

文章编号: 1001-3806(2016)02-0303-04

LD 侧面抽运全固态 Nd:YAG 紫外激光器的研究

刘 慧¹, 姚育成^{1,2}, 黄楚云^{1,2*}

(1. 湖北工业大学 理学院, 武汉 430068; 2. 湖北工业大学 太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 武汉 430068)

摘要: 为了使侧面抽运全固态 355nm 紫外激光器输出高质量光束的紫外激光, 采用腔内光束传输矩阵模拟的方法, 进行了谐振腔优化和腔内倍频和频结构设计。通过理论分析和实验验证, 取得了输入电功率为 280W、声光调制频率为 40kHz 时, 355nm 紫外激光的输出功率为 10.58W、激光脉冲宽度 20ns、光束质量因子 $M^2 = 1.3$ 的数据。结果表明, 侧面抽运腔内倍频与和频可实现近基模高功率紫外激光的输出。这一结果对紫外激光器的工程化有一定指导意义。

关键词: 激光器; 355nm 紫外激光器; 倍频与和频; 谐振腔

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.032

Research of laser diode side-pumped all-solid-state Nd:YAG ultraviolet lasers

LIU Hui¹, YAO Yucheng^{1,2}, HUANG Chuyun^{1,2}

(1. School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to output high beam quality laser from a side-pumped all-solid-state 355nm ultraviolet laser, resonant cavity structure was optimized and intra-cavity double frequency and triple frequency was designed by using the method of intra-cavity beam propagation matrix simulation. Theoretical analysis and experimental verification show that under pump power of 280W and acousto-optic modulation frequency of 40kHz, output power of 355nm ultraviolet laser is 10.58W, pulse width is 20ns and quality factor M^2 is 1.3. The results show that side pump intra-cavity double frequency and triple frequency can realize the output of high power ultraviolet laser of approximate fundamental mode. The study has guidance for the engineering of ultraviolet laser.

Key words: lasers; 355nm ultraviolet laser; double frequency and triple frequency; resonant cavity

引言

355nm 紫外固体激光器具有光子能量高、脉宽短等优点^[1-3], 在精密微加工等领域具有良好的应用^[4-7]。随着需求的扩大, 355nm 紫外激光技术得到快速发展^[8-9]。目前报道的实验最高输出功率达到 220W^[10], 由激光二极管 (laser diode, LD) 侧面抽运模块组成双路激光合成实现, 光束质量因子 $M^2 = 2.8$; 参考文献 [10] 中采用端面抽运方式加两级放大得到 355nm 紫外激光输出 24.3W, 光束质量因子 $M^2 = 1.15$; TIAN 等人采用侧面抽运方式在电功率输入 939W 时, 输出 355nm 紫外激光 15.3W, 光束质量因子 $M^2 = 4.56$ ^[11]。精密加工等应用要求紫外激光具有好的光

束质量和脉冲特性^[12-13], LD 端面抽运激光器一般通过准直聚焦系统耦合抽运光, 抽运光与振荡光耦合度高, 因此电光效率高, 容易实现近基模运转, 是目前工程化产品主要采用的方式^[14]。双端面抽运可实现 8W 的准连续紫外激光输出, 但受增益介质破坏阈值的限制, 端面抽运激光器功率很难进一步提高, 若采用多级放大等方式提高功率会使激光器结构复杂, 这不适合工程应用。LD 侧面抽运激光器一般是多模输出, 电光效率略低, 但结构更紧凑, 也容易实现高功率运转, 若通过限制晶体棒直径和谐振腔优化而实现近基模输出, 则更具工程化优势。作者通过 LD 侧面抽运 2mm 直径 Nd:YAG 晶体棒, 采用腔内倍频与和频方式设计了结构简单的 355nm 激光器并进行实验, 可为紫外激光器的工程化提供指导。

