

文章编号:1004-4213(2010)10-1757-5

LD 侧面抽运 Nd : YAP 腔内三倍频蓝光激光器*

胡博宇¹, 凌铭², 曹丰慧¹, 金光勇¹, 梁柱¹

(1 长春理工大学 激光技术研究所, 长春 130022)

(2 上海理工大学 医疗器械工程研究所, 上海 200093)

摘 要:研制了一台 LD 侧面抽运 Nd : YAP 腔内三倍频 447.1 nm 脉冲蓝光激光器. 采用列阵高频激光二极管侧面抽运 Nd : YAP 晶体, 使用 V 型折叠腔, LN 晶体电光调 Q, 输出高峰值功率的 1 341.4 nm 偏振基频光. 选取 KTP 晶体 II 类临界相位匹配倍频, 获得 670.7 nm 红光. 使用 LBO 晶体 I 类临界相位匹配把 670.7 nm 的倍频光与 1 341.4 nm 的基频光进行和频, 获得三倍频 447.1 nm 的蓝光输出. 实验结果表明: 优化后的 V 型折叠腔, 可提高非线性转换效率, 在平均抽运功率 92.4 W 时, 获得了平均功率 887 mW、峰值功率 17.7 kW、脉宽 50 ns 的偏振蓝光输出, 光-光转换效率为 0.96%.

关键词:47 nm 蓝光激光器; Nd : YAP 晶体; 三倍频; 电光调 Q

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103910.1757

0 引言

蓝光激光器以其波长短、衍射效应小、能量高等特点, 广泛应用于激光显示、数据存储、海洋探测、生物医学等领域^[1-2].

目前, 在众多产生蓝光的方式中, 结构简单、技术较成熟的是应用 Nd³⁺ 的准三能级跃迁, 产生 946 nm 的基频光, 然后对其倍频得到蓝光输出^[3-6]. 2006 年, 长春光机所郑权等人利用半导体端面抽运 Nd : GdVO₄, 在 30 W 的抽运功率下产生了 5.3 W 的 456 nm 蓝光^[7]. 然而, 在大功率端面抽运时, 准三能级系统存在着不可避免的再吸收损耗, 严重阻碍了激光晶体对大功率 LD 抽运的吸收^[8]. 同时准三能级跃迁也存在着较四能级跃迁阈值高、发射截面小的缺陷, 更是限制了大功率激光的输出. 因此, 应用 LD 侧面抽运 Nd³⁺ 的四能级系统, 对输出的 1.3 μm 基频光进行三倍频得到蓝光的输出方式, 将成为大功率蓝光激光器发展的新方向. 2008 年, Zhu Hai-yong 等人利用连续 LD 侧面抽运 Nd : YAP 晶体, 使用声光调 Q、LBO 倍频、KTP 和频, 获得了 4.76 W、脉宽 190 ns 的 447 nm 蓝光输出, 光-光转换效率为 0.92%^[9].

本文应用 Nd : YAP 晶体的⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2} 四能级跃迁, 采用 LD 侧面抽运方式获得 1 341.4 nm 基频光, 选用 LN 电光调 Q、KTP 二倍频、LBO 三倍频,

在重复频率为 1 000 Hz 时, 获得了脉宽 50 ns、峰值功率 17.7 kW 的 447.1 nm 蓝光输出.

1 实验设计

高功率的蓝光输出方式将以 Nd³⁺ 的四能级产生 1.3 μm 为主, 实现此波段输出的晶体主要有 Nd : YAP、Nd : YAG、Nd : GdVO₄、Nd : YVO₄. 表 1 给出了这几种 Nd³⁺ 晶体⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2} 四能级跃迁的参量和晶体热传导率的对比.

