

低功率泵浦 Ti : Al₂O₃ 自锁模激光器

向望华 戴建明 邢歧荣 张伟力 王清月

(天津大学精仪系, 天津 300072)

提 要

本文报道了低功率泵浦的 Ti : Al₂O₃ 激光器实现了稳定的自锁模运转, 锁模脉冲宽度为 180 fs. 分析了激光器的结构及工作特性.

关键词 TiAl₂O₃ 激光器, 自锁模, 自聚焦自相位调制.

1 引 言

利用 Ti : Al₂O₃ 作为激活介质获得超短光脉冲已经在主动锁模^[1]、被动锁模^[2]、对撞锁模^[3]、APM 技术^[4]与 RPM 技术^[5]中均获得了成功. 更引人注目的是 Ti : Al₂O₃ 激光器的自锁模特性, 它可采用很简单的腔结构而获得飞秒量级的稳定自锁模运转. 自从 Spence 等人首次报道利用 Ti : Al₂O₃ 中的非线性效应实现自锁模以来, 在国际上已形成研究热点, 从国外文献报道中发现, 实现自锁模的泵浦阈值功率都是在较高功率的情况下获得的^[6~8], 稳定运转大于 5.5 W^[9], 而在本文的实验研究中, 在较低的泵浦功率 2.5 W 时, 便可实现稳定的自锁模, 3.8 W 时获得最窄脉宽为 180 fs.

2 实验装置

自锁模 Ti : Al₂O₃ 激光器的实验装置如图 1 所示, 其中掺钛蓝宝石棒的大小为 $\phi 6 \times 20$ (mm), 两端加工成布儒斯特角. $n = 1.77$ (对激光振荡中心波长), 采用 Ar⁺ 离子激光全线泵浦. 光腔 M₁~M₄ 构成的四镜折迭腔, 腔长为 1.5 m.

M₂, M₃ 为球面全反射镜, 曲率半径 $R_2 = R_3 = 10$ cm, M₁ 为平面输出镜, $T = 3.3\%$, M₄ 为平面全反镜. 由于采用该折迭腔, M₃ 与 M₄ 又是小曲率半径, 因此, 对光束将产生严重的象散, 使振荡光束发生畸变, 根据象散补偿原理, 利用光腔的往返矩阵和数值分析, 精确地计算钛宝石在 M₂, M₃ 之间的位置及腔的折迭角 θ , 以使象散得以充分补偿. P₁, P₂ 为高折射率棱镜对, 其材料为 SF₁₄ 玻璃, 用来进行色散补偿, 压缩脉宽; A 为小孔, 大小、位置可根据实验选择; N 为刀口, 在腔内没有插入 B, F 元件的情况下, 采用刀口可以实现波长可调谐, 并起到改进锁模状态的作用.

