

利用 SBR 实现自启动锁模钛宝石 飞秒激光脉冲的产生*

王屹山¹⁾ 刘红军¹⁾ 程 昭¹⁾ 赵 卫¹⁾ 王勇刚^{2B)} 马晓宇²⁾ 张志刚³⁾

¹⁾ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710068)

²⁾ 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

³⁾ 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室, 天津 300072)

(2004 年 9 月 8 日收到, 2005 年 4 月 4 日收到修改稿)

利用国内生长的低损耗双量子阱结构的可饱和布拉格反射器在掺钛蓝宝石激光器中实现了可饱和吸收体被
动锁模、孤子锁模和 KLM 锁模状态的自启动稳定运转. 当抽运功率为 4.5W 时, 用啁啾镜进行色散补偿, 获得了 18fs
的 KLM 锁模脉冲, 输出功率为 150mW.

关键词: 可饱和布拉格反射器, 啁啾镜, 飞秒, 钛宝石激光器

PACC: 4265R, 4260F

1. 引 言

克尔透镜锁模技术(kerr lens modelocking, KLM) 已成为产生飞秒激光短脉冲的重要手段, 但它的主要缺陷是难以自启动, 对激光腔稳定区调节要求高, 依赖于激光晶体具有高的克尔非线性效应, 目前只有钛宝石等极少数激光晶体能够采用 KLM 实现锁模飞秒脉冲, 这大大限制了 KLM 锁模飞秒激光器向小型化、实用化发展, 因此 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. 在掺钛宝石激光器中引入新型半导体可饱和吸收体镜(SESAM)来解决 KLM 锁模自启动困难的问题是日前人们研究的热点之一.

与 KLM 的快速可饱和吸收效应不同的是, 孤子锁模是一种建立在慢速可饱和吸收效应上的锁模技术^[1], 这种慢可饱和吸收效应主要由半导体可饱和吸收镜来实现^[2], 由于孤子锁模的启动与维持由 SESAM 来完成, 与激光晶体的非线性无关, 因此它是实现各种固体激光器自启动及稳定锁模的最佳选择. 在孤子锁模中, 脉冲成形机理完全是由于自相位调制和群速度色散相互平衡作用下的孤子脉冲成形效应, 而 SESAM 只起启动和稳定作用. 由于 SESAM 的

慢可饱和吸收效应, 它的净增益窗口在脉冲经过时不会很快关闭, 如果可饱和吸收体调制深度足够大, 就可能产生短脉冲, 而自相位调制和群速度色散的孤子成形作用就为产生孤子短脉冲创造了条件, 而其他任意的基底噪声和扰动都会因为群速度色散作用而在时间上展宽, 最终被慢回复吸收体吸收. 因此孤子锁模与激光腔稳定区的调试无关, 它可以在整个稳定区上存在, 这大大降低了对激光腔的调试要求, 而 SESAM 可作为一个独立可调节的聚焦元件来实现对激光脉冲饱和吸收强度的最佳化调节.

SESAM 上高反射膜层有半导体布拉格反射膜与金属反射膜两种, 利用金属反射膜可以获得宽反射带宽, 但它的缺陷是损伤阈值低、反射损耗大、调制深度小, 必需借助于 KLM 才能获得短脉冲, 而利用半导体布拉格反射膜生长的可饱和布拉格反射器(SBR)具有抗损伤阈值高、反射率高、调制深度易调节, 缺陷是反射带宽较窄, 但它与孤子锁模结合起来可形成高效、易调节、高可靠性、结构紧凑的实用化飞秒激光源.

目前 SESAM 已成功应用在众多的固体激光器中, 如 Nd:YLF^[3], Nd:YAG^[4], Nd:YVO₄^[5], Nd:glass^[6], Yb:YAG^[7], Cr:LiSAF^[8]等, Keller 等人利用

* 国家自然科学基金(批准号 60408002, J0390160)和陕西省自然科学基金(批准号 2003F19)资助的课题.

