

引用格式: SUN Jingwei, YU Yang, WANG Kaixin, et al. Single-frequency Ring Laser Oscillation and Power Amplification System[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(9):0914003

孙静玮,余洋,王凯鑫,等. 环形腔单频激光振荡及功率放大系统研究[J]. 光子学报, 2023, 52(9):0914003

环形腔单频激光振荡及功率放大系统研究

孙静玮^{1,2,3}, 余洋^{1,2,3}, 王凯鑫^{1,2,3}, 高春清^{1,2,3}

(1 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

(2 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(3 信息光子技术工业与信息化部重点实验室, 北京 100081)

摘 要:设计研制了波长为 1 064 nm 的半导体激光器泵浦单频 Nd:YAG 激光振荡及功率放大系统。仿真分析了激光晶体的端面温度分布,采用低掺杂浓度激光晶体和端面键合方式有效改善了晶体棒的端面热效应。激光振荡级采用环形腔内插入法拉第旋光器、偏振片、半波片和声光 Q 开关的方式,在重复频率 25 Hz 下获得了能量 2.18 mJ、脉冲宽度 63.2 ns 的单向单频脉冲激光输出。经过一级放大后,最终获得了能量 15.85 mJ、脉冲宽度 62.7 ns 的单频脉冲激光输出。

关键词:Nd:YAG 晶体;单频激光;全固态环形激光器;振荡-放大系统;晶体热效应

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235209.0914003

0 引言

全固态单频脉冲激光器由于具有线宽窄、相干长度长、稳定性高、结构紧凑等优点,现已广泛应用于相干激光探测^[1-2]、激光遥感^[3-4]、激光测距^[5-6]等领域。近年来在相干激光探测领域,风场信息、大气成分浓度、大气气溶胶、相干成像等的检测需求越来越大,单频激光器是激光雷达的关键器件。基于 Nd:YAG 晶体的 1 064 nm 单频脉冲激光器除了可直接用作激光雷达的光源进行风场和气溶胶的探测外,也可以通过倍频、和频、光学参量振荡等非线性变频方式产生其他波长的单频激光输出,有重要的应用价值^[7-10]。

2009 年, XIE Shiyong 等报道了一台 1 064 nm 准连续高功率可调谐的单频激光器^[11],其振荡级采用三镜环形行波腔的结构,通过腔内插法拉第旋光器和标准具的方式,在重复频率 1 kHz 下获得了 13.2 W 的单频可调谐的激光输出,后经过放大器双程放大后获得功率 44 W 的激光输出,放大倍数约 3.3 倍。2011 年,他们使用 1 064 nm 和 1 319 nm 单频光源通过和频的方式,在 589.159 nm 处获得了 7.5 W 准连续输出^[12]。2015 年, ZHANG Junxuan 等报道了一台半导体激光器(Laser Diode, LD)双端脉冲泵浦单频 Nd:YAG 激光器^[13],该激光器采用 U 型驻波腔结构,利用 RbTiOPO₄ 晶体进行电光调 Q,通过种子注入的方式,在重复频率 400 Hz 下获得了 9.9 mJ 的 1 064 nm 单频脉冲激光输出。2016 年,他们使用该单频激光器作为光学参量振荡器的泵浦源,获得了 2.05 μm 的信号光输出^[14]。2018 年, LONG Jiangxiong 等报道了一台种子注入单频 Nd:YAG 激光系统^[15],其振荡级采用 U 型驻波腔结构,利用电光调 Q 方式在重复频率 500 Hz 下获得了 8.4 mJ 单频脉冲激光输出,并通过倍频方式获得了能量 1.1 mJ 的倍频激光脉冲输出,通过 LD 双端泵浦 Nd:YAG 放大器进一步提升了激光能量。2020 年, CREMONS D R 等报道了一台可用于直接探测火星轨道风场和气溶胶的激光雷达,该雷达发射机为基于主振荡器和功率放大器的 Nd:YAG 激光系统^[16]。该系统采用环形腔种子注入的方式获得单频调 Q 激光输出,并通过一级放大最终在 250 Hz 的重复频率下获得了脉冲能量 4 mJ 的 1 064 nm 激光输出。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61627821)

