

激光与光电子学进展

LD 端面泵浦千赫兹多波长激光器

冉子涵*, 赵一鸣, 李静, 李之通, 李祚涵

北京遥测技术研究所, 北京 100076

摘要 报道了一台用于大气探测激光雷达系统的 LD 脉冲端面泵浦 Nd:YAG 激光晶体的腔外倍频千赫兹多波长激光器。采用紧凑介稳腔设计和电光调 Q 方式, 获得具有高动静比的 1064 nm 基频光脉冲输出。腔外采用 I 类相位匹配 LBO 晶体倍频, II 类相位匹配 LBO 晶体和频, 实现了 355 nm 和频光输出, 同时对 355 nm 和频光单脉冲能量的影响因素进行了理论分析和实验研究。当倍频转换效率为 53% 时, 获得重复频率为 1 kHz 的三波长激光分束输出, 对应的单脉冲能量分别为 1.18 mJ@1064 nm、1.06 mJ@532 nm、0.73 mJ@355 nm; 脉冲宽度分别为 3.49 ns@1064 nm、3.42 ns@532 nm、3.02 ns@355 nm; 光束质量因子分别为 $M_x^2=1.70$ 、 $M_y^2=1.75$ @1064 nm, $M_x^2=1.57$ 、 $M_y^2=1.41$ @532 nm, $M_x^2=1.51$ 、 $M_y^2=1.38$ @355 nm。

关键词 激光器; 二极管泵浦; 千赫兹; 多波长; 电光调 Q

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914002

LD End-Pumped Kilohertz Multiwavelength Lasers

Ran Zihan*, Zhao Yiming, Li Jing, Li Zhitong, Li Zuohan

Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China

Abstract This study describes an extra-cavity frequency-doubled kilohertz multiwavelength laser for an atmospheric detection lidar that uses an LD pulse end-pumped Nd:YAG laser crystal. It adopts an electro-optic Q-switching technique and a compact metastable cavity design to achieve a high dynamic-to-static ratio of 1064-nm fundamental frequency optical pulse output. Type I phase-matched LBO crystal frequency doubling and type II phase-matched LBO crystal sum-frequency outside the cavity were used to produce 355-nm sum-frequency light. Additionally, the influence factor of 355-nm sum-frequency light pulse energy was theoretically and experimentally investigated. A three-wavelength laser beam splitting output with a repetition frequency of 1 kHz was obtained for a frequency doubling conversion efficiency of 53%. The corresponding single-pulse energy was 1.18 mJ at 1064 nm, 1.06 mJ at 532 nm, and 0.73 mJ at 355 nm, and the pulse width was 3.49 ns at 1064 nm, 3.42 ns at 532 nm, and 3.02 ns at 355 nm; and the beam quality factors were $M_x^2=1.70$, $M_y^2=1.75$ at 1064 nm, $M_x^2=1.57$, $M_y^2=1.41$ at 532 nm, and $M_x^2=1.51$, $M_y^2=1.38$ at 355 nm.

Key words lasers; diode pumping; kilohertz; multiwavelength; electro-optical Q-switching

OCIS codes 140.2020; 140.3538; 140.3540

1 引言

千赫兹多波长电光调 Q 激光器是大气探测激光雷达系统的核心探测光源, 同时还可以应用于海

洋探测、陆地探测和激光测距等领域。千赫兹重复频率激光探测具有目标捕获快、回波数多、标准点数据密度高等优点。相对于单波长激光雷达, 多波长激光雷达的光谱范围宽, 获得的光学参数多, 探

