量子光学学报 29(3):031002, 2023
Journal of Quantum Optics

DOI:10.3788/JQO20232903.1002

高功率全固态 355 nm 紫外脉冲激光器

赵昱栋[1]， 张艳林[1]， 杨婕[1]， 刘鑫宇[1]， 卢华东[1,2†]

（1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室 山西大学光电研究所 山西 太原 030006；

2. 山西大学 极端光学协同创新中心 山西 太原 030006）

摘要：紫外激光具有单光子能量大、易聚焦的特点，且大多数材料对其吸收较强，在标记、复合材料切割、钻孔、精细加工等领域有着广泛的应用。本文报道了一种基于 1 064 nm 红外光，采用非线性光学频率变换技术实现 10 W、355 nm 紫外脉冲激光输出的全固态实验装置。实验中设计了用 888 nm 半导体激光器端面泵浦的结构紧凑、功率稳定、光斑质量好的“Z”型声光调 Q 1 064 nm 谐振腔，再利用腔外倍频、腔外和频技术得到 355 nm 紫外激光。当输入的泵浦功率为 80 W、重复频率为 50 kHz 时，得到了平均输出功率为 10 W，光束质量为 $M_x^2 = 1.13$，$M_y^2 = 1.02$ 的 355 nm 紫外脉冲激光，泵浦光到紫外光的光 -光转化效率为 12.5%。

关键词：紫外激光； 脉冲； 全固态激光； 高功率激光器

中图分类号：TN248 **文献标识码**：A

High Power All Solid State 355 nm UV Pulsed Laser

ZHAO Yu-dong[1]， ZHANG Yan-lin[1]， YANG Jie[1]， LIU Xin-yu[1]， LU Hua-dong[1,2†]

(1. *State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China;*

2. *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: Ultraviolet light has the advantages of large single photon energy, being easily focused, and most materials have strong absorption of ultraviolet light. It is widely used in marking, composite cutting, drilling, fine processing and other fields. An all-solid-state experimental device based on 1 064 nm infrared light and nonlinear optical frequency conversion technology to achieve 10 W 355 nm ultraviolet pulsed laser is reported in this paper. In the experiment, a “Z” type acousto-optic Q-switched 1 064 nm resonator, which is end-pumped by 888 nm semiconductor laser, was designed with a compact structure, stable power and good beam quality. The resonator has a large cavity mode, which can match the pump power well and alleviate the thermal effect of gain crystal. When the pump power is 85.7 W, the maximum average output power of 1 064 nm laser is 33.5 W, and its slope efficiency is 59.8% after linear fitting. The 355 nm ultraviolet laser is obtained by extra-cavity frequency doubling and extra-cavity frequency

收稿日期：2022-09-20； **接受日期**：2023-02-06

基金项目：国家自然科学基金（61975100；62027821；62105192）；山西省应用基础研究项目（20210302121004）；山西省重点研发计划（202102150101002）；山西省高等学校创新人才计划；山西省“1331 工程”重点学科建设计划；山西省留学基金委资助研究项目（2022-015）

作者简介：赵昱栋（1997–），男，山西长治人，研究方向为固体激光技术。E-mail：1322080170@qq.com

† **通信作者**：卢华东，E-mail：luhuadong@sxu.edu.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

summing techniques. With the continuous increase of the incident pump power, in addition to the gradual increase of the powers of the 1 064 nm laser, 532 nm laser and 355 nm laser, the beam waist sizes and positions of the 1 064 nm laser and the 532 nm laser at the sum frequency crystal will have small changes, which will directly affect the output power and conversion efficiency of the 355 nm ultraviolet laser. When the incident pump power and repetition rate are 80 W and 50 kHz, respectively, a pulsed 355 nm ultraviolet laser with an average output power of 10 W, beam quality of $M_x^2 = 1.12$ and $M_y^2 = 1.03$ is obtained, and the conversion efficiency from the pump light to the ultraviolet light is 12.5%. It can be predicted that further optimizing the power ratio and beam waist size on this basis will result in a larger output power of 355 nm ultraviolet light.

