

# 用腔内半导体可饱和吸收镜钛宝石激光器中 自锁模状态的实验研究\*

柴 路 王清月 张志刚 赵江山 王 勇 张伟力 邢歧荣

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 国家教育部光子信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

(2000 年 2 月 14 日收到)

用可饱和吸收体镜 (SESAM) 的掺钛蓝宝石激光器能够稳定运转在三种不同的锁模状态, 即可饱和吸收体被动锁模、孤子锁模加被动锁模和 KLM 锁模. 分析了三种自锁模的机理和 SESAM 的作用. 对 SESAM 实现 KLM 锁模的自启动机制进行了实验观察和讨论. 从该激光器的 KLM 锁模状态, 获得了小于 18 飞秒的锁模脉冲序列.

关键词: 半导体可饱和吸收镜, 自锁模, 钛宝石激光器

PACC: 4265R, 4260F

## 1 引 言

自从 1991 年, 克尔透镜锁模 (Kerr-lens mode-locking, KLM) 的掺钛蓝宝石激光器问世以来<sup>[1]</sup>, 飞秒激光器得到了飞速发展和广泛应用. 由于钛宝石晶体具有较低的非线性折射率系数, 带来了 KLM 锁模自启动的困难. 虽然在极端临界的腔条件下, 偶然能够实现 KLM 锁模的自启动<sup>[2]</sup>, 但是这种运转状态往往是非稳定的, 其运转参数也是极其苛刻的. 因此, 在通常情况下 KLM 锁模的钛宝石激光器主要是靠外界的微扰 (机械或电磁) 来启动锁模. 这大大限制了这种激光器向小型化、实用化发展. 所以, KLM 锁模飞秒钛宝石激光器的自启动问题一直是超快激光领域研究的前沿课题. 1992 年, 瑞士的 Keller 等人将反共振的法布里-珀罗标准具可饱和吸收体 (antiresonant Fabry-Perot saturable absorber, A-FPSA) 用于 Nd:YLF 和 Nd:YAG 激光器的腔内, 实现了该类激光器的锁模运转<sup>[3]</sup>. 1995 年, 他们将此项技术用于解决 KLM 锁模的自启动问题<sup>[4]</sup>. 最近, 国际上出现一种将半导体可饱和吸收体直接附于金属膜反射镜之上, 构成了新型半导体可饱和吸收体镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)<sup>[5,6]</sup>. 然而, 目前 SESAM 的引入主要是为了解决 KLM 锁模自启动困难的问题, 对于该器件

的自启动 KLM 锁模动力学和其对自锁模状态所起作用的研究报道仍然不多. 本文通过对采用腔内新型宽带 SESAM 掺钛蓝宝石激光器的实验研究, 发现该激光器在不同的腔参数下, 可以分别稳定地运转在三种不同的锁模状态, 即纯被动锁模、孤子锁模和克尔透镜锁模, 并对 SESAM 在各种自锁模状态中的作用进行了分析和讨论. 这对于深入了解该类激光器的工作原理和不断改进激光器结构以实现其小型化和实用化是十分有意义的.

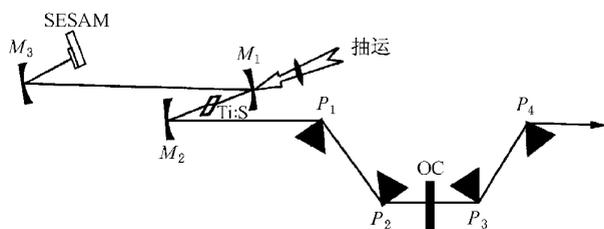


图 1 用 SESAM 的掺钛蓝宝石激光器实验装置

## 2 实验方法

实验采用的五镜腔结构如图 1 所示. 它是由标准的四镜 Z 形腔改变而来, 只是将非棱镜端的平面镜由一球面反射镜  $M_3$  和 SESAM 平面镜组合所代替, 其作用是增强入射在 SESAM 上的功率密度, 以使可饱和吸收体饱和; 并可通过改变球面镜与

\*教育部高等学校骨干教师资助计划、国家重点基础研究专项经费 (批准号: G1999075200)、国家“九五”攀登计划、教育部重点科学基金和天津市自然科学基金 (批准号: 020-413188) 资助的课题.

