

文章编号: 0258-7025(2009)07-1848-04

# 全固态窄线宽钠导星激光器

鲁燕华 刘东 张雷 马毅 唐淳 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** 研制了一台重复频率 400 Hz, 平均功率 1.0 W 的激光二极管抽运全固态窄线宽钠导星激光器。利用两路波长分别为 1064 nm 和 1319 nm 的声光(AO)调 Q 激光器作为基频光, 在腔外通过三硼酸锂(LBO)晶体和频产生(SFG)589 nm 钠导星激光, 和频效率约达 20%。每路基频光均采用标准具压窄线宽, 输出和频光线宽约 1.8 GHz, 并调节控制标准具的温度和倾斜角度将中心波长锁定于 589.159 nm(偏差 $\pm 1$  pm), 实现了激光器谱线与钠原子 D<sub>2</sub> 线的精确匹配。

**关键词** 激光器; 钠导星; 和频; 线宽; 标准具

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1848

## All-Solid-State Narrow Linewidth Sodium Guide Star Laser

Lu Yanhua Liu Dong Zhang Lei Ma Yi Tang Chun Wang Weimin

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** A laser diode-pumped all-solid-state narrow linewidth sodium guide star laser was developed. The repetition rate was 400 Hz and the average power was 1.0 W. Two acousto-optic (AO) Q-switched lasers of 1064 nm and 1319 nm were used as basic-frequency lasers, and then 589 nm sodium guide star laser was generated through an extra-cavity sum-frequency generation (SFG) lithium triborate (LBO) crystal. The efficiency of sum-frequency generation was about 20%. Each of the basic frequency lasers was adopted well-designed etalons to narrow the linewidth. The linewidth of the 589 nm laser was controlled to about 1.8 GHz. The central wavelength was locked to 589.159 nm( $\pm 1$  pm) by tuning the temperature and angle of the etalons. In the end, the sodium guide star laser's spectra was exactly matched to the D<sub>2</sub> line of the sodium atoms.

**Key words** lasers; sodium guide star; sum-frequency generation; linewidth; etalon

## 1 引言

在距离地面平均高度 92 km, 厚度 10 km 的大气中间层处存在大量的钠原子, 将地面上激光器对准钠原子的最强的 D<sub>2</sub> 吸收线(真空波长值 589.159 nm), 可激发产生共振荧光, 以作为天文自适应光学的人造导引星, 这一特殊的激光器称为钠导星激光器<sup>[1~3]</sup>。目前国际上已有利用钠导星激光器开展发射、接收实验, 星火光学领域利用 1319 nm 和 1064 nm Nd:YAG 激光器和频产生了 50 W 连续单频 589 nm 激光器<sup>[4]</sup>。相干技术公司为 Gemini North 天文台开发了基于 Nd:YAG 激光器的功率 16 W 的连续锁模激光系统<sup>[5]</sup>。V. Velur 等<sup>[6]</sup>发展了 8 W 宏微脉冲 Nd:YAG 和频激光器。国内吕彦飞等<sup>[7]</sup>采用复合腔腔内和频的方式获得了

340 mW 的 589 nm 连续输出, 耿爱丛等<sup>[8]</sup>采用 V 型腔腔内和频产生了 3 W 连续波 589 nm 黄光激光器, 但这些激光器均未提及中心波长对准与线宽压窄。马毅等<sup>[9]</sup>利用腔外和频获得了 500 mW 准连续调 Q 钠黄光输出, 线宽约 10 GHz, 但针对大气中间层钠原子的特性, 钠信标光源除了波长要求严格对准钠 D<sub>2</sub>a 线之外, 激光线宽应小于大气钠原子多普勒展宽吸收带宽 3 GHz。为此, 本文在文献<sup>[9]</sup>的基础上对激光器进行了优化改进, 用两台线宽控制更窄的 1064 nm 与 1319 nm 激光器外腔和频。