1 理论分析

LD 侧面抽运固体激光器中抽运光充满整个工作物质, 一般情况下腔内基模体积远小于工作物质体积形成多模激光振荡输出。要想提高激光光束质量, 一方面在允许范围内尽量减小激光晶体棒直径, 另一方

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41301372); 太阳能高效利用湖北省协同创新中心开放基金资助项目 (HB-SKFMS2104022)

作者简介: 刘 慧 (1989-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光技术与器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: chuyun.h@163.com

收稿日期: 2014-12-01; 收到修改稿日期: 2015-03-23

面通过谐振腔的模拟优化增大晶体棒所处位置的基模光束直径。

激光器结构如图 1 所示,工作物质为 Nd:YAG 晶体棒,直径 2mm,非线性晶体三硼酸锂(lithium triborate, LBO) LBO₁ 为倍频晶体, LBO₂ 为和频晶体,谐波反射镜 M₂, M₃ 和偏振反射镜 M₄ 均采用平平镜。

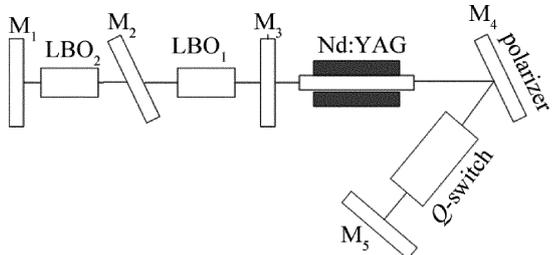


Fig. 1 Laser structure

考虑到激光晶体、倍频晶体、和频晶体热透镜的影响^[15],采用传输矩阵模拟谐振腔内基模高斯光束的传播特性,优化谐振腔结构,增大基模高斯光束的模体积,使通过激光晶体部分的基模高斯光束的直径接近晶体棒直径,实现激光器近基模运转。激光器谐振腔结构如图 2 所示。其中, f_1 和 f_2 分别为和频晶体、倍频晶体的等效薄透镜焦距, f_3 为工作物质等效薄透镜焦距;若工作物质及非线性晶体长度为 l , 折射率为 n_0 , 则主平面的位置根据 $h = l/(2n_0)$ 计算^[16], 主平面与工作物质中心平面的距离 $d = (l - 2h)/2$; L_1 为 M₁ 与晶体 LBO₂ 之间的等效距离, L_2 为晶体 LBO₂ 与晶体 LBO₁ 之间的等效距离, L_3 为晶体 LBO₁ 与 Nd:YAG 晶体棒之间的等效距离, L_4 为 Nd:YAG 晶体棒与 M₅ 之间的等效距离, d 为主平面到工作物质 Nd:YAG 中心平面的距离。

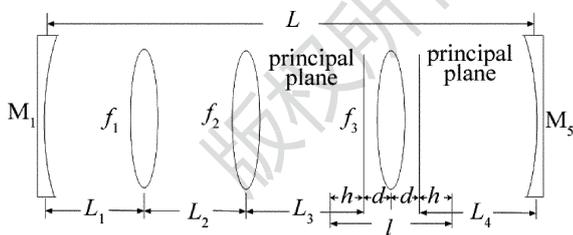


Fig. 2 Diagram of resonant cavity structure

假设腔镜的孔径足够大,用 ABCD 传输矩阵模拟谐振腔内基模高斯光束的传播^[17],激光谐振腔的往返传输矩阵为:

$$M = X_1 Y_3 X_2 Z_1 X_2 Y_3 X_3 Y_2 X_4 Y_1 X_5 Z_2 X_5 Y_1 X_4 Y_2 X_6 = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$X_1 = \begin{bmatrix} 1 & L_3 - x + d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, X_2 = \begin{bmatrix} 1 & L_4 + d \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} X_3 &= \begin{bmatrix} 1 & L_3 + d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, X_4 = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ X_5 &= \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, X_6 = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ Y_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix}, Y_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix}, \\ Y_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{bmatrix}, Z_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_5} & 1 \end{bmatrix}, \\ Z_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, x 表示光束开始传输处到倍频晶体 LBO₂ 右侧之间的距离, R_1, R_5 分别为 M₁ 和 M₅ 的曲率半径。在满足稳定性条件 $|A + D|/2 < 1$ 情况下,将晶体棒部分计算矩阵拆分,由矩阵起点处基模高斯光束半径 $w = (\lambda/\pi)^{1/2} |B|^{1/2} \left[1 - \left(\frac{D+A}{2} \right)^2 \right]^{-1/4}$ 计算腔内光束光斑半径^[18],优化谐振腔。

