

2 kHz 毫焦耳级 532 nm 激光雷达紧凑型 激光光源的研制

蔡旭武¹ 袁自钧² 王 礼¹ 杨经纬¹ 程庭清^{1,3} 吴先友^{1,3} 江海河^{1,3}

¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

² 合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009

³ 中国科学院合肥物质科学研究院 医学物理与技术中心, 安徽 合肥 230031

摘要 绿光激光雷达是探测大气气溶胶的有效工具。作为光源的激光器对激光雷达有决定性的影响, 激光器性能的改善将显著提高激光雷达的探测能力。依据微脉冲激光雷达光源的要求, 研制了一台高光束质量、高重复频率、高脉冲能量的紧凑型激光二极管(LD)端面抽运声光调 Q 毫焦耳级 532 nm 绿光激光器。在 2 kHz 的重复频率下, 获得了脉冲能量为 0.9 mJ、脉宽为 22 ns 的绿光输出, 光束 M^2 因子小于 1.76、能量不稳定性为 $\pm 2\%$ 。该激光器有助于提高微脉冲激光雷达的探测距离、探测速度和探测精度。

关键词 激光器; 微脉冲激光雷达; 内腔倍频; 声光调 Q; 紧凑型

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0602005

Development of Compact 2 kHz mJ-Level 532 nm Laser as Laser Source of Lidar

Cai Xuwu¹ Yuan Zijun² Wang Li¹ Yang Jingwei¹ Cheng Tingqing^{1,3}
Wu Xianyou^{1,3} Jiang Haihe^{1,3}

¹ Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

² School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

³ Center of Medical Physics and Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The green lidar is an effective tool for detecting aerosols. The laser in the lidar is a critical factor to the performance of lidar, because the progress of the laser can markedly improve the performance of lidar. Based on light source's requirements of the micro pulse lidar, a compact high beam quality, high repetition rate and high pulse energy diode end-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser is developed, which can be used as the laser source in lidar. At the repetition rate of 2 kHz, the Q pulse with energy of 0.9 mJ and pulse width of 22 ns is generated. The beam factor M^2 is less than 1.76 and the energy instability is $\pm 2\%$. The laser is helpful to improve the detection distance, detection speed and detection precision of micro pulse lidar.

Key words lasers; micro pulse lidar; intracavity frequency doubling; acousto-optic Q-switch; compact

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3515; 140.3530; 140.3540

1 引 言

米散射激光雷达是研究大气气溶胶分布、运动

过程和云层结构的有效工具。传统的激光雷达^[1]由于采用闪光灯抽运以及水冷方式, 工作频率低至几

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2014-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(61275118)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(U1230131)

作者简介: 蔡旭武(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事 LD 抽运激光器方面的研究。E-mail: xw_tsai@163.com

导师简介: 江海河(1961—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事固体激光技术方面的研究。

E-mail: hjiang@aiofm.ac.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S040160747S)

十赫兹,单位时间内回波数少,所需积分时间长,不易实现快速探测;而且采用的水冷系统体积大、功耗大,移动和安装困难。这些不足造成了传统激光雷达的应用受到了一定的限制。为此,1993年 Spinhirne^[2]提出了微脉冲激光雷达技术。微脉冲激光雷达光源采用无需水冷的激光二极管(LD)抽运高重复频率激光器,频率高达2 kHz,与发射和接收光学系统紧密为一体,克服了传统激光雷达重复频率低、体积大和功耗大等缺点,且移动方便。然而,微脉冲激光雷达的脉冲能量仅有10 μJ左右,由于大气吸收衰减和散射损耗,导致一方面微小能量的激光穿透能力有限,无法实现高层目标物的探测;另一方面,探测回波信号能量微弱,使得接收系统不能采用光电倍增管(PMT)进行光子计数,而只能采用响应速度慢、信号采集时间长、探测面积小的雪崩光电二极管(APD),这对后续信息处理系统的性能要求更高,并导致探测速度慢和探测精度低^[3-4]。为了使微脉冲激光雷达能实现高层探测并提高其探测速度、探测精度,需要采用高重复频率、高能量的Q脉冲绿光激光器作为光源。

