

垂直腔面发射激光端面泵浦的高能量调Q Nd:YAG激光

谢仕永, 王久旺, 孙勇, 黄康胜, 王彩丽, 史小玄, 薄铁柱, 蔡华, 宋普光

引用本文:

谢仕永, 王久旺, 孙勇, 等. 垂直腔面发射激光端面泵浦的高能量调Q Nd:YAG激光[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 558–564.

XIE Shi-yong, WANG Jiu-wang, SUN Yong, et al. VCSEL end-pumped high-energy Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 558–564.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0558>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Yb:YAG/Cr4+:YAG/YAG键合晶体的被动调Q激光器

Passively Q-switched laser with a Yb:YAG/Cr4+:YAG/YAG composite crystal

光学精密工程. 2018, 26(1): 55–61 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182601.0055>

高功率窄线宽微秒脉冲1064 nm环形腔激光

High-power narrow linewidth microsecond pulse 1064 nm ring laser

光学精密工程. 2016, 24(10s): 35–40 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0035>

全固态210 nm准连续深紫外激光器

All-solid-state 210 nm quasi-continuous deep ultraviolet laser

光学精密工程. 2016, 24(10s): 212–215 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0212>

LD端面泵浦铯蒸气激光器的模式匹配

Mode matching of LD-end-pumped cesium vapor laser

光学精密工程. 2015, 23(10): 2755–2760 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152310.2755>

菲涅尔透镜聚焦太阳光泵浦Cr/Nd:YAG陶瓷激光器

Solar-pumped Cr/Nd:YAG ceramic laser focused by Fresnel lens

光学精密工程. 2016, 24(10s): 294–299 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0294>

文章编号 1004-924X(2020)03-0558-07

垂直腔面发射激光端面泵浦的 高能量调 Q Nd : YAG 激光

谢仕永^{1,2*}, 王久旺¹, 孙 勇¹, 黄康胜¹, 王彩丽^{1,2}, 史小玄^{1,2}, 薄铁柱^{1,2}, 蔡 华^{1,2}, 宋普光¹

(1. 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024;

2. 建材行业特种光电材料重点实验室, 北京 100024)

摘要:采用垂直腔面发射激光端面泵浦 Nd : YAG 获得了高能量的 1 064 nm 调 Q 激光输出。与边发射半导体激光相比,垂直腔面发射激光具有各向发散角相同、波长随温度漂移小等优点,更适合用作泵浦源以产生高效率、结构紧凑的激光。泵浦能量为 200 mJ 时,产生了最高 45 mJ 的 1 064 nm 激光输出,光光转换效率达到 22.5%,激光脉宽为 8 ns,发散角为 1.2 mrad。基于模拟计算优化了 Nd³⁺ 掺杂浓度,通过采用低浓度的 Nd : YAG 晶体减小泵浦端面增益,从而有效抑制了影响调 Q 激光能量提高的自激振荡,为获得高能量的端面泵浦调 Q 激光输出提供了有效的技术手段。

关键词:垂直腔面发射激光;端面泵浦;调 Q 激光;自激振荡

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202803.0558

VCSEL end-pumped high-energy Q-switched Nd : YAG laser

XIE Shi-yong^{1,2*}, WANG Jiu-wang¹, SUN Yong¹, HUANG Kang-sheng¹,
WANG Cai-li^{1,2}, SHI Xiao-xuan^{1,2}, BO Tie-zhu^{1,2}, CAI Hua^{1,2}, SONG Pu-guang¹

(1. *China Building Materials Academy Co., Ltd, Beijing 100024, China;*

2. *Key Laboratory of China Building Materials Industry for
Special Photoelectric Materials, Beijing 100024, China)*

** Corresponding author, E-mail: shiyong515@163.com*

Abstract: A high-energy Q-switched 1 064 nm laser output is obtained using a vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) with end pumping-Nd : YAG. Compared with the edge emitting diode laser, the VCSEL is a more suitable generator for high efficiency and compact lasers because its pump source has the advantages of equal divergence angles in each direction and exhibits small wavelength shifts with temperature. The 1 064-nm laser with a maximum output of 45 mJ is generated with a pump energy of 200 mJ, corresponding to an optical conversion efficiency of 22.5%. The laser pulse width is 8 ns, and its divergence angle is 1.2 mrad. The doping concentration of Nd³⁺ is optimized based on simulations and calculations. Furthermore, self-excited oscillation, which affects the enhancement of Q-switched laser energy, is effectively suppressed by reducing the gain of the pump end by using a Nd : YAG crystal with low doping concentration. This provides an effective technical method for obtaining high energy end-pumped Q-switched lasers.