设计中晶体长度为 0.063m, 折射率为 1.82, 通过实际测量得到工作物质的等效薄透镜焦距为 0.25m, 非线性晶体的等效薄透镜的焦距为 1m, 基频光波长为 1064nm。通过 MATLAB 模拟仿真,不断调整谐振腔各部分参量优化,得到当 $L_1 = 0.06m, L_2 = 0.06m, L_3 = 0.2m, L_4 = 0.2m$ 时, M₂ 为平面镜, M₅ 为曲率半径 1m 的凹面镜,工作物质内基模光斑半径为 0.88mm, 接近晶体棒半径 1mm, 激光模式较好, 仿真结果如图 3 所示。

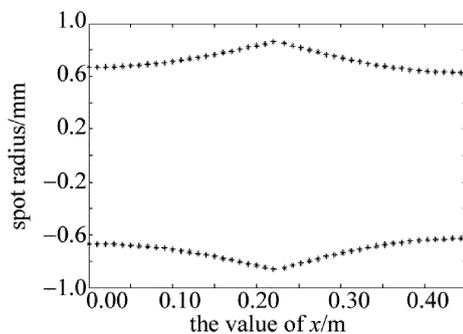


Fig. 3 Results of beam simulation in laser medium

2 实验原理及装置

如图 1 所示,采用侧面抽运 Nd:YAG 晶体,通过反射偏振镜 M₄ 产生 1064nm 波长的基频偏振光,通过非线性晶体 LBO₁ 产生 532nm 波长的倍频光,1064nm 波长的基频光和 532nm 波长的倍频光,通过非线性晶体 LBO₂ 和频得到 355nm 波长的三倍频光,从倾斜反射

镜 M_2 射出。

实验中采用美国 CEO 公司的激光模块 RBA20-1C2, Nd:YAG 激光棒的规格为 $\varnothing 2\text{mm} \times 63\text{mm}$, LD 波长为 808nm, 额定输入电功率为 300W; 两块 LBO 晶体均由福晶公司生产, 经半导体致冷器 (thermoelectric cooler, TEC) 实现精确温控, 精度为 0.1°C , 倍频晶体 LBO_1 采用 I 类角度相位匹配 ($\theta = 42.2^\circ, \varphi = 56^\circ$ 。 θ 表示光矢与 z 轴之间的夹角; φ 表示光矢投影与 x 轴的夹角), 晶体两端镀有 1064nm/532nm 的增透膜, 和频晶体 LBO_2 采用 II 类角度相位匹配 ($\theta = 44.6^\circ, \varphi = 90^\circ$), 晶体两端镀有 1064nm/532nm/355nm 的增透膜; 声光 Q 开关为 GOOCH & HOUSEGO 公司的 QS041-3C。根据模拟计算, 全反镜 M_5 曲率半径为 1m, 镀有 1064nm 高反膜, 其余均为平面镜, M_1 镀有 1064nm/532nm/355nm 的高反膜, 与 M_5 构成谐振腔实现基频光振荡; 谐波反射镜 M_3 镀有 1064nm/532nm 的增透膜, M_2 则双面镀有 1064nm/532nm 的增透膜, 单面镀有 355nm 的高反膜, 将紫外光反射输出。

