

# 自调 $Q$ -自锁模掺钛蓝宝石激光器\*

邢岐荣 张伟力 张新平 王清月

(天津大学精仪系现代光学仪器研究所超快激光研究室, 天津 300072)

摘要 报道了自调  $Q$ -自锁模掺钛蓝宝石激光器的实验研究结果。

关键词 自调  $Q$ , 自锁模, 掺钛蓝宝石激光器

## 1 引言

近年来,自锁模掺钛蓝宝石激光器<sup>[1~3]</sup>的出现与发展使固体飞秒激光器面目一新。多种固体激光器相继实现了自锁模,如 Nd:YAG, Nd:YLF, Cr:LiSaF, Cr:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>。固体激光器的自锁模(又称克尔透镜锁模 KLM)是腔内光束的自聚焦效应与腔内孔阑结合等效在腔内插入一块可饱和吸收体所引起的被动锁模。这种自锁模固体激光器通常不能自启动。固体激光介质通常都有较长的上能级寿命,因而其被动锁模激光器常常表现出锁模脉冲序列的有序起伏甚至出现自调  $Q$  现象,即锁模脉冲序列包络表现出周期调制,其调制深度可达 100%。70 年代 H. A. Haus 从理论上详细讨论过被动锁模激光器的自调  $Q$  问题<sup>[4]</sup>。实验上,人们分别观察到耦合腔锁模 Nd:glass 激光器<sup>[5]</sup>,被动锁模 Cr:LiSaF 激光器的自调  $Q$  运转<sup>[6]</sup>。关于掺钛蓝宝石激光器的自调  $Q$ -自锁模现象还未见报道。根据 H. A. Haus 的理论,F. Krausz 认为,由于掺钛蓝宝石激光介质的上能级寿命仅 3.2  $\mu$ s,因而不满足自调  $Q$ -自锁模条件<sup>[5]</sup>。T. Tsang 曾观察到腔内含有可饱和吸收体的自锁模掺钛蓝宝石激光器输出的锁模脉冲序列包络具有周期调制,其调制深度为 100%<sup>[7]</sup>。但他不认为这是自调  $Q$  现象,而把这种脉冲序列包络的 100% 的周期调制看作是高阶孤子运转的判据。我们在实验中观察到掺钛蓝宝石激光器的自调  $Q$ -自锁模现象。我们使用的激光器即通常的自锁模掺钛蓝宝石激光器,腔内不含有专门插入的被动元件,如图 1 所示。

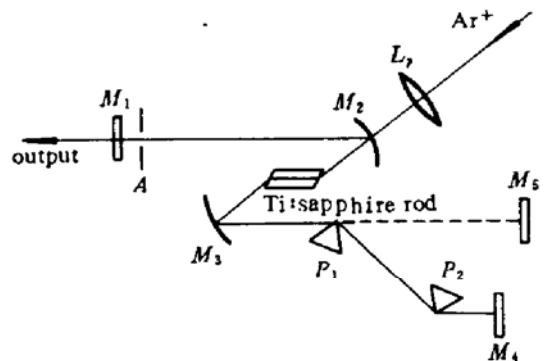


Fig. 1 Schematic of the cavity configuration

\* 得到国家攀登计划资助和国家教委“光电子信息工程开放实验室”的部分资助。部分工作在香港科技大学完成。

## 2 实验装置

如图 1 所示,我们采用标准的象散补偿 Z 字型光学谐振腔构成自锁模掺钛蓝宝石激光器。镀有抗反射膜的焦距为 12.7 cm 的透镜  $L$ , 将全线  $\text{Ar}^+$  激光束聚焦在长 5 mm 的掺钛蓝宝石晶体上。掺钛蓝宝石晶体切成布氏角,  $c$  轴平行于激光束电场振动方向, 晶体对泵浦光的单程吸收为 76%。熔石英棱镜对  $P_1$  和  $P_2$  用来补偿腔内色散和脉冲啁啾, 两棱镜顶间距为 56 cm。在中心波长 800 nm 处, 输出镜  $M_1$  的透射率为 10%。球面反射镜  $M_2, M_3$  为双色镜, 曲率半径为 10 cm, 其凹面镀膜, 对 750~850 nm 的光为高反射率, 对  $\text{Ar}^+$  激光为高透射率, 其平面镀有对  $\text{Ar}^+$  激光的抗反射膜。  $M_4$  为全反射端镜, 在 750~850 nm 的波长范围内反射率大于 99.9%。我们采用无背景实时相关器测量锁模脉宽, 用快速光电二极管和高频示波器监视激光器输出的锁模脉冲序列。

