文章编号 1004-924X(2017)10-2661-07

高功率准连续微秒脉冲钠导星激光

谢仕永[1,2],王彩丽[1*],薄 勇[3],刘 辉[1],许祖彦[3]

(1. 中国建筑材料科学研究总院,北京 100024;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;
3. 中国科学院 理化技术研究所,激光物理与技术研究中心,北京 100190)

摘要:采用硼酸锂(LBO)晶体腔外和频 Nd∶YAG 1 064 nm 与 1319 nm 激光获得了高功率准连续微秒脉冲钠导星激光。通过改进的欧拉方法数值模拟了和频过程的三波耦合方程,优化了基频光的束腰大小与 LBO 晶体长度。为了提高和频效率,通过像传递系统对两路基频光进行扩束整形实现了空间模式匹配,通过精确控制触发延时实现了时域激光脉冲同步。研究了 500,600,800 及 1000 Hz 条件下的和频输出特性,结果显示,该条件下分别产生了 53,42.6,27 及 22 W 的 589 nm 激光输出,相应的和频效率分别为 21.8%,20.3%,16.9%和 16.3%。黄光最高功率时的光束质量因子 M^2 为 1.32,脉冲宽度为 100 μs。采用了 PZT 与步进电机复合控制系统进行稳频,实现频率的波动为±0.2 GHz,保证了黄光波长在钠原子 D_{2a} 谱线的吸收谱内。该项研究为获取 50 W 级高功率准连续微秒脉冲钠导星激光提供了有效的技术支持。

关 键 词:钠导星激光;高功率激光;硼酸锂(LBO)晶体;和频;稳频
中图分类号:TN248.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20172510.2661

High-power quasi-continuous microsecond pulse sodium guide star laser

XIE Shi-yong[1,2], WANG Cai-li[1*], BO Yong[3], LIU Hui[1], XU Zu-yan[3]

(1. *China Building Materials Academy, Beijing* 100024, *China*;
2. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
3. *Research Center for Laser Physics and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)
** Corresponding author, E-mail: clw3662@163.com*

Abstract: A high-power quasi-continuous microsecond pulse sodium guide laser was generated by extra-cavity sum frequency of Nd:YAG 1064 and 1319 nm spectral line lasers in a Lithium Borate (LBO) crystal. The three wave coupling equations of the sum-frequency process were simulated by the improved Euler method, and the waist size of fundamental light and the length of LBO crystal were optimized. To improve the sum frequency efficiency, the spatial mode matching and time domain pulse synchronization of two fundamental lasers were realized by the beam shaping of image propagation and the precise control of trigger delay. The laser outputs were researched ,and the results show that the

收稿日期:2017-05-03;**修订日期**:2017-06-08.
基金项目:中国建筑材料科学研究总院前沿探索基金资助项目(No. YX-91);应用光学国家重点实验室开放基金资助项目(No. 37730301)

589 nm laser outputs with the powers of 53, 42.6, 27 and 22 W are obtained under the conditions of 500, 600, 800 and 1000 Hz, and the corresponding sum-frequency efficiencies are 21.8%, 20.3%, 16.9 % and 16.3%, respectively. Moreover, the beam quality factor of M_2 is 1.32 and the pulse width is 100 μs at the maximum power of yellow light. A control system compound by a PZT and a stepper motor was used to stabilize the frequency, and results indicate that the frequency fluctuation is in the range of ±0.2 GHz, which ensures that the wavelength of yellow light is within the D_{2a} absorption spectrum of sodium atom. The research results iprovide a technologic support for generating 50 W high-power quasi-continuous microsecond pulse sodium guide lasers.