Keywords: 355 nm; pulsed laser; all-solid-state laser; high power laser

0 引言

半导体二极管（Laser Diode, LD）泵浦的全固态激光器具有转换效率高、使用寿命长、结构紧凑、输出功率稳定等优点，被广泛应用于激光器行业中，长期以来都是各国激光器研究领域中的热点[1]。尤其是基于全固态激光技术产生的紫外激光具有波长短、单光子能量高等优点，在工业加工方面具有独特优势[2]。首先紫外激光的工作波长短，易聚焦，因此能实现精细加工；其次，紫外激光作用到材料上时，可以直接破坏材料的化学键，因而属于“冷”处理过程，热影响区较小；再次，大多数材料能有效地吸收紫外光，可加工许多红外光和可见光激光器加工不了的材料，因而紫外激光在发光二极管蓝宝石衬底划刻、太阳能电池板切割、医疗器械标记等方面具有重要应用[3]。此外，在生物学领域，紫外激光还可以用来对物质中的蛋白质浓度及纯度进行测定；在激光医学领域，紫外激光还可以直接打断细胞间的分子键，进而避免热损伤[4]。到目前为止，使用最多的紫外激光是 355 nm 波段激光，这是因为 355 nm 紫外激光通过 1 064 nm 激光直接三倍频就可以获得。国外一些国家对 355 nm 波段的紫外激光的研究起步较早[5]。早在 1995 年，Yushi Kaneda 和 Shigeo Kubota 就首次利用两台输出波长分别为 1 064 nm 和 532 nm 的单频激光器，通过双共振外腔和频技术实现了输出功率为 220 mW 的连续波 355 nm 紫外激光输出[6]。在 2001 年，Norman Hodgson 等人通过单谐振腔两级双端泵浦 $Nd:YVO_4$ 晶体产生高功率 1 064 nm 红外激光，然后通过级联腔外倍频、和频，获得了平均输出功率达到 12 W 的 355 nm 紫外激光输出，光 – 光转化率为 11.5%[7]。为了获得更高功率的 355 nm 紫外激光输出，首先需要提高基频 1 064 nm 激光的输出功率。因此，一方面科学家不断提高单个谐振腔的 1 064 nm 激光的输出功率。在 2012 年 8 月，王利荣等人利用输出功率为 150 W 的 Nd:YAG 激光器作为 1 064 nm 基频激光光源，采用新型的非线性光学硼酸钙镧（$La_2CaB_{10}O_{19}$，LCB）晶体得到了 31.6 W 的 355 nm 紫外激光[8]。2014 年，Hay 等人利用腔内倍频、和频技术以及连续偏振合束技术，实现了高达 220 W 的 355 nm 紫外激光输出[9]。另一方面，通过激光放大技术来达到获得高功率 1 064 nm 激光输出的目的。2013 年，Chen 等人利用单频红外 1 064 nm 激光作为种子源，通过光纤主控振荡器的功率放大器（Master Oscillator Power-Amplifier，MOPA）和固体 MOPA 放大器，将平均功率提升到 105 W，然后通过级联倍频和和频过程实现了 43.7 W 的 355 nm 紫外激光输出[10]。2014 年，他们发展了一种通过三倍频晶体走离补偿提高和频效率的技术和方法。采用楔形 类 LBO 晶体进行和频，大幅度提高了和频效率[11]。2021 年，刘斌、王彬宇等人采用多级端面泵浦 $Nd:YVO_4$ 增益介质对锁模皮秒光纤种子源进行功率放大，获得超过 100 W 的高光束质量 1 064 nm 基频光输出，然后通过 LBO 晶体对 1 064 nm 激光进行二倍频和三倍频，获得 30.3 W 的 355 nm 皮秒激光输出，光 – 光转化效率达到 30%，光束质量因子优于 1.2[12]。

对于谐振腔，有两种和频方式：腔内和频和腔外和频。腔内和频技术可以获得紧凑稳定的紫外激光输出，但不利于腔内元件的更换，一旦损坏，则需要重新调试；而利用 MOPA 技术结合腔外倍频和和频过程尽管体积较大，但是可以实现模块化设计，容易更换各部分元件。我们研究组在 2020 年，采用“V”型腔内倍频和频折叠腔结构，在 878 nm 泵浦光的输入功率 20.9 W，重复频率 42 kHz 时，获得了平均输出功率为 3.2 W，光 – 光转化效率为 15.3% 的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

355nm 紫外脉冲激光。在此基础上，首先利用 888 nm 的 LD 泵浦 Nd : YVO_4 晶体产生高功率的高质量 1 064 nm 基频光输出，再通过腔外倍频、腔外和频技术得到输出功率 10 W 的 355 nm 紫外激光输出。