表 1 几种 Nd³⁺ 晶体⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2} 跃迁的参量和晶体热传导率的对比

Table 1 Comparison of ⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2} transition parameters and thermal conductivity of Nd-doped laser crystals

Crystal	Nd : YAP	Nd : YAG	Nd : GdVO ₄	Nd : YVO ₄
⁴ F _{3/2} - ⁴ I _{13/2} /nm	1 341	1 319/1 338	1 341	1 342
Emission section/ (×10 ⁻¹⁹ cm ²)	2.2	0.92/0.87	1.8	6.0
Lifetime /μs	180	230	100(90)	99(95)
Thermal conductivity/ (W · cm ⁻¹ · K ⁻¹)	11	14	11.7	5.2

在相同外部条件下, 激光输出功率与激光晶体的受激发射截面与荧光寿命的乘积成正比, 而激光阈值与上述两参量乘积成反比. 从表 1 中可看出 Nd : YAP 的受激截面和荧光寿命都是较大的, 两者乘积只比 Nd : YVO₄ 小, 但 Nd : YVO₄ 的低热导率限制了其高抽运功率下的使用. 而 Nd : YAP 的热导率与 Nd : YAG 接近, 能更好的适应较强的热效应. 此外, Nd : YAP 晶体是各向异性的, 具有天然双折射性质, 输出为偏振光, 这对电光调 Q 具有重

* 长春市科技局科技计划项目(2009002)资助

Tel: 0431-85582465

Email: hby0625@163.com

收稿日期: 2009-10-13

修回日期: 2010-04-03

要意义. Nd:YAP 不但在 1.3 μm 波段的分支比最大,而且对于 1.3 μm 的吸收谱,在非偏振抽运时有 4 nm~5 nm 的吸收带宽,对泵浦源的稳定性要求不那么苛刻^[10-11]. 因此 Nd:YAP 晶体是实现低阈值、高功率的 LD 侧面抽运 Nd³⁺ 四能级跃迁产生 1.3 μm 波段激光的优良材料,具有其它晶体不可比拟的优势.

实验选用 V 型折叠谐振腔. 图 1 为实验原理.

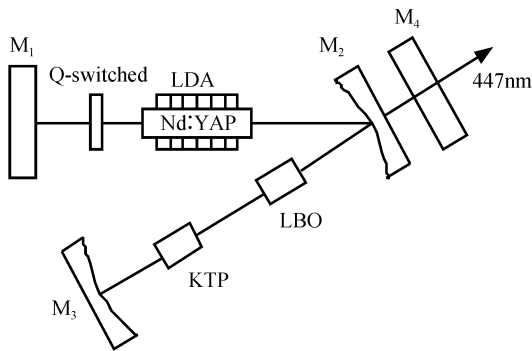


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

激光晶体选用 Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.9 at%, b 轴切割的 Nd:YAP. 此方向切割的 Nd:YAP 晶体,产生 c 偏振激光时,1 341.4 nm (1 079.5 nm) 的谱线增益最强^[12-13]. 晶体尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 晶体两端镀 1 341.4 nm 和 1 079.5 nm 增透膜. LD 抽运源由三只峰值功率为 120 W 的列阵管按 120° 配置,脉宽取 180 μs ,重复频率 1 000 Hz. 选用 LN 作为电光调 Q 晶体,利用 Nd:YAP 晶体自身作为起偏检偏器,直接对 Nd:YAP 晶体输出的偏振光进行调 Q,减少起偏器件带来的插入损耗,降低激光阈值. 调 Q 电源是由长春理工大学研制的 LH-T1K 型高重频调 Q 电源,可与 LD 抽运电源同步触发,其晶体电压和延迟时间均可调.

平面反射镜 M₁ 镀 1 341.4 nm 和 670.7 nm 的高反膜 ($R=99.9\%$); 平凹折叠输出镜 M₂ 曲率半径 $R=150 \text{ mm}$, 镀 1 341.4 nm 和 670.7 nm 的高反膜 ($R=99.9\%$), 同时镀 447.1 nm 的增透膜 ($T>95\%$); 平凹反射镜 M₃ 曲率半径 $R=310 \text{ mm}$, 镀 1 341.4 nm、670.7 nm 高反膜 ($R=99.9\%$). 以上所有腔镜均镀 1 079.5 nm 的增透膜 ($T>95\%$), 以抑制 1 079.5 nm 的起振. M₄ 为滤光镜.