Key words: sodium guide star laser; high-power laser; Lithium Borate(LBO) crystal; sum-frequency generation; frequency stabilization

1 引　言

大型地基望远镜对天体等空间目标进行观测时,需要采用自适应光学技术对大气湍流等扰动进行校正以提高成像分辨率[1-3]。589 nm 黄激光与大气电离层钠原子的共振荧光背向散射可以产生钠导星,是自适应光学望远镜的理想信标[4-5]。目前,高功率钠导星固体激光器采用的主要技术手段有和频 1 064 nm 与 1 319 nm Nd∶YAG 激光[6-12]和倍频 1 178 nm 拉曼光纤激光[13-17]。2003 年美国空军实验室通过种子源注入环形腔锁定放大及共振增强腔和频获得激光线宽小于 10 MHz、功率 20 W 的 589.159 nm 钠黄光[10,11],然后又对这一系统进行了升级,获得了 100 W 的 1 064 nm 激光输出和 60 W 的 1 319 nm 激光输出,最终通过和频获得 50 W 的 589 nm 连续波钠黄光输出[12]。欧洲南方天文台深入研究了拉曼光纤钠导星激光器,2009 年通过种子注入拉曼光纤放大获得了窄线宽的 1 178 nm 激光,经共振腔倍频产生 14.5 W 的 589 nm 连续波黄光[13],接着在 2010 年采用相干合成三路 1 178 nm 拉曼激光以扩大基频光功率,获得了最高输出达 50.9 W 的 589 nm 黄光[15]。与以上连续波运转的钠导星光源相比,本文所研究的准连续微秒脉冲方式运转的钠导星光源,可以提供门脉冲时间选通机制,消除大气瑞利散射的干扰,提高钠信标信号的信噪比;同时可以减小钠导星像斑拉长现象,提高钠导星成像精度,从而优化自适应光学系统的校正效果[18-21]。

在激光与钠原子相互作用产生钠导星的过程中,最常用的波长是具有最大发射截面的钠原子 D_{2a} 谱线,而 D_{2a} 谱线的多普勒展宽宽度仅约为 1.2 GHz[20],因此需要对激光进行稳频以保证激光中心波长始终对准钠原子吸收峰,从而保持钠导星的亮度稳定。PDH(Pound Drever Hall)技术具有波长敏感、精度高等特点,常用于激光稳频[10-15],但其对参考源的稳定性要求高,故大大提高了系统的复杂性与控制要求。本文首次采用 PZT 与步进电机复合控制系统来实现频率稳定控制,降低了系统对环境变化的敏感度,有利于工程化,具有较强的实用性。本研究基于 Nd:YAG 1 064 nm与 1 319 nm 谱线和频产生高功率准连续钠导星激光,对 589 nm 和频过程进行了数值模拟,根据改进欧拉公式编写 MATLAB 程序数值求解了三波耦合方程,优化了基频光的束腰大小与和频硼酸锂晶体(LBO)的长度。为了提高和频效率,通过像传递系统对两路基频光进行扩束整形实现了空间模式匹配,通过精确控制触发延时实现了基频激光脉冲同步。研究了 500、600、800 及 1 000 Hz 条件下的和频输出特性,结果显示随着重复频率的降低和频效率有了提高。500 Hz 下产生了 53 W 的 589 nm 最高输出功率,相应的和频效率为 21.8%,光束质量因子 M^2 为 1.32,脉冲宽度为 100 μs。为了减小自由运转时激光波长的波动,通过鉴频反馈控制 PZT 和转台旋转来改变 1 064 nm 振荡腔中标准具的角度,从而实现输出黄光波长的稳定,保证了 589.159 nm 钠黄光的频率波动在 ±0.2 GHz 范围内。本研究为获取 50 W 级高功率准连续微妙脉冲钠导星激光提供了有效的技术手段。