收稿日期:2019-08-19;修订日期:2019-10-15.

基金项目:中国建筑材料科学研究总院前沿探索基金资助项目(No. YX-91)

Key words: Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL); end pump; Q-switched laser; self-excited oscillation

1 引言

高能量低重频调Q Nd:YAG激光峰值功率高、脉冲宽度窄,具有连续运转的激光不可比拟的优势,在激光雷达、激光预处理及激光测距等领域有着广泛的应用^[1-3]。基于高能量调Q Nd:YAG 1 064 nm激光及其变频产生的532,355 nm激光广泛应用于大气激光雷达中^[4-8]。西安理工大学华灯鑫研究组设计和构建了波长为355,532和1 064 nm的多波长米散射激光雷达系统,实现了对地表气溶胶的探测^[6]。该研究组还选用355 nm激光作为激励源,分别设计拉曼激光雷达分光系统和高光谱分辨率激光雷达分光系统,实现气溶胶的精细探测^[7]。中国海洋大学吴松华研究组基于大气粒子弹性后向散射信号的退偏振比,研究了三波长发射系统的水汽-云-气溶胶激光雷达系统,可连续探测对流层水汽和云的垂直廓线^[8]。

目前,商用的高能量低重频调Q Nd:YAG激光器多采用脉冲氙灯泵浦方式,氙灯光谱宽,导致激光器效率低,激光产生过程中的大量废热需通过水流带走,相应的制冷系统增加了激光系统的质量,且存在冷却水泄露等隐患。另外,氙灯寿命一般为 10^7 次脉冲,需要定期更换。全固态激光器采用半导体激光二极管(Laser Diode,LD)泵浦,可实现LD谱线与增益介质吸收谱线较好的匹配,能量转换效率高,废热产生率低,通过半导体制冷即可导出热量,大大提高了系统的可靠性与环境适应性;此外,LD寿命可达 10^{10} 脉冲数,比氙灯提高了3个量级。LD侧面泵浦Nd:YAG晶体板条是获取高能量1 064 nm调Q激光的重要技术手段。Armandillo等基于板条Z形几何光路和高斯非稳腔设计来减小激光波前畸变和提高激光光束质量,在边发射LD泵浦能量750 mJ条件下产生了100 mJ,20 ns的1 064 nm脉冲激光,光光转换效率为13.3%^[9]。中科院上海光机所的陈卫标研究组使用布鲁斯特角切割的Z形Nd:YAG板条,通过传导冷却的方式将边发射LD及激光晶体废热导出,利用KD*P的普克尔效应进行调Q,获得了100 mJ,10 ns的1 064 nm

激光输出,光光转换效率为13%^[10]。与侧面泵浦相比,端面泵浦条件下的泵浦光束能更好地与激光振荡模式相匹配,空间交叠程度高,有利于提高激光转换效率。Goldberg等利用由3组不同中心波长的边发射LD组成的列阵端面泵浦Nd:YAG晶体,输出1 064 nm调Q激光的能量最高为60 mJ,光光转换效率达17%^[11]。目前,主要通过高功率的边发射LD泵浦源产生高能量的调Q激光输出。

近年来,垂直腔面发射激光(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)技术发展迅速^[12-14]。与边发射LD相比,VCSEL具有各向发散角相同,波长随温度漂移小等优势,因此作为泵浦源在耦合至增益介质时更容易进行光束整形,同时对温度不敏感,降低了对VCSEL控温精度的要求,甚至不需要主动控温,从而有利于获得高效率、结构紧凑的激光输出。目前有关VCSEL泵浦的研究还比较少^[15-19]。Goldberg等采用6.4 mm×6.4 mm的VCSEL阵列端面泵浦Nd:YAG晶体棒,通过Cr:YAG饱和吸收的被动调Q获得了18 mJ的1 064 nm窄脉冲激光,光光转换效率为12.5%^[15]。Seurin等研发了VCSEL模块用于侧面泵浦Nd:YAG晶体棒,每个模块包含12个3 mm×3 mm的808 nm VCSEL阵列,采用声光调Q产生了21 mJ的946 nm脉冲激光^[18]。本文采用 $\Phi 8.93$ mm的近似圆形VCSEL阵列端面泵浦Nd:YAG晶体棒,电光调Q获得了高能量、高效率的1 064 nm窄脉冲激光输出。通过优化Nd³⁺掺杂浓度和减小激光晶体泵浦端面增益,有效抑制了影响调Q激光能量提高的自激振荡,为获得高能量端面泵浦调Q激光输出提供了有效的技术手段。

