

La₃Ga₅SiO₁₄ 晶体电光调 Q 高重复频率 瓦级紫外激光器

陆婷婷 李小莉 臧华国 朱小磊 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 报道了一台激光二极管(LD)双端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体腔内三倍频 355 nm 紫外激光器。采用 La₃Ga₅SiO₁₄ (LGS)高重复频率电光调 Q 技术, U 型平凹腔结构设计, 在腔内用 I 类相位匹配的 LiB₃O₅ (LBO) 晶体实现二倍频, II 类相位匹配的 LBO 晶体实现三倍频, 获得了高效率、高峰值功率、高重复频率的 355 nm 紫外激光脉冲输出。在抽运功率 20.4 W 及电光调 Q 重复频率 10 kHz 的工作条件下, 获得脉宽 9.6 ns, 平均输出功率 1.29 W 的紫外激光输出, 光-光转换效率约为 6.3%。

关键词 激光器; 准连续紫外激光器; 电光调 Q; 内腔三倍频; LiB₃O₅ 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402005

Watt-Level High-Repetition Rate Ultraviolet Laser with La₃Ga₅SiO₁₄ Electro-Optic Q-Switch

Lu Tingting Li Xiaoli Zang Huaguo Zhu Xiaolei Lu Yutian

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A laser diode (LD) dual-end-pumped electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ solid-state ultraviolet laser is reported by using a U flat-concave resonator, with type I phase-matched LiB₃O₅ (LBO) as the second harmonic generation crystal and type II phase-matched LBO as the third harmonic generation crystal. A block of La₃Ga₅SiO₁₄ (LGS) crystal is used as a Q-switch. The 1.29 W output power of 355 nm is obtained at the pump power of 20.4 W and repetition frequency of 10 kHz with pulse width as short as 9.6 ns. The optical-optical transformation efficiency is about 6.3%.

Key words lasers; quasi-continuous wave ultraviolet laser; electro-optic Q-switch; intracavity frequency-tripling; LiB₃O₅ crystal

OCIS codes 140.3480; 140.3538; 140.3540; 140.3580; 140.3610

1 引言

紫外激光器具有波长短、可聚焦性能好、光子能量高、适于光学冷加工和精细加工, 以及激发特定的光化学反应的能力等特点^[1], 因而在光信息存储、精细微加工、大气探测、激光化学、激光生物学以及医疗等领域有着广泛的应用。与传统的准分子紫外激光器相比, 半导体激光(LD)抽运的全固态紫外激光器具有光束质量好、功率稳定性好、可靠性高、使用

方便、结构紧凑等诸多优点, 成为紫外激光器的主要发展方向^[2]。已有的研究报告显示, 对掺 Nd³⁺ 固体激光近红外波长进行非线性频率转换是获得全固态紫外激光最直接、最成熟的方法, 利用高重复频率调 Q 技术可以有效提高非线性频率转换效率, 获得大功率紫外激光输出。目前, 采用声光调 Q 技术获得准连续紫外激光脉冲输出的报道不断出现^[3~8], 而有关电光调 Q 高平均功率输出的紫外激光器的报

收稿日期: 2010-10-18; 收到修改稿日期: 2010-11-29

作者简介: 陆婷婷(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: tingting_lu@siom.ac.cn

导师简介: 朱小磊(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光技术和激光应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

道却不多见^[9],其原因是没有合适的电光 Q 开关器件。近年来,利用新型电光晶体 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS) 进行的高重复频率电光调 Q 实验研究工作取得了显著进展^[10~15],由于 LGS 电光晶体不但具有抗损伤阈值高、透光范围大、物理化学性能稳定的特征,而且压电环效应小,因而在高重复频率调 Q 应用中受到关注。

本课题组在 2008 年开展了 LGS 晶体电光调 Q 高重复频率全固态激光器的研究工作^[13,14]。利用山东大学提供的纵横比约为 10:1 的 LGS 晶体,在 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器中,获得了最高重复频率为 30 kHz 的 1064 nm 调 Q 激光脉冲输出,脉宽窄至 9.2 ns,最大平均输出功率达 6.2 W。在 V 型激光谐振腔束腰位置插入 LiB₃O₅ (LBO) 倍频晶体,在 20 kHz 重复频率下,获得了平均功率 2.3 W 的倍频绿光激光脉冲输出,脉冲宽度不大于 10 ns,光-光转换效率约为 10%。本文采用 LGS 晶体电光调 Q 开关,在双端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体 U 形谐振腔结构中,研究内腔倍频高重复频率紫外激光器的输出特性,并与声光调 Q 实验结果进行比较。

