

文章编号: 1001-3806(2009)03-0273-03

## 二极管侧面抽运双声光调 Q 589nm 黄光激光器

李莉莎<sup>1</sup>, 侯 瑶<sup>1</sup>, 陈秀艳<sup>2</sup>, 李 修<sup>2</sup>, 陈浩伟<sup>1</sup>, 任兆玉<sup>2,3</sup>, 白晋涛<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 西北大学 物理学系, 西安 710069; 2. 西北大学 光子学与光子技术研究所 陕西省光电子学省级重点开放实验室, 西安 710069; 3. 西北大学 陕西省高功率全固态激光器及应用工程技术研究中心, 西安 710069)

**摘要:** 为了研究高稳定性、高光束质量 589nm 黄光激光器, 采用双声光调 Q T 型复合腔结构、激光二极管侧面抽运 Nd:YAG, KTP 晶体 II 类临界相位匹配、腔内和频的方法, 进行了理论分析和实验验证, 在总抽运电流为 36A、重复频率为 10kHz 时, 获得了最大平均功率可达 3.8W 的 589nm 黄光输出, 脉冲宽度为 135ns。结果表明, 使用 T 型复合腔可以获得高稳定性、高光束质量的黄光激光输出。这一结果对实现黄光激光在医学领域中的应用是很有帮助的。

**关键词:** 激光器; 589nm 黄光激光器; 内腔和频; 双声光调 Q

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Diode-side-pumped 589nm yellow laser with double acousto-optic Q-switches

LI Li-sha<sup>1</sup>, HOU Yao<sup>1</sup>, CHEN Xiu-yan<sup>2</sup>, LI Xiu<sup>2</sup>, CHEN Hao-wei<sup>1</sup>, REN Zhao-yu<sup>2,3</sup>, BAI Jin-tao<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Institute of Photonics and Photo-technology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. Shaanxi Engineering Technology Research Center for Solid State Lasers and Application, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** In order to obtain 589nm yellow laser with high beam quality and high stability, double acousto-optic Q-switches and T-shaped composite cavity were adopted. Diode-side-pumped Nd:YAG and KTP intracavity sum-frequency converter with II-type critical phase-matching were used. On the basis of theoretical analysis and experimental verification, the maximum average power of 589nm laser reached 3.8W with pulse width of 135ns when the total pumping current was 36A and the repetition frequency was 10kHz. The result showed that high beam quality and high stable 589nm laser could be obtained by means of T-shaped composite cavity. This result is quite helpful for the realization of yellow laser application in the medical field.

**Key words:** lasers; 589nm yellow laser; intra-cavity sum-frequency; double acousto-optic Q-switches

### 引 言

上世纪 90 年代, 激光二极管的出现极大的推动了激光产业的发展, 其中全固态固体激光器因其体积小、结构紧凑、效率高、光束质量好、绿色环保等一系列优点而成为国际激光产业研究和开发的热点<sup>[1-5]</sup>。尤其是与倍频技术相结合, 已有大量的文章报道了在激光二极管抽运的腔内/腔外倍频绿光、红光、蓝光、紫外激光器研制方面所取得的科研成果及其在众多领域中的应用<sup>[6-8]</sup>。然而, 处在 550nm ~ 650nm 波段范围内的相干辐射由于缺少相应的基频光, 还不能用倍频方式获得<sup>[9-11]</sup>, 而处于这一波段内的 589nm 黄光光源在生物医疗、激光显示、天文学、玻色爱因斯坦凝聚、激光定

位、导航、军工、大气遥感等领域中都有其独特的应用价值, 尤其是在天文观测中, 利用 589nm 钠黄光激光使地球大气上层的钠元素被激发发光, 形成激光引导星<sup>[12]</sup>, 同时利用自适应天文光学系统就能够进行畸变校正, 消除由于大气扰动等原因产生的畸变, 提高成像质量。因此, 发展不同应用目的的高效稳定的 589nm 激光辐射源就成为激光二极管抽运的全固态激光领域中新的研究热点。

1994 年, 保加利亚和匈牙利的科研人员报道了采用含有一块 Nd:YAG 晶体的振荡器同时产生双波长红外激光, 腔内混频产生 589nm 黄光激光输出。该实验的主要目的是为了验证 1064nm 和 1319nm 双线同时振荡并腔内混频产生 589nm 黄光激光输出的可行性<sup>[13]</sup>。随后, 以美国和日本为首的发达国家竞相对此波长黄光激光器展开了研究。到 2006 年, 国外已生产出 589nm 黄光的产品。国内对此方面的研究起步较晚, 但也取得了很大的进展, 主要的研制单位有中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院物

