

文章编号: 0253-2239(2010)08-2306-05

高效率 PPSLT 准相位匹配和频钠导星激光器

鲁燕华 张雷 马毅 刘东 唐淳 王卫民 高松信 魏彬

(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 3.09 W、和频效率大于 35% 的周期极化化学计量比钽酸锂(PPSLT)晶体准相位匹配和频钠导星激光器。用声光调 Q 的二极管抽运 Nd:YAG 固体激光器产生高光束质量的基频光 1064 nm 与 1319 nm, 在腔内插入高精度控温的标准具获得窄线宽输出, 并在腔外通过准相位匹配的 PPSLT 晶体和频产生钠导星激光。当注入 PPSLT 晶体的 1064 nm 和 1319 nm 总平均功率约 8.80 W 时, 在匹配温度 68 °C 时实现了最高和频转换, 输出钠导星激光 3.09 W, 重复频率 800 Hz, 脉宽约 60 ns, 线宽约 1.6 GHz。并通过调节控制标准具的倾斜角度和温度, 将中心波长对准至钠 D₂a 线 589.1591 nm, 偏差小于 ±0.2 pm。

关键词 激光器; 钠导星; 和频; 准相位匹配; 周期极化化学计量比钽酸锂(PPSLT); 标准具

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2306

Sodium Guidestar Laser Based on High-Efficiency PPSLT Quasi-Phase-Matched Sum Frequency Generation

Lu Yanhua Zhang Lei Ma Yi Liu Dong Tang Chun Wang Weimin
Gao Songxin Wei Bin

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

Abstract A 3.09 W sodium guidestar laser with the sum frequency generation efficiency more than 35% is reported. The laser is based on the periodically poled stoichiometric lithium tantalite(PPSLT) crystal quasi-phase-matched sum frequency generation. Two acousto-optical(AO) Q-switched diode pumped Nd:YAG lasers of 1064 nm and 1319 nm are used as the fundamental-frequency lasers. To get the narrow linewidth output, the etalons with well temperature controlling are inserted into the cavities. The sodium guidestar laser is generated through an external-cavity quasi-phase-matched sum frequency PPSLT crystal. When the total power of 1064 nm and 1319 nm is 8.80 W, the output sodium guidestar laser's power is 3.09 W with the highest sum frequency generation efficiency at the matching temperature of 68 °C. The repetition frequency of the laser is 800 Hz and the width of pulse is about 60 ns. The linewidth is about 1.6 GHz. The central wavelength is locked to sodium D₂a line 589.1591 nm (error less than ±0.2 pm) by tuning the angle and the temperature of the etalons.

Key words lasers; sodium guidestar; sum frequency; quasi-phase matching; periodically poled stoichiometric lithium tantalite(PPSLT); etalon

1 引言

钠导星和瑞利导星是目前科学家们仅能采用的两种人造激光导引星, 而其中钠导星相比瑞利导星高度更高、斜程误差更小, 能更准确反映光束在大气传输过程中产生的波前畸变, 因此研制钠导星激光器对于自适应光学系统具有极其重要的意义。然而, 为了使大气钠层原子产生后向共振散射光, 必须将钠导星激光器的中心波长对准钠原子最强吸收线

D₂a 线, 且线宽小于 3 GHz, 这给大功率钠导星激光器的研制带来了关键技术难题。

产生钠导星光源的方式主要有染料激光器^[1,2]、光纤激光器^[3,4]和激光二极管抽运固体激光器^[5-7], 而其中激光二极管抽运固体激光器具备结构紧凑、转换效率高、技术发展成熟等优势, 是发展大功率钠导星光源最佳技术途径之一。2005 年, 美国空军研究实验室星火光学领域利用激光二极管抽

收稿日期: 2009-11-12; 收到修改稿日期: 2009-12-07

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等方面的研究。

E-mail: happyeleo@yahoo.com.cn

运的全固态 1064 nm 和 1319 nm 激光器和频产生了 50 W 连续单频 589 nm 激光器, 中心波长对准 589.159 nm, 线宽小于 10 MHz^[5]。2008 年, 洛克希德·马丁相干技术公司为 Gemini South 天文台开发了基于激光二极管抽运 Nd:YAG 激光器的功率为 55 W 的连续锁模钠导星光源, 波长对准 589.159 nm, 线宽约 1.0 GHz^[6]。

