

文章编号: 0258-7025(2010)09-2419-05

# 15.5 W 全固态腔外和频 589 nm 黄光激光器

鲁燕华 张 雷 刘晟西 魏 彬 唐 淳 武德勇 王卫民

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 报道了一台平均功率 15.5 W, 重复频率 5 kHz 的激光二极管(LD)抽运全固态 589 nm 黄光激光器。用声光调 Q 的 LD 抽运 Nd:YAG 固体激光器产生 1064 nm 与 1319 nm 的基频光, 并在腔外通过两块 LBO 晶体和频产生 589 nm 黄光激光。为提高和频转换效率, 对 1064 nm 与 1319 nm 基频光的功率配比及脉冲宽度进行了优化设计, 并采用电子学延迟技术使二者在时域上同步。当 1064 nm 和 1319 nm 基频光总平均功率为 140 W, 匹配温度为 43.5 °C 时, 获得了 15.5 W 的 589 nm 激光输出, 和频效率约 11.1%, 重复频率 5 kHz, 脉宽约 110 ns。

**关键词** 激光器; 全固态; 腔外和频; 黄光激光; LBO 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2419

## 15.5 W All-Solid-State Extra-Cavity Sum-Frequency Generation 589 nm Yellow Laser

Lu Yanhua Zhang Lei Liu Shengxi Wei Bin Tang Chun Wu Deyong Wang Weimin  
(*Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

**Abstract** A 15.5-W average power, 5-kHz repetition rate laser diode(LD) pumped all-solid-state 589 nm yellow laser was reported. Two acoustic-optic Q-switched LD pumped Nd:YAG lasers of 1064 nm and 1319 nm were used as the basic-frequency lasers. The 589 nm yellow laser was generated by extra-cavity sum-frequency generation(SFG). To get high SFG efficiency, the power ratio and pulse widths of 1064 nm and 1319 nm were optimized. Moreover, the electronic delay technology was employed to make the two lasers time-synchronization. When the total power of 1064 nm and 1319 nm was 140 W, the output power of 589 nm laser was 15.5 W at the matching temperature of 43.5 °C. The conversion efficiency of SFG was about 11.1%. The repetition frequency of the laser was 5 kHz with the pulse width of about 110 ns.

**Key words** lasers; all-solid-state; extra-cavity sum-frequency generation; yellow laser; LBO crystal

### 1 引 言

589 nm 激光属于黄光(550~650 nm)激光, 在激光显示与照明、激光测量、生物医疗等领域有着广泛的应用需求<sup>[1]</sup>。同时, 由于 589 nm 黄光激光正好对应大气中间层钠原子最强的 D<sub>2</sub> 吸收线, 因此, 在天文钠导星自适应光学及空间目标识别与探测方面也有着重要应用<sup>[2]</sup>。最早获得高功率 589 nm 黄光激光器的方法是采用染料激光器<sup>[3,4]</sup>。近年来, 激光二极管(LD)抽运全固态激光器以其结构紧凑、转换效率高、安全可靠等特点获得迅猛发展, 利用基于 Nd:YAG 激光器的和频 589 nm 黄光激光器在国

内外同行中被广泛采用<sup>[5~11]</sup>。

2004 年, 美国芝加哥大学与 Caltech 合作为 Palomar 天文台发展了 8 W 腔外和频 589 nm 激光器<sup>[5]</sup>。2005 年, 美空军研究实验室星火光学靶场利用 LD 抽运的全固态 1064 nm 及 1319 nm 激光器腔外和频产生了 50 W 连续 589 nm 激光器<sup>[6]</sup>。2008 年, 洛克希德·马丁相干技术公司为 Gemini South 天文台开发了基于 LD 抽运 Nd:YAG 激光器的功率为 55 W 的 589 nm 黄光激光器<sup>[7]</sup>。

国内 2006 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所利用 LD 抽运 Nd:YAG 腔内和频获得

收稿日期: 2010-01-19; 收到修改稿日期: 2010-02-01

作者简介: 鲁燕华(1981—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: happyleo@yahoo.com.cn

了860 mW连续 589 nm 激光输出<sup>[8]</sup>。同年,中国科学院物理研究所采用 V 型腔腔内和频产生了 3 W 连续 589 nm 黄光激光器<sup>[9]</sup>。2008 年,固体激光技术国家重点实验室利用复合腔型腔内和频获得了最高平均功率10.5 W,重复频率 5 kHz 的 589 nm 黄光激光器<sup>[10]</sup>。2009 年西北大学用腔内和频获得了 5.7 W,5 倍衍射极限的 589 nm 黄光输出,重复频率 18 kHz<sup>[11]</sup>。