2 实验及分析

2.1 实验装置

808 nm VCSEL端面泵浦调Q Nd:YAG激光光路如图1所示,它包括泵浦源VCSEL、VCSEL整形透镜F、激光晶体(LC)、1 064 nm偏振器(PS)、1 064 nm四分之一波片(QW)、电光晶体(EOC)及输出耦合镜(OC)。其中,808 nm

VCSEL 阵列 (Princeton Optronics, Inc.) 如图 2 所示, 由 4 个间距约为 1 mm 的发光象限形成一个近似圆形 ($\Phi 8.93$ mm) 的发光区域, 每个象限包括数以千计的 VCSEL 发光点。VCSEL 阵列随温度的波长漂移为 0.07 nm/ $^{\circ}\text{C}$, 在低占空比条件下通过铜散热器传导冷却即可, 无需主动控温, 有利于减小激光器的功耗与体积。808 nm VCSEL 阵列在低占空比 ($<1\%$) 条件下可提供最高 800 W 的峰值功率。阵列的数值孔径为 0.15, 各方向发散角相同, 通过透镜 ($f=8.5$ mm) 可以很容易地聚焦到激光晶体内。激光晶体采用 Nd:YAG 棒, 直径为 4 mm, Nd:YAG 泵浦面镀有 1064 nm 高反膜和 808 nm 高透膜, 另一通光面镀 1064 nm 增透膜。偏振分束器对 1064 nm 光进行起偏, 使得垂直偏振的 s 光反射, 水平偏振的 p 光透射。偏振分束器与 1064 nm 四分之一波片及电光晶体构成调 Q 组件, 对谐振腔 Q 值进行调制, 产生脉冲激光输出。电光晶体选用 LN 晶体, 尺寸为 9 mm \times 9 mm \times 25 mm, 两通光面均镀 1064 nm 增透膜, 在四分之一波脉冲电压驱动下工作以满足调 Q 需要。输出耦合镜与激光晶体的泵浦端面构成激光谐振腔, 实现 1064 nm 激光的振荡输出。

