焦泵浦透镜, 其焦点附近焦轴与 M₁, M₂ 在钛宝石棒中的焦轴重合。钛宝石棒尺寸为 $\phi 6 \times 20$ mm, 两边为布氏角切割, Ti³⁺ 离子掺杂浓度约为 0.15%, 钛宝石晶体的品质因素 (FOM) 约为 150。S 为双狭缝板, 靠近 M₄ 内侧放置, 狭缝为 $\phi 2$ mm, 相距约为 150 μ m。激光谐振腔总的腔长约为 1.54 m, M₅ 端为短臂, 臂长为 49 cm; 另一端为长臂, 长约 105 cm。在 M₁ 及 M₂ 间束腰半径约为 15 μ m, 有效地降低了激光阈值。采用 Ar⁺ 激光器全线泵浦, CW 激光阈值约为 1 W 左右, 自锁模激光阈值约为 3 W, 平均输出锁模功率约为 70 mW。当泵浦增加到接近 4 W 时, 平均锁模输出功率约为 400 mW。这是在没有狭缝 S 情况下的自锁模激光器运转情况。采用自相关仪测量激光器输出脉宽为 36 fs。用单色仪实时测量脉冲的光谱, 其中心波长在 795 nm 处的 $\Delta \lambda$ 为 27 nm。其自相关函数和脉冲光谱见图 3。当我们加上狭缝 S 时, 腔内损耗突然加大, 激光锁模阈值升高, 经过适当的准直调试, 仍然采用 4 W 的泵浦功率, 自锁模输出功率下降到 70 mW。为了有效输出, 并且使激光器更加稳定, 将泵浦功率增加到 4.8 W, 双脉冲输出功率大于 80 mW。采用单色仪和自相关仪实时测量了双狭缝自锁模钛宝石飞秒激光器的输出脉冲光谱和持续期, 见图 4。双脉冲的中心波长分别为 755 nm 和 772 nm, 光谱宽度分别为 6 nm 及 7 nm, 其脉宽为 120 fs 及 98 fs。在双脉冲输出运转时, 当狭缝之间的间隔选择得不太合适时, 单腔锁模输出脉冲跳动比较大, 甚至较长波长的脉冲中心波长和光谱变化也比较大。因此, 要选择好两狭缝之间的间隔, 在我们双

波长非对称谐振腔的结构中,两狭缝间隔取 100 到 250 μm 比较好,有较稳定的双波长脉冲序

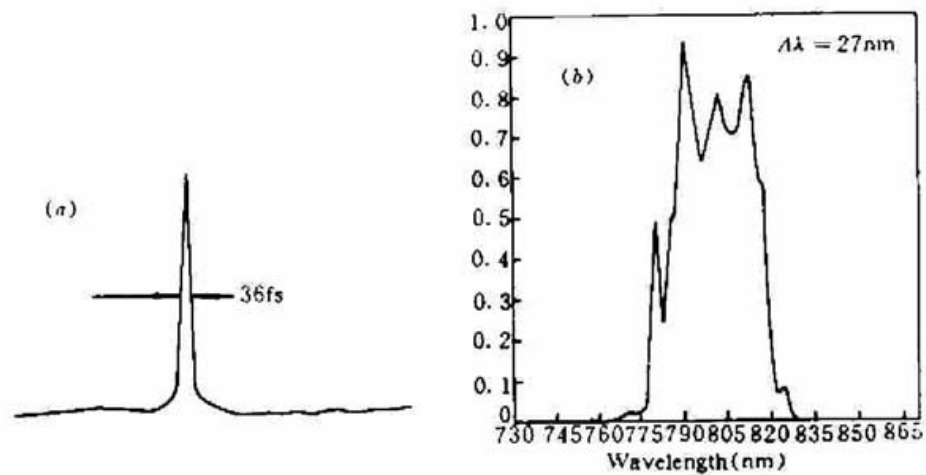


Fig. 3 Autocorrelation trace (a) and its spectrum (b) of the single-wavelength femtosecond Ti:Al₂O₃ laser

