

文章编号: 0258-7025(2010)08-1925-04

# 工作在 1341 nm 的 LD 纵向抽运腔倒空锁模 Nd:YAP 激光器

汪莎<sup>1,2</sup> 陈军<sup>1</sup> 葛剑虹<sup>1</sup> 刘崇<sup>1</sup> H. J. Eichler<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)  
(<sup>2</sup>柏林工业大学光学和原子物理研究所, 德国 柏林 10623)

**摘要** 报道了工作在 1341 nm 的激光二极管(LD)纵向抽运主被动锁模 Nd:YAP 激光器。该激光器采用 Nd:YAP 晶体作为增益介质,可饱和吸收体 V<sup>3+</sup>:YAG 作为被动锁模器件,声光调制器作为主动锁模器件。在抽运能量 50 mJ,抽运频率 10 Hz 的情况下获得了 0.82 mJ 的脉冲串输出。该脉冲串的半峰全宽为 570 ns,每个脉冲间的间隔为 7.7 ns,共包含约 75 个脉冲,单脉冲的平均能量为 11  $\mu$ J。采用电光晶体 RbTiOPO<sub>4</sub>(RTP)作腔倒空,获得了能量为 160  $\mu$ J,脉宽为 680 ps 的单脉冲输出。采用 InGaAs 红外探测器测得光斑大小约为 1.2 mm,激光传播因子 M<sup>2</sup> 约为 1.5。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 腔倒空; 1341 nm; Nd:YAP 晶体

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.1925

## Cavity Dumping of a Mode Locked Nd:YAP Laser Working at 1341 nm

Wang Sha<sup>1,2</sup> Chen Jun<sup>1</sup> Ge Jianhong<sup>1</sup> Liu Chong<sup>1</sup> H. J. Eichler<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)  
(<sup>2</sup> Institute of Optic and Atomic Physics, Technical University Berlin, Berlin 10623, Germany)

**Abstract** A laser diode (LD) end pumped active- and passive- mode locked Nd:YAP laser at 1341 nm is reported. A Nd:YAP laser crystal is used as gain material. A saturable absorber V<sup>3+</sup>:YAG is used for passive mode locking and an acousto-optical modulator (AOM) is used for active mode locking. The output pulse train with a total energy of 0.82 mJ is obtained under the conditions of pump energy of 50 mJ and frequency of 10 Hz. The full-width at half-maximum (FWHM) is measured as 570 ns. The pulse repetition period is 7.7 ns. There are around 75 pulses in the pulse train, and each pulse has an average energy of about 11  $\mu$ J. An opto-electronic RbTiOPO<sub>4</sub>(RTP) crystal works as a cavity dumper. A single pulse of 160  $\mu$ J with pulse duration of 680 ps is obtained. The laser beam diameter is measured as 1.2 mm and the beam propagation factor M<sup>2</sup> is around 1.5 by using an InGaAs infrared detector.

**Key words** lasers; solid state lasers; cavity dumping; 1341 nm; Nd:YAP crystal

## 1 引言

1.3  $\mu$ m 激光器在医学上有广泛的应用。其在治疗消化道疾病<sup>[1]</sup>和切除头颈部血管瘤<sup>[2]</sup>上已有了较为深入的研究和报道。1.3  $\mu$ m 激光作为抽运源的拉曼激光器的拉曼波长都在人眼安全范围内(1.5~1.6  $\mu$ m),可用作医疗和雷达等方面<sup>[3,4]</sup>。另外 1.3  $\mu$ m 激光还可用于光纤通信<sup>[5]</sup>;其倍频输出为红光,是获得高功率红光的方法之一<sup>[6]</sup>。相比于

