

自锁模 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器自启动条件分析*

杨 杰 魏志义 黄斐然 刘焰发 余振新 周建英

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 广州, 510275)

摘要: 本文分析了 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器的自启动条件, 讨论了不同腔参数对锁模产生的影响, 计算了自锁模及自启动的调节范围, 并在实验中实现了自启动锁模, 计算结果与实验相吻合。

关键词: $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光 自锁模 自启动

Analysis on self-starting condition of self-mode-locked $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$

Yang Jie, Wei Zhiyi, Huang Feiran, Liu Yanfa, Yu Zhenxin, Zhou Jianying

(Ultrafast Laser Spectroscopy Laboratory, Zhongshan University, Guangzhou, 510275)

Abstract: The self-starting condition of the self-mode-locked $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ laser suffered the influence of resonator parameters. Based on the analysis of the beam propagation in resonator, a self-mode-locked judgemental factor δ is obtained. A large δ corresponds the wide adjustment region of the mode-locked area. In resonator, here are two areas satisfying both the self-mode-locked condition and self-starting condition. The self-mode-locked and self-starting region is a few tens μm . In experiment, the self-mode-locked and self-starting laser pulses of 74 fs are obtained. The theoretical calculation is well agree with the experimental results.

Key words: $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ laser self-mode-locking self-starting

一、引言

自从 D. E. Spence 等人在掺钛蓝宝石 ($\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$) 激光器中发现了自锁模以来^[1], 以 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器为代表的固体锁模器件, 由于有着结构简单, 调谐范围宽, 稳定性好, 容易得到窄脉宽等优点, 越来越多地被人们使用。利用钛宝石等固体材料的克尔效应进行锁模的研究也已成为超短脉冲研究的热点。这类锁模激光器通常要借助敲击^[1], 移动反射镜^[2]等方法来启动锁模, 稳定性及可靠性均不尽人意。近年来, 国外已有人对自锁模 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光自启动特性进行了研究, S. Chen 和 J. Wang 等人通过数值分析探讨了自启动的可能性^[3], C. Radzewicz 等人使用 ZnS 材料使自锁模的启动过程及稳定性得到提高^[4], M. Lai 报导了不带附加材料的自启动自锁模 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器^[5]。我们采用国产元件, 也实现了自启动自锁模。本文对自锁模 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器的腔型结构进行了分析计算, 指出了自锁模及自启动锁模产生的条件及各腔参数对自启动锁模条件的影响。

二、锁模条件及腔型分析

采用典型的“Z”型腔结构, 实验装置如图 1 所示, 其中 M_1 为全反镜、 M_4 为输出镜、 M_2, M_3

* 本项目获国家自然科学基金及广东省自然科学基金资助。

为一对共焦镜, 曲率半径分别为 R_1, R_2 , 在 L_3 臂放置一对棱镜, 进行色散补偿。氩离子泵浦光聚焦后由 M_2 镜进入钛宝石晶体, 将钛宝石晶体等效为一个薄透镜, 由于钛宝石棒以布氏角切割, 而且光束在球面腔镜上是斜入射, 在子午面和弧面上会形成象差, 这种象差会影响光束的形状, 在折迭角不太大的情况下, 对激光效率和腔模稳定性并不造成明显影响, 所以可在忽略象差情况下讨论其腔模结构, 全反镜为起点, 输出镜为终点, 计算光束在腔内的单程传播矩阵

$$M_{\text{self}} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ s_{1/f_2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_{22} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/f & 1 \end{bmatrix} = y_{\text{nx}} \begin{bmatrix} 1 & L_{21} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/(f_1) & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$j = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \epsilon b \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad ck$$

令

$$\begin{cases} u_1 = L_1 + L_{21} - \frac{L_1 L_{21}}{f_1} \\ u_2 = L_3 + L_{22} - \frac{L_3 L_{22}}{f_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_1 = L_3 f_1 + L_{21} f_2 - L_3 L_{21} \\ u_2 = L_1 f_2 + L_{22} f_1 - L_1 L_{22} \end{cases} \quad (2)$$