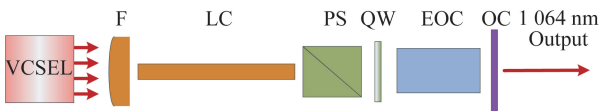


图 1 VCSEL 端面泵浦调 Q Nd:YAG 激光光路

Fig. 1 Light path of VCSEL end-pumped Q-switched Nd:YAG laser

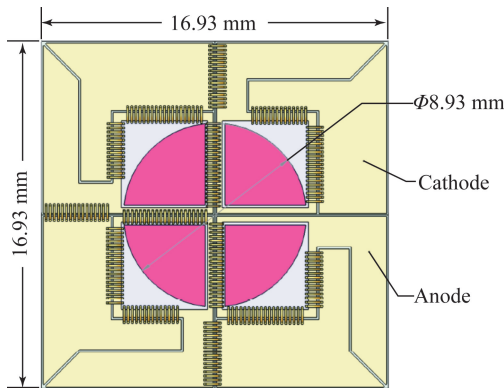


图 2 VCSEL 阵列布局

Fig. 2 Layout of VCSEL array

2.2 Nd:YAG 晶体参数优化

VCSEL 端面泵浦 Nd:YAG 晶体是获得高光束质量、高转换效率 1064 nm 调 Q 激光输出的有效途径, 然而工作物质端面对泵浦光的吸收形成的高增益极易引起自激振荡, 严重制约了高能量的调 Q 激光输出。根据比尔吸收定律, 激光介质对端面泵浦光的吸收呈指数规律下降, 基于激光工作物质对泵浦光的吸收系数与激活粒子浓度呈比例的关系, 通过降低激活粒子的掺杂浓度, 减小激光介质端面对泵浦光的吸收率, 可以实现端面增益的降低, 进而有效抑制自激振荡。理论模拟不同 Nd^{3+} 掺杂浓度下 Nd:YAG 晶体对 808 nm VCSEL 光的吸收率, 结果如图 3 所示, 在泵浦功率为 800 W 时, Nd^{3+} 掺杂浓度为 1.0%, 0.6%, 0.1% 时泵浦端面吸收率分别为 640, 384 及 64 W/mm。可见, 随着晶体激活粒子浓度的下降, 吸收效率逐渐降低, 从而可实现有效的自激振荡抑制。同时, 为了保证激光介质对泵浦光的充分吸收, 在降低端面吸收率时则需要通过增加晶体长度实现。图 4 数值模拟的不同 Nd^{3+} 浓度下 VCSEL 泵浦光吸收随晶体长度的变化。计算结果显示, Nd^{3+} 掺杂浓度为 1.0%, 0.6%, 0.1% 下在达到对泵浦光 95% 的吸收时对应的晶体长度分别为 3.7, 6.2 及 37 mm。通过以上分析可以看出, 为了降低晶体端面增益需要减小 Nd^{3+} 的掺杂浓度, 而激活粒子浓度的下降则需要增加晶体长度来保证对泵浦光的充分吸收。本实验采用 Nd^{3+} 掺杂 0.1% 的低浓度 Nd:YAG 晶体作为激光工作介质, 晶体长度为 37 mm, 确保对泵浦光的充分吸收, 以获得高动静比与高能量的调 Q 激光输出。

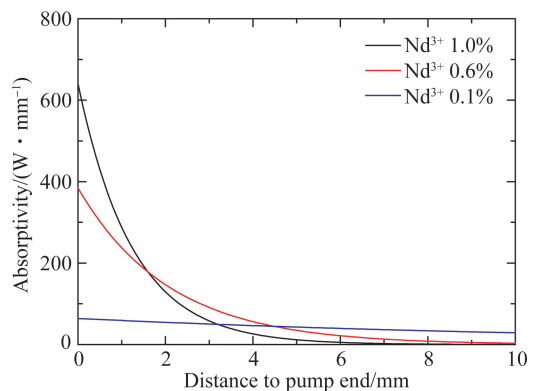


图 3 不同 Nd^{3+} 掺杂浓度下的 VCSEL 泵浦光吸收率

Fig. 3 Absorptivity of VCSEL pump power under different Nd^{3+} doping concentrations

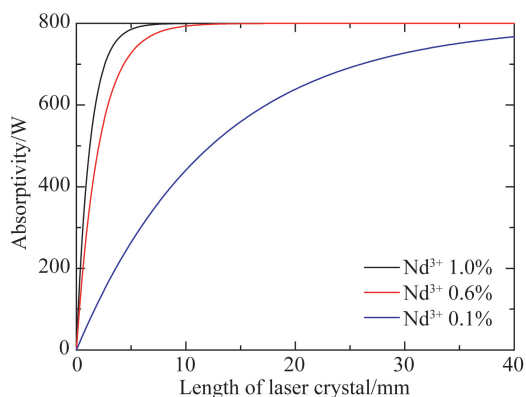


图 4 VCSEL 泵浦光吸收随晶体长度的变化曲线
Fig. 4 Variation of absorption of pump power with length of laser crystal

2.3 谐振腔输出耦合率优化

在产生高能量脉冲激光的过程中, 由于高的峰值功率会引起激光谐振腔内部光学器件的损伤, 为了获得 45 mJ, 8 ns, 光斑 3.5 mm 的 1 064 nm 脉冲激光输出, 腔内功率密度的计算公式如下:

$$I_2 = I_1 \frac{1+R}{1-R} = I_1 \frac{2-T}{T}, \quad (1)$$

其中: I_2 为腔内功率密度, I_1 为腔外功率密度, R 为输出镜反射率, T 为输出镜透过率。计算结果如图 5 所示, 随着输出耦合透过率的不断增大, 腔内功率逐渐减小, 为了避免光学器件的损伤, 原则上透过率越高越好。本研究中, 光学器件镀膜的伤害阈值一般为 500 MW/cm², 而计算结果显示在输出耦合率为 20% 时对应的腔内功率密度为 526 MW/cm², 因此在优化输出耦合率时需保证透过率不低于 20% 才能确保激光器运行时不出现器件损伤。通过实验测试了不同透过率时的激光输出能量, 发现随着透过率的不断增大, 输出能量逐渐减小, 最终确定采用透过率为 25% 的输出耦合镜。

