

文章编号: 1001-3806(2005)06-0629-03

# Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 腔外三倍频紫外激光器

贾富强<sup>1,2</sup>, 郑 权<sup>1\*</sup>, 薛庆华<sup>1,2</sup>, 谭成桥<sup>1,2</sup>, 钱龙生<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130022 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 理论上分析了影响腔外三倍频输出效率的各因素, 并对 Cr<sup>4+</sup>:YAG 小信号透过率、输出镜透过率、聚焦透镜焦距、非线性晶体尺寸的优化选取以及各元件的合理放置进行了讨论。在最大抽运功率为 17W 的情况下, 获得了 336mW 的 355nm 准连续紫外激光输出, 重复频率为 28kHz, 脉宽 12ns, 单脉冲能量为 12μJ, 峰值功率为 1kW, 总的光-光转换效率为 2%。

**关键词:** 激光器; 355nm 紫外激光器; Cr<sup>4+</sup>:YAG; 被动调 Q; 腔外三倍频

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched extra-cavity third-harmonic laser

JIA Fu-qiang<sup>1,2</sup>, ZHENG Quan<sup>1</sup>, XUE Qing-hua<sup>1,2</sup>, TAN Cheng-qiao<sup>1,2</sup>, QIAN Long-sheng<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China; 2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The factors attributed to the efficiency of the extra-cavity third-harmonic generation are analyzed. The maximum output power of 355nm UV laser is 330mW with the incident pumped power 17W after optimizing the small signal transmittance of the Cr<sup>4+</sup>:YAG, the transmittance of the output coupler at 1064nm, the focal length of the focusing lens, the nonlinear crystal and aligning the optical elements reasonably. The repetition rate, pulse width, single pulse energy of the pulsed 355nm laser is 28kHz, 12ns, 12μJ respectively. The overall light to light efficiency is 2%.

**Key words** lasers; 355nm ultraviolet laser; Cr<sup>4+</sup>:YAG; passively Q-switched; extra-cavity third-harmonic

### 引 言

紫外激光由于波长短、衍射效应小、分辨率高、单光子能量大等优点, 在数据存储、微加工、大气探测、微电子学、光化学、光生物学及医疗等领域有广泛的应用。传统的紫外激光光源如: 准分子激光器、N<sub>2</sub> 激光器等, 存在结构复杂、体积庞大、稳定性差等缺点。随着大功率半导体激光器技术的日益成熟, 以及新的性能优良的非线性晶体 (BBO, LBO, CLBO) 等的出现, 通过非线性频率变换技术获得大功率、高稳定性、高效率、小体积的全固态紫外激光器已成为当前的研究热点<sup>[1-5]</sup>。在国外, 利用高功率高亮度 532nm 绿光通过腔外直接倍频已经获得了高达 20W 的紫外激光输出<sup>[3]</sup>, 国内在这方面的研究报道较少, 功率不高, 却多采用主动调 Q 的方式, 系统比较复杂。高兰兰等人利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 腔外三倍频, 在 2W 抽运功率下, 只获得了 120μW 的 355nm 紫外激光输出<sup>[5]</sup>。

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (2002AA311141)

作者简介: 贾富强 (1980), 男, 博士研究生, 研究方向为全固体激光器件与非线性频率变换技术。

\* 通讯联系人。E-mail: zhengquannok@263.com

收稿日期: 2004-06-01; 收到修改稿日期: 2005-03-22

采用 LDA 纵向抽运 Nd:YAG 晶体, 用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶片作为被动调 Q 开关, 在 17W 的抽运功率下获得了平均功率为 2.43W 的 1064nm 脉冲激光输出, 峰值功率高达 5.6kW, 用 KTP 晶体腔外倍频产生绿光之后, 再用走离效应较小的 LBO 晶体腔外和频, 得到了脉冲重复频率为 28kHz, 单脉冲能量为 12μJ, 紫外峰值功率达 1kW、最大平均输出功率为 336mW 的准连续 355nm 紫外激光, 该平均功率是目前国内的最高报道。

### 1 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 1064nm 脉冲激光器的设计

红外调 Q 激光器实验装置如图 1 所示。图中 LDA 为德国 LMO 公司的带光纤耦合输出的半导体激光器阵列, 最大输出功率为 20W, 室温下的中心发射波长为 808nm, 光纤的数值孔径 NA = 0.22, 光纤的芯径约为 400μm。CO (coupling optics) 为耦合光学系统, 将抽运光斑 1:1 成像到 Nd:YAG 晶体中, Nd:YAG 的尺寸为 ∅4mm × 3mm, 原子数分数为 1.0%。A 为小孔光

