

# 100 Hz LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q 2.79 μm 激光器的脉冲输出特性

姜玲玲<sup>1,2</sup>, 马圣洁<sup>1,2</sup>, 朱永斌<sup>1</sup>, 程庭清<sup>1</sup>, 江海河<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院健康与医学技术研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 对闪光灯泵浦的 2.79 μm Er,Cr:YSGG 激光器在高重复频率下的声光调 Q 输出特性进行了研究。当射频驱动功率为 30 W 时, LiNbO<sub>3</sub> 声光开关实现了最大的衍射效率和稳定的调 Q 特性。当重复频率为 100 Hz 时, 实验研究了不同反射率下 LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q Er,Cr:YSGG 激光器的输出特性, 采用平凸谐振腔补偿增益介质中的热透镜效应, 明显改善了 Er,Cr:YSGG 激光器的调 Q 输出性能, 在平凸腔中能够得到最大的脉冲能量和最短的脉冲宽度。与平平腔相比, 平凸腔将激光器的输出能量提高了 1.5 倍。当重复频率为 100 Hz 时, 激光系统输出的脉冲能量的最大值为 4.36 mJ, 脉冲宽度的最小值为 76.8 ns。

**关键词** 激光器; 固体激光器; Er,Cr:YSGG; LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q; 平凸谐振腔

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230685

## 1 引言

目前, 纳秒脉冲的 3 μm 激光系统得到了广泛的科学研究和实际应用<sup>[1-2]</sup>。对于 3~12 μm 波段中红外光参量振荡器(OPO), 为了减少参量转换过程中的量子损耗, 应尽可能利用该波段的较长波长激光作为泵浦源<sup>[2]</sup>。同时, 窄脉宽、高峰值功率的泵浦源可以提高中红外参量的转换效率, 获得更大的输出能量或功率<sup>[2-3]</sup>。纳秒脉冲 3 μm 激光系统的另外一个重要应用与水和羟基磷灰石的独特性质有关, 即它们在 3 μm 波段附近具有极高的吸收峰<sup>[4-5]</sup>。因此, 3 μm 波段的激光可用于医疗消融手术, 特别是在牙科和骨科应用中。较高重复频率的激光器可以提高牙龈组织的消融效率、加快治疗过程<sup>[6-7]</sup>。此外, 较窄脉宽的纳秒脉冲激光可以减少对周围健康组织的热损伤<sup>[8]</sup>。因此, 在高重复频率下, 实现稳定的高峰值功率、窄脉宽 3 μm 激光输出是大家共同努力的方向。

调 Q 技术是目前获得 3 μm 波长窄脉宽、高峰值功率激光的主要方式, 其中主动调 Q 有电光调 Q<sup>[9-12]</sup>和声光调 Q<sup>[13-17]</sup>。由于该波段光电材料在吸收特性和高损伤阈值方面的局限性, 寻找性能优良的 3 μm 波长的光电开关一直是该波段激光技术需要攻克的难题。十年前, 我们创新研制了硅酸镱(LSG)电光调 Q 开关, 在 3 μm 波段实现了窄脉冲、高峰值功率的激光输出<sup>[11-12]</sup>。

由于电光调 Q 技术仅对线偏振光进行调控, 而激光晶体的热致双折射使线偏光产生了热退偏, 且热退偏效应随抽运能量的增大而增强, 故难以在棒状激光晶体中实现高重复频率运转<sup>[1,10]</sup>。声光调 Q 技术利用光的衍射效应, 能够在高重复频率下实现稳定的激光输出, 并且具有插入损耗较小、结构紧凑的优点。2000 年, Maak 等<sup>[13]</sup>在闪光灯泵浦的 Er,Cr:YSGG 激光器中使用 TeO<sub>2</sub> 作为声光调 Q 开关, 当重复频率为 1 Hz 时, 获得了脉冲能量为 27 mJ、脉冲宽度为 120 ns 的激光脉冲。2017 年, Ren 等<sup>[15]</sup>在激光二极管(LD)泵浦的 Er:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光器中使用 TeO<sub>2</sub> 作为声光调 Q 开关, 当重复频率为 0.3 kHz 时, 实现了脉冲能量为 0.3 mJ、脉冲宽度为 41 ns 的激光输出。研究者一直在寻找 3 μm 波段的新颖声光开关。最近, KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 和 KG(WO<sub>4</sub>) 两种晶体被报道作为声光调 Q 开关可用于 2~3 μm 波段的激光器<sup>[18-19]</sup>, 当重复频率为 5 Hz 时, 3 μm 激光器的脉冲能量为 29.6 mJ、脉冲宽度为 75 ns<sup>[18]</sup>。块状的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体具有优良的声光特性, 可以作为理想的声光介质, 在 3 μm 波段具有较高的透过率(90%)、较低的声衰减系数(1 dB/cm @1 GHz)<sup>[20]</sup>和较高的抗损伤阈值(>200 MW/cm<sup>2</sup>)<sup>[10]</sup>。实际上, 多年前研究者就尝试用块状的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体制作声光开关, 但未能实现在 3 μm 波段的应用<sup>[21]</sup>。前不久, 我们创新研制了 LiNbO<sub>3</sub> 声光开关并实验验证了其声光有效性<sup>[22]</sup>。本文对