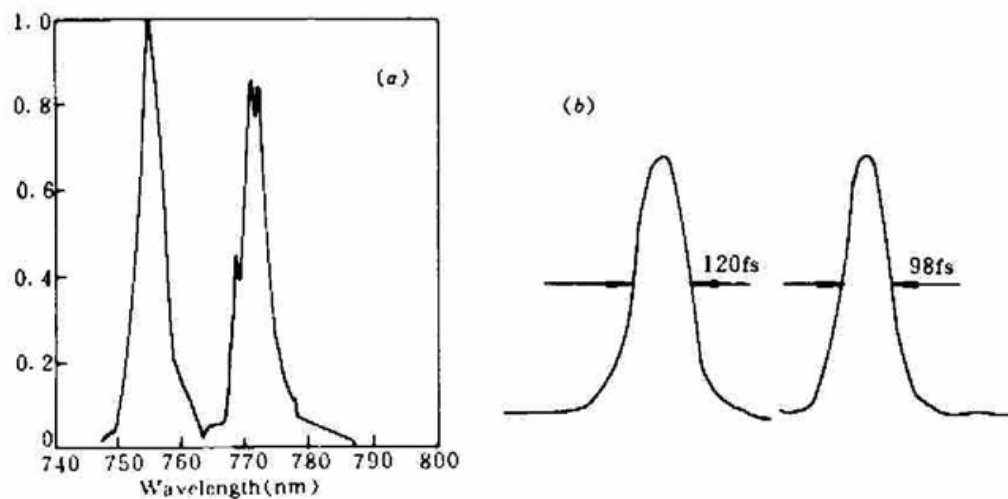


Fig. 4 Pulse profile and pulse autocorrelation trace of the dual wavelength femtosecond Ti:Al₂O₃ laser

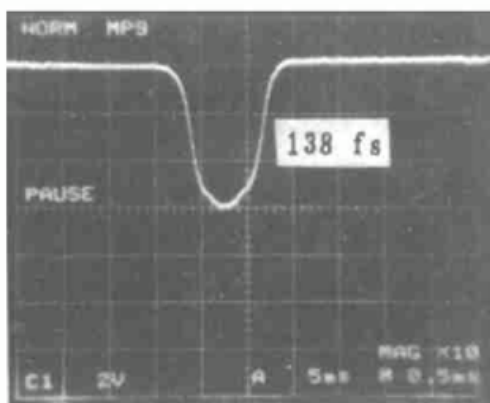


Fig. 5 Cross-autocorrelation trace between the two pulses centered at 755 nm and 772 nm, obtained using a 0.6% output coupler (M_s)

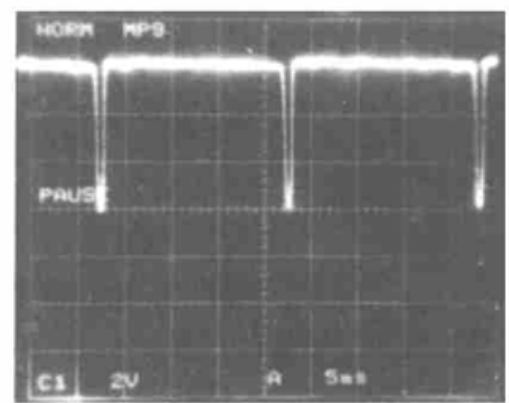


Fig. 6 Cross-autocorrelation trace train between the two pulses centered at 755 nm and 772 nm

列输出。如果增加泵浦功率到 5 W 以上,双波长飞秒脉冲很稳定,在 5.5 W 泵浦功率测得脉冲持续期,几乎不变。由于我们采用的是单腔多波长锁模运转腔型结构,将 M_s 腔镜用透过率在