目前直腔型Q脉冲绿光激光器通常采用大功率的连续LD光源抽运,可以获得很高重复频率的Q脉冲激光,但激光的脉冲能量比较小。宋标等^[5]采用连续LD端面抽运电光调Q Nd:YVO₄腔内LBO倍频,在1 kHz的重复频率下获得了脉冲能量为28 μJ、脉宽约为20 ns的532 nm绿光输出。葛燕等^[6]利用连续LD端面抽运电光调Q Nd:YAG腔内KTP倍频研究时,在1 kHz的重复频率下获得了脉冲能量为218 μJ、脉宽约24 ns的532 nm绿光输出。冯立春等^[7]利用连续LD端面抽运电光调Q Nd:YVO₄腔内KTP倍频研究时,在1 kHz的重复频率下获得了脉冲能量为8 μJ、脉宽为33 ns,光斑直径为0.16 mm、发散角为3 mrad、光束质量M²因子为1.42的绿激光输出。陈虹竹等^[8]通过对连续LD抽运源脉冲调制,在Nd:YAG/LBO U形腔内进行倍频,获得了重复频率为1 kHz、脉冲能量为1.38 mJ、脉宽为8 ns、光束质量M²因子为1.3的绿光输出。由此可见,连续LD端面抽运直腔激光器结构简单且紧凑,但其输出激光脉冲能量小、光束质量差;而四镜的U形腔激光脉冲能量大、光束质量好,但结构复杂。

采用LD调制脉冲抽运技术和KTP腔内倍频,研制了一台可作为激光雷达光源的紧凑型声光调Q脉冲532 nm绿光Nd:YAG激光器,其重复频率高

达2 kHz,脉冲能量达到毫焦耳级,兼顾了高重复频率与高能量的特性,既拥有微脉冲激光雷达高的重复频率又具有传统激光雷达较高的脉冲能量,同时光束M²因子小于1.76、能量不稳定性为±2%,具有好的光束质量、稳定性和紧凑结构。该Q脉冲绿光激光器有助于提高微脉冲激光雷达的探测距离、探测速度和探测精度。

2 理论分析

受到抽运后的激光晶体在其内部存在热沉积,由此导致的热透镜效应将严重影响激光输出能量和光束质量^[9]。采用2 kHz调制LD脉冲抽运,并选用热导性良好的Nd:YAG作为工作物质,以便快速降低晶体的热量、有效地减小激光器热效应,获得大能量脉冲输出,满足系统产生光束质量好的高重复频率、高能量脉冲激光的要求。LD端面抽运激光器的热焦距与注入的平均抽运功率有以下关系^[10]

$$f_{th} = \frac{\pi K_c}{dn/dT} \frac{\omega_p^2}{\xi P_m [1 - \exp(-\alpha_p l)]}, \quad (1)$$

式中 α_p 为晶体吸收系数, ξ 为热负荷比, K_c 为导热系数, dn/dT 为热光系数, ω_p 为抽运光斑半径, l 为激光晶体长度, P_m 为注入的抽运功率。从(1)式可知,减少注入的抽运功率能有效降低激光热透镜效应,从而能够获得光束质量好的高重复频率、高能量的脉冲激光输出。

LD抽运激光器有连续抽运和脉冲抽运两种方式,由于缺乏高重复频率的脉冲LD抽运源,一般的LD抽运激光器中不得不采用连续抽运源。为了实现高重复频率的Q脉冲运转,对连续LD采用了脉冲调制抽运方法,选择适当的占空比,使每个脉冲抽运时间与Nd:YAG上能级寿命及Q开关的工作周期相匹配。假设脉冲调制的重复频率为 f ,脉冲宽度为 t_w ,则某LD电流下的脉冲抽运能量为 $E = P_c t_w$, P_c 为该电流下的连续抽运功率。脉冲峰值功率 P_p 、平均抽运功率 P_{av} 可以分别表示为

$$P_p = \frac{E}{t_w} = \frac{P_c t_w}{t_w} = P_c, \quad (2)$$

$$P_{av} = fE = fP_c t_w = R_d P_c, \quad (3)$$

式中 R_d 为调制脉冲的占空比。从(2)式和(3)式可知,对于脉冲调制的LD抽运源,其峰值功率由给定电流时的LD连续功率决定,注入的平均抽运功率由调制脉冲的占空比决定。当LD脉冲调制时,在相同的注入电流下,对于不同的占空比 R_d ,激光器的热透镜的可以改写为

$$f_{th} = \frac{\pi K_c}{dn/dT} \cdot \frac{\omega_p^2}{\xi R_d P_c [1 - \exp(-\alpha_p l)]}, \quad (4)$$

从(4)式可以看出,在相同注入电流下,热焦距与占空比成反比。当占空比 $R_d=1$ 时,则表示连续抽运的情况;当脉冲调制抽运时,占空比 $R_d < 1$,其热效应要小于连续抽运。反之在相同的平均抽运功率下,脉冲抽运具有比连续抽运更高的峰值功率,从而有利于获得高脉冲能量和窄脉冲的激光输出^[11]。因此采用脉冲调制抽运,既能大幅度地提高脉冲抽运能量和峰值功率,同时还能减少注入到晶体中的平均抽运功率,并通过选择合适的占空比以优化抽运效率,从而最大限度地减小激光器的热效应。