我们可求得传播矩阵的 $ABCD$ 参数为

$$\begin{cases} A = 1 - u_1/(f_1 f_2) - u_2 x_1 \\ B = u_1 [1 - (L_3/f_2)] + u_2 [1 - (L_1/f_1)] - (u_1 u_2)/F \\ C = (1/F) - x_1 - x_2 + 1/(f_1 f_2) [L_{21} + L_{22} - (L_{21} L_{22}/F)] \\ D = 1 - [u_2/(f_1 f_2)] - u_1 x_2 \end{cases} \quad (3)$$

对于平-平谐振腔, 我们知道其 G 参数为 $G_1 = A, G_2 = D$, 由此可推导出振荡光束在晶体中的束腰半径为 $W_0^2 = \lambda(u_1^2 G_1 + u_2^2 G_2 + 2u_1 u_2 G_1 G_2)/\{\pi B [G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)]^{1/2}\}$ (4)

在此, 引入^[6]

$$\delta = \frac{1}{W_0} \frac{dW_0}{dF} \Big|_{F \rightarrow \infty} \quad (5)$$

作为自锁模的判定因子, 不难理解, 能够实现自锁模的腔型参数应满足 $\delta > 0$, 并且 δ 的绝对值越大, 表明谐振腔对腔内噪声起伏越敏感, 该腔型结构就越容易产生自启动锁模。将光斑半径表达式代入上式可得最大锁模判定因子为

$$\delta_{\text{max}} = 1/\{4[G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)]^{1/2}\} \quad (6)$$

以上述公式为基础, 对腔结构参数进行分析计算, 以便找出腔型结构与自锁模、自启动特性的关系, 根据实验经验, 取 $f = 50\text{mm}$, $L_1 = 600\text{mm}$, $L_3 = 700\text{mm}$, $L_{21} = 55\text{mm}$, $L_{22} = 50\text{mm}$, 取混合焦距 $F = 20\text{cm}$, 通过循环改变其中一值, 进行大量计算, 从中找出各腔镜的位置与锁模效果的关系。

图 2a 为自锁模判定因子绝对值 $|\delta|$ 随 L_{21} 变化曲线, 固定其它参数, 令 L_{21} 从 50mm 变化到 58mm , 从中可看出随 L_{21} 的变化存在两个稳定区 A 和 B, 稳区的各边界分别为 50.01mm , 53.22mm , 54.55mm 和 57.77mm , 在稳区边缘, δ 值很大, 并且随 L_{21} 的斜率也很大, 说明在稳区边缘存在对腔型变化的敏感区, 由此我们得出结论(1): 腔内存在两个稳区, 在稳区边缘有四

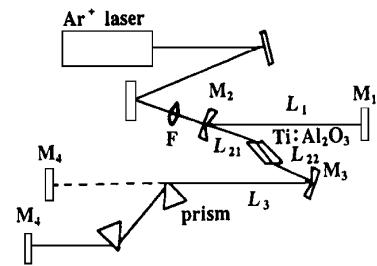


Fig. 1 Schematic diagrams of the self-starting, self-mode locking Ti: sapphire laser

个对腔型扰动的敏感区域，它们是有希望产生自锁模及自启动的区域。进一步对四个可能的自锁模区进行分析，讨论它们对腔内功率（腔内噪声功率扰动）的敏感程度。图 3a 为四个边界点处的 $|\delta|$ 值随腔内功率（用焦距 F 表示）的变化曲线，图 3b 为束腰随 F 的变化曲线。

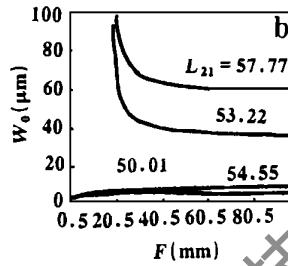
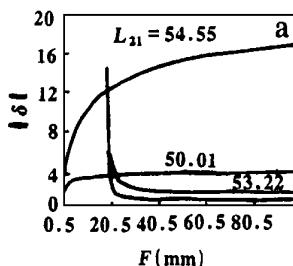


Fig. 3 The curves a and b respectively show the function relationship of factor δ with focuslength F of the gain medium and relationship of laser waist W_0 in Ti: sapphire rod for four boundary position of the stable region

