

适于空间应用的高重复频率窄脉冲电光调 Q 激光器

刘 琪^{1,2}, 孟俊清¹, 祖继锋¹, 蒋 静¹, 陈思露^{1,2}, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 给出了一种适用于空间应用的全固态高重复频率窄脉冲激光器。激光器采用超稳双 porro 棱镜直线谐振腔, 以 LD 侧面抽运 Nd:YAG 板条, 磷酸氧钛铷(RTP)晶体作为电光调 Q 开关, 并利用偏振耦合输出激光。实现了激光脉冲重复频率为 1 kHz、平均功率为 1.15 W、脉冲宽度为 1.3 ns、光束质量因子 M^2 为 $M_x^2=1.20$ 和 $M_y^2=1.23$ 、波长为 1064 nm 的脉冲激光输出。激光器结构紧凑, 性能良好, 可作为未来新型空间探测激光雷达系统的光源。

关键词 激光器; 固体激光器; 激光光学; 电光调 Q; Nd:YAG; 高重复频率; 窄脉冲

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0601005

High Repetition Frequency Narrow Pulse Electro-Optically Q-Switched Laser for Space Applications

Liu Qi^{1,2}, Meng Junqing¹, Zu Jifeng¹, Jiang Jing¹, Chen Silu^{1,2}, Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A all solid-state laser with high repetition frequency and narrow pulse width for space applications is shown. The laser adopts ultra-stable double porro prism cavity, using laser diode side pumping, the rubidium titanyl phosphate (RTP) crystal as electro-optically Q-switched switch, and polarization-coupled outputting. The system achieves 1 kHz laser pulse repetition frequency, 1.15 W average power, 1.3 ns pulse width, the beam quality factor M^2 of two directions of $M_x^2=1.20$, $M_y^2=1.23$, the output wavelength of 1064 nm. The laser has a compact structure and good performance, which can be used as the light source for the new space detection lidar in the future.

Key words lasers; solid-state laser; laser optics; electro-optically Q-switched; Nd:YAG; high repetition frequency; narrow pulse

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3540; 140.3580

1 引 言

激光雷达作为一种新型主动遥感探测工具, 与传统微波、毫米波雷达相比, 具有精度高、分辨率高等优点, 越来越多地运用于空间对地观测以及深空探测等相关领域。已有的空间对地探测激光雷达多采用低重复频率、高峰值功率的激光器, 存在着测量点稀疏、地表分辨率低等问题。为此, 近年来单光子探测技术开始用于空间对地观测。与原有的方法相比, 单光子探测技术降低了对空间激光器单脉冲能量的要求, 但同时也对空间激光器提出了新的要求: 1) 更高的脉冲重复频率, 一般要达到千赫兹量级以上; 2) 更窄的激光脉冲; 更好的光束质量及稳定性; 3) 更小的体积及更轻的重量; 4) 更高的电光转化效率等。

收稿日期: 2017-02-06; 收到修改稿日期: 2017-02-28

作者简介: 刘 琪(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: hitliuqi@163.com

导师简介: 孟俊清(1975—), 研究员, 硕士生导师, 主要从事固体激光技术方面的研究

E-mail: jqmeng@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

例如美国第二代地球冰盖观测卫星 ICESat-2,早期的技术方案原本只是在前一代 ICESat 所用激光器技术方案的基础上进行了少量更改,提高了可靠性(指标为单脉冲能量 50 mJ、脉宽 6 ns、重复频率 50 Hz),而在 2009 年后美国宇航局(NASA)提出了新的高重复频率、低脉冲能量的技术方案(单脉冲能量为 2 mJ、脉宽为 1 ns、重复频率为 10 kHz、多波束同时探测)。此外,NASA 正在进行的激光雷达地表地形测绘(LIST)计划中,也采用了高重复频率、窄脉冲的激光器(单脉冲能量为 100 μJ、脉宽为 1 ns、重复频率为 10 kHz)^[1-3]。