Nd:YAG,Nd:YAP 激光介质为双折射晶体,其激光输出为线偏振光<sup>[7]</sup>。其在 1341 nm 的发射截面积为  $2.2 \times 10^{-19}$  cm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>,大约是 Nd:YAG 的 2.5 倍。本文采用 Nd:YAP 作为激光增益介质获得 1341 nm 的激光输出。锁模技术通常为获得皮秒量级的脉冲输出的有效办法。但通常锁模激光器输出的能量较小。在已有的报道中,1341 nm 的被动锁模输出脉冲串能量都为 10  $\mu$ J 量级,其中每个脉冲的能量为

收稿日期: 2009-12-21; 收到修改稿日期: 2010-01-19

作者简介: 汪莎(1982—),女,博士研究生,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。E-mail: anskina@hotmail.com

导师简介: 陈军(1946—),女,博士,教授,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

(通信联系人)

几百个纳焦量级<sup>[5,8,9]</sup>。为了获得较大能量的锁模脉冲,本文采用主被动锁模腔倒空技术,获得了单脉冲能量约为 160  $\mu\text{J}$  的振荡光输出。

## 2 实验装置及结果

图 1 为工作在 1341 nm 的激光二极管(LD)纵向抽运腔倒空主被动锁模 Nd:YAP 激光器的实验装置。实验中采用一个峰值功率为 1000 W,工作在 10 Hz 下的 LD。望远镜系统  $L_1$  和  $L_2$  将光纤输出的抽运光耦合进激光增益介质 Nd:YAP 中,其中透

镜  $L_1$  的焦距为 100 mm,透镜  $L_2$  的焦距为 150 mm,抽运光斑的束腰约为 1.5 mm。因为 Nd:YAP 介质在 1080 nm 的发射面积远大于其在 1341 nm 处的发射面积,所以为了获得 1341 nm 的激光输出,必须抑制 1080 nm 处的振荡。实验中,Nd:YAP 激光介质镀有对 1080 nm 和 1341 nm 的增透膜。激光腔中所有腔镜都镀有对 1080 nm 高透(透射率大于 90%),对 1341 nm 高反的膜。输出激光用 HP 70950A 光谱分析仪测试,在 900~1700 nm 内只有 1341 nm 有激光输出,如图 2 所示。

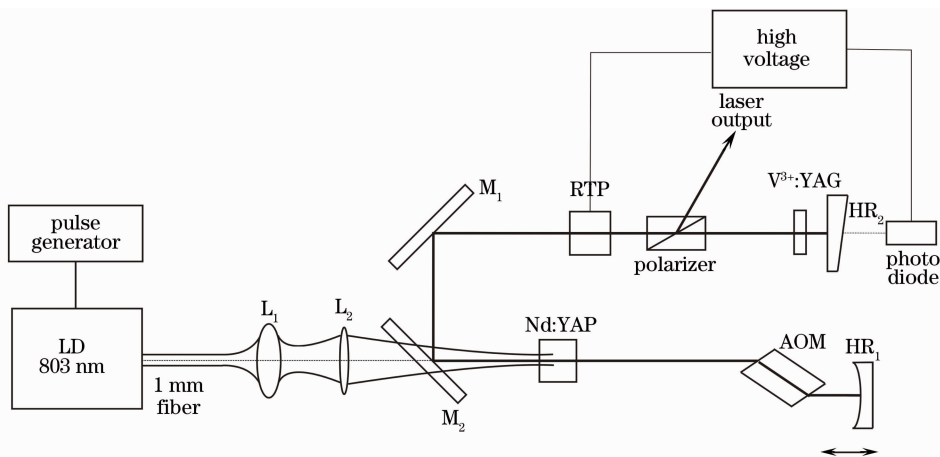


图 1 LD 纵向抽运腔倒空主被动锁模 Nd:YAP 激光器的实验装置

Fig. 1 Experiment setup of LD end pumped cavity dumped active- and passive-mode locked Nd:YAP laser