3 实验结果及分析

实验中将 M_1 反射镜换为 1064nm 基频光、透过率为 15% 的输出镜进行基频光实验, 调 Q 实验时, 将声光 Q 开关电源功率输出调制间隔时间 (Q 开关打开时间) 设置为 $2\mu\text{s}$, 尽量减少基频光低功率输出对倍频及和频的影响, 在连续波 (continuous wave, CW) 和调 Q 频率为 40kHz 情况下, 1064nm 基频光的输出功率如图 4 所示。

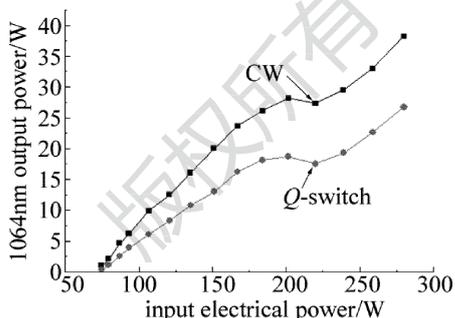


Fig. 4 Output power of CW and Q-switch 1064nm laser

在电功率输入为 71.8W 时, 开始有激光输出。随着电功率输入的增大, 基频光的功率增大。在电功率输入为 220W 时, 功率出现明显下降, 此时谐振腔出现一个不稳定区域。当冷却水的温度为 23.3°C 、电功率输入为 280W 时, 得到 1064nm 基频光的最大功率为 38.2W。打开声光调制, 在调制频率为 40kHz 时, 得到最大功率为 26.7W。

利用北京光电技术研究所的光束质量分析仪测量基频光光束能量分布 (见图 5), 通过拟合得到光束质

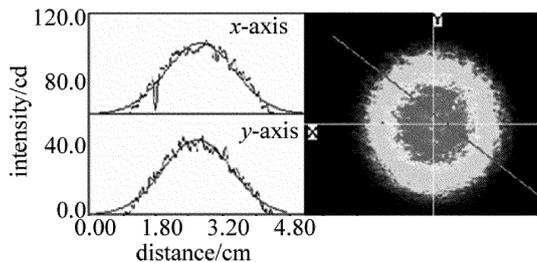


Fig. 5 Energy distribution of fundamental beam

量因子 $M^2 = 1.3$, 用北京同德公司生产的激光波形探测仪 (TRC-141 型) 和 100MHz 示波器测得激光脉冲宽度为 20ns, 脉冲波形图如图 6 所示。

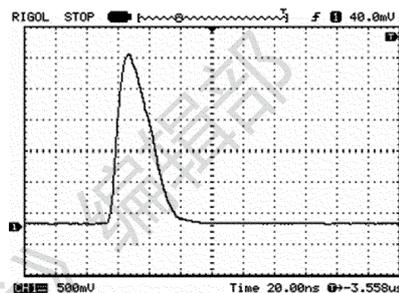


Fig. 6 Pulse wave of laser at repetition frequency of 40kHz

将 M_1 反射镜换为镀有 1064nm/532nm/355nm 的高反膜全反镜进行紫外激光实验, 精确调节倍频晶体 LBO_1 、和频晶体 LBO_2 的温度, 在调 Q 频率为 40kHz 的情况下, 得到 355nm 紫外激光的输出功率, 如图 7 所示。

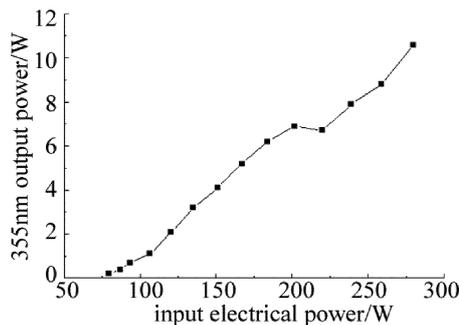


Fig. 7 Output power of 355nm laser at repetition frequency of 40kHz

在电功率输入为 77.9W 时, 开始有 355nm 紫外激光输出。跟基频光的情况相近, 电功率输入为 220W 时, 输出功率明显降低。当电功率输入为 280W 时, 355nm 紫外激光输出的平均功率最大, 为 10.58W。腔内和频具有较高的综合转化效率, 基频光到紫外光的转化效率达到 39.6%。