高的倍频转化效率,不仅可以获得高能量的绿光,提高系统效率,还可以减少抽运能量,是有效降低激光热效应的重要因素。倍频转换效率与基频光的功率密度和模式匹配等参数密切相关,激光器腔内功率密度较高,腔内是实现高效倍频转换的理想环境。为了获得高重复频率、高能量的绿光,实验中将倍频转化设计为直腔内倍频,通过采用端面脉冲抽运方式和调 Q 压缩脉冲宽度,获得较高的腔内基频光功率密度,提高倍频转换效率。腔内倍频的最大倍频光功率由下式决定^[12]

$$I_{SH,max} = g_0 I_{sat} (1 - \sqrt{\gamma})^2, \quad (5)$$

式中 I_{sat} 为基频光饱和功率, g_0 为基频光的小信号增益, l 为激光晶体长度, γ 为基频光在谐振腔内往返一次时的线性损耗与非饱和增益的比值。从(5)式可以看出,最大的倍频光功率随着谐振腔的损耗减小而增大,为了得到最大的倍频光功率需要降低谐振腔的损耗。为此,选择插入损耗小的声光 Q 开

关作为调 Q 方式。同时选择有效非线性系数大、热导率高、吸收系数小的 KTP 以获得高能量、高重复频率的倍频绿光输出^[13];KTP 倍频晶体还具有失配度小、走离角小、不潮解及化学机械性能稳定等特点,特别适合激光雷达便携与野外工作环境。

3 实验装置

为满足结构紧凑的要求,合理设计激光器直线型腔内布局,尽可能小的体积和高的抗振稳定性,以便满足能嵌入在激光雷达的光学望远镜内部和便携移动等实用要求。同时对激光晶体、倍频晶体、声光晶体等关键器件的温场采取合适控制,以实现光束质量好的高重复频率、高能量的 Q 脉冲绿光输出。实验装置示意图如图 1 所示,LD 中心波长为 808 nm,最大输出功率为 30 W。耦合光纤直径为 400 μm ,数值孔径 $d_{NA}=0.22$,透镜组耦合比为 1:1。Nd:YAG 晶体尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,掺杂原子数分数为 1%,两端面均镀 0.81 μm 、1.06 μm 增透膜,激光晶体侧面被铝箔包裹好,置于导热良好的紫铜热沉中。激光谐振腔采用平平腔结构,谐振腔总的几何腔长为 165 mm。后腔镜 M_1 镀有 0.81 μm 增透、1.06 μm 高反膜,谐波反射镜 M_2 镀有 0.53 μm 高反、1.06 μm 高透膜,腔镜 M_3 作为绿光输出镜,镀有 0.53 μm 高透、1.06 μm 高反膜。双面镀 0.53 μm 、1.06 μm 高透膜的倍频晶体 KTP 尺寸为 6 mm \times 6 mm \times 5 mm,采用 II 类相位匹配 ($\theta=90^\circ$, $\Phi=23.5^\circ$)。调 Q 开关为线偏振的风冷声光 Q 开关。激光器外观尺寸为 185 mm \times 70 mm \times 55 mm。

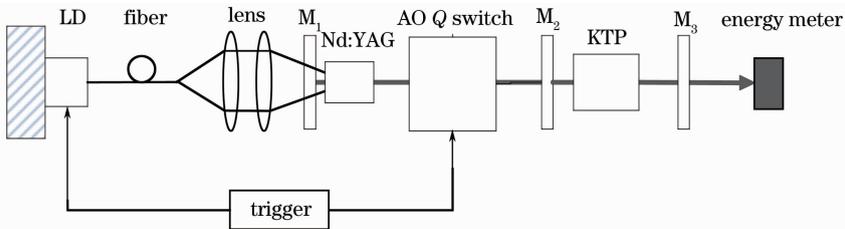


图 1 声光调 Q 绿光激光器示意图

Fig. 1 Setup of acousto-optically Q-switched green laser

4 实验结果与分析

激光器 LD 抽运脉冲宽度为 250 μs ,以匹配 Nd:YAG 的上能级寿命。通过增加 LD 电流以增加注入的抽运脉冲能量,在不同占空比 R_d 下,测量得到输出 532 nm 绿光能量与 LD 电流的关系如图 2 所示;不同占空比下输出激光脉宽与 LD 电流的关

