

半导体可饱和吸收镜启动克尔透镜 锁模机理的实验研究*

柴 路 王清月 赵江山 邢歧荣 张志刚

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

(2001 年 2 月 9 日收到)

对采用腔内新型宽带半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 掺钛蓝宝石激光器中的启动克尔透镜锁模 (KLM) 的机理进行了实验研究. 讨论了 SESAM 在阻挡-恢复过程中, 启动锁模时间与其他因素的关系. 获得了 SESAM 启动 KLM 过程较为完整的物理图像, 并对其机理进行了分析和讨论.

关键词: 半导体可饱和吸收镜, 自启动动力学, 钛宝石激光器

PACC: 4265R, 4260F

1 引 言

自 20 世纪 90 年代以来, 飞秒脉冲激光技术得到了飞速的发展, 并在许多领域, 例如物理学、化学、生物学、医学, 以及工业领域有广泛的应用. 这些应用的开发反过来更促进了飞秒激光技术不断发展和完善. 当前, 在近红外波段, 最可靠和最实用的飞秒脉冲激光源仍然是掺钛蓝宝石激光器. 基于啁啾镜 (chirped mirror) 色散补偿技术与半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 辅助锁模技术相结合的方法, 极大地促进了该类激光器的小型化、实用化和稳定性, 并已成为全固化飞秒激光器的标准化技术^[1-3]. 最近我们实现了采用负色散补偿镜和新型宽带 SESAM 的自启动、自锁模掺钛蓝宝石激光器^[4,5]. 目前 SESAM 的引入主要是为了解决克尔透镜锁模 (KLM) 自启动困难的实际问题, 以及如何在自启动条件下优化激光运转参数以获得更短的激光脉冲. 而对于该器件自启动 KLM 的机理研究甚少. 本文着重讨论带有新型宽带 SESAM 掺钛蓝宝石激光器自锁模的自启动动力学过程, 实验研究了 SESAM 在阻挡-恢复过程中, 锁模的建立时间与其他因素的关系, 获得了 SESAM 启动 KLM 较为完整的物理图像, 并对其机理进行了分析和讨论.

2 实验方法

实验采用的“X”形五镜腔结构如图 1 所示. 在凹面镜 M_1 和 M_2 之间放置长度为 4mm 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 7% 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. M_3 为一球面反射镜, 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 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. SESAM 采用由金属银反射补底的 InGaAs 和 GaAs 单量子阱构成宽带可饱和吸收镜^[4]. 抽运源为一台二极管抽运的钕酸钇倍频激光器. 当抽运功率为 5W 时, 该激光器锁模脉冲宽度为 20—30fs, 重复频率为 88MHz, 平均输出功率为 300mW.

为了研究 SESAM 自启动 KLM 的动力学过程, 在腔内放置了一台斩波器, 以实现激光腔的阻断-开通的周期性变换. 输出的锁模脉冲序列分成两束: 一束直接由快响应光电二级管 (PD1) 接收, 以监视激光器从连续波到自锁模的整个建立过程; 另一束则被球面反射镜 M_4 会聚到 BBO 晶体上. 当 KLM 发生时, 在 BBO 晶体中产生二次谐波 (second harmonic

* 国家教育部高等学校骨干教师基金、国家重点基础研究项目特别基金 (批准号: G1999075201-2)、国家“九五”攀登计划及天津市自然科学基金 (批准号: 020-413188) 资助的课题.

generation, SHG). 该信号由另一只快响应光电二级管 (PD2) 接收, 用以判断 KLM 飞秒脉冲产生时间和建立过程. 适当调整光路和输入电缆的长度, 使两路

信号同时被输入到一台 400MHz 的数字存储示波器 (Tektronix TDS380) 进行监测和记录.

