

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 基于半导体可饱和吸收镜实现闪光灯抽运 Nd : YAG 激光器的被动调 Q 与锁模

王加贤, 庄鑫巍

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 基于同一块半导体可饱和吸收镜 (SESAM), 实现了闪光灯抽运的 Nd : YAG 激光器的被动调 Q 与锁模。实验结果表明: 腔长较小时, 激光器运转在调 Q 状态, 调 Q 脉冲宽度为 90 ns; 随着腔长的增加, 调 Q 脉冲中出现调制, 而且调制深度随着腔长的增加而加深。当腔长为 140 cm, 全反射凹面镜曲率半径为 300 cm 时, 激光器运转在稳定的被动锁模状态, 输出的锁模脉冲序列能量为 27 mJ、脉宽为 35 ps。实验比较了 SESAM 器件在平凹稳定腔和平凸非稳腔激光器中实现被动锁模的差异, 并给出理论解释。SESAM 有望取代有机染料成为闪光灯抽运的 Nd : YAG 激光器理想的被动锁模器件。

**关键词:** 激光技术; 半导体可饱和吸收镜; Nd: YAG 激光器; 被动调 Q; 被动锁模

中图分类号: TN243 文献标识码: A

## Passive Q-switching and mode-locking in a flashlamp-pumped Nd : YAG laser with semiconductor saturable absorption mirror

WANG Jia-xian, ZHUANG Xin-wei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The passive Q-switched and mode-locked operations were realized in a flashlamp pumped Nd:YAG laser with the same semiconductor saturable absorption mirror under the different conditions. The experimental results show that for the shorter cavity length ( $L < 90$  cm), the laser only operates in the Q-switched mode and the pulse duration of the Q-switched pulse is 90 ns, and the amplitude modulation occurs in the Q-switch pulse and the modulation gradually deepens with the increase of cavity length. When the cavity length is 140 cm and the radius of curvature of the full-reflective concave mirror is 300 cm, the Nd : YAG laser is operated in the stable mode-locking and a pulse train with 27 mJ energy and 35 ps pulse duration is obtained. The differences of the passive mode-locking by the semiconductor saturable absorption mirror in the plane-concave stable resonator and the plane-convex unstable resonator lasers are experimentally compared and reasonably explained. It is concluded that the semiconductor saturable absorption mirror can replace organic dyes to become the best saturable absorber for the mode-locked operation of the flashlamp pumped Nd:YAG laser with larger

收稿日期: 2005-11-12; 修订日期: 2005-06-09.

基金项目:

output energy.

**Key words:** laser technology; semiconductor saturable absorption mirror (SESAM); Nd : YAG laser; passive Q-modulation; passive mode-locking

## 1 引言

闪光灯抽运的 Nd : YAG 激光器相对于 LD 抽运的全固态激光器,具有输出能量大、价格便宜等优点,所以仍然在大量使用。这类激光器一直采用有机染料(如五甲川溶于二氯乙烷溶液)作为可饱和吸收体实现皮秒量级被动锁模,但是染料有毒性、稳定性很差、使用不方便。近年来曾尝试采用  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG 晶体作为可饱和吸收体,利用它的激发态饱和吸收进行被动锁模,但获得的锁模脉冲较宽,锁模几率和稳定性也比较差<sup>[1]</sup>。因此,有必要寻找更加合适的可饱和吸收体,实现这类激光器的被动锁模。

1992 年, U. Keller<sup>[2]</sup> 等人首次在谐振腔内引入反共振的法布里-珀罗标准具可饱和吸收体 (Antiresonant Fabry-Berot Absorber, A-FP-SA), 又称半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor Saturable Absorption Mirror, SESAM), 实现 Nd:YLF 激光器的自启动被动锁模, 获得 3.3 ps 的激光脉冲。SESAM 器件结构简单、使用方便, 而且可以通过改变吸收区材料使之适合各种激光波长。现在国外不但把 SESAM 作为自启动器件广泛用于克尔透镜锁模飞秒激光器<sup>[3]</sup>, 而且用于多种波长的固体激光器中直接实现被动锁模, 获得皮秒激光脉冲输出<sup>[4-5]</sup>。例如: 2000 年, Spuhler G J 等采用 SESAM 实现 LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器被动锁模, 获得功率 27 W、脉宽 19 ps、单脉冲能量  $0.5 \mu\text{J}$  的脉冲序列输出<sup>[6]</sup>; 2005 年, Gorbunkov M V 等采用 SESAM 器件和电光调制器对 LD 抽运的 Nd : YAG 激光器进行主被动锁模, 获得重复率 100 Hz, 脉冲宽度 15~50 ps 的脉冲序列<sup>[7]</sup>。国内也陆续研制出适合于几种波长的 SESAM 器件, 并成功地用于飞秒激光器的自启动<sup>[8]</sup>, 以及 LD 抽运的 Nd : YAG、Yb : YAG、Nd : YVO<sub>4</sub> 皮秒激光器的被动锁模, 取得很大成功<sup>[9-12]</sup>。2005 年, Guo L 等采用 CW 二极管抽运 Nd : YAG 激光器, 用 SESAM 作为锁模器件, 得到重复率 130 MHz, 脉宽 8.3 ps 的脉冲