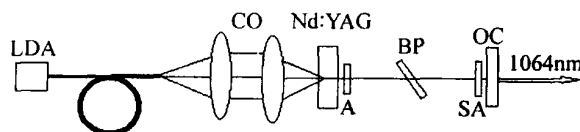


Fig 1 The schematic diagram of the Q-switched laser at 1064nm

阑(由于腔外频率变换效率受注入光斑质量影响很大<sup>[4]</sup>,所以,可通过在腔内加小孔光阑来抑制谐振腔中的高阶模式,提高 1064nm 红外光输出光斑的质量),BP 为布儒斯特角放置的玻璃片,让输出的 1064nm 为水平方向的线偏振光(偏振比大于 100:1),SA(saturable absorber)为  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  可饱和吸收体,尺寸为  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ ,小信号透过率为 8%,SA 的左右端面都镀制 1064nm 的增透膜,以降低器件的插入损耗。OC(output coupler)是 1064nm 耦合输出镜,曲率为无穷大,对 1064nm 的透过率为 40%。 $\text{Nd}:\text{YAG}$  的左端面对 808nm 高透,对 1064nm 高反,与输出镜的左端面一起构成谐振腔,腔长约为 41mm。当抽运光入射到  $\text{Nd}:\text{YAG}$  中以后,很大一部分的光功率未能转换成跃迁辐射,以热的形式存在于  $\text{Nd}:\text{YAG}$  中,导致热透镜效应的存在,于是几何上的平-平腔变成了稳定性更好的平-凹腔。

实验中,先通过温度控制器调节 LDA 的温度(温度控制器在图中已经省略),让 LDA 的发射峰与  $\text{Nd}:\text{YAG}$  的吸收峰重合,达到很好的光谱匹配,然后调节各元件至红外输出为最佳状态。测量时利用重庆光电所研制的快速 PN 光电探测器和 Tektronix 公司的数字示波器来分别探测和显示调 Q 红外脉冲的重复频率和脉宽,利用相干公司的 FieldMaster-GS 功率计测量此时的 1064nm 的平均功率,以及当谐振腔中没有放置  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  时连续运转情况下的输出功率。实验中测得的 1064nm 连续功率、脉冲平均功率、以及计算得到脉冲峰值功率随抽运功率的变化关系曲线如图 2 所示。

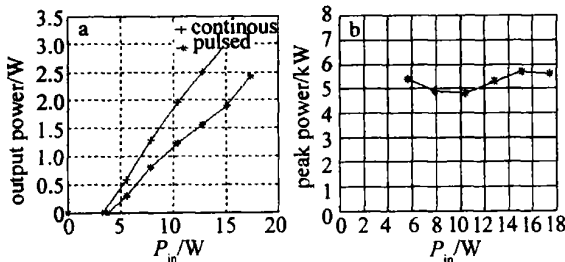


Fig 2 The parameter of 1064nm laser versus the incident power  
a—the output power versus the incident power in pulsed and continuous operation b—the peak power versus the incident power

从图 2 中可以看出,连续运转时的输出功率和脉冲运转时的平均功率随抽运功率的增加呈线性增加,峰值功率随抽运功率的变化却不明显。在最大抽运功率为 17W 时,调 Q 1064nm 的平均功率为 2.42W,峰值功率高达 5.6kW。

## 2 腔外三倍频 355nm 紫外激光产生

激光三倍频实际上是一个和频过程,由频率为  $\omega$  基频光和频率为  $2\omega$  的倍频光,在非线性和晶体中通过三波相互作用产生。根据三倍频激光的输出光强的表达

$$P_3 = \frac{2\pi^2 L^2 \chi_{\text{eff}}^2}{n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 c \epsilon_0 A_1 A_2} \text{sinc}^2(\Delta K \cdot L/2) A_3 \quad (1)$$

