

小时间抖动、高重复频率 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器

王煜^{**}, 姜梦华, 惠勇凌, 雷訇, 李强^{*}

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 报道了一种小时间抖动、高重复频率 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器。该激光器以 808 nm 单管激光二极管作为抽运源, 基于切割方向为 [001] 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体在一定入射光功率密度下的极化取向特性, 采用偏振抽运的方式, 使抽运光偏振方向与晶轴方向平行, 将 Nd:YAG 晶体吸收后剩余的抽运光全部用于漂白 Cr⁴⁺:YAG 晶体该晶轴方向的电偶极子。结果表明, 采用偏振抽运的方式, 通过优化切割方向为 [001] 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体取向, 可以有效减小 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器输出脉冲时间抖动。

关键词 激光器; 时间抖动; Cr⁴⁺:YAG; 被动调 Q; 各向异性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1014004

Passively Q-Switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG Microchip Laser with Low Time Jitter and High Repetition Rate

Wang Yu^{**}, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang^{*}

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract A passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser with a low time jitter and a high repetition rate is reported, which uses a single-tube laser diode with a wavelength of 808 nm as the pumping source. Based on the polarization orientation characteristic of a Cr⁴⁺:YAG crystal with a cutting direction of [001] at a certain incident beam power density, the polarized pumping method is chosen to make the polarization direction of the pumping light parallel to the crystallographic axis direction and all of the residual pumping light after absorption by the Nd:YAG crystal is used for bleaching the electric dipoles along the crystallographic axis direction of the Cr⁴⁺:YAG crystal. The results show that the output pulse time jitter of the Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched microchip laser can be effectively reduced with the optimization of the orientation of the Cr⁴⁺:YAG crystal with a cutting direction of [001] when the polarized pumping method is adopted.

Key words lasers; time jitter; Cr⁴⁺:YAG; passive Q-switching; anisotropy

OCIS codes 140.3580; 140.3425; 140.3540; 140.3480

1 引 言

调 Q 固态激光器在科研、工业、军事等领域有着广泛的应用, 被动调 Q 固态激光器具有设计简单、结构紧凑、成本低、重量轻等优点, 特别是由 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体构成的微型激光器, 可广泛应用于激光雷达、激光测距等领域^[1-3]。在这些测量应用中, 提高激光器输出脉冲的重复频率将有利于测量精度的提高。

输出脉冲中存在时间抖动, 导致 Nd:YAG/

Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器的性能大大降低。时间抖动是由各种随机扰动引起的, 包括抽运光功率和光谱的波动、增益介质中的热梯度以及自发辐射噪声等, 这些扰动会影响激光器阈值, 使腔内形成激光振荡的时间相对于抽运脉冲开始的时间会有微小的变化, 影响测量结果。为减小输出脉冲的时间抖动, 被动调 Q 微型激光器通常采用增益预抽运技术^[4-5]对抽运源进行调制。Lai 等^[4]采用增益预抽运技术, 当重复频率为 8 kHz 时, 实现了脉冲时间抖动优于 2.5 μs 的脉冲激光输出。Tian 等^[6]以光

收稿日期: 2018-04-13; 修回日期: 2018-05-10; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(61378023)、北京市自然科学基金(KZ201610005006, 4174085)

* E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn; ** E-mail: wangyubgd@emails.bjut.edu.com

纤耦合激光二极管作为抽运源,并结合增益预抽运技术,当重复频率为 1 kHz 时,实现了脉冲时间抖动为 $12 \mu\text{s}$ 的激光输出。Gong 等^[7]以光纤耦合激光二极管作为抽运源,并结合增益预抽运和纵模控制技术,当重复频率为 100 kHz 时,实现了脉冲时间抖动为 $0.2 \mu\text{s}$ 的激光输出。

在上述 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器中,均以光纤耦合激光二极管作为抽运源,即采用非偏振抽运源,而没有考虑以 Cr⁴⁺:YAG 晶体为可饱和吸收体时,抽运光偏振特性对输出脉冲时间抖动的影响。在 Nd:YAG 微型激光器中,切割方向为 [001] 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体是最重要的被动调 Q 晶体之一。Sakai 等^[8-9]研究了沿不同方向偏振的入射光经过 Cr⁴⁺:YAG 晶体的透过率,以切割方向为 [110] 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为可饱和吸收体,当激光偏振方向与 Cr⁴⁺:YAG 晶体晶轴平行时,可以获得性能稳定的线偏振激光输出。Sun 等^[10]以切割方向为 [001] 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为可饱和吸收体,当重复频率为 20 kHz 时,实现了可控消光比的脉冲激光输出。切割方向为 [001] 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体的极化取向特性对输出激光的偏振特性有着重要影响。

本文报道了一种性能稳定的小时间抖动、高重复频率激光二极管端面抽运 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器。以波长为 808 nm 的单管激光二极管作为抽运源,通过旋转 Cr⁴⁺:YAG 晶体,研究了 Cr⁴⁺:YAG 晶体在不同取向条件下的输出脉冲时间抖动,并对实验结果进行了定性分析。结果表明,采用偏振抽运的方式,通过优化切割方向为 [001] 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体取向,可以有效减小 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器输出脉冲的时间抖动。

2 实验装置

激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器的结构如图1所示。激光器增益介质是原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体,尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。厚度为 1 mm、切割方向为 [001] 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体与 Nd:YAG 晶体热键合在一起作为可饱和吸收体,初始透过率为 45%。两块厚度为 1 mm 的未掺杂 YAG 晶体分别热键合在晶体两端,以减少热膨胀引起的表面应力。YAG-Nd:YAG-Cr⁴⁺:YAG-YAG 复合晶体两端面构成平平腔,腔长为 5 mm。在复合晶体的抽