1　实验方案

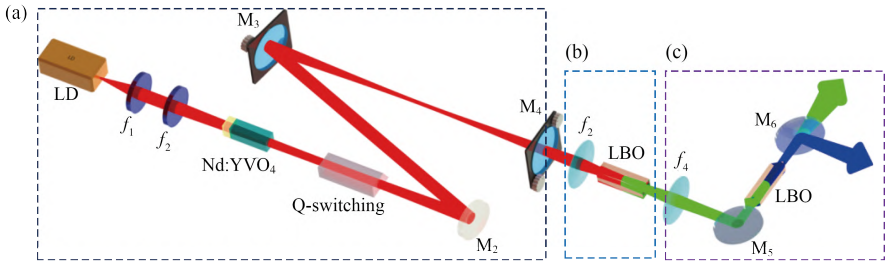


Fig. 1 Experimental setup diagram of 355 nm ultraviolet pulsed laser

(a): Pulsed 1 064 nm laser; (b): Frequency doubling part; (c): Sum frequency part

图 1 355 nm 紫外脉冲激光器实验装置图

（a）脉冲 1 064 nm 激光器；（b）倍频部分；（c）和频部分

本文通过采用 1 064 nm 红外光进行腔外倍频、腔外和频的技术方案来实现高功率 355 nm 紫外脉冲激光输出，实验装置如图 1 所示。实验装置分为三个部分：1 064 nm 红外脉冲激光器、倍频系统、和频系统。

1.1　纳秒级脉冲 1 064 nm 激光器

为了实现高功率 355 nm 紫外激光的产生，实验设计了一个高功率、高质量的纳秒级脉冲 1 064 nm 激光器，如图 1(a) 所示。采用光纤耦合输出的中心波长为 888 nm 的 LD（COHERENT Co., Ltd）端面泵浦 Nd : YVO_4 晶体产生 1 064 nm 基频光，光纤芯径为 0.4 mm，数值孔径为 0.22。使用 888 nm 的 LD 作为泵浦源，一方面可以降低增益晶体的量子亏损，缓解其热效应；另一方面 Nd : YVO_4 晶体对 888 nm 泵浦光具有非偏振吸收的特点，有利于激光器稳定运转。为了实现泵浦光与谐振腔的模式匹配，泵浦光经过光学耦合系统后聚焦至增益晶体处，这个系统是由两个焦距分别为 $f_1 = 30$ mm 和 $f_2 = 80$ mm 的透镜（AR@888 nm）组成。为了使得实验结构更加紧凑，在整体 1 064 nm 激光谐振腔的设计上，本实验采用了“Z”型驻波腔。增益晶体采用 a 轴切割的尺寸为 3 mm × 3 mm × (3 + 20) mm 的单端键合 Nd : YVO_4 晶体，其掺杂部分的长度为 20 mm，掺杂浓度为 0.8%，未掺杂部分长度为 3 mm，且其前端面镀膜：AR@888 nm & HR@1 064 nm，所以既可以当作输入镜 M1，又可以充当热沉，用以缓解增益晶体的端面热效应；增益晶体的后端面镀膜：AR@888 nm & 1 064 nm。整个 Nd : YVO_4 晶体侧面用铟箔严密包裹并进行铟焊，最后再放于紫铜控温炉中使用，设置晶体工作温度为 30.5°C，控温精度为 0.01°C。谐振腔中的 M2 为入射角度为 10° 的平面镜，表面镀有 HR@1 064 nm 的高反膜；M3 为 $R = 100$ mm、入射角度为 10° 的平凹镜；M4 为 $R = 100$ mm、$T = 37\%$@1 064 nm 的平凹镜。为获得脉冲 1 064 nm 红外光，在谐振腔内插入了声光 Q 开关，所选择的调 Q 元件是英国 GOOCH & HOUSEGO 公司生产的 I-QS041-1.5C10G-4-SO12 声光 Q 开关，其有效孔径为 1.5 mm，调制损耗可达 85%。

为了满足激光输出的条件，利用 Mathematica 软件计算了谐振腔内的 ABCD 传输矩阵。考虑到增益晶体的热透镜效应会对谐振腔的腔模和稳定性条件产生一定影响，本文首先计算了不同泵浦功率下增益晶体的热透镜焦距。