式中,  $L$  为和频晶体的长度,  $\chi_{\text{eff}}$  为二阶有效非线性极化系数,  $n_1$ ,  $n_2$  和  $n_3$  分别对应频率为  $\omega$ ,  $2\omega$ ,  $3\omega$  光束在晶体中的折射率,  $c$  是真空中光速,  $\epsilon_0$  是真空中介电常数,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  和  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  则分别表示 3 种频率的光波在非线性和晶体中的功率和横截面积,  $\Delta K$  为位相匹配系数,  $\Delta K = K_3 - K_1 - K_2$ 。从 (1) 式可以看出,为了提高三倍频的转换效率,除了尽量满足位相匹配条件  $\Delta K = 0$  还需要提高调 Q 1064nm 的峰值功率<sup>[7,8]</sup>  $P_1$  (非线性频率转换效率跟基频光的峰值功率成正比,实验中通过选取合理的输出镜对 1064nm 的透过率和  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的小信号透过率来实现),以及选取有效非线性系数  $\chi_{\text{eff}}$  大的非线性晶体(非线性频率变换效率与有效非线性系数的平方成正比)。同时,由于高斯光束腔外频率变换的效率跟聚焦的光斑大小和光束的会聚程度密切相关,所以,根据高斯光束腔外非线性频率变换的最佳聚焦原理<sup>[9]</sup>,合理选取聚焦透镜的焦距、位置以及非线性晶体的长度,可以提高非线性频率的转换效率;由于在基频光的注入功率一定的前提下,尽量满足在位相匹配方向上基频光和倍频光的光子数之比为 1:1<sup>[10,11]</sup>,可以得到最大的和频效率,实验中发现由于 KTP 的波片效应, KTP 对未转换的 1064nm 基频光的偏振态有很大的影响,实验中以晶体通光方向为轴旋转 KTP,每次旋转 90° 以后,观察光经过 KTP 后在垂直于光轴的各个方向上 1064nm 和 532nm 的功率值,然后换算为两种光在各个偏振方向上的光子数之比,最后选择一个最佳 KTP 放置方向。在得到高峰功率的被动调 Q 1064nm 的激光器以后,通过对 1064nm 激光脉冲腔外三倍频,得到 355nm 紫外激光输出。其实验原理如图 3 所示。

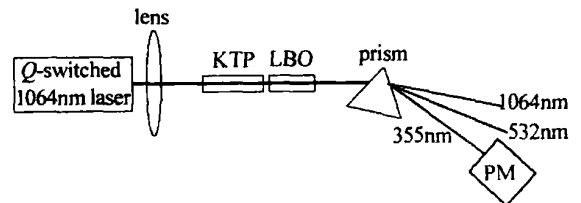


Fig 3 The schematic diagram of the 355nm UV laser

调 Q 1064nm 红外脉冲,经过  $f=17\text{mm}$  的透镜以后入射到 KTP 中(KTP 的尺寸为  $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 9\text{mm}$ ,按 II 类临界相位匹配切割,以 45° 方向放置),产生了 532nm 的倍频绿光,倍频光和未转换的 1064nm 基频光一起入射 LBO 晶体当中(LBO 按 I 类临界相位匹配切割,  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=37.1^\circ$ ; 尺寸为  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 15\text{mm}$ ,也呈 45° 放置),prism 为熔石英制作的分光棱镜,PM(power meter)是相干公司的 FieldMaster-GS 功率计。

实验中只采用一个聚焦透镜,既能减少装置的复

杂性, 同时又能减少因多透镜结构所带来的各种像差, 严重的像差会对三倍频的效率产生很大影响<sup>[4]</sup>。由于 KTP 的接受角和有效非线性系数都很大, 在焦点附近很长的范围内倍频效率变化不是很大, 于是可将 KTP 在离焦点有一定距离靠近透镜一侧放置, 而将接受角和有效非线性系数相对较小的 LBO 放在光功率密度更高的焦点处, 从而在简化实验装置的同时, 也得到了很高三倍频效率, 降低了 KTP 中灰线的产生几率。利用紫外波段的光电探测器和 Tektronix 公司的数字示波器, 来分别探测和显示紫外激光脉冲的脉宽和重复频率, 其随注入光功率的变化曲线如图 4a 所

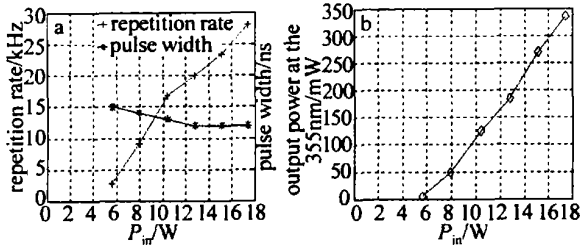


Fig 4 The parameter of the 355 nm laser versus the incident power a—the repetition rate and the pulse width versus the incident power b—the output power at the 355nm versus the incident power