## 2 激光器设计

在能产生钠导星的众多技术路线中, 激光二极管抽运全固态激光器(DPSSL)和频产生 589 nm 钠

收稿日期: 2008-09-01; 收到修改稿日期: 2008-12-30

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

黄光是其中使用较成熟的一项技术,主要的方法是采用两台适当调谐的激光二极管抽运 Nd:YAG 激光器产生 1064 nm 和 1319 nm 两种红外基频激光,然后利用非线性晶体的腔外和频产生 589 nm 钠信标激光,设计光路图如图 1 所示。

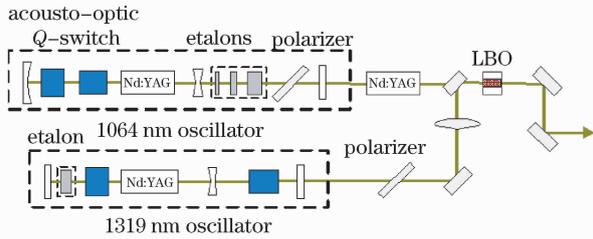


图 1 钠导星激光器原理示意图

Fig. 1 Sketch map of sodium guide star laser

1064 nm 振荡器采用单通主振荡功率放大(MOPA)结构,1319 nm 振荡器采用单谐振腔结构,两路基频光均采用声光(AO)Q 开关来获取高功率的激光脉冲,并在腔内插入标准具来压窄两路基频光线宽。两路基频光经过腔外耦合、缩束,通过三硼酸锂(LBO)晶体的非线性和频效应产生(SFG) 589 nm 钠信标激光,经两次分光后全部滤掉 1064 nm 与 1319 nm 激光,获得纯净的 589 nm 钠黄光激光。

由于 Nd:YAG 的 1064 nm 受激发射截面( $2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ )约是 1319 nm( $8.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )的 3 倍,而且在 1319 nm 附近存在与其受激发射截面接近的 1338 nm( $9.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ),因此在 1319 nm 谐振腔内必须抑制 1064 nm 与 1338 nm 激光。采取特殊的镀膜方法实现这一目的,即在 1319 nm 全反镜对 1319 nm 全反、对 1064 nm 减反,输出镜对 1064 nm 减反、对 1319 nm 与 1338 nm 部分反射,且对 1338 nm 反射率低于 1319 nm。

1064 nm 与 1319 nm 抽运模块均工作于 400 Hz 重复频率,250  $\mu\text{s}$  脉宽的脉冲信号,并利用声光调 Q 技术来获取高功率密度的脉冲激光。声光 Q 开关在抽运模块驱动电源信号延迟 240  $\mu\text{s}$  瞬间打开,为能完全关断,获得较好调 Q 脉冲输出,1064 nm 与 1319 nm 谐振腔每路均采用两个声光 Q 开关,如图 1 所示。每路谐振腔内的两个声光 Q 开关结构相同,且采用完全一样的驱动信号。

为满足钠导星中心波长以及线宽要求,在腔内插入了标准具,通过标准具倾角和温度的调节实现波长调谐,利用标准具的选择性透射特性以压窄激光线宽。Nd:YAG 的均匀展宽线宽约为 450 pm,由于 1064 nm 谐振腔增益高、线宽宽,因此采用 3 块标准具;而 1319 nm 谐振腔增益较低、线宽较窄,因

此采用单块标准具。1064 nm 激光器由谐振腔输出激光再经过一个  $10^6 \text{ Pa}$  的放大模块以获得更高的输出功率。实验时首先粗调节 1064 nm 与 1319 nm 振荡器内标准具的角度使和频输出波长与钠  $D_2a$  线较为接近,然后调节控制 1319 nm 标准具的温度使和频输出波长精确对准钠  $D_2a$  线(即波长 589.159 nm)。

非线性和频晶体采用技术成熟的非临界 I 类相位匹配 LBO 晶体<sup>[10]</sup>,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 对基频光和和频光的吸收均很小,在 1064 nm,1319 nm,589 nm 处吸收系数分别为  $1.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ,  $1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ,  $1.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。低吸收就降低了晶体的热梯度并提高了损伤阈值,有利于高功率密度工作。

