

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0037-04

589 nm 和频激光器

马 毅, 王卫民, 石靖波, 刘 东

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 报道了一台二极管激光器抽运的全固态 Nd:YAG 和频激光器。采用腔外和频方式, 在 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ LBO 晶体(沿 x 切割, $\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$)中实现了 1064 nm 和 1319 nm 两束基频光的高效和频。通过控制 LBO 晶体的温度实现了 I 类非临界相位匹配, 在 500 Hz 重复频率下, 当分别注入 1.23 W 和 1.50 W 的 1064 nm 和 1319 nm 调 Q 脉冲到 LBO 晶体时, 和频最大输出达到了 500 mW, 脉宽为 25 ns, 和频效率达到了 18.5%, 光束质量 M^2 小于 3。通过仔细调节谐振腔内标准具的倾角, 和频输出波长被调谐到钠 D_2 线。

关键词 激光技术; 钠激光; 和频; 非线性晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

589 nm Sum-Frequency Laser

MA Yi, WANG Wei-min, SHI Jing-bo, LIU Dong

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

Abstract A diode laser (DL)-pumped Nd:YAG all-solid-state sum-frequency laser is presented. Efficient sum-frequency mixing 1064 nm and 1319 nm in a $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ LBO crystal (x -cut, $\theta=90^\circ, \phi=0^\circ$) is obtained by extra-cavity sum-frequency. Type I noncritical-phase-match (NCPM) is realized by controlling the temperature of the LBO crystal. By injecting 1.23 W and 1.50 W of 1064 nm and 1319 nm Q-switched radiation into the LBO crystal, respectively, 500 mW of sum-frequency maximum output is generated with a pulse repetition rate of 500 Hz and pulse duration of about 25 ns, efficiency up to 18.5%, beam quality M^2 less than 3. By carefully adjusting the tilt angle of etalon in each oscillator, the wavelength of sum-frequency output is tuned to the sodium D_2 line.

Key words laser technique; sodium laser; sum-frequency; nonlinear crystal

1 引 言

589 nm 钠激光光源在光谱学研究、激光导航、激光定位和天文观测等领域具有广泛的应用。目前, 589 nm 激光可以通过染料激光技术、拉曼激光技术或固体激光和频技术等获得^[1~3]。Nd:YAG 固体激光器具有结构紧凑、可靠性高、效率高等特点, 在较高占空比情况下仍能获得很好的光束质量。近年来二极管激光器(DL)寿命不断增加、成本不断降低, 因此, 二极管激光器抽运 Nd:YAG 激光器和频产生 589 nm 钠激光逐渐成为研究热点。

本文介绍了二极管激光器抽运 Nd:YAG 激光腔外和频产生 589 nm 钠激光的基本原理和关键技术, 并给出了实验研究结果。

2 基本原理

基本原理如图 1 所示, 两台波长适当调谐的

1064 nm 和 1319 nm Nd:YAG 激光通过双色镜实现共轴传输, 然后在非线性晶体中和频产生与钠 D_2 线相对应的 589 nm 钠激光输出。

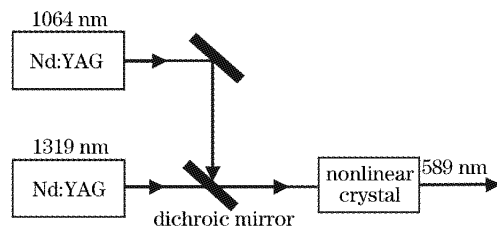


图 1 和频产生 589 nm 钠激光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sum-frequency generation of 589 nm sodium laser