国内 2006 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 连续波 589 nm 黄光激光器^[8], 2008 年固体激光技术国家级重点实验室利用复合腔型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^[9], 但上述激光器均未提及谱线控制。中国工程物理研究院应用电子学研究所于 2008 年利用激光二极管抽运 Nd:YAG 激光器腔外和频三硼酸锂(LBO)晶体获得了 1.0 W 的钠黄光输出, 和频效率 20%, 并将中心波长对准至 589.159 nm, 线宽小于 3 GHz, 光束质量 $M^2 < 2.2$ ^[10]。

本文在以往工作基础上对激光器进行了改进, 提升了 1064 nm 与 1319 nm 基频激光器输出功率, 并用周期极化化学计量比钽酸锂(PPSLT)晶体实现了高效率准相位匹配和频转换, 最高输出和频钠导星激光 3.09 W, 和频效率大于 35%, 中心波长对准 589.1590 nm, 线宽约 1.6 GHz。

2 PPSLT 准相位匹配和频技术

准相位匹配(QPM)是通过晶体的周期性极化结构来获得有效的能量转换, 它与传统的双折射相位匹配相比, 没有严格的偏振方向要求, 可以利用晶体最大的非线性系数, 获取更高的非线性转换效率, 因此现在广泛应用于倍频^[11]、和频^[12]与光学参变振荡器^[13]等领域。

适合作准相位匹配和频产生 589 nm 钠黄光的晶体有周期极化的磷酸钛氧钾(KTP)、周期极化的铌酸锂(称 LN)和周期极化的钽酸锂(LT), 其中周期极化的 LT 晶体非线性系数比 KTP 大, 损伤阈值又比 LN 高, 因此选取 LT 作为准相位匹配和频的周期极化晶体。由于 LT 的极化反转电场较大(大于 20 kV/mm), 极易击穿晶体材料, 因此需合理地控制晶体中元素的比例, 即化学计量比的钽酸锂晶体(SLT), 从而使极化反转电场大大降低, 更易得到厚度大的晶体^[14]。

为了利用非线性晶体的最大非线性系数, 设计采用一阶准相位匹配和频。Ariel Bruner 等^[15]在普通 LT 晶体折射率色散方程基础上, 结合实验测量数据推导出 SLT 的经验折射率色散方程如下:

$$n_e^2(\lambda, T) = 4.51584 + \frac{7.294 \times 10^{-3} + 3.482449 \times 10^{-8}(T + 273.15)^2}{\lambda^2 - [0.179937 + 1.608146 \times 10^{-8}(T + 273.15)^2]^2} + \frac{0.073876}{\lambda^2 - 0.198887^2} + \frac{0.001}{\lambda^2 - 7.999976^2} - 0.02358\lambda^2, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, 单位 μm ; T 为温度, 单位 $^\circ\text{C}$ 。

准相位匹配和频满足能量守恒与动量守恒的相位匹配条件:

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3, \quad (2)$$

$$\frac{n_1(\lambda, T)}{\lambda_1} + \frac{n_2(\lambda, T)}{\lambda_2} + \frac{1}{\Lambda(T)} = \frac{n_3(\lambda, T)}{\lambda_3}, \quad (3)$$

式中 $\Lambda(T)$ 是温度为 T 时的极化周期长度, 单位为 μm , 满足晶体的热膨胀方程^[15]为

$$\Lambda(T) = \Lambda(T_0) [1 + 1.6 \times 10^{-5}(T - T_0) + 7 \times 10^{-9}(T - T_0)^2], \quad (4)$$

式中 T_0 为室温 25°C 。

根据上述公式, 计算得到当 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.319 \mu\text{m}$ 时, 刚好和频产生 $\lambda_3 = 0.589 \mu\text{m}$, 且 PPSLT 晶体匹配温度与极化周期的关系曲线如图 1 所示。

由图 1 可见, 当 PPSLT 晶体极化周期在 10.4 ~

10.9 μm 时, 可在 $200^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 的匹配温度实现相位匹配, 产生 0.589 μm 和频光。在加工 PPSLT 晶体时设计选择 10.8 μm 的极化周期, 此时对应匹配温度约 65°C 。