序列<sup>[13]</sup>。但是, 把 SESAM 器件用于闪光灯抽运的大能量输出的 Nd : YAG 激光器的被动锁模在国内尚未见过报道。本文研究采用同一块国产的 SESAM 器件对闪光灯抽运的 Nd : YAG 激光器的被动调 Q 与锁模, 通过腔型选择和参量优化, 在较佳的工作条件下获得输出能量 27 mJ、脉宽 35 ps 的锁模脉冲序列。

## 2 实验装置

半导体可饱和吸收镜被动调 Q 与锁模 Nd : YAG 激光器实验装置如图 1 所示。M<sub>1</sub> 是曲率半径 300 cm 的全反射凹面镜 (也可换成凸面镜); M<sub>2</sub> 是贴在铜片上的半导体可饱和吸收镜; M<sub>3</sub> 是 45°角时反射率为 25% 的平面输出镜; F 是可变光阑, 其位置和孔径在实验中调整, 它保证了激光的单横模运转;  $\phi 4 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  的 Nd : YAG 棒由单根脉冲氙灯抽运, 工作重复率 1 Hz, 棒的左端面与 M<sub>1</sub> 镜的距离  $L_1 = 15 \text{ cm}$ , 右端面与 M<sub>2</sub> 镜的距离  $L_2$  可通过移动 M<sub>2</sub> 镜而改变。输出激光由响应时间 1 ns 的 PIN 硅光电二极管接收并输入到 300 MHz 存储示波器上存储和观察脉冲波形, 用非共线自相关二次谐波法测定脉冲宽度, 用 PT-1 型激光能量计测量输出激光能量。

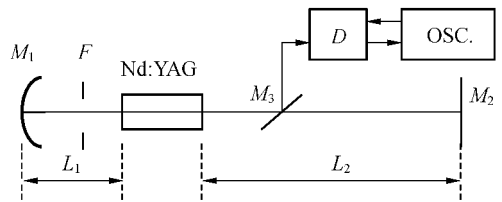


图 1 SESAM 被动调 Q 与锁模 Nd : YAG 激光器  
Fig. 1 Experimental setup of passively Q-switched and mode-locked Nd : YAG laser with SESAM

半导体可饱和吸收镜由中国科学院半导体研究所研制, 其结构如图 2 所示<sup>[14]</sup>。采用 GaAs 为衬底, 其上是由 GaAs 和 AlAs 交错生长的半导体布拉格反射镜 (DBR), DBR 上面生长一层半

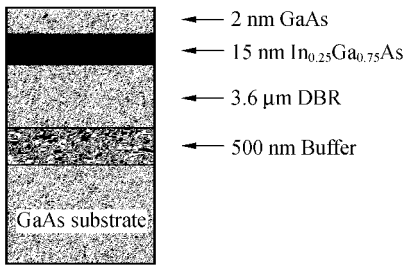


图 2 半导体可饱和吸收镜结构图

Fig. 2 Schematic structure of semiconductor saturable absorption mirror

导体可饱和吸收体薄膜 ( $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱), 最上层利用 GaAs 与空气的界面作为反射镜。这上下两层反射镜形成了一个法布里-珀罗腔, 通过改变吸收体的厚度及反射镜的反射率, 就可以调节吸收体的调制深度和反射镜的带宽。对于皮秒量级的激光器, 所要求的带宽较窄, 很容易满足。

### 3 实验结果与分析

由曲率半径 300 cm 的凹面镜和 SESAM 器件构成平凹腔激光器, 沿腔轴移动 SESAM 器件进行不同腔长的实验。结果表明: 激光器的腔长较小时 ( $L < 90$  cm), 激光器运转在调 Q 状态; 腔长增加, 调 Q 脉冲中出现调制而且调制深度随着腔长的增加而加深; 当腔长  $L > 130$  cm 时, 出现稳定的锁模脉冲。图 3(a)、(b)、(c) 分别对应  $L = 80$  cm、 $L = 120$  cm、 $L = 140$  cm 时激光器输出的激光脉冲。调 Q 脉冲的时间宽度 (FWHM) 90 ns, 能量为 46 mJ; 锁模脉冲序列中的脉冲间隔约为 10 ns, 与光脉冲在腔内的往返时间相符, 脉冲包络时间约为 450 ns, 单脉冲序列能量为 27 mJ。用非共线自相关二次谐波法测定脉冲宽度为 35 ps。实验还观察到, 插入光阑后, 锁模几率和锁模稳定性有所提高。