由于 LBO 晶体采用的是非临界 I 类相位匹配,两基频光偏振方向互相平行,采用偏振片来获取 p 分量线偏振光。在 1064 nm 谐振腔内直接插入偏振片可实现线偏振光输出,而由于 1319 nm 自身起振阈值较高,而且 1319 nm 偏振片膜层抗损伤阈值不高,因此对于 1319 nm 激光器,采用的是在腔外插入偏振片将谐振腔输出的圆偏振光进行偏振选择。

为提高和频效率,1064 nm 与 1319 nm 激光在到达 LBO 晶体处时应进行聚焦且保证空间重叠。由于 1064 nm 放大级抽运模块存在热透镜效应,将 LBO 晶体放置在热焦点附近位置固定,然后在 1319 nm 这一路加入一个纵向位置可调、焦距合适的正透镜,通过调节正透镜位置使两路基频光在到达 LBO 晶体时光斑大小匹配。

### 3 实验结果

由于 1064 nm 与 1319 nm 两台激光器相互独立,且内部增益和阈值电流不同,输出的两个调 Q 脉冲信号在时间上很难自然同步,两者之间存在一定的相位差,测量结果如图 2(a)所示,1319 nm 激光脉冲信号的脉宽约为 65 ns,1064 nm 激光脉冲信号的脉宽约为 35 ns。

为了获得更佳的和频效果,1064 nm 与 1319 nm 两束输入光脉冲必须确保在和频时达到时间上的同步。为此,对两路基频激光器的声光 Q 开关驱动源进行了改进,采用主从电源模式:利用

主电源的外触发输入实现与宏脉冲的同步,并用主电源去控制从电源。主、从电源各有两个功率输出,它们各自分别驱动一个 1064 nm 与 1319 nm 声光 Q 开关。主电源的 1064 nm 声光 Q 开关驱动信号与从电源的 1064 nm 声光 Q 开关驱动信号同步,同样,主电源的 1319 nm 声光 Q 开关驱动信号与从电源的 1319 nm 声光 Q 开关驱动信号也同步。在主电源内部设计一个电子学延迟调节模块,调节精度 5 ns,调节范围 0~3050 ns。通过调节延迟模块可以有效补偿 1064 nm 与 1319 nm 之间的相位差,从而实现二者在时间上达到较好的同步性,如图 2(b)所示。

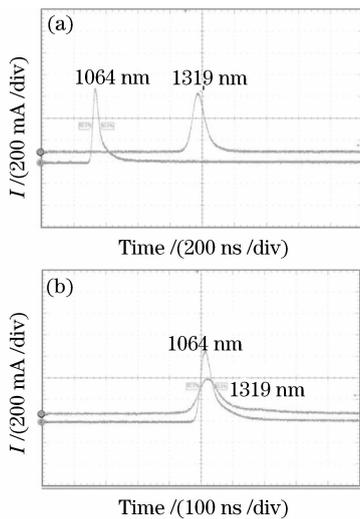


图 2 两激光脉冲的时序关系。(a)同步前;(b)同步后  
Fig. 2 Time relation between two laser pulses. (a) before synchronization; (b) after synchronization

根据理论分析,当 1064 nm 与 1319 nm 光子比保持 1 : 1,功率比 1.24 : 1 时和频效果最佳,对应和频效率最高。然而由于实际输出的 1064 nm 与 1319 nm 两束基频激光脉宽、空间光斑分布的失配,实验中发现当 1064 nm 与 1319 nm 功率比为 1.1 : 1 时,实际的和频效率最高,图 3 是 589 nm 和频光的功率及转换效率曲线。

由图 3 可见,当 1064 nm 与 1319 nm 输入总功率 2.45 W 时,输出 589 nm 和频光 0.50 W,效率为 20.4%。随着 1064 nm 和 1319 nm 的功率和的增加,和频光功率进一步得到提高,当 1064 nm 与 1319 nm 总功率 5.39 W (1064 nm 为 2.82 W, 1319 nm 为 2.57 W),输出和频光功率 0.98 W,但和频效率略有下降,为 18.25%。效率下降的原因是随着基频光功率的增加,基频光光束质量变差、脉冲展宽且脉宽比值变大,1064 nm 与 1319 nm 的空