SESAM 的距离,调节可饱和吸收体上的光功率密度,从而调节其饱和深度,抽运源为一台  $\text{Ar}^+$  离子激光器,抽运功率 5W,在凹面镜  $M_1$  和  $M_2$  之间放置长度为 7mm 的钛宝石棒.一对熔石英棱镜( $P_1, P_2$ )用于腔内的色散补偿.OC 为 6% 的耦合输出镜.腔外的另一对棱镜( $P_3, P_4$ )用于补偿输出镜玻璃对脉冲引入的正啁啾和腔内棱镜对带来的空间啁啾.当棱镜对间隔为 60cm 时,整个腔长为 3.9m,脉冲重复频率为 77MHz. SESAM 采用由金属银反射衬底的 InGaAs 和 GaAs 单量子阱构成可饱和吸收体镜,其结构见图 2. 应该强调指出的是,采用银作为反射衬底是由于它能够支持的光谱宽度远远大于由半导体材料构成的布拉格反射衬底(A-FPSA)所支持的光谱宽度,更利于短脉冲的产生.

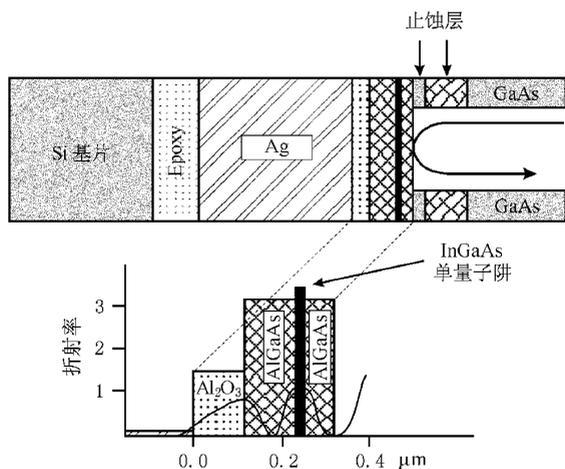


图 2 宽带半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的结构

为了与传统的 KLM 锁模的钛宝石激光器进行比较,首先用一平面反射镜代替半导体可饱和吸收镜.在完全相同的腔参数条件下实现 KLM 锁模运转,并确定了 KLM 锁模的范围.此时该平面反射镜是在  $M_3$  的焦点上.然后,用 SESAM 换下该平面反射镜,稍做调整后,即可实现采用 SESAM 的自启动 KLM 锁模运转.此时 SESAM 的位置靠近  $M_3$  的焦点内侧.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 三种锁模状态

