

文章编号 1672-6634(2021)03-0028-05

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2021.03.004

基于 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的被动 调 Q 微片激光器

王 运,王勇刚,刘思聪,陈兆哲,王慧中,黎 巍

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院,陕西 西安 710119)

摘 要 利用端面泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体搭建了 1064 nm 被动调 Q 微片激光器。采用 100 Hz 脉冲光源泵浦键合晶体,获得了脉冲宽度 1.72 ns、峰值功率 70.3 kW、单脉冲能量 120 μ J 的被动调 Q 脉冲激光,相应的最大光-光转化效率为 4.1%。利用连续光源泵浦,获得了重复频率为 3.1 kHz、脉冲宽度为 3.54 ns 的被动调 Q 脉冲激光。相应的单脉冲能量达到了 158.7 μ J,峰值功率为 44.8 kW,平均输出功率为 492 mW,斜效率为 6.7%。

关键词 微片激光器;被动调 Q;Nd:YAG/Cr:YAG;可饱和吸收体

中图分类号 TN 248.1

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Passive Q-switched Microchip Laser Based on Nd:YAG/Cr:YAG Bonded Crystals

WANG Yun,WANG Yonggang,LIU Sicong,CHEN Zhaozhe,
WANG Huizhong,LI Wei

(School of Physics and Information Technology,Shaanxi Normal University,Xi'an 710119,China)

Abstract The Nd:YAG/Cr:YAG bonded crystal is used to construct the passive Q-switched microchip laser at 1064 nm.A passive Q-switched laser with pulse duration of 1.72 ns,peak power of 70.3 kW and single pulse energy of 120 μ J was obtained by pumping bonded crystal with 100 Hz pulsed light source,and the corresponding maximum light-to-light conversion efficiency was 4.1%.A passive Q-switched laser with repetition rate of 3.1 kHz and pulse duration of 3.54 ns was obtained by pumping continuous light source.The corresponding single pulse energy reached 158.7 μ J,the peak power was 44.8 kW,the average output power was 492 mW,and the slope efficiency was 6.7%.

Key words microchip laser;passive Q-switched;Nd:YAG/Cr:YAG;saturable absorber

收稿日期:2020-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(12075190);陕西省自然科学基金项目(2017JM6091)资助

通讯作者:王勇刚,男,汉族,博士,教授,研究方向:新型激光材料,E-mail:chinawygxjw@snnu.edu.cn.

0 引言

被动调 Q 固体激光器由于其简单的结构、低廉的价格,以及较大的峰值功率和单脉冲能量,被广泛的应用在激光雷达、生物医疗、环境监测、材料加工、激光点火等领域^[1-3]。可饱和吸收体是被动调 Q 固体激光器中至关重要的器件。现阶段主要用于被动调 Q 固体激光器的可饱和吸收体包括染料吸收体^[4]、色心晶体^[5]、半导体可饱和吸收镜^[6]、掺 Cr⁴⁺ 晶体^[7-9]、二维材料^[10-12]等。Cr⁴⁺:YAG 晶体由于其在 1 μm 波段具有较高的损伤阈值,较好的热稳定性,较大的吸收截面,以及较长的使用寿命等特点,被广泛认为是小型全固态激光器的理想被动 Q 开关^[1,13]。为了获得更小型化的激光器和更好的激光输出性能,通常将增益介质和可饱和吸收体连接在一起。Nd:YAG/Cr:YAG 晶体就是利用晶体键合技术将 Nd:YAG 晶体与 Cr:YAG 晶体接合在一起,形成一块整体。这样的结构相比于传统分离晶体的结构具有明显的优势,比如更弱的热效应,更小的腔长等^[14]。由此可以得到更窄的脉冲激光输出,以及更加小型化的激光器^[15]。从 1994 年美国林肯国家实验室首次报道了基于 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的被动调 Q 微型激光器^[16],经过若干年的发展,现在关于 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体被动调 Q 固体激光器的研究也愈发的成熟。2014 年,北京工业大学报道了一种被动调 Q 微型激光器,分别采用[100]切割 Nd:YAG 和[110]切割 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为激光增益介质和被动调 Q 晶体,在重复频率 100 Hz 时,获得单脉冲能量 5 mJ、脉冲宽度 12.98 ns 的激光输出^[17]。2015 年,中科院上海光机所报道了一种 Nd:YAG/Cr:YAG 被动调 Q 微型激光器,重复频率为 8.1 kHz,单脉冲能量为 50.1 μJ,脉冲宽度为 3.2 ns,峰值功率为 15.7 kW^[18]。2019 年,广东省晶体与激光技术工程研究中心将 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 晶体应用在被动调 Q 拉曼激光系统中,获得了最大平均输出功率 0.92 W,重复频率 53.5 kHz,脉冲宽度 3.22 ns 的调 Q 激光输出^[19]。上述相关研究进一步推进了基于 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的被动调 Q 微型激光器的发展,但在获得高输出能量的时候,脉冲宽度却还停留在 3 ns 以上。因此,研究基于 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体被动调 Q 激光器获得高能量和窄脉宽兼顾的激光输出是很有必要的。