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-01-28; 录用日期: 2021-02-04

通信作者: *rzhic3@163.com

测微粒种类丰富,可对大气中的气溶胶消光系数、后向散射系数、退偏振比、边界层高度等参数的时空分布进行探测^[1-8]。大气激光雷达要求探测光源输出激光单脉冲能量达毫焦量级,实现水平方向探测距离达 10 km,垂直方向探测距离达 20 km;输出激光脉冲宽度尽量窄,实现高精度探测。2007 年, Ji 等^[9]采用侧面泵浦方式,设计了一种新型谐振腔来补偿激光晶体热退偏,获得重复频率为 1 kHz,单脉冲能量为 30 mJ,脉冲宽度为 15 ns 的 1064 nm 激光输出。2015 年, Zhu 等^[10]利用双端泵浦 Nd:YAG,采用 KD*P 电光调 Q,获得重复频率为 1 kHz,单脉冲能量为 8 mJ,脉冲宽度为 11 ns 的 1064 nm 激光输出。2018 年, Ebadian 等^[11]利用 LD 侧面泵浦双棒 Nd:YAG,采用退偏补偿技术,在重复频率为 1 kHz 时,获得单脉冲能量为 10 mJ,脉冲宽度为 6.5 ns 的 1064 nm 激光输出。为满足大气探测激光雷达应用需求,具有多波长、窄脉冲宽度、高光束质量的千赫兹激光器受到越来越多的关注。文献[9-11]报道的激光器输出激光单脉冲能量较高,但由于激光器增益低,腔内脉冲建立时间长,且腔内光子寿命较长,输出激光脉冲宽度较宽;采用侧面泵浦方式,输出激光的光束质量差;且均为单波长激光输出。

本文利用 LD 脉冲端面泵浦 Nd:YAG 增益介质,设计了一种结构紧凑的介稳腔,采用电光调 Q 技术,获得高动静比的 1064 nm 基频光脉冲运转。在谐振腔外,1064 nm 基频光经 I 类相位匹配 LBO 晶体倍频产生 532 nm 波长激光,二者再经 II 类相位匹配 LBO 晶体和频产生 355 nm 波长激光。理论计算分析得出倍频转换效率 50% 对应最高 355 nm 单脉冲能量输出,进而通过实验探究了倍频转换效率对 355 nm 输出能量的影响。为了满足大气探测激光雷达的应用需求,最终在倍频转换效率为 53% 时获得重复频率为 1 kHz 的三波长激光分束输出,三波长激光单脉冲能量分别为 1.18 mJ@1064 nm, 1.06 mJ@532 nm, 0.73 mJ@355 nm;脉冲宽度分别为 3.49 ns@1064 nm, 3.42 ns@532 nm, 3.02 ns@355 nm;光束质量因子分别为 $M_x^2=1.70$ 、 $M_y^2=1.75$ @1064 nm, $M_x^2=1.57$ 、 $M_y^2=1.41$ @532 nm, $M_x^2=1.51$ 、 $M_y^2=1.38$ @355 nm。本文设计的激光器采用端面泵浦方式,腔内增益高,脉冲建立时间短,泵浦光与振荡光模式匹配良好,可获得窄脉冲宽度、高光束质量的输出激光。采用介稳腔设计可以有效平衡腔内功率密度与光学膜层损伤阈值,有

利于激光器稳定运转。腔外采用非线性频率变换方式,拓展了激光器的波长范围,获得多波长激光输出。大气激光雷达采用所设计激光器作为探测光源,可实现长距离、高精度、大范围的大气探测。

2 倍频与和频理论

非线性频率变换理论可以拓展新的激光波段,扩大激光器应用范围。1064 nm 激光经倍频转换可获得 532 nm 波长激光,532 nm 激光和剩余的 1064 nm 激光和频可获得 355 nm 波长激光。根据三波耦合方程^[12]可以推导出倍频光强公式与和频光强公式,

$$I_2 = \frac{8\pi^2 l^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1^2 n_2 \lambda_1^2 c \epsilon_0} I^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right), \quad (1)$$

$$I_3 = \frac{8\pi^2 l^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 c \epsilon_0} I_1 I_2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right), \quad (2)$$

式中: d_{eff} 为倍频晶体的有效非线性系数; d_{eff} 为和频晶体的有效非线性系数; l 为非线性晶体长度; n_1 、 n_2 、 n_3 为基频光、倍频光、和频光在非线性晶体中的折射率; I 为倍频前注入基频光的光强; I_1 、 I_2 为倍频后输出基频光、倍频光的光强; I_3 为和频后输出和频光的光强; λ_1 、 λ_3 为基频光与和频光的波长; c 为光速; ϵ_0 为介电常数; Δk 为相位匹配因子。

由倍频光强公式——(1)式可以推导出倍频转换效率:

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{8\pi^2 l^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1^2 n_2 \lambda_1^2 c \epsilon_0} I \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right). \quad (3)$$

根据倍频转换效率公式,当倍频晶体尺寸确定时,若基频光与倍频光满足相位匹配条件($\Delta k = 2k_1 - k_2 = 0$),倍频转换效率随基频光注入功率密度的增加而增大。

