

室温 6.11 mJ 脉冲 LD 单端抽运 Tm:YAG 调 Q 激光器

金光勇, 宋雪迪, 吴春婷, 陈薪羽, 于 凯

(长春理工大学 理学院 吉林省固体激光重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 由于 $2\mu\text{m}$ 波段激光处于大气的窗口上, 并且对人眼安全, 因而在测风领域具有潜在的应用价值。该波段的激光器可以作为相干多普勒测风雷达和差分吸收雷达的光源。为了进行相干多普勒测风雷达光源的研究, 报道了一种脉冲激光二极管(LD)单端抽运 Tm:YAG 调 Q 激光器。在实验中, 采用 L 型平凹腔结构, 利用声光 Q 开关实现大能量的激光输出。该激光器输出的激光中心波长为 2014.9nm , 在重复频率为 100Hz 情况下, 调 Q 后获得最大单脉冲能量为 6.11mJ , 激光脉冲宽度为 324.7ns , 斜率效率为 13.56% 的激光输出。输出的脉冲激光的光束质量 M^2 在 x 方向上为 1.31 , y 方向上为 1.35 。

关键词: $2\mu\text{m}$; Tm:YAG 激光器; 脉冲抽运; 调 Q

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3252-05

6.11 mJ Q-switched Tm: YAG laser end pumped by pulse laser diode at room temperature

Jin Guangyong, Song Xuedi, Wu Chunting, Chen Xinyu, Yu Kai

(Jilin Key Laboratory of Solid-state Laser Technology, College of Sciences, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The $2\mu\text{m}$ laser is in the atmosphere window and the eye-safety wavelength regions. Therefore, it is expected to have potential application in wide range of fields. The lasers can be a light source of Coherent Doppler Wind Lidars and Differential Absorption Lidars. In order to develop a laser light source of Coherent Doppler Wind Lidars, a pulse LD end pumped Q-switched Tm:YAG laser was developed by using a plano-concave cavity with a acousto-optical (AO) Q-switch. The center wavelength of the output laser was measured to be 2014.9nm . In the repetition frequency of 100Hz , a maximum single energy of 6.11mJ after Q-switching operation and the narrowest pulse width of 324.7ns were achieved at room temperature, whose slop efficiency was 13.56% . The M_x^2 was 1.31 and the M_y^2 was 1.35 .

Key words: $2\mu\text{m}$; Tm:YAG laser; pulse pumped; Q-switch

收稿日期: 2014-02-05; 修订日期: 2014-03-07

基金项目: 长春市科技局长科技合(2013143)

作者简介: 金光勇(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态激光器方面的研究。Email: jgycom@163.com

0 引言

2 μm 人眼安全激光器在医疗、测风雷达等领域应用广泛,已经成为固体激光器的研究重点之一^[1-4]。目前,对于连续 Tm:YAG 激光器的报道较多。然而,对应用更广泛的调 Q Tm:YAG 激光器的研究还很少^[5-10]。其中,中心波长在 2 μm 附近的调 Q Tm:YAG 激光器就是很好的一种测风雷达光源。作为相干多普勒测风雷达光源,要求具有宽脉冲宽度和大的单脉冲能量。这是由于短的脉冲宽度会使得探测器来不及响应,无法探测到完整的信号。在单脉冲能量方面,根据现有报道,单脉冲能量仍然较低。在大多数报道中,通常采用连续(CW)激光二极管(LD)作为 Tm:YAG 调 Q 激光器的抽运源,但该抽运方式会产生大量的热。而采用脉冲激光二极管作为抽运源,可以减少热聚积,并提高激光器的热稳定性,从而获得更大的单脉冲能量输出。如何提高单脉冲能量是实验的研究重点。

1991 年,Paul J. M. Suni 等人报道了一种调 Q Tm:YAG 激光器。在重频 100 Hz 情况下,获得单脉冲能量 1 mJ 的激光输出^[11]。1999 年,Cheng Li 等对 2 μm Tm:YAG 激光器进行了研究。激光在连续输出情况下的最大输出功率为 760 mW,调 Q 运转后,在重频 100 Hz 情况下获得最大当脉冲能量 1.8 mJ 的激光输出^[12]。2002 年,Sharone Goldring 等研究了 RTP 电光调 Q 2 μm Tm:YAG 激光器,在重频 20 Hz 时,最大单脉冲能量为 2.4 mJ,脉冲宽度为 57 ns^[13]。2012 年 Chunting Wu 报道了对于声光调 Q Tm:YAG 激光器的脉冲宽度的研究,获得了重频 100 Hz 最大单脉冲能量 1.8 mJ 的激光输出^[7]。