800 nm 可饱和半导体布拉格反射镜在钛宝石激光器中产生纯孤子锁模脉冲的宽度最短 $34\text{fs}^{[9]}$, 并结合 KLM 技术产生了 19fs 的最短脉冲^[10], 采用银反射镜的宽带 SESAM 产生孤子锁模脉冲最短 $13\text{fs}^{[11]}$, 并在借助 KLM 技术产生了 6.5fs 的短脉冲^[12], 天津大学的张志刚等人在宽带低损耗可饱和吸收镜研究方面做了独创性的工作^[13], 并研制成功金属金反射层的 SESAM, 并在钛宝石激光器中获得了 300mW , 20fs 的激光脉冲输出^[14]. 我们利用国内生长的 SBR, 在掺钛蓝宝石激光器中采用啁啾镜进行色散补偿产生了高效稳定的 18fs 的自启动 KLM 光脉冲输出, 获得的脉冲宽度已经进入了传统宽带金属反射镜饱和吸收镜的优势领域.

2. 实验与结果

图 1 是我们自行设计生长的 SBR 结构图, 整个生长过程采用金属有机化学气相淀积方法 (MOCVD), 布拉格反射镜由 22 对 $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 按照 $\lambda/4$ 厚度交替生长而成, 实际达到的反射率 98% 以上, 反射带宽 $790\text{--}820\text{ nm}$, 中心波长为 817nm . 布拉格反射镜生长有两层 GaAs (10 nm) / $\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ (18 nm) 组成的双量子阱, 其中 GaAs 生长温度为 550°C , 对于 MOCVD 来说, 为低温生长, 目的是产生 As_{Ga} 和 V_{Ga} 缺陷, 可以形成恢复时间为皮秒的非线性光吸收区. 实际测量的 SBR 光谱反射光谱和色散特性分别如图 2 中的曲线 1 和曲线 3 所示.

实验采用标准的 Z 形折叠腔结构如图 3 所示. 腔内掺钛蓝宝石长度为 2.2mm , 聚焦凹面镜 M_1 和 M_2 的曲率半径为 50mm . 腔的长臂端放置一对啁啾镜 CM_1 和 CM_2 (Chirped mirrors, CM) 进行色散补偿, 图 2 中的曲线 2 给出了腔内啁啾镜色散补偿曲线. 输出耦合镜 OC 加载在长臂端, 耦合输出率为 20%. CM_3 和 CM_4 为腔外色散补偿啁啾镜, 用来补偿输出

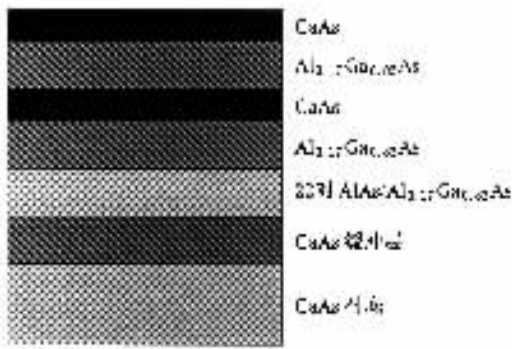


图 1 SBR 生长结构图

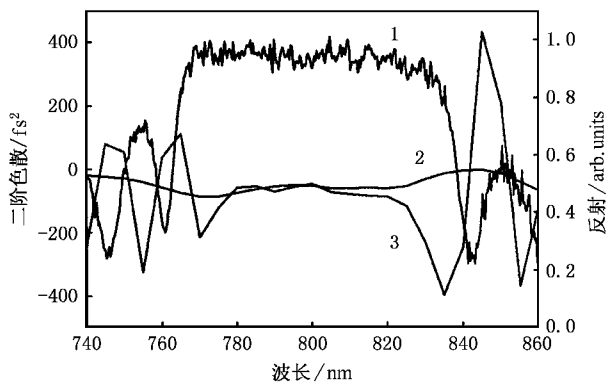


图 2 SBR 光谱反射特性及色散特性(曲线 1 表示 SBR 反射光谱 2 表示腔内啁啾镜色散补偿曲线 3 表示 SBR 的色散曲线)

镜厚度引起的啁啾. 短臂端采用曲率半径为 500mm 的凹面镜 M_3 反射聚焦在 SBR 上, 以增强入射在 SBR 上的功率密度. 激光腔中所有凹面镜都镀有 $700\text{--}900\text{nm}$ 的宽带全反膜, 因此由图 2 可知该激光器对输出光谱带宽限制最大的器件是 SBR 镜.

