

2.94 μm LiNbO₃ 声光调 Q Er:YAG 激光输出脉冲特性*

王滔宁¹⁾²⁾ 姜玲玲¹⁾²⁾ 程庭清¹⁾ 王礼³⁾ 江海河^{1)2)†}

1) (中国科学院合肥物质科学研究院, 健康与医学技术研究所, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

3) (中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2023 年 10 月 6 日收到; 2023 年 11 月 22 日收到修改稿)

2.94 μm 纳秒钕激光是宽调谐中红外激光和临床医疗研究中重要的固体激光源. 本文研制了新型 LiNbO₃ 声光调 Q Er:YAG 激光器, 研究了 20 Hz 重复频率下不同调 Q 延迟时间和耦合腔镜反射率对激光输出脉冲特性的影响规律. 根据测量激光器的热透镜焦距设计了凹凸谐振腔补偿热透镜效应, 获得了激光单脉冲能量为 34.68 mJ、脉冲宽度为 119.9 ns 的调 Q 输出, 相应的峰值功率为 289.24 kW, 与平平腔相比输出能量提高了 2.09 倍. 据我们所知, 这是目前声光调 Q Er:YAG 激光器中获得的最高能量, 可为进一步研究宽调谐中红外激光技术提供新的手段.

关键词: 固体激光器, Er:YAG, LiNbO₃ 声光调 Q 开关

PACS: 42.55.Rz, 42.60.Gd

DOI: 10.7498/aps.73.20231616

1 引言

Er:YAG 激光器可以实现 2.94 μm 窄脉宽和高峰值的相干光输出, 具有广泛的科学研究和应用需求. 一方面, 2.94 μm 纳秒脉冲 Er:YAG 激光是宽调谐中红外激光器理想的固体泵浦激光源. 对于具有优异特性的中红外宽调谐 Fe:ZnSe 或 CdSe 或 CdTe 等激光器, 室温下需要 3 μm 波段脉冲宽度小于 Fe²⁺ 荧光寿命 (300 ns) 的窄脉冲激光器作为泵浦源, 纳秒 Er:YAG 固体激光泵浦源相比 HF 气体激光器、非线性频率变换光源具有系统简单、廉价和可集成等优点^[1-3]. 对于科学研究广泛采用的中红外非线性参量激光, 纳秒 Er:YAG 脉冲激光 2.94 μm 的较长泵浦波长更接近非线性参量输

出波长, 有利于减少参量转换中的量子亏损, 提高光光转换效率, 可获得更大的输出能量^[4-6]. 另一方面, 相比常规的数百微秒长脉冲 Er:YAG 激光, 纳秒激光脉宽远小于牙硬组织的热弛豫时间 (约 24 μs)^[7], 可以极大地减少在牙硬组织消融过程中的热量积累, 避免对消融组织及周围组织的热损伤^[8,9]. 因此, 发展 2.94 μm Er:YAG 纳秒脉冲激光技术有助于促进中红外激光技术的发展和應用.

调 Q 技术是目前获得纳秒窄脉宽、高峰值功率脉冲的一种主要手段, 分为主动调 Q 和被动调 Q. 其中, 主动调 Q 包含声光调 Q 和电光调 Q. 由于被动调 Q 脉冲发生的时间不可控, 而主动电光调 Q 需要在腔内插入偏振器、且热退偏效应导致的退偏损耗较大^[10,11], 在较高重复频率下难以获得较大的脉冲激光能量. 由于声光调 Q 具有结构简单、掺

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB0407204) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hjiang@aiofm.ac.cn