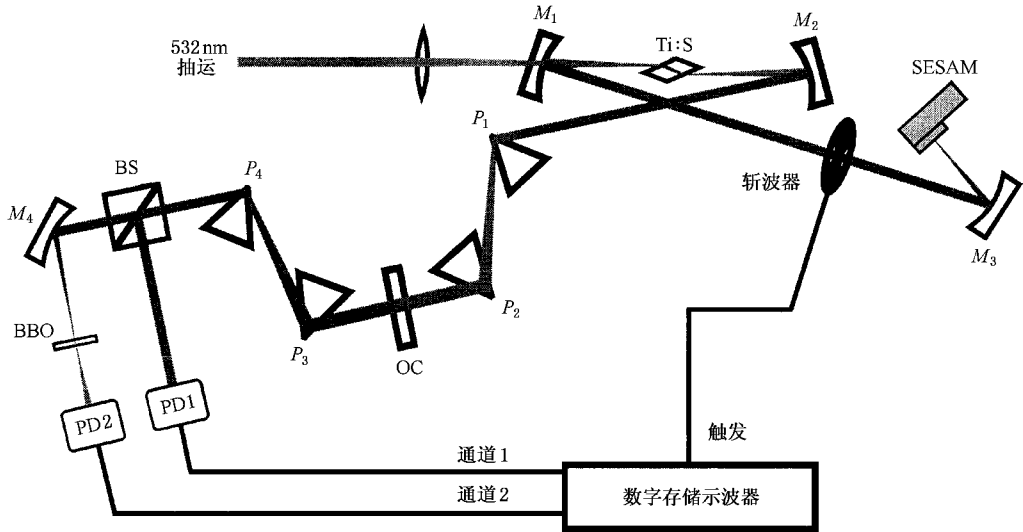


图 1 实验装置图

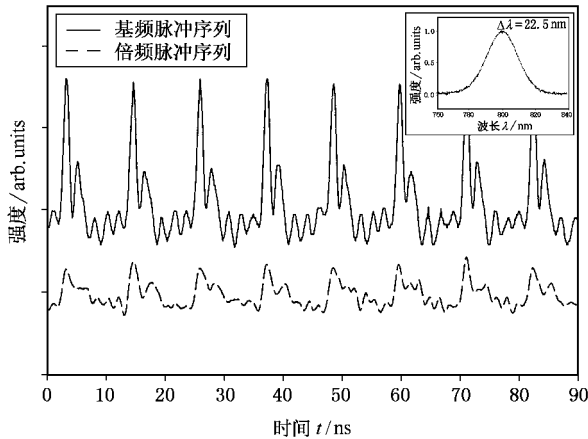


图 2 激光器稳定运转时的 KLM 脉冲序列和对应光谱

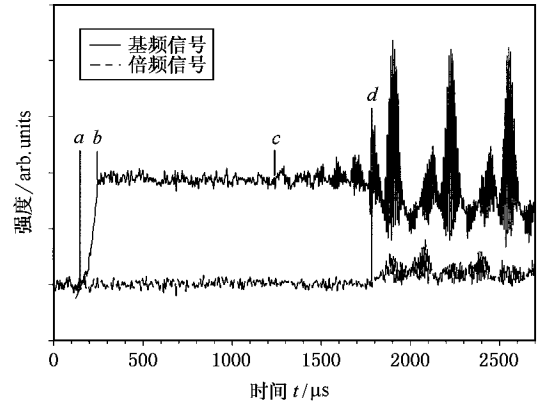


图 3 快速阻挡-恢复情况下 SESAM 自启动锁模动力学过程

3 结果与讨论

首先在不加 SESAM (其位置上放一平面反射镜) 的钛宝石激光器内放置斩波器, 对连续光运转状态进行阻挡-恢复实验, 得到该斩波器的完全阻断时间为 2.6 ms, 完全开通时间为 2.8 ms, 开通过程 (上升沿) 为 200 ns, 阻断过程 (下降沿) 为 500 ns. 然后对 SESAM 启动 KLM 的钛宝石激光器进行同样的实验观测. 图 2 示出斩波前激光器正处于稳定的 KLM 状态. 图中上方的锁模脉冲序列为 PD1 测得的飞秒脉

冲基波信号, 下方的锁模脉冲序列为 PD2 测得的飞秒脉冲倍频信号, 内插图为其对应的光谱, 光谱宽度 $\Delta\lambda = 22.5 \text{ nm}$, 在满足傅里叶变换极限的条件下对应 30fs 的脉冲宽度 (假定脉冲形状为 sech^2 函数). 图 3 示出斩波后, 该激光器中 SESAM 启动 KLM 的动力学过程. 图中上面的曲线为基频信号, 下面的曲线为 SHG 信号. SESAM 启动 KLM 的动力学过程可分为以下几个阶段: 从 a 点到 b 点为第一阶段, 它含有两个过程: 当斩波器由阻断到开通后, 激光器首先由非运转状态快速进入连续波激光运转状态 (时间约为 200ns), 随后建立起皮秒锁模 (时间约为 100 μs). 两者相比较, 前者可以忽略. 因此, 从 a 点到 b 点可以