文中采用中心波长为 785 nm 的脉冲 LD 作为抽运源。激光输出的中心波长为 2 014.9 nm。在重频 100 Hz 情况下,获得最大单脉冲能量 6.11 mJ,脉冲宽度 324.7 ns 的激光输出。实验中,对输出镜透过率进行了优化,通过理论计算模拟,确定了最佳输出镜透过率的范围,在实验中采用输出镜透过率为 4%,而 Chunting Wu 的报道中采用的输出镜透过率为 3.5%,从输出的单脉冲能量上看,该优化使得激光输出能量获得较大的提高。从中可知,微小的输出镜透过率的变化会对输出的单脉冲能量产生很大的影

响。实验中采用脉冲 LD 抽运方式,通过声光调 Q,在 100 Hz 情况下所获得的 6.11 mJ Tm:YAG 调 Q 激光输出,已经是目前所报道的 100 Hz 重频下最大的单脉冲能量。

1 实验装置

脉冲 LD 单端抽运 Tm:YAG 激光器的实验结构如图 1 所示。激光二极管的激光通过光纤耦合输出,最大输出功率为 60 W,中心发射波长为 785 nm。光纤芯径为 400 μm ,数值孔径为 0.16。Tm:YAG 为单端键合晶体,晶体端面直径为 3 mm,总长度为 11 mm,其中未掺杂的部分的长度为 3 mm,Tm 的掺杂浓度为 3.5 at.%。晶体两端镀有对 785 nm 和 2 013 nm 高透膜($R<0.5\%$),晶体铝箔包裹,用紫铜热沉封装并通过水冷进行散热。抽运光通过两个平凸透镜耦合到晶体内,透镜的焦距分别为 35 mm 和 75 mm。谐振腔腔长为 200 mm,呈 L 型。 M_1 为平面镜,镀有对 785 nm 高透 ($R<0.5\%$) 2 013 nm 高反膜 ($R>99.5\%$)。 M_2 为 45° 全反镜,镀有与 M_1 相同的膜系。 M_3 为平凹输出镜,曲率半径为 200 mm,对于低增益的 Tm:YAG 激光工作物质而言,在设计谐振腔的时候要尤其注意避免无用损耗的引入,选取最佳的输出镜透过率,以降低激光器的阈值,提高激光器的输出单脉冲能量,经过理论模拟分析,确定了最佳输出镜透过率范围之后,在实验中,通过对比文献报道,缩小最佳透过率范围,最后通过对比不同输出镜透过率情况下输出能量,确定了实验中采用的输出镜对 2 013 nm 的透过率为 4%。AO 为 2 μm 声光 Q 开关 (QS041-10M-HI8),有效通光孔径为 2 mm。在实验中,采用水冷方式对声光 Q 开关进行散热,水冷的温度保持在 16 $^{\circ}\text{C}$,控制精度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

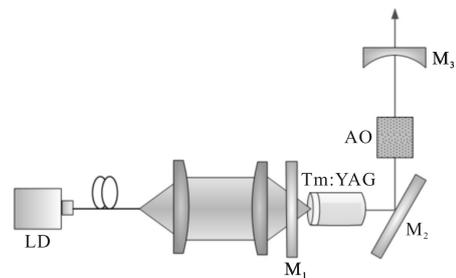


图 1 脉冲 LD 单端抽运 Tm:YAG 激光器的实验装置

Fig.1 Structure of pulse LD pumped Q-switched Tm:YAG laser

2 实验结果及分析

实验测量了重复频率 100 Hz 和 200 Hz 时,自由运转与调 Q 运转情况下激光输出能量。通过脉冲 LD 进行抽运的过程中,要求脉冲 LD 的抽运源频率与声光调 Q(AO)的频率保持一致,因此实验中设计了时序电路将两者进行关联控制。脉冲 LD 抽运源的占空比为 50%。在 100 Hz 情况下,脉冲抽运源的脉宽为 5 ms。调 Q 开启前为自由运转情况,图 2 为 100 Hz 重频下,自由运转与调 Q 运转时,输出能量