第一作者:孙静玮, 3120200566@bit.edu.cn

通讯作者:高春清, gao@bit.edu.cn

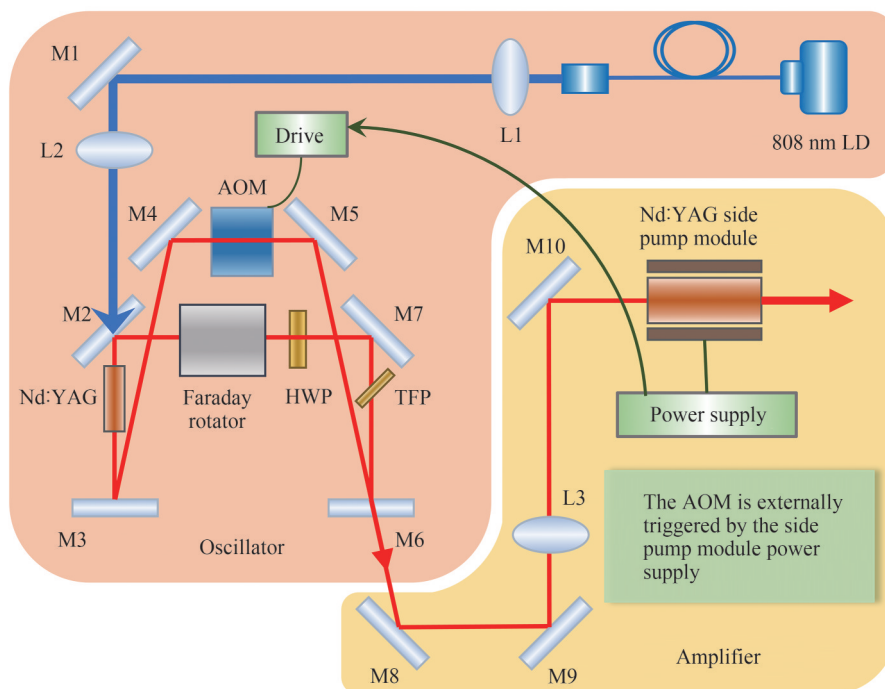
收稿日期:2023-03-15;录用日期:2023-04-28

<http://www.photon.ac.cn>

本文设计研制了一种全固态单频脉冲Nd:YAG激光振荡及功率放大系统,振荡级采用六镜行波环形腔结构,通过腔内插入法拉第旋光器、偏振片和半波片的方式使振荡器单向单频运转,通过声光调Q的方式获得单频脉冲输出。为了获得更高的输出能量,振荡级后加入了一级放大级,有效提升了系统输出能量。最终该系统在25 Hz的重复频率下获得了脉冲能量15.85 mJ、脉冲宽度62.7 ns的单频脉冲激光输出。

1 实验装置

设计的单频Nd:YAG脉冲激光振荡及功率放大系统的光路图如图1所示,包含一个振荡级和一个放大级。



AOM; acousto-optic modulator; HWP: half-wave plate; TFP: thin film polarizer

图1 单频脉冲Nd:YAG激光振荡及功率放大系统实验装置

Fig.1 Experiment setup of single frequency pulsed Nd:YAG laser oscillation and power amplification system

1.1 激光振荡器结构

该激光振荡器为M2至M7构成的六镜环形行波腔结构,为了压缩输出激光的脉冲宽度,腔长被压缩至930 mm左右。M2、M4、M5和M7是808 nm透射率95%和1 064 nm反射率99.5%的45°平面双色镜,M3为曲率半径1 000 mm的平凸反射镜,镀有808 nm高透膜以及1 064 nm高反膜,M6为1 064 nm透射率20%的输出镜,曲率半径为-1 000 mm。