利用 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体,搭建了 1064 nm 被动调 Q 微片激光器,腔长为 7 mm。在采用脉冲光源泵浦键合晶体时,获得了脉冲宽度 1.72 ns、单脉冲能量 120 μJ、峰值功率 70.3 kW 的被动调 Q 脉冲激光,并研究了输出激光脉冲的数量和延时特性与泵浦光源能量之间的关系。在采用连续光源泵浦时,获得了脉冲宽度 3.54 ns、平均输出功率 492 mW、重复频率 3.1 kHz 的被动调 Q 脉冲激光。相应的单脉冲能量为 158.8 μJ、峰值功率为 44.8 kW。通过对脉冲泵浦时激光器输出能量随时间变化的测量以及连续泵浦时输出脉冲序列的表征,表明我们搭建的被动调 Q 激光器具有较好的稳定性。

1 实验装置

图 1 为基于 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的被动调 Q 微片激光器的实验装置图。泵浦源为最大输出功率 50 W、中心波长 808 nm 的半导体激光二极管,具有连续光输出和脉冲光输出两种模式。泵浦光通过光纤耦合输出,光纤纤芯直径 100 μm,数值孔径 NA=0.22,从光纤输出的光经过耦合比为 1:1 的耦合镜聚焦在键合晶体上。

实验中用到的增益介质和可饱和吸收体为 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体,尺寸为 3×3×7 mm³。其中增益介质 Nd:YAG 为 1.1% 的 Nd³⁺ 掺杂,长度为 4.8 mm。可饱和吸收体 Cr:YAG 的初始透过率为 35%,长度为 2.2 mm。在键合晶体的 S1 端面镀有 1064 nm 波段高反膜,808 nm 波段高透膜;在 S2 端面镀有 808 nm 波段高反膜,1064 nm 波段部分反射膜,反射率为 70%。将上述键合晶体涂上导热硅脂,侧面用铝箔包裹,固定在紫铜块中。紫铜块与恒温水冷却系统连接,温度设定为 18℃。实验过程中通过光电探测器接收脉冲激光信号,并通过带宽为 1 GHz 的数字示波器观察脉冲序列。