在泵浦区域内，增益晶体热透镜效应焦距可以表示为[13]：

$$f_{\mathrm{th}} = \frac{2\pi K \omega_p^2}{\eta_h P_{\mathrm{abs}} \mathrm{d}n/\mathrm{d}T}, \tag{1}$$

式 (1.1) 中，K 表示热传导系数，ω_p 表示增益介质处的泵浦光光斑半径，η_h 为能级跃迁量子亏损，$\mathrm{d}n/\mathrm{d}T$ 为热光系数，P_{abs} 表示增益介质吸收的泵浦功率，且有：

$$P_{\mathrm{abs}} = P_0 [1 - \exp(-\alpha l)], \tag{2}$$

其中，P_0 代表注入泵浦功率，α 为吸收系数，l 为增益介质吸收长度。利用式 (1.1) 得到了增益晶体热透镜焦距随着泵浦功率的变化曲线，如图 2 所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

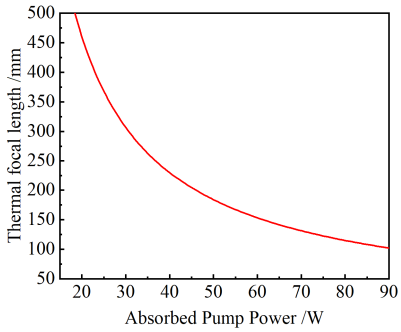


Fig. 2 Thermal focal length of gain crystal varies with pump power

图 2 增益晶体热透镜焦距随着泵浦功率变化曲线

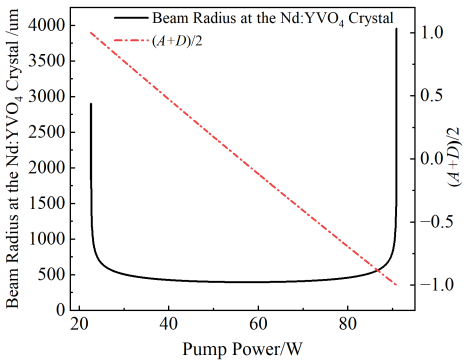


Fig. 3 Variation of resonator parameters with pump power Solid line and dotted line are the beam radius ω at the gain crystal and Stability parameter $(A+D)/2$ versus pump power, respectively

图 3 谐振腔参数随泵浦功率的变化曲线 实线和点划线分别为增益晶体处的腔膜半径 ω 和稳定性参数 $(A+D)/2$ 随着泵浦功率的变化曲线

通过图 2 可以看出，在泵浦功率为 80 W 时，增益晶体的热透镜焦距为 115 mm。在此基础上，通过不断优化谐振腔的腔长，得到总腔长为 354.5 mm 时，谐振腔的参数随泵浦功率变化的曲线（如图 3 所示），其中实线和点划线分别为增益晶体处的束腰半径 ω_0 和稳定性参数 $(A+D)/2$ 随着泵浦功率的变化曲线。从图 3 中可以看到，在泵浦功率为 23 W 时，激光器逐渐进入稳区，随着泵浦功率的不断增加，激光器在稳区内正常工作，此时的 $Nd:YVO_4$ 晶体处光斑半径先变小后变大。最后在泵浦功率为 90 W 时，激光器逐渐离开稳区。

1.2 倍频系统

常见的从 1 064 nm 向 532 nm 转换的非线性晶体有 KTP（磷酸氧钛钾）、LBO（三硼酸锂）和 BBO（β-硼酸钡）。表 1[14] 中列出了这三种非线性材料的特性。

通过表 1 可知：KTP 正双轴晶体虽然有效非线性系数大、允许角度大，但是它的损伤阈值低，不能适用于高功率激光器，且走离角较大，无法满足本实验需求。BBO 晶体有一定的潮解性，走离角最大且允许角度小，同样无法满足本实验要求。相比之下，虽然 LBO 晶体的有效非线性系数较小，但是在 类温度匹配时没有走离效应且损伤阈值高，适用于高功率 532 nm 绿光激光器的设计要求，再综合考虑市场价格等因素，LBO 晶体是最满足本实验设计要求的二阶非线性光学晶体。