该振荡器的泵浦源为光纤耦合的半导体激光器(LD),中心波长808 nm,数值孔径为0.22,光纤芯径为200 μm 。泵浦光束通过由两个凸透镜(L1、L2)组成的泵浦耦合系统后聚焦在增益介质中,泵浦光束在增益介质内的直径约为1 mm。为了降低连续端面泵浦引起的热效应,采用 $\phi 4 \times 50 \text{ mm}^3$ 低掺杂的YAG/Nd:YAG复合晶体作为增益介质,其中掺杂部分长度为45 mm,Nd³⁺粒子掺杂浓度0.2at.%,未掺杂部分的长度为5 mm,用于传导晶体棒积累的热量,降低热退偏以及热透镜效应。晶体棒的两端面均镀有808 nm和1 064 nm的增透膜。Nd:YAG晶体棒被铝箔均匀包裹并放置在铜制热沉当中,铜制热沉的温度由热电制冷器(Thermo-Electric Cooler, TEC)控制在18 $^{\circ}\text{C}$,TEC通过铝制水冷热沉进行散热。

谐振腔内插入的法拉第旋光器、半波片和薄膜偏振片起到光隔离的作用,通过旋转半波片的光轴,可以使得腔内激光单向运转,消除空间烧孔效应,获得单频激光输出。腔内的声光Q开关用于调Q获得脉冲激光输出。

1.2 激光放大器结构

由振荡器输出的脉冲激光通过光束整形后进入放大器中进行能量的进一步放大。放大器的泵浦源为LD侧面泵浦Nd:YAG模块,该侧泵模块由两个相同的Nd:YAG晶体棒以及LD阵列构成,Nd:YAG晶体棒的尺寸为 $\varphi 5 \times 25 \text{ mm}^3$,Nd³⁺粒子的掺杂浓度为1.0at.%,LD阵列为弧形排列封装。该模块由水冷热沉进行散热,温度由TEC控制在最佳工作温度37℃。为了充分利用放大器的增益介质,由振荡器输出的激光光束通过焦距为400 mm的凸透镜(L3)进行扩束至略小于侧泵晶体棒横截面积的尺寸。

LD泵浦阵列的最大峰值功率为4 800 W,最大泵浦电流为200 A,脉冲宽度为250 μs,重复频率为25 Hz。LD侧泵模块的驱动电源可以通过外部调制的方式控制振荡器中声光Q开关的驱动电源,通过实验对比后将设置Q开关延迟时间为250 μs,在该延迟时间下,振荡器的增益介质在Q开关打开之前可以积累足够的反转粒子数。

2 理论分析

Nd:YAG晶体在808 nm处具有较高的吸收截面,晶体吸收大量泵浦光会产生一定的热致退偏和热透镜效应,产生光束质量恶化并对谐振腔的稳定性有一定影响,且连续单端泵浦时其热效应更为严重,因此降低晶体的热效应非常重要。本节以实验使用的Nd:YAG晶体为基础,建立LD连续单端泵浦下的稳态热传导模型,并通过有限元分析的方法分析晶体掺杂浓度和端面键合对晶体温度的影响。

2.1 稳态热传导模型

图2为Nd:YAG晶体棒结构示意图,假设晶体棒左端的中心为坐标原点,建立如图2所示的笛卡尔坐标系。晶体棒的半径为R,长度为L,泵浦光沿z轴入射到晶体中。晶体的侧面在水冷热沉及TEC的作用下保持恒温18℃,晶体两个端面与空气自然对流散热。