国内的研究机构均是采用腔内和频的方案获得 589 nm 黄光输出,但介绍利用腔外和频途径获得 589 nm 黄光激光的报道却很少。2009 年,鲁燕华等<sup>[12]</sup>报道了 1.52 W 输出功率的腔外和频 589 nm 黄光激光器。本文在以往工作基础上对激光器工作

体制进行了改进,并大幅提升 1064 nm 与 1319 nm 基频激光输出功率,在 140 W 总基频激光功率下,获得了 15.5 W 的 589 nm 激光输出,重复频率 5 kHz,脉宽约 110 ns。

## 2 激光器设计

激光器设计采用 LD 抽运的固体激光器腔外和频的技术途径,其主要的方法是采用声光(AO)调 Q 的 1064 nm 和 1319 nm 两种红外激光作为基频光,并采用电学延迟控制技术使二者在时间上同步,然后缩束聚焦通过两块非临界 I 类相位匹配 LBO 晶体,和频产生了 589 nm 黄光激光,设计光路图如图 1 所示。

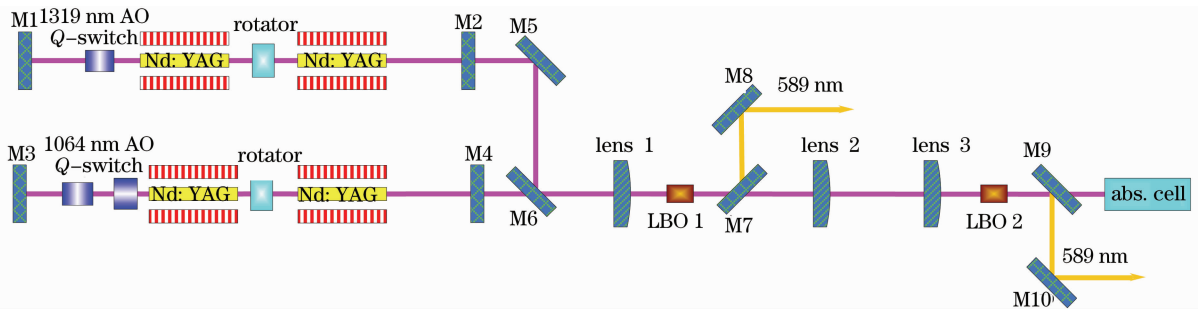


图 1 激光器装置示意图

Fig. 1 Sketch map of laser

图 1 中 1064 nm 与 1319 nm 均采用双棒串接平平对称腔。1319 nm 谐振腔包含全反镜 M1,输出镜 M2,两个 24 Bar 连续抽运模块,一个声光 Q 开关和一个 90°石英旋转片。1064 nm 谐振腔结构基本与 1319 nm 相同,它由全反镜 M3,输出镜 M4,两个 20 Bar 抽运模块,两个声光 Q 开关和一个 90°石英旋转片组成。腔内插入声光 Q 开关的目的是为了获取高峰值功率的调 Q 激光脉冲输出。关键部件——四个连续抽运模块均为自行研制封装,并且两两结构相同,每两个抽运模块中间插入 90°石英旋转片补偿热致双折射和热致退偏。

1064 nm 与 1319 nm 由谐振腔输出后通过平面镜 M5(1319 nm 全反膜)、平面镜 M6(1319 nm 全反,1064 nm 高透)和聚焦透镜 lens 1 到达第一块 LBO(图 1 中 LBO1),产生的第一束 589 nm 黄光通过分光镜 M7 和 M8 输出。余下的 1064 nm 和 1319 nm 激光再通过 lens 2, lens 3 在第二块 LBO 晶体(图 1 中 LBO2)继续产生 589 nm 黄光激光,第二束 589 nm 黄光激光通过分光镜 M9(589 nm 全反,1064 nm 和 1319 nm 减反)和 M10 输出。图中 lens 1, lens 2 和 lens 3 均为  $f=120$  mm 正透镜,并

且 lens 1 和 lens 2 构成  $4f$  像传递系统。分光镜 M7, M8, M9 和 M10 完成相同,均镀制 589 nm 全反,1064 nm 和 1319 nm 减反膜层。