750 ~ 900 nm 之间为 0.6% 的反射耦合镜代替,由 M_5 就可得到 30 mW 以上的中心波长为 755 nm 及 772 nm 混合飞秒脉冲序列输出。采用 409 型强度相关仪实时测量了脉冲持续期的变化情况,其结果见图 5。在这种情况下 M_4 输出的双波长序列脉冲的光谱及中心波长没有变化,只是由于泵浦增加到 5.5 W,脉冲的平均功率增加了。图 5 相关曲线的脉冲半高全宽(FWHM)为 138 fs。可见在单腔情况下,只要狭缝位置及参数选得适当,内腔棱镜弥散补偿有效,双色飞秒脉冲之间的跳动就小于 20 fs。图 6 是我们利用相关仪和存贮示波器实时测量和拍摄的由 M_5 输出的脉冲序列。在示波器上逐次展开分析测量,三个脉冲宽度之差别小于 ± 3 fs。说明我们的双色调谐 Ti : Al₂O₃ 飞秒激光器非常稳定。激光器在单脉冲运转下调谐范围从 750 nm 到 860 nm 可变,双脉冲输出波长调谐范围小一些,从 750 nm 到 830 nm。改变双狭缝间隔的大小和位置均可得到相应的脉冲中心波长的变化,但在大多数情况下双色脉冲的持续期也变了。在双色脉冲运转的最佳状态下获得了短波长的最短脉宽为 60 fs,长波长的最短脉冲为 48 fs。实验中,我们采用抛光的细金属丝结构,不用双孔狭缝放在输出耦合器的内侧,调试内腔准直光束及激光器参数,获得了三波长锁模钛宝石激光运转,采用单色仪及强度相关仪测量三色脉冲的光谱和脉冲持续期,其结果见图 7 和图 8。其三色飞秒光脉冲的中心波长分别为 755 nm、808 nm 及 821 nm,其光脉冲最短的是长波长耦合输出的,带宽约为 11.5 nm。由图 7 及图 8 看到,脉冲光谱带宽和它对应的脉宽相差甚远,最大的脉宽约为 146 fs,对应的中心波长为 755 nm。处于中心波长 808 nm 的光脉冲持续期为 70 fs,对应中心波长 821 nm 的脉宽为 55 fs。