我国已发射或在研的星载激光雷达,主要是嫦娥系列激光高度计等,采用的是硅雪崩光电二极管线性探测模式,搭载的激光器也主要为高峰值功率、低重复频率的固体激光器^[4]。近年来,为了应对未来的远程高精度深空探测的需求,我国也开展了空间单光子探测激光雷达的相关研究^[5-8]。为满足此类激光雷达的需求,研制高重复频率、窄脉冲宽度、高光束质量与稳定性的激光光源具有重要的实际意义。本文针对单光子探测模式空间激光雷达,给出了一种结构紧凑、稳定性好、高光束质量输出的高重复频率窄脉宽全固态电光调 Q 激光器,可用于下一代空间对地探测或者深空探测激光雷达。

2 激光器系统

2.1 激光器光学结构

本文给出了一种适于空间应用的高重复频率窄脉冲固体激光器,光学结构如图 1 所示,激光增益介质选用掺杂浓度为 1% 的 Nd:YAG 板条晶体,长度为 10 mm,宽度为 5 mm,厚度为 1.2 mm,两个端面分别切割成布儒斯特角,使其具有选偏特性,其中单侧面用以抽运,对面焊接热沉冷却。采用波长为 808 nm 的准连续半导体激光二极管(LD)侧面抽运板条晶体,抽运光频率为 1 kHz,抽运脉冲宽度为 150 μs。

采用正交双 porro 棱镜作为谐振腔,谐振腔长度约为 100 mm。由于 porro 棱镜具有使入射光原路返回的特点,因此采用正交放置的双 porro 棱镜的谐振腔,具有良好的抗失谐特性。此外,由于 P 方向的偏振光在 porro 棱镜内发生了两次全内反射,故棱镜棱线摆放角度的不同会引起不同的相位延迟,以 45° 和 135° 时延迟最大,故需加入波片对 porro 棱镜进行退偏补偿^[9]。本文选用两个半波片(HWP)来分别进行双 porro 棱镜的退偏补偿。

为获得纳秒级脉宽的高重复频率激光输出,采用 RTP 晶体作为电光调 Q 开关,采用升压调 Q 方式,谐振腔内插入 1/4 波片(QWP)和偏振分光棱镜(PBS),以实现调 Q 与偏振耦合输出,即在未对调 Q 晶体加电压时,增益介质产生的光透过 PBS,经 1/4 波片、调 Q 晶体和 HWP,被 porro1 棱镜反射后再次返回 PBS,相位的延迟使偏振方向与初始的方向垂直,由 PBS 全部反射出腔外,未形成激光振荡;在对调 Q 晶体加适当高电压时,光经 1/4 波片、调 Q 晶体和半波片,被 porro1 棱镜反射后再次返回 PBS 时,为部分反射和部分透射。PBS 对激光的反射率与加载在调 Q 晶体上的电压有关,为降低腔内光子流密度,保证可靠工作,采用高耦合输出率。调整电压使约 20% 的光透过 PBS 在腔内形成振荡,80% 的光经 PBS 反射出腔外形成激光输出。

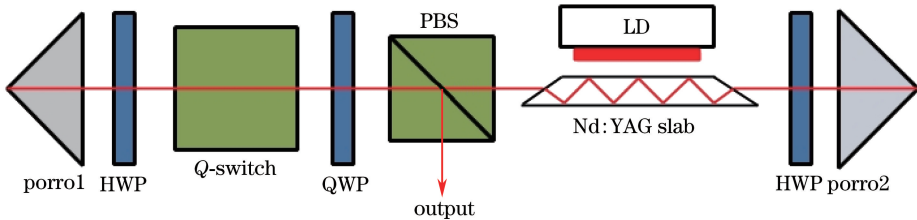


图 1 激光器结构图

Fig. 1 Experimental setup of laser

2.2 激光输出有关参数的理论估算

根据激光谐振腔理论,调 Q 激光速率方程为^[10-13]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \varphi \left(c\sigma n \frac{l}{L} - \frac{\epsilon}{t_R} \right), \tag{1}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n \varphi \sigma c, \tag{2}$$

式中 c 为光速, l 为激活介质长度, L 为谐振腔长度, $t_R = 2L/c$ 表示光子数寿命, φ 为光子数密度, n 为粒子反转数密度, σ 为受激发射截面, γ 为反转因子, $\epsilon = -\ln R + \delta + \zeta(t)$, $-\ln R$ 、 δ 、 $\zeta(t)$ 分别为耦合损耗、耗散损耗、Q 开关腔损耗。