目前,能够通过非线性变换得到蓝光的晶体主要有 LBO、KTP、BBO、BIBO 等. 虽然 BBO 和 BIBO 有很大的有效非线性系数,但是他们的走离角较大,对输出的光束质量影响较大,所以我们只考虑使用 KTP、LBO 作为非线性频率变换晶体. 表 2 为 300 K 时, LBO、KTP 晶体对 1.3 μm 进行倍频的参量表.

由倍频效率

$$\eta = \frac{8\pi^2 L^2 d_{\text{eff}}^2}{n_o^2 n_{2o} \lambda_o^2 c \epsilon_0} |I_w| \left[\sin \left(\frac{\Delta k l}{2} \right) / \frac{\Delta k l}{2} \right]^2$$

可知,除了匹配因子外,倍频效率主要与有效非线性系数和基频光强有关. 从表中可以看出,虽然 KTP 的走离角比 LBO 大,但 KTP 的有效非线性系数远大于 LBO.

表 2 300 K 时, LBO、KTP 晶体对 1 341.4 nm 进行倍频的参量表

Table 2 Phase matching parameters of KTP, LBO for 1 341.4 nm SHG in 300 K

Crystal	KTP	LBO	LBO
Phase matching type	CPM II	CPM I	CPM II
$d_{\text{eff}} / (\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	2.84	0.817	0.645
Walk-off angle / mrad	44.30	3.45	3.25
PM angle	$\theta=58.8^\circ$, $\varphi=0^\circ$	$\theta=86.1^\circ$, $\varphi=0^\circ$	$\theta=3.6^\circ$, $\varphi=0^\circ$
Accept angle / (mrad · cm)	1.69	12.11	24.8

考虑下一步的和频,选取有效非线性系数大的 KTP 作为倍频晶体,采用 II 类临界相位匹配作为倍频方式,以提高 670.7 nm 的输出强度. KTP 晶体尺寸为 $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$, 两端镀 1 341.4 nm 和 670.7 nm 的增透膜 ($T>95\%$).

表 3 为 300 K 时,和频晶体的参量表. 由表可以看出 LBO 虽然有效非线性系数较小,但是其接收角较大,可以更为容易的接收倍频光和基频光,进行和频. 同时 LBO 较小的走离角也可以提高输出的光束质量. 和频激光器中二次谐波功率与总功率之比 M 为

$$M = P_{670.7} / (P_{670.7} + P_{1341.4})$$

如果以 1 341.4 nm 和 670.7 nm 输入的光子配比为 1:1, 则 M 为 0.67, 此时在理论上输出 447 nm 和频蓝光转换效率最高^[14], 因此在谐振腔设计和晶体选择时应充分考虑能量的分配, 满足最佳条件. 最终我们选择 LBO 的 I 类临界相位匹配作为和频方式, LBO 晶体尺寸为 $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$, 一端镀 1 341.4 nm 和 670.7 nm 的增透膜 ($T>95\%$), 一端镀 1 341.4 nm、670.7 nm 和 447.1 nm 的增透膜 ($T>95\%$).

表 3 300 K 时, LBO、KTP 晶体的和频参量表

Table 3 Phase matching parameters of KTP, LBO for SMF in 300K

Crystal	KTP	LBO	LBO
Phase matching type	CPM II	CPM I	CPM II
$d_{\text{eff}} / (\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	4.04	0.816	0.586
Walk-off angle / mrad	21.38	0	12.61
PM angle	$\theta=78.7^\circ$, $\varphi=0^\circ$	$\theta=90^\circ$, $\varphi=19.9^\circ$	$\theta=59.9^\circ$, $\varphi=0^\circ$
Accept angle / (mrad · cm)	1.66	3.57	3.04

在高功率、高重频抽运情况下,热效应对激光输

出的光束质量会产生很大影响^[15],所以必须首先考虑Nd:YAP晶体的热效应.通常将Nd:YAP晶体等效成一透镜,表4为应用非稳腔法对在1000 Hz时不同抽运电流的热焦距进行测量的结果.