基金项目: 国家火炬计划基金资助项目(2006GH041493)

作者简介: 李莉莎(1965-), 女, 讲师, 博士研究生, 现主要从事物理教学与激光技术研究。

\* 通讯联系人。E-mail: bjtnwu@yahoo.cn

收稿日期: 2008-04-21; 收到修改稿日期: 2008-07-14

理研究所、华中科技大学和中国工程物理研究院。

作者在自行设计的 T 型复合腔结构基础上,利用计算机数值计算优化谐振腔参量,同时采用同步声光调 Q, KTP 晶体 II 类临界相位匹配腔内和频技术,在重复频率 10kHz 时,获得了 3.8W 准连续 589nm 黄光输出,脉宽为 135ns。

### 1 腔型的选取与设计

实验装置如图 1 所示。每根 Nd:YAG 棒(A 棒和

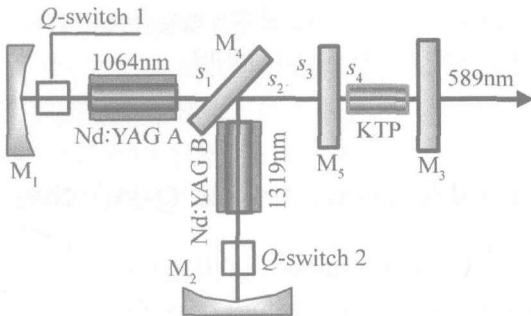


Fig. 1 Schematic diagram of 589nm laser

B 棒)的热透镜效应均可以等效为一个厚透镜(焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ )。厚透镜的主平面到棒端面的距离为  $h = l/2n$  ( $l$  为激光晶体的长度,  $n$  为折射率)<sup>[14]</sup>,见图 2。M<sub>1</sub> 和 M<sub>3</sub> 镜组成 1064nm 基频光谐振腔, M<sub>2</sub>, M<sub>4</sub> 和

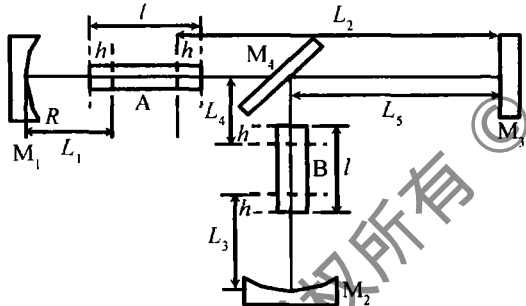


Fig. 2 Thermal lens equivalent diagram of resonant cavity

M<sub>3</sub> 镜构成 1319nm 基频光谐振腔。设两激光晶体热焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ , 据此分别以 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 镜为参考面, 则两谐振腔内的往返矩阵分别为:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_4 + L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4 + L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $R_1$  和  $R_2$  分别为平凹端镜 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 的曲率半径, 谐振腔的稳定性条件为:

$$|(A_i + D_i)/2| \leq 1, (i = 1, 2) \quad (3)$$

式中, 下角标 1 和 2 分别代表 1064nm 基频光谐振腔和 1319nm 基频光谐振腔, 即只有两个基频光谐振腔的往返矩阵都能满足稳定性条件, 整个激光系统才能处于稳定状态。同时要保证和频晶体处光斑大小尽量相等, 以获得两基频光更好的空间交叠。根据上述分析, 使用计算机软件进行计算, 优化各谐振腔参量, 当  $L_1 = 7.3\text{cm}, L_2 = 6.8\text{cm}, L_3 = 7.3\text{cm}, L_4 + L_5 = 10.2\text{cm}, R_1 = R_2 = 1\text{m}$  时, 所设计出的激光系统允许激光晶体的热焦距变化范围可从 11.5cm 到 100cm, 见图 3 所示。计算 1064nm 和 1319nm 基频光在 M<sub>3</sub> 镜处光斑半径分别为 221 $\mu\text{m}$  和 223 $\mu\text{m}$ 。