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-04-27; 录用日期: 2023-05-22; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407204)

通信作者: \*hjiang@aiofm.ac.cn

LiNbO<sub>3</sub>声光开关在Er,Cr:YSGG激光器中高重复频率下的输出特性进行了研究。

在3 μm波段,Er,Cr:YSGG激光晶体已被证明是一种高效率的灯泵激光介质。虽然LD泵浦的Er:YSGG激光器可在高重复频率下实现高能量输出,但是其成本较高。更重要的是,与LD泵浦的激光器相比,氙灯泵浦的激光器可以进行更大能量的泵浦、获得更大的脉冲能量输出。与Er:YAG晶体相比,Er<sup>3+</sup>掺杂的YSGG晶体具有较长的上能级寿命(1.3 ms)、较低声子能量引起的低激光阈值和较高的转换效率<sup>[23]</sup>。因此,当泵浦源为氙灯时,敏化离子Cr<sup>3+</sup>掺杂的Er:YSGG晶体是能够实现高重复频率和高脉冲能量输出的候选材料之一。Cr<sup>3+</sup>和Er<sup>3+</sup>离子与氙灯发射光谱有重叠的吸收带,因此有两个泵浦过程,一个是Er<sup>3+</sup>自身的直接泵浦<sup>[23]</sup>,另一个是间接的Cr<sup>3+</sup>向Er<sup>3+</sup>的转移泵浦,可提高转换效率<sup>[23]</sup>。遗憾的是,Er,Cr:YSGG晶体具有较高的量子亏损,高重复频率下的较强的热透镜效应对激光器的输出性能有不利的影响。此外,3 μm波段的TeO<sub>2</sub>、Ge声光Q开关的损伤阈值一般较低。为了研制性能优异的2.79 μm Er,Cr:YSGG激光器,同时降低高重复频率下声光Q开关的损伤风险,需要对谐振腔进行优化设计以补偿热透镜效应,改善激光器的输出性能。

本文对闪光灯泵浦的2.79 μm Er,Cr:YSGG激光器在高重复频率下的声光(AO)调Q输出特性进行了研究。当射频驱动功率为30 W时,自行研制的LiNbO<sub>3</sub>声光开关实现了最大的衍射效率。在100 Hz的重复频率下,研究了不同反射率下LiNbO<sub>3</sub>声光调Q

Er,Cr:YSGG激光器的输出特性,采用平凸谐振腔补偿了增益介质中的热透镜效应,明显改善了高重复频率下的光束质量和激光器的输出能力,实现了LiNbO<sub>3</sub>声光开关在Er,Cr:YSGG激光器中的稳定激光输出。

## 2 激光实验装置

激光实验装置如图1(a)所示。激光增益介质是Er,Cr:YSGG晶体,其尺寸为Φ3 mm×100 mm,其中掺杂的Er<sup>3+</sup>和Cr<sup>3+</sup>的原子数分数分别为30%和1.5%。增益介质的两个端面镀有2.79 μm增透膜。脉冲氙灯在陶瓷聚光腔内对Er,Cr:YSGG晶体进行泵浦,相应的泵浦脉宽为100 μs。为保证激光器能够安全稳定地工作,利用循环去离子水对激光晶体和闪光灯进行冷却,冷却水的温度为(283±0.3)K,流量为33 L/min。谐振腔为平凸腔形结构,HR为全反镜(反射率R>99%),OC为输出耦合镜。

在激光谐振腔内,将LiNbO<sub>3</sub>声光Q开关置于全反镜HR和Er,Cr:YSGG激光晶体之间。LiNbO<sub>3</sub>声光介质的两个端面镀有2.79 μm的增透膜,并利用分光光度计对LiNbO<sub>3</sub>声光介质的透过率进行了测量,结果如图1(b)所示。在LiNbO<sub>3</sub>晶体中掺入MgO使得OH<sup>-</sup>的吸收峰发生紫移,所以在2810~2850 nm范围内透过率骤降,在附近区域没有其他特征。如图1(b)所示,在2.79 μm波长处,LiNbO<sub>3</sub>晶体的透过率约为90%,因此能够减小谐振腔中的插入损耗。当声光驱动功率调节到最大值30 W且射频频率为40.68 MHz时,获得了Q开关最大的衍射效率57%。