2 实验及分析

2.1 实验装置

1 064 nm 与 1 319 nm 激光和频产生 589 nm

钠导星激光的光路如图 1 所示。为了获得高功率窄线宽激光输出，两路基频光均采用了三镜环形腔＋行波放大的主振功率放大(Master Oscillator Power-Amplifier，MOPA)结构。在基频光的环形腔内，通过插入 FP 标准具压窄激光线宽与调谐激光波长，组合使用法拉第旋光器、半波片和偏振片构成的光学单向器实现环形腔激光单向运行，在热近非稳腔条件下运转以获得高功率高光束质量激光输出。为了获得更高输出功率，对 1 064 nm 振荡光进行了两级双程行波放大；对于受激发射截面较小的 Nd：YAG 1 319 nm 谱线激光则采用两级双程＋两级单程行波放大的方案。MOPA 系统的激光泵浦模块均采用单线 4 列 808 nm 准连续 LD 三围侧面泵浦 Nd:YAG 晶体结构，Nd：YAG 棒的尺寸为 Φ3×80 mm，Nd^{3+} 离子掺杂浓度为 0.6%，激光棒放于一石英玻璃管中，冷却循环水在激光棒和石英管之间高速流动，以带走泵浦过程中产生的废热，对激光棒进行冷却。两基频光输出后分别经过像传递系统进行扩束整形，使两束基频光的光斑尺寸匹配。另外，由于和频过程采用 I 类相位匹配，需要两束基频光的偏振态相同，而 1 064 nm 与 1 319 nm MOPA 输出激光分别为 s 光与 p 光，即垂直与水平线偏振光，因此，在 1 064 nm 输出光路中加一 90°旋光晶体 QR6. M7、M8 为 45°1 064 nm 高反镜，M9 为 45°1 319 nm 高反镜，M10 作为合束镜对 1 064 nm 高透、1 319 nm 高反，L15 为消色差聚焦透镜，表面镀 1064 nm 与 1319 nm 高透膜。在基频光合束过程中，首先通过 M9 与 M10 将 1 319 nm 激光调节至合束光路上，然后通过 M7 与 M8 将 1 064 nm 激光调节至与 1 319 nm 激光共线，确保了和频过程中两路基频光的空间重叠。经过 M10 的两束基频光经透镜 L15 聚焦到和频晶体 LBO 中，实现高功率 589 nm 黄光输出。实验中用到的 LBO 晶体通光孔径为 4 mm × 4 mm，长度为 60 mm，采用 I 类相位匹配，切割角 $\theta=90°$，$\varphi=0°$，匹配温度为 40 ℃，前后通光面均镀有 589 nm、1 064 nm 与 1319 nm 的增透膜。输出的 589 nm 黄光及剩余的两束基频光通过分光棱镜分开。通过波长计实时探测 589 nm 黄光的波长，利用 PZT＋步进电机复合系统反馈控制 1 064 nm 振荡腔中标准具的角度，以实时控制 589nm 输出激光波长。1064 或 1319 nm 基频光的波长漂移都会引起 589 nm 激光波长波动，实验中并没有分别对基频光进行稳频，而是根据 589 nm 和频光鉴频信号控制 1 064 nm 谐振腔中的标准具，通过改变标准具角度调谐 1 064 nm 波长来实时补偿基频光的波长漂移，确保了和频光的波长稳定。

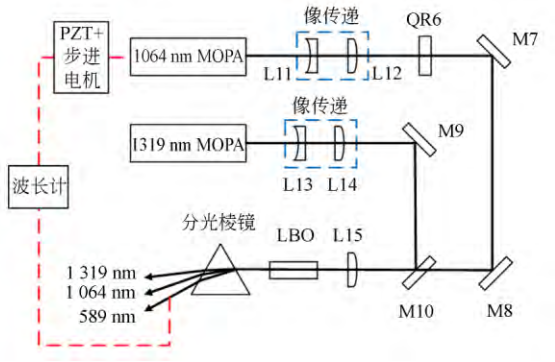


图 1　589 nm 和频实验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental device of 589 nm sum-frequency generation(SFG)