实验中, 首先在未加啁啾镜对的直腔中进行了 SBR 的被动锁模研究, 结果发现只需调节激光腔至连续功率最大, 然后调节 SBR 和凹面镜 M_3 的间距就很容易实现稳定锁模, 光谱和脉宽的测量结果如图 4 所示. 锁模脉冲的光谱带宽 (FWHM) 为 5nm , 中心波长为 811nm , 脉宽为 4.5ps , 此时激光器运行

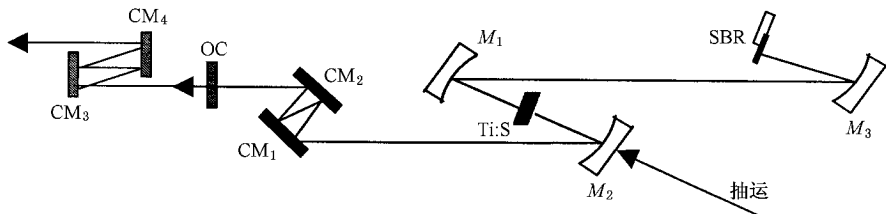


图 3 采用 SBR 的自启动锁模钛宝石激光器实验结构图 (CM 为啁啾镜, OC 为输出耦合镜)

在 SBR 的可饱和吸收体被动锁模状态 ,SBR 锁模依赖于它的慢可饱和吸收特性^[15,16] ,由于 SBR 的净增益窗口在皮秒量级 ,锁模脉冲宽度也在皮秒量级 ,实验测量的结果也证实了这一点 .当加入啁啾镜对时 ,

调节激光器运行在稳定区中心附近 ,此时输出功率接近最大 ,随后通过调节 SBR 与凹面镜 M_3 之间的距离来改变聚焦在 SBR 上的功率密度 ,同时调节凹面镜 M_1 和 M_2 间距以得到稳定的锁模脉冲序列 .

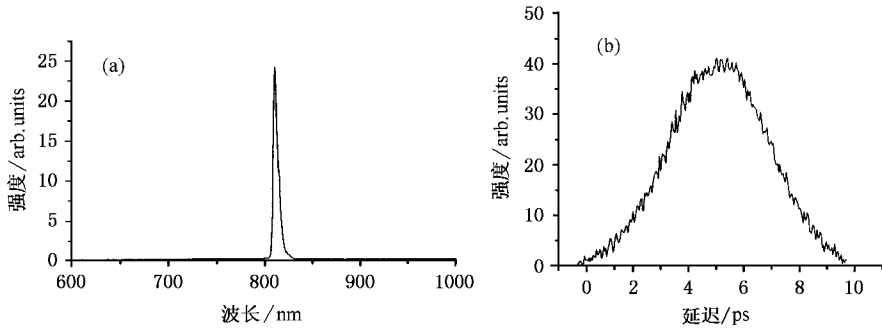


图 4 (a)测量的钛宝石激光器直控锁模脉冲光谱和(b)相应的自相关曲线

实验中发现稳定锁模出现在 M_1 和 M_2 间距较小的稳定区 ,这与软光栏克尔透镜锁模位于 M_1 和 M_2 间距较大的稳定区不同^[17] ,这主要是由于当激光器运转在 M_1 和 M_2 间距较小的稳定区时 ,聚焦在 SBR 上的光斑较小 ,采用 ABCD 矩阵传输方法很容易计算出聚焦在 SBR 上的光斑半径约为 $90\mu\text{m}$,相应的聚焦功率密度较大 ,容易达到自启动所需要的饱和深度 ;而当激光器运转在 M_1 和 M_2 间距较大的稳定区时 ,聚焦在 SBR 上的光斑较大 ,此时的聚焦光斑半径约为 $250\mu\text{m}$,相应的聚焦功率密度较小 ,可饱和吸收深度不够 ,不能产生稳定的锁模脉冲 .

当 SBR 与凹面镜 M_3 的间距为 300mm 时 ,微调锁模稳定区可得到不同谱宽及脉宽的稳定的锁模脉冲输出 .当调节 M_1 和 M_2 间距距离稳定区边缘较远时 ,锁模光谱较窄 ,相应的脉冲宽度比较宽 ,实验测量的光脉冲的干涉自相关曲线和相应的光谱结果如