表 1 常用倍频晶体

Tab. 1 Frequency doubling crystals

倍频晶体	KTP（正双轴）	LBO（负双轴）	BBO（负单轴）
潮解	不	不	微
相位匹配类型	II	I（温度）	I
有效非线性系数 10^{-12}m/V	7.34	1.2	1.83
损伤阈值 @1 064 nm/(GW/cm^2)	0.4@$\Delta t=10$ ns; >1@$\Delta t=1$ ns	18.9@$\Delta t=0.1$ ns; 25@$\Delta t=0.1$ ns	29@$\Delta t=7.5$ ns; 10@$\Delta t=0.02$ ns
走离角/rad	44.3	0	50.12
允许角度/(mrad·cm)	25	4.3	0.5
允许温度/(°C·cm)	25	4	55

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

因此，本实验选用 LBO 作为倍频晶体，采用 I 类非临界相位匹配以消除走离效应，提高倍频转化效率。倍频晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 25 mm，其前端面镀膜为 AR@1 064 nm，后端面镀膜为 AR@532 nm & 1 064 nm。在使用前，晶体侧面先用铟箔包裹，之后再将其置于紫铜控温炉中，设置晶体的工作温度为 145.00°C。最后，1 064 nm 脉冲激光器的输出光束经过焦距 $f_3 = 60$ mm 的耦合透镜聚焦到倍频晶体上产生 532 nm 倍频光，如图 1(b) 所示。

1.3 和频系统

目前，常用来进行紫外波段频率转换的非线性频率变换晶体有：BBO、CLBO、LBO，各和频晶体性质如表 2[14] 所示：

表 2 常用倍频晶体

Tab. 2 Frequency doubling crystals

和频晶体	BBO	CLBO	LBO
相位匹配类型	I 类临界相位匹配	II 类临界相位匹配	II 类临界相位匹配
匹配角度/deg	31.3	38.7	42.6
有效非线性系数/(pm/V)	1.72	0.522	0.532
走离角/mrad	72.1	37.14	9.35
允许角度/mrad·cm	0.4	0.96	3.53

在表 2 所列晶体中，BBO 晶体虽然有效非线性系数最大，但是走离角也最大同时允许角度最小，因而在整个和频过程中，晶体的有效通光长度短，这会导致非线性光学频率转化效率降低。同时，BBO 晶体相对容易潮解，不适用于工业激光器的研制。CLBO 晶体所具有的有效非线性系数较小且走离角较大、易潮解的特性，阻碍了其在 355 nm 紫外激光领域的应用。LBO 晶体是优秀的大功率紫外非线性晶体，具有不易潮解、较小的走离角和大的允许角度，因此被广泛应用。

本实验选用 类角度匹配的 LBO 作为和频晶体，其尺寸为 7 mm × 3 mm × 20 mm，前后端面的镀膜均为 AR @1 064 nm & 532 nm & 355 nm，设置晶体的工作温度为 26.90°C。和频晶体的两个端面均切割有 17° 的斜面，这可有效补偿 II 类角度匹配过程中的走离效应，提高和频效率。

实验中，倍频系统产生的 532 nm 绿光和倍频后剩余的 1 064 nm 红外光由焦距 $f_4 = 30$ mm 的耦合透镜聚焦到和频晶体上，产生 355 nm 脉冲激光的同时，还会有剩余的 1 064 nm 和 532 nm 激光输出，然后再经分光镜 M6（HR@355 nm & HT@1 064 nm & HT@532 nm）将 355 nm 脉冲激光分离出来，如图 1(c) 所示。

2 实验结果与分析

本实验测量并分析了谐振腔输出的 1 064 nm 激光、倍频产生的 532 nm 激光和剩余 1 064 nm 激光以及和频产生的 355 nm 紫外脉冲激光的平均输出功率随泵浦功率的变化曲线，如图 4 – 图 6 所示。

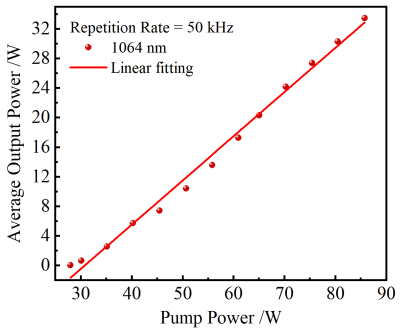


Fig. 4 Variation of average output power of 1 064 nm laser with pump power and its fitting curve