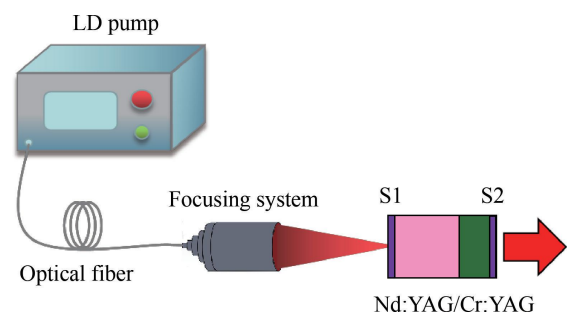


图 1 被动调 Q 微片激光器实验装置图

2 实验结果和分析

2.1 脉冲光泵浦下的激光输出特性

实验中首先采用脉冲泵浦方式,泵浦光的脉宽设定为 $140 \mu\text{s}$,重复频率设定为 100 Hz 。通过改变泵浦源的峰值功率来改变泵浦光的输入能量。图 2(a)为激光输出能量和光-光转化效率随输入能量变化而变化的曲线图。当泵浦光能量大于 2.94 mJ 时,可以观察到被动调 Q 激光脉冲,此时为一个调 Q 激光脉冲。此后,随着输入能量的增大,总输出能量呈阶梯状增加,输出的调 Q 脉冲数目也逐渐增多。这主要是因为单个调 Q 激光脉冲的能量是一定的,激光器在输出下一个脉冲之前,总的输出能量保持不变,呈现平台状。随着输入能量逐渐增大,增益介质上能级继续进行反转粒子数积累,当达到脉冲发射阈值时,将会产生第二个脉冲,输出能量陡然增大,出现第二个平台^[20-23]。在泵浦光能量达到 6.3 mJ 时,激光器输出 4 个调 Q 脉冲,总输出能量为 $480 \mu\text{J}$ 。在每个平台内,激光器光-光转化效率随输入能量的增大而逐渐降低。这是因为在产生第一个脉冲之后,泵浦光的能量还不足以产生第二个脉冲,泵浦光的能量作用于增益介质,使其进行反转粒子数的积累^[21]。在输出单个脉冲时,最大光-光转化效率为 4.1% 。图 2(b)为不同泵浦能量下的输出脉冲序列。在每个泵浦脉冲周期内,当泵浦光能量为 2.94 mJ 时,输出一个调 Q 激光脉冲;泵浦光能量为 4.06 mJ 时,输出两个调 Q 激光脉冲;泵浦光能量为 5.18 mJ 时,输出三个调 Q 激光脉冲;泵浦光能量为 6.3 mJ 时,输出了四个调 Q 激光脉冲。图 2(c)为激光器输出两个脉冲时,脉冲延迟时间随输入能量增大而变化的曲线图。从图中可以看出,脉冲延迟时间随泵浦光能量的增大而逐渐减小,最短时间延迟为 $37.4 \mu\text{s}$ 。这主要是因为 Cr:YAG 晶体在高能量泵浦下饱和吸收速率会增大。图 2(d)为单脉冲能量和峰值功率随泵浦能量变化的曲线图。单脉冲能量和峰值功率随着泵浦光能量的增大波动幅度较小,单脉冲能量在 $120 \mu\text{J}$ 左右,相应的峰值功率为 70 kW 左右。