此我们可以得到结论(2)：在腔内的两个稳区的四个边界点中，只在左边界点附近才能出现自锁模及自启动。从图中还可看出，在 A 区的左边界点附近，自锁模范围极窄，只有几十微米，在 B 区的左边界点附近，自锁模范围可达几百微米以上。下面我们

以具有较宽自锁模范围的 B 区为例进一步讨论，取 B 区的几个代表性的点来考虑，取 $L_{21}=54.55\text{ mm}$, 54.60 mm 和 56.1 mm ，它们分别对应 B 区中的极陡、较陡和平缓三个区域。图 3a, b 分别为相应的 $|\delta|$ 和 W_0 随 F 的变化曲线，从中可看出 $L_{21}=54.55\text{ mm}$ 处 $|\delta|$ 很大，对腔内功率扰动最敏感。这个点附近最可能出现自启动锁模，在较陡的 $L_{21}=54.60\text{ mm}$ 附近， $|\delta|$ 值有所下降，但仍对功率扰动较敏感。这是可以出现非自启动锁模的区域，从自启动锁模区到非自启动锁模区仅相差约 $50\mu\text{m}$ ，而在 $L_{21}=56.1\text{ mm}$ 处，由于 W_0 随 F 变化为负斜率， $\delta < 0$ ，不能出现自锁模，为非锁模区。同样稳区 A 中也存在三个类似的区域。由此我们得到结论(3)：在腔内稳区中存在三个区域，分别对应自启动锁模区，非自启动锁模区和非锁模区，并且自启动锁模区的范围极窄。

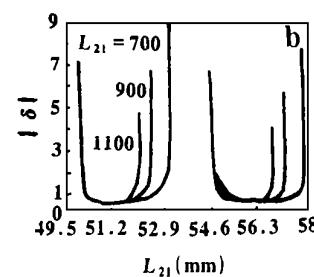
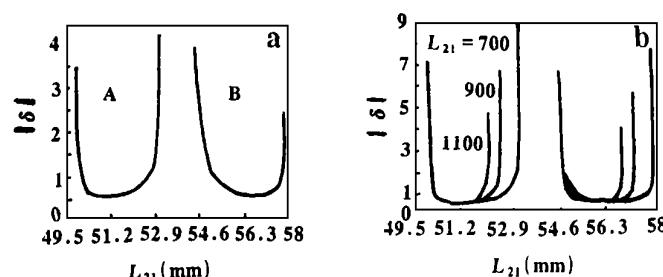


Fig. 2 a—Mode-locking factor δ is the function of distance L_{21} from mirror M_2 to Ti: sapphire rod. Here are two stable areas A and B b—Parameter L_3 has influence on mode-locking factor δ , and the stable areas vary with parameter L_3

从中可看出对于稳区 A, B 的右边界点 $L_{21} = 53.22\text{ mm}$, 57.77 mm 两点，由于 W_0 随 F 的变化为负斜率，所以 $\delta < 0$ ，不满足自锁模条件，不能产生自锁模。而左边界点 $L_{21} = 50.01\text{ mm}$, 54.55 mm 处 W_0 随 F 的变化为正斜率， $\delta > 0$ ，满足自锁模条件，能产生自锁模，因

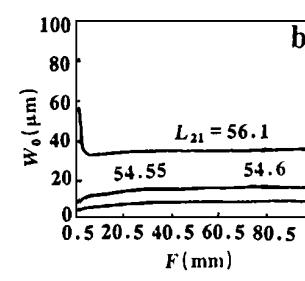
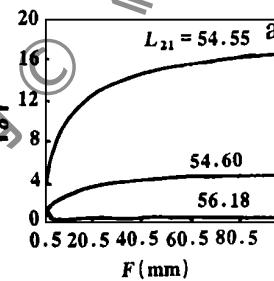


Fig. 4 The curves a and b respectively show the function relationship of factor δ and laser waist W_0 in Ti: sapphire rod with focuslength F of the gain medium for different positions of a stable region