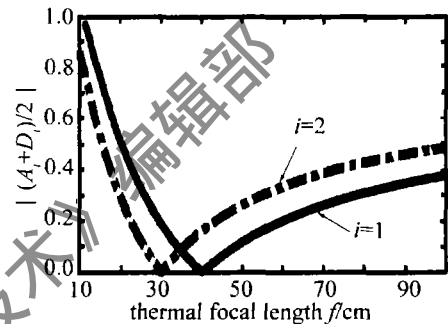


Fig. 3 The relation of cavity and thermal focal length

### 2 实验装置与实验结果

在如图 1 所示的实验装置中, 抽运源为两台武汉三浦公司生产的半导体激光器组件, 每个抽运组件由 45 个 20 W 激光二极管阵列组成, 按照三角形等间距侧面抽运 Nd:YAG 晶体棒, Nd:YAG 激光介质的尺寸均为  $\varnothing 4.0\text{mm} \times 90\text{mm}$ , 激光晶体 A 中  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂粒子数分数均为 0.01, B 中为 0.008, 两棒均侧面打毛, 两端磨成平面, 其中 A 棒用于提供 1064nm 基频振荡光, 两端均镀有 1064nm 增透膜, B 棒的两端分别镀有 1064nm 和 1319nm 双色增透膜。谐振腔端镜 M<sub>1</sub> 的曲率半径为 1m, 其凹面镀有 1064nm 高反膜; 平面端镜 M<sub>3</sub> 的左面镀有 1064nm 和 1319nm 高反、589nm 高透的三色膜; 谐振腔端镜 M<sub>2</sub> 曲率半径为 1m, 凹面镀有 1319nm 高反膜; 与水平方向成 45° 放置的耦合镜 M<sub>4</sub> 两面均镀有偏振膜, s<sub>1</sub> 面镀有 1064nm s 偏振高透膜, s<sub>2</sub> 面镀有对 1064nm s 偏振高透和 1319nm p 偏振高反的双色膜。谐波反射镜 M<sub>5</sub> 的 s<sub>3</sub> 面镀有 1319nm 和 1064nm 双色高透膜, s<sub>4</sub> 面镀有对 1319nm 和 1064nm 高透、对 589nm 高反的三色膜。用于产生 589nm 黄光的和频晶体 KTP 采用 II 类临界相位匹配(相位匹配角  $\theta = 78.9^\circ, \phi = 0^\circ$ ), 两通光面均镀有对 1319nm、1064nm 和 589nm 高透的三色膜, 其几何尺寸为 4mm × 4mm × 7mm, 侧面用铝箔包裹, 放于 2 维调整架上, 置于两基频光共用的谐振腔内, 并将 KTP 晶体

尽量靠近谐振腔端镜  $M_3$  处,以获得高的和频转换效率。放置在两激光晶体附近的声光  $Q$  开关由同一驱动电源控制,中心频率为 27kHz,其调制频率在 1kHz ~ 50kHz 可调。

由能量守恒定律可知:一个波长为 1064nm 的光子与一个波长为 1319nm 的光子生成一个波长为 589nm 的光子,因此,腔内 1064nm 和 319nm 两波长基频光激光功率理论上的最佳比值为波长数值得反比,即 1.24:1<sup>[15]</sup>。在实验中,其它条件不变,先将 1064nm 激光的抽运电流设在阈值以上的某一固定值,再逐渐增大 1319nm 抽运源的抽运电流,测得当 589nm 黄光激光的输出功率值达到最大时,即为两波长基频光的