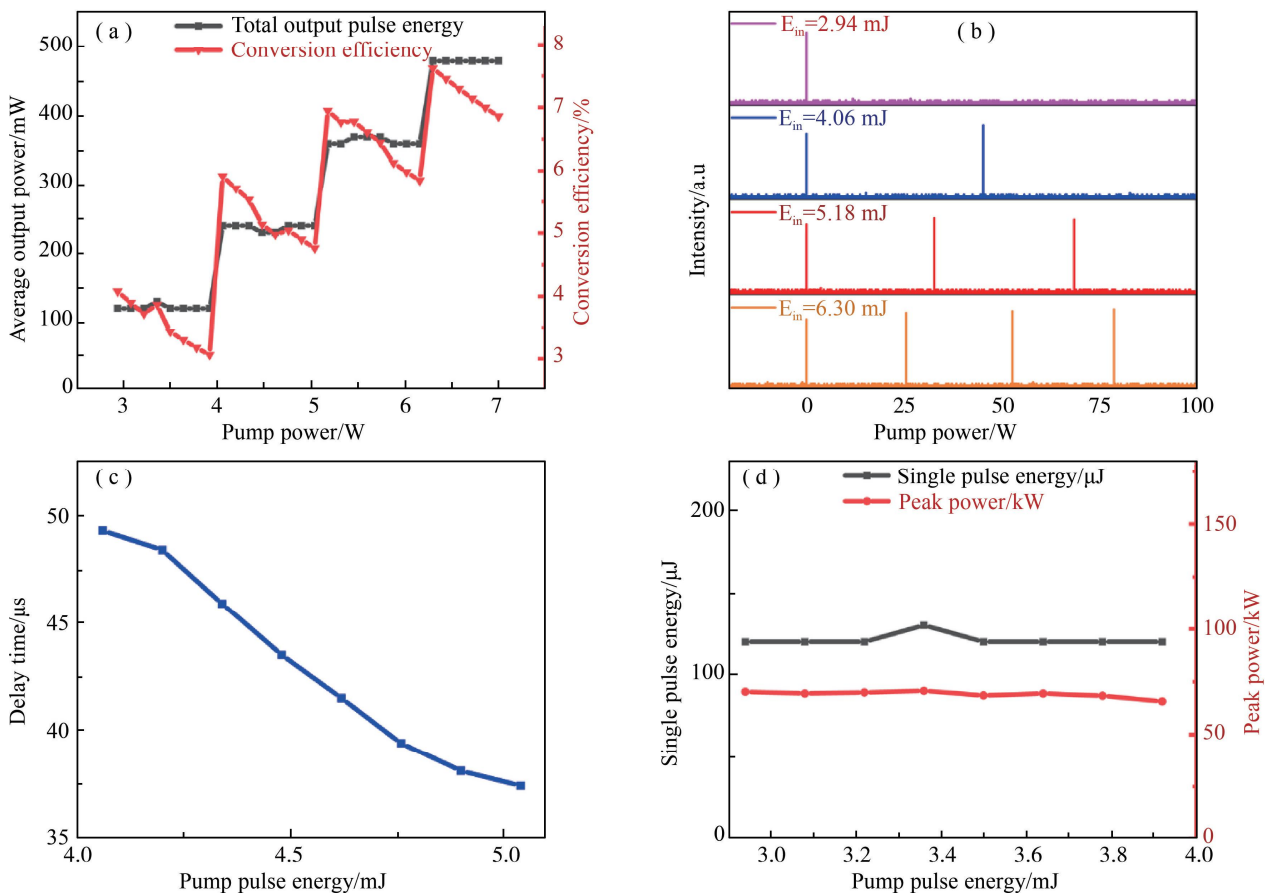


图 2 脉冲光泵浦时被动调 Q 激光结果:(a)总输出能量及光-光转化效率随泵浦光能量变化的曲线;(b)不同泵浦能量下的脉冲序列;(c)激光器发出两个脉冲时脉冲延迟时间随泵浦能量的变化曲线;(d)单脉冲能量和峰值功率随泵浦能量变化的曲线

单脉冲的脉冲波形如图 3(a)所示,其插图为输出激光的远场光强分布。输出激光的脉冲宽度为 1.72 ns ,光束呈现很好的基横模分布。图 3(b)为脉冲宽度与泵浦光能量的关系图。随着泵浦光能量的增大,脉冲宽度维持在 1.72 ns 左右,波动幅度很小。这主要是因为 Cr:YAG 晶体的初始透过率决定了饱和阈值,在

不同泵浦能量下脉冲发射时腔内的光子数基本一样,在损耗不变的情况下,每个脉冲从建立到熄灭的时间和总能量基本不变^[24]。图 3(c)为 15 min 内,输出激光能量随时间变化的曲线图。输出激光能量随时间变化波动性较小,表明我们搭建的激光器具有较好的稳定性。