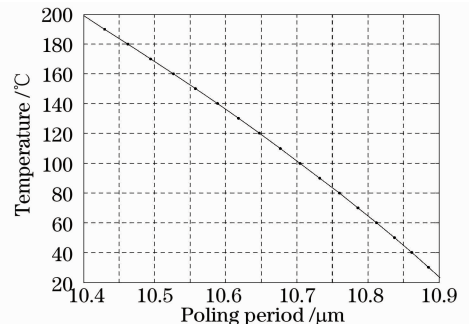


图 1 PPSLT 晶体匹配温度与极化周期的关系曲线

Fig. 1 Relation between the matching temperature and the poling period of PPSLT crystal

3 实验装置

设计采用结构紧凑、转换效率高、技术发展成熟的激光二极管抽运的 Nd:YAG 激光器腔外和频技

术方案,和频晶体采用一阶准相位匹配方式的 PPSLT 晶体,图 2 是实验装置示意图。

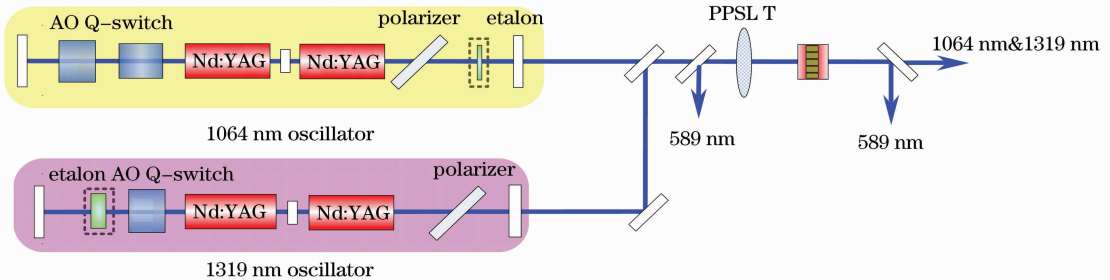


图 2 钠导星激光器示意图

Fig. 2 Schematic of sodium guidestar laser

由于 Nd:YAG 的 1319 nm 波长的受激发射截面比 1064 nm 波长的受激发射截面小得多,而且在其附近还存在与之相当的 1338 nm 激射波长,因此在 1319 nm 谐振腔内必须设计抑制 1064 nm 与 1338 nm 的激射。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 的反射率低于 1319 nm。两台激光器均在腔内插入偏振片以获得线偏振光输出。

为满足钠导星中心波长以及线宽要求,在腔内插入了半导体致冷片控温的标准具,控温精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过调节标准具的倾角和温度实现波长调谐,利用标准具的选择性透射特性以压窄激光线宽。

和频晶体采用准相位匹配的 PPSLT 晶体,尺寸为 $0.8\text{ mm}\times 9.0\text{ mm}\times 35.3\text{ mm}$,设计极化周期长度为 $10.8\text{ }\mu\text{m}$,装夹入控温炉进行高精度温度控制。由于 PPSLT 晶体厚度仅有 0.8 mm ,需对 1064 nm 激光与 1319 nm 激光合束后的激光进行聚焦缩束,图 2 中正透镜正起此作用。同时,由于 PPSLT 晶体表面未镀膜,会有一部分和频钠导星激光从 PPSLT 晶体前表面返回 1064 nm 与 1319 nm 谐振腔内。为此,在 PPSLT 晶体前后位置均插入了 589 nm 分光镜,以获取最大功率的钠导星激光输出。

4 实验结果与分析

根据和频能量守恒条件(2)式知,当 1064 nm 与 1319 nm 光子比为 1:1 时,和频效果最佳,对应和频效率最高,此时二者功率比为 1.24:1。但实验过程中很难保证 1064 nm 激光与 1319 nm 激光在时

间域脉宽、空间域光斑形状及发散角完全一致,也即二者功率比并非 1.24:1 时和频效果最佳,实验中发现二者功率比约为 1:1 时和频效果较好。图 3 是 1064 nm 激光与 1319 nm 激光功率比保持 1:1 时 589 nm 和频光的功率及转换效率曲线。图中 1064 nm 激光与 1319 nm 激光功率和指的是注入 PPSLT 晶体前的功率和,和频光的功率是指前向与后向和频光相加的结果。