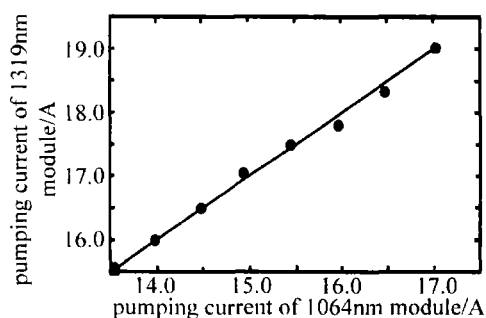


Fig. 4 The optimum pumping current ratios of 1064nm and 1319nm

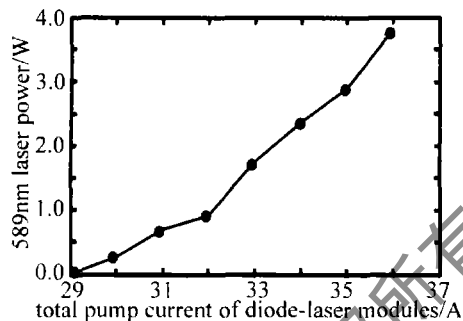


Fig. 5 The output power of 589nm yellow laser

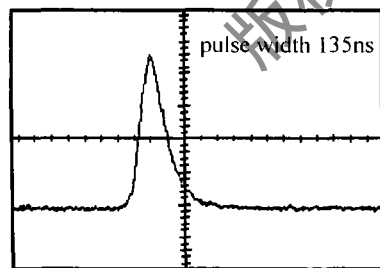


Fig. 6 The pulse power width of 589nm laser

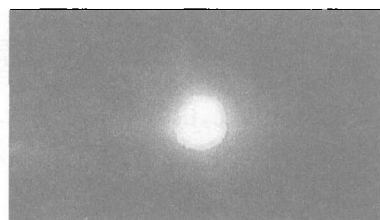


Fig. 7 The spot size of 589nm yellow laser

最佳功率配比,测试结果见图4。从图中可以看出,理论值与实验值基本吻合。在此过程中,记录了 589nm 黄光输出功率随总的抽运电流的变化关系,见图5,黄光输出功率随抽运电流的增加而增大,近似成线性关系。

当总抽运电流在 36A 时,589nm 黄光功率最大可达 3.8W,在整个过程中,声光调  $Q$  的调制频率固定在 10kHz。从图5还可以看出,整个激光系统输出功率未达饱和,为避免和频晶体受损和镜片镀膜损伤,抽运电流未继续加大。图6和图7分别为 589nm 黄光最大输出功率时的脉宽图(135ns)和远场光斑图。

### 3 结论

采用 T 型复合腔结构,通过数值计算设计出优化的谐振腔参量,以此为基础,在实验中控制 1064nm 和 1319nm 两基频光的功率配比以获得高效率的 589nm 黄光激光,最终获得 3.8W 的黄光输出,在重复频率为 10kHz 时,脉冲宽度为 135ns。

#### 参考文献

- [1] BAI J T, CHEN G F. Continuous-wave diode-laser-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP high power solid-state green laser [J]. Optics & Laser Technology, 2004, 34(4): 333-336.
- [2] LI B Ch. Experimental optimization of the output performance of a all-solid-state pulsed Nd:YAG laser [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 144-146 (in Chinese).
- [3] LIU X Sh, WANG Zh Y, YAN X, et al. A high energy good-beam-quality krypton lamp pumped Nd:YAG solid-state laser with one pump cavity [J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(2): 521-523.
- [4] ZHOU R, Y JIAN Q, XU D G, et al. Study on resonator of 85W all-solid-state green laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(6): 641-645 (in Chinese).
- [5] LÜ Ch, YUAN X, ZHU Ch H, et al. Phase-matching characteristics of 589nm radiation generated by SFG with double-axis crystals [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 459-461 (in Chinese).
- [6] XIE H M, CHEN H W, JIA Sh, et al. Diode-pumped double Nd:YVO<sub>4</sub> crystals continuous green laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(6): 597-600 (in Chinese).
- [7] CAO S S, ZHANG X Y, HUANG Y L, et al. 1J high energy frequency-doubled Nd:YAG laser [J]. Laser Technology, 2003, 23(2): 101-102 (in Chinese).
- [8] GENG A C, BO Y, BI Y, et al. One hundred and twenty one W green laser generation from a diode-side-pumped Nd:YAG laser by use of a dual-V-shaped configuration [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(6): 589-596.
- [9] LÜ Y F, TAN H M, GAO L L, et al. LBO type-I critical phase-matched intracavity sum-frequency mixing 593.5nm laser [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(1): 45-47 (in Chinese).
- [10] JIA F Q, XUE Q H, ZHENG Q, et al. All-solid-state 556nm yellow laser by LBO intracavity-frequency-doubling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(8): 1017-1021 (in Chinese).

(下转第 290 页)

从表2中可以看出,近化学计量比 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体的非挥发全息记录性能和单光子及有无汞灯照射有关。其中有汞灯预照的双光子存储实验在非挥发全息记录过程中得到最高的固定衍射效率  $\eta = 2.8\%$ , 比经汞灯照射的单光子的固定衍射效率  $\eta = 0.79\%$  要高出3倍~4倍,因为在 Ce:Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体中进行非挥发全息记录时,晶体中掺杂了铁和铈两种杂质,两种掺杂离子之间的互补效应和能量传递作用将大大改善光折变中心的电离截面和俘获截面的值,从而影响晶体内载流子的激发、迁移及俘获过程,使光折变效应得到增强。