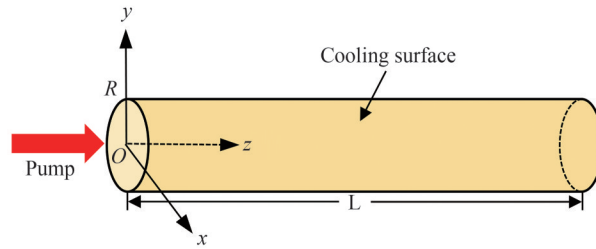


图2 Nd:YAG晶体棒结构示意图
Fig.2 Structure diagram of the Nd:YAG rod

根据能量守恒定律和傅里叶定律,该模型下LD连续单端泵浦的温度场分布满足以下三维稳态热传导方程和温度边界条件

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} + Q(x, y, z) = 0 \\ T(x, y, z) = T_c \quad x^2 + y^2 = R^2 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma} = h_0(T_{\Sigma} - T_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $T(x, y, z)$ 代表点 (x, y, z) 处的温度, $Q(x, y, z)$ 为热源函数,表示单位体积产热量, $K_x=K_y=K_z=K$ 表示各向同性介质在 x,y,z 三个方向上的热传导系数。 T_c 为侧面冷却温度, T_0 为环境温度, h_0 为晶体棒端面与空气的自然对流换热系数。

由于泵浦光通过光束整形后由晶体棒的端面入射,则泵浦光束可以近似看作沿 x,y 方向呈高斯分布,沿 z 方向呈指数吸收,则LD连续单端泵浦Nd:YAG晶体棒的热源函数可以表示为

$$Q(x, y, z) = \begin{cases} \frac{\alpha \eta P_{\text{abs}}}{\pi \omega_p^2(z)} \exp(-\alpha z) \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2(z)}\right] & (0 < x, y \leq \omega_p(z)) \\ 0 & (\omega_p(z) < x, y \leq R) \end{cases} \quad (2)$$

式中, α 为晶体对泵浦光的吸收系数, η 为热转换系数, $P_{\text{abs}} = \eta_{\text{abs}} P_{\text{in}}$ 表示被晶体吸收的泵浦功率, P_{in} 为入射泵浦功率, η_{abs} 为泵浦光的吸收效率。 $\omega_p(z)$ 为泵浦光在点 z 处的光斑半径, 其表达式为

$$\omega_p^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{M^2 \lambda_p z}{n \pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, ω_0 为泵浦光的束腰半径, M^2 为泵浦光光束质量因子, n 为晶体折射率, λ_p 为泵浦光波长。

2.2 仿真及结果分析

仿真使用的三个晶体模型如图3所示, 晶体棒直径为4 mm, 掺杂部分长度均为45 mm。模型A(图3(a))的 Nd^{3+} 粒子掺杂浓度为0.4at.%, 模型B、C(图3(b)、(c))的 Nd^{3+} 粒子掺杂浓度为0.2at.%. 仅模型C左端面键合5 mm长未掺杂的YAG晶体。

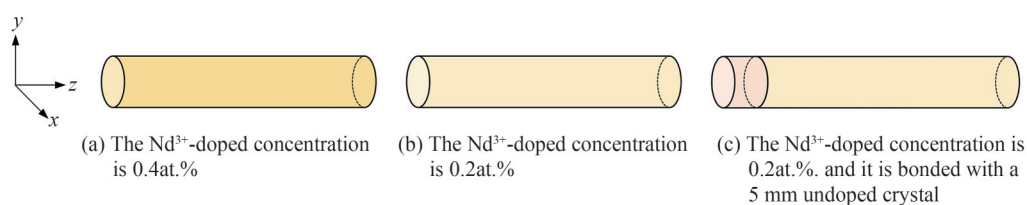


图3 Nd:YAG 晶体模型

Fig.3 Nd:YAG crystal models

利用有限元分析软件求解LD连续单端泵浦下三个模型的端面温度场分布情况。当入射泵浦功率 P_{in} 为40 W、泵浦光斑束腰半径为0.5 mm时, 模型C左端面的温度分布以及三个模型左端面中心轴上的温度分布如图4所示。