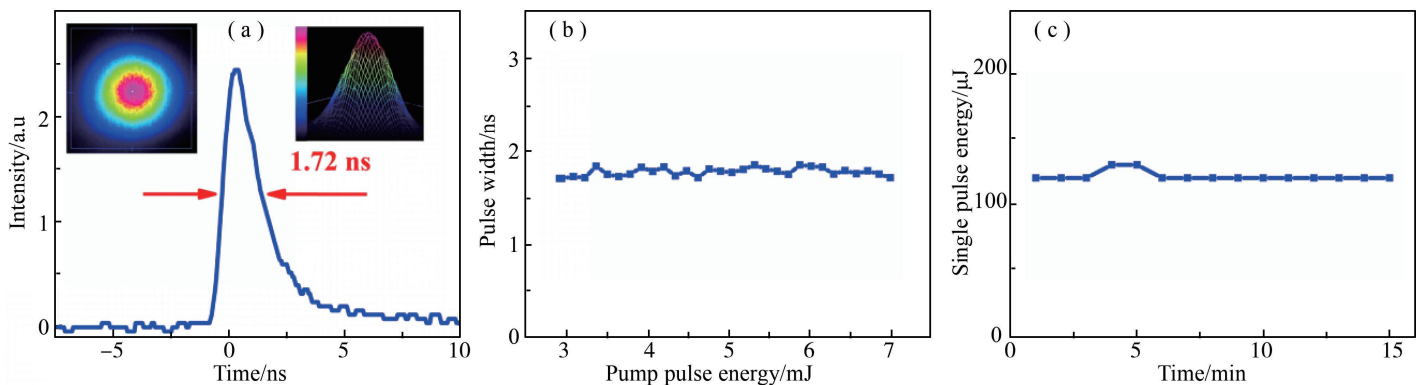


图 3 脉冲光泵浦时被动调 Q 激光结果(a)单脉冲波形和光束质量图;(b)脉冲宽度随泵浦光能量变化的曲线;(c)激光器输出单脉冲能量随时间变化的曲线

2.2 连续光泵浦下的激光输出特性

通过逐渐增大泵浦功率,我们获得了一个稳定的被动调 Q 脉冲激光。平均输出功率与泵浦功率之间的关系如图 4(a)所示。当泵浦功率达到 10 W 时,出现被动调 Q 激光脉冲。泵浦功率在 10 -13.5 W 之间,可以获得稳定的调 Q 脉冲。相应的平均输出功率从 258 mW 增大到 492 mW,斜效率为 6.7%。同时我们记录了不同泵浦功率下的重复频率和脉冲宽度,如图 4(b)所示。重复频率随着泵浦功率的增大而增大,脉冲宽度随着泵浦功率的增大而减小。当泵浦功率增加到 13.5 W 时,最大的重复频率为 3.1 kHz,最短脉冲宽度为 3.54 ns。由于连续光泵浦相比于脉冲光泵浦热效应更强,在继续增加泵浦功率时,脉冲波形开始出现波动,因此最短脉冲宽度相比于脉冲泵浦时所获得的结果更宽。输出脉冲的单脉冲波形如图 4(c)所示。