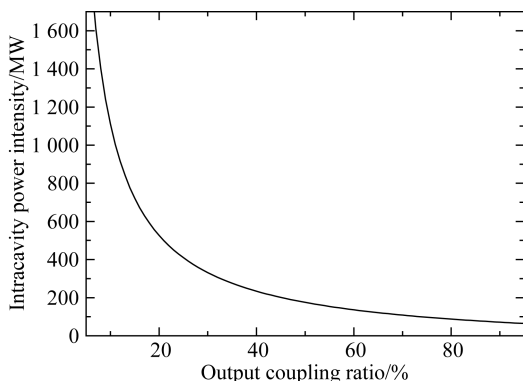


图 5 腔内功率密度随输出耦合率的变化曲线
Fig. 5 Variation of intracavity power intensity with output coupling ratio

2.4 实验结果

实验中, 首先对泵浦源的输出特性进行了研究, VCSEL 的峰值功率随驱动电流的变化如图 6 所示。在 20 Hz, 250 μs 的条件下, VCSEL 的输出功率与电流基本呈线性关系, 在电流为 235 A 时输出最高 800 W 的泵浦功率, 斜效率为 3.6 W/A。通过近红外光纤光谱仪 (HR2000CG, Ocean Optics) 对 VCSEL 的光谱进行了测量, 结果如图 7 所示。中心波长为 808.4 nm, 对准了 Nd: YAG 晶体的吸收峰, 谱宽 (FWHM, 半高全宽) 为 2 nm, 是普通边发射 LD 谱宽的 1/3, 较窄的谱宽保证了激光晶体对泵浦光的充分吸收。

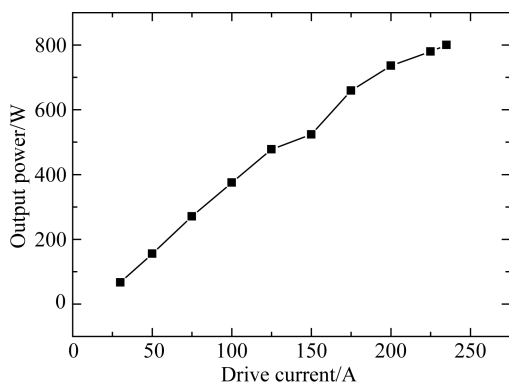


图 6 VCSEL 输出功率随电流的变化曲线

Fig. 6 Variation of VCSEL output power with drive current

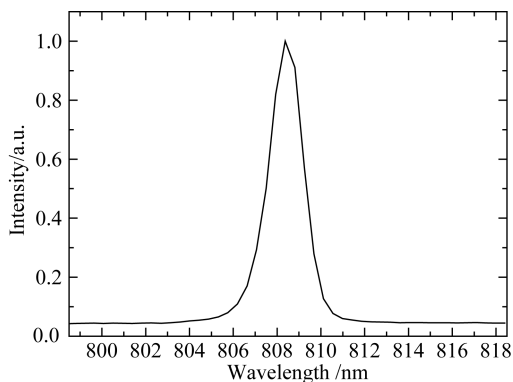


图 7 VCSEL 光谱

Fig. 7 Spectrum of VCSEL

通过能量计 (PE50BF-DIFH-C, Ophir-Spiricon Inc.) 对 1 064 nm 激光的输出能量进行了测试, 测试结果如图 8 所示。在 VCSEL 最高泵浦能量为 200 mJ 时输出了 45 mJ 的 1 064 nm 调 Q 激光, 光光转换效率高达 22.5%。同时, 对调 Q 过程的动静比进行了研究, 发现随着泵浦能

量的增大动静比并没有明显的下降,最高泵浦能量下静态(未调 Q)输出 48 mJ 的 1 064 nm 激光,动静比达到 93.8%。由此可以看出,采用低浓度的 Nd:YAG 晶体降低泵浦端面增益有效地抑制了自激振荡,在高泵浦能量下仍然保持高的动静比,从而为获得更高能量的 1 064 nm 脉冲激光提供了有效的技术手段。随着输出功率的不断提高,VCSEL 作为泵浦源有望获得更高能量的 Nd:YAG 脉冲激光输出。