图 4 1 064 nm 激光平均输出功率随泵浦光功率变化及其拟合曲线

从图 4 中可以看出，当重复频率为 50 kHz 时，1 064 nm 红外脉冲激光的阈值为 26.8 W，实际阈值比理论计算高的原因一方面是因为理论计算和实验具有一定的误差，另一方面是因为谐振腔刚进稳区时，谐振腔增益晶体处腔膜半径太大，与泵浦光匹配太差。当泵浦功率为 85.7 W 时，1 064 nm 激光的最大平均输出功率为 33.5 W，经线性拟合后，得到其斜效率为 59.8%。由于谐振腔中增益晶体热效应的影响，1 064 nm 激光的输出功率曲线整体上呈现出一种“下凹”的形状，这是因为在低泵浦注入和高泵浦注入时，谐振腔腔模半径较大，与泵浦光匹配较好，从而具有较高的转化效率。1 064 nm 基频光经过 LBO 晶体倍频后，得到最大平均输出功率为 12.18 W 的 532 nm 绿光。由图 5 可以看出，在泵浦功率达到 75 W 之前，532 nm 绿光功率一直上升，在 75 ~ 80 W 时出现下降，这是因为随着泵浦功率

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的增加，增益晶体的热透镜焦距逐渐变小，此时谐振腔内增益晶体处的腔模先变小后变大，从而引起倍频晶体处光斑大小变化，最终导致倍频转化效率下降。

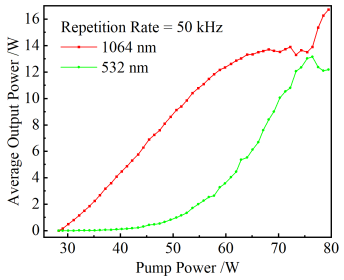


Fig. 5 The curve of the average output power of the 532 nm laser generated by frequency doubling and the remaining 1 064 nm laser as a function of the pump power

图 5 倍频产生的 532 nm 激光和剩余 1 064 nm 激光的平均输出功率随泵浦光功率变化的曲线

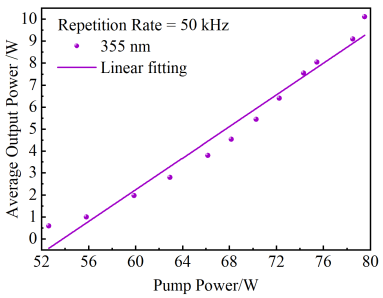


Fig. 6 Variation of average output power of 355 nm laser with pump power and its fitting curve under extra-cavity frequency doubling and extra-cavity sum-frequency structure

图 6 腔外倍频、腔外和频结构下 355 nm 激光平均输出功率随泵浦功率变化及其拟合曲线

在和频晶体中，532 nm 倍频光与剩余的 1 064 nm 基频光在共同经过时会发生和频效应，最终得到的 355 nm 紫外脉冲激光平均输出功率为 10 W。经线性拟合后，得到其斜效率为 36.0%。泵浦光到紫外光的光–光转化效率为 12.5%。理论上来说，当 1 064 nm 激光和 532 nm 激光完全重合时，二者的光子数目比为 1∶1，对应的功率比为 1∶2 时，获得的 355 nm 紫外激光的功率最大。然而在实际实验过程中，除了基频光和倍频光的功率比之外，二者的腰斑大小和腰斑位置都会对和频过程产生直接的影响。在本实验中，随着泵浦光功率的不断上升，除了基频光和倍频光以及和频光的功率逐渐增加之外，基频光和倍频光在和频晶体处的腰斑大小和位置均会有微小的变化，而这些变化会直接影响 355 nm 紫外激光的输出功率和转化效率。从图 5 和图 6 中可知，在输出功率曲线的最后部分，尽管 532 nm 倍频光有稍微地降低，但是 355 nm 和频光输出功率最高，也就是说在当前的基频光和倍频光功率下，这个腰斑大小和位置是最佳的。可以预见的是，在这个基础上进一步优化功率比例，将会得到更大的 355 nm 紫外光的输出功率。

当 355 nm 紫外光的输出功率为 10 W 时，使用“ROHDE & SCHWARZ”公司生产的 RTO2014 示波器（1 GHz，10 GSa/s）测得的激光脉宽为 12.85 ns，脉宽曲线如图 7 所示；使用“Avantes”公司生产的 AvaSpec-ULS4096CL-EVO 光谱仪（波长范围：200 ～ 1 100 nm）测得的激光谱宽为0.380 7 nm，谱宽曲线如图 8 所示；使用 Thorlabs 公司生产的 BC106N-VIS/M 光束轮廓仪（波长范围：350 ～ 1 100 nm；像素：1 360 pixels × 1 024 pixels）测得的 1 064 nm 红外光和 355 nm 紫外光的二维空间模式分别如图 9 和图 10 所示。根据国际标准 ISO11146，实验通过对不同位置处的光束直径进行双曲线拟合，得到了 355 nm 紫外光在 x 方向和 y 方向的光束质量分别为 $M_x^2 = 1.13$, $M_y^2 = 1.02$，如图 11 所示。结果表明，激光光束质量良好，符合实验预期。