由于通过调整棱镜的距离来补偿腔内色散, 所以 L_3 要发生变化, 下面讨论自锁模判定因子 $|\delta|$ 随 L_3 的变化情况, 如图 2b, 分别取 $L_3 = 700\text{mm}, 900\text{mm}, 1100\text{mm}$, 从中可看出, 在四个边界点中只有能产生自锁模的两个左边界几乎不随 L_3 变化而改变, 即 L_3 的变化不影响锁模腔结构, 同时 L_3 越短, $|\delta|$ 值越大, 与 $|\delta|$ 斜率大对应的锁模调节范围也较宽, 所以我们得到结论(4): 在固定其它腔参数的情况下, 谐振腔的棱镜臂的长度对自启动锁模区的位置几乎没有影响, 并且棱镜臂越短, 自启动及自锁模区域越宽。

三、实 验

我们在实验中使用过两根长短不同的钛宝石棒: 棒 1 是美国 Union Carbide 公司生长 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的高浓度钛宝石棒, 通光方向长 4mm。棒 2 是上海光机所生长的 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的长棒, 通光方向长 20mm。

为了便于加入色散补偿棱镜, 将 L_3 长度取为 110cm, 考虑到象散补偿腔的要求, 凹面镜 M_2, M_3 的折迭角调整为 15° , 聚焦透镜的焦距仍为 10cm, 两凹面镜的曲率半径仍为 10cm, M_1, M_2, M_3 上镀上中心波长为 790nm 的全反膜, M_4 为输出镜, 其透过率为 $T = 4\%$, 将 M_4 放在一根长 40cm 的导轨上, 通过快速移动 M_4 来启动锁模。

对于短棒 1, 在实验中发现: (1) 连续振荡最佳位置并不是自锁模的最佳位置。我们在钛宝石激光连续输出为最佳的 1W 时得不到锁模, 调出锁模后, 输出功率只有 560mW, 一旦锁模停止, 连续输出功率只有 650mW, 只有最佳连续输出的三分之二。(2) M_2, M_3 的位置与距离是能否自启动锁模的主要因素, 当 M_2, M_3 处在最佳位置时, M_4 几乎在导轨上的各个位置都能实现自锁模。(3) 某一调整位置, 只对应于某一定泵浦功率才能自锁模。如锁模状态下加大或减小泵浦功率会使锁模消失, 要相应调整镜片才能再次出现锁模。(4) 锁模的工作范围与 M_2 (M_3) 到晶体的距离密切相关, 尽管在 45~53mm 范围内都能实现钛宝石激光的连续振荡, 但是能实现自锁模的范围却非常小, 仅当 L_{21} 或 L_{22} 分别为 50mm 和 52mm 左右时, 才能实现自锁模, L_{21} 或 L_{22} 允许调节范围只有约 0.3mm。这也与我们在计算中得到的: “自锁模和自启动出现在稳区的边缘敏感位置, 并且调节范围极小”相吻合。(5) 在各种锁模启动方法中, 快速推动平面镜方法对启动锁模最有效, 钛宝石棒越短自启动越困难。(6) 用熔石英棱镜对来补偿腔内色散, 棱镜对顶角距离调节为 53cm, 在 5.6W 的氩离子全线泵浦功率下, 锁模输出功率大于 500mW, 脉冲宽度为 26fs, 中心波长为 774nm, 光谱宽度为 28nm, $\Delta\tau \times \Delta t = 0.37$, 接近转换极限, 说明熔石英作棱镜对,

损耗小, 色散补偿效果较好。

对于长棒 2, 在实验中发现: 当 M_2, M_3 被调到其一最佳位置, 棱镜对及 M_1, M_4 也处在适当位置, 并且腔内功率达到一定值时, 锁模可以自启动, 人为地遮挡一下腔内光路再松开, 锁模能够自动恢复, 其恢复时间与

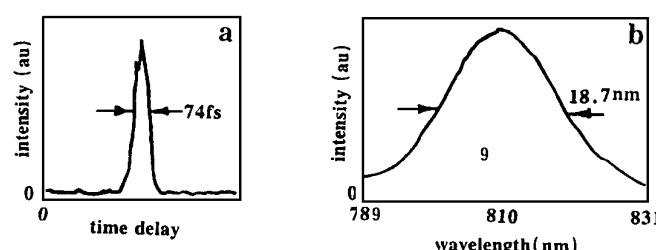


Fig. 5 a—Autocorrelation trace and b—spectrum of Ti: sapphire laser pulse. The pulse width is 74fs, assuming Sech² shape, the spectral bandwidth is 18.7nm and central wavelength is 810nm