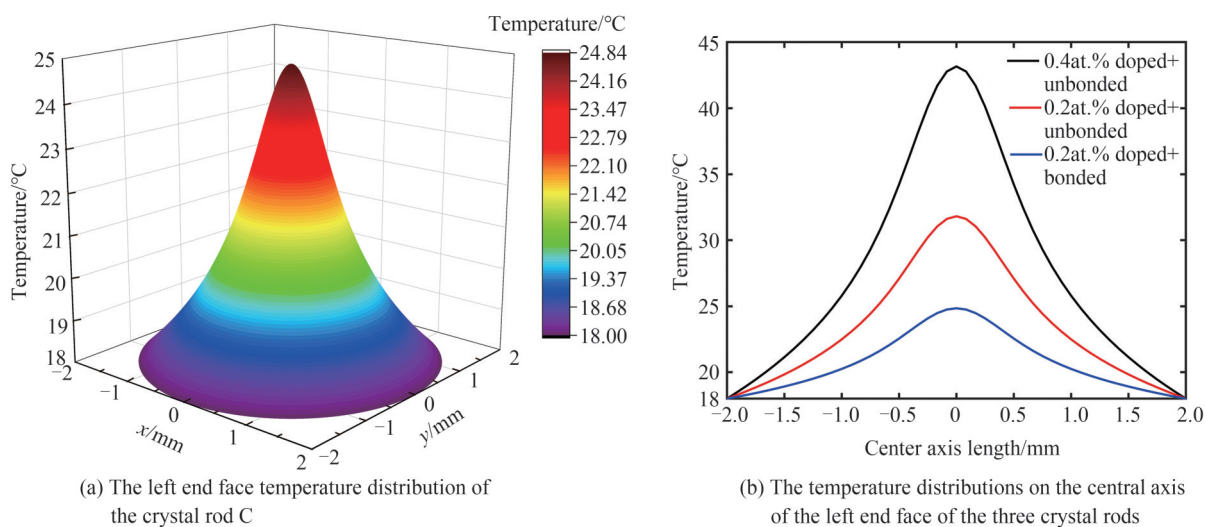


图4 LD连续单端泵浦下晶体模型的温度场

Fig.4 Temperature field of the crystal models under LD continuous single-ended pumping

由图4可以看出, 晶体的端面温度呈高斯分布, Nd^{3+} 粒子掺杂浓度越高, 晶体端面温度越高, 使用端面键合的晶体端面温度明显小于未键合晶体温度。由此证明, 降低 Nd^{3+} 粒子掺杂浓度和使用端面键合的晶体可以有效降低晶体端面温度, 减小因热量积累产生的热透镜效应等不良影响。

3 实验结果及分析

3.1 振荡器结果分析

图5是25 Hz重复频率下输出脉冲能量及脉冲宽度与泵浦功率的关系曲线。随着泵浦功率的增加,输出能量首先近似呈线性增长后趋于饱和。当泵浦功率为42 W时,输出激光能量为2.18 mJ。实验中改变调Q重复频率至50、100、200和300 Hz,发现输出能量曲线几乎与图5一致。这是由于Nd:YAG晶体上能级寿命仅约230 μs ,当重复频率小于4.3 kHz,每个脉冲经过晶体时晶体的上能级均能积累足量的反转粒子数以供消耗,所以在低重频的状态下改变重复频率,输出能量曲线几乎保持不变。随着泵浦功率的增加,脉冲宽度随之减小,且减小幅度逐渐降低。

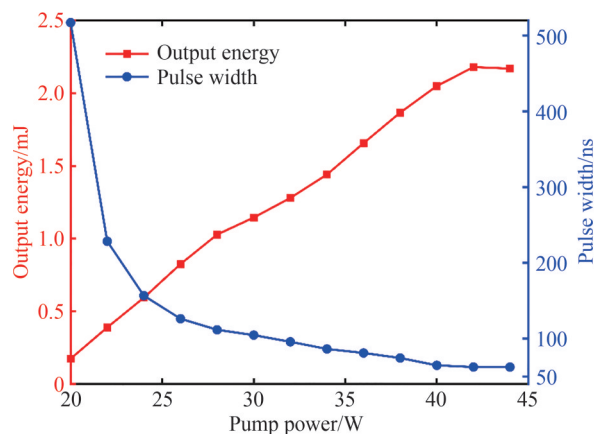
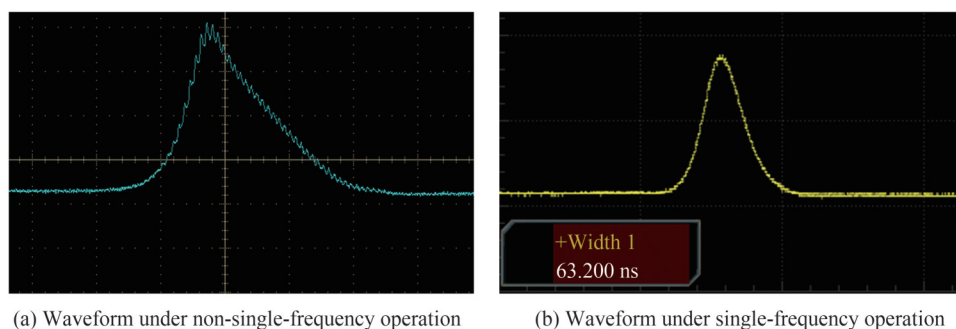