2.2　589 nm 和频数值模拟

对于频率为 ω_1、ω_2 和 $\omega_3=\omega_1+\omega_2$ 的 3 个光波，当频率为 ω_1 和 ω_2 的两束光同时入射到非线性介质中，由于二阶非线性效应，将产生频率为 ω_3 的非线性极化强度，进而由这个非线性极化强度产生频率为 ω_3 的光场，这就是和频产生过程。和频过程可以通过三波耦合方程组来描述，在理想的单色均匀平面波和慢变振幅近似下推导出的耦合波方程为：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}A_1}{\mathrm{d}z}+\alpha_1 A_1=i\dfrac{\omega_1 d_{\mathrm{eff}}}{n_1 c}A_2^{*}A_3\mathrm{e}^{i\Delta k\cdot z}\\ \dfrac{\mathrm{d}A_2}{\mathrm{d}z}+\alpha_2 A_2=i\dfrac{\omega_2 d_{\mathrm{eff}}}{n_2 c}A_1^{*}A_3\mathrm{e}^{i\Delta k\cdot z}\\ \dfrac{\mathrm{d}A_3}{\mathrm{d}z}+\alpha_3 A_3=i\dfrac{\omega_3 d_{\mathrm{eff}}}{n_3 c}A_1A_2\mathrm{e}^{-i\Delta k\cdot z}\end{cases},\qquad(1)$$

其中，A_i 和 ω_i 分别是光波的振幅和圆频率，α_i 是损耗系数，n_i 是介质的折射率，d_{eff} 是有效非线性系数，Δk 为波矢失配量。通过改进的欧拉(Euler)方法对三波耦合方程进行了数值模拟，在模拟过程中，对和频过程做以下近似处理：

(1)高斯光束近似：非线性晶体外，基频光、和频光均为高斯光束；晶体中光束半径遵循高斯光束传播规律；

(2)和频过程满足相位匹配条件：$\Delta k=0$；

(3)非线性晶体均匀、透明、无像散、无色散、

无热效应；

(4)忽略其他非线性效应，晶体中仅存在和频效应。

对方程(1)中的变量进行无量纲化处理，可得归一化的耦合波方程为：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}[w_1(z')\Lambda_1]}{\mathrm{d}z'}-\Lambda_1\dfrac{\mathrm{d}w_1(z')}{\mathrm{d}z'}=w_1(z')ic_1\Lambda_2^*\Lambda_3\\ \dfrac{\mathrm{d}[w_2(z')\Lambda_2]}{\mathrm{d}z'}-\Lambda_2\dfrac{\mathrm{d}w_2(z')}{\mathrm{d}z'}=w_2(z')ic_2\Lambda_1^*\Lambda_3\\ \dfrac{\mathrm{d}[w_3(z')\Lambda_3]}{\mathrm{d}z'}-\Lambda_3\dfrac{\mathrm{d}w_3(z')}{\mathrm{d}z'}=w_3(z')ic_3\Lambda_1\Lambda_2\end{cases},\tag{2}$$

其中，$\Lambda_i=A_i/A_{im}$，A_{im}为 A_i 的最大值，$Z'=Z/L$，L 为非线性和频晶体的长度，$c_1=\dfrac{\omega_1 d_{\mathrm{eff}}}{n_1 c}\dfrac{A_{2\mathrm{m}}A_{3\mathrm{m}}L}{A_{1\mathrm{m}}}$，$c_2=\dfrac{\omega_2 d_{\mathrm{eff}}}{n_2 c}\dfrac{A_{1\mathrm{m}}A_{3\mathrm{m}}L}{A_{2\mathrm{m}}}$，$c_3=\dfrac{\omega_3 d_{eff}}{n_3 c}\dfrac{A_{1\mathrm{m}}A_{2\mathrm{m}}L}{A_{3\mathrm{m}}}$。