具有最高单脉冲能量的 355 nm 和频光输出对应着一个最优倍频转换效率,但是不同的文献给出的最优倍频转换效率并不相同^[13-14]。理想情况下,最佳 355 nm 激光的获得需满足 1064 nm 与 532 nm 激光在和频前功率配比为 1:2,则对应的倍频转换效率为 66.7%。但是产生最佳 355 nm 和频光并不是只要满足功率配比为 1:2 即可,还要考虑功率密度等其他影响因素^[15]。

由和频光强公式——(2)式可以推导出和频转换效率公式:

$$\eta_{\text{SFG}} = \frac{8\pi^2 l^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 c \epsilon_0} \frac{I_1 I_2}{I} \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right). \quad (4)$$

研究倍频转换效率对 355 nm 输出激光单脉冲能量的影响,仅需要考虑倍频后功率密度 I_1 、 I_2 对和

频转换效率 η_{SFG} 的影响^[12]。若不考虑倍频晶体对激光的吸收损耗, 倍频前基频光光强为 I , 倍频后基频光光强 $I_1 = I - I_2$, 设其他变量为常数 a , 即

$$a = \frac{8\pi^2 l^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 c \epsilon_0 I} \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right), \quad (5)$$

则和频转换效率为

$$\eta_{\text{SFG}} = a I_1 I_2 = a I_2 (I - I_2). \quad (6)$$

根据(6)式得到的仿真结果如图 1 所示。当 $I_2 = I/2$, 即倍频转换效率为 50% 时, 和频转换效率

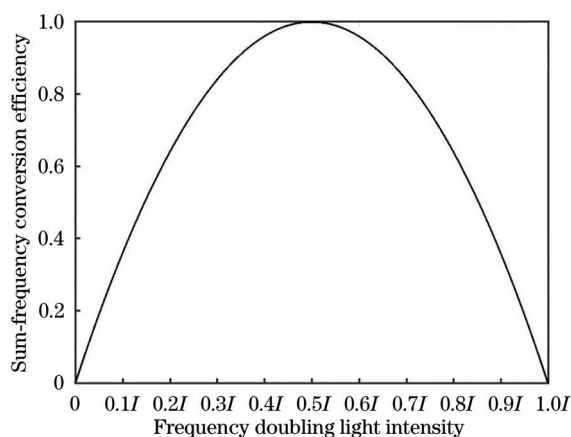


图 1 和频转换效率随倍频光强的变化曲线

Fig. 1 Sum-frequency conversion efficiency changed with frequency doubling light intensity

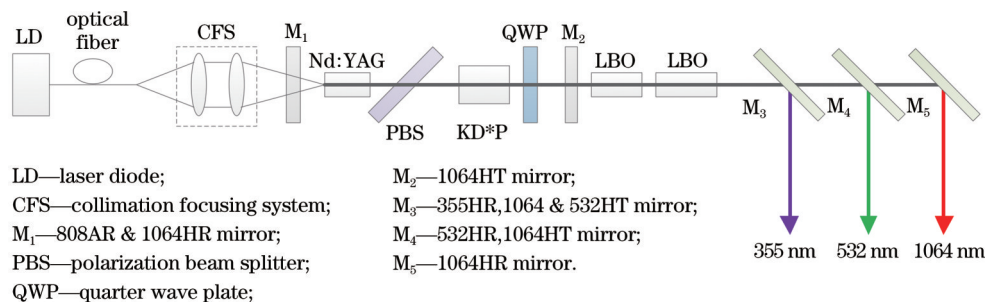


图 2 千赫兹多波长激光器实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup for kilohertz multiwavelength laser

频率变换采用腔外倍频方式, 腔外倍频相比于腔内倍频, 易于获得多波长激光输出, 且方便切换激光波长。LBO 晶体具有损伤阈值高、允许角度大、走离角小等优点, 因此倍频晶体与和频晶体均选用 LBO 晶体。倍频晶体为 I 类角度相位匹配 LBO ($\theta=90^\circ, \varphi=11.6^\circ$), 尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 双面均镀 1064 nm 和 532 nm 增透膜 ($T>99.8\% @ 1064\text{ nm} \ \& \ 532\text{ nm}$)。和频晶体为 II 类角度相位匹配 LBO ($\theta=42.2^\circ, \varphi=90^\circ$), 尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 14\text{ mm}$, 双面均镀 1064 nm、532 nm 和 355 nm 三波长