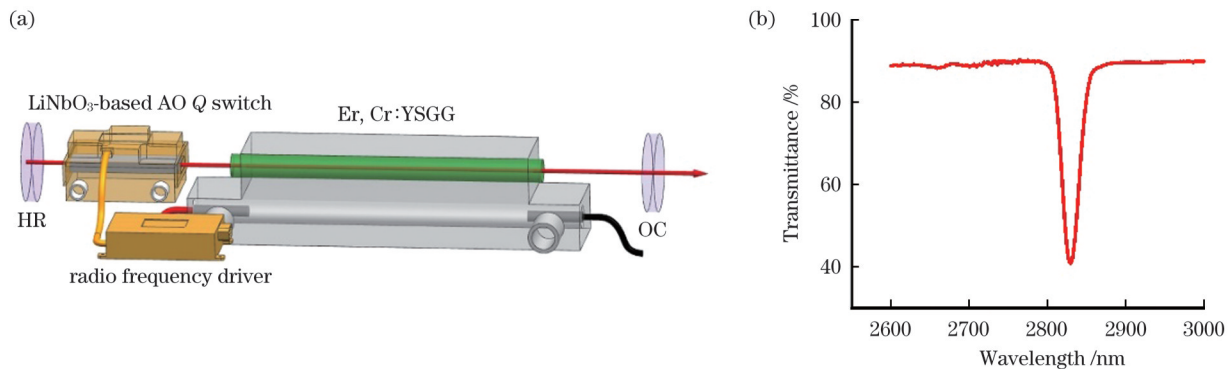


图1 LiNbO<sub>3</sub>声光调Q 2.79 μm Er,Cr:YSGG激光器的实验装置图及LiNbO<sub>3</sub>晶体的透过率。(a)实验装置图;(b)透过率  
Fig. 1 Experimental device diagram of LiNbO<sub>3</sub> acousto-optic Q-switched 2.79 μm Er,Cr:YSGG laser and transmittance of LiNbO<sub>3</sub> crystal. (a) Experimental device diagram; (b) transmittance

## 3 激光器谐振腔设计及热效应补偿

由于高重复频率灯泵系统中存在严重的热效应,平平腔中的热焦距值及光束质量因子(M<sup>2</sup>)并不理想。在一定的泵浦功率范围内,平凸腔结构可以对热透镜效应进行有效的补偿,从而优化光束质量、改善激光器的输出性能。为了有效地补偿热透镜效应,实验中先

根据热焦距公式<sup>[24]</sup>对Er,Cr:YSGG激光晶体的热焦距进行了理论计算。因为激光晶体的热焦距与众多因素有关,利用理论计算的方式并不能得到完全准确的热焦距的大小,所以重复频率为100 Hz时,在平平腔中利用临界腔稳定法对Er,Cr:YSGG激光晶体的热焦距进行测量,理论计算和实际测量结果如图2所示。

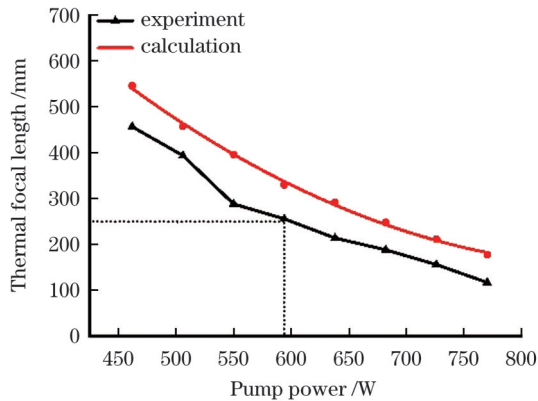


图 2 不同泵浦功率下的热焦距值

Fig. 2 Thermal focal lengths under various pump powers

当激光器处于自由运转状态时,利用能量计对输出能量进行采集,图 3 显示了当重复频率为 100 Hz 时激光脉冲能量的输入-输出特性。实验中,输出镜的反射率为 70%。如图 3 所示,在平平腔中,输出的激光脉冲的能量最大值(26.7 mJ)对应的泵浦电功率为 594 W,由图 2 中的虚线可以得到此时的热焦距为 254.9 mm。根据含有热透镜的谐振腔的设计理论<sup>[25]</sup>,计算得到平凸腔中凸面镜的曲率半径为 -166.3 mm。因此,在以下实验中采用了曲率半径( $r$ )为 -100、-150、-200 mm 的凸镜作为后腔镜,对激光脉冲能量进行测量和采集。从获得的最大输出脉冲能量可以看出,曲率半径为 -150 mm 的凸镜较曲率半径为 -100 mm、-200 mm 的两个凸镜的补偿效果要好,这也从实验上验证了理论计算的结果。如图 3 所示,当重复频率为 100 Hz 时,激光器在平平腔中输出的能量最大值为 26.7 mJ,在平凸腔中输出的能量最大值为 52.6 mJ,随着泵浦能量的持续增大,激光器的热效应变得严重,导致谐振腔内的激光振荡偏离方向,出现输出能量下降的现象。因此,与平平谐振腔结构相比,平凸谐振腔结构使得激光器的输出能量增加了 2 倍以上。

平凸腔结构有效地补偿了 Er,Cr:YSGG 晶体中的热效应,提高了激光器的输出能量,实现了静态激光的稳定输出。具有热效应补偿功能的平凸腔为高重复频率下 LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q 开关得到高峰值功率、短脉冲宽度的激光脉冲提供了实验基础。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 耦合腔镜反射率对声光调 Q 激光输出性能的影响