结合激光在晶体中遵循高斯光束传播规律，根据改进欧拉公式对式(2)编写 MATLAB 程序，可得在已知初始条件下方程的数值解，对晶体的和频效率进行了数值模拟，结果分别如图 2、图 3 所示。图 2 为晶体长度一定时和频效率随基频激光束腰大小的变化曲线，可以看出当束腰很小时，虽然功率密度高，具有较高的转化效率，但光束发散角大，瑞利长度短，仅在较短的晶体长度内具有高的转换效率，而束腰较大时由于基频光功率密度的下降也会引起和频效率下降，因此存在一个最佳的束腰值，模拟优化的束腰直径为 130 μm。图 3 为束腰大小和泵浦功率一定时和频效率随非线性晶体 LBO 长度的变化曲线，可以看出和频效率随晶体长度的增加而逐渐增大，但存在一个饱和值，当晶体长度达到一定值时，其和频效率的增长将变得缓慢，这时再增加晶体长度，对和频效率的影响就很小了。根据本实验基频光的功率对晶体长度进行了模拟优化，最终选择 LBO 晶体长度为 60 mm。

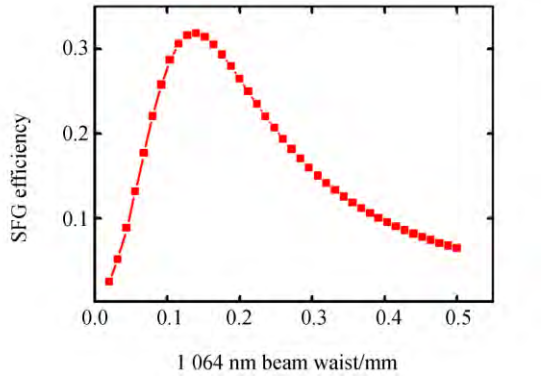


图 2　和频效率随 1 064 nm 光束束腰大小变化曲线

Fig. 2　Variation curve of SFG efficiency with 1 064 nm beam waist

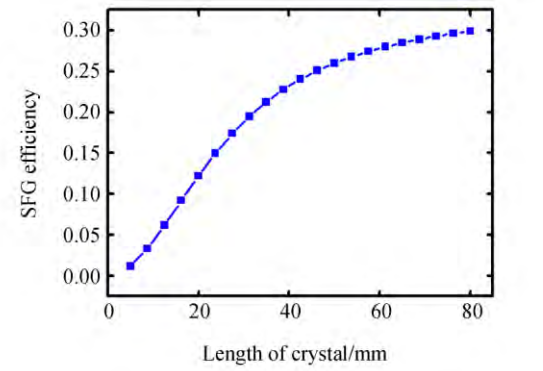


图 3　和频效率随非线性晶体 LBO 长度变化曲线

Fig. 3　Variation curve of SFG efficiency with length of nonlinear crystal LBO

2.3　589 nm 和频实验结果

本研究采用的是 1 064 nm 与 1 319 nm 微秒脉冲激光和频技术，为实现高效和频激光输出，两路基频光不仅需满足空间模式匹配要求，还需满足脉冲时间同步要求。为此，对于 1 064 nm 与 1 319 nm激光微秒脉冲同步性进行了优化。由于 Nd：YAG 晶体的 1 319 nm 激光增益低于 1 064 nm 激光增益，通常，1 064 nm 激光脉冲会更快建立并输出。为了实现同步，需分别对驱动电源进行高精度触发，并实时测量 1 064 nm 与1 319 nm 激光输出脉冲，通过精确调节两路激光的脉冲触发延时确保激光脉冲的同步性，基频光脉冲同步测试结果如图 4(彩图见期刊电子版)所示，可见 1 064 nm 与 1 319 nm 激光输出脉冲实现了时间同步。

测量产生的 589 nm 黄光功率时，需通过 LBO 晶体后的分光棱镜将 1 064 nm 和 1 319 nm 两束基频光滤除，从而实现精确测量。实验中，通过调节基频光的重复频率产生了不同重复频率的 589 nm 激光，黄光输出功率与和频效率如表 1 所示，在 500、600、800 及 1000 Hz 条件下，分别产生了 53、42.6、27 及 22 W 的 589 nm 输出功率，相应的和频效率分别是 21.8%、20.3%、16.9%和 16.3%。可以发现，随着重复频率降低，和频效率在提高，这是由基频光峰值功率的不断提高引起