最高, 可获得具有最高单脉冲能量的 355 nm 和频光输出。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示, 泵浦源 LD 纤芯直径为 $400\ \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22。泵浦光光纤耦合输出, 经准直聚焦系统聚焦于激光晶体, 其中准直聚焦透镜焦距比值为 1:2, 入射泵浦光的光斑直径为 $800\ \mu\text{m}$, 泵浦光与振荡光的模式匹配良好。采用脉冲泵浦方式, 重复频率为 1 kHz, 泵浦脉冲宽度为 $200\ \mu\text{s}$, 占空比为 20%。谐振腔采用紧凑介稳腔设计, 模场体积大, 在激光晶体热透镜作用下过渡为稳定腔, 有利于获得基横模激光输出。后腔镜 M₁ 镀 808 nm 增透膜 ($T>95\%$) 和 1064 nm 高反膜 ($R>99.8\%$), 输出镜 M₂ 镀 1064 nm 增透膜 ($T=70\%$)。激光晶体 Nd:YAG 的掺杂浓度(原子数分数)为 1.0%, 尺寸为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 双面均镀有 1064 nm 增透膜 ($T>99.8\%$), 激光晶体侧面被铝箔包裹夹持安装在铜基座上, 制冷方式为水冷。偏振片选择 45° 薄膜偏振片, 与布儒斯特角偏振片相比, 45° 薄膜偏振片的调节更加简便。电光晶体选用 KD*P 普克尔盒, 采用加压式电光调 Q 获得脉冲激光。

增透膜 ($T>99.8\% @ 1064\text{ nm} \ \& \ 532\text{ nm}, T>99.5\% @ 355\text{ nm}$)。晶体在腔外放置满足图 3 所示的相位匹配条件。1064 nm 基频光经 I 类相位匹配 LBO 倍频后, 剩余的 1064 nm 基频光与 532 nm 倍频光具有互相垂直的偏振态, 恰好能满足 II 类相位匹配 LBO 和频的相位匹配条件。和频晶体 LBO 对产生的 532 nm 激光和剩余的 1064 nm 激光和频, 产生 355 nm 紫外激光。三波长激光经过三片 45° 分色镜分束输出, 分色镜 M₃ 镀 355 nm 高反膜 ($R>99.8\%$) 和 1064 nm、532 nm 增透膜 ($T>95\%$); 分色镜 M₄ 镀 532 nm 高反

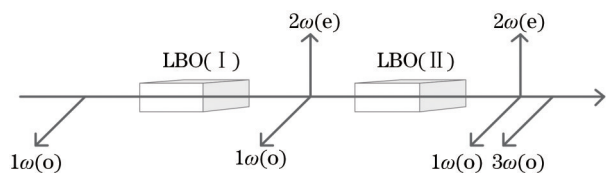


图 3 LBO 晶体中倍频 (I 类)、和频 (II 类) 光束的相位匹配情况

Fig. 3 Phase matching of frequency doubling (type I) and sum-frequency (type II) beams in LBO crystal

膜 ($R > 99.8\%$) 和 1064 nm 增透膜 ($T > 95\%$); 分色镜 M_5 镀 1064 nm 高反膜 ($R > 99.8\%$)。

4 实验结果与分析

进行高效倍频与和频转换以获得较大单脉冲能量三波长激光的基础是获得高动静比的 1064 nm 基频光输出。本实验通过采用脉冲泵浦方式提高转换效率, 设计紧凑介稳腔, 当泵浦功率为 24 W 时, 获得动静比为 69% 的 1064 nm 基频光输出。图 4 所示为 1064 nm 基频光的静态输出与动态输出对比曲线, 可以看到, 随着泵浦功率增大, 动静比逐渐减小, 分析原因为高泵浦功率下激光晶体热效应加剧, 导致增益饱和。

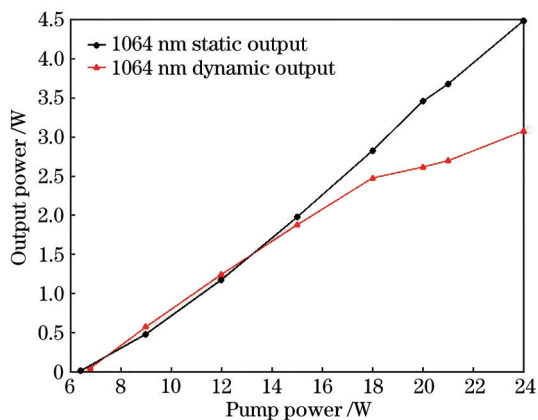


图 4 1064 nm 基频光的静态输出与动态输出对比

Fig. 4 Comparison of static output and dynamic output of 1064 nm basic-frequency light