表4 重复频率1000 Hz时,不同抽运电流下

Nd:YAP晶体的热焦距

Table 4 Thermal focal length of Nd:YAG versus the pump current

Pump current/A	50	55	60	65	70	75
Thermal focal length/mm	1 170	1 090	1 005	895	780	635

图1中设 L_1 为 M_1 到激光晶体的距离, L_2 为激光晶体到 M_2 的距离, L_3 为 M_2 与 M_3 之间的距离.由于器件尺寸的限制,选取 $L_1=70$ mm.依据高斯光束的矩阵变换和ABCD定律,利用MATLAB软件,对腔参量进行数值计算.图2为不同腔长时,热焦距 f 对 G 因子、两臂束腰半径的影响曲线.由图2可看出当 $L_1=70$ mm、 $L_2=170$ mm、 $L_3=90$ mm时,热焦距从120~1500 mm时 G 因子均处于稳区内,可以较好的减小热效应造成的谐振腔不稳定性对输出的影响.同时主臂内的束腰半径较大,有利于增大激光晶体的模体积;折叠臂内的束腰半径较小,有利于提高变频晶体内的功率密度.

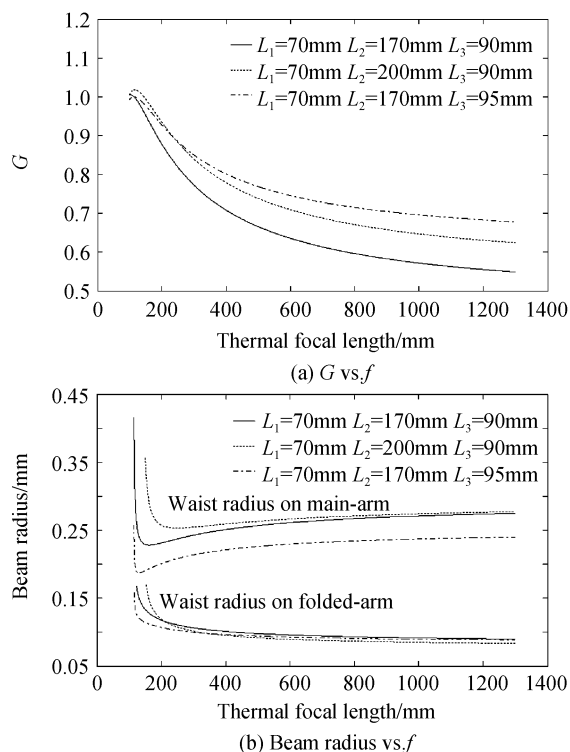


图2 不同腔长下, G 因子和束腰半径随热焦距 f 的变化曲线

Fig. 2 Variation of G and beam radius on two arms with the thermal focal length for different cavity length

2 实验结果及分析

实验中依据对腔结构分析和优化的结果,将

KTP和LBO放置于折叠臂束腰两侧.使用海洋光学光谱仪,首先对输出光的光谱进行测量,结果如图3.

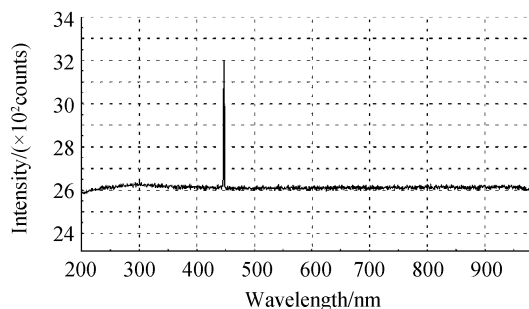


图3 蓝光光谱

Fig. 3 Spectra of blue light

从图3可看出,蓝光光谱较纯.这是因为所设计的这种产生蓝光的方式较好地抑制了除1341.4 nm外的其他谱线的起振,使得基频光和倍频光谱线较纯的结果.

图4为抽运频率1000 Hz时,测量的蓝光输出能量与LD抽运电流的曲线.低抽运电流时,激光器在阈值附近运转,基频光能量增长较慢、变频晶体的效率较低;高抽运电流时,基频光能量增长较快、变频晶体的效率较高.在平均抽运功率92.4 W时,最终输出了887 μ J,脉宽为50 ns,峰值功率为17.7 KW的447.1 nm的蓝光,光-光转换效率0.96%.图5和图6分别为抽运电流为75 A时蓝光的脉宽和近场光斑图.