3 1319 nm 单谱线激光

Nd:YAG 以 Nd^{3+} 作为激活粒子, 它的主要跃迁和发射截面参量如表 1 所示。位于激光上能级的

Nd^{3+} 将以 $0.60:0.25:0.14$ 的发射分支比向 ${}^4F_{11/2}$, ${}^4F_{9/2}$ 和 ${}^4F_{13/2}$ 的 3 个终端能级发生辐射跃迁, 并分别发出 $1.06 \mu\text{m}$, $0.95 \mu\text{m}$ 和 $1.3 \mu\text{m}$ 荧光谱线。其中, $0.95 \mu\text{m}$ 跃迁属于准三能级系统, 阈值很高, 常温下难以实现激光振荡; $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.3 \mu\text{m}$ 跃迁属四能级系统, 阈值较低, 常温下容易获得激光输出。由表 1 知, $1.3 \mu\text{m}$ 的受激发射截面不足 $1.06 \mu\text{m}$ 的 $1/5$, 而且在 $1.3 \mu\text{m}$ 附近还存在 1320 nm 和 1338 nm 等多条谱线, 其中 1338 nm 的受激发射截面比 1319 nm 更大。因此, 为了获得 1319 nm 单谱线激光输出, 必须抑制 $1.06 \mu\text{m}$ 和 1338 nm 等谱线在腔内的振荡。为此, 采用了双色镜和三色镜技术: 1319 nm 全反镜为对 $1.06 \mu\text{m}$ 高透, 对 1319 nm 高反的双色镜; 1319 nm 输出镜为三色镜, 它对 $1.06 \mu\text{m}$ 高透, 并且 1338 nm 的透过率大于 1319 nm 透过率, 使 1338 nm 在谐振腔内的振荡阈值大于 1319 nm 的振荡阈值。

表 1 Nd:YAG 主要受激发射截面参量

Table 1 Main stimulated emission cross section parameters of Nd:YAG

Wavelength /nm	Transition	Stimulated emission cross section / cm^2
1319	$R_2 \rightarrow X_1$	8.7×10^{-20}
1320	$R_2 \rightarrow X_2$	1.9×10^{-20}
1334	$R_1 \rightarrow X_1$	3.0×10^{-20}
1335	$R_1 \rightarrow X_2$	3.4×10^{-20}
1338	$R_2 \rightarrow X_3$	9.2×10^{-20}
1356	$R_1 \rightarrow X_4$	4.4×10^{-20}
1064	$R_2 \rightarrow Y_3$	65×10^{-20}
946	$R_1 \rightarrow Z_5$	5.1×10^{-20}

4 波长精细调谐

为使和频波长与钠 D_2 线 (589.0 nm) 相对应, 需要对 1064 nm 和 1319 nm 振荡器的输出波长进

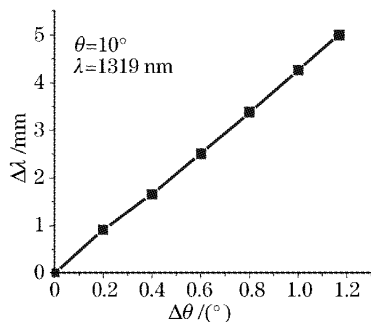


图 2 波长调谐量与标准具角度调谐量的关系

Fig. 2 Tuning range of wavelength versus the tuning angle of the etalon

行精细调谐。通过精细调节谐振腔内标准具的倾斜角可以实现输出波长的精细调谐。当标准具倾角 θ 变化 $\Delta\theta$ 时, 透射率达到最大值对应的波长 λ 将随之变化

$$\Delta\lambda = \lambda \left[1 - \frac{\cos(\theta + \Delta\theta)}{\cos\theta} \right]. \quad (1)$$

图 2 描述的是波长调谐量与标准具倾角变化的理论计算曲线 ($\theta=10^\circ$, $\lambda=1319 \text{ nm}$)。从图 2 可以看出, $\Delta\lambda$ 与 $\Delta\theta$ 近似为线性关系。

5 和频晶体与和频参量的选取

LBO 晶体具有光损伤阈值高、吸收角度宽和离散角度小等特点, 而且它还具有较低的光学吸收系数 (在 $1.32 \mu\text{m}$, $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.589 \mu\text{m}$ 的吸收系数分别为: $1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$, $1.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 和 $1.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$)。故选择 LBO 晶体作为和频晶体, 尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (沿 x 切割, $\theta=90^\circ$, $\phi=0^\circ$)。