M_2, M_3 到晶体的距离密切相关, 当该距离最佳时恢复时间约 1s, 稍偏离该距离时, 相应恢复时间延长至数分钟, 进一步偏离时, 不能自启动, 必须靠敲击镜片或移动 M_4 等外界扰动才能启动, 偏离太多时, 则不能锁模, 反复实验结果表明, 在 7W 的泵浦功率下, 从最佳自启动锁模到不能自启动, M_2 (M_3) 的调节范围只有约 40 μm 。从自启动锁模到不能锁模, M_2 (M_3) 的调节范围大约为 0.5mm。长棒的自启动时的自相关脉冲及光谱曲线如图 5, 自启动锁模脉冲宽度为 74fs, 中心波长为 810nm, 光谱宽度为 18.7nm, $\Delta\tau \times \Delta t = 0.632$ 。通过比较发现, 短棒产生的脉冲宽度更窄, 但长棒比短棒更容易实现自启动。

四、结 论

自锁模 Ti:Al₂O₃ 激光器腔内存在两个稳区, 有四个对腔型扰动敏感的边界点, 但其中只有稳区的左边界点附近才能同时满足既对腔型敏感又对腔内功率扰动敏感的条件, 即腔内只有两个点附近可出现自锁模及自启动。在每个稳区中, 都存在锁模判定因子随腔长及腔内功率变化斜率不同的三个子区, 分别对应自启动锁模区、非自启动锁模区及非锁模区, 并且自启动锁模区的范围极窄, 只有约几十微米。同时发现腔的棱镜臂的长度对自启动锁模区的位置几乎没有影响, 棱镜臂越短自锁模区及自启动锁模区调节范围越宽。在实验中得到了 74fs 的自启动锁模脉冲, 理论计算的自启动及自锁模区的宽度与实验结果较好地吻合。

参 考 文 献

- 1 Spence D E, Kean P N, Sibbett W. Opt Lett, 1991; 16(1): 42
- 2 Liu Y M, Sun W, Prucnal P R et al. Opt Lett, 1992; 17(17): 1219
- 3 Chen S, Wang J. Opt Lett, 1991; 16(21): 1689
- 4 Radzewicz C, Pearson G W, Kasinski J S. Opt Commun, 1993; 102(5, 6): 464
- 5 Lai M. Opt Lett, 1994; 19(10): 722
- 6 Magni V, Cerullo G, Silvestri S De. Opt Commun, 1993; 101(5, 6): 365

* * *

作者简介: 杨杰, 男, 1964 年 2 月出生。工学博士, 讲师。现从事固体激光及超短脉冲激光技术的研究。

收稿日期: 1996-03-18 收到修改稿日期: 1996-09-18

•简

讯•

V 形槽高效侧泵浦的双层放大器

通过一种新型的 V 形槽将光耦合到多模光纤使光纤放大器实现侧面泵浦。不同于经铜瓣式二极管激光器端面泵浦的方式, 用廉价二极管激光器列阵可以在光纤中沿多点实现侧泵浦, 保留自由的端面可以直接连接其它光纤。一个 90° 的 V 形槽嵌入光纤侧面横向光学轴对内层作用而不干扰纤心。激光输出相对于槽穿过光纤传输。经过从 V 形槽的角形壁的全内反射, 也可以耦合到光纤的多模内层, 综合效率高达 96%。

华盛顿美国海军实验室的 Lew Goldberg 在去年 2 月末在圣何塞的 OFC 会议上讲解这项技术, CA(论文号 WA2)。最近, 100 μm 宽二极管激光阵列采用双层 Er/Yb 光纤放大器泵浦。20 μm 深的 V 形槽位于 8.7m 长光纤的侧面, 760mW 准直, 会聚的二极管阵列输出可耦合到层内, 效率 70%。

於祖兰, 曹三松 供稿