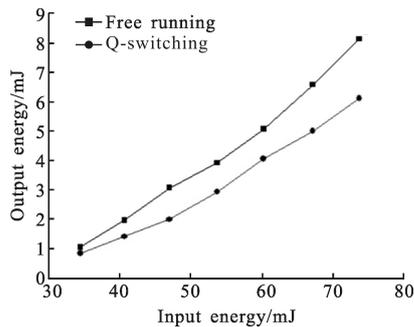


图 2 100 Hz 自由运转和调 Q 运转情况下,输出能量随注入能量变化曲线

Fig.2 Output energy of free running and Q-switching under repetition frequency of 100 Hz

随抽运能量变化的曲线。自由运转情况下,最大输出能量为 8.13 mJ,斜率效率为 17.69%(通过能量计 30A-BB Co. Ophir 测量);调 Q 后最大的输出能量为 6.11 mJ,斜率效率为 13.65%,调 Q 后脉冲宽度为 324.7 ns(通过示波器 DPO3054 Co. Tektronix 和脉宽探测器 PCI-3TE-12 Co. Vigo 测量)。在 200 Hz 情况下的脉冲抽运源的脉宽为 2.5 ms,图 3 为重频 200 Hz 情况下,自由运转与调 Q 运转时,输出能量随抽运能量变化的曲线。自由运转情况下,最大输出能量为 7.83 mJ,斜率效率为 16.98%;调 Q 后最大的输出能量为 5.41 mJ,斜率效率为 12.79%,脉冲宽度为 394.8 ns。实验结果表明该激光器在重频 100 Hz 下运转时的出光性能更佳,分析其原因主要包括两个,一是由于 Tm:YAG 晶体的上能级寿命较长,为 10 ms 左右,考虑到工作物质储能和上能级反转粒子数的利用率,决定了 Tm:YAG 激光器的最佳运转频率在 100 Hz 左右;二是由于重复频率的增加,即使采用脉冲激光二极管泵浦的方式,对缓解晶体热问题的能

力有限,尤其在调 Q 状态下,已经出现效率降低的趋势,这个现象从调 Q 后重频 100 Hz 与 200 Hz 激光的输出能量和效率的对比中可以得出初步的结论。图 4 和图 5 为激光脉冲宽度随输出能量变化的曲线,从图中可知脉冲宽度随能量增大逐渐减小,同时,在相同输出能量的情况下,重复频率的增加会使得激光器的输出脉宽有所展宽。在该实验中所获得的脉冲宽度均符合测风雷达光源的需求。

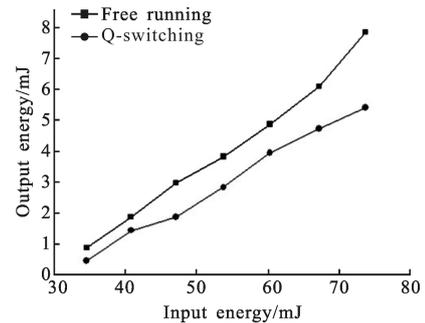


图 3 200 Hz 自由运转和调 Q 运转情况下,输出能量随注入能量变化曲线

Fig.3 Output energy of free running and Q-switching under repetition frequency of 200 Hz

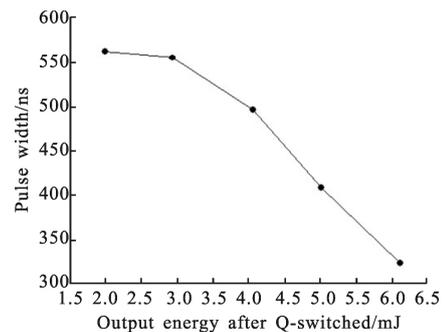


图 4 100 Hz 情况下,脉冲宽度随调 Q 后输出能量变化曲线

Fig.4 Pulse width with different output energies after Q-switched under repetition frequency of 100 Hz