为了探究反射率对 LiNbO<sub>3</sub> 声光开关输出性能的影响,在平凸腔中将耦合腔镜的反射率设置为 60%、70%、80%,实验结果如图 4 所示。实验中, LiNbO<sub>3</sub> 声光开关的驱动功率为 30 W。当激光器的重复频率为 100 Hz 时, LiNbO<sub>3</sub> 声光开关在反射率为 60%、70%、80% 的情况下输出的最大脉冲能量分

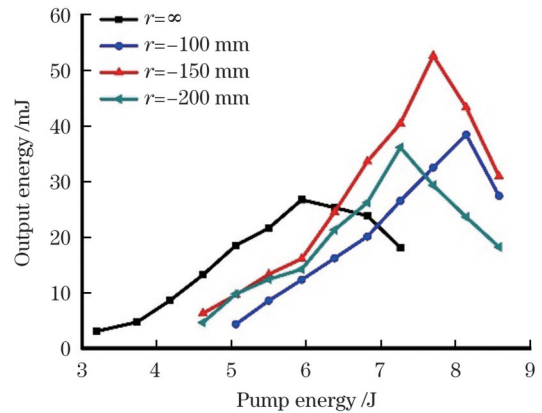


图 3 当重复频率为 100 Hz 时激光器在自由运转状态下的输出能量随泵浦能量的变化

Fig. 3 Output energy versus pump energy for laser in free running state when repetition rate is 100 Hz

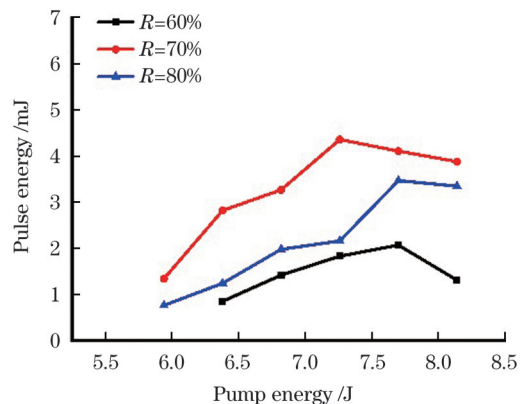


图 4 不同反射率下脉冲能量随泵浦能量的变化曲线

Fig. 4 Pulse energy versus pump energy under different reflectivity values

别为 2.07、4.36、3.47 mJ。因此,研制的 LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q Er,Cr:YSGG 激光器的输出镜的最佳反射率为 70%。

### 4.2 热效应对声光调 Q 激光脉冲输出性能的影响

为了探究热效应对 LiNbO<sub>3</sub> 声光开关输出特性的影响,设计了平平腔 (PPR) 和平凸腔 (PCR) 的调 Q 对比实验。实验中,输出耦合镜 OC 的反射率为 70%, LiNbO<sub>3</sub> 声光开关的驱动功率为 30 W。如图 5(a) 所示,当重复频率为 100 Hz 时, LiNbO<sub>3</sub> 声光开关在平平腔、平凸腔中的最大脉冲能量分别为 2.93 mJ、4.36 mJ,相应的脉冲宽度分别为 93.1 ns、76.8 ns。当重复频率为 100 Hz 时, LiNbO<sub>3</sub> 声光开关在平凸腔中输出的脉冲能量相较于平平腔提高了 1.5 倍。当重复频率为 100 Hz 时,在平凸腔中利用光电探测器测量获得了调 Q 激光脉冲波形[图 5(b)]及脉冲序列[图 5(c)]。因此,合理的平凸腔结构能够在一定的泵浦功率范围内改善 LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q Er,Cr:YSGG 激光器的调 Q 性能。