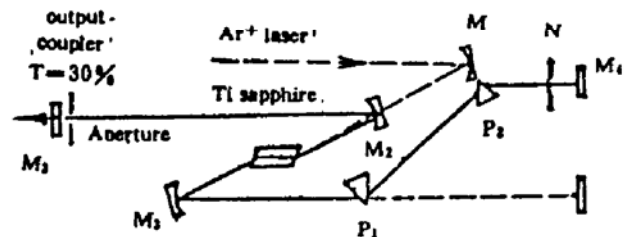


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

3 工作特性

3.1 自锁模原理

Spence 等人首次发现,连续运转的 Ti: Al₂O₃ 激光器在腔镜瞬间失谐时会产生超短脉冲并能自维持运转. 对于 Ti: Al₂O₃ 激光器自锁模的机理至今尚无统一说法. 作者认为, Ti: Al₂O₃ 激光器的自锁模是利用光束通过工作物质产生自聚焦效应与腔内有限孔径的结合而实现的, 从时域角度看, 任何带有被动性质的锁模激光器, 腔内都存在这样的元件, 它们首先从噪声中选取强度较大的脉冲作为脉冲序列的种子, 然后利用其锁模器件的非线性使脉冲的前后沿的增益小于 1, 而使脉冲中部的增益大于 1, 脉冲在腔内往返过程中, 不断被整形放大, 脉宽被压缩, 直到稳定锁模. 例如, 具有快饱和吸收体的锁模激光器, 可饱和吸收损耗了光脉冲前沿, 而可饱和吸收体的有限弛豫时间切断了脉冲的后沿, 脉冲中部得到放大. 具有慢饱和吸收体 (恢复时间远大于脉宽, 但远小于脉冲在腔内来回一周的时间) 被动锁模激光器, 由于其吸收饱和特性脉冲前沿被吸收掉, 中央部分和后沿通过, 在增益介质处, 脉冲中央部分得到充分放大. 由于增益饱和效应, 脉冲后沿部分几乎没有得到增益而压缩了脉冲的后沿, 脉冲的形成实际上是由于饱和吸收体的非线性吸收和增益介质的增益饱和共同作用的结果. 在自锁模 Ti: Al₂O₃ 激光器中, 入射到钛宝石中的光束, 由于其非线性效应引起光束与光强相关的自聚焦, 即 $n = n_0 + n_2(|E|^2)$, 自聚焦改变光束的空间分布, 由于腔内光阑的存在, 这种光阑可以是外加的, 也可以认为是钛宝石内部光束本身所形成的三维立体的, 光束经受一个强度相关的损耗调制, 即 $\alpha = \alpha_0 - \beta|E|^2$, 换言之, 在腔内参数及结构选择适当的情况下, 腔内高功率光束比低功率光束有更高的透过率, 因此对于一个光脉冲, 自聚焦与腔内光阑的结合就相当于一个快饱和吸收体, 它对光脉冲的前后沿有压缩作用.

3.2 自锁模的启动

主动锁模激光器, 其腔内引入调制元件, 在调制器的作用下, 使线宽内的所有纵模具有确定的振幅和相位关系, 从时域来看, 工作物质使激光输出脉宽变宽, 而调制器使之变窄; 从频域来看, 工作物质使频宽变窄, 而调制器则使输出频带变宽, 在腔内往返经过, 最后自动形成一个稳定的锁模脉冲宽度和谱宽. 其脉宽取决于线宽、调制器频率及饱和增益. 被动锁模是通过可饱和吸收体的吸收和工作物质的放大作用, 从起伏的噪声脉冲中选取, 脉冲在往返吸收、放大, 使前沿不断被削掉, 而顶峰部分有效地通过, 使脉冲变窄, 最后形成稳定的锁模脉冲序列, 但首先必需有一个启动锁模的阈值噪声功率, 这是所有的被动锁模激光器中共有的特性. 自锁 Ti: Al₂O₃ 激光器腔内既无调制器, 也无可饱和吸收体, 由于其非线性效应产生自聚焦, 这种自聚焦效应与腔内小孔的结合就可等效于一可饱和吸收体, 它对腔内光束起到损耗作用, 其损耗系数 $C = 1.1 \times 10^{-7} \text{ W}$, 设初始连续运转的 Ti: Al₂O₃ 激光腔内的强度起伏为 10%, 若腔内功率为 10 W, 可以得到损耗为 1.1×10^{-7} , 而锁模的自启动阈值为 $1.3 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-5}$ ^[10], 因此 Ti: Al₂O₃ 激光器不能自启动锁模, 而为了使其启动锁模, 在瞬间引入一个扰动, 使腔内产生足够强的噪声脉冲达到锁模阈值. 在本文的实验中, 启动的方法是振动腔镜 M₁ 或 M₂, 使谐振腔在突然间失谐, 造成高损耗, 反转集属数获得充分积累, 当腔镜复位时, 产生巨脉冲, 这就是起始脉冲, 这些脉冲在腔内传播, 由于 Ti: Al₂O₃ 的非线性自聚焦作用, 对脉冲进行选择、放大、压缩, 最后形成稳定的振荡. 另外, 也可以改变腔内其它元件 (如调节棱镜), 相当于引入一扰动, 使之产生较强噪声脉冲, 从而获得自锁模启动. 最早的自锁模理论认为, 只有激光运转在单横模才能实现, 最近所报道的研究表明, 在高阶模情况下也可以自锁. 作者在实验中发现, 无

论是激光腔调整到单横模或多横模工作状态都可获得稳定的自锁模. 图 2 是锁模脉冲序列.

3.3 输出功率

采用氩离子激光全线泵浦, 连续 $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器运转的泵浦阈值功率为 1.2 W, 随着泵浦功率的增加, 输出功率也相应增大. 图 3 中曲线 (a) 为连续光运转时输入、输出功率变化关系, 泵浦功率为 3.8 W 时, 连续输出 130 mW. 当泵浦功率为 2.5 W 时, 开始实现自锁模运转, 随着泵浦功率的提高, 锁模输出功率增大, 曲线 (b) 是测得的输出功率随泵浦功率的变化关系.