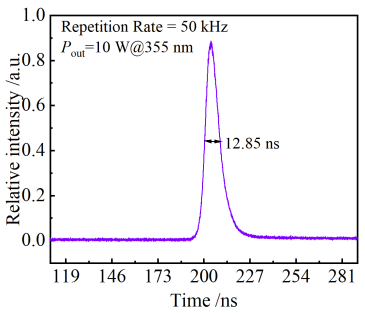


Fig. 7 The pulsed waveform of 355 nm laser at the output power of 10 W

图 7 输出功率 10 W 时的 355 nm 紫外光脉冲波形

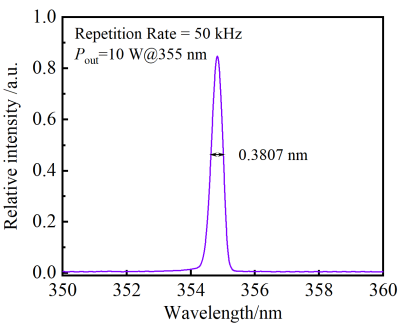


Fig. 8 The spectral width of 355 nm laser

图 8 355 nm 紫外光谱宽

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

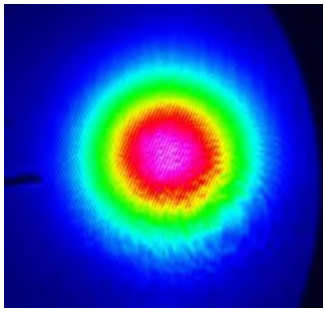


Fig. 9 The near-field 2D profile of the 1 064 nm laser at the output power of 33.5 W

图 9 输出功率为 33.5 W 时，1 064 nm 红外光二维空间模式

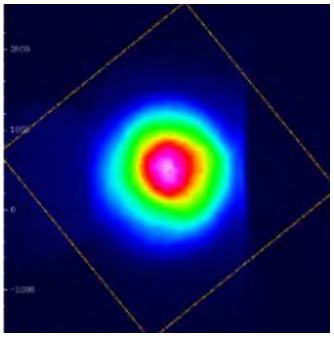


Fig. 10 The near-field 2D profile of the 355 nm laser at the output power of 10W

图 10 输出功率为 10 W 时，355 nm 紫外光二维空间模式

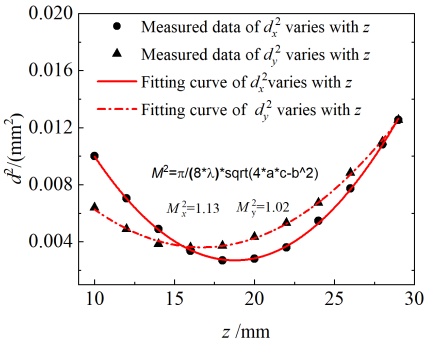


Fig. 11 Beam quality of 355 nm laser obtained by hyperbola fitting

图 11 双曲线拟合得到的 355 nm 紫外光光束质量

3　结论

本文采用输出功率为 80 W 的 LD 端面泵浦“Z”型驻波腔中的 Nd : YVO_4 晶体，设置信号源的重复频率为 50 kHz，经过声光调 Q 后得到的红外脉冲激光的平均输出功率为 33.5 W，之后再通过腔外倍频、和频的方式，最终得到最高平均输出功率为 10 W，光束质量为 $M_x^2=1.13$，$M_y^2=1.02$ 的 355 nm 紫外脉冲激光，泵浦光到紫外光的光－光转化效率为 12.5%。

参考文献

[1] 侯杰, 贾海旭, 白雅苏拉. 915 nm 激光二极管端面泵浦的高稳定性全固态 355 nm 紫外激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, **58**(19):236–242. DOI: 10.3788/LOP202158.1914003.
HOU J, JIA H, BAIYA S. 355 nm all-solid-state ultraviolet laser with high stability end-pumped by 915 nm laser diode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, **58**(19):236–242. (in Chinese). DOI: 10.3788/LOP202158.1914003.