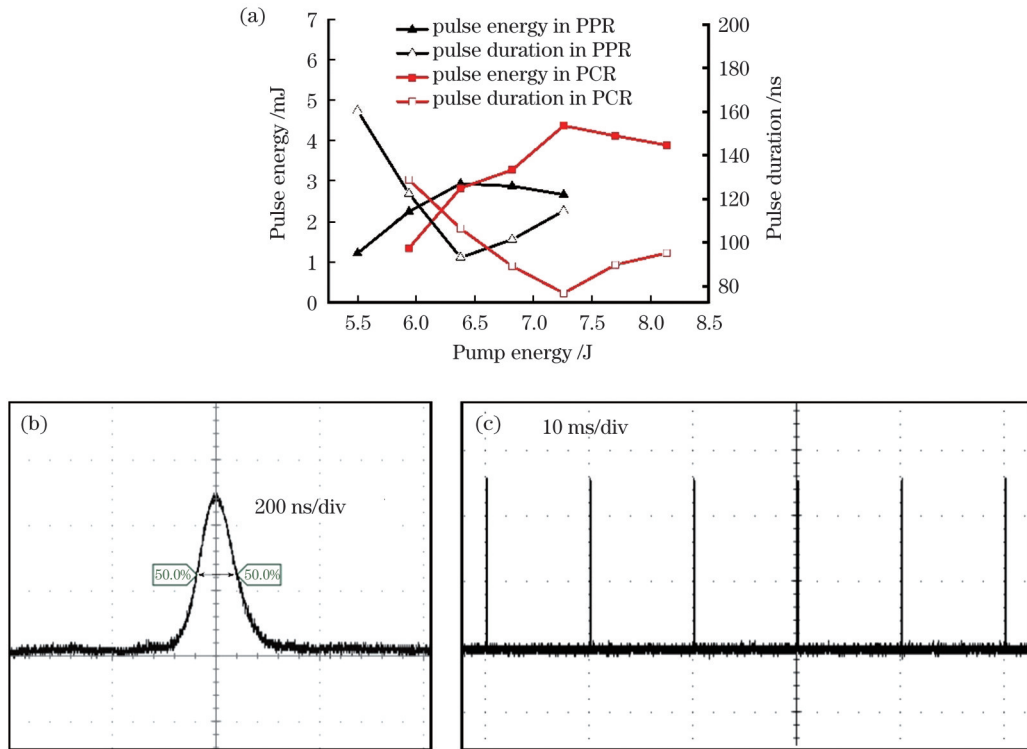


图 5 激光器的调 Q 输出特性。(a) 脉冲能量和脉冲宽度随泵浦能量的变化曲线; (b) 4.36 mJ 时的脉冲图; (c) 相应的脉冲序列  
Fig. 5 Q-switched output characteristics of laser. (a) Pulse energy and pulse duration versus pump energy; (b) pulse profile at 4.36 mJ; (c) corresponding pulse train

### 4.3 驱动功率对声光调 Q 激光脉冲输出性能的影响

声光 Q 开关被放置在激光谐振腔内, 其衍射效率是影响调 Q 激光脉冲输出性能的一个重要因素。通过控制声光开关的驱动功率 (RFDP) 可以改变衍射效率, 因此, LiNbO<sub>3</sub> 声光开关的驱动功率直接影响 Er, Cr: YSGG 激光器的声光调 Q 输出特性。当重复频率为 100 Hz 时, 通过改变施加在 Q 开关上的驱动功率来改变衍射效率, 对 Q 开关输出的脉冲能量和脉

冲宽度进行测量, 结果如图 6 所示。实验中, 激光器的耦合镜的反射率为 70%。由图 6 可知, 当驱动功率较小时, 脉冲能量较小、脉冲宽度被展宽, 影响了激光器的输出特性。随着驱动功率的增加, 脉冲能量增加、脉冲宽度被压缩, 明显改善了 LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q Er, Cr: YSGG 激光器的输出特性。由于电声换能器的功率损伤阈值的限制, 实验中射频驱动功率的最大值为 30 W。

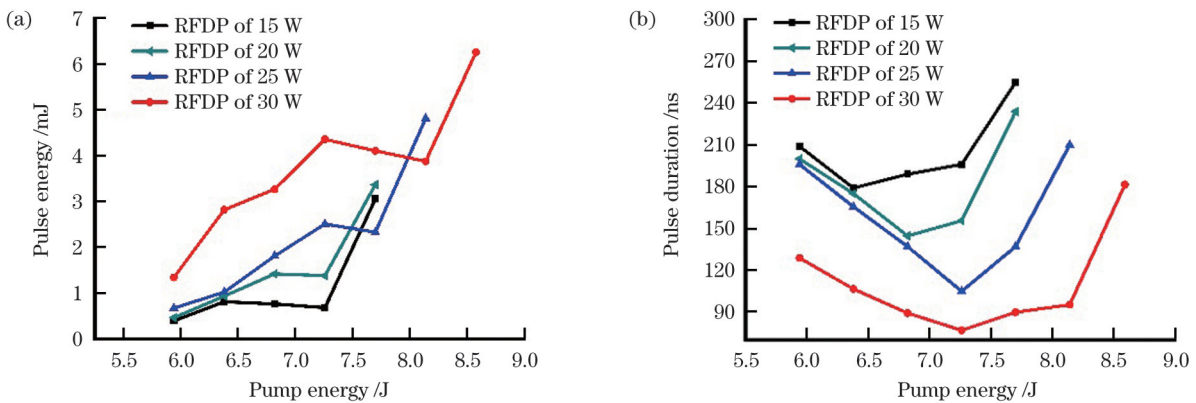


图 6 不同驱动功率下脉冲能量和脉冲宽度随泵浦能量的变化曲线。(a) 脉冲能量; (b) 脉冲宽度  
Fig. 6 Pulse energy and pulse duration versus pump energy under different RFDPs. (a) Pulse energy; (b) pulse duration

如图 6 所示, 在驱动功率为 15、20、25、30 W 的情况下, 激光器分别在泵浦能量为 6.38、6.82、7.26、7.26 J 时达到最佳的调 Q 输出, 即输出的调 Q 单脉冲具有最大的脉冲能量和最窄的脉冲宽度。随着泵浦能量的持

续增大, 激光器的热效应变得严重, 脉冲能量缓慢下降、脉宽被展宽, 继续增加泵浦能量, Q 开关出现关不住的现象, 导致静态激光产生, 使得脉冲能量和脉冲宽度骤增。因此, 只有在提高声光调 Q 衍射效率以增加