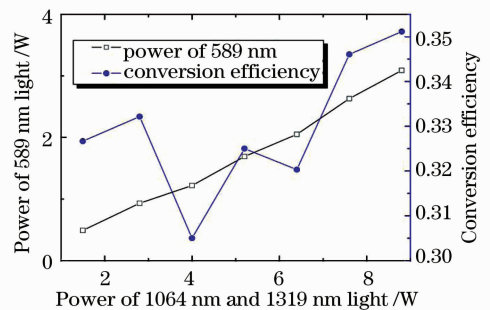


图 3 589 nm 光功率及转换效率曲线

Fig. 3 Curves of 589 nm light power and conversion efficiency

由图 3 可见,589 nm 光输出功率随着 1064 nm 与 1319 nm 光总输入功率的增加而增加,转换效率也呈增大趋势,且保持在 30% 以上。图中转换效率曲线在中间段存在下降过程,主要原因是 1064 nm 与 1319 nm 激光光斑形状、光束质量随工作电流变化而变化,而两者在空间上必须重叠效果达到最佳才能发生最大和频转换,这是一个极其难以控制的过程,在调试的过程中只是在最高工作电流时将二者空间重叠效果调至最佳,并非在每一组工作电流下都单独进行了调节。当 1064 nm 激光与 1319 nm 激光输入总功率最高达 8.80 W 时,输出 589 nm 和频光达到最大 3.09 W,其中后向输出 2.50 W,前向

输出 0.59 W, 此时转换效率也对应最大, 为 35.1%。由于基频功率和指的是注入 PPSLT 晶体前的功率之和, 而并非实际进入 PPSLT 晶体内部的功率之和(由于晶体未镀膜有部分激光会从前表面反射), 因此实际和频转换效率应大于 35.1%。

当注入 PPSLT 晶体功率固定为 8.80 W 时, 改变 PPSLT 晶体的温度, 和频转换效率也随之发生改变, 如图 4 所示。图中纵坐标为归一化的和频转换效率值, 当发生最高和频转换时对应晶体温度 68 °C, 与理论计算结果 65 °C 较为接近。相位匹配允许温度范围约 1.5 °C(半峰全宽值)。

同时, 当钠导星激光输出功率最大时, 用 Spiricon 公司 M-200 对后向输出的 2.50 W 和频激光光束质量进行了测量, 结果如下图 5 所示, 测得两个方向光束质量 M^2 因子分别为 2.83, 2.67。

调谐标准具倾角与温度, 由高精度波长计(德国 HighFinesse WS-7)测量钠导星激光的光谱, 如图 6 所示。

图 6(a)为粗略光谱形状, 读出中心波长 589 nm; 图 6(b)为精细光谱形状, 进一步读出中心波长为 589.1591 nm, 刚好与钠原子 D_2 a 线完全对准。线宽