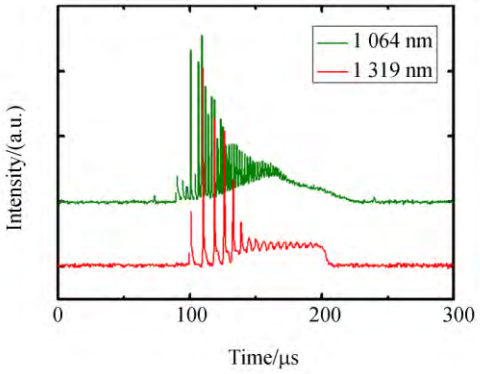


图 4　基频脉冲同步性测试结果

Fig. 4　Pulse synchronization of fundamental lights

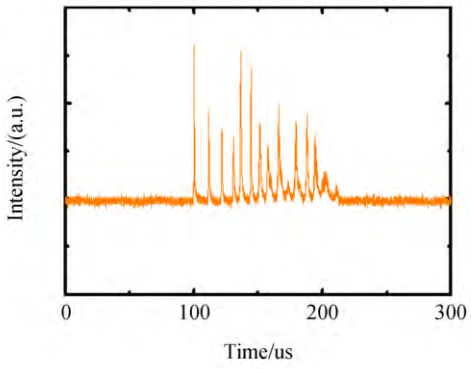


图 6　589 nm 激光脉冲波形

Fig. 6　Pulse waveform of 589 nm laser

的。利用光束质量分析仪（M^2-200，Spiricon Inc.）对 500 Hz、53 W 的 589 nm 激光进行了光束质量测量，测量结果如图 5 所示，测量到的光束质量因子 $M_x^2=1.34$、$M_y^2=1.30$，对应的光束质量 $M^2=1.32$。589 nm 激光脉冲波形通过一硅光电探测器（DET10A，Thorlabs）和示波器（DPO 4104，Tektronix）进行测量，测量结果如图 6 所示，激光脉冲宽度约为 100 μs。

表 1　不同重复频率下 589 nm 激光的输出功率

Tab. 1　Output power of 589 nm laser under different pulse repletion rates

重复频率	输出功率/W			和频效率
/Hz	1 064 nm	1 319 nm	589 nm	/%
500	145.0	98.2	53	21.8
600	119.6	90.4	42.6	20.3
800	88.7	71.5	27.0	16.9
1 000	80.0	55.0	22.0	16.3

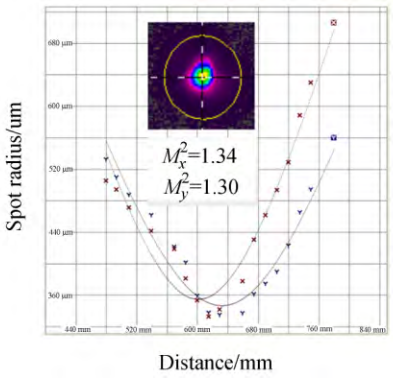


图 5　589 nm 激光的光束质量

Fig. 5　Beam quality of 589 nm laser

本实验利用在基频光谐振腔内放置 F-P 标准具来压窄激光线宽和调谐激光波长。自由运转条件下由于振动和 F-P 标准具温度的漂移等变化导致输出激光的波长和线宽一直在变化，从而直接影响 589 nm 激光中心波长，图 7 为利用精度为 60 MHz 的波长计（WS-7，HighFinesse GmbH）测量的激光频率在 508.848 THz（对应波长 589.159 nm）附近的漂移情况，可见自由运转时 10 min 内频率从508.8465 THz 波动至 508.8497 THz，漂移的幅度达到±1.6 GHz，远超出大气中钠原子 D_{2a} 的谱宽范围。