2 实验装置及原理分析

实验采用双端抽运方式,抽运源为尾纤连续输出的 808 nm LD,纤芯直径为 400 μm ,数值孔径 (NA) 为 0.22。LD 发出的抽运光经过光学耦合系统后聚焦进 Nd:YVO₄ 晶体,焦点位置在略超过晶体中心处,实测焦点处光斑直径约为 1 mm。Nd:YVO₄ 晶体掺杂原子数分数为 0.25%,尺寸为

4 mm×4 mm×10 mm,沿 a 轴切割,通光方向长度为 10 mm,晶体的两个通光面分别镀 1064 nm 和 808 nm 增透膜。Nd:YVO₄ 晶体冷却采用微通道铜制热沉,晶体冷却温度控制在 23 $^{\circ}\text{C}$ 。

首先,利用固体激光器谐振器设计软件 Lascad 计算抽运功率为 20 W 时 Nd:YVO₄ 晶体内部的温度分布,如图 1 所示,可知 Nd:YVO₄ 晶体最高温度为 321.8 K,约 49 $^{\circ}\text{C}$ 。晶体中心轴向温度分布趋于均匀,说明对抽运功率吸收均匀,有利于振荡模光束质量的提高。

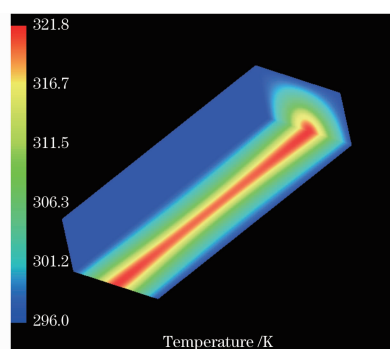


图 1 抽运功率为 20 W 时 Nd:YVO₄ 晶体内的温度分布
Fig. 1 Temperature spatial distribution of Nd:YVO₄ crystal when pump power is 20 W

实验原理光路如图 2 所示,凹面镜 M1 曲率半径为 1.2 m,对 1064 nm 波长高反。平面镜 M6 对 1064,532 和 355 nm 波长全反。平面镜 M2 和 M3 为 45 $^{\circ}$ 双色镜,对 808 nm 波长增透,对 1064 nm 波长全反。平面镜 M4 对 1064 nm 波长增透,对 532 nm 波长全反。平面镜 M5 作为紫外光输出耦合镜,与光轴成一定角度放置。

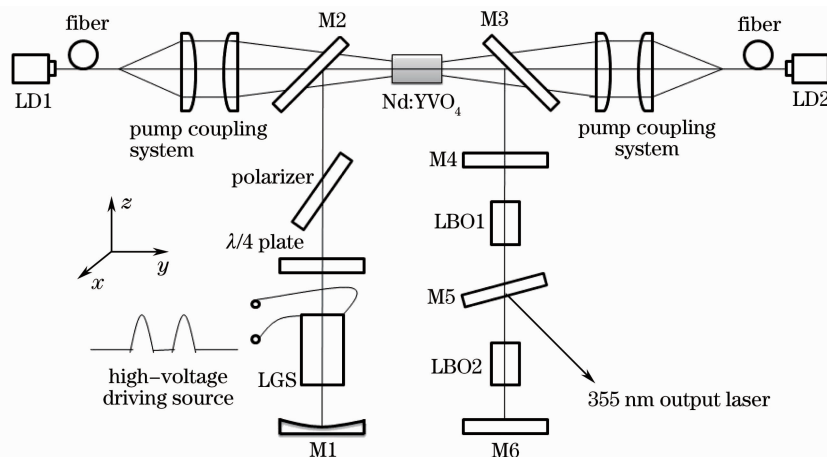


图 2 腔内频率转换 355 nm 紫外激光器光路图

Fig. 2 Experimental setup of intracavity frequency conversion 355 nm UV laser

实验采用 LBO 晶体作为二倍频 (SHG) 和三倍频 (THG) 晶体。二倍频晶体的参数为: I 类相位匹配,切

割角为 $\theta = 90^{\circ}$, $\varphi = 11.4^{\circ}$, 尺寸为 4 mm×4 mm×12 mm,晶体两面镀有对 1064 nm 和 532 nm 增透双色