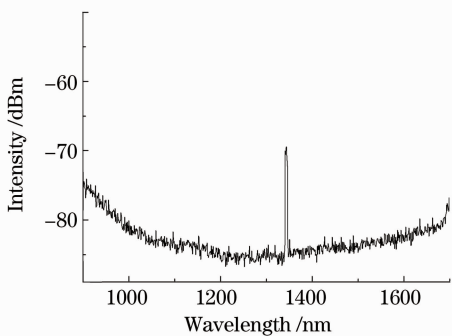


图 2 HP 70950A 光谱分析仪测得的波长

Fig. 2 Laser wavelength detected by optical spectrum analyzer HP 70950A

实验中采用可饱和吸收体  $V^{3+}:\text{YAG}$  进行被动锁模。 $V^{3+}:\text{YAG}$  的初始透射率为 89%。由于被动锁模的稳定性较差,且常出现卫星脉冲,所以在被动锁模的基础上再加一个主动调制器,构成主被动结合的锁模器件。主动锁模器件声光驻波调制器(AOM)为布儒斯特角切割,工作频率(即给声光驻波调制器注入的声频) $f=65\text{ MHz}$ 下,其对应的调制频率为  $2f=130\text{ MHz}$ ,该调制频率要求的光学腔

长为 1153.8 mm。高反镜  $\text{HR}_1$  可调整其位置以获得与调制频率匹配的最佳腔长。需要提出的是在实验中并没有对腔长进行即时补偿调整,也就是说对偶然的干扰,比如调制频率的漂移,或者人为的扰动,腔长并不能随之变化。因此锁模脉宽并没有达到最佳值。

实验装置中电光晶体  $\text{RbTiOPO}_4$  (RTP)和偏振片一起构成腔倒空器件。开始时,电光晶体上加半波电压。p 偏振光通过电光晶体变成 s 偏振光,该 s 偏振光通过偏振片,在腔内形成激光振荡。当腔内的累积能量达到最大值后,位于高反镜(反射率  $R=99.5\%$ ) $\text{HR}_2$  后的光电二极管探测到激光输出串的最大脉冲时,给提供高压的电源触发信号,关闭加在电光晶体上的半波电压。电压关闭的下降沿时间约为 6 ns,小于两个脉冲之间的间隔时间。此时振荡光通过电光晶体后的偏振态不发生改变,从偏振片反射出腔内获得激光输出。随后电压开始缓慢上升,其上升沿时间约 100 ns,如图 3 所示。在电压关闭的时间段内,顺利地从小腔内选出最大能量的激光脉冲后续的一个激光。

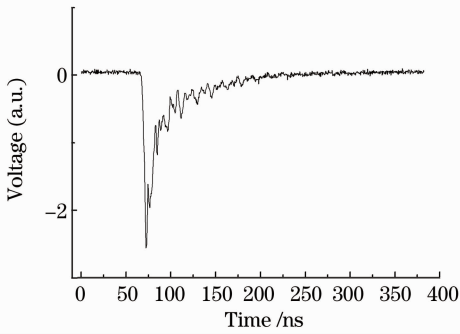


图3 高压开关的时间形状

Fig. 3 Time shape of voltage off and on process

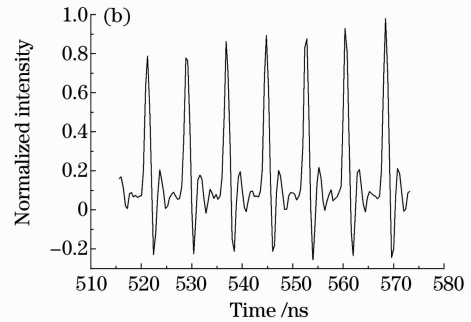
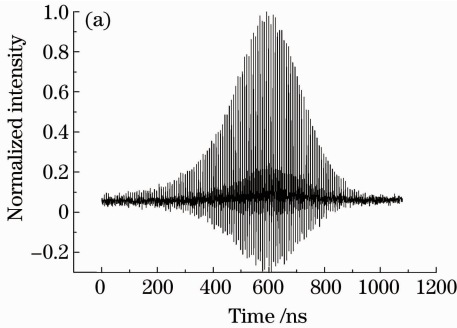