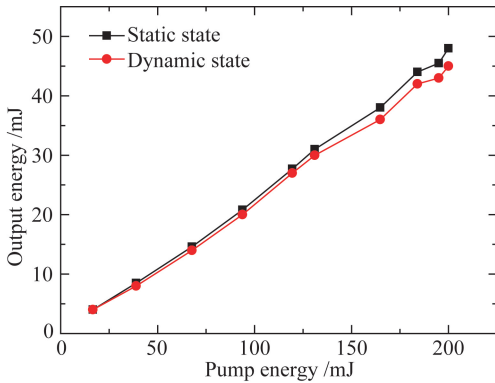


图 8 1 064 nm 激光输出能量随 VCSEL 泵浦能量的变化曲线
Fig. 8 Variation of output energy of 1 064 nm laser with pump energy of VCSEL

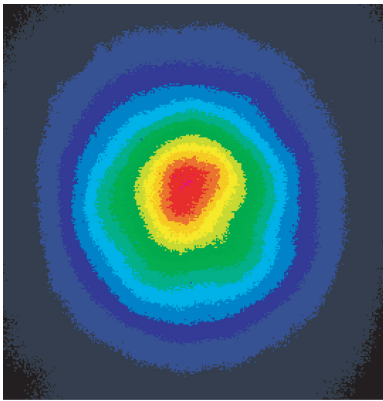


图 9 1 064 nm 激光的二维光强分布
Fig. 9 Two-dimensional beam profile of 1 064 nm laser

利用光束质量分析仪 (SP620U, Spiricon Inc.) 对 20 Hz, 45 mJ 的 1 064 nm 激光进行了光束质量测量,测得的光强二维分布如图 9 所示。

参考文献:

- [1] 刘秋武,陈亚峰,王杰,等. 差分吸收激光雷达波长漂移和能量波动对浓度反演的影响 [J]. 光学精密

可以看出,光强近似呈高斯分布,光斑大小约为 3.5 mm。利用套孔法对 1 064 nm 激光的发散角进行了测量,通过一长焦透镜 ($f=3$ m) 将激光聚焦,在光束聚焦位置测得光腰直径为 3.6 mm,计算可得 1 064 nm 激光的发散角为 1.2 mrad。1 064 nm 激光脉冲波形通过一快速响应的硅光电探测器 (DET10A, Thorlabs) 和示波器 (DPO 4104, Tektronix) 进行测量,测量结果如图 10 所示,激光脉冲宽度约为 8 ns。

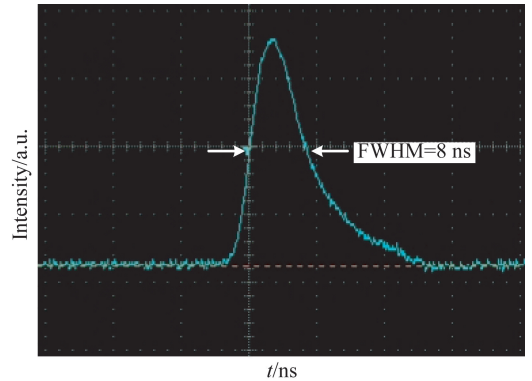


图 10 1 064 nm 调 Q 激光脉冲波形
Fig. 10 Pulse waveform of 1 064 nm Q-switched laser

3 结 论

本文通过 VCSEL 端面泵浦 Nd:YAG 获得了高能量的 1 064 nm 调 Q 激光输出。通过模拟计算分析了 Nd^{3+} 掺杂浓度与自激振荡的关系,在保证对泵浦光充分吸收的前提下确定了激光晶体的浓度与长度。为了避免光学器件的镀膜损伤,计算了谐振腔内的功率密度,输出耦合镜的透过率确定为 25%。VCSEL 泵浦能量为 200 mJ 时,产生了最高 45 mJ 的 1 064 nm 调 Q 激光输出,光光转换效率达到 22.5%。激光脉宽为 8 ns,发散角为 1.2 mrad。对调 Q 过程的动静比进行了研究,采用低浓度的 Nd:YAG 晶体降低泵浦端面增益能够有效抑制自激振荡,在高泵浦能量下仍然保持了高的动静比,从而为获得更高能量的 1 064 nm 脉冲激光提供了有效的技术手段。

工程, 2018, 26(2): 253-260.