膜。三倍频晶体的参数为:II类相位匹配,切割角为 $\theta=42.7^\circ, \varphi=90^\circ$, 尺寸为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 12\text{ mm}$, 晶体两面镀有对 1064, 532 和 355 nm 增透三色膜。两块晶体分别用铝箔包裹置于铜制热沉。谐振腔内的激光束在两块 LBO 晶体中的偏振匹配如图 3 所示。

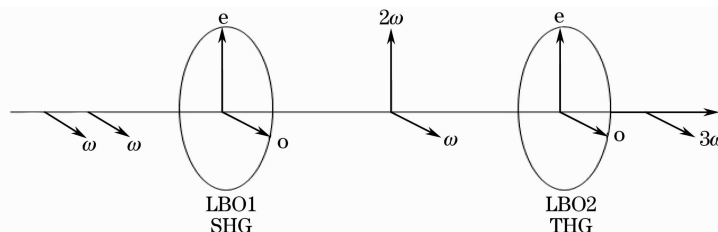


图 3 LBO 晶体中倍频(I类)与和频(II类)光束的偏振匹配情况

Fig. 3 Schematic of polarization states of the second (type I) and the third (type II) harmonic of laser beams in two LBO crystals

激光器的电光 Q 开关采用纵横比较大的 LGS 晶体, 尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 45\text{ mm}$ (由山东大学提供), 采用 z 向通光, x 方向加电压。LGS 晶体 9:1 的纵横比大大降低了调 Q 电压, 其对应的 $V_{\lambda/4}$ 理论值仅为 1967 V, 有利于实现高重复频率驱动^[15]。

实验采用脉冲加压式电光调 Q 方式, 偏振片及 $\lambda/4$ 波片和 LGS 晶体共同构成电光 Q 开关。晶体 Q 开关的高频高压驱动源为实验室自行研制, 输出重复频率在 $0\sim 30\text{ kHz}$ 范围内连续可调, 输出高压最高可达 4 kV。

3 实验结果

当抽运功率恒定为 20 W 时, 355 nm 激光器单脉冲能量和脉宽随重复频率的变化曲线如图 4 所示。随着重复频率的增大, 当增益介质抽运时间小于上能级寿命时, 造成增益介质激活区反转粒子数密度降低, 因此单脉冲能量减小, 激光脉宽也随之展宽。同时, 紫外激光平均输出功率随重复频率的变化如图 5 所示, 实验结果显示, 激光器在 $5\sim 30\text{ kHz}$ 频率范围内其最佳工作频率为 10 kHz。

当 LD 总抽运功率达到 20.4 W 时, 355 nm 紫外激光脉冲最大平均功率输出出现在 10 kHz 重复频率状态下, 达到 1.29 W, 此时测得激光脉冲宽度约为 9.6 ns, 紫外激光 Q 脉冲波形如图 6 所示, 脉冲峰值功率达 13.4 kW, 激光器的光-光转换效率达到 6.3%。在同一个激光器实验装置上, 在相同抽运功率和重复频率下, 当采用声光调 Q 开关替代 LGS 电光开关时, 紫外激光脉冲输出平均功率能够上升到 1.8 W, 高于 LGS 电光调 Q 实验结果。初步分析其原因主要是由于 LGS 电光开关的插入损耗比声

LBO 晶体 I 类相位匹配所产生的二次谐波与基波具有相互垂直的偏振态, 恰好能够满足 LBO (II 类) 三倍频的相位匹配条件, 偏振损耗较小。三倍频 LBO 晶体对二倍频 LBO 晶体产生的倍频光和剩余的基波进行和频, 最终获得 355 nm 紫外激光输出。

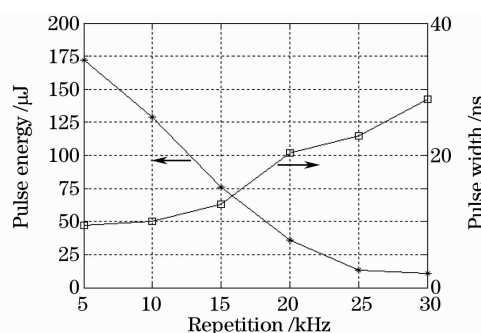


图 4 355 nm 激光器单脉冲能量和脉宽随重复频率的变化曲线

Fig. 4 Pulse energy and pulse width of 355 nm laser with different repetition rates