入损耗低等特点, 可避免退偏损耗和实现脉冲可控, 声光调 Q 开关和调 Q 已成为 $3\ \mu\text{m}$ 和中红外波段激光的研究重点. Schnell 等^[12] 在 1990 年研制了闪光灯泵浦 Er:YAG 声光调 Q 激光器, 采用锗晶体作为声光调 Q 开关, 获得了 $9.3\ \mu\text{J}$, $100\ \text{ns}$ 脉冲激光输出. 由于缺乏低损耗、高损伤阈值的 中红外声光晶体, 限制了该波段声光调 Q 激光输出能量. 研究人员也一直努力在寻找 $3\ \mu\text{m}$ 波段新型声光开关. 2019 年, Pushkin 等^[13] 将 $\text{KG}(\text{WO}_4)$ 晶体成功用于闪光灯泵浦的 Er:YAG 声光调 Q 激光器, 在 $2\ \text{Hz}$ 重复频率下获得了 $12.5\ \text{mJ}$, $100\ \text{ns}$ 脉冲激光输出, 但是该晶体生长过程复杂, 价格昂贵. 相对于 $\text{KG}(\text{WO}_4)$ 晶体, LiNbO_3 晶体不仅生长容易、价格便宜、性能稳定, 而且拥有优秀的声光特性, 在 $3\ \mu\text{m}$ 波段具有较高的抗损伤阈值 ($> 200\ \text{MW}/\text{cm}^2$) 和较高的透过率 (90%)^[11]. 前不久, 本研究组^[14] 成功实现了将 LiNbO_3 晶体用作声光 Q 开关对 Er:Cr:YSGG 激光器进行声光调 Q . 但是, 目前还没有见到更接近 $3\ \mu\text{m}$ 波长的声光调 Q 激光研究的报道.

本文制备了 $2.94\ \mu\text{m}$ Er:YAG LiNbO_3 声光调 Q 激光器, 研究了 $20\ \text{Hz}$ 重复频率下的激光输出脉冲特性, 探究了不同延迟时间和透过率对激光输出脉冲特性的影响规律, 设计凹凸谐振腔补偿热透镜效应, 明显提高了激光器输出能量, 实现了 LiNbO_3 声光调 Q Er:YAG 激光器稳定调 Q 高能量激光稳定输出, 适合于中红外宽调谐激光器的泵浦和激光牙组织的无热损伤的应用研究.

2 实验设置

实验装置如图 1 所示, Er:YAG 晶体棒长度为 $\Phi 4\ \text{mm} \times 105\ \text{mm}$, 其中 Er^{3+} 离子掺杂原子浓度为 50%. 晶体棒两端镀有 $2.94\ \mu\text{m}$ 增透膜. 谐振腔腔

长 $255\ \text{mm}$, HR 为反射率大于 99% 的全反镜, OC 为输出耦合镜. 由于 Er:YAG 晶体上能级寿命为 $120\ \mu\text{s}$, 为了能够满足使粒子数尽可能反转的同时尽可能地减小热效应, 并考虑到激光调 Q 振荡特性, 实验中闪光灯的泵浦脉宽选取在 $150\ \mu\text{s}$. 用压缩机制冷去离子水并通过水循环带走泵浦光在激光晶体中产生的剩余热量, 水温保持在 $(291 \pm 0.3)\ \text{K}$, 流量为 $33\ \text{L}/\text{min}$. 本实验中采用新型的 LiNbO_3 晶体作为调 Q 开关, 晶体两端镀有 $2.7\text{--}3.0\ \mu\text{m}$ 增透膜, 声光开关放置在激光晶体与全反镜之间并靠近晶体端面的位置. 声光开关射频频率为 $40.68\ \text{MHz}$, 最大电驱动功率 $40\ \text{W}$.

3 实验系统及测量结果

测量晶体热焦距可为在一定的泵浦功率范围内对激光器进行热透镜效应补偿提供依据, 以此设计合适的热补偿腔型, 改善激光器输出性能, 提高输出能量. 利用临界腔法测量了 $20\ \text{Hz}$ 下 Er:YAG 晶体热焦距, 结果如图 2 所示.

根据 ABCD 矩阵计算可知, 当采用平凸腔进行热焦距补偿时, 凸面镜曲率为 $-5\ \text{mm}$, 不符合实际, 所以设计凹凸腔对晶体热焦距进行补偿. 根据实验室现有条件, 选择输出镜 (OC) 曲率半径为 $-216\ \text{mm}$, 计算可得全反镜 (HR) 曲率的取值范围为 $(288.18, +\infty)$. 在使用凹凸腔补偿热透镜效应时, 应使得 g_1g_2 的乘积尽可能接近 0.5. 在 Matlab 中模拟可知, 随着全反镜曲率增大, g_1g_2 的乘积增长速度越来越缓慢, 最后近似不再增长, 如图 3 所示.