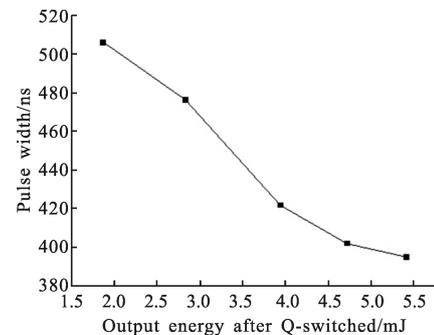


图 5 200 Hz 情况下,脉冲宽度随调 Q 后输出能量变化曲线

Fig.5 Pulse width with different output energies after Q-switched under repetition frequency of 200 Hz

图 6 为 20 min 内重频为 100 Hz 情况下最大输出能量的稳定性曲线,能量不稳定性小于 2%。图 7 为重频 100 Hz 时的典型脉冲图,图中的脉冲宽度为 324.7 ns。

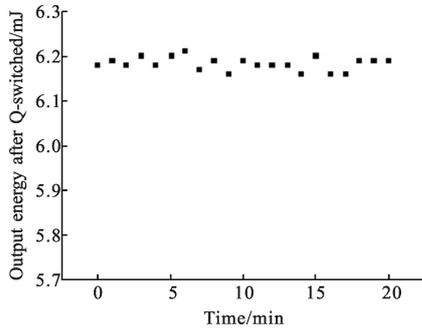


图 6 100 Hz 情况下,最大输出能量稳定性
Fig.6 Energy stability at maximum output energy under repetition frequency of 100 Hz

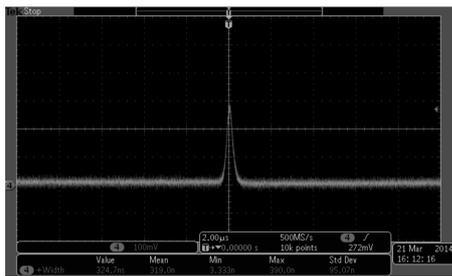


图 7 脉冲 LD 抽运声光调 Q Tm:YAG 激光器典型脉宽图,调 Q 后脉冲宽度为 324.7 ns

Fig.7 Typical pulse width of pulse LD pumped AO Q-switched Tm:YAG laser after Q-switched was 324.7 ns

激光输出波长通过光谱仪(AQ6375 Co.YOKOGAWA)进行测量,将测量到的数据点导入到 origin8.0 中绘制光谱曲线。根据测量结果,输出的脉冲激光的中心波长为 2 014.9 nm,光谱图如图 8 所示。实验采用光束质量分析仪(Pyrocam-III Co.Spiricon)分析了脉冲

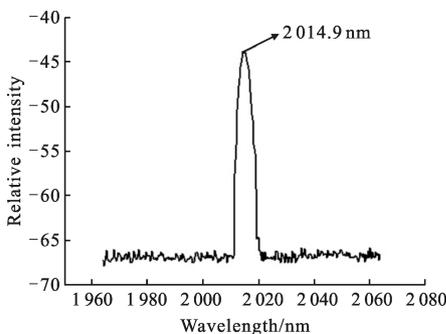


图 8 脉冲 Tm:YAG 激光器激光输出光谱图
Fig.8 Laser spectra of pulse Tm:YAG laser wavelength

LD 单端抽运 Tm:YAG 调 Q 激光器的光束质量,x 方向上的光束质量为 1.31,y 方向上的光束质量为 1.35。图 9 为输出激光的光束质量及光斑情况。

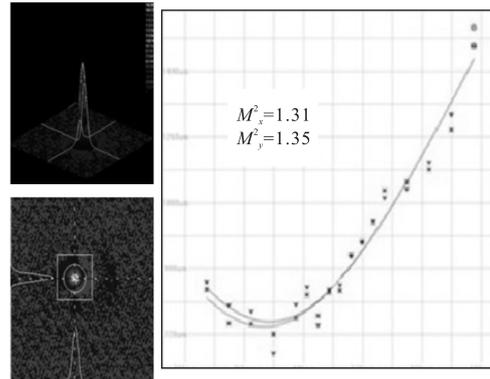


图 9 输出能量为 6.11 mJ 情况下脉冲 Tm:YAG 激光器光束质量测量

Fig.9 Beam quality factor of pulse Tm:YAG laser measured at output energy of 6.11 mJ