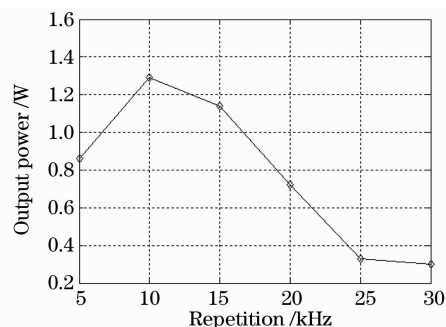


图 5 355 nm 激光平均功率随重复频率的变化曲线

Fig. 5 Average power versus repetition frequency of 355 nm laser

光 Q 开关严重造成的。此时声光调 Q 紫外激光脉冲宽度约为 12 ns, 高于电光调 Q 激光脉冲宽度, 说明电光调 Q 更容易获得窄脉宽。

在 10 kHz 重复频率下, 紫外激光器输出平均功率随抽运功率的变化曲线如图 7 所示, 抽运功率在 $11\sim 20\text{ W}$ 的区间内, 激光器紫外输出的斜率效率约为 11.8%。

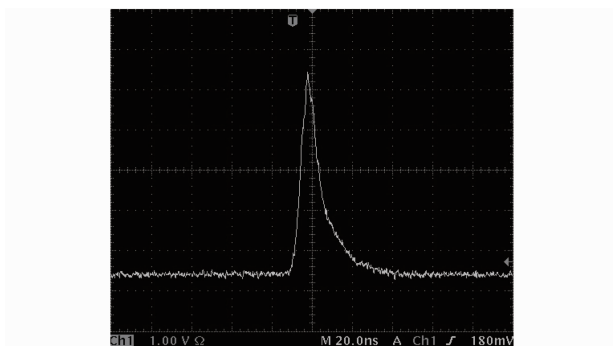


图 6 355 nm 激光单脉冲波形图

Fig. 6 Pulse waveform of 355 nm laser

实验中,用 Spiricon M^2 -200 光束质量分析仪测量紫外激光器的输出光束质量。355 nm 紫外激光输出功率为 1.29 W 时,测得紫外激光输出光束质

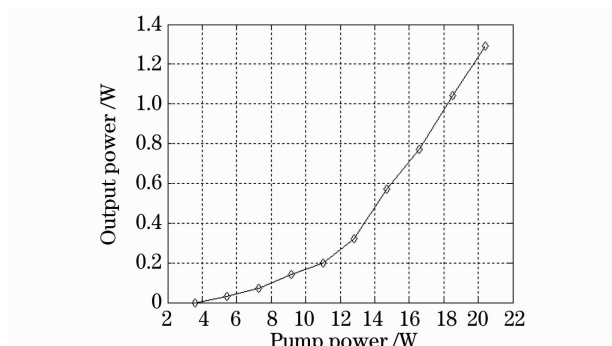


图 7 355 nm 激光器平均功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 7 Average power as a function of pump power of 355 nm laser