假设在低 Q 值转变到高 Q 值时, 激光器初始的反转粒子数为 n_i , 阈值反转粒子数为 n_t , 最终的反转粒子数为 n_f , 抽运脉冲宽度为 t_p , 基级粒子数为 n_0 , 抽运速率为 W_p , 荧光寿命为 τ_f , 反射率为 R , 文中 R 取耦合输出等效反射率, 光子能量为 $h\nu$ 。 n_i 和 n_f 的关系为

$$n_i - n_f = n_t \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right), \quad (3)$$

$$n_t = \frac{1}{2\sigma l} \left(\ln \frac{1}{R} + \delta \right), \quad (4)$$

$$n_i = n_0 W_p \tau_f [1 - \exp(-t_p/\tau_f)]. \quad (5)$$

而单位时间与体积内基能级转移到上能级的原子数为

$$W_p n_0 = \eta_Q \eta_S P_{ab} / h\nu V, \quad (6)$$

式中量子效率 η_Q 表示激光发射光子数与抽运光子数之比; 斯托克斯效率 η_S 表示发射光子能量与抽运光子能量之比; 光束交叠效率 η_B 表示吸收抽运光功率或增益分布同谐振腔模之间的空间交叠程度。介质吸收峰值功率为

$$P_{ab} = \eta_T \eta_c \eta_a P_{in}, \quad (7)$$

式中 V 为抽运带体积, P_{in} 为输入单脉冲抽运光的峰值功率, 抽运光耦合效率 η_c 由抽运耦合光学系统决定; 抽运光吸收效率 η_a 表示介质吸收抽运光功率与射入激光介质抽运光功率之比; 抽运光传输效率为 η_T , $\eta_T = 1 - r$, r 表示增益介质表面对入射抽运光的反射引起的损耗。所以,

$$n_i = P_{in} \eta_T \tau_f [1 - \exp(-t_p/\tau_f)] / h\nu V, \quad (8)$$

式中

$$\eta = \eta_c \eta_T \eta_a \eta_Q \eta_S \eta_B. \quad (9)$$

求得以上各项参数, 由此得出脉宽为

$$\Delta t_p = \tau_c \frac{n_i - n_t}{n_i - n_t [1 + \ln(n_i/n_t)]}, \quad (10)$$

调 Q 激光器的输出能量为

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln \frac{n_i}{n_f}, \quad (11)$$

式中 A 为有效光束面积。

将表 1 中的各项参数代入(10)、(11)式得到, 脉宽 $\Delta t_p = 0.90$ ns, 激光脉冲能量为 $E = 1.05$ mJ, 由此预计系统可以实现脉宽为 1 ns、重复频率为 1 kHz、功率为 1 W 量级的激光输出。

表 1 各项参数值

Table 1 Parameter values

Parameter	Value	Parameter	Value
l	10 mm	A	$7.85 \times 10^{-7} \text{ m}^2$
L	130 mm	σ	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
$h\nu$	$1.86 \times 10^{-19} \text{ J}$	γ	1
R	0.22	δ	0.01
P_{in}	100 W	τ_f	230 μs
t_p	150 μs	V	12 mm^3
η_c	1	η_T	0.96
η_a	0.81	η_Q	0.95
η_S	0.76	η_B	0.85

3 实验结果

按上述说明搭建激光器系统。调整波片与调 Q 电压,以达到设计的耦合输出率。电光开关驱动器重复频率设置为 1 kHz,与抽运脉冲时间延迟设置为 175 μs 。

测试得到激光的输出平均功率随板条晶体吸收的平均功率变化的曲线如图 2 所示。当晶体吸收抽运平均功率达到 9.6 W 时,对应的调 Q 激光输出平均功率为 1.15 W,此时,激光器的光-光转换效率为 12.0%。