示, 然后用功率计测量紫外输出功率, 其随注入功率的变化曲线如图 4b 所示。在最大抽运功率为 17W 的情况下, 得到重复频率为 28kHz 单脉冲能量为 12μJ 峰值功率为 1kW 355nm 紫外激光输出, 总的光-光转换效率为 2%, 输出光斑质量受 LBO 走离效应的影响较小, 呈近圆分布, 光斑如图 5 所示。

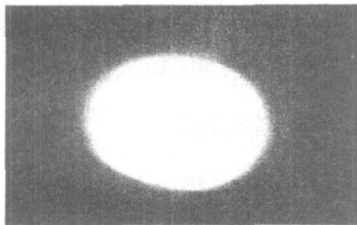


Fig 5 The facula of the 355nm laser

### 3 结 论

根据三次谐波理论, 通过提高高频光的峰值功率,

选择有效非线性系数大的倍频晶体与和频晶体, 以及根据高斯光束的传输和腔外频率变换原理, 选取合适的聚焦透镜焦距和非线性晶体长度, 选择合适的晶体放置方向和位置, 最终获得高的三次谐波转换效率。实验中用 LDA 纵向抽运 Nd:YAG 晶体, 用  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶片作为被动调  $Q$  开关, 在 17W 的抽运功率下获得了平均功率为 2.43W 的调  $Q$  1064nm 脉冲激光输出, 峰值功率高达 5.6kW, 用 KTP 和 LBO 晶体腔外倍频后再和频, 得到了最大输出功率为 336mW 的准连续 355nm 紫外激光, 脉冲重复频率为 28kHz 单脉冲能量为 12μJ 紫外峰值功率达 1kW, 总的光-光转换效率为 2%, 在将来的实验中, 如果进一步优化  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的初始透过率和输出镜的透过率、谐振腔的长度、聚焦透镜的焦距、以及非线性晶体的长度, 有望得到更高的三倍频转换效率。

### 参 考 文 献

- [1] 周 城, 叶子青, 郑 权 *et al*  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调  $Q$  四倍频全固态紫外激光器的研究 [J]. 激光技术, 2003, 27(4): 339~341
- [2] 何京良, 卢兴强, 贾玉磊 *et al* BBO 四倍频全固态 Nd:YVO<sub>4</sub> 紫外激光器 [J]. 物理学报, 2000, 49(10): 2106~2108
- [3] KOJIMA T, KONNO S, FUJIKAWA S *et al* 20W ultraviolet beam generation by fourth-harmonic generation of an all-solid-state laser [J]. Opt Lett 2000, 25(1): 58~60
- [4] AGNESIA, DELL'ACQUA S, PICCINI E *et al* Efficient wavelength conversion with high power passively  $Q$ -switched diode pumped neodymium laser [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(8): 1480~1484.
- [5] 高兰兰, 檀慧明 *et al* LD 泵浦全固体 355nm 紫外脉冲激光器 [J]. 半导体光电, 2003, 24(2): 94~96
- [6] 蓝信钜. 激光技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 71.
- [7] ZHANG X Y, ZHAO Sh Zh, WANG Q P *et al* Optimization of  $\text{Cr}^{4+}$  doped saturable-absorber  $Q$ -switched laser [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(12): 2286~2294
- [8] ZAYHOWSKI J, KELLEY P L. Optimization of  $Q$ -switched lasers [J]. IEEE J Q E, 1991, 27(9): 2220~2225
- [9] 姚健铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 91~94
- [10] 克希耐尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 534~536
- [11] CRAXTON R S. Theory of high efficiency third harmonic generation of high power Nd:glass laser radiation [J]. Opt Commun, 1980, 34: 474~478.

• 简 讯 •

### 重 要 公 告

经过一段时间的筹备, 本刊的网站终于正式开通了, 网址是: <http://www.jgjs.net.cn>, 内设在线投稿、在线查询、在线审稿等几大版块, 欢迎广大读者踊跃投稿, 也敬请各位评审专家尽量在线审稿, 以提高稿件处理的效率, 加快期刊电子化、无纸化进程!

《激光技术》编辑部

2005年 11月