据实验室现有条件, 采用曲率半径分别为 680 , 1000 和 $5000\ \text{mm}$ 凹面镜进行对比实验, 为保护腔内元件, 输出镜反射率为 70%, 使用能量计 (COHERENTJ-50-MB-IR) 对输出能量进行测量. 结果如图 4 所示.

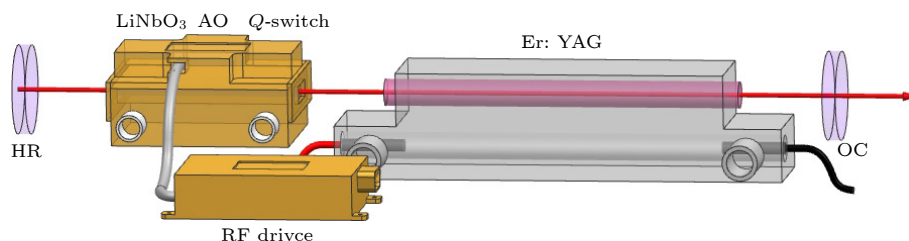


图 1 LiNbO_3 声光调 Q Er:YAG 激光器实验装置图

Fig. 1. Schematic diagram of the Er:YAG laser system with LiNbO_3 -based acousto-optic Q -switch.

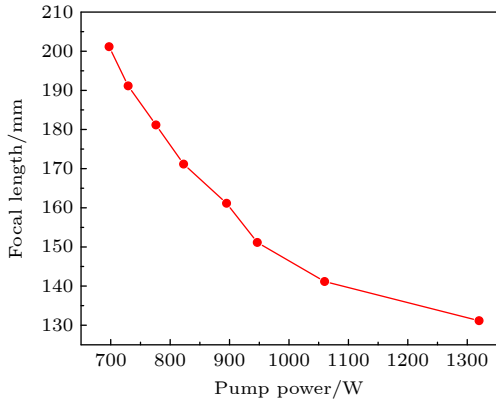


图 2 热焦距随泵浦功率变化趋势

Fig. 2. Trend of thermal focal length with pump power.

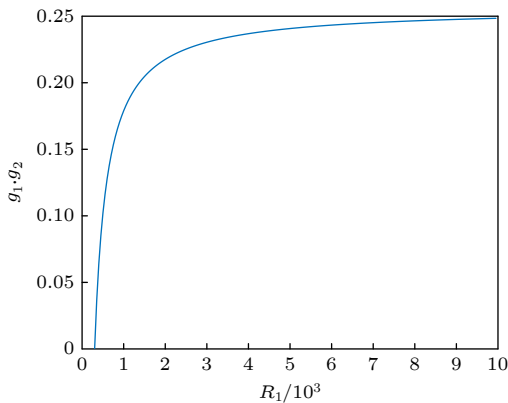


图 3 谐振腔稳定性 g_1g_2 与全反镜曲率半径变化关系

Fig. 3. Stability of the resonant cavity g_1g_2 versus radius of curvature variation in total reflectors.

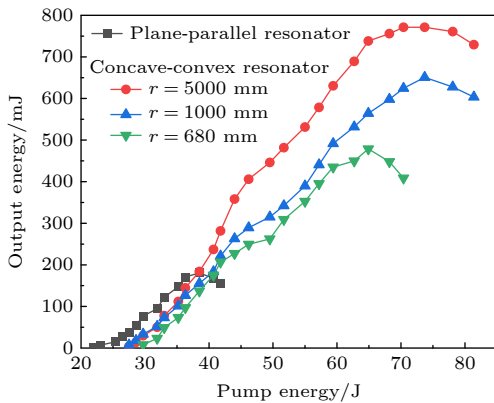


图 4 不同曲率半径下激光器输出能量曲线对比

Fig. 4. Comparison of laser output energy curves at different radii of curvature.