衍射损耗的同时,才能进一步增加泵浦功率以获得更高的脉冲能量及峰值功率。

实验中利用光斑相机对研制的 LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q Er,Cr:YSGG 激光器进行测量,并分析光束质量,结果如图 7 所示。当重复频率为 100 Hz、单脉冲能量为 4.36 mJ 时,激光束在 X 方向上的光束质量因子( $M_x^2$ )和 Y 方向上的光束质量因子( $M_y^2$ )分别为 8.3 和 7.7。

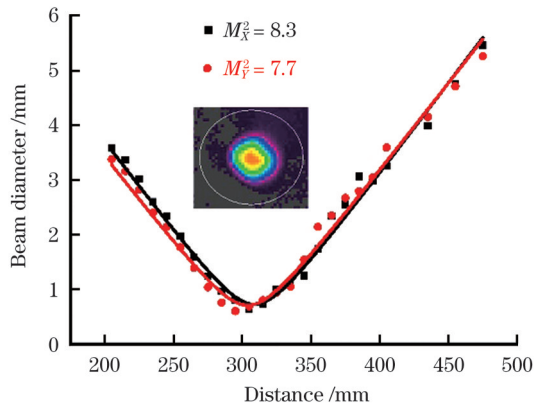


图 7 光束质量及远场光斑图

Fig. 7 Beam quality and far-field beam profile

另外,为了探究 LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q Er,Cr:YSGG 激光器的稳定性,测试了 30 min 的激光输出能量,结果如图 8 所示,激光器的能量波动的标准偏差(SD)小于 2.55%。因此,研制的 LiNbO<sub>3</sub> 声光调 Q Er,Cr:YSGG 激光器能够在高重复频率下实现稳定的高脉冲能量、窄脉宽激光输出。

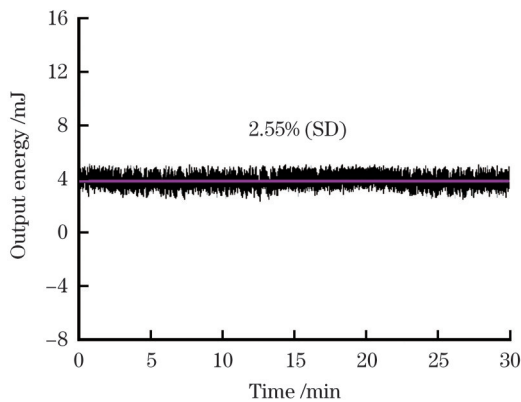


图 8 30 min 内的脉冲能量波动性

Fig. 8 Pulse energy fluctuation in 30 min

## 5 结 论

研制的 LiNbO<sub>3</sub> 声光开关可实现高重复频率的 2.79  $\mu\text{m}$  Er,Cr:YSGG 激光器纳秒脉冲的调 Q 输出,所设计的平凸腔结构有效补偿了增益介质中的热透镜效应,明显改善了 Er,Cr:YSGG 激光器的输出性能。通过增加声光开关的射频驱动功率,能够提高脉冲能量、压缩脉宽,改善 Er,Cr:YSGG 激光器的调 Q 输出特性。当射频驱动功率为 30 W 时,LiNbO<sub>3</sub> 声光开关

实现了最大的衍射效率和稳定的调 Q 特性,在平凸腔中实现了热效应补偿,获得了最大的脉冲能量和最短的脉冲宽度。当重复频率为 100 Hz 时,激光系统输出的脉冲能量的最大值为 4.36 mJ,脉冲宽度的最小值为 76.8 ns。实验结果表明,LiNbO<sub>3</sub> 声光开关是一种性能优异的 3  $\mu\text{m}$  波段声光器件,LiNbO<sub>3</sub> 声光 Er,Cr:YSGG 调 Q 激光器可以实现窄脉冲、高重复频率的稳定激光输出。