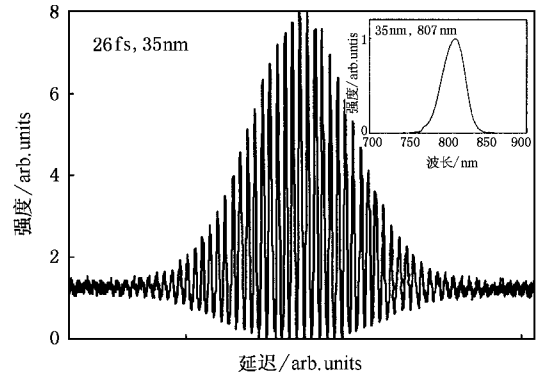


图 6 从用 SBR 的钛宝石激光器中 KLM 锁模获得 26fs 光脉冲的干涉自相关曲线(插图为相应的光谱图)

图 5 所示 ,抽运光功率为 4.5W ,脉冲宽度为 45fs ,光谱宽度为 15nm ,输出功率 400mW ,此时还没有进入克尔透镜锁模区 ,因而孤子锁模是产生锁模脉冲的

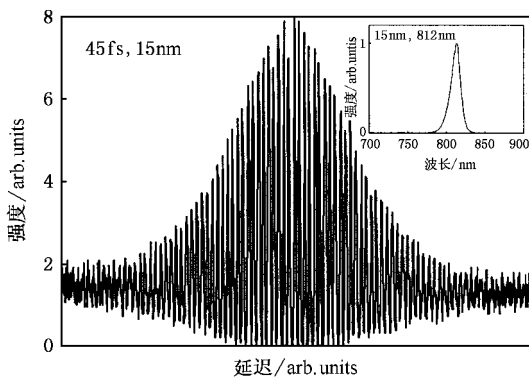


图 5 从用 SBR 的钛宝石激光器中 KLM 锁模获得 45fs 光脉冲的干涉自相关曲线(插图为相应的光谱图)

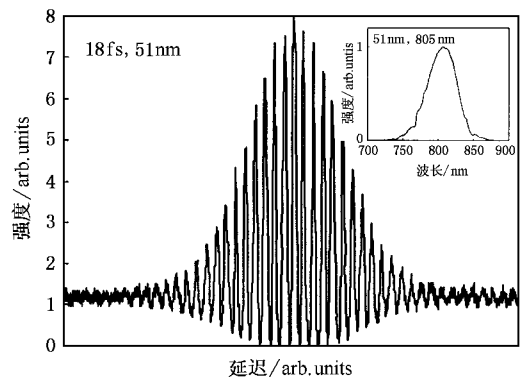


图 7 从用 SBR 的钛宝石激光器中 KLM 锁模获得 18fs 光脉冲的干涉自相关曲线(插图为相应的光谱图)

主要机理. 当调节 M_1 和 M_2 间距向稳定区边缘靠近时, 锁模脉冲光谱有所展宽, 相应的脉宽也变窄, 实验测量的光脉冲的干涉自相关曲线和相应的光谱结果如图 6 所示, 抽运光功率为 4.5W, 脉冲宽度为 26fs, 光谱宽度为 35nm, 输出功率 300mW, 此时表明克尔透镜锁模已发生作用. 当调节 M_1 和 M_2 间距继续接近稳定区边缘时, 光谱继续展宽, 在优化锁模稳定区及钛宝石晶体基础上, 抽运光功率为 4.5W 时, 实验测量的最短光脉冲的干涉自相关曲线和相应的光谱如图 7 所示, 脉冲宽度为 18fs, 光谱宽度为 51nm, 输出功率 150mW. 在以上三种条件下, 激光器都很容易自启动, 并且运行稳定.

总之, 利用 SBR 自启动的掺钛蓝宝石激光器中能够稳定地存在三种锁模机理: 可饱和吸收体被动锁模、孤子锁模和克尔透镜锁模, 它们的脉冲宽度分

别对应皮秒级、几十飞秒级以及十飞秒级, 图 4, 5, 7 给出了三种不同锁模机理下的锁模特征. 实验中, SBR 作为可饱和吸收体的作用主要是实现自启动及维持锁模状态的稳定运转.

3. 结 论

本文报道用国内生长的低损耗双量子阱结构的可饱和布拉格反射器在掺钛蓝宝石激光器中实现了三种不同锁模状态的自启动稳定运转, 即可饱和吸收体被动锁模、孤子锁模和 KLM 锁模. 当抽运功率为 4.5W 时, 用啁啾镜对进行色散补偿, 在 KLM 锁模状态下获得了 18fs 的最短锁模脉冲, 输出功率为 150mW. 该激光器具有自启动、易调节、运行稳定等特点.