实验发现:在用 SESAM 的掺钛蓝宝石激光器中,能够稳定地存在三种锁模状态:可饱和吸收体被

动锁模、孤子锁模加被动锁模和 KLM 锁模.它们的脉冲宽度分别对应皮秒、百飞秒和几十飞秒量级,图 3 给出了三种锁模状态所分别对应的光谱特征:由

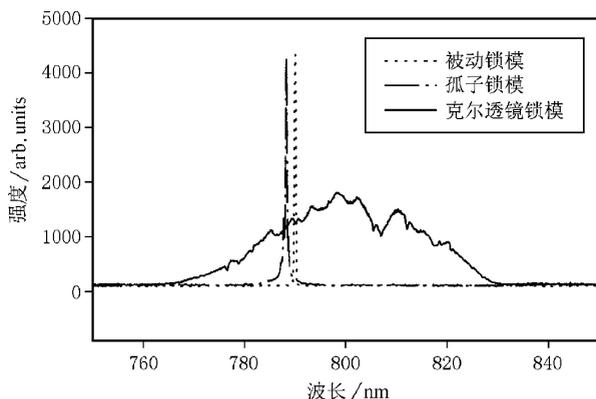


图 3 用 SESAM 的掺钛蓝宝石激光器中三种自锁模状态的光谱

点表示的谱是皮秒量级的被动锁模状态,其呈现为极窄的线状;由点划线表示的孤子锁模加被动锁模的谱特征是谱的底部出现几纳米至十几纳米的“喇叭状”加宽;而 KLM 锁模则对应“钟形”的宽谱.从光谱特征清楚的看出,只有 KLM 锁模的光谱能够支持最短的光脉冲,这与实验观察结果一致.图 4 给出了从该激光器中的 KLM 锁模中,获得的最短光脉冲的干涉自相关曲线和相应的光谱.脉冲宽度约为 17.5fs (假设脉冲形状是  $\text{sech}^2$  函数),谱宽为 36nm,时间-带宽乘积为 0.34,接近傅里叶变换极限.

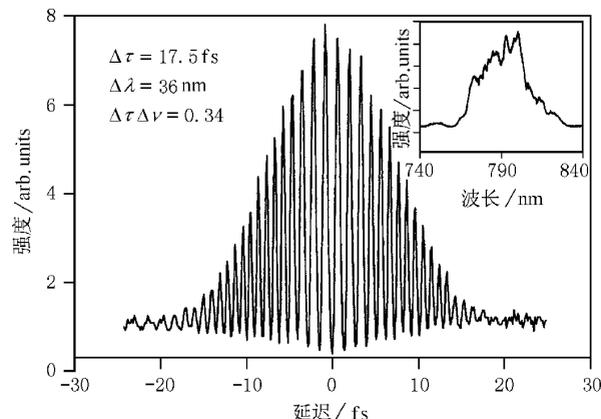


图 4 从用 SESAM 的钛宝石激光器中 KLM 锁模获得 17.5fs 光脉冲的干涉自相关曲线(插图为相应的光谱图)

通过调节凹面镜  $M_1$  与增益介质间距所确定的锁模的范围来看<sup>[7]</sup>,三种自锁模状态中,可饱和吸收体被动锁模的范围遍布整个谐振腔稳区.除非抽

运功率降到阈值以下,否则很难出现独立的连续光运转.而后两种锁模状态则只能在稳区特定的范围内存在.这是由于三种自锁模的不同机理所决定的.

### 3.2 锁模机理分析

半导体可饱和吸收体的脉冲响应时间分为两段区域<sup>[3]</sup>.一个是由能带内部载流子之间散射和热弛化过程引起的快响应区,响应时间大约 100fs 量级;另一个为能带之间载流子的俘获和复合过程所造成的慢响应区,响应时间为皮秒量级.半导体可饱和吸收体的光学非线性是基于光致激发载流子对上能带的填充,从而导致对吸收的漂白.在用 SESAM 的掺钛蓝宝石激光器中,SESAM 对三种自锁模状态所起的作用是完全不同的.

对于被动锁模状态:半导体可饱和吸收体的慢响应时间(皮秒量级)和相对较低的饱和阈值,使其相对激光噪声脉冲是一个快可饱和吸收体,净增益窗口为皮秒量级.另外,自脉冲在可饱和吸收体中碰撞(在 SESAM 中可饱和吸收体是紧靠反射层的)形成的瞬时光栅对脉冲本身也有整形作用.因此激光器很容易从激光噪声中提取种子脉冲,并形成稳定的皮秒锁模脉冲序列.由于这种快可饱和吸收体的作用与腔参数的关系不大,因此,调整腔参数对被动锁模状态影响不大,被动锁模遍及整个稳区.