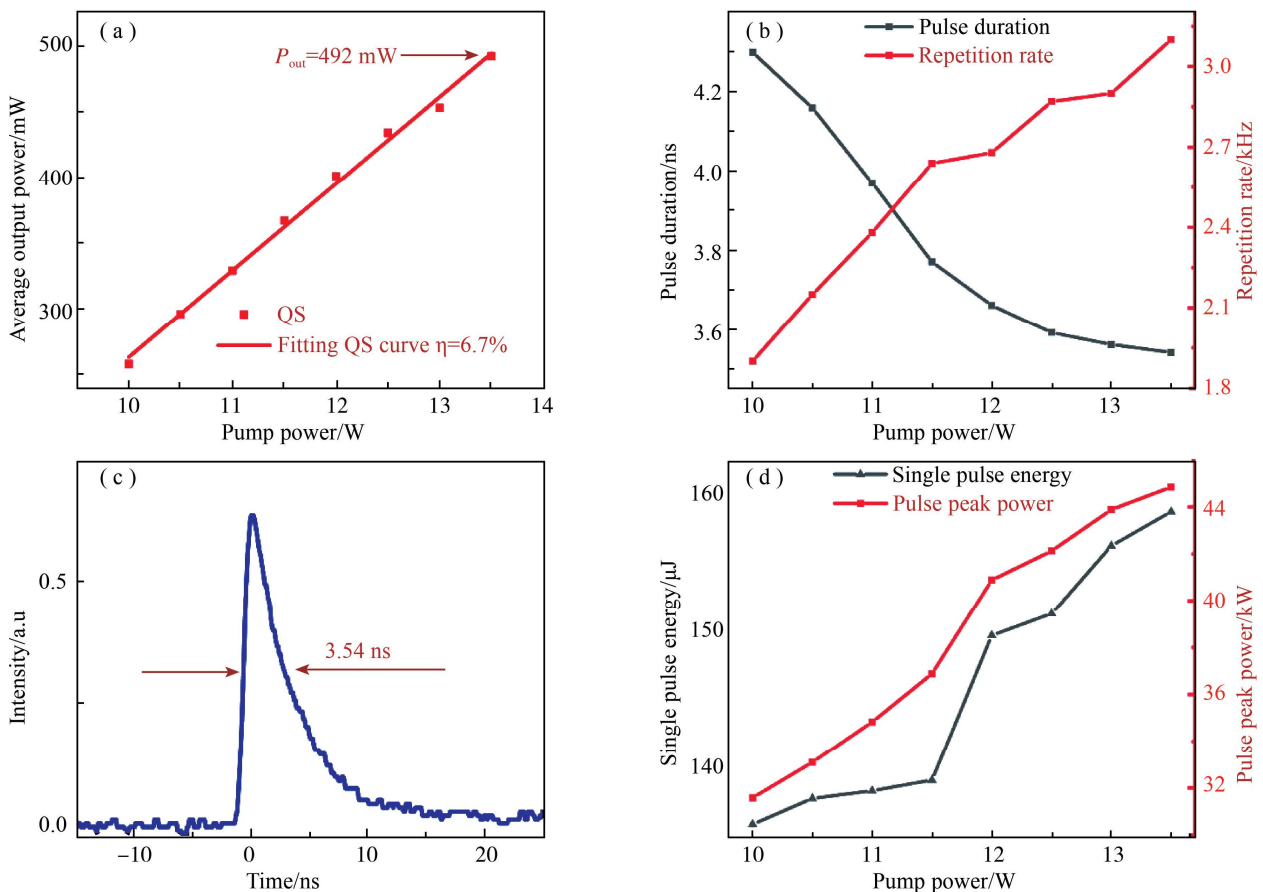


图 4 连续光泵浦时被动调 Q 激光结果(a)平均输出功率随泵浦功率变化的曲线;(b)脉冲宽度和重复频率随泵浦功率变化的曲线;(c)单脉冲波形;(d)单脉冲能量和峰值功率随泵浦功率变化的曲线

根据重复频率和脉冲宽度,我们定量的计算了输出激光的单脉冲能量和峰值功率,如图 4(d)所示。单脉冲

能量和峰值功率随泵浦功率的增加而单调增加。当泵浦功率达到 13.5 W 时,最大单脉冲能量达到了 158.7 μJ ,最大峰值功率为 44.8 kW。图 5 为三个不同泵浦功率下的脉冲序列图,直观的展示了重复频率随泵浦功率变化的情况。随着泵浦功率的增大,脉冲数目增多,重复频率增大。并且从图中可以看出,脉冲抖动较小,激光器的调 Q 状态较为稳定。

3 结论

利用 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体搭建了 1064 nm 被动调 Q 微片激光器。采用脉冲激光端面泵浦方式,获得了脉冲宽度 1.72 ns、单脉冲能量 120 μJ 、峰值功率 70 kW 的被动调 Q 脉冲激光,相应的最大光-光转化效率为 4.1%。研究了脉冲泵浦光激发 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体产生调 Q 激光的输出特性,发现可以通过控制单个泵浦周期内泵浦光源的能量,调节输出激光脉冲的数目以及延迟时间。利用连续光源泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体,获得了脉冲宽度 3.54 ns、重复频率 3.1 kHz、单脉冲能量 158.7 μJ 、峰值功率 44.8 kW、平均输出功率 492 mW 的被动调 Q 脉冲激光,相应的斜效率为 6.7%。对比之下,发现脉冲光源泵浦相比于连续光源泵浦更易获得窄脉宽的调 Q 脉冲激光。通过对脉冲泵浦时激光器输出能量随时间变化的测量以及连续泵浦时输出脉冲序列的表征,表明我们搭建的被动调 Q 激光器具有较好的稳定性。这种窄脉宽、高能量且具有高稳定性的微型激光器在激光加工、激光点火、激光医疗等领域的应用具有重要意义。