看成是 SESAM 作为可饱和吸收体的纯被动锁模(皮秒脉冲)的建立过程.从 b 点到 c 点为第二阶段,该阶段的特征是维持纯皮秒锁模脉冲运转,其间皮秒锁模脉冲不断得到压缩,时间约为 1 ms.第三阶段(图中 c 到 d)为从皮秒锁模向 KLM 转变的过渡阶段.在此阶段皮秒锁模脉冲的峰值功率已经到达了 KLM 的阈值附近.当脉冲的峰值功率超过 KLM 的阈值成为种子脉冲后,KLM 过程开始启动,此时 KLM 的物理过程与 SESAM 的被动锁模物理过程同时存在,并使皮秒脉冲继续快速压窄,同时产生自调 Q -自锁模过程^[6],这从图中振幅的调制周期变化对比可以看出.在此阶段,腔内脉冲的峰值功率较低,不足以产生二次谐波(SH)信号,所以 PD2 的探测信号仍为零.此段经历的时间约为 $540\mu\text{s}$.当到达 d 点后,二次谐波信号开始产生,标志着此时的 KLM 过程完全占据了统治地位,并快速地压缩脉冲至飞秒量级,激光器进入单一飞秒 KLM 状态.随后进行的是腔内稳定 KLM 的建立过程:飞秒脉冲宽度很快地被压缩,峰值功率迅速增强,最终达到稳定状态.这一过程由图 4 中放大后测量的 SHG 曲线给出:由 d 点到 e 点的距离给出了这一过程对应的时间,即腔内稳定的飞秒 KLM 的建立时间约为 $10\mu\text{s}$.这个过程我们称为第四阶段.大量的系统实验显示,这一过

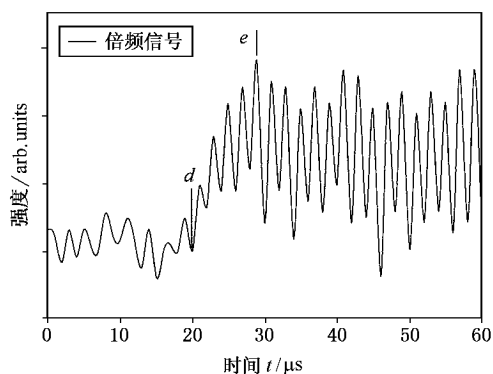


图 4 自启动 KLM 的建立过程

程所持续的时间是确定的,与抽运功率无关.而由 a 点到 c 点的皮秒脉冲建立、维持和压缩过程的平均时间强烈地依赖抽运功率的强弱,图 5 示出这一依赖关系:当抽运功率从 4.6W 上升到 5.0W 时,该过程的建立时间从平均约为 2.0 ms 缩短到 1.0 ms.对于不同的腔型或者激光器处于不同的状态,锁模的建立时间可能完全不同,但是其遵循的动力学过程相同^[7].需要说明的是:该激光器锁模脉冲序列的重复频率为 88 MHz(见图 2),在图 3 至图 5 中,锁模区

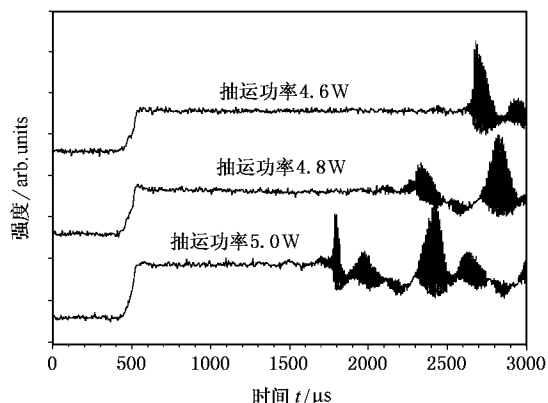


图 5 自启动 KLM 的建立时间随抽运功率的变化关系

域中出现的长周期振幅调制是由于所用 TEX-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,而带来的显示皮形失真,实际上锁模区域应是等幅的亮带.