对于孤子锁模状态:在自相位调制(self-phase modulation, SPM)引起的非线性效应和群速度色散(group velocity dispersion, GVD)引起的线性效应之间必须达到一种平衡<sup>[8]</sup>才能够实现.在用 SESAM 的掺钛蓝宝石激光器中,增益介质中产生的 SPM 效应使脉冲中部带有近乎线性的正啁啾,并伴有频谱展宽,而棱镜对能够提供一种可调谐的负 GVD 使脉冲产生线性的负啁啾.如果不考虑腔内的非线性啁啾和高阶色散的影响,当二者达到完全相互补偿时,脉冲将被压缩<sup>[9]</sup>.在实际锁模激光运转中,SPM 效应引入的非线性啁啾主要集中在脉冲的两翼;另外,由于非饱和损耗(如腔内散射损耗等)而形成的连续性背景与主脉冲叠加在一起.这两种脉冲成分,用棱镜对不能完全补偿.这些带有啁啾的脉冲成分,经过多次往返后,在时间上将主脉冲分离开,形成子脉冲的种子.一旦主脉冲达到增益饱和,这些成分仍不断被放大,超过阈值后形成多脉冲振荡<sup>[10]</sup>,使锁模失稳.在这种状态下,半导体可饱和吸收体相对孤子锁模而言是慢可饱和吸收体,脉冲的前沿不断

被削去.而在时域中不断滞后于主脉冲的啁啾成分,则当其与主脉冲的时间间隔大于可饱和吸收体的恢复时间后,将被可饱和吸收体不断吸收,无法形成子脉冲.所以,半导体可饱和吸收体主要作用是防止子脉冲的产生和稳定孤子锁模.从孤子锁模的机理来看,它对腔镜  $M_1$ ,  $M_2$  和激光晶体的位置以及对棱镜对的调节都比较敏感.因此,孤子锁模不能分布在全部稳区,而只能在某些特定的腔参数下才能实现.

对于 KLM 锁模:其机理是由于脉冲与激光晶体相互作用形成的自聚焦效应,并结合抽运光束形成的“软光阑”构成等价的快可饱和吸收体,实现对脉冲的自振幅调制.因为只有谐振腔稳区边界附近的振幅调制度最大,对应“快可饱和吸收体”有最高的鉴别率,所以 KLM 锁模仅能在稳区边界附近运转<sup>[11]</sup>.因此, KLM 锁模对腔参数的调节有极高的敏感性.相对其他锁模状态而言, KLM 锁模范围是最小的.但是,它是迄今为止直接从激光器本身获得最窄光脉冲的唯一方法.在这里半导体可饱和吸收体的作用主要是启动 KLM 锁模.

对于 SESAM 启动 KLM 锁模的机理,我们利用在腔内插入一斩波器的方法来观察这一动力学过程.实验观察表明:被动锁模的皮秒脉冲提供了 KLM 锁模所需要的振幅扰动,见图 5.当腔内的光

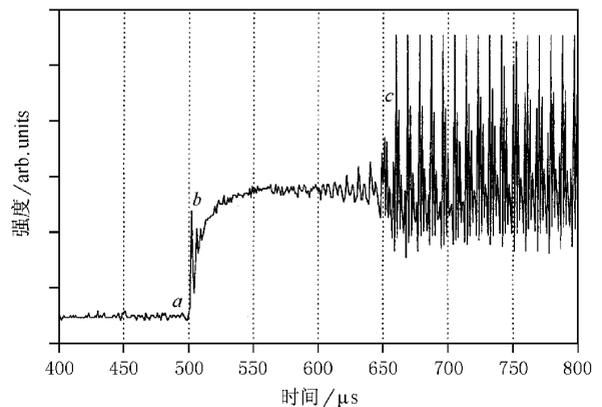


图 5 SESAM 自启动 KLM 锁模的动力学过程

阑打开后,被动锁模几乎是在数微秒内恢复(从  $a$  到  $b$ ),这些皮秒脉冲平均在 150—200 $\mu$ s 的时间内(从  $b$  到  $c$ )不断得到放大和压缩,最终达到 KLM 锁模的启动阈值,从而实现了 KLM 锁模的自启动.从同步的二次谐波观测证实,图中  $c$  点以后为飞秒脉冲序列.图中飞秒锁模区域中出现的长周期振幅调制是由于所用 TDS-380 型数字存储示波器的采样间隔远远大于锁模脉冲序列的周期,而带来的显示

波形失真. 实际上飞秒锁模区域是等幅的亮带.

在本文实验研究中, 半导体可饱和吸收体的快脉冲响应时间区域的作用仍然是不清楚的, 有待于继续进行研究.