和频采用 I 类相位匹配方式, 入射基波光均为慢光, 偏振方向平行。通过控制晶体温度实现非临界相位匹配, 此时有效和频系数达到 $0.96 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。

6 实验研究

实验装置如图 3 所示。 1064 nm 和 1319 nm 振荡器设计为平凹稳定腔, 激光介质选用 Nd 掺杂原子数分数均为 1.3% , 直径为 2 mm 的 YAG 圆棒, 并分别用自行封装的 5 只, 10 只二极管激光器抽运模块进行环形径向侧面抽运, 抽运重复频率 500 Hz , 占空比 10% 。谐振腔内采用焦距适当的平凹透镜用以补偿介质的热透镜效应。振荡器采用声光调 Q 和偏振输出。两束基频光经 45° 反射镜 (M_3, M_4, M_5) 导入到双色镜 (1064 nm 高反, 1319 nm 高透) 上, 然后利用相关调节机构实现两束基频光的共轴传输, 最后经正透镜汇聚后在 LBO 晶体内和频产生 589 nm 激光输出。

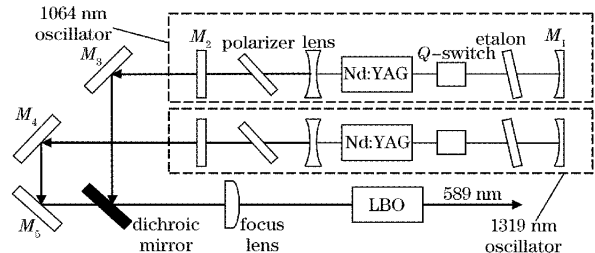


图 3 589 nm 和频激光器实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup of 589 nm sum-frequency laser

声光调 Q 采用与 Nd:YAG 抽运模块相同的重复频率,即一个抽运周期内只触发一个调 Q 脉冲,在 500 Hz 重复频率下,1064 nm 和 1319 nm 振荡器输出的调 Q 脉冲宽度分别为 25 ns 和 60 ns 左右。对于如此短的光脉冲,为了获得较高和频效率,除了让两束基频光共轴传输到 LBO 晶体外,还必须保证两束基频光在 LBO 晶体内具有很好的时间同步性。

时间上的同步控制分为粗同步和精同步两部分。粗同步主要由一台含有多路同步输出和多路延时输出的信号源来实现:首先利用信号源的两个同步输出接口同时触发两路振荡器的 Nd:YAG 抽运模块,经过一定延时后再同时触发两路振荡器内的 Q 开关驱动源,让 1064 nm 和 1319 nm 调 Q 脉冲基本上在同一时刻形成。但由于 1064 nm 和 1319 nm 谐振腔内增益系数、激光阈值等参量的不同,使得最后触发的调 Q 脉冲在时间上并不重叠。为此,在 1064 nm 和 1319 nm Q 开关驱动源之间设计了一个精确延时调节模块,通过精确延时调节后,两束调 Q 脉冲在时间上达到了较好的同步性。

通过控制 LBO 晶体温度实现了 I 类非临界相位匹配,当晶体温度控制在 40.2~40.7 °C 时,和频效率最高。图 4 是和频归一化功率与晶体温度之间的关系曲线图。

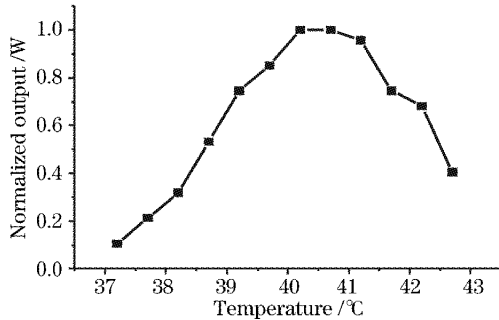


图 4 归一化输出晶体温度变化曲线
Fig. 4 Curve of normalized output versus temperature of crystal

经焦距为 150 mm 的正透镜汇聚后,两束基频光在 LBO 晶体内的峰值功率密度得到了提高,和频效率也相应得到了提高。当 1064 nm 和 1319 nm 注入功率分别为 1.23 W 和 1.50 W 时,和频最大输出达到了 500 mW,和频效率达到了 18.5%。图 5 是通过实验获得的和频输出功率与基频光输入功率的关系曲线图。