图5 重复频率25 Hz下振荡器脉冲能量及脉冲宽度和泵浦功率的关系曲线

Fig.5 Pulse energy and pulse width as a function of the pump power of the oscillator at the repetition rate of 25 Hz

在重复频率25 Hz下测量最大输出能量处的激光脉冲波形图。使用带宽10 GHz的PIN光电二极管接收激光脉冲的散射光,使用带宽1 GHz的示波器显示脉冲波形,实验采集的脉冲波形如图6所示。当振荡器非单频运转时,会产生多个纵模模式,激光脉冲波形上出现多个调制尖峰(图6(a))。当振荡器单频运转时,激光脉冲的波形平滑无调制,脉冲宽度约为63.2 ns(图6(b))。经长时间观测,我们发现激光脉冲波形始终平滑且可重复,证明振荡器为单纵模输出。利用光谱仪测量激光脉冲光谱得,激光脉冲的中心波长为1 063.6 nm。



(a) Waveform under non-single-frequency operation

(b) Waveform under single-frequency operation

图6 振荡器输出脉冲波形

Fig.6 The output pulse waveform of the oscillator

3.2 放大器结果分析

从振荡器输出的脉冲激光通过侧面泵浦模块进行能量放大。图7是放大器输出的脉冲能量与泵浦电流的关系曲线。放大器的输入能量为1.85 mJ,随着泵浦电流的增加,输出能量随之增长且涨幅没有变缓的趋势。当泵浦电流为120 A时,最大输出能量为15.85 mJ,放大倍数约为8.6倍。由于TEC性能的限制,继续增加泵浦电流,侧面泵浦模块的温度无法稳定维持在最佳工作温度37 $^{\circ}\text{C}$,后续通过优化侧面泵浦模块的制

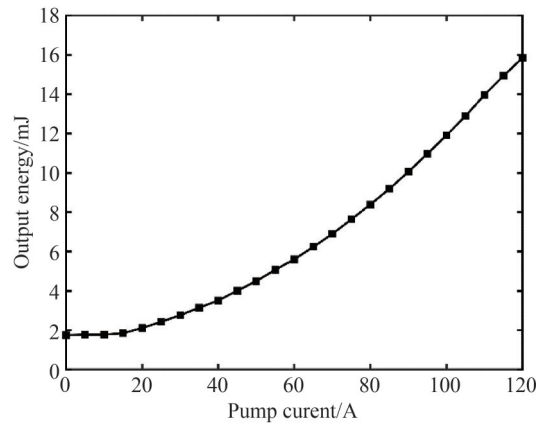


图7 重复频率 25 Hz 下放大器脉冲能量和泵浦电流的关系曲线

Fig.7 Pulse energy as a function of the pump current of the amplifier at the repetition rate of 25 Hz

冷装置可获得更高能量输出。在增加泵浦电流的同时监测放大器输出激光脉冲波形,发现在此过程中脉冲宽度几乎保持不变,且单频性能保持良好。实验中输入放大器的脉冲激光能量密度较弱,属于小信号输入的情况,此时放大器中不会出现明显的增益饱和现象。小信号输入时,脉冲的各部分功率增益是相等的,输出脉冲波形没有畸变,所以在此过程中脉冲宽度几乎保持不变。在最大输出能量时,放大器的输出脉冲宽度约为 62.7 ns,结果如图 8 所示。