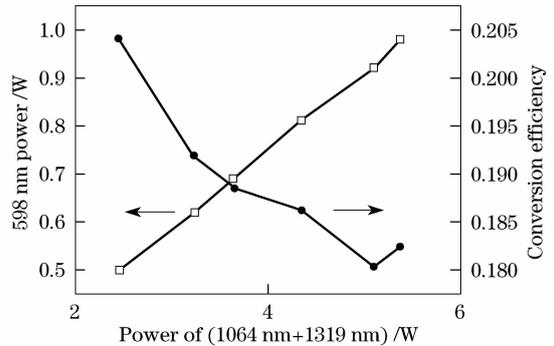


图 3 589 nm 功率及转换效率曲线

Fig. 3 Power and conversion efficiency curve of 589 nm 间匹配及时间同步效果都变差。

用 Spiricon 公司 M-200 对钠黄光光束质量进行了测量,结果如图 4 所示。扫描不同位置处 X, Y 方向的光斑大小,然后进行曲线拟合并与基模高斯分布进行比较计算可见测得 X, Y 方向光束质量  $M^2$  因子分别为 2.09, 2.19。

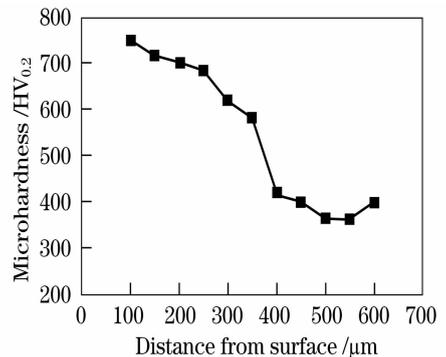


图 4 589 nm 光束质量(功率 980 mW 下)

Fig. 4 Beam quality of 589 nm(at the power of 980 mW)

钠信标激光的中心波长通过高精度波长计测量,实验中发现不采用任何波长控制技术时很难使输出中心波长自行对准钠  $D_2a$  线,二者偏差少则 30 pm,多则达 120 pm,因此必须对中心波长进行调谐控制。采取的方法是:将标准具采用水冷支架控

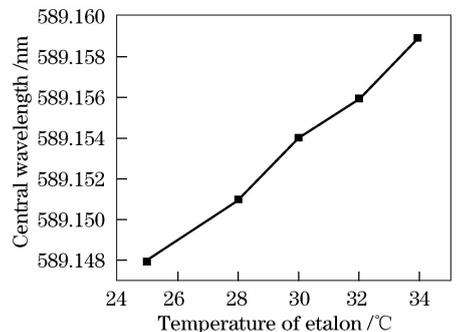


图 5 和频中心波长与标准具温度关系曲线

Fig. 5 Central wavelength of SFG versus temperature of etalons

温,并设定初始温度为室温 25 ℃,然后粗调 1064 nm 与 1319 nm 标准具的倾角,使输出激光中心波长与钠 D<sub>2</sub>a 线大致接近,为 589.148 nm,再调节改变标准具的温度,当温度控制至 34 ℃ 时,实现了中心波长与钠 D<sub>2</sub>a 线(589.159 nm)的精确对准。图 5 是和频输出中心波长与标准具温度的关系曲线。图 5 中波长随着标准具温度的升高而变大,且在微小的调谐范围内,波长改变量与温度改变量近似成线性关系。采用高精度波长计 WS-7 测得对准后的中心波长谱线。中心波长为 589.1592 nm,符合系统设计要求(589.159 nm,允许偏差 ±1 pm)。