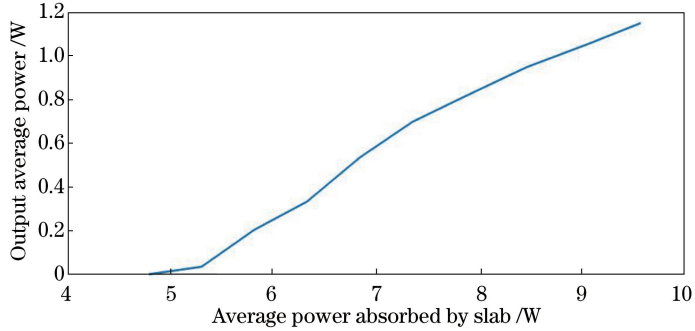


图 2 激光器输出平均功率与板条晶体吸收平均功率的关系

Fig. 2 Output average power versus average power absorbed by slab

使用 20 G/s 采样率的示波器与高速光电探测器测量激光脉冲的宽度,如图 3 所示,半波宽度约为 1.3 ns,因腔内未加选模器件,多纵模的拍频导致出现尖峰。采用激光光束分析仪对输出光斑进行测量,激光器输出的近场光斑如图 4 所示,光斑直径约为 0.89 mm,得到两个方向的光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.20$, $M_y^2 = 1.23$ 。测得激光器连续工作 8 h,以均方根(RMS)表征激光输出功率的稳定度为 0.5%。

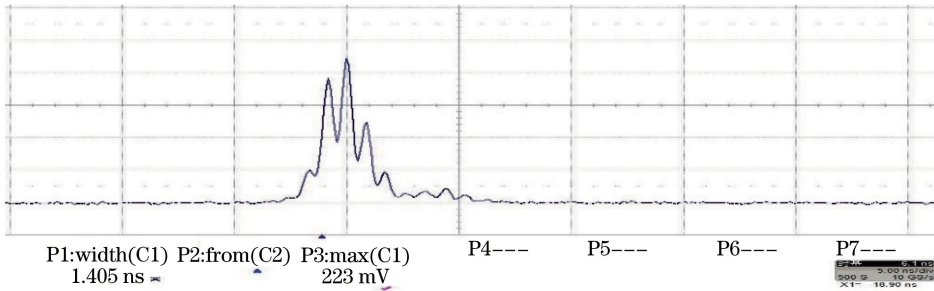


图 3 激光器脉冲波形

Fig. 3 Pulse profile of laser

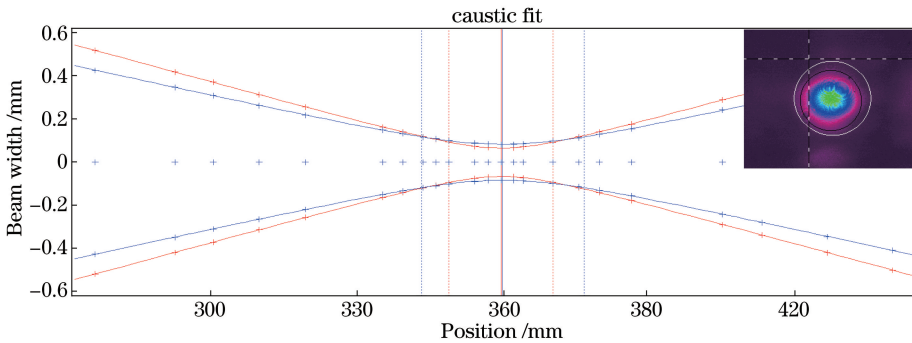


图 4 输出光束质量和激光器近场光斑

Fig. 4 Output beam quality and near-field beam profile of laser

为验证双 porro 棱镜的稳定性,分别测量了 porro 棱镜在垂直于棱镜直角棱线的方向(记为 y 方向)和平行于棱镜直角棱线的方向(x 方向)发生倾斜时对激光输出能量的影响,即定量控制 porro 棱镜的倾斜角度,同时检测输出激光的能量,分别对正交两棱镜失谐情况进行测量。