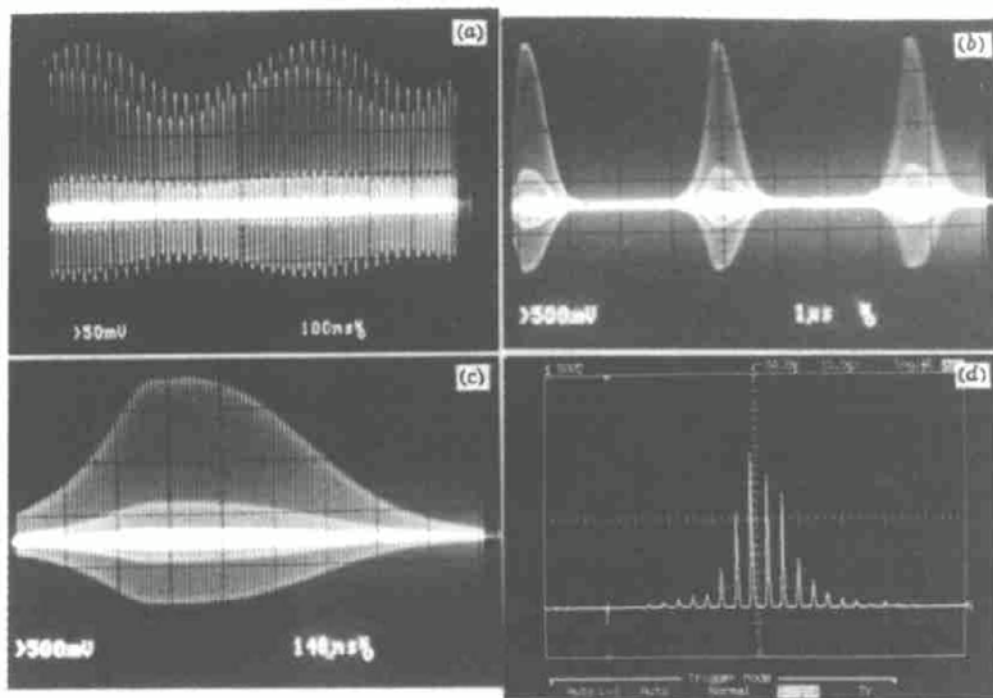


Fig. 2 Self- $Q$  switched and self-mode-locked output from a Ti:sapphire laser

(a) spiking self-mode-locked pulse train; (b) self-sustained self- $Q$  switched envelope train;

(c) self- $Q$  switched self-mode-locked pulse train; (d) the corresponding intensity autocorrelation trace(300 fs/div.)

## 3 实验结果

一般情况下,通过适当调整激光器,我们的装置可实现自锁模运转,锁模脉冲宽度小于 50 fs。脉冲序列频率为~80 MHz,平均输出功率 400 mW,这时的泵浦功率 5.7 W。此为稳定的自锁模运转状态。如果从这种状态开始,移动棱镜  $P_1$ ,以增加光腔内玻璃的长波,激光器输出的脉冲宽度变窄。输出脉宽在 30 fs 左右,锁模脉冲序列的包迹开始出现有规的起伏,如图 2(a)。这种起伏随玻璃的增加而加深。当输出脉宽变为最窄时(20 fs 左右),激光器突然进入一种稳定的自调  $Q$ -自锁模状态[图 2(b),(c)所示]。图 2(b)为自调  $Q$  序列。自调  $Q$  包络的宽度为~1  $\mu\text{s}$ ,周期为 1~6  $\mu\text{s}$  可调。调  $Q$  最大锁模脉冲幅度比稳定的自锁模脉冲幅度大 10 倍。当激光器突然进入自调  $Q$ -自锁模状态后,其锁模脉冲宽度也由最窄的锁模脉冲宽度突然变为 300 fs 左右,如图 2(d)所示。其中被调制的相关曲线,是低频实时相关测量结果。实验中我们发现,自调

Q-自锁模状态对移动棱镜非常敏感且很临界,维持这种状态所对应的棱镜向前移动的范围仅有  $50\ \mu\text{m}$  左右。而对移动  $M_3$  不敏感。图 3 给出自调 Q 周期与移动  $M_3$  的关系曲线。对应于自调 Q,  $M_3$  的移动距离为  $300\ \mu\text{m}$ 。

H. A. Haus 从理论上研究了被动锁模激光器参数的取值范围。他指出,较小的  $T_c/T_L$ ,或者说对于激光腔弛豫时间  $T_c$ (和光腔损耗有关)激光介质具有较长的上能级寿命  $T_L$ ,较易产生自调 Q 运转。在自锁模掺钛蓝宝石激光器中,由于自聚焦效应与腔内光阑相结合,使腔内损耗与腔内功率相关。在固体自锁模激光器中,当腔内强高斯光束通过增益介质时,介质的克尔效应表现出对光束的自聚焦作用,因此,增益介质可等效一个透镜(克尔透镜)。时域中呈钟形的光脉冲前后沿对应一个较长克尔透镜焦距,中部对应较短焦距。这种克尔透镜与光学谐振腔中其它光学元件共同规定着