在基频光谐振腔设计时, 综合考虑输出激光的光斑尺寸、发散角等参数, 使输出激光具有高功率密度, 且满足倍频晶体的允许角以获得良好相位匹配。无需增加聚焦系统, 即可获得高效倍频转换, 有效缩小激光器体积。在相同泵浦功率下, 通过改变倍频晶体 LBO 与谐振腔输出镜 M_2 的距离, 进而改变倍频晶体 LBO 处的 1064 nm 激光的注入峰值功率密度, 验证 1064 nm 峰值功率密度对

532 nm 单脉冲能量的影响。图 5 所示为 532 nm 单脉冲能量随 1064 nm 基频光注入峰值功率密度的变化曲线, 随着注入基频光峰值功率密度增大, 532 nm 输出单脉冲能量增加, 对应的倍频转换效率提高, 最高倍频转换效率可达到 64.4%。剩余的 1064 nm 基频光与 532 nm 倍频光和频产生 355 nm 波长激光。经过理论计算得知, 50% 倍频转换效率对应最高单脉冲能量 355 nm 激光输出。本节研究 532 nm 倍频转换效率对 355 nm 输出能量的影响, 确定最佳倍频转换效率, 以获得满足应用需求的三波长激光单脉冲能量。

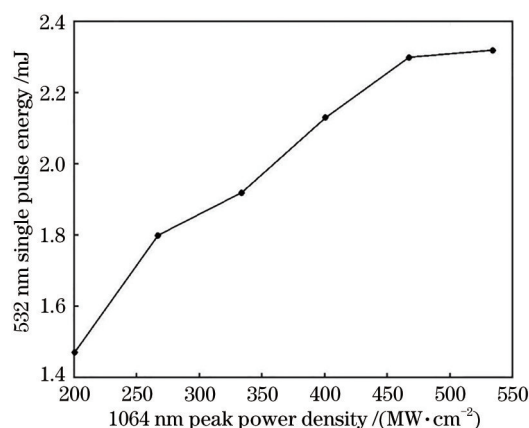


图 5 532 nm 单脉冲能量随注入 1064 nm 激光峰值功率密度的变化曲线

Fig. 5 532 nm single pulse energy changed with 1064 nm peak power density

通过微调倍频晶体 LBO 角度引入相位失配, 进而改变倍频转换效率, 观察不同倍频转换效率对应的 355 nm 单脉冲能量输出, 如图 6 所示。在倍频转换效率从 34% 增大至 51% 的过程中, 355 nm 单脉

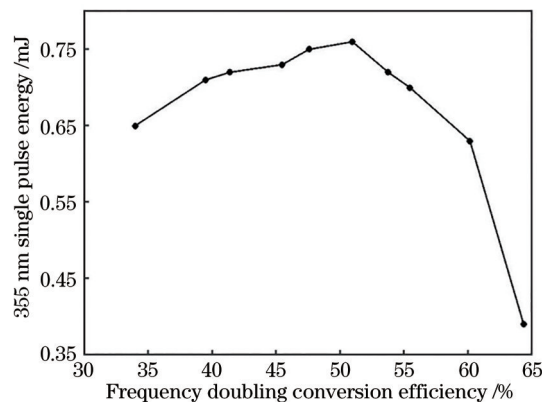


图 6 355 nm 单脉冲能量随倍频转换效率的变化曲线

Fig. 6 355 nm single pulse energy changed with frequency doubling conversion efficiency

冲能量逐渐增加;当倍频转换效率超过 51% 时,输出的 355 nm 单脉冲能量逐渐降低。在倍频转换效率为 51% 时获得的 355 nm 单脉冲能量最高,达到 0.76 mJ,与理论计算结果吻合。