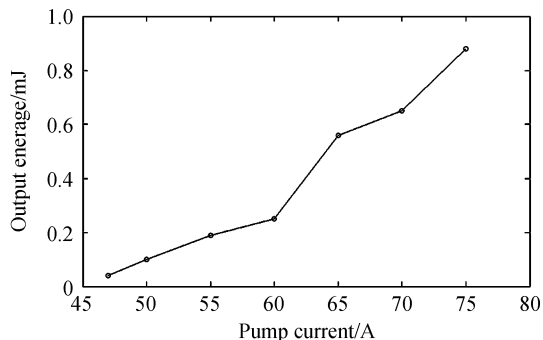


图4 输出能量与抽运电流曲线

Fig. 4 Output energy versus pump current

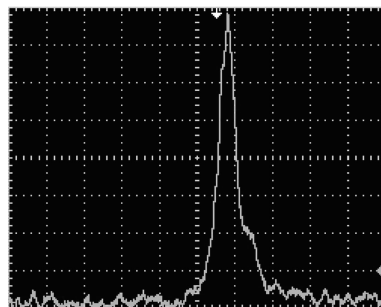


图5 蓝光脉宽图

Fig. 5 Temporal pulse profile of blue light

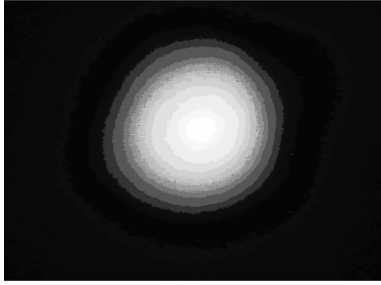


图6 近场蓝光光斑图

Fig. 6 Blue light spot at near field

测量结果显示,蓝光输出半小时的稳定度优于3%。

3 结论

实验验证了对 LD 侧面抽运 Nd : YAP 晶体产生的 1 341.4 nm 激光进行电光调 Q 和非线性光学频率变换,可获得高功率、窄脉宽的 447 nm 蓝光输出。在抽运功率 92.4 W、重复频率 1 000 Hz 时,获得了峰值功率 17.4 KW,脉宽 50 ns 的蓝光输出,光-光转换效率 0.96%。这是目前 447 nm 蓝光输出中脉宽最窄,转换效率最高的报道。可以预见,在提高抽运功率的前提下,对腔型进一步优化,有效地克服晶体热效应,可以获得更高功率、更好光束质量的蓝光输出。

参考文献

- [1] GAO Jing, YU Xin, ZHANG Wen-ping, *et al.* Research progress in LD pumped all-solid-state blue lasers[J]. *Optical Technique*, 2007, **32**(3): 430-434.
高静,于欣,张文平,等. LD 抽运全固态蓝光激光器的研究进展[J]. *光学技术*, 2007, **32**(3): 430-434.
- [2] LUI Wei-ren, HUO Yu-jing, HE Shu-fang, *et al.* All-solid-state blue laser technology[J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(4): 221-223.
刘伟仁,霍玉晶,何淑芳,等. 全固体蓝色激光技术综述[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(4): 221-223.
- [3] GAO Lan-lan, TAN Hui-ming. Compact and efficient 600 mW blue laser with a composite Nd : YAG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 8-10.
高兰兰,檀慧明. 利用复合 Nd : YAG 实现 600 mW 高效紧凑型蓝光激光器[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 8-10.
- [4] LI Bin, YAO Yi, LI Yong-da, *et al.* LD pumped Nd : YAG all solid state blue laser[J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(4): 306-309.