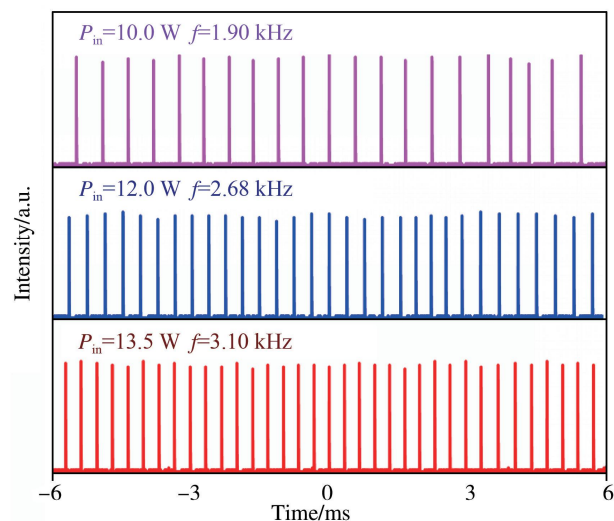


图 5 连续光泵浦时不同泵浦功率下的脉冲序列

参 考 文 献

- [1] WANG Y, LIU S C, WANG J, et al. High-Power Passively Q-Switched Nd:YVO₄ Laser Based on WS₂ Saturable Absorber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(13): 831-834.
- [2] GUO X Y, TOKITA S, KAWANAKA J. 12 mJ Yb:YAG/Cr:YAG microchip laser[J]. Optics Letters, 2018, 43(3): 459-461.
- [3] DASCA L T, CROITORU G, GRIGORE O, et al. High-peak-power passively Q-switched Nd:YAG/Cr³⁺:YAG composite laser with multiple-beam output[J]. Photon Res, 2016, 4(6): 267-271.
- [4] OUSLIMANI H, BASTARD L, BROQUIN J E. Narrow-linewidth Q-switched DBR laser on Ytterbium-doped glass[J]. Ceramics International, 2015, 41(7): 8650-8654.
- [5] MEN S J, LIU Z J, CONG Z H, et al. Tunable narrow line-width LiF:F₂ color center laser[J]. Optics Communications, 2014, 324: 160-164.
- [6] NODOP D, LIMPERT J, HOHMUTH R, et al. High-pulse-energy passively Q-switched quasi-monolithic microchip lasers operating in the sub-100-ps pulse regime[J]. Optics Letters, 2007, 32(15): 2115-2117.
- [7] DOU X T, YANG J N, MA Y J, et al. Passive Q-Switching of a Yb:LuVO₄ Laser with Cr³⁺:YAG: Approaching the Intrinsic Upper Limit of Repetition Rate[J]. Chin Phys Lett, 2018, 35(6): 064201.
- [8] DRUON F, BALEBOIS F, GEORGES P, et al. High-repetition-rate 300-ps pulsed ultraviolet source with a passively Q-switched microchip laser and a multipass amplifier[J]. Optics Letters, 1999, 24(7): 499-501.
- [9] GUO X Y, TOKITA S, FUJIOKA K, et al. High beam quality, efficient operation of passively Q-switched Yb:YAG/Cr:YAG laser pumped by photonic crystal surface emitting laser[J]. Appl Phys B, 2017, 123: 194.
- [10] HUANG X S, HUI Y L, JIANG M H, et al. Passively Q-switched Nd:YAG/Cr³⁺:YAG micro laser with high beam quality[C]. High Power Lasers, High Energy Lasers, and Silicon-based Photonic Integration, Beijing: Proc of SPIE, 2016.
- [11] WANG J, CHEN Z D, WANG Y G, et al. Molybdenum Disulfide Film Saturable Absorber Based on Sol-Gel Glass and Spin-Coating Used in High-Power Q-Switched Nd:YAG Laser[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12: 9404-9408.
- [12] 王江, 汪太进, 刘思聪, 等. 基于 Langmuir-Blodgett 技术制备的二硫化钨可饱和吸收体在调 Q 固体激光器中的研究[J]. 聊城大学学报, 2019, 32(5): 15-18.
- [13] 郭俊宏, 段延敏, 张静, 等. Nd:YAG/Cr³⁺:YAG/YAG 键合晶体调 Q 激光输出特性研究[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 0214002.
- [14] 宋琦, 王国菊, 张丙元, 等. Nd:YAG/Cr³⁺:YAG 晶体的被动调 Q 运转特性研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2014, 27(4): 90-94.