由图 4 可以看出, 全反镜曲率半径为 5000 mm 时, 激光器输出能量最大, 补偿效果最好, 从实验上验证了模拟结果. 激光器在平平腔中输出能量最大为 180.6 mJ, 在凹凸腔中输出能量最大为 771.3 mJ, 提高了 4.27 倍. 凹凸腔结构有效补偿了

Er:YAG 晶体中热效应, 实现了稳定静态输出, 为后面调 Q 实验提供了实验基础.

4 结果与讨论

4.1 调 Q 延时对激光器输出性能的影响

理论分析可知, Q 开关打开最佳时间应该位于泵浦后时候的某一时刻, 此时增益介质上能级的反转粒子数达到最大值. 当 Q 开关过早打开时, 由于增益介质上能级的反转粒子数没有达到最大值就开始起振, 调 Q 输出能量会出现下降, 而后继积累的上能级粒子还可能出现多脉冲现象; 当 Q 开关打开过晚时, 由于增益介质较短寿命的上能级粒子自发辐射损耗, 将降低激光输出脉冲能量. 因此, 需要找到一个最佳的调 Q 延迟时间, 使得激光器实现输出能量最大. 根据氙灯泵浦脉宽, 将延迟时间分别设置在 110, 130, 150, 170, 190, 210 μs 进行实验, 平平腔的实验结果如图 5 所示.

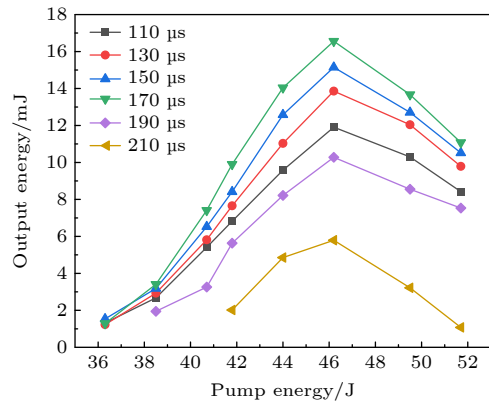


图 5 不同调 Q 延时下输出能量随泵浦能量变化特性曲线

Fig. 5. Characteristic curves of output energy versus pump energy with different Q -delays.

从图 5 可以看出, 当调 Q 延迟时间在 110—170 μs 之间时, 在低能量泵浦情况下, 由于 Er:YAG 激光阈值较高, 超过阈值之上的泵浦能量就显得较少, 此时泵浦脉宽对 LiNbO₃ 声光调 Q Er:YAG 激光器输出能量的影响差别不大. 继续增加泵浦能量, 可以发现: 输出能量随着泵浦能量的增加而增加, 在泵浦能量为 46 J 时, 激光输出能量达到最大; 随后, 由于大的泵浦伴随着强的热效应影响, 激光输出能量随着泵浦能量的增加而减小. 调 Q 延迟时间为 170 μs 时, 激光器实现了输出最大的调 Q 能量, 当延迟时间超过 190 μs 时激光器的输出能

量出现了明显下降, 其原因是由于 Er:YAG 增益介质上能级 ${}^4I_{11/2}$ 寿命仅为 120 μs , 延迟时间太长即 Q 开关打开过晚时, 增益介质上能级寿命远小于该时间, 自发辐射将损耗大量的上能级粒子, 导致激光输出脉冲能量的下降. 170 μs 为本激光器系统最佳的调 Q 延迟时间.

4.2 输出耦合镜反射率对激光器输出性能的影响

为了研究不同反射率对调 Q 激光输出特性的影响, 在重复频率为 20 Hz 的条件下, 将输出耦合镜反射率设置为 70%, 75%, 80%, 85% 进行实验, 平平腔的实验结果如图 6 所示.

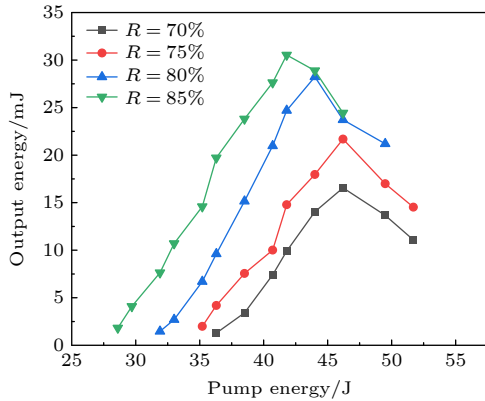


图 6 20 Hz 时不同反射率下调 Q 输出能量随泵浦能量变化的特性曲线

Fig. 6. Characteristic curves of the output energy of Q -switched laser versus pump energy at 20 Hz with different reflectivities.