将所设计的激光器作为大气激光雷达的探测光源,为使水平探测距离达 10 km,垂直探测距离达 20 km,分束后 1064 nm 和 532 nm 激光的单脉冲能量均需要超过 1 mJ,355 nm 激光的单脉冲能量超过 0.7 mJ。倍频转换效率为 51% 时可获得最高的 355 nm 单脉冲能量 0.76 mJ,但是对应的 1064 nm 和 532 nm 单脉冲能量分别为 1.30 mJ 和 0.91 mJ。适当提高倍频转换效率,可增大 532 nm 单脉冲能量输出,同时倍频转换效率提高,使得 355 nm 激光能量略微下降。图 7 所示为倍频转换效率为 53% 时,经分色镜分束后三波长激光输出单脉冲能量随泵浦功率的变化曲线。当泵浦功率为 24 W,重复频率为 1 kHz 时,获得的三波长激光单脉冲能量分别为 1.18 mJ@1064 nm、1.06 mJ@532 nm、0.73 mJ@355 nm。泵浦功率为 24 W 时,利用示波器测得的三波长激光脉冲宽度如图 8 所示,三波长激光脉冲宽度分别为 3.49 ns@1064 nm、3.42 ns@532 nm、

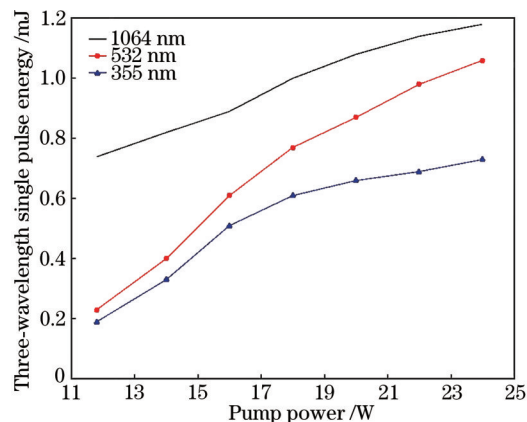


图 7 三波长激光单脉冲能量随泵浦功率的变化关系
Fig. 7 Relationship between single pulse energy of three-wavelength laser and pump power

3.02 ns@355 nm。泵浦功率为 24 W 时,测得的三波长激光远场光斑分布如图 9 所示,三波长激光的光场分布均匀。利用 Spiricon 光束质量分析仪测试三波长激光的光束质量,对应的光束质量因子分别为 $M_x^2=1.70$ 、 $M_y^2=1.75$ @1064 nm, $M_x^2=1.57$ 、 $M_y^2=1.41$ @532 nm, $M_x^2=1.51$ 、 $M_y^2=1.38$ @355 nm。图 10 给出了泵浦功率为 24 W 时,三波长激光在

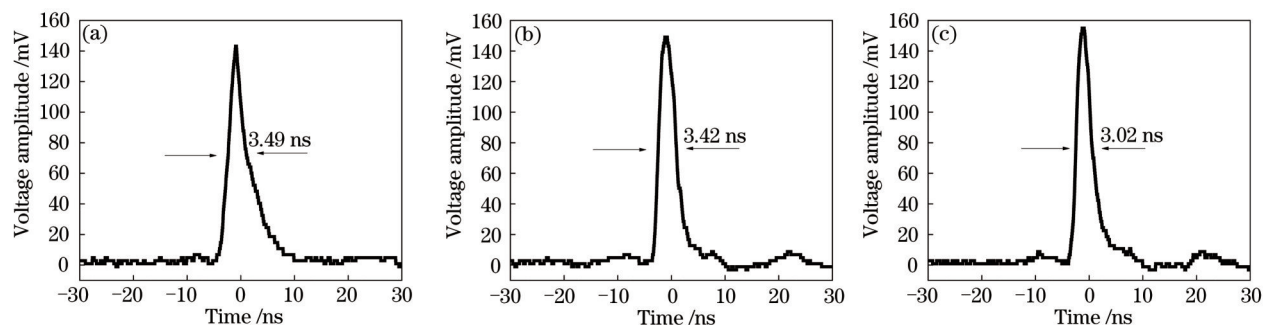


图 8 三波长激光脉冲波形图。(a) 1064 nm; (b) 532 nm; (c) 355 nm
Fig. 8 Laser pulse shape of three wavelengths. (a) 1064 nm; (b) 532 nm; (c) 355 nm