## 参 考 文 献

- [1] 王礼,杨经纬,蔡旭武,等. 2.09  $\mu\text{m}$  纳秒钛激光抽运的磷锗铟光参量振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102008.  
Wang L, Yang J W, Cai X W, et al. 2.09  $\mu\text{m}$  nanosecond holmium laser pumped ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0102008.
- [2] Huang K, Wang Y Q, Fang J N, et al. Highly efficient difference-frequency generation for mid-infrared pulses by passively synchronous seeding[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(1): e4.
- [3] Quan C, Sun D L, Zhang H L, et al. 13-W and 1000-Hz of a 2.7- $\mu\text{m}$  laser on the 968 nm LD side-pumped Er:YAP crystal with concave end-faces[J]. Optics Express, 2021, 29(14): 21655-21663.
- [4] 江健涛,魏蒙恩,熊正东,等. 子脉冲序列模式 Er:YAG 激光消融牙本质的实验观察[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0107001.  
Jiang J T, Wei M E, Xiong Z D, et al. Observation of dentin ablation using an Er:YAG laser in a sub-pulse sequence mode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0107001.
- [5] 杨经纬,江海河,王礼,等. 调 Q 和静态 Er:YAG 激光消融硬组织的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s104001.  
Yang J W, Jiang H H, Wang L, et al. Study on ablation hard tissue using Q-switched Er:YAG laser and free-running Er:YAG lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(s1): s104001.
- [6] Mortensen L J, Alt C, Turcotte R, et al. Femtosecond laser bone ablation with a high repetition rate fiber laser source[J]. Biomedical Optics Express, 2014, 6(1): 32-42.
- [7] Charlton A, Dickinson M R, King T A. High repetition rate, high average power Er:YAG laser at 2.94  $\mu\text{m}$ [J]. Journal of Modern Optics, 1989, 36(10): 1393-1400.
- [8] Zajac A, Skorczakowski M, Swiderski J, et al. Electrooptically Q-switched mid-infrared Er:YAG laser for medical applications[J]. Optics Express, 2004, 12(21): 5125-5130.
- [9] Park Y H, Kong H J, Kim Y S, et al. 2.70  $\mu\text{m}$  emission Er:Cr:YSGG laser with LiNbO<sub>3</sub> Pockels cell[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(3): 198-202.
- [10] Yang J W, Wang L, Wu X Y, et al. High peak power Q-switched Er:YAG laser with two polarizers and its ablation performance for hard dental tissues[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 15686-15696.
- [11] Wang L, Wang J T, Yang J W, et al. 2.79  $\mu\text{m}$  high peak power LGS electro-optically Q-switched Cr, Er:YSGG laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2150.
- [12] Wang L, Cai X W, Yang J W, et al. 520 mJ langasite electro-optically Q-switched Cr, Tm, Ho:YAG laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1986-1988.
- [13] Maak P, Jakab L, Richter P, et al. Efficient acousto-optic Q switching of Er:YSGG lasers at 2.79- $\mu\text{m}$  wavelength[J]. Applied Optics, 2000, 39(18): 3053-3059.
- [14] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. 12 W Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2812-2814.
- [15] Ren X J, Wang Y, Fan X L, et al. High-peak-power acousto-optically Q-switched Er:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser at  $\sim 2.7 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 15004306.
- [16] Liu J J, Zong M Y, Wang D Z, et al. Acousto-optic Q-switched

- Er: CaF<sub>2</sub>-SrF<sub>2</sub> laser at 2.73 μm[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 116: 103758.
- [17] Cui Q Z, Wei M G, Xiong Z D, et al. 100-300 Hz repetition-rate acousto-optic Q-switched 2.79 μm Er: YSGG laser side-pumped by laser-diode[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 256-259.
- [18] Pushkin A V, Mazur M M, Sirotkin A A, et al. Powerful 3-μm lasers acousto-optically Q-switched with KYW and KGW crystals [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4837-4840.
- [19] Chizhikov A I, Mukhin A V, Egorov N A, et al. High-efficiency KYW acousto-optic Q-switch for a Ho: YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(5): 1085-1088.
- [20] Mys O, Kostyrko M, Krupych O, et al. Anisotropy of the acousto-optic figure of merit for LiNbO<sub>3</sub> crystals: isotropic diffraction[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8176-8186.
- [21] Schnell S, Ostroumov V G, Breguet J, et al. Acousto-optic Q-switching of erbium lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, 26(6): 1111-1114.
- [22] Jiang L L, Wu Z C, Cheng T Q, et al. 2.79-μm efficient acousto-optic Q switched Er, Cr: YSGG laser with an LiNbO<sub>3</sub> crystal modulator[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(23): 6193-6196.
- [23] Fang Z Q, Sun D L, Luo J Q, et al. A modified formula of thermal focal length for lamp pumping Cr, Er: YSGG crystal with high performance 2.79 μm laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 115: 398-403.
- [24] Koechner W, Bass M. *Solid-state lasers*[M]. New York: Springer, 2003.
- [25] Magni V, Valentini G, De Silvestri S. Recent developments in laser resonator design[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1991, 23(9): 1105-1134.

## Pulse Output Characteristics of LiNbO<sub>3</sub> Acousto-Optic Q-switched 2.79-μm Laser at 100 Hz

Jiang Lingling<sup>1,2</sup>, Ma Shengjie<sup>1,2</sup>, Zhu Yongbin<sup>1</sup>, Cheng Tingqing<sup>1</sup>, Jiang Haihe<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Health and Medical Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;*

<sup>2</sup>*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*

### Abstract

**Objective** Currently, nanosecond pulsed 3 μm lasers are of interest for many scientific research and practical applications. For mid-infrared optical parametric oscillators (OPOs), pumping sources with longer wavelengths are desirable to reduce the quantum loss in the parametric conversion. Moreover, pumping sources with short pulse duration and high peak power can improve the conversion efficiency to the mid-infrared wavelength (3–12 μm range) and obtain greater output power or energy. Another important application of nanosecond pulsed 3 μm lasers is related to the distinctive features of water and hydroxyapatite, i. e. , extremely high absorption in the vicinity of the 3 μm wavelength range. Therefore, pulsed lasers in this wavelength range are widely employed for medical ablation surgery, particularly for dental and orthopedic applications. Further, lasers with high repetition rate can improve the ablation efficiency of hard tissue and speed up the treatment process. If the laser pulse duration is less than the thermal diffusion time, unnecessary thermal damage to the surrounding healthy tissue can be reduced. Therefore, it is a common endeavor to achieve a stable 3 μm laser output with a high peak power and short pulse duration at a high repetition rate.