由图 6 可以看出, 当输出耦合镜的反射率分别为 70%, 75%, 80%, 85% 时, LiNbO₃ 声光调 Q Er:YAG 激光器的最大输出能量分别为 16.56, 21.69, 28.24, 30.53 mJ. 在上述实验中, 反射率为 85% 的耦合镜输出的激光调 Q 能量最大, 达到了 30.53 mJ, 对应的峰值功率为 244.63 kW. 由于反射率为 90% 时的耦合镜会进一步提升腔内激光功率密度, 腔内是腔外的 19 倍, 这可能会对谐振腔镜和晶体的膜层造成损伤. 所以, 未进行反射率为 90% 的输出耦合镜相关的调 Q 实验.

4.3 热效应对激光器输出特性的影响

为研究热效应对激光器输出特性的影响, 设计了凹凸腔与平平腔的对比实验. 为了防止腔内能量密度过高而导致腔内光学元件发生损伤, 在 20 Hz

重复频率下, 采用反射率为 70% 的输出耦合镜进行实验. 由图 7 可知, 在泵浦能量小于 46 J 区间, 平平腔输出激光能量随着泵浦能量的增加而增加; 在泵浦能量大于 46 J 区间, 由于热效应严重未得到补偿, 激光能量随着泵浦能量的增加而下降. 而在凹凸腔中, 其输出激光能量随着泵浦能量的增加一直在增加. 结合图 8 可知, 平平腔和凹凸腔中最大脉冲能量分别为 16.56 mJ 和 34.68 mJ, 对应的脉冲宽度分别为 154.7 ns 和 119.9 ns. 相比平平腔, 凹凸腔的激光器输出能量提高了 2.09 倍, 且脉冲宽度压缩 1.29 倍. 因此, 合适的凹凸腔结构可以在一定泵浦功率范围内有效改善激光器的输出特性.

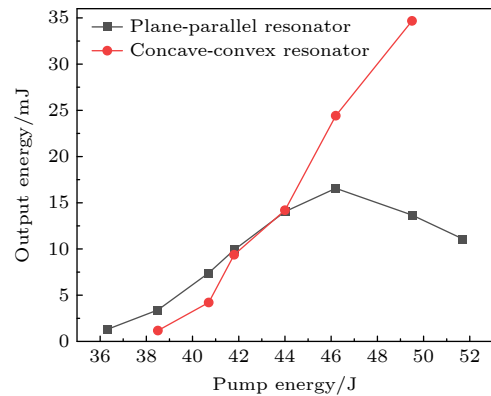


图 7 不同腔型下脉冲能量随泵浦能量的变化曲线

Fig. 7. Curves of pulse energy with pump energy under different cavity types.

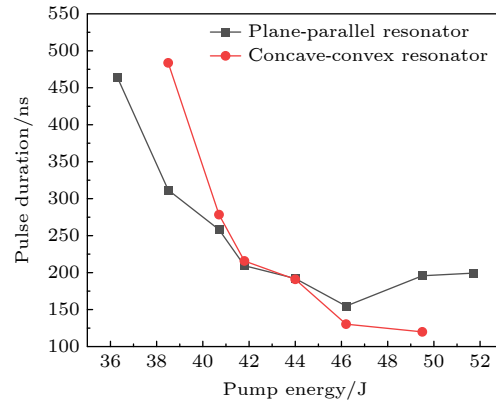


图 8 不同腔型下脉冲宽度随泵浦能量的变化曲线

Fig. 8. Curves of pulse width with pump energy under different cavity types.

在凹凸腔的实验中发现, 当泵浦能量超过 49.5 J 以后, 进一步增加泵浦能量, 其脉宽突然变大, 这表明发生了漏光现象, 其原因是调 Q 开关超声驱动功率不足, 以至于 Q 开关无法关死, 激光脉冲中含有少部分静态激光, 激光器调 Q 性能降低.