图 1 中 LBO1 和 LBO2 晶体参数完全相同,均采用非临界 I 类相位匹配,切割角度  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=0^\circ$ ,晶体长度 30 mm。此时 LBO 不存在走离效应,具备很大的相位匹配接收角,通过温度调节实现调谐输出。对比于其他可以温度调谐的晶体,LBO 还具有一个相对比较大的相位匹配允许温度。此外,LBO 对基频光与和频光的吸收均很小,抗损伤阈值高,有利于高峰值功率密度工作。由于图 1 中激光器基频光未进行偏振选择,因此两块 LBO 晶体相互之间需旋转 90°放置,以充分利用两基频光的 p 偏振分量和 s 偏振分量。

由于 1064 nm 与 1319 nm 增益存在较大差异,两者在调 Q 运转时在时域上脉宽、相位均不一致,因此需对谐振腔结构及 Q 开关驱动信号进行优化设计。首先,必须尽可能缩短 1319 nm 谐振腔长、增加 1064 nm 谐振腔长(图 1 中 1319 nm 谐振腔长 640 mm,1064 nm 谐振腔长 900 mm),才能减少二者调 Q 激光脉冲宽度之间的差异。其次,对

1064 nm 与 1319 nm Q 开关驱动信号采用同一信号源(重复频率 5 kHz),并在 1064 nm Q 开关电源前增加一个电学延迟控制模块,通过电学延迟控制模块的主动调节实现 1064 nm 与 1319 nm 调 Q 后的激光脉冲相位同步。

### 3 实验结果与分析

根据所设计的 1064 nm 与 1319 nm 基频激光器,获得两者随抽运电流的功率输出分别如图 2,3 所示。

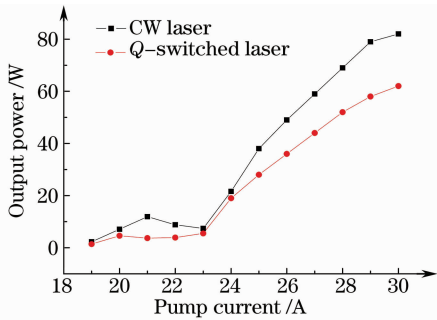


图 2 1064 nm 激光功率曲线

Fig. 2 Power curves of 1064 nm laser

在图 2,3 中,横坐标抽运电流代表每个谐振腔内两个抽运模块的工作电流是相同的。由图可知,1064 nm 阈值电流约为 19 A,当工作电流在 30 A 时,连续激光输出 82 W,调 Q 后输出 62 W;1319 nm 阈值电流约为 22 A,当工作电流在 33 A 时,连续激光输出 99 W,调 Q 后输出 78 W。图 2,3 中 1064 nm 与 1319 nm 功率曲线均存在一个拐点(其中 1064 nm 尤为明显),这是因为抽运模块的热效应随工作电流变化而变化,对应设计的固定腔型,在某一工作电流附近,激光器会由热稳区工作突变为介稳区工作,大大增加谐振腔损耗,从而导致输出功率降低。为获得高功率 589 nm 黄光激光输出,1064 nm 与 1319 nm 均工作于最大电流点,即二者调 Q 功率分别为 62 W 和 78 W。

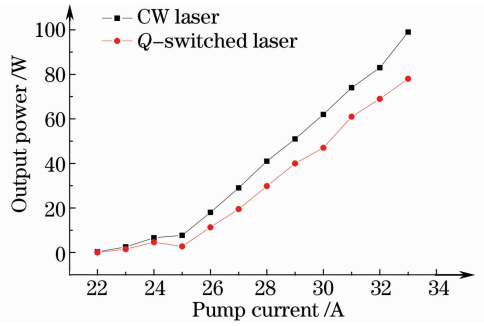


图 3 1319 nm 激光功率曲线

Fig. 3 Power curves of 1319 nm laser

利用所优化设计的谐振腔结构及 Q 开关驱动信号,实现了 1064 nm 与 1319 nm 调 Q 后激光脉冲在时域上的最佳重叠,如图 4 所示。

图 4 中,1064 nm(较窄脉冲)脉宽约为 116 ns,1319 nm(较宽脉冲)脉宽约为 206 ns,二者重复频率均为 5 kHz,同步后两激光器脉冲能保证中心区域绝大部分对准,且十分稳定。

当时间同步后的 1064 nm(62 W 输出功率)与 1319 nm(78 W 输出功率)共 140 W 注入和频晶体时,第一块 LBO 晶体获得了 9.2 W 的 589 nm 黄光激光输出,第二块 LBO 晶体获得 6.3 W 黄光激光输出,总计获得 589 nm 黄光功率 15.5 W,和频效率约 11.1%,重复频率 5 kHz,脉宽约 110 ns,图 5 是实验装置实物图。