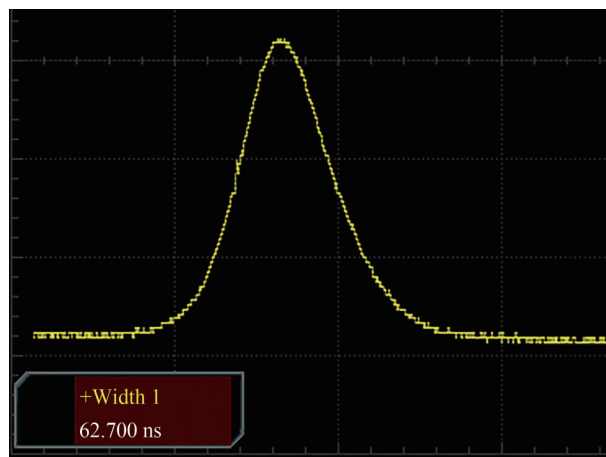


图8 放大器输出脉冲波形

Fig.8 The output pulse waveform of the amplifier

4 结论

设计实现了重复频率 25 Hz 的 1 064 nm Nd:YAG 单频激光振荡-放大系统。采用了六镜环形腔作为振荡器,通过腔内插入法拉第旋光器及声光 Q 开关的方式获得了单频脉冲激光输出。经过一级放大后,最终在重复频率 25 Hz 下获得了脉冲宽度 62.7 ns、能量 15.85 mJ 的 1 064 nm 单频脉冲输出。该系统在激光雷达、泵浦参量振荡器方面具有较大的应用价值。

参考文献

- [1] WANG K, GAO C, LIN Z, et al. 1 645 nm coherent Doppler wind lidar with a single-frequency Er: YAG laser[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 14694-14704.
- [2] KIEMLE C, QUATREVALET M, EHRET G, et al. Sensitivity studies for a space-based methane lidar mission[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4(10): 2195-211.
- [3] WANG Juntao, ZHU Ren, ZHOU Jun, et al. Conductively cooled 250-Hz single frequency Nd:YAG laser[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 9(8): 081405.
- [4] TAYLOR E W, SHI Wei, CARDIMONA D A, et al. All fiber-based single-frequency Q-switched laser pulses at 2 μ m

- for lidar and remote sensing applications[C]. *Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments V*, 2011, 8164: 81640M.
- [5] ZHANG Haifeng, LONG Mingliang, DENG Huarong, et al. Space debris laser ranging with a 60 W single-frequency slab nanosecond green laser at 200 Hz[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(5): 051404.
- [6] ILLIG D W, JEMISON W D, LEE R W, et al. Optical ranging techniques in turbid waters[C]. *Ocean Sensing and Monitoring VI*, 2014, 9111: 91110R.
- [7] ZHOU J, ZANG H, YU T, et al. Development of single-frequency laser for direct-detection wind lidar[C]. *SPIE*, 2007, 6681: 20.
- [8] WANG Juntao, ZHU Ren, ZHOU Jun, et al. Conductively cooled 1-kHz single-frequency Nd:YAG laser for remote sensing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(8): 081405.
- [9] LIU Z, WU S, LIU B. Seed injection and frequency-locked Nd:YAG laser for direct detection wind lidar[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(3): 541-545.
- [10] LOHRING J, LUTTMANN J, KASEMANN R, et al. INNOSLAB-based single-frequency MOPA for airborne lidar detection of CO₂ and methane[C]. *SPIE*, 2014.
- [11] XIE Shiyong, LU Yuanfu, BO Yong, et al. High power tunable single frequency 1 064 nm quasi-continuous-wave laser oscillator-amplifier system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(7): 4659-4663.
谢仕永, 鲁远甫, 薄勇, 等. 高功率可调谐 1 064 nm 准连续单频激光振荡-放大系统研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(7): 4659-4663.
- [12] XIE S, BO Y, SHEN Y, et al. A 7.5 W quasi-continuous-wave sodium D2 laser generated from single-pass sum-frequency generation in LBO crystal[J]. *Applied Physics B*, 2011, B102(4): 781-787.
- [13] ZHANG Junxuan, ZHU Xiaolei, MA Xiuhua, et al. Stable seeder-injected Nd:YAG pulsed laser using a RbTiOPO4 phase modulator[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(11): 53-57.
- [14] XIE Xiaobing, LI Shiguang, ZHU Xiaolei, et al. Characteristics of single resonant nanosecond pulse optical parametric oscillator with output wavelength of 2.05 μm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1208002.
谢小兵, 李世光, 朱小磊, 等. 2.05 μm 单谐振纳秒脉冲光参量振荡器特性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1208002.
- [15] LONG Jiangxiong, LI Gang, YANG Bin, et al. Injection-seeded 500 Hz repetition rate high peak power single-frequency Nd:YAG laser for mid-infrared generation[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2018, 39(6): 600-607.
- [16] CREMONS D R, ABSHIRE J B, SUN X, et al. Design of a direct-detection wind and aerosol lidar for mars orbit[J]. *CEAS Space Journal*, 2020, 12(2): 149-162.