图4 (a)主被动锁模的激光脉冲串输出;(b)脉冲序列段精细结构

Fig. 4 (a) Laser pulse train with active and passive mode locking; (b) several pulses in the output pulse train

图5为腔倒空的激光脉冲输出。在示波器上测得的脉宽为 680 ps,该值为所有测量仪器下的分辨极限值。图中所示脉冲后的振荡为光电二极管和电缆中的信号反射等原因造成,并不是实际的光信号脉冲形状。测得的脉冲能量为 160  $\mu\text{J}$ 。由于电光晶体 RTP 在高能量时具有一定的热致退偏效应,且偏振片对 p 偏振光并不是 100%高透,所以输出脉冲有前置脉冲(由于前置脉冲和主脉冲的能量比在 1:100 量级,所以在图 5 中并不能清楚地看到前置脉冲)。实验中采用了 InGaAs 红外探测器测量了光斑大小约为 1.2 mm,测得的激光传播因子  $M^2$  约为 1.5。

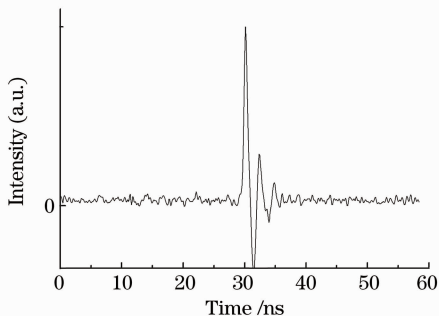


图5 腔倒空激光脉冲输出

Fig. 5 Output of cavity dumped laser

采用一个耦合输出率为 9%的平面镜代替高反镜  $\text{HR}_1$ 。抽运光的脉宽为 200  $\mu\text{s}$ ,工作频率为 10 Hz。在实验中采用 InGaAs 光电二极管和 Tektronix TDS 680B 示波器 (1 GHz,  $5 \times 10^{-4}$  T/s) 探测激光输出脉冲形状。在抽运能量 50 mJ,抽运频率 10 Hz 的情况下获得了 0.82 mJ 的脉冲串输出,如图 4 所示。该脉冲串的半峰全宽为 570 ns。由于每个脉冲间的间隔为  $1/(2 \times 65 \text{ MHz}) = 7.7 \text{ ns}$ ,所以该脉冲串中包含有约 75 个脉冲,单脉冲的平均能量为 11  $\mu\text{J}$ 。当抽运能量再加大后,将输出多个脉冲串脉冲。

### 3 结 论

对工作在 1341 nm 的电光腔倒空激光二极管纵向抽运主被动锁模 Nd:YAP 激光器进行了实验研究。实验中获得了能量为 160  $\mu\text{J}$ ,脉宽为 680 ps 的锁模单脉冲输出,该单脉冲能量远大于已知的报道结果。在将来的研究中,可以将该单脉冲进行进一步的放大以获得更高的能量输出。

### 参 考 文 献

- Jia Fang, Wang Xiuqi, Ma Junzhong. Report on 45 patients with digestive diseases who were treated by the Nd:YAP laser with endoscope[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 1054~1058  
贾方,王修齐,马君忠. 1341.4 nm Nd:YAP 激光内镜下治疗消化道疾病 45 例报告[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11): 1054~1058
- Chen Ming, Shen Hongyuan, Ye Qing *et al.*. The clinic study of treating hemangioma and vascular malformation in the otorhinolaryngological and head neck area by means of 1341 nm Nd:YAP laser irradiation incision[J]. *Chin. J. Ophthalmol and Otorhinolaryngol*, 2002, **2**(6): 352~357  
陈明,沈鸿元,叶青等. 1341 nm Nd:YAP 激光器切除头颈部血管瘤和血管畸形的临床研究[J]. *中国眼耳鼻喉科杂志*, 2002, **2**(6): 352~357
- J. J. Romero, E. Montoya, L. E. Bausa *et al.*. Multiwavelength laser action of  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$  singlecrystals grown by the laser heated pedestal growth method [J]. *Optical Materials*, 2004, **24**(4): 643~650