量因子分别为 $M_x^2=1.21, M_y^2=1.31, M^2$ 测量结果如图 8(a)所示,图 8(b)为激光能量远场空间分布情况。

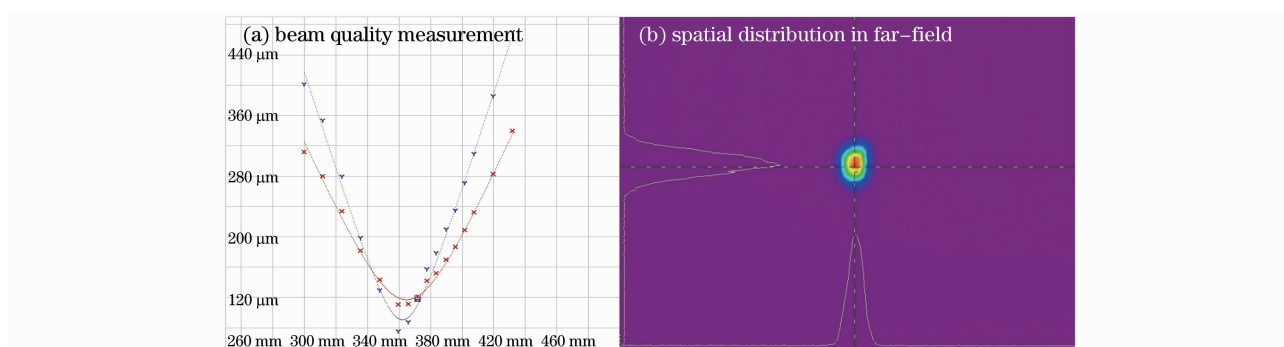


图 8 Spiricon M^2 -200 光束质量分析仪的测量结果

Fig. 8 Measurement of the Spiricon M^2 -200 beam propagation analyzer

4 结 论

利用大纵横比的电光晶体 LGS 作为高重复频率调 Q 元件,成功实现了双端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体双 LBO 晶体腔内三倍频 355 nm 全固态准连续紫外激光振荡输出。总抽运功率为 20.4 W 时,获得平均功率为 1.29 W 的 10 kHz 重复频率紫外激光脉冲序列输出,光-光转换效率达 6.3%,紫外激光单脉冲能量达到 130 μJ,峰值功率 13.4 kW,光束质量较好。与声光调 Q 全固态紫外激光器相比,电光调 Q 紫外激光器更容易获得窄脉宽输出,而且结构紧凑,在激光精细加工和超精细加工行业中有很大的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 Y. Ekinci, H. Solak, C. David. Extraordinary optical transmission in the ultraviolet region through aluminum hole array[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(2): 172~174
- 2 A. V. Hicks, C. X. Wang, G. Y. Wang. Advances in high power diode-pumped ultraviolet lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5332**: 120~133
- 3 Xiuwei Fan, Haitao Huang, Jijian Jiang *et al.*. Generation of UV

radiation at 335.5 nm based on frequency-quadrupling of a diode-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 192~194

- 4 C. X. Wang, G. Y. Wang, A. V. Hicks *et al.*. High power Q-switched TEM₀₀ mode diode-pumped solid state lasers with >30 W output power at 355 nm[C]. *SPIE*, 2006, **6100**: 610019
- 5 H. Kitano, T. Matsui, K. Sato *et al.*. Efficient 355 nm generation in CsB₃O₅ crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4): 263~265
- 6 Hu Ailan, Guo Qiang, Wu Bian *et al.*. LD pumped 355-nm quasi-CW ultraviolet laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1810~1814
- 胡爱兰,郭强,吴边等. LD 抽运 355-nm 准连续紫外激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1810~1814
- 7 Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying *et al.*. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 29~32
- 石朝辉,樊仲维,张瑛等. 高效率大功率全固态紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 29~32
- 8 Liu Huan, Gong Mali. Compact LD end-pumped Nd:YVO₄ intracavity frequency-tripled 355 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1341~1346
- 刘欢,巩马理. 紧凑型激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 腔内三倍频 355 nm 紫外激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1341~1346
- 9 X. Liu, D. Li, P. Shi *et al.*. Highly efficient third-harmonic generation with electro-optically Q-switched diode-end-pumped

- Nd:YVO₄ slab laser [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**(1): 192~196
- 10 X. Yin, J. Wang, H. Zhang *et al.*. Electrooptic properties and electrooptic Q-switch of $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ single crystal[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(part1): 7419~7421
- 11 Chunyu Wang, Huaguo Zang, Xiaoli Li *et al.*. LD-pumped high repetition rate Q-switched Nd:YVO₄ laser by using $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ single crystal electro-optic modulator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6): 329~331
- 12 Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli *et al.*. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1654~1659
朱小磊, 唐昊, 李小莉等. 高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1654~1659
- 13 Hao Tang, Xiaolei Zhu, Junqing Meng *et al.*. 20-kHz watt-level green laser with LGS crystal electro-optic Q-switch[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 812~814
- 14 Tang Hao, Zhu Xiaolei, Meng Junqing *et al.*. High repetition rate short pulse width LGS electro-optic Q-switch Nd:YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 137~141
唐昊, 朱小磊, 孟俊清等. 高重复频率窄脉宽 LGS 电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 137~141
- 15 Wang Jiyang, Yin Xin, Zhang Shaojun *et al.*. Growth, property and electro-optical application of lagasite crystal[J]. *Progress in Physics*, 2007, **27**(9): 344~360
王继扬, 尹鑫, 张少军等. 硅酸镓镧单晶的生长、性质及电光应用的研究[J]. *物理学进展*, 2007, **27**(9): 344~360