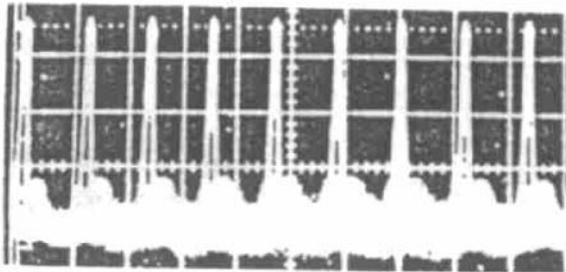


Fig. 2 Pulse train of self-mode-locked laser

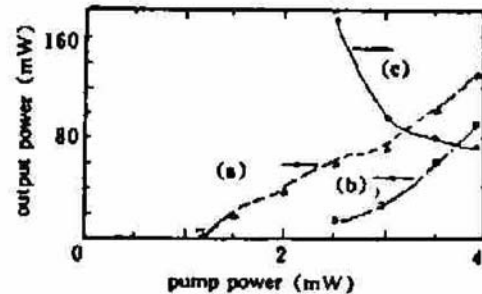


Fig. 3 CW output power (a), mode-locked output power (b), and pulse width (c) vs pump power

3.4 脉冲宽度

实验发现, 增加泵浦功率, 同时适当调节腔内元件 (如小孔、棱镜间距等) 可使脉冲宽度变窄. 图 3 中曲线 (c) 是不同泵浦功率下所得到的不同脉宽. 这是因为随着泵浦功率的增加和谐振腔的优化调整, 都将使得腔内光强的增加, 自聚焦效应是光强的函数, 这就必然导致自聚焦效应的增强, 使得脉冲前后沿的损耗增加. 同时, 由于介质的自相位调制效应使得脉冲光谱进一步得到展宽. 然后, 再适当增加腔内负色散量 (通过增加棱镜间距来实现) 去补偿由自相位调制产生的脉冲啁啾, 便可得到更窄的脉冲. 所以说, 泵浦功率的变化引起脉宽的变化, 实质上是脉宽随自聚焦效应的强弱而变化. 当泵浦功率过低时, 自聚焦效应太弱, 对光脉冲前后沿的损耗不明显, 起不到饱和吸收体的作用, 因此就不能形成稳定的自锁模. 国外所报道的自锁模阈值为 3~4 W. 鉴于实验的 Ar^+ 激光器不能提代稳定的高功率运转, 所以反复细致地调整腔的结构, 尽量降低锁模阈值, 当泵浦功率为 2.5 W 时实现自锁模, 当 Ar^+ 激光最大输出为 3.8 W 时, 所得到的最窄脉宽为 180 fs, 相应的谱宽为 4.2 nm, 如图 4 所示. $\Delta\nu \cdot \Delta t = 0.37$, 接近傅里叶变换极限.

3.5 棱镜距离对脉宽的影响

在图 3 曲线 (c) 所示的输出脉宽随输入功率的变化关系中, 脉宽是在某一输入功率不变的情况下, 调节 P_1, P_2 两棱镜间的距离所获得的脉宽的最佳值. 当泵浦功率为 3.8 W 时, 改变 P_1, P_2 间距离以调节腔内的负色散量, 脉宽有明显的变化. 图 5 描述了其变化规律曲线.

小 结 1) 利用国产的低功率 Ar^+ 激光器做泵浦源, 在国内首次实现了稳定的 $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 自锁模, 泵浦功率比国外文献报道的要低一倍. 2) 随着泵浦功率的增加, 脉宽将会变窄, 在 5~8 W 泵浦功率时, 很容易获得 100 fs 以下的脉宽. 3) 作者认为, 在增益介质中, 由于介质的自聚焦效应, 使得介质中存在一个三维的“光栏”, 随着泵浦功率的变化以及光腔的调整, 使得腔内振荡光强变化, 导致自聚焦效应的不同, 这就相当于介质中三维“光栏”的改变, 使得自锁模状态发生变化. 4) 当泵浦功率相对较低时, 或者光腔偏离最优化较远时, 外加小孔的大小和位置对自锁模起着相当重要的作用. 当提高泵浦功率并进行细致的光腔调整, 使得各实验参数合适时, 即便去掉腔内插入的二维光栏, 其自锁模仍然能够稳定地运转.