为了使激光器稳定工作在钠 D_{2a} 谱线上，采用 PZT 与步进电机复合控制系统来实现频率稳定。采用高精度波长计作为鉴频器，在 589 nm 和频过程中，波长计实时读取和频波长并反馈给计算机，计算机利用数字 PID 算法控制 PZT 和转台旋转来改变 1 064 nm 振荡腔中的标准具角度，从而实现输出黄光波长的稳定。实验中，先手动调节标准具温度和角度以使和频光波长正好对准钠 D_{2a} 谱线中心，同时保证标准具有合适的倾斜角度，使得频率控制的闭环反馈系统够正常工作。当外界因素导致和频光波长偏离 589.159 nm 时，PZT 系统首先对标准具进行小角度的调节，从而控制波长在 589.159 nm 附近；当时间增长或某一时刻受较大的外界环境影响，和频光波长偏移量超过 PZT 调节能力范围时，高精密电动转台开始对标准具进行较大角度的调节。PZT 和步进电机控制系统配合使用，最终实现和频后黄光频率的精确控制。主动控制时的波长漂移情况如图 7 所示，与自由运转时相比有明显改善，10 min 内频率漂移的幅度仅为±0.2 GHz，保证了

黄光波长在钠原子 D_{2a} 谱线的吸收谱内。

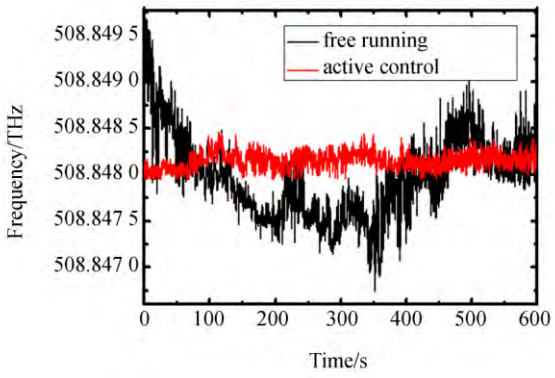


图 7　自由运转与主动控制时和频激光的频率漂移

Fig. 7　Frequency drift of SFG laser under free running and active control

3　结　论

对 589 nm 和频过程的三波耦合方程进行了数值模拟，得到了和频效率随基频光的束腰大小与和频晶体长度变化的曲线，确定了最佳束腰直径和晶体长度分别为 130 μm 和 60 mm。针对微秒脉冲激光和频技术，分别通过像传递系统对两路基频光进行扩束整形和精确控制触发延时，实现了基频激光空间模式匹配与脉冲同步。研究了 500、600、800 及 1000 Hz 条件下的和频输出特性，结果显示 589 nm 最高输出功率分别为 53、42.6、27 及 22 W，相应的和频效率分别是 21.8%、20.3%、16.9%和 16.3%，表明基频光峰值功率的提高引起和频效率随着重复频率降低而不断提高。589 nm 输出功率 53 W 时的光束质量因子 $M^2=1.32$，脉冲宽度为 100 μs。为了减小自由运转时激光波长的波动，通过鉴频反馈控制 PZT 和转台旋转来改变 1 064 nm 振荡腔中标准具的角度以稳定黄光波长，从而保证 589.159 nm 钠黄光的频率波动在 ±0.2 GHz 以内。本研究为获取 50 W 级高功率准连续微妙脉冲钠导星激光提供了有效的技术手段，稳频采用的 PZT 与步进电机复合控制方法降低了系统对环境变化的敏感性，有利于工程化，具有较强实用性。

参考文献：

[1] FUGATE R Q, FRIED D L, AMEER G A, *et al*.. Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide-star[J]. *Nature*, 1991, 353(6340): 144-146. [2] JOYCE R, BOYER C, DAGGERT L, *et al*.. The laser guide star facility for the thirty meter telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6272: 62721H.

[3] WEI K, BO Y, XUE X H, *et al*.. Photon returns test of the pulsed sodium guide star laser on the 1.8 meter telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8447: 84471R.

[4] JIN K, WEI K, XIE S Y, *et al*.. Coupling efficiency measurements for long-pulsed solid sodium laser based on measured sodium profile data[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9148: 91483L.

[5] OTAROLA O, HICKSON P, GAGNE R, *et al*.. On-Sky tests of a high-power pulsed laser for sodium laser guide star adaptive optics[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2016, 5(2): 1650001.