在同样的抽运条件下, 带有 SESAM 器件的 Nd:YAG 激光器是运转在调 Q 状态还是锁模状态, 腔长起了关键作用。对此的解释是: (1) 当凹面镜与 Nd:YAG 棒的位置不变时, 增大 Nd:YAG 棒与 SESAM 器件的距离 (腔长增加), 可使 Nd:YAG 棒内基模模体积增大, 腔内激光能量

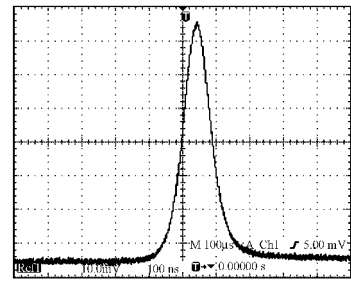
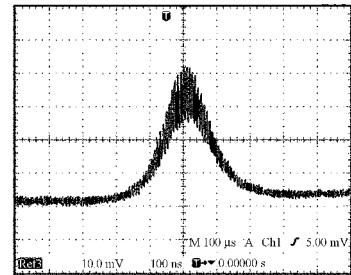
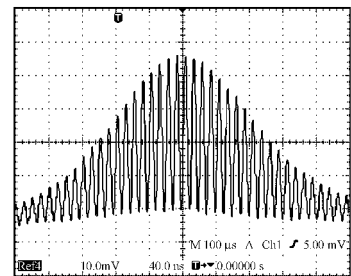
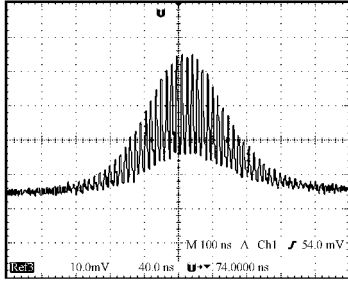
(a) 腔长  $L = 80$  cm(a)  $L = 80$  cm(b) 腔长  $L = 120$  cm(b)  $L = 120$  cm(c) 腔长  $L = 140$  cm(c)  $L = 140$  cm

图 3 带有 SESAM 的平凹腔 Nd:YAG 激光器输出的激光脉冲

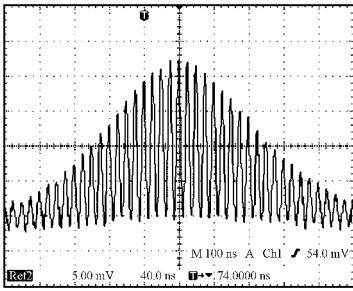
Fig. 3 Laser pulses from the plane-concave resonator Nd:YAG laser with SESAM for the different cavity length  $L$ 

随着增大, 使之超过 SESAM 器件的饱和通量从而实现被动锁模; 腔长较小时, 腔内激光能量较小, 不足以使可饱和吸收体完全漂白, 达不到锁模阈值, 所以只能产生调 Q 或调 Q 包络下的轻度调制。(2) 腔长大时, 锁定的纵模数多, 有利于锁模脉冲的形成、脉冲的压缩和激光峰值功率的提高。考虑上述两个因素, 在本实验条件下, 腔长大才有

可能使作用在 SESAM 上的激光脉冲光强超过其饱和光强从而实现被动锁模。另外,在腔内插入光阑,能保证激光的基模运转,使激光增益全部集中到参与锁模的基横模上来,从而保证作用在 SESAM 上的激光功率密度足够大。



(a) 腔长  $L = 80$  cm  
(a)  $L = 80$  cm



(b) 腔长  $L = 140$  cm  
(b)  $L = 140$  cm

图 4 带有 SESAM 的平凸腔 Nd : YAG 激光器输出的激光脉冲

Fig. 4 Laser pulses from the plane-convex resonator Nd : YAG laser with SESAM for the different cavity length  $L$

实验中还把  $M_1$  镜换成曲率半径  $-300$  cm 的凸面镜,与 SESAM 器件构成平凸非稳腔激光器。该激光器运转状态与腔长的关系类似平凹腔,即腔长小时 ( $L < 60$  cm),出现调 Q;随着腔长的增加,调 Q 包络中出现调制;当腔长大于  $120$  cm 时,出现稳定的锁模脉冲。图 4(a)、(b)是腔长  $L = 80$  cm 和  $L = 140$  cm 时激光器输出的激光脉冲。

与平凹腔比较,平凸腔激光器在腔长相对较小时就出现调制和锁模,这是因为平凸非稳腔基模的模体积大,腔内激光能量较大所致。当  $L = 140$  cm 时,测得平凸非稳腔激光器的锁模脉冲能量为  $56$  mJ,明显大于相同腔长的平凹腔锁模激光器的输出能量。脉冲宽度在误差范围内基本相同。