- [26] PEGG D T, PHILLIPS L S, BARNETT S M. Optical state truncation by projection synthesis[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 98:1604.
- [27] BLANDINO R, LEVERRIER A, BARBIERI M, et al. Improving the maximum transmission distance of continuous-variable quantum key distribution using a noiseless amplifier[J]. *Phys Rev A*, 2012, 86:012327.
- [28] GHALALI M, OTTAVIANI C, KUMAR R, et al. Long-distance continuous-variable quantum key distribution with quantum scissors[J]. 2018, arXiv:1808.01617 [quant-ph].
- [29] GHALALI M, OTTAVIANI C, KUMAR R, et al. Discrete-modulation continuous-variable quantum key distribution enhanced by quantum scissors[J]. 2019, arXiv:1907.13405 [quant-ph].
- [30] HU L Y, AL A M, LIAO Z Y, et al. Entanglement improvement via a quantum scissor in a realistic environment[J]. *Phys Rev A*, 2019, 100:052322.
- [31] YANG S, ZHANG S L, ZOU X B, et al. Improving noiseless linear amplification for optical quantum communication with quadrature squeezing[J]. *Phys Rev A*, 2013, 87:024302.
- [32] ZHANG K Z, HU L Y, YE W, et al. Preparation and non-classicality of non-Gaussian quantum states based on catalytic quantum scissors[J]. *Laser Phys Lett*, 2019, 16:015204.
- [33] YU X, ZHAO X, SHEN L Y, et al. Maximal quantum Fisher information for phase estimation without initial parity[J]. *Opt. Express*, 2018, 26:16292.
- [34] 张欢,周维东,叶炜,等.基于催化式 KLM 型干涉仪实现非高斯量子态的制备及非经典性的研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2019, 32(6):21-27.
-

(上接第 32 页)

- [15] DONG J, UEDA K, SHIRAKAWA A, et al. Composite Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22):14516-14523.
- [16] ZAYHOWSKI J J, DILL I C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(18):1427-1429.
- [17] SUN Z, LI Q, CHEN X, et al. Stable polarized diode-pumped passively Q-switched [100]-cut Nd:YAG laser with Cr⁴⁺:YAG crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 60(8):56-60.
- [18] 韩伙辉,夏克贵,李桂运,等.3.2 ns 高峰值功率 YAG/Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体被动调 Q 径向偏振微片激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(07):69-73.
- [19] JIANG C, CHEN Y Y, MEI S H, et al. Investigation of a passively Q-switched Raman laser at 1176 nm with Nd³⁺:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal and a coupled cavity[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51:380.
- [20] TSUMEKANE M, TAIRA T. High Peak Power Passively Q-Switched Yb:YAG/Cr:YAG Micro-Lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(5):454-461.
- [21] TSUNEKANE M, INOHARA T, KANEHARA K, et al. Micro-Solid-State Laser for Ignition of Automobile Engines[M]. *Advances in Solid State Lasers Development and Applications*. Tokyo: Intech, 2010.
- [22] LEE K, LEE H C, CHO J Y, et al. Passively Q-switched high peak power Nd:YAG laser pumped by QCW diode laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7):2053-2057.
- [23] 高旭恒,吴立志.基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体结构的被动调 Q 固体微片激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6):061401.
- [24] 李景照,陈振强,朱思祁.基于 Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG 键合晶体的高峰值功率短脉冲激光器[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6):0606007.