(半峰全宽值)约 1.8 pm, 也即约 1.6 GHz, 小于钠原子多普勒展宽线宽 3 GHz。

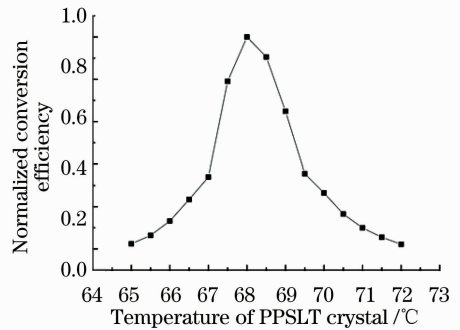


图 4 PPSLT 晶体匹配温度曲线

Fig. 4 Matching temperature of PPSLT crystal

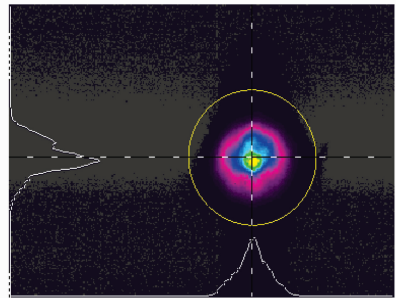


图 5 钠导星激光光斑分布

Fig. 5 S distribution of sodium guidestar laser

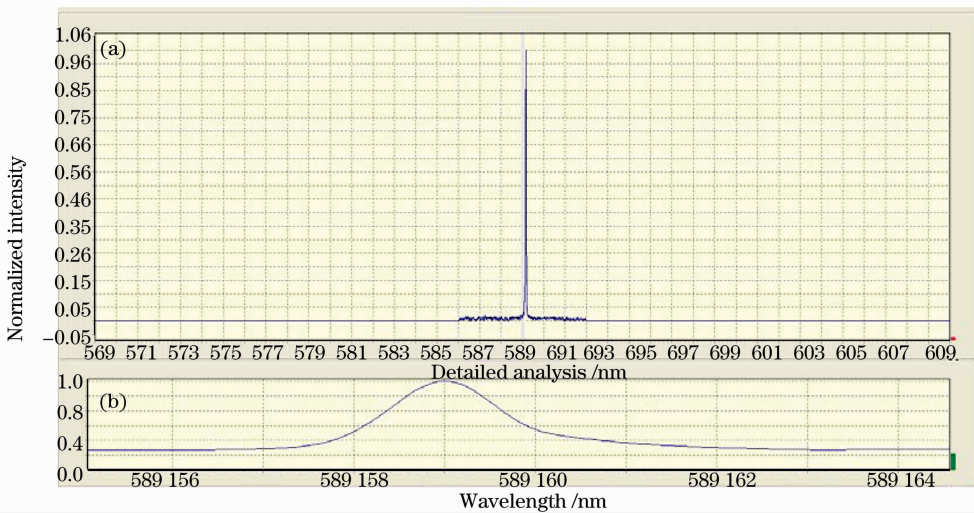


图 6 钠导星激光光谱

Fig. 6 Spectra of sodium guidestar laser

5 结 论

研制了一台基于 PPSLT 晶体准相位匹配和频的钠导星激光器, 输出功率为 3.09 W, 和频效率大于 35%, 并实现了钠导星激光的光谱与钠原子 D_2 线的匹配。这是国内已报道的最高功率水平的钠导

星激光器, 也是国内首次利用准相位匹配和频方式产生钠导星激光。实验结果充分表明准相位匹配和频在高功率钠导星激光器研制方面有重大潜力, 下一步将提高基频光激光器的功率与光束质量, 并优化耦合缩束系统结构与 PPSLT 晶体参数, 以获得

更高功率的钠导星激光输出。

参 考 文 献

- 1 S. Rabien, R. I. Davis, T. Ott *et al.*. Test performance of PARSEC laser system [C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 981~988
- 2 D. Bonaccini, E. Allaert, C. Araujo *et al.*. The VLT laser guide star facility [C], *SPIE*, 2003, **4839**: 381~392
- 3 Jay W. Dawson, A. D. Drobshoff, R. J. Beach *et al.*. Multi-watt 589 nm fiber laser source [C], *SPIE*, 2006, **6102**: 61021F~1
- 4 L. Taylor, Y. Feng, D. Bonaccini *et al.*. Multi-watt Na D₂-line generation via frequency doubling of a Raman fibre amplifier: a source for LGS-assisted AO [C], *SPIE*, 2006, **6272**: 627249~1
- 5 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
- 6 Ian Lee, Munib Jalali, Neil 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
- 7 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
- 8 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
- 9 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
- 10 Lu Yanhua, Liu Dong, Zhang Lei *et al.*. All-solid-state narrow linewidth sodium guide star laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1848~1851
鲁燕华, 刘 东, 张 雷 等. 全固态窄线宽钠导星激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1848~1851
- 11 Ji Feng, Yao Jianquan, Zhang Baigang *et al.*. 2.1 W continuous wave green light output by first-order quasi-phase-matched intracavity second harmonic generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1314~1318
纪 峰, 姚建铨, 张百钢 等. 2.1 W 连续绿光输出的一阶准相位匹配内腔倍频 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1314~1318
- 12 Allen J. Tracy, Allen K. Hankla, Camilo A. Lopez *et al.*. High-power solid-state sodium guidestar laser for the gemini north observatory [C]. *SPIE*, 2006, **6100**: 226~237
- 13 Peng Yuefeng, Lu Yanhua, Xie Gang *et al.*. Investigation of quasi-phase-matched optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 670~674
彭跃峰, 鲁燕华, 谢 刚 等. 准相位匹配 PPMgLN 光参量振荡技术 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 670~674
- 14 Douglas J. Bamford, David J. Cook, Scott J. Sharpe. Periodic poling of stoichiometric lithium tantalite [C]. *SPIE*, 2004, **5337**: 30~38
- 15 Ariel Bruner, David Eger, Moshe Oron *et al.*. Refractive index dispersion measurements of congruent and stoichiometric LiTaO₃ [C]. *SPIE*, 2002, **4628**: 66~73