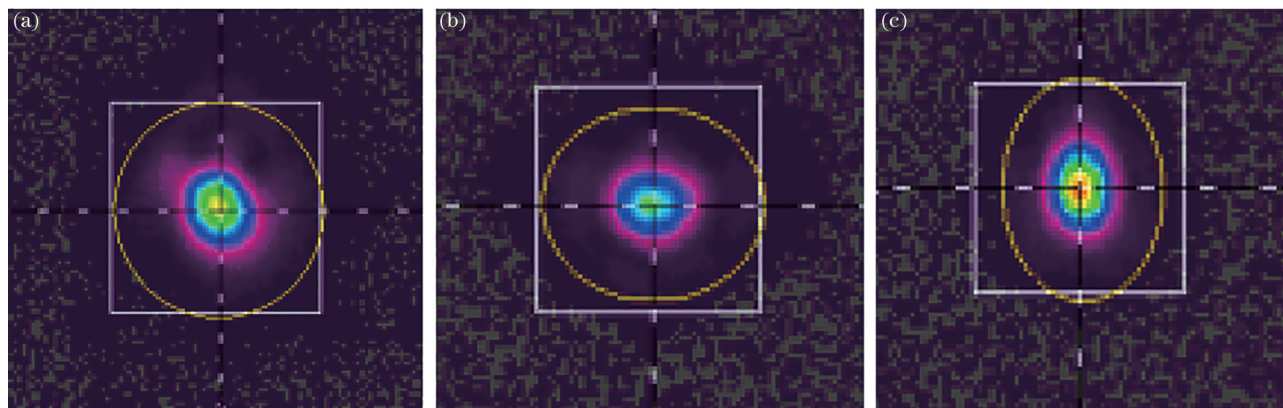


图 9 三波长激光远场光斑。(a) 1064 nm; (b) 532 nm; (c) 355 nm
Fig. 9 Laser far-field spots of three wavelengths. (a) 1064 nm; (b) 532 nm; (c) 355 nm

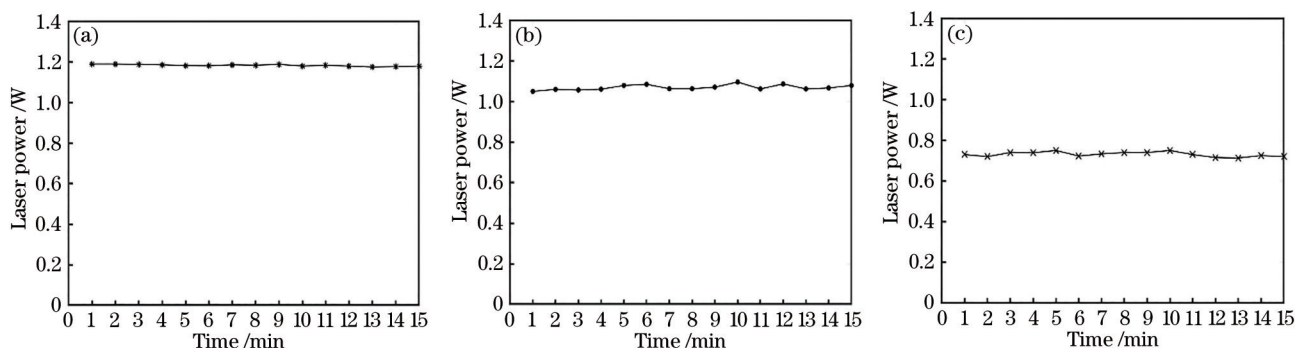


图 10 三波长激光功率稳定性曲线。(a) 1064 nm; (b) 532 nm; (c) 355 nm

Fig. 10 Laser power stability curves of three wavelengths. (a) 1064 nm; (b) 532 nm; (c) 355 nm

15 min 内的输出功率稳定性曲线, 1064 nm 激光的输出功率短期不稳定性为 0.39%, 532 nm 激光的输出功率短期不稳定性为 1.21%, 355 nm 激光的输出功率短期不稳定性为 1.62%。