LIU Q W, CHEN Y F, WANG J, *et al.*. Effects of wavelength shift and energy fluctuation on inversion of NO_2 differential absorption lidar [J]. *Opt. Preci-*

- tion Eng., 2018, 26(2): 253-260. (in Chinese)
- [2] 赵元安,胡国行,刘晓凤,等. 激光预处理技术及其应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2938-2947. ZHAO Y A, HU G H, LIU X F, *et al.*. Laser conditioning technology and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 2938-2947. (in Chinese)
- [3] 罗阳,胡国行,赵元安,等. 激光预处理提升 DKDP 晶体加工表面的抗损伤能力[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 1987-1994. LUO Y, HU G H, ZHAO Y A, *et al.*. Improvement of laser damage resistance at surface of DKDP crystal by laser conditioning process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 1987-1994. (in Chinese)
- [4] 靳磊. 激光雷达数据反演气溶胶后向散射比研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013. JIN L. *The Retrievals of Aerosol Backscattering Ratio from Lidar Data* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- [5] 周海金. 大气气溶胶与痕量气体廓线 MAX-DOAS 遥测方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2013. ZHOU H J. *Studies on Remote Sensing of Aerosol and Trace Gas Vertical Distribution by the MAX-DOAS* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [6] 狄慧鸽,侯晓龙,赵虎,等. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 244206-1-8. DI H G, HOU X L, ZHAO H, *et al.*. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar [J]. *Acta Phys. Sin.* 2014, 63(24): 244206-1-8. (in Chinese)
- [7] 高飞. 激光雷达精细探测大气气溶胶研究[D]. 西安:西安理工大学,2008. GAO F. *Study of Laser Radar for Fine-Detection of Aerosol Profiles* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [8] 张薇. 水汽-云-气溶胶激光雷达偏振通道的设计与校正研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013. ZHANG W. *Design and Calibration of Polarization Channel in Water Vapor-cloud-aerosol Lidar* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- [9] ARMANDILLO E, NORRIE C, COSENTINO A, *et al.*. Diode-pumped high-efficiency high-brightness Q-switched Nd:YAG slab laser [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(15): 1168-1170.
- [10] MA X H, BI J Z, HOU X, *et al.*. Conductively cooled all-solid-state zigzag slab laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(5): 366-368.
- [11] GOLDBERG L, NETTLETON J, SCHILLING B, *et al.*. Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6552: 65520G-1-8.
- [12] 许坤,付林杰,钟发成,等. 高光束质量垂直腔面发射激光器同相耦合阵列[J]. 发光学报, 2018, 39(6): 844-849. XU K, FU L J, ZHONG F C, *et al.*. High beam quality in-phase coupled vertical cavity surface emitting laser array [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(6): 844-849. (in Chinese)
- [13] 李保志,邹永刚,王小龙,等. 宽范围可调谐内腔液晶垂直腔面发射激光器设计与研究[J]. 发光学报, 2018, 39(11): 1621-1626. LI B Z, ZOU Y G, WANG X L, *et al.*. Design and research of wide range tunable intracavity liquid crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1621-1626. (in Chinese)
- [14] 周广正,兰天,李颖,等. 高温稳定 25 Gbit/s 850 nm 垂直腔面发射激光器[J]. 发光学报, 2019, 40(5): 630-634. ZHOU G ZH, LAN T, LI Y, *et al.*. High temperature-stable 25 Gbit/s 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(5): 630-634. (in Chinese)
- [15] GOLDBERG L, MCINTOSH C, COLE B. VCSEL end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser with adjustable pulse energy [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(5): 4261-4267.
- [16] LEEUWEN R V, XIONG Y H, WATKINS L S, *et al.*. High power 808 nm VCSEL arrays for pumping of compact pulsed high energy Nd:YAG lasers operating at 946 nm and 1 064 nm for blue and UV light generation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7912: 79120Z-1-7.
- [17] LEEUWEN R V, XIONG Y H, SEURIN J F, *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for diode pumped solid-state lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8381: 83810I-1-7.
- [18] SEURIN J, XU G Y, MIGLO A, *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for solid-state laser pumping [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8276: 827609-1-10.

[19] COLE B, HAYS A, MCINTOSH C, *et al.*. Wide temperature operation of a VCSEL pumped 355nm

frequency tripled Nd : YAG laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8599: 85991L-1-7.

作者简介:



谢仕永(1984—),男,山东潍坊人,博士,高级工程师,2011年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事固体激光及变频技术的研究。E-mail: shiyong515@163.com