在和频输出为最大功率时,利用 Spiricon 公司的 M²-200 测试仪和 LBA-700 光斑分析仪对和频输

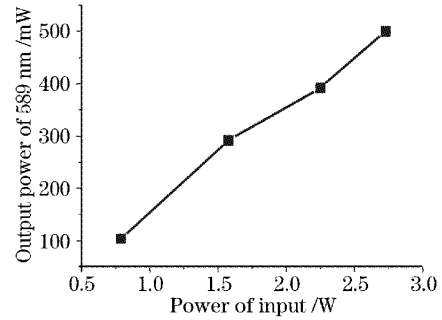


图 5 和频输出功率随输入功率变化曲线
Fig. 5 Curve of sum-frequency output versus power of input

出的光束质量和光强分布进行了测量。光束质量 M² 在 x 和 y 方向上分别为 2.14 和 2.11。和频输出三维分布如图 6 所示。

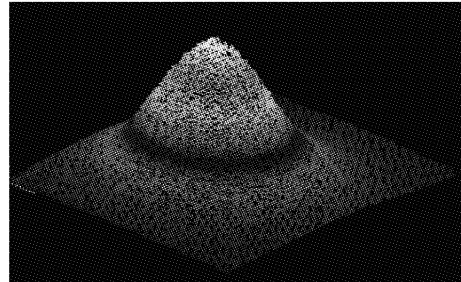


图 6 和频输出光斑三维分布

Fig. 6 3-D distribution of sum-frequency output

利用 SP500i 光谱仪对 1319 nm 振荡器的输出光谱进行了监测,监测数据表明,振荡器获得了 1319 nm 单条输出谱线,1.06 μm 等其他谱线得到了有效抑制。对和频输出光谱也进行了监测,并与钠灯发射的 D₂ 谱线进行了比较,如图 7 所示。从图中可以看出,通过精细调整振荡器内标准具的倾角后,和频输出光谱与钠 D₂ 线具有很好的一致性。在实验室,利用低压钠灯作为钠池,用肉眼观测到了

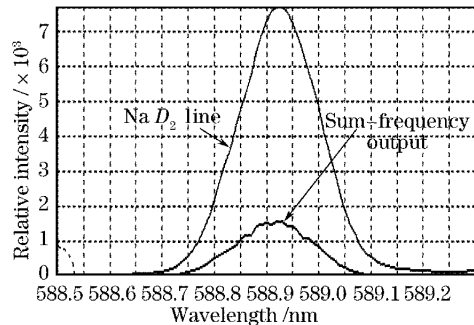


图 7 和频输出光谱与钠 D₂ 线
Fig. 7 Spectrum of sum-frequency output versus Na D₂ line

钠原子共振荧光,如图 8 所示。



图 8 钠池中产生的共振荧光

Fig. 8 Resonance fluorescence in sodium cell

7 结 论

利用腔外和频方式,在 LBO 晶体中实现了

1064 nm 和 1319 nm 两束基频光的高效和频。在 500 Hz 重复频率下,当分别注入 1.23 W 和 1.50 W 的 1064 nm 和 1319 nm 调 Q 脉冲到 LBO 晶体时,和频最大输出达到了 500 mW,脉宽为 25 ns,和频效率达到了 18.5%,光束质量 M^2 小于 3。

参 考 文 献

- 1 Thomas H. Jeys, A. A. Brailove, Aram Mooradian. Sum frequency generation of sodium resonance radiation [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(13): 2588~2591
- 2 Takuya D. Kawahara, Tsukasa Kitahara, Fumitoshi Kobayashi *et al.*. Sum frequency generation of sodium D_2 resonance line for the lidar application of mesopause temperature measurements [C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 270~278
- 3 Yan Feng, Shenghong Huang, Akira Shirakawa *et al.*. Multiple-color cw visible lasers by frequency sum-mixing in a cascading Raman fiber laser [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(9): 1843~1847