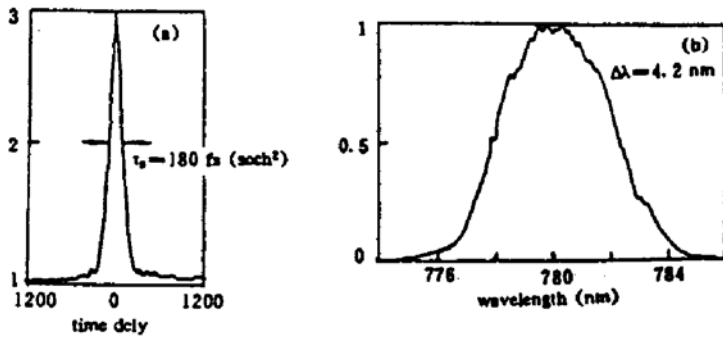


Fig. 4 (a) Autocorrelation traces
(b) Spectra of pulse corresponding wavelength (nm)

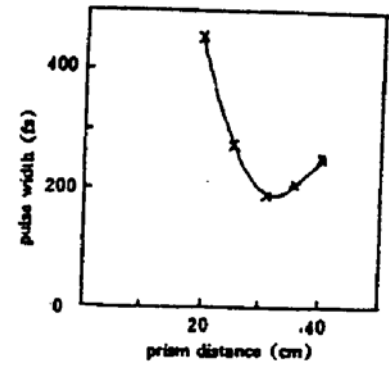


Fig. 5 Pulse duration versus distance of prism

参 考 文 献

- [1] P. F. Curlay, A. I. Ferguson, Actively mode-locked Ti : sapphire laser producing transform-limited pulses of 150 fs duration, *Opt. Lett.*, 1991, 16(3) : 1016~1018
- [2] Nobuhiro Sarakura, Yuzo Ishida, Hibetoshi Nakano, Generation of 50-fsec pulses from a pulse-compressed CW, passively mode-locked Ti : sapphire laser, *Opt. Lett.*, 1991, 16(3) : 153~155
- [3] Kazunori Naganuma, Kazuo Mogi, 50-fs pulse Generation directly from a colliding-pulse-mode locked Ti : sapphire laser using an antiresonant ring mirror, *Opt. Lett.*, 1991, 16(10) : 738~740
- [4] D. E. Spence, W. Sibbett, Femtosecond pulse generation by a dispersion-compensated coupled-cavity, mode-locked Ti : sapphire laser, *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, 8(10) : 2053~2060
- [5] U. Keller, G. W. Thooft, W. H. Knox *et al.*, Femtosecond pulse from a continuously self-starting passively mode-locked Ti : sapphire laser, *Opt. Lett.*, 1991, 16(13) : 1022~1024
- [6] D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett, 60 fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti : sapphire laser, *Opt. Lett.*, 1991, 16(1) : 42~44
- [7] Chung-po Huang, Henry C. Kapteyn, John W. McIntosh *et al.*, Generation of transform-limited 32 fs pulses from a self-mode-locked Ti : sapphire laser, *Opt. Lett.*, 1992, 17(2) : 139~141
- [8] J. P. Likforman, G. Grillon, M. Joffre *et al.*, Generation of 27 fs Pulse of 70 kW peak power at 80 MHz repetition rate using a CW self-pulsing Ti : sapphire laser, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(19) : 2016~2063
- [9] N. H. Rizvi, P. M. W. French, J. R. Taylor, Continuously self-mode-locked Ti : sapphire laser that produces sub-50-fs pulses, *Opt. Lett.*, 1992, 17(4) : 279~281
- [10] Szuyuan Chen, Jyhpyng Wang, Self-starting issues of passive self-focusing mode locking, *Opt. Lett.*, 1991, 16(21) : 1689~1691

A self-mode locked Ti : sapphire laser with low pump power

Xiang Wanghua Dai Jianming Xing Qirong

Zhang Wili Wang Qinyue

(Department of Precision Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 30 November 1992; revised 12 March 1993)

Abstract

Stable pulse train with duration as short as 180 fsec has directly generated from a self-mode locked Ti : sapphire with low pump power. Schematic construction and characteristics of the laser have been analysed in detail.

Key words Ti : sapphire laser, self-mode-locking, self focus, self phase modulation.