Single-frequency Ring Laser Oscillation and Power Amplification System

SUN Jingwei^{1,2,3}, YU Yang^{1,2,3}, WANG Kaixin^{1,2,3}, GAO Chunqing^{1,2,3}

(1 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing 100081, China)

(3 Key Laboratory of Information Photonic Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: All-solid-state single-frequency pulse lasers have been widely used in coherent laser detection, laser remote sensing, laser ranging, and other fields due to their advantages of narrow line width, long coherent length, high stability, and compact structure. In recent years, in the field of coherent laser detection, the demands for wind field measurement, aerosol detection, and coherent imaging are increasing, and single-frequency lasers are the key devices of lidar. Among them, the 1 064 nm single-frequency pulsed laser based on Nd:YAG crystal can not only be directly used as the light source of lidar for wind field and aerosol detection, but also can generate single-frequency laser output of other wavelengths through nonlinear frequency conversions such as frequency doubling, sum frequency, and optical parametric oscillation. In this paper, an LD-pumped single-frequency Nd:YAG master oscillator and power amplifier system with a wavelength of 1 064 nm has been developed. Nd:YAG crystal has a high absorption at 808 nm. The crystal absorbs a large amount of the pump light, which will induce the thermal lensing effect and decrease the quality and stability of the beam. The thermal effect is more serious when the crystal is pumped continuously. Therefore, it is very important to decrease the thermal effect. In

this paper, the steady-state heat transfer model of the Nd:YAG rod is studied, and three Nd:YAG rod models with different parameters are built for comparative analysis. It is shown from the simulated results that the temperature of the Nd:YAG rod can be decreased by low doping concentration and end-face bonding. In the experiment, a six-mirror ring cavity is used as the oscillator. A Faraday polarizer, a polarizer, and a half-wave plate are inserted into the cavity to eliminate the spatial hole-burning effect and obtain a unidirectional single-frequency laser output. The laser pulse is obtained by an acousto-optic Q-switch. A pulse output with an energy of 2.18 mJ and a pulse width of 63.2 ns is obtained at the repetition rate of 25 Hz, and its single-frequency characteristic is validated by monitoring the waveform of the output pulse. In order to achieve a higher energy output, a power amplification system is established after the oscillator. The pulsed laser with an energy of 1.85 mJ incidents in the amplifier after being shaped by a lens. An LD side-pumped Nd:YAG module is used in the power amplification system. After the amplification, a laser output of 15.85 mJ with a pulse width of 62.7 ns is obtained with the gain of about 8.6 times. The single-frequency ring laser oscillation and power amplification system has potential applications in lidar and optical parametric oscillators.

Key words: Nd:YAG crystals; Single-frequency lasers; All-solid-state ring lasers; Oscillation-amplification systems; Crystal thermal effects

OCIS Codes: 140.3580; 140.3530; 140.3570; 140.3540