[6] LU Y H, FAN G B, REN H J, *et al*.. High-average-power narrow-line-width sum frequency generation 589 nm laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9650: 965008.

[7] LU Y F, XIE S Y, BO Y, *et al*.. Generation of tunable and narrow linewidth continuous-wave yellow laser by sum-frequency mixing of diode-pumped solid-state Nd:YAG ring lasers[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(17): 3573-3576.

[8] JEYS T H, BRAILOVE A A, MOORADIAN A. Sum frequency generation of sodium resonance radiation[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(13): 2588-2591.

[9] 刘杰，王建立，吕天宇，等. 全固态 589 nm 激光器及其钠导星激发亮度[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12): 3199-3204.
LIU J, WANG J L, LV T Y, *et al*.. All-solid-state 589 nm laser and the brightness of excited sodium guide star[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3199-3204. (in Chinese)

[10] BIENFANG J C, DENMAN C A, GRIME B W, *et al*.. 20 W of continuous-wave sodium D2 resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(22): 2219-2221.

[11] DENMAN C A, HILLMAN P D, MOORE G T, *et al*.. 20 W CW 589 nm sodium beacon excitation source for adaptive optical telescope applications[J]. *Optical Materials*, 2004, 26(4): 507-513.

[12] FUGATE R Q, DENMAN C A, HILLMAN P D, *et al*.. Progress toward a 50-watt facility-class sodium guide star pump laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5490: 1010-1020.

[13] TAYLOR L R, FENG Y, CALIA D B. High power narrowband 589nm frequency doubled fibre laser source[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14687-14693.

[14] FENG Y, TAYLOR L R, CALIA D B. 25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 19021-19026.

[15] TAYLOR L R, FENG Y, CALIA D B. 50W CW visible laser source at 589nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrowband Raman fibre amplifiers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.

[16] CALIA D B, FENG Y, HACKENBERG W, *et al*.. Laser development for sodium laser guide stars at ESO[J]. *The Messenger*, 2010, 139: 12-19.

[17] ZHANG L, JIANG H W, CUI S Z, *et al*.. Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 889-895.

[18] **许祖彦，谢仕永，薄勇，等**. 30 W 级第二代钠信标激光器研究[J]. **光学学报**, 2011, 31(9): 0900111.
XU Z Y, XIE SH Y, BO Y, *et al*.. Investigation of 30 W-class second-generation sodium beacon laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900111. (in Chinese)

[19] WANG P Y, XIE S Y, BO Y, *et al*.. 33 W quasi-continuous-wave narrow-band sodium D2a laser by sum-frequency generation in LBO[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(9): 094208.

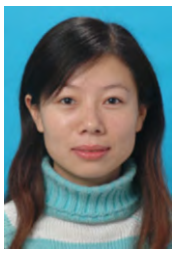
[20] **王鹏远. 高功率准连续微秒脉冲全固态钠信标激光技术研究及应用**[D]. **北京：中国科学院研究生院(理化技术研究所)**, 2014.
WANG P Y. *Investigation and application of high power quasi-continous-wave microsecond pulse diode-pumped solide-state sodium beacon laser technology*[D]. Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[21] **鲁远甫，谢仕永，刘艳，等. 高功率窄线宽微秒脉冲** 1 064 nm **环形腔激光**[J]. **光学 精密工程**, 2016, 24(10): 35-40.
LU Y F, XIE SH Y, LIU Y, *et al*.. High-power narrow linewidth microsecond pulse 1064 nm ring laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 35-40. (in Chinese)

作者简介：



谢仕永(1984－)，**男，山东潍坊人，博士，工程师，2011 年于中国科学院物理研究所获得博士学位，主要从事固体激光及变频技术研究**。E-mail: shiyong515@163.com



王彩丽(1983－)，**女，河南周口人，博士，工程师，2015 年于北京航空航天大学获得博士学位，主要从事固体激光技术的研究**。E-mail: clw3662@163.com