#### 4 双光子全息存储效果图及分析

图5为实验时存储的图片的再现。由3幅图对比

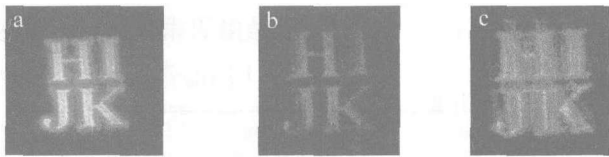


Fig. 5 The retrieved picture of volume holographic storage

可以看出,不同时间进行图片存储,效果是不同的。图5a是在起栅完成后不久进行存储得到的效果图,图像亮度高,且清晰,效果最好。图5b是在起栅未完全完成时进行存储得到的,图像较暗,也不太清晰。图5c是在起栅后一段时间进行存储得到的,图像亮度高,但很不清晰。这是因为照射太久出现光损伤所致。

#### 5 结论

研究了 SLN:Ce:Fe 晶体的光谱特性,发现随着  $n(\text{Li})/n(\text{Nb})$  比的增大,晶体的红外透射谱变窄;紫外吸收谱发生紫移。通过二波耦合实验对样品晶体采用不同的方法来实现非挥发全息存储,并对单、双光子存储性能的某些参量进行测试。结果显示,以 He-Ne 光为记录光以及汞灯发出的紫外光为开关光能够很好地

实现全息存储固定。双光子存储的性能参量明显优于单光子存储的性能参量。比如双光子存储的写入时间短,擦除后的固定衍射效率比单光子要高。对于单光子存储实验,用紫外光预照晶体的衍射效率比不用紫外光预照的衍射效率要高。

#### 参考文献

- [1] PANG Zh G, YU K X, FAN H. Study of the optimum operating mode in lithium niobate acousto-electro-optic modulator [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 160-162 (in Chinese).
- [2] WANG Y H, YUAN W, LIU G Q. Study on the characteristics of scattering noise in photorefractive holographic storage [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(6): 529-532 (in Chinese).
- [3] XU X G, XU G B, HU D W, *et al.* Holographic properties of cerium-ferrum serica co-doped lithium niobate [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 947-952 (in Chinese).
- [4] YAO J H, YAN B X, CHEN Y H, *et al.* Periodically poled second harmonic green light generation in near-stoichiometric MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 141-143 (in Chinese).
- [5] BUSE K, ADIBI A, PSALTIS D. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals [J]. Nature, 1998, 393(7): 665-668.
- [6] YUE X, ADIBI A, HUDSON T, *et al.* Role of cerium in lithium niobate for holographic recording [J]. J A P, 2000, 87(9): 4051-4055.
- [7] REN L R, LIU L R, LIU D A, *et al.* Optimal switching from recording to fixing for high diffraction efficiency from a LN:Cu:Ce photo refractive nonvolatile hologram [J]. Opt Lett, 2004, 29(2): 186-188.
- [8] XU Zh P. Study on growth and holographic properties of cerium-ferrum serica co-doped lithium niobate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 24-31 (in Chinese).
- [9] LI M H, YANG Ch H, XU Y H. Photorefractive crystal materials science introduction [M]. Beijing: Science Press, 2003: 140-141 (in Chinese).
- [10] SCHIRMER O F, THIEMANN O, Wochlecke M. Defects in LiNbO<sub>3</sub> experimental aspects [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1991, 52(2): 185-200.
- [11] LEE M, TAKEKAWA S, FURUKAWA Y, *et al.* Nonvolatile two-color holographic storage in Tb-doped LiNbO<sub>3</sub> [J]. A P L, 2000, 76(13): 1653-1655.
- [12] GAO L L, TAN H M. Noise characteristic of sum-frequency mixing orange solid-state laser [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(5): 987-991.
- [13] BIENFANG J, DEVNAN C, BRENT G, *et al.* 20W of continuous-wave sodium D<sub>2</sub> resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers [J]. Opt Lett, 2003, 28(22): 2219-2221.
- [14] DANAILOV M B, APAI P. 589nm light generation by intracavity mixing in a Nd:YAG laser [J]. J A P, 1994, 75(12): 8240-8242.
- [15] WANG H L, ZHOU Zh Y, CAO H B, *et al.* Study on the stable characteristic of two-rod Nd:YAG laser [J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2003, 14(2): 149-152 (in Chinese).
- [16] LÜ Y F, TAN H M, QIAN L Sh. Laser diode array pumped Nd:YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589nm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(4): 438-442 (in Chinese).

(上接第 275 页)

- [11] GAO L L, TAN H M. Noise characteristic of sum-frequency mixing orange solid-state laser [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(5): 987-991.
- [12] BIENFANG J, DEVNAN C, BRENT G, *et al.* 20W of continuous-wave sodium D<sub>2</sub> resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers [J]. Opt Lett, 2003, 28(22): 2219-2221.
- [13] DANAILOV M B, APAI P. 589nm light generation by intracavity