系如图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出,在不同占空比下,532 nm 绿光激光输出脉冲能量随着抽运能量的增加而增加,其脉冲宽度随着 LD 电流增加而变窄,并且从图 2 和图 3 中可以看出绿光输出能量并未出现饱和现象,脉宽仍有变窄的趋势,但受限于实验所用

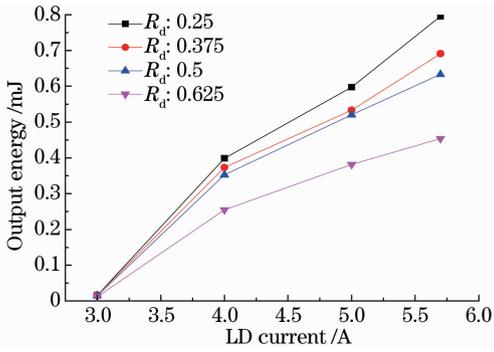


图 2 不同占空比下输出激光能量与 LD 电流的关系
Fig. 2 Energy versus LD current at different duty cycles

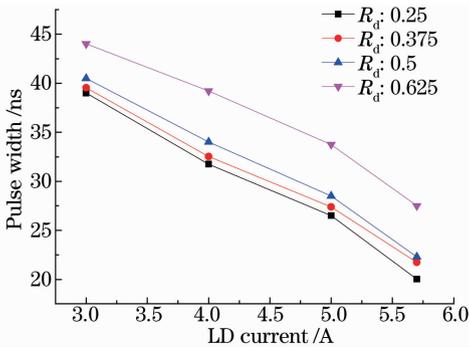


图 3 不同占空比下输出激光脉宽与 LD 电流的关系
Fig. 3 Pulse width versus LD current at different duty cycles

LD,无法继续增加其注入电流。随着占空比 R_d 的增大,激光器的热效应加剧,导致激光器的输出能量下降,且脉冲宽度变宽。在实验中,当占空比 $R_d = 0.25$ 时,输出 532 nm 激光脉冲能量最大、脉冲宽度最小。经过实验光路精细调整,在微脉冲激光雷达常用的 2 kHz 重复频率下获得最大的绿光输出脉冲能量为 0.9 mJ,脉冲宽度为 22 ns,脉冲最大峰值功率为 41 kW,倍频转化效率为 50%。在输出镜处的光斑直径约为 0.35 mm,光束发散角为 1.75 mrad。利用 Thorlabs 公司的 DET10A/M 型探头和 Tektronix 公司的 DPO4104B-L 型示波器观

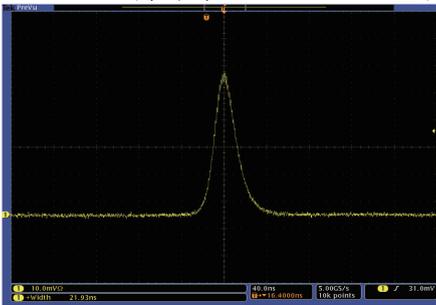


图 4 2 kHz 声光调 Q 脉冲波形图
Fig. 4 Acousto-optically Q-switched pulse waveform at 2 kHz repetition rate

测到最大能量的绿光 Q 脉冲波形图如图 4 所示。用 BGS6314 型激光光束分析仪测得其远场光斑横截面强度分布如图 5 所示。从图 5 可以看出,绿光光斑在横截面 x 、 y 方向呈现出较好的准 TEM₀₀ 模高斯分布。在输出绿光光路上加一透镜后,测量得到光束 M^2 因子分别为 $M_x^2 = 1.76$ 和 $M_y^2 = 1.75$,光斑尺寸与位置的关系及拟合的光束传播方程如图 6 所示。

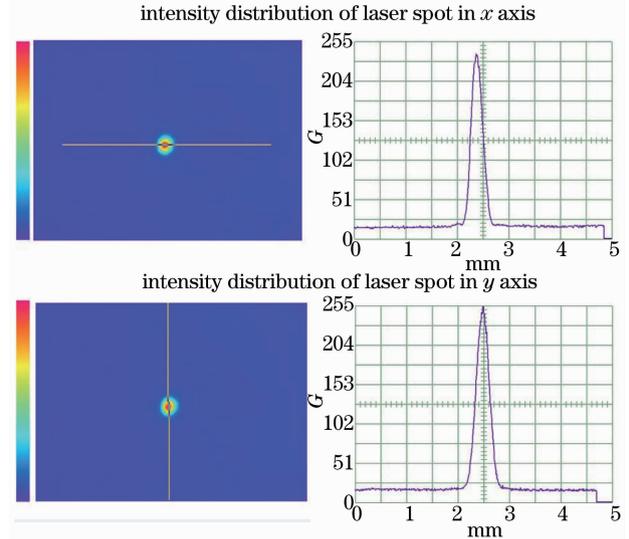


图 5 远场光斑横截面 x 、 y 方向强度分布
Fig. 5 Intensity distribution of laser spot in far-field