4 小结

通过模拟优化谐振腔结构, 使得 LD 侧面抽运激光器实现近基模激光振荡, 采用腔内倍频及和频方式, 降低了单次谐波转换效率的要求, 实现了高功率 355nm 近基模紫外激光输出。当电功率输入为 280W、

声光调制频率为 40kHz 时,355nm 激光的输出光功率为 10.58W。实验装置结构简单紧凑,对紫外激光器的工程化具有一定指导意义。

参 考 文 献

- [1] LÜ B D, MA H. New progress in the study of diode pump solid state laser [J]. *Laser and Infrared*, 2000, 30(2): 67-70 (in Chinese).
- [2] LIU X B, DING W P. The development and application of diode pump solid state laser [J]. *Journal of Hunan Institute of Science and Technology*, 2005, 18(3): 49-51 (in Chinese).
- [3] LIU Q, YAN X P, CHEN H L, *et al.* New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2289-2297 (in Chinese).
- [4] YI X J, YANG C, CHEN M, *et al.* High-efficiency laser diode side-pumped extra-cavity doubled green laser [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2012, 18(2): 217-222 (in Chinese).
- [5] ZHENG B R, YAO Y C, HUANG C Y. Experiment of double-end-pumped intra-cavity triple frequency ultraviolet laser [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 155-157 (in Chinese).
- [6] CHEN S M. The application of MATLAB in optical resonators' designing [J]. *Journal of Ankang Teachers College*, 2004, 16(1): 71-73 (in Chinese).
- [7] TIAN M, WANG F, CHE Y. LD pumped QCW 355nm laser by extra-cavity sum-frequency-mixing using double synchronized wavelength lasers [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 804-806 (in Chinese).
- [8] HAY N, SLAVINSKIS N, RODIN A M, *et al.* 220W output power at 355nm from a Q-switched diode-pumped solid-state laser [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2014, 8959: 1117-1123.
- [9] ZHANG L, LI K, XU D G, *et al.* A 7.81W 355nm ultraviolet picosecond laser using $\text{La}_2\text{CaB}_{10}\text{O}_{19}$ as a nonlinear optical crystal [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 17187-17192.
- [10] HONG H L, LIU Q, HUANG L. High-beam-quality all-solid-state 355nm ultraviolet pulsed laser based on a master-oscillator power-amplifier system pumped at 888nm [J]. *Physics Express*, 2012, 15(4): 52-55.
- [11] TIAN M, WANG F, LI Y Y, *et al.* The research of high power continuous 355nm all-solid-state ultraviolet laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 412-416 (in Chinese).
- [12] LI K. Comparison between single shot micromachining of silicon with nanosecond pulse shaped IR fiber laser and DPSS UV laser [J]. *Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 1077-1082.
- [13] CHEN J, DONG J T, ZHANG Q, *et al.* Three dimensional mapping of absorption defects at 355nm for potassium dihydrogen phosphate (KDP) used in high power laser systems [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2014, 9237: 1317-1321.
- [14] LEI C Q, WANG Y F, HUANG F, *et al.* Progress of high power solid-state laser pumping and coupling technology [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6): 725-732 (in Chinese).
- [15] ZHU G Z, CHEN P F, ZOU X F, *et al.* Finite element analysis of laser medium's thermal-lens [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2): 208-210 (in Chinese).
- [16] WALTER K. *Solid-state laser engineering* [M]. 4th ed. Berlin, Germany: Springer Verlag, 1996: 300-323.
- [17] CHEN K, ZHU D X, ZHANG P C. Mode analysis of laser resonator based on finite element matrix [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3): 352-356 (in Chinese).
- [18] ZHOU B K. *Principle of laser* [M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 86-87 (in Chinese).