另外,为研究 LiNbO₃ 声光调 Q Er:YAG 激光器的稳定性,在重复频率 20 Hz 下,测试了 30 min 的激光输出脉冲能量.结果如图 9 所示,激光器的不稳定性 (SD) 小于 4.09%.说明该激光器具有较高的稳定性,能够在长时间下稳定工作.

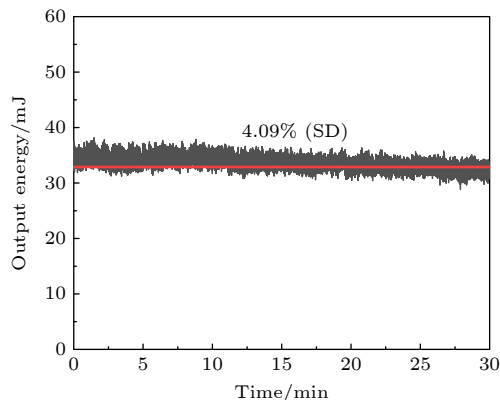


图 9 30 min 内激光器输出能量的稳定性

Fig. 9. Stability of the laser output energy within 30 min.

5 结 论

本文使用 LiNbO₃ 晶体作为声光 Q 开关研制了闪光灯泵浦声光调 Q Er:YAG 激光器,首次实验证实了 LiNbO₃ 可用于 2.94 μm 激光调 Q,并研究了输出脉冲特性,在 20 Hz 重复频率下,获得了激光最大输出能量 34.68 mJ 的声光调 Q 脉冲,为目前该波长声光调 Q 激光器最高输出能量;2.94 μm 调 Q 激光器可实现 200—300 ns 脉冲激光输出,与中红外宽调谐 Fe:ZnSe 激光上能级寿命相匹配;稍宽的纳秒级激光有助于提升激光组织消融效率.研制的 LiNbO₃ 声光调 Q Er:YAG 激光器可以实

现稳定运行,在 30 min 内能量标准偏差 SD 小于 4.09%.本文 LiNbO₃ 开关为 3 μm 波段声光调 Q 技术研究提供了新的途径,有助于拓展调谐中红外激光和临床研究.

参考文献

- [1] Li E, Uehara H, Tokita S, Yao W, Yasuhara R 2023 *Opt. Laser Technol.* **157** 108783
- [2] Martinez A D, Martyskhin D V, Camata R P, Fedorov V V, Mirov S B 2015 *Opt. Mater. Express* **5** 2036
- [3] Jelínková H, Doroshenko M, Jelínek M, Vyhlídal D, Šulc J, Němec M, Kubeček V, Zagoruiko Y, Kovalenko N, Gerasimenko A, Puzikov V, Komar V 2013 *Conference on Solid State Lasers XXII—Technology and Devices San Francisco, CA, February 3–5, 2013* p85990E
- [4] Li E, Uehara H, Yao W, Tokita S, Potemkin F, Yasuhara R 2021 *Opt. Express* **29** 44118
- [5] Huang K, Wang Y Q, Fang J N, Chen H X, Xu M H, Hao Q, Yan M, Zeng H P 2021 *High Power Laser Sci. Eng.* **9** e4
- [6] Kostyukova N Y, Boyko A A, Badikov V, Badikov D, Shevyrdyaeva G, Panyutin V, Marchev G M, Kolker D B, Petrov V 2016 *Opt. Lett.* **41** 3667
- [7] Jiang J T, Wei M E, Xiong Z D, Wu X Y, Cheng T Q, Jiang H H 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 0107001 (in Chinese) [江健涛,魏蒙恩,熊正东,吴先友,程庭清,江海河 2021 *中国激光* **48** 0107001]
- [8] Zajac A, Skorczakowski M, Swiderski J, Nyga P 2004 *Opt. Express* **12** 5125
- [9] Gordienko V, Potemkin F, Pushkin A, Sirotkin A, Firsov V 2015 *J. Russ. Laser Res.* **36** 570
- [10] Yang J W, Wang L, Wu X Y, Jiang H H 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0614002 (in Chinese) [杨经纬,王礼,吴先友,江海河 2012 *光学学报* **32** 0614002]
- [11] Yang J W, Wang L, Wu X Y, Cheng T Q, Jiang H H 2014 *Opt. Express* **22** 15686
- [12] Schnell S, Ostroumov V, Breguet J, Luthy W A, Weber H, Shcherbakov I 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 1111
- [13] Pushkin A V, Mazur M M, Sirotkin A A, Firsov V V, Potemkin F V 2019 *Opt. Lett.* **44** 4837
- [14] Jiang L L, Wu Z C, Cheng T Q, Jiang H H 2022 *Opt. Lett.* **47** 6193