- 李斌,姚奕,李永大,等. LD 泵浦 Nd : YAG 全固态蓝光激光器[J]. *应用激光*, 2008, **28**(4): 306-309.
- [5] BU Yi-kun, CHENG Ying-xin, ZHENG Quan, *et al.* LD pumped Nd : YVO₄ crystal LBO frequency doubling 457 nm blue laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 336-339.
卜铁坤,陈颖新,郑权,等. LD 泵浦 Nd : YVO₄ 晶体 LBO 倍频 457 nm 蓝色激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 336-339.
- [6] ZHENG Quan, ZHAO Ling, QIAN Long-sheng. LD-pumped high efficient folded cavity YAG/LBO blue laser[J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(3): 144-146.
郑权,赵岭,钱龙生. LD 泵浦的高效率折叠腔 YAG/LBO 蓝光激光器[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(3): 144-146.
- [7] JIA Fu-qiang, XUE Qiu, ZHENG Quan, *et al.* 5.3 W deep blue light generation by intra-cavity frequency doubling of Nd : GdVO₄[J]. *Appl Phys B*, 2006, **83**(2): 245-247.
- [8] FAN T, BYER R. Model and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd : YAG laser[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, **23**(5): 605-612.
- [9] ZHU Hai-yong, ZHANG Ge. Multi-watt power blue light generation by intracavity sum-frequency-mixing in KTiOPO₄ crystal[J]. *Opt Exp*, 2008, **16**(5): 2989-2994.
- [10] CHEN Ying, CAI Zhi-ping. Measurement and analysis for polarized spectrum of Nd : YAP crystal[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2005, **44**(Sup).
陈颖,蔡志平. Nd : YAP 激光晶体偏振光谱的测量与分析[J]. *厦门大学学报增刊(自然科学版)*, 2005, **44**(Sup).
- [11] SHEN Hong-yuan, ZHANG Ge. High power 1 341.4 nm Nd : YAlO₃ CW laser and its performances[J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(2): 69-72.
- [12] MASSY G A, YARBOROUGH J M. High average power operation and nonlinear optical generation with the Nd : YAlO₃ laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1971, **18**(12): 576-579.
- [13] WEBER M J, VARITIMOS T E. Optical spectra and intensities of Nd³⁺ in YAlO₃[J]. *J Appl Physics*, 1971, **42**(12): 4996-5005.
- [14] WANG Chun-yu, ZHU Xiao-lei, LU Yu-tian. Pumping intensity distribution in LDA side pumped solid state lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **36**(6): 961-965.
王春雨,朱小磊,陆雨田. LD 侧面泵浦固体激光器泵浦光分布模拟[J]. *光子学报*, 2005, **36**(6): 961-965.
- [15] KOCHNER W. Solid-state laser engineering[M]. SUN Wen, JIANG Ze-wen, CHENG Guo-xiang, transl. Beijing: Science Press, 2002: 534-536.
W. 希克耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥,译. 北京: 科学出版社, 2002: 534-536.
- [16] LING Ming. Reseaches of laser diary side-pumped Nd : YAP blue laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
凌铭. 半导体侧面泵浦 Nd : YAP 蓝光激光器研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.

LD Side-pumped Nd : YAP Intra-cavity Frequency-tripled Blue Laser

HU Bo-yu¹, LING Ming², CAO Feng-hui¹, JIN Guang-yong¹, LIANG Zhu¹

(1 *Laser Technology Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022*)

(2 *Institute of Medical Instrument Engineering University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: A laser-diode array side-pumped Nd : YAP intra-cavity frequency-tripled 447 nm pulse blue laser was reported. After high peak power of polarized 1 341.4 nm fundamental laser was generated by using high frequency laser-diode array side-pump Nd : YAP crystal, V-type resonator and LN crystal for Q-switched, 670.7 nm red laser second harmonic generation (SHG) was obtained with II critical phase matching (CPM) KTP crystal, and 447.1 nm blue laser by sum frequency mixing (SFM) of the 1 341.4 nm and 670.7 nm radiation was obtained with I CMP LBO crystal. The experimental results show that an optimized V-type resonator can increase the efficiency of nonlinear conversion. At the incident pumping power of 92.4 W, the output power of polarized blue laser is 887 mW, the peak power of blue laser is 17.7 kW, and the pulse width is 50 ns, corresponding to an optical-to-optical conversion efficiency of 0.96%.

Key words: 447 nm blue laser; Nd : YAP crystal; Frequency tripling; Electroptical Q-switched



HU Bo-yu was born in 1984. He is pursuing the M. S. degree and his research interests focus on all solid state laser.



LIANG Zhu was born in 1938. Now he is a professor at Changchun University of Science and Technology, and his research interests focus on laser theory, technology and applied research.