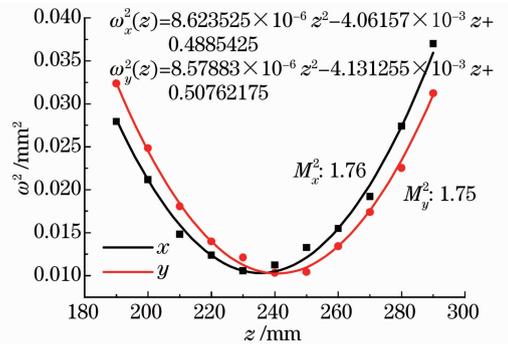


图 6 光斑尺寸与位置关系及光束传播拟合方程
Fig. 6 Beam dimension versus location and beam quality measured by fitting propagation equation

5 结 论

研制了一台紧凑型高光束质量、高重复频率、高脉冲能量的声光调 Q 532 nm 绿光激光器。该激光器采用直线型的平平腔,KTP 腔内倍频,在 2 kHz 的重复频率下,获得了 0.9 mJ、22 ns、光束 M^2 因子小于 1.76 的 Q 脉冲绿光激光,光束发散角为 1.75 mrad,能量不稳定性为 $\pm 2\%$ 。相应的峰值功率达到 41 kW,倍频转化效率为 50%。以该 Q 脉冲

绿光激光器作为光源的新型激光雷达将同时具有微脉冲雷达的高重复频率和传统激光雷达的高能量的优点, 不仅整体结构紧凑、移动方便, 并且能采用响应速度快的 PMT 进行光子计数, 有助于提高微脉冲雷达抗背景辐射噪声干扰的能力、探测距离、探测速度和探测精度。该激光器具有的高重复频率和高脉冲能量及好的光束质量, 为激光雷达提供了一个很好的激光光源。

参 考 文 献

- 1 G Fiocco, L Smullin. Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60~140 km) by optical radar[J]. Nature, 1963, 199(4900): 1275-1276.
- 2 J D Spinhirne. Micro pulse lidar[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1993, 31(1): 48-55.
- 3 Xu Chidong, Ji Yufeng. Research and application of MPL-A1/T micro pulse lidar[J]. Journal of Atmospheric and environmental Optics, 2008, 3(5): 337-343.
徐赤东, 纪玉峰. MPL-A1/T 型微脉冲激光雷达的研制与应用[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(5): 337-343.
- 4 Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong, *et al.*. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0514001.
陈涛, 赵玉洁, 刘东, 等. 微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0514001.
- 5 Song Biao, Wu Lusheng. LD end-pumped actively electro-optic Q-switching green lasers with pulse repetition rate up to 5 kHz[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(2): 102-103.
宋标, 吴路生. 5 kHz 电光调 Q LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 绿光激

- 光器[J]. 激光与红外, 2006, 36(2): 102-103.
- 6 Ge Yan. Study on the LD Pumped CW and Pulse Green Lasers [D]. Xi'an: Northwest University, 2008. 44-47.
葛燕. LD 泵浦连续及脉冲绿光激光器研究[D]. 西安: 西北大学, 2008. 44-47.
- 7 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang, *et al.*. LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(4): 461-465.
冯立春, 霍玉晶, 何淑芳, 等. 激光二极管抽运声光调 Q 高重复频率 532 nm 激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 461-465.
- 8 Chen Hongzhu, Jia Guanghui, Dong Lei, *et al.*. LD end pumped Nd:YAG/LBO laser with high frequency short pulse width[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(1): 35-37.
陈虹竹, 贾光辉, 董磊, 等. 高重复窄脉冲 LD 端面泵浦 Nd:YAG/LBO 绿光激光器[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 35-37.
- 9 W Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 363-366.
W Koechner. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 363-366.
- 10 M E Innocenzi, H T Yura, C L Fincher, *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers[J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(19): 1831-1833.
- 11 Lan Xinju. Laser Technology[M]. Beijing: Science Press, 2009. 81-85.
蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 81-85.
- 12 W P Risk, T R Gosnell, A V Nurmikko. Compact Blue-Green Lasers[M]. Cambridge University Press, 2003. 224-228.
- 13 Y S Liu, D Dentz, R Belt. High-average-power intracavity second-harmonic generation using KTiOPO₄ in an acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser oscillator at 5 kHz[J]. Optics Letters, 1984, 9(3): 76-78.

栏目编辑: 宋梅梅