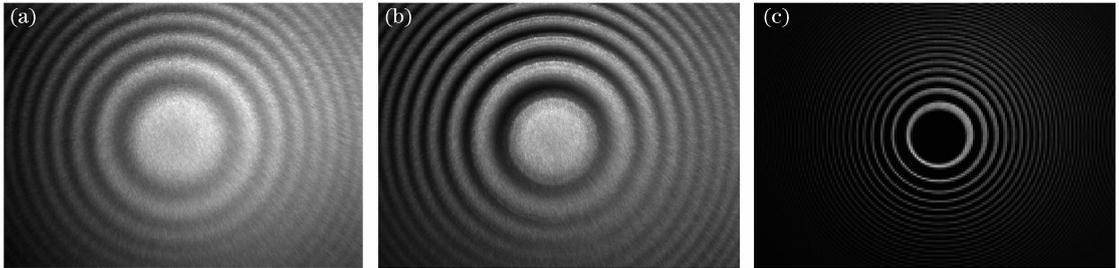


图 6 无标准具(a)、一块标准具(b)和四块标准具(c)时测得的干涉条纹

Fig. 6 Interference stripes measured without etalons (a), with one etalon (b) and with four etalons (c)

## 4 结 论

设计了一台 DPSSL 外腔和频输出钠黄光的激光器,并重点解决了时间同步、线宽控制、波长对准等技术难点,根据设计方案在实验平台上建立了装置,获得平均功率 1.0 W,中心波长 589.159 nm(偏差 ±1 pm),线宽约 1.8 GHz,光束质量  $M^2 < 2.2$  的钠导星激光输出。经钠导星发射装置发射至 90 km 高度处大气中间层,成功接收到钠原子共振散射回光。

## 参 考 文 献

- Zhang Xiaofang, Yu Xin, Yan Jixiang. Development and prospect of multi-conjugate adaptive optics[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(1):76~80  
张晓芳,俞信,阎吉祥.多层共轭自适应光学的进展与展望[J]. *纳米技术与精密工程*, 2004, **2**(1):76~80
- Guan Baozhu, Chen Haiqing, Cheng Penghui. The space-borne adaptive optical system based on laser guide star[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(8):20~23  
管保柱,陈海清,程鹏辉.基于激光钠导星的星载自适应光学系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(8):20~23
- Johe Telle, Jack Drummond, Craig Denman *et al.*. Studies of a mesospheric sodium guidestar pumped by continuous-wave sum-frequency mixing of two Nd:YAG laser lines in lithium triborate [C]. *SPIE*, 2006, **6215**:62150K
- C. A. Denman, P. D. Hillman, G. T. Moore. Realization of a 50-

脉冲体制激光线宽的准确测量一直是个难题,通过自行设计的扫描标准具照相法测量得到线宽压窄过程中输出的 589 nm 激光的干涉条纹如图 6 所示。可见,随着标准具的插入干涉条纹越来越精细、清晰、稳定,说明纵模数目在逐渐变少、线宽越来越窄。再根据高精度波长计自带的线宽估算功能,可读出四标准具时线宽约为 1.8 GHz(FWHM 值),小于钠原子多普勒展宽线宽 3 GHz。通过实时监测得到激光器在长时间运转时(1 h 内)线宽波动小于 ±10%。

Watt facility-class sodium guidestar pump laser[C]. *SPIE*, 2005, **5707**:46~49

- A. J. Tracy, A. K. Hankla, C. A. Lopez. High power solid state sodium beacon laser guide star for the gemini north observatory [C]. *SPIE*, 2004, **5490**:998~1009
- V. Velur, E. J. Kibblewhite, R. G. Dekany. Implementation of the Chicago sum frequency laser at Palomar laser guide star test bed[C]. *SPIE*, 2004, **5490**:1033~1040
- Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all intra-cavity sum-frequency laser at 589 nm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(3):260~264  
吕彦飞,檀慧明,钱龙生.全固态 589 nm 复合腔连续波和频激光器[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(3):260~264
- 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
- Ma Yi, Wang Weimin, Shi Jingbo *et al.*. 589 nm sum-frequency laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):37~40  
马毅,王卫民,石靖波等. 589 nm 和频激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(Suppl.):37~40
- Lü Chao, Yuan Xiao, Zhu Changhong *et al.*. Phase-matching characteristics of 589 nm radiation generated by SFG with double-axis crystals[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5):459~461  
吕超,袁孝,朱长虹等. 双轴晶体和频产生 589 nm 钠黄光的相位匹配特性[J]. *激光技术*, 2005, **29**(5):459~461