[2] 张诗梦, 崔源, 贾真, 等. LD 端面泵浦 Nd : YVO_4 高重频紫外激光器 [J]. 沈阳理工大学学报, 2019, **38**(05):81–84. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2019.05.017.
ZHANG S, CUI Y, JIA Z, *et al*. LD End-pumped High-repetition-rate Nd : YVO_4 Ultraviolet Laser[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2019, **38**(05):81–84. (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2019.05.017.

[3] 张百涛. 大功率全固态 355 nm 紫外激光器研究 [D]. 济南: 山东大学. 2012.
ZHANG B T. Study on High Power DPSSL 355 nm Ultraviolet Lasers[D]. Jinan: Shandong University. 2012.

[4] 崔建丰, 岱钦, 邬小娇, 等. LD 侧面泵浦 Nd : YVO_4 高重频紫外激光器 [J]. 发光学报, 2019, **40**(08):1011–1014. DOI: 10.3788/fgxb20194008.1011.
CUI J F, DAI Q, WU X J, *et al*. LD-side Pumping Nd : YVO_4 High Repetition Rate UV Laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, **40**(08):1011–1014. (in Chinese). DOI: 10.3788/fgxb20194008.1011.

[5] 杨涛, 赵书云, 张弛, 等. LD 端面泵浦 355 nm 紫外激光器 [J]. 激光与红外, 2012, **42**(03):279–282. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.008.
YANG T, ZHAO S Y, ZHANG C, *et al*. LD end pumped 355 nm UV lasers[J]. *Laser & Infrader*, 2012, **42**(03):279–282. (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.008.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[6] KANEDA Y, KUBOTA S. CW 355 nm Generation by Doubly-Resonant Sum-Frequency Mixing in an External Resonator[C]// Advanced Solid State Lasers. Optical Society of America, 1996. DOI: 10.1364/ASSL.1996. FC5.

[7] HODGSON N, DUDLEY D, GRUBER L, *et al*. Diode end-pumped, TEM_{00} $Nd:YVO_4$ laser with output power greater than 12W at 355nm[C]// Conference on Lasers & Electro-optics. IEEE Xplore, 2001. DOI: 10.1109/CLEO.2001.947954.

[8] WANG L R, WU Y, WANG G L, *et al*. 31.6 W, 355 nm generation with $La_2CaB_{10}O_{19}$ crystals[J]. *Applied Physics B*, 2012, **108**(2):307–311. DOI: 10.1007/s00340-012-5026-5.

[9] HAY N, SLAVINSKIS N, RODIN A M, *et al*. >220 W output power at 355 nm from a Q-switched diode-pumped solid-state laser[C]// Solid State Lasers XXIII: Technology and Devices. International Society for Optics and Photonics, 2014. DOI: 10.1117/12.2040238.

[10] CHEN H, LIU Q, YAN P, *et al*. High-power 355 nm ultraviolet lasers operating at ultrahigh repetition rate[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, **10**(2):025401. DOI: 10.1088/1612-2011/10/2/025401.

[11] YAN X, LIU Q, PEI C, *et al*. High-power 355 nm third-harmonic generation with effective walk-off compensation of LBO[J]. *Journal of Optics*, 2014, **16**(4):045201. DOI: 10.1088/2040-8978/16/4/045201.

[12] 刘斌, 王彬宇, 刘崇, 等. 高功率皮秒紫外激光器的实验研究 [J]. 杭州电子科技大学学报: 自然科学版, 2021, **41**(3):24–29. DOI: 10.13954/j.cnki.hdu.2021.03.005.
LIU B, WANG B, LIU C, *et al*. Experimental study on high power picosecond ultraviolet lasers[J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 2021, **41**(3):24–29. (in Chinese). DOI: 10.13954/j.cnki.hdu.2021.03.005.

[13] 王雅君. 激光晶体热效应的改善及全固态高功率单频激光器的实验研究 [D]. 太原: 山西大学, 2014.
WANG Y J. Improving on thermal effect in gain medium and experimental investigation of all-solid-state high power single frequency lasers[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2014. (in Chinese).

[14] 王泽宇. 全固态 355 nm 紫外激光技术研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
WANG Z Y. Study on all solid 355 nm UV Laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese).

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net