LiNbO₃ acousto-optically *Q*-switched pulse characteristics of Er:YAG laser at 2.94 μm*

Wang Tao-Ning¹⁾²⁾ Jiang Ling-Ling¹⁾²⁾ Cheng Ting-Qing¹⁾
Wang Li³⁾ Jiang Hai-He^{1)2)†}

1) (*Institute of Health and Medical Technology, Hefei Institutes of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(Received 6 October 2023; revised manuscript received 22 November 2023)

Abstract

The 2.94 μm nanosecond erbium laser is an important solid-state laser source in the wide-tuning mid-infrared laser and clinical medical research. In this work, a novel LiNbO₃ acousto-optically *Q*-switched Er:YAG laser is developed, and the effects of different *Q*-switched delay times and output coupler's reflectivities on the laser output pulse characteristics are investigated at a repetition frequency of 20 Hz. A concave-convex resonant cavity is designed to compensate for the thermal lens effect, and a single *Q*-switched pulse is obtained. The maximum pulse energy and minimum pulse duration are 34.68 mJ and 119.9 ns respectively, with corresponding peak power of 289.24 kW. Compared with the plane-plane cavity, the cavity proposed herein increases the output energy by 2.09 times. To our knowledge, this is the highest energy ever obtained in the acousto-optically *Q*-switched Er:YAG laser. This work provides a new means for further studying wide-tuning mid-infrared laser technology.

Keywords: solid-state laser, Er:YAG laser, LiNbO₃ acousto-optic *Q*-switch

PACS: 42.55.Rz, 42.60.Gd

DOI: [10.7498/aps.73.20231616](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231616)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFB0407204).

† Corresponding author. E-mail: hjiang@aiofm.ac.cn



2.94 μm LiNbO₃声光调Q Er:YAG激光输出脉冲特性

王滔宁 姜玲玲 程庭清 王礼 江海河

LiNbO₃ acousto-optically Q-switched pulse characteristics of Er:YAG laser at 2.94 μm

Wang Tao-Ning Jiang Ling-Ling Cheng Ting-Qing Wang Li Jiang Hai-He

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 044205 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231616

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231616>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1064 nm固体激光器和光纤激光器在制备压缩真空态光场实验中的对比研究

Comparative study of squeezed vacuum states prepared by using 1064-nm solid-state and fiber-laser as pump source

物理学报. 2019, 68(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182304>

离轴抽运厄米-高斯模固体激光器

Off-axis pumped Hermite-Gaussian mode solid-state laser

物理学报. 2020, 69(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200086>

声光调Q Nd:YVO₄晶体级联拉曼倍频窄脉宽657 nm激光器

Frequency doubling of acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ cascaded Raman laser for narrow pulse-width 657 nm laser

物理学报. 2021, 70(22): 224209 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210695>

基于腔内球差选模产生高阶拉盖尔-高斯模式激光

High-order Laguerre-Gaussian mode laser generated based on spherical aberration cavity

物理学报. 2022, 71(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211514>

基于单壁碳纳米管调Q锁模低阈值Tm,Ho:LiLuF₄激光器

Passively Q-switched mode-locked low threshold Tm, Ho: LLF laser with a single walled carbon nanotubes saturable absorber

物理学报. 2018, 67(1): 014201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171748>

基于光学tamm态的声光开关的研究

Research on acousto-optic switch based on optical tamm state

物理学报. 2020, 69(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200396>