- 4 N. Takei, S. Suzuki, F. Kannari. 20 Hz operation of an eye safe cascade Raman laser with a  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  crystal[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **74**(6): 521~527
- 5 M. Li, S. Zhao, K. Yang *et al.*. Diode-pumped 1.34  $\mu\text{m}$ -Q-switched and mode-locked Nd:GdVO<sub>4</sub> laser by a V<sup>3+</sup>:YAG saturable absorber[J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(5): 933~938
- 6 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu *et al.*. Study on CW Nd:YAG laser at 1319 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30** (10): 881~884  
王 涛,姚建铨,李喜福 等. 波长为 1319 nm 的连续输出 Nd:YAG 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 881~884
- 7 A. H. Li, H. Y. Zhu, G. Zhang. *et al.*. Diode side-pumped 1.3414  $\mu\text{m}$  Nd:YAP laser in Q-switched mode[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(33): 8002~8006
- 8 A. Agnesi, A. Guandalini, G. Reali *et al.*. Diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1.34  $\mu\text{m}$  Q-switched and mode locked by a V<sup>3+</sup>:YAG saturable absorber[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194** (4-6): 429~433
- 9 Kejian Yang, Shengzhi Zhao, Jingliang He *et al.*. Diode-pumped passively Q-switched and modelocked Nd:GdVO<sub>4</sub> laser at 1.34  $\mu\text{m}$  with V:YAG saturable absorber[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20176~20185

\*\*\*\*\*

## Chinese Optics Letters

### 首个影响因子位列亚洲入选 SCI 光学类期刊第 2 名

根据美国科学信息研究所 (ISI) 2010 年 6 月 18 日公布的期刊引证报告 (JCR), Chinese Optics Letters (COL) 2009 年的 SCI 影响因子为 0.804。

COL 创刊于 2003 年, 2007 年开始即被 SCI 收录。根据 ISI 影响因子的计算方法, JCR 从 2009 年开始首次公布 COL 的影响因子等有关数据。在全球入选 SCI 的 70 种光学类期刊中排名第 39 位 (总被引频次排名第 36 位), 在亚洲 (包括中国、韩国、新加坡、日本等) 入选 SCI 的光学类期刊中排名第 2 (总被引频次排名第 1), 在中国入选 SCI 的 114 种期刊中排名前 40%。

COL 是由中国光学学会和中国科学院上海光学精密机械研究所联合主办, 上海交通大学协办, 美国光学学会 (OSA) 全球发行的国际性英文版学术期刊。COL 创刊时即坚持走国际化办刊路线, 其宗旨是快速、全方位地报道国际光学研究领域的最新理论、实验和技术创新成果。在创刊不久, 即被国际知名检索机构 EI, CA, CSA 收录, 2006 年被 OSA 主办的 OpticsInfoBase 收录 (2009 年 COL 论文在 OpticsInfoBase 的年下载量为 24,137 次, 比 2007 年增长了 3 倍多), 2007~2008 年又相继被 SCI-E 和 MSB-S 收录。

COL 的创刊和现任主编为徐至展院士, 并拥有由 40 多名在光学各个领域有突出成就的专家组成的编委会 (其中国外编委比例超过 20%), 还拥有一支工作在光学科研一线的出色的审稿专家队伍 (其中国外审稿专家比例超过 35%)。在他们的支持和帮助以及编辑部人员的共同努力下, COL 不断成长, 现已发展为国内外光学研究的一个重要的成果传播平台。