- [1] Jung I D, Kartner F X, Brovelli L R, Kamp M and Keller U 1995 *Opt. Lett.* **20** 1892
- [2] Sutter D H, Gallmann L, Matuschek N, Morier-Genoud F, Scheuer V, Angelow G, Tschudi T, Steinmeyer G and Keller U 2000 *Appl. Phys. B* **70** S5
- [3] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, Chiu T H, Ferguson J F and Asom M T 1992 *Opt. Lett.* **17** 505
- [4] Weingarten K J, Keller U, Chiu T H and Ferguson J F 1993 *Opt. Lett.* **18** 640
- [5] Fluck R, Zhang G, Keller U, Weingarten K J and Moser M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1378
- [6] Kopf D, Kartner F X, Keller U and Weingarten K J 1995 *Opt. Lett.* **20** 1169
- [7] Innerhofer E, Schreyer T, Brunner F, Hring R, Aschwanden A, Paschotta R, Hnninger C, Kumkar M, and Keller U 2003 *Opt. Lett.* **28** 367
- [8] Kemp A J, Stormont B, Agate B, Brown C T A, Keller U and Sibbett W, 2001 *Electron. Lett.* **37** 1457
- [9] Brovelli L R, Jung I D, Kopf D, Kamp M, Moser M, Kartner F X and Keller U 1995 *Electron. Lett.* **31** 287
- [10] Jung I D, Brovelli L R, Kamp M, Keller U and Moser M 1995 *Opt. Lett.* **20** 1559
- [11] Kartner F X, Jung I D and Keller U 1996 *Invited Paper IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **2** 540
- [12] Jung I D, Kartner F X, Matuschek N, Sutter D H, Morier-Genoud F, Zhang G, Keller U, Scheuer V, Tilsch M and Tschudi T 1997 *Opt. Lett.* **22** 1009
- [13] Zhang Z G, Torizuka Kenji, Itatani Taro, Kobayashi Katsuyuki, Sugaya Takeyoshi, Nakagawa Tadashi and Takahashi Hiroshi 1998 *Opt. Lett.* **23** 1465
- [14] Zhang Z G, Chai L, Zhao J S, Sun D R, Liu Y J and Wang Y Q 2002 *Acta Optica Sinica* **22** 1151 (in Chinese) [张志刚、柴路、赵江山、孙大睿、刘永军、王清月 2002 光学学报 **22** 1151]
- [15] Chai L, Wang Q Y, Zhang Z G, Zhao J S, Wang Y, Zhang W L and Xing Q R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 68 (in Chinese) [柴路、王清月、张志刚、赵江山、王勇、张伟力、邢歧荣 2001 物理学报 **50** 68]
- [16] Chai L, Wang Q Y, Zhao J S, Xing Q R and Zhang Z G 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1298 (in Chinese) [柴路、王清月、赵江山、邢歧荣、张志刚 2001 物理学报 **50** 1298]
- [17] Xu L, Tempea G, Poppe A, Lenzner M, Spielmann C, Krausz F, Stingl A and Ferencz K 1997 *Appl. Phys. B* **65** 151

Self-starting mode-locked femtosecond Ti :sapphire laser using saturable Bragg reflector(SBR)*

Wang Yi-Shan¹⁾ Liu Hong-Jun¹⁾ Cheng Zhao¹⁾ Zhao Wei¹⁾ Wang Yong-Gang^{2)B)} Ma Xiao-Yu²⁾ Zhang Zhi-Gang³⁾

¹⁾*State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)*

²⁾*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)*

³⁾*Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)*

(Received 8 September 2004 ; revised manuscript received 4 April 2005)

Abstract

Stable self-starting mode-locking states in a compact Ti :sapphire laser incorporating a home-made SBR with low loss double quantum-well and low temperature and surface state hybrid absorber are investigated experimentally. The 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 successfully demonstrated. In this laser, chirped mirrors are used for dispersion compensation, and the 18 fs pulses are produced from the Kerr-lens mode-locking at 4.5W pump power, and output power is 150mW.

Keywords : saturable Bragg reflector, chirped Mirror, femto-second, Ti :sapphire laser

PACC : 4265R, 4260F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos.60408002,10390160) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No.2003F19).