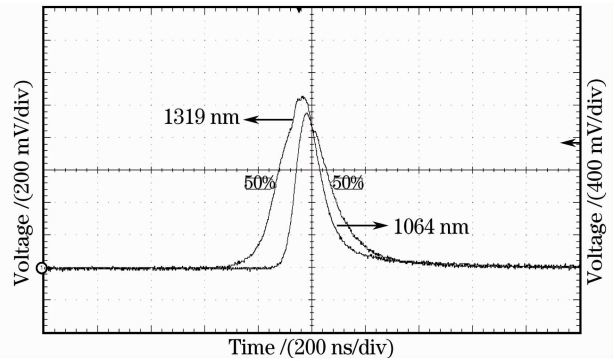


图 4 时间同步后的两激光脉冲

Fig. 4 Time synchronization of two laser pulses

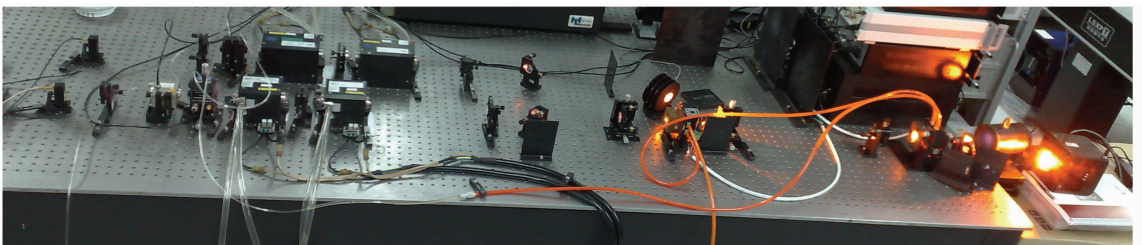


图 5 实验系统照片

Fig. 5 Photo of experiment system

实验发现,虽然第一块 LBO 晶体与第二块 LBO 晶体加工参数完成一样,匹配温度及缩束透镜也相同,但获得的和频光功率差异较大,相差 30% 以上。这是因为:1)两块 LBO 晶体彼此旋转  $90^\circ$  放置,利用的基频光偏振分量不一致,1064 nm 与 1319 nm 两偏振分量功率差别 15%~20%;2)和频晶体 LBO1,分光镜 M7,透镜 lens 2 和 lens 3 对基频光损耗约 5%;3)虽然两块 LBO 晶体采用的缩束透镜完全一样,但光路经过透镜、分光镜等传输、聚焦后光斑大小及空间重叠性难以保证完全一致。

腔外和频隔离了腔内和频存在的 1064 nm 与

1319 nm 激光脉冲之间的互相干扰,容易获得稳定的激光输出,图 6 是第一束 9.2 W 黄光激光的功率稳定性测量结果。

图 6 中采集了连续 3028 个功率点,功率波动位于 8.94~9.30 W 之间,不稳定性约为 0.8% (均方根值)。

同时用 SP-500I 光谱分析仪测量第一束与第二束激光光谱,结果均为 589 nm,如图 7 所示。由图 7 可知,所获得的黄光激光光谱为单一谱线,中心波长对准 589 nm,证实该激光由 1064 nm 与 1319 nm 和频产生。