## 4 结 论

在闪光灯抽运的直腔 Nd : YAG 激光器中,采用半导体可饱和吸收镜实现被动调 Q 与锁模运转。腔长较小时,激光器运转在调 Q 状态;腔长较大时,激光器运转在锁模状态,锁模脉冲能量  $27$  mJ、脉宽  $35$  ps。本实验获得的激光脉冲还比较宽,如果进一步优化激光器和 SESAM 器件的参量,可能得到更好的结果。SESAM 锁模器件具有结构简单、使用方便、锁模稳定等优点,有很好的发展前景,可望取代有机染料成为闪光灯抽运的 Nd : YAG 激光器理想的被动锁模器件。

## 参考文献:

- [1] WANG J X, ZHANG W ZH, XING Q R, *et al.* Investigation of  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG passive mode-locking in a pulsed Nd : YAG laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, 30(5): 303-305.
- [2] KELLER U, MILLER D A B, BOYD G D, *et al.* Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd : YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17(7): 505-510.
- [3] ZHANG ZH G, NAKAGAWA T, TORIZUKA K, *et al.* Self-starting mode-locked  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG laser with a low-loss broadband semiconductor saturable-absorber mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(23):1768-1780.
- [4] FLUCK R, ZHANG G, KELLER U. Diode-pumped passively mode-locked  $1.3 \mu\text{m}$  Nd : YVO<sub>4</sub> and Nd : YLF lasers by use of semiconductor absorbers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(17): 1378-1380.
- [5] AUS DER A J, SCHAER S F, PASCHOTTA R, *et al.* High-power diode-pumped passively mode-locked Yb : YAG lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(18):1281-1283.
- [6] SPUHLER G J, SUDMEYER T, PASCHOTTA R, *et al.* Passively mode-locked high-power Nd : YAG lasers with multiple laser heads [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, 71: 19-25.

- [7] GORBUNOV M V, KONYASHKIN A V, KOSTRYUKOV P V, *et al.* Pulsed-pumped, all-solid-state, electro-optically controlled picosecond Nd : YAG lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, 35(1):2-6.
- [8] 郑玮,王清月,赵江山,等. 20 MHz 自启动克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光器[J]. 中国激光,2002, 29(6): 481-484. ZHENG W, WANG Q Y, ZHAO J SH, *et al.* Self-start Kerr-lens mode-locked Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser at repetition rates of 20 MHz [J]. *Chinese J. of Lasers*, 2002, 29(6): 481-484. (in Chinese)
- [9] 陈檬,张丙元,李港,等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd : YAG 激光器的研究 [J]. 中国激光,2004, 31(6): 646-648. CHEN M, ZHANG B Y, LI G, *et al.* Study on SESAM passively-mode-locked Nd : YAG laser [J]. *Chinese J. Laser*, 2004, 31(6): 646-648. (in Chinese)
- [10] 蔡志强,温午麒,姚建铨,等. 半导体可饱和吸收镜连续被动锁模端面抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 734-738. CAI Z Q, WEN W Q, YAO J Q, *et al.* Continuous-wave passively mode-locked diode end-pumped Nd : YVO<sub>4</sub> laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(6): 734-738. (in Chinese)
- [11] JU G F, CHAI L, WANG Q Y. Stable mode-locking in an Yb : YAG laser with a fast SESAM [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(12): 695-696. (in Chinese)
- [12] WANG Y G, MA X Y, LI CH Y, *et al.* Passive mode-locked diode-end-pumped Nd : YAG with semiconductor saturable absorption mirror grown by metal organic chemical vapor deposition [J]. *Chinese Physics Letters*, 2003, 20(11): 1960-1963. (in Chinese)
- [13] GUO L, HOU W, ZHANG H B, *et al.* Diode-end-pumped passively mode-locked ceramic Nd : YAG laser with a semiconductor saturable mirror [J]. *Optics Express*, 2005, 13(11):4085-4089.
- [14] 王勇刚,马晓宇,居桂方,等.用表态型半导体可饱和吸收镜实现 Yb : YAG 激光器被动调 Q 锁模[J]. 光子学报, 2005, 34(1): 11-13. WANG Y G, MA X Y, JU G F, *et al.* Passive Q-switched mode-locking diode-end-pumped Yb : YAG with surface-state type of semiconductor saturable absorption mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1): 11-13. (in Chinese)

作者简介:王加贤(1955—),男,福建泉州人,教授,博士,华侨大学信息科学与工程学院教授,主要研究方向为激光技术与固体激光器件,超短光脉冲技术与非线性光学,已发表论文 50 多篇。通信地址:福建省泉州市华侨大学信息科学与工程学院。E-mail: wangjx@hqu.edu.cn