## 4 结 论

本文报道用可饱和吸收体镜( SESAM )的掺钛

蓝宝石激光器能够稳定运转在三种不同的锁模状态, 即可饱和吸收体被动锁模、孤子锁模加被动锁模和 KLM 锁模. 分析了三种自锁模的机理和 SESAM 的作用. 对 SESAM 实现 KLM 锁模的自启动机理进行了实验观察和讨论. 从该激光器的 KLM 锁模状态, 获得了小于 18fs 的锁模脉冲序列.

- 
- [ 1 ] D. E. Spence ,P. N. Kean ,W. Sibbett ,*Opt. Lett.* ,**16**( 1991 ) , 42.
- [ 2 ] G. Cerullo ,S. De Silvestri ,V. Magni ,*Opt. Lett.* ,**19**( 1994 ) , 1040.
- [ 3 ] U. Keller ,*Appl. Phys.* ,**B58**( 1994 ) ,347.
- [ 4 ] L. R. Brovelli ,I. D. Jung ,D. Kopf *et al.* ,*Electronics Lett.* ,**31** ( 1995 ) 287.
- [ 5 ] R. Flouck ,I. D. Jung ,G. Zhang *et al.* ,*Opt. Lett.* ,**21**( 1996 ) , 743.
- [ 6 ] Zhi-gang Zhang ,Kenji Torizuka ,Taro Itatani *et al.* ,*Opt. Lett.* ,**23**( 1998 ) ,1465.
- [ 7 ] Lu Chai ,Qi-rong Xing ,Wei-li Zhang ,Qing-yue Wang ,*Acta Physica Sinica* **48**( 1999 ) ,1818 [ in Chinese ] 柴 路、邢歧荣、张伟力、王清月 物理学报 **48**( 1999 ) ,1818 ] .
- [ 8 ] I. D. Jung ,F. X. Kratner ,L. R. Brovelli *et al.* ,*Opt. Lett.* ,**20** ( 1995 ) ,1892.
- [ 9 ] Lu Chai ,Qing-yue Wang ,Wei-li Zhang ,Qi-rong Xing ,*Chinese Journal of Lasers*( in Chinese )( to be published ] 柴 路、王清月、张伟力、邢歧荣 中国激光 ( 待发表 )].
- [ 10 ] Ching-yue Wang ,Wei-li Zhang ,K. M. Yoo ,*Opt. Commun.* , **137**( 1997 ) 89.
- [ 11 ] Ching-yue Wang ,Lu Chai ,Wei-li Zhang *et al.* ,*Appl. Opt.* ,**37** ( 1998 ) 522.

# EXPERIMENTAL STUDY ON THE SELF-MODE-LOCKING STATES IN A Ti SAPPHIRE LASER USING AN INTRACAVITY SEMICONDUCTOR SATURABLE ABSORBER MIRROR\*

CHAI LU WANG QING-YUE ZHANG ZHI-GANG ZHAO JIANG-SHAN

WANG YONG ZHANG WEI-LI XING QI-RONG

( *Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Tianjin University;*  
*Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Chinese Ministry of Education, Tianjin 300072, China* )

( Received 14 February 2000 )

## ABSTRACT

The self-mode-locking states in a Ti:sapphire laser using an intracavity semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) have been investigated experimentally. In this laser, three mode-locking states, i. e. the passive mode-locking with a saturable absorber, the soliton mode-locking and the Kerr-lens mode-locking have been demonstrated. As short as sub-18-fs pulses were produced from the Kerr-lens mode-locking in the laser. The mode-locking mechanism and the role of SESAM as well as the self-starting dynamics of SESAM have been investigated and discussed.

**Keywords** : SASEA, self-mode-locking, Ti:sapphire laser

**PACC** : 4265R, 4260F

---

\* Project supported by the Special Found Project for the Key Teachers in Universities and the Key Science Foundation from Chinese Ministry of Education, National Key Basic Research Special Foundation ( Grant No. G1999075200 ), the China National " Climbing " Plan, the Natural Science Foundation of Tianjin ( Grant No. 020 - 413188 ).