5 结 论

采用 LD 端面脉冲泵浦 Nd:YAG 激光晶体, 设计紧凑介稳腔, 采用电光调 Q 方式, 获得高动静比的 1064 nm 基频光输出。同时考虑 1064 nm 基频光输出光斑尺寸、发散角等参数进行谐振腔设计, 无需增加聚焦系统即可获得高效倍频变换, 使激光器更加小型化。采用腔外非线性频率变换方式, 倍频晶体为 I 类相位匹配 LBO, 和频晶体为 II 类相位匹配 LBO。理论计算得到, 当倍频转换效率为 50% 时, 输出 355 nm 激光单脉冲能量最大, 进而探究倍频转换效率对 355 nm 激光输出能量的影响。为了满足大气探测激光雷达的应用需求, 最终在倍频转换效率为 53% 时获得重复频率为 1 kHz 的三波长激光分束输出, 对应的单脉冲能量分别为 1.18 mJ@1064 nm, 1.06 mJ@532 nm, 0.73 mJ@355 nm; 脉冲宽度分别为 3.49 ns@1064 nm, 3.42 ns@532 nm, 3.02 ns@355 nm; 光束质量因子分别为 $M_x^2=1.70$ 、 $M_y^2=1.75$ @1064 nm, $M_x^2=1.57$ 、 $M_y^2=1.41$ @532 nm, $M_x^2=1.51$ 、 $M_y^2=1.38$ @355 nm。

参 考 文 献

- [1] Mei L. Atmospheric scheinpflug lidar technique and its progress[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 090004.
梅亮. 沙氏大气激光雷达技术及其研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090004.
- [2] Zhang Z P, Zhang H F, Wu Z B, et al. kHz repetition satellite laser ranging system with high

precision and measuring results[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(15): 1177-1183.

张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果[J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1177-1183.

- [3] Wu D, Wang J H, Yan F Q. Estimation of air-sea gas transfer velocity using the CALIPSO lidar measurements [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0928001.
吴东, 王建华, 阎逢旗. 激光雷达数据应用于海气界面气体传输速率的估算[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0928001.
- [4] Hu J F, Yang F M, Zhang Z P, et al. Raman laser system for multi-wavelength satellite ranging[J]. Science in China (Series G), 2004, 34(6): 711-717.
扈荆夫, 杨福民, 张忠萍, 等. 多波长卫星测距的 Raman 激光系统[J]. 中国科学 G 辑: 物理学、力学、天文学, 2004, 34(6): 711-717.
- [5] Zhao H, Hua D X, Di H G, et al. Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0113001.
赵虎, 华灯鑫, 狄慧鸽, 等. 全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0113001.
- [6] Zhuang Q F, Wang Y M, Wang Z J, et al. Typical case of multi-wavelength aerosol lidar observation of persistent hazy weather in Beijing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240101.
庄全风, 王一萌, 王章军, 等. 多波长气溶胶激光雷达观测北京地区持续性雾霾的典型案例[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240101.
- [7] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0710003.
徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激

- 光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0710003.
- [8] Yang H, Xie C B, Fang Z Y, et al. Joint observations of vertical distribution of aerosols in Hefei area by spaceborne and ground-based lidars[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0110001.
杨昊, 谢晨波, 方志远, 等. 星-地激光雷达联合观测合肥地区的气溶胶垂直分布[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0110001.
- [9] Ji J H, Zhu X L, Dai S T, et al. Depolarization loss compensated resonator for electro-optic Q-switched solid-state laser[J]. Optics Communications, 2007, 270(2): 301-304.
- [10] Zhu X L, Ma X H, Li S G, et al. 1 kHz high average power single-frequency Nd:YAG laser[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92550A.
- [11] Ebadian H, Maleki A. Efficient thermal induced birefringence compensation in a QCW diode pumped Nd:YAG laser[J]. Optik, 2018, 165: 362-369.
- [12] Cui J F, Li F J, Wu X J, et al. High energy and high conversion efficiency 355 nm UV laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(12): 1730-1734.
崔建丰, 李福玖, 邬小娇, 等. 高能量高转换效率 355 nm 紫外激光器[J]. 发光学报, 2018, 39(12): 1730-1734.
- [13] Hicks A V, Wang C X, Wang G Y. Advances in high-power diode-pumped ultraviolet lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5332: 120-133.
- [14] Liu X M, Li D J, Shi P, et al. Highly efficient third-harmonic generation with electro-optically Q-switched diode-end-pumped Nd:YVO₄ slab laser[J]. Optics Communications, 2007, 272(1): 192-196.
- [15] Zhang X, Wang A K, Xue J H, et al. Numerical calculation of conversion efficiency in type I frequency-doubling on LBO crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 121602.
张鑫, 王爱坤, 薛建华, 等. LBO 晶体 I 类倍频相位匹配转换效率的数值计算[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 121602.