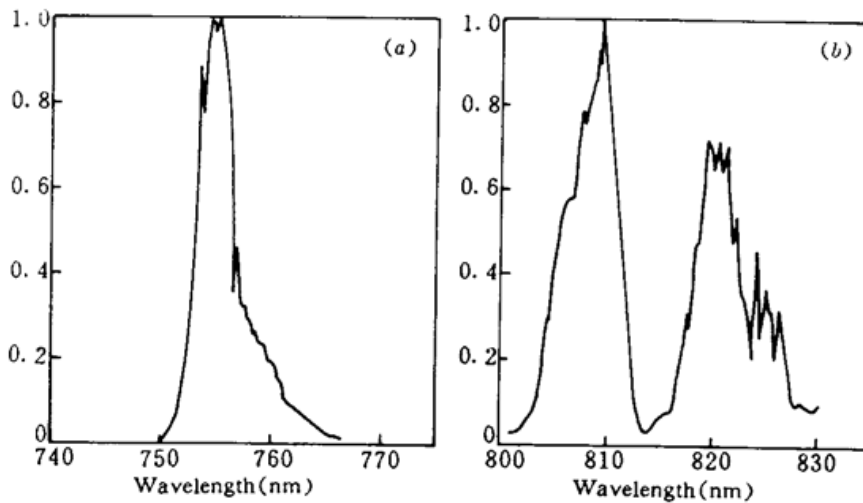


Fig. 7 Pulse profiles of the three-wavelength femtosecond Ti : Al₂O₃ laser

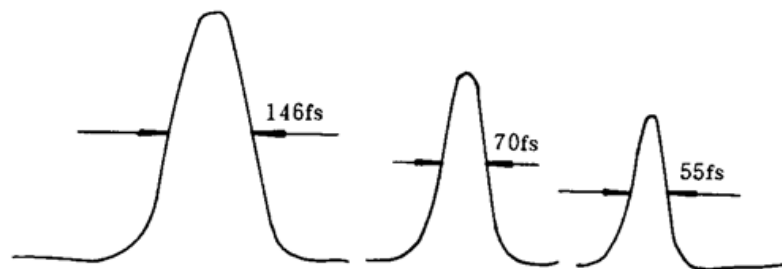


Fig. 8 Autocorrelation traces of the three pulses centered at 755 nm, 808 nm and 821 nm, respectively

总之,双波长输出脉冲的持续期在 48 ~ 120 fs 之间,最短同步双脉冲持续期为 48 fs 和 60

fs,它们之间的跳动约为 20 fs。从双波长及三波长脉冲序列的中心波长位置来看,多色脉冲的中心波长在 26 nm 到 49 nm 范围内变动。由于采用同一棱镜对进行多色光脉冲弥散补偿,各脉冲不能同时达到最佳补偿,故各色光持续期差别较大。单腔结构实质上是腔长相等的两个或三个谐振腔,不同中心波长的光脉冲在腔内各沿自己的光通道传播,但是都在钛宝石晶体自锁模,经受很强的脉冲成形效应。单腔结构有很强的腔间耦合,图 5 和图 6 的互相关-自相关曲线给出了两个具有不同中心波长的飞秒脉冲同时运转时的相互关系。由于腔的损耗很大,又调试到低阈值运转,放大的自发辐射(ASE)并不大,ASE 并不影响激光器运转。我们曾在腔内加一染料进行可饱和吸收和自启动,对减小 ASE 有作用。为了使各色脉冲有较好的弥散补偿,改善脉冲宽度差别较大的不足,可以采用多腔结构,但是结构复杂了。考虑到我们的具体应用,还是选用单腔结构。

参 考 文 献

- 1 W. E. Bron, J. Kuhl, B. K. Rhee. Picosecond-laser-induced transient dynamics of phonons in GaP and ZnSe. *Phys. Rev. B*, 1986, 34(10): 6961~6971
- 2 M. T. Asaki, S. Backus, C. Shi *et al.*. Frequency doubling of ultrashort pulses from a Ti : sapphire laser. *Ultrafast phenomena*. 1994, ThD14/4-5
- 3 Randy J. Ellingson, Chung L. Tang. Ti : sapphire-pumped solid state source of high-repetition-rate femtosecond pulses tunable in the visible. *SPIE*, 1994, 2116 : 47~55
- 4 M. R. X. de Barros, P. C. Becker. Bi-wavelength operation of a short-pulse Ti : sapphire laser. *SPIE*, 1994, 2116 : 37~46
- 5 J. M. Evans, D. E. Spence, D. Burns *et al.*. Dual-wavelength self-mode-locked Ti : sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1993, 18(13) : 1074~1076
- 6 Wang Shuicai, Tang Jianming, Li Hao *et al.*. Dynamic study on self-mode-locked Ti : sapphire femtosecond lasers. *SPIE*, 1994, 2116 : 129~136
- 7 R. L. Fork. Optical frequency filter for ultrashort pulses. *Opt. Lett.*, 1986, 11 : 629

Investigation of Multi-wavelength Tunable Ti : sapphire Femtosecond Laser

Wang Shuicai Xiao Dong Yang Jianjun Tang Jianming Guan Yichun

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

Abstract A multi-wavelength tunable self-mode-locked Ti : sapphire laser has been constructed that synchronously generates femtosecond pulse trains at two independent wavelength regions or three. Pulses as short as 48 fs with a 70 mW average output power and a central wavelength separation adjustable between 26 nm and 49 nm have been produced by using correspondent apertures or slits. This laser can be tuned from 750 nm to 830 nm.

Key words multi-wavelength, tuning, femtosecond laser pulse