3 结 论

通过对重频 100 Hz 和 200 Hz 情况下激光输出能量、脉宽、波长及光束质量的测量与分析,研究了脉冲 LD 单端抽运 Tm:YAG 调 Q 激光器。获得了输出激光的中心波长为 2 014.9 nm,调 Q 运转情况下,重频 100 Hz 时,最大单脉冲能量为 6.11 mJ 的激光输出,脉冲宽度为 324.7 ns,斜率效率为 13.56%。x 方向上的光束质量为 1.31,y 方向上的光束质量为 1.35。由于高能量的 2 μm 波段激光在众多领域应用广泛,文中实验研究在一定程度上提高了 Tm:YAG 调 Q 激光器的输出能量,是具有十分积极的意义的。针对实验中发现的 Tm:YAG 激光输出转换效率低的问题,下一步拟通过定制体光栅或在腔内插入标准具的方式,将激光运转波长调离 H₂O 和 CO₂ 的吸收峰,进而降低腔内损耗,提高转换效率。

参 考 文 献 :

[1] Zhang Wenping, Li Mingshan, Shang Weidong, et al. Temperature control precision of LD in DPL [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 70-72. (in Chinese) 张文平,李明山,尚卫东. 二极管泵浦激光器中的二极管温控精度[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 70-72.

[2] Ju Youlun, Dai Tongyu, Shen Yingjie, et al. Doppler velocity measurement experiment based on Tm, Ho:YAP injection-

- seeded laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 344–348. (in Chinese)
- 鞠有伦, 戴通宇, 申英杰, 等. Tm:Ho:YAP 种子注入激光多普勒测速实验[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 344–348.
- [3] Chen Weibiao, Zhou Jun, Liu Jiqiao, et al. Doppler lidar and its all solid-state single frequency laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 57–60. (in Chinese)
- 陈卫标, 周军, 刘继桥, 等. 多普勒激光雷达及其单纵模全固态激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 57–60.
- [4] Gao C, Wang R, Lin Z. 2 μm single-frequency Tm:YAG laser generated from a diode-pumped L-shaped twisted mode cavity[J]. *Appl Phys B*, 2012, 107(1): 67–70.
- [5] Wu C T, Ju Y L, Li Y F. Diode-end-pumped composite Tm:YAG rod with undoped ends at room temperature [J]. *Chin Opt Lett*, 2008, 6(8): 594–596.
- [6] Lin Z F, Gao M W, Gao C Q. Experimental investigation of laser diode end pump Tm: YAG Laser [J]. *Chin J of Lasers*, 2007, 2: 181–185.
- [7] Wu C T, Chen F, Wang R. Experimental investigation of the pulse width of a diode-pumped acousto-optically Q-switched Tm:YAG laser [J]. *J of Russ Laser Res*, 2002, 33(1): 98–102.
- [8] Ju Y L, Wu C T, Wang Z G. High-efficiency composite Tm:YAG laser[J]. *Laser Phys*, 2008, 18(11): 1316–1318.
- [9] Zhang S Y, Wang M J, Xu L. Efficient Q-switched Tm:YAG ceramic slab laser[J]. *Opt Express*, 2011, 19(2): 727–732.
- [10] Stoppler G, Kieleck C, Eichhorn M. High-pulse energy Q-switched Tm³⁺:YAG laser for nonlinear frequency conversion to the Mid-IR[C]//SPIE, 2010, 7836: 738609.
- [11] Suni P J M, Henderson S W. 1-mJ/pulse Tm:YAG laser pumped by a 3-W diode laser[J]. *Opt Lett*, 1991, 16: 817–819.
- [12] Li C, Song J, Shen D Y. Diode-pumped high-efficiency Tm:YAG lasers[J]. *Opt Express*, 1999, 4(11): 12–18.
- [13] Goldring S, Lebiush E, Lavi R. RTP Q-switched 2-micron Tm:YAG laser[C]//SPIE, 2002, 4630: 13–16.