Bulk LiNbO<sub>3</sub> crystals have excellent acousto-optical (AO) properties and can be used as an ideal AO medium, exhibiting higher transmission in the 3 μm wavelength range, lower acoustic attenuation coefficient (1 dB/cm @ 1 GHz), and higher damage threshold (>200 MW/cm<sup>2</sup>). More than 30 years ago, scientists attempted to use LiNbO<sub>3</sub> crystals to create an AO Q switch, but it failed to work at 3 μm wavelength. Recently, we innovated and developed a LiNbO<sub>3</sub>-based AO Q switch, and its effectiveness was verified in our previous study. In this work, the output characteristics of a LiNbO<sub>3</sub> AO Q switch at a high repetition rate are investigated in an Er, Cr: YSGG laser. Hence, the output characteristics of an AO Q-switched Er, Cr: YSGG laser pumped by a flash lamp at a high repetition rate are studied. The thermal focal lensing effect in the gain medium is compensated using a plane-convex resonator (PCR), which significantly improves the beam quality and output capacity of the laser at a high repetition rate. A stable output of the LiNbO<sub>3</sub> AO Q switch in the Er, Cr: YSGG laser is realized.

**Methods** To effectively compensate for the thermal focal lensing effect, the thermal focal lengths of Er, Cr: YSGG laser crystals are calculated theoretically. Because the thermal focal length of the laser crystal is related to many factors, the corresponding theoretical calculation cannot be completely accurate. Hence, the thermal focal length of the Er, Cr: YSGG laser crystal is measured using the critical resonator stabilization method in a plane-parallel resonator at 100 Hz. The theoretical calculation and actual measurement results are presented in Fig. 2. According to the design theory of the resonator with the embedded thermal lens, the curvature radius of the convex mirror in the plane-convex resonator should be -166.3 mm. Therefore, convex mirrors with curvature radii of -100, -150, and -200 mm are adopted as rear mirrors in the respective experiments to measure and collect laser pulse energy. It can be seen from Fig. 3 that the compensation effect of the convex mirror with a curvature radius of -150 mm is better than those with -100 mm and -200 mm curvature radii.

**Results and Discussions** To explore the influence of the reflectivity of the output coupler(OC)mirror on the output performance of the LiNbO<sub>3</sub> AO Q switch, the reflectivity is set at 60%, 70%, and 80% for experimental research in the plane-convex resonator, and

the results are shown in Fig. 4. The optimum reflectivity of the OC mirror of the LiNbO<sub>3</sub> AO Q-switched Er, Cr:YSGG laser is 70%. To explore the influence of the thermal focal lensing effect on the output performance of the LiNbO<sub>3</sub> AO Q switch, a comparison experiment of Q-switching between the plane-parallel resonator and the plane-convex resonator is performed. It can be seen from Fig. 5 that the structure of the plane-convex resonator can improve the output performance of the LiNbO<sub>3</sub> AO Q-switched Er, Cr:YSGG laser in a certain pump energy range. The diffraction efficiency is varied by changing the radio frequency driving power (RFDP) added to the Q switch, and the output performance of the laser is explored. As can be seen from Fig. 6, when the repetition rate is 100 Hz, the maximum pulse energy and minimum pulse duration are 4.36 mJ and 76.8 ns, respectively, when the RFDP is 30 W. Moreover, the beam quality factor ( $M^2$ ) and the stability of the LiNbO<sub>3</sub> AO Q-switched Er, Cr:YSGG laser are examined. As shown in Fig. 7, for the pulse energy of 4.36 mJ, the beam quality factor ( $M_x^2$ ) in the X direction and the beam quality factor ( $M_y^2$ ) in the Y direction are 8.3 and 7.7 at 100 Hz. Further, as shown in Fig. 8, the degree of energy stability (standard deviation) of the laser is 2.55%.

**Conclusions** The results show that the designed LiNbO<sub>3</sub> AO Q switch can realize nanosecond pulse output at a high repetition rate in a 2.79  $\mu\text{m}$  Er, Cr:YSGG laser. The plane-convex resonator structure can effectively compensate for the thermal lensing effect of the gain medium, optimize beam quality, and improve the output performance of the laser. Increasing the radio frequency driving power of the AO Q switch can increase the pulse energy and compress the pulse duration, thus improving the output performance of the LiNbO<sub>3</sub> AO Q-switched Er, Cr:YSGG laser.

**Key words** lasers; solid-state lasers; Er, Cr:YSGG; LiNbO<sub>3</sub> acousto-optic Q-switching; plane-convex resonator