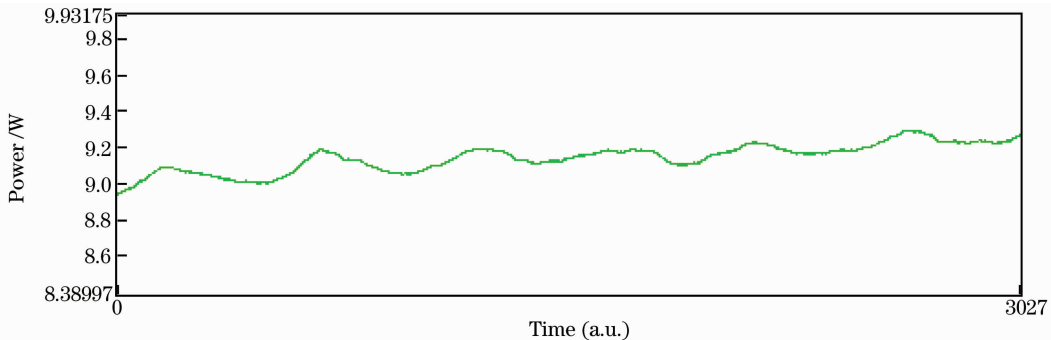


图 6 第一束 589 nm 激光功率稳定性

Fig. 6 Power stability of the first 589 nm laser beam

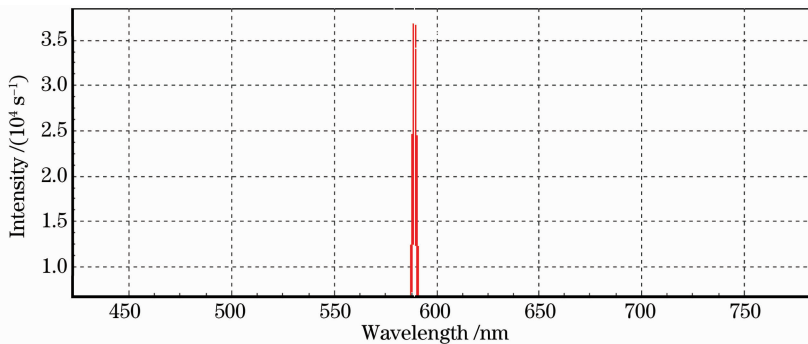


图 7 589 nm 激光光谱

Fig. 7 Spectra of 589 nm laser

## 4 结 论

通过 1064 nm 与 1319 nm 腔外和频获得了重复频率 5 kHz,平均功率 15.5 W 的全固态 589 nm 黄光激光输出,验证了腔外和频方案用于发展高功率 589 nm 黄光激光器是可行的。下一步工作将对系统的和频效率及光束质量进行深入研究,以获得更高亮度的 589 nm 黄光激光输出。

## 参 考 文 献

1 Wang Zhichao, Du Chenlin, Ruan Shuangchen. Research progress of all-solid-state yellow lasers [J]. *Laser &*

*Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 29~36

王志超, 杜晨林, 阮双琛. 全固态黄光激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 29~36

2 Jia Shui. Na laser guidestar technology in adaptive optical image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, **39**(4): 10~13

佳水. 自适应成像中的 Na 激光导星技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, **39**(4): 10~13

3 S. Rabiens, R. I. Davis, T. Ott *et al.*, Test performance of PARSEC laser system[C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 981~988

4 D. Bonaccini, E. Allaert, C. Araujo *et al.*. The VLT laser guide star facility[J]. *SPIE*, 2003, **4839**: 381~392

5 V. Velur, E. J. Kibblewhite, R. G. Dekany *et al.*. Implementation of the Chicago sum frequency laser at Palomar laser guide star test bed[C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 1033~1040

6 C. A. Denman, P. D. Hillman, G. T. Moore *et al.*. Realization of a 50-watt facility-class sodium guidestar pump laser [C].

- SPIE*, 2005, **5707**: 46~49
- 7 I. Lee, M. Jalali, N. Vanasse *et al.*. 20 W and 50 W guidestar laser system update for the Keck I and Gemini south telescopes [C]. *SPIE*, 2008, **7015**: 1~11
- 8 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. Laser diode array pumped Nd:YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 438~442  
吕彦飞, 檀慧明, 钱龙生. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG 腔内双波长运转 589 nm 和频激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 438~442
- 9 Geng Aicong, Bo Yong, Bi Yong *et al.*. A 3 W continuous-wave 589 nm yellow laser based on the intracavity sum frequency generation in a V-shaped cavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5227~5230  
耿爱丛, 薄勇, 毕勇等. V型腔腔内和频产生 3 W 连续波 589 nm 黄光激光器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5227~5230
- 10 Liang Xingbo, Yuan Ligang, Jiang Dongsheng *et al.*. 10.5 W quasi continuous wave yellow laser at 589 nm [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(9): 876~878  
梁兴波, 苑利钢, 姜东升等. 10.5 W 准连续波 589 nm 黄光激光器[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(9): 876~878
- 11 Xiuyan Chen, Xiu Li, Haolei Zhang *et al.*. 589 nm yellow laser generation by intra-cavity sum-frequency mixing in a T-shaped Nd:YAG laser cavity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 815~818
- 12 Lu Yanhua, Liu Dong, Zhang Lei *et al.*. 400 Hz all-solid-state sum-frequency sodium guidestar laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1898~1901  
鲁燕华, 刘东, 张雷等. 400 Hz 全固态和频钠导星激光器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1898~1901