实验结果表明 SESAM 启动 KLM 的动力学过程可以分为五个阶段:第一阶段为从连续光状态进入皮秒锁模的过程(图 3 中隐含在从 a 点到 b 点的时间内);第二阶段是纯被动锁模皮秒脉冲的压缩过程(图 3 中从 b 点到 c 点的时间内);第三阶段是被动锁模与 KLM 的共存过程(图 3 中从 c 点到 d 点的时间内).第四阶段是单一的飞秒 KLM 快速自建立过程(图 4 中从 d 点到 e 点的时间内).第五阶段为稳定的 KLM 过程.第一阶段由于 SESAM 的较低的饱和阈值和相对于皮秒脉冲的快可饱和吸收体的作用,使得被动锁模在很短时间内建立.第二阶段是对皮秒脉冲的不断放大和压缩过程,使之成为启动 KLM 的种子脉冲.这两个阶段主要是由 SESAM 本身的非线性光学效应造成的.随着抽运功率的增加,增益系数增大,其饱和过程随之加快,从而缩短了到达启动 KLM 阈值的时间,因此这一过程强烈地依赖于抽运功率的大小.实验发现:当抽运功率降为 3.5—4.2 W 时,这一过程可持续数毫秒至数十毫秒,并具有很强的随机起伏.当抽运功率低于 3.5 W 后,这一过程无法达到 KLM 的阈值,因此也就无法进入飞秒脉冲的建立过程,仅能维持皮秒锁模运转.后三个阶段:一个是 KLM 和可饱和吸收体被动锁模同时共存,并随着脉冲变窄 KLM 逐渐取得支配地位的过程;另外两个是完全 KLM 过程.这两个阶段主要是增益介质中非线性效应(自聚焦)和腔内的软光阑(抽运光束的包络)形成的等价的快可饱和吸收体对脉冲的压缩过程,使其由第二阶段提供的种子脉冲

很快压缩至飞秒量级,并与色散效应和其他非线性效应实现平衡,达到最窄脉冲宽度.在这一动力学过程中,主要靠增益介质中的自相位调制和激光腔内色散效应的平衡完成.因此,这个过程一旦开始,它就不再依赖于前两个阶段,即该过程建立时间与抽运功率无关.此时 SESAM 的启动作用已经完成,而其饱和和作用仅对飞秒脉冲有稳定作用.

4 结 论

本文报道了 SESAM 在掺钛蓝宝石激光器中自启动 KLM 的动力学过程.实验发现 SESAM 在快速

阻挡-恢复条件下,对 KLM 的自启动动力学过程可分成五个阶段,即从连续光状态进入皮秒锁模态,维持纯被动锁模的皮秒锁模态,并使皮秒脉冲的峰值功率逐渐放大到 KLM 的启动阈值;KLM 的初始状态与纯被动锁模状态共存态;以及单一 KLM 的快速自建立和稳定运转状态.整个自启动过程能在数百微秒至数毫秒内完成,主要建立时间在第二阶段.

衷心感谢日本电子技术综合研究所提供 SESAM 和中国科学院上海光学精密机械研究所邓佩珍教授提供优质钛宝石晶体.

- [1] D.H. Sutter, I. D. Jung, F. X. Kärtner *et al.*, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **4** (1998) 169.
- [2] Z. Zhang, T. Nakagawa, K. Torizuka *et al.*, *Appl. Phys. (Suppl.)*, **B7**(2000) 59.
- [3] Z. Zhang, T. Nakagawa, H. Takada *et al.*, *Opt. Commun.*, **176** (2000) 171.
- [4] L. Chai *et al.*, *Acta Optica Sinica*, **20**(2000) 431 (in Chinese)

- [柴 路等, 光学学报 **20**(2000) 431].
- [5] Z.G. Zhang *et al.*, *Acta Optica Sinica*, **21**(2001) 253 (in Chinese) [张志刚等, 光学学报 **21**(2001) 253].
- [6] Q. R. Xing, W. L. Zhang, K. M. Yoo, *Opt. Commun.*, **119**(1995), 113.
- [7] L. Chai *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **50**(2001) 68 (in Chinese) [柴路等, 物理学报 **50**(2001) 68].

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANISM OF A SELF-STARTING KERR-LENS-MODE-LOCKING USING A SEMICONDUCTOR SATURABLE ABSORBER MIRROR*

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

(Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering,

Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Chinese Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 9 February 2001)

ABSTRACT

The self-starting dynamics of the Kerr-lens-mode-locking (KLM) in a Ti:sapphire laser using an intracavity broadband semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) was investigated experimentally. The mechanism of the self-starting KLM using a SESAM was investigated and discussed.

Keywords: semiconductor saturable absorber mirror, self-starting dynamics, Ti:sapphire laser

PACC: 4265R, 4260F

* Project supported by the Foundation for University Key Teachers from Chinese Ministry of Education, the National Key Basic Research Special Foundation of China (Grant No. G1999075201-2), the National "Climbing" Program in the "9th 5-Year Plan" of China, and the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 020-413188).