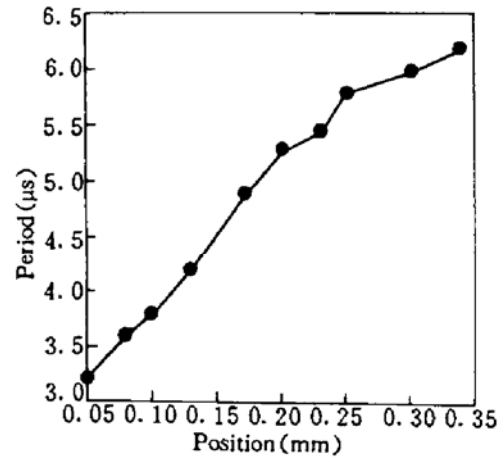


Fig. 3 Self-Q switched period versus the distance of  $M_3$  from the closer face of the Ti : sapphire laser rod in cavity

激光腔内的光束特征,因而使输出镜面上的光斑大小与光强有关,较大的光斑对应较弱的光强。若在输出镜处放一个可调光阑(硬光阑),自聚焦作用与硬光阑的结合等效一个插入腔内的快可饱和吸收体,对光脉冲起着整形和压缩作用。在增益介质中,泵浦光束与腔内激光束的重迭情况直接影响激光的增益。自聚焦效应使增益介质中的光束半径与光强有关,因此,增益被光强调制,我们称之为自增益调制。对于我们实验中采用的 Z 字形光学谐振腔,当腔长取定时,最关键的参数是两折迭镜  $M_2, M_3$  之间的距离<sup>[9]</sup>。它的取值可决定光学谐振腔是稳定腔(低损耗)还是非稳腔(高损耗)或是临界腔。反射镜  $M_3$  与其最近的钛宝石端面之间的距离则规定着腔内激光束的聚焦条件,同时也决定了增益介质中激光束的大小,进而影响增益。由于上述机制,我们认为,相当小的  $T_c/T_L$  可以通过适当控制激光器的运转参数和光学谐振腔参数来实现。所以,尽管掺钛蓝宝石仅有  $3.2\ \mu\text{s}$  的上能级寿命,仍可以使其满足产生自调 Q 的条件而实现自调 Q-自锁模运转。移动球面镜  $M_3$ ,改变了光腔的参数,很可能使光学谐振腔的损耗增加,在泵浦不变的情况下,增加了建立粒子数反转的时间,因此,改变了自调 Q 的周期。另外,我们认为,移动棱镜或  $M_3$ ,可能改变了光腔的横模状态,较高阶横模的存在也有利于自调 Q 发生。

## 4 结 论

我们报导了掺钛蓝宝石激光器的自维持运转的自调 Q-自锁模现象,并发现,自调 Q 的周期和腔内球面镜  $M_3$  相对于 Ti : sapphire 激光晶体的位置有关。使我们惊奇的是,通常情况下自锁模掺钛蓝宝石激光器的锁模运转不能自起动。但在自调 Q-自锁模运转状态,虽然,锁模脉冲包络的调制深度达到 100%,但仍然能自维持自锁模运转,使激光器保持稳定的自调 Q-自锁模运转状态。

## 参 考 文 献

- 1 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**:42
- 2 邢岐荣, 李 鹏, 张伟力 等. 62 fs 掺钛蓝宝石自锁模激光器. *中国激光*, 1993, **A20**:584
- 3 张影华, 刘玉璞, 赵永华 等. 连续钛蓝宝石激光器自锁模实验研究. *中国激光*, 1994, **A21**:781
- 4 H. A. Haus. Parameter ranges for CW passive mode-locking. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**:169
- 5 F. Krausz, M. E. Fermann, Thomas Brabec *et al.*. Femtosecond solid-state laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1992, **QE-28**:2097
- 6 N. H. Rizvi, P. M. W. French, J. R. Taylor. Generation of 33-fs pulses from a passively mode-locked Cr<sup>3+</sup>:LiSrAlF<sub>6</sub> laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**:1005
- 7 T. Tsang. Observation of high-order solitons from a mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**:293
- 8 G. Cerullo, S. De Silvestri, V. Magni *et al.*. Resonators for Kerr-lens mode-locked femtosecond Ti:sapphire lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**:807

Self-*Q* Switched Self-mode-locked Ti:sapphire Laser

Xing Qirong Zhang Weili Zhang Xinping Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, Modern Optical Instruments Institute, Department of Precision Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** To our Knowledge, it is the first report of the observation of self-*Q* switched Self-mode-locking directly generated in a self-mode-locked Ti:sapphire laser. The self-*Q* switched period was observed with a nearly linear dependence on the distance between one spherical mirror  $M_3$  and the closer face of the laser rod.

**Key words** self *Q* -switching, self-mode-locking, Ti:sapphire laser