实验结果如图 5 所示,横坐标为 porro 棱镜的倾斜角度,纵坐标表示 porro 棱镜发生倾斜时与未倾斜时

输出能量之比。由图 5 可知,两个棱镜均在 porro 棱镜绕棱线方向发生失调时,可以较好地保持激光的能量输出稳定,在倾斜角度为 $0\sim 15$ mrad 时,激光器能量输出基本保持在未倾斜时的 80% 之内。而在沿棱线方向失调则较为敏感,在 2 mrad 的倾斜角下,能量已降至很低。故采取双 porro 棱镜作为谐振腔,两个棱镜的棱线正交摆放,用以保证 x 、 y 两个方向的稳定性。

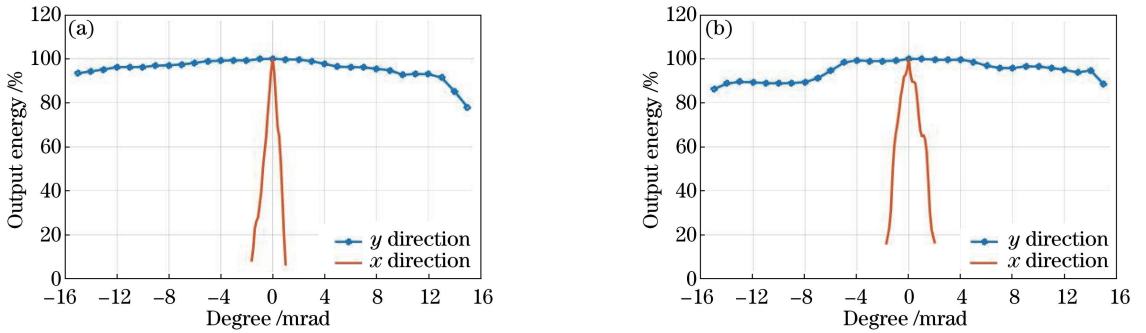


图 5 porro 棱镜 x 和 y 方向失调时对谐振腔输出能量的影响。(a) 135° ;(b) 45°

Fig. 5 Porro prism mismatch effects on output energy in x and y direction. (a) 135° ; (b) 45°

5 结 论

搭建了一种高重复频率窄脉冲的电光调 Q 固体激光器。采用适于空间应用的电光调 Q 驱动器,在激光二极管侧面抽运下,得到了平均功率为 1.15 W、脉冲频率为 1 kHz、脉冲宽度为 1.3 ns 的激光输出。光束质量良好,光束质量因子为 $M_x^2=1.20$, $M_y^2=1.23$ 。针对空间应用的需求,该激光器采用了正交双 porro 棱镜谐振腔结构,经实验验证,稳定性良好,并优化了腔内结构,系统结构更加紧凑,使其可作为下一代单光子探测空间激光雷达的光源。

参 考 文 献

- [1] Yu A W, Li S X, Shaw G B, *et al.* Overview of space qualified solid-state lasers development at NASA goddard space flight center[C]. SPIE, 2009, 7193: 719305.
- [2] Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Progress and current state of space-borne laser altimetry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020006.
于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020006.
- [3] Brunt K M, Neumann T A, Amundson J M, *et al.* MABEL photon-counting laser altimetry data in Alaska for ICESat-2 simulations and development [J]. The Cryosphere, 2016, 10(4): 1707-1719.
- [4] Yang H, Meng J, Ma X, *et al.* Compact and high-energy diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG slab laser system for space application [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(12): 121406.
- [5] Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, *et al.* Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0514001.
姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514001.
- [6] Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, *et al.* Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0208001.
杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术 [J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0208001.
- [7] Zhang Y, He Y, Yang F, *et al.* Three-dimensional imaging lidar system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(11): 111101.
- [8] Luo Yuan, He Yan, Geng Liming, *et al.* Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0514001.
罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0514001.
- [9] Yang H, Meng J, Chen W. Characteristic analysis of a polarization output coupling porro prism resonator [C]. SPIE, 2015, 9255: 92553O.

- [10] Degnan J J. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(2): 214-220.
- [11] Wagner W G, Lengyel B A. Evolution of the giant pulse in a laser[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(7): 2040-2046.
- [12] Zhang X, Zhao S, Wang Q, *et al.* Modeling of diode-pumped actively Q-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(12): 1912-1918.
- [13] Koechner. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 133-138.
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 133-138.