运端面镀 808 nm 高透、1064 nm 全反双色膜,在复合晶体输出端面镀 1064 nm、反射率 R 为 85% 的部分反射率膜。复合晶体用钢箔包裹并放置于紫铜热沉中,水循环冷却温度设置为 $21.7 \text{ }^\circ\text{C}$,如图 2 所示。抽运源是功率为 5 W、波长为 808 nm 的激光二极管,其发光面积为 $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,抽运光经焦距分别为 5.5 mm 和 4 mm 的组合透镜准直聚焦后进入 Nd:YAG 晶体,抽运光聚焦后,光斑大小约为 $80 \mu\text{m} \times 84 \mu\text{m}$ 。对激光二极管电源进行调制,获得周期性变化的脉冲电流输出,脉冲电流的最窄宽度为 $5 \mu\text{s}$ 。

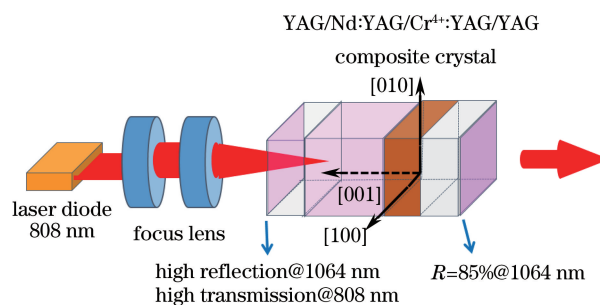


图1 LD端面抽运 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器示意图

Fig. 1 Schematic of LD end pumped and passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser

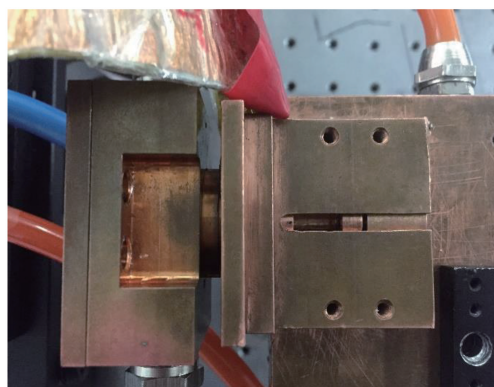


图2 LD端面抽运 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微型激光器实验装置

Fig. 2 Experimental device of LD end pumped and passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser

3 实验结果与分析

以输出激光为轴,逆时针旋转复合晶体,将抽运光偏振方向与 [010] 之间的夹角设定为 α 。为了测量输出脉冲的时间抖动,示波器采用自动设置,触发电平略大于零,示波器对光脉冲信号有非常好的响应,能够实时记录每一个脉冲,打开示波器无限余晖功能,示波器能够持续记录一段时间内的所有脉冲

叠加波形,经过 2 min 后(测量时间大于 2 min 后,所得到的时间抖动基本相同),通过测量脉冲波形的时间弥散范围,得到输出脉冲的时间抖动。实验测得输出脉冲时间抖动随 α 的周期性变化,如图 3 所示。当 α 为 0° 、 90° 、 180° 和 270° 时,即当抽运光偏振方向与 $[100]$ 或 $[010]$ 平行时,输出脉冲的时间抖动明显减小,约为 $0.1 \mu\text{s}$,输出脉冲时间抖动不稳定性小于 $\pm 0.5\%$ 。当转到其他角度时,输出脉冲的时间抖动均增大。当 α 为 45° 、 135° 、 225° 和 315° 时,即当抽运光偏振方向与切割方向为 $[001]$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体晶轴间的夹角为 45° 时,输出脉冲的时间抖动最大,约为 $0.3 \mu\text{s}$ 。 α 分别为 0° 和 45° 时测得的输出脉冲时间抖动如图 4 所示。由图 4 可知,在偏振抽运条件下,当抽运光偏振方向与晶轴方向平行时,输出脉冲的时间抖动明显减小。

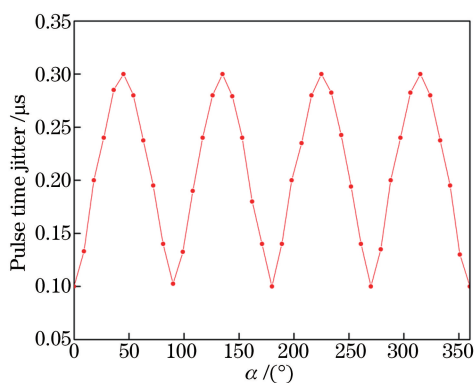


图 3 输出脉冲时间抖动随 α 的变化曲线
Fig. 3 Output pulse time jitter versus α

由图 4 可以读出示波器统计得到的脉冲幅值的标准差和均值。计算可得:当 $\alpha = 0^\circ$ 时,幅值不稳定性约为 $\pm 0.67\%$;当 $\alpha = 45^\circ$ 时,幅值不稳定性约为 $\pm 0.98\%$ 。在相同的条件下,同时测得 α 为 10° 、 25° 和 35° 时的幅值不稳定性分别为 $\pm 0.73\%$ 、 $\pm 0.84\%$ 和 $\pm 0.93\%$ 。可以看出,当抽运光偏振方向与晶轴方向平行时,输出脉冲的幅值稳定性也稍有提高。实验测得 α 分别为 0° 和 45° 时,输出单脉冲能量分别为 $4.8 \mu\text{J}$ 和 $4.6 \mu\text{J}$ 。可以看出,当抽运光偏振方向与晶轴方向平行时,输出单脉冲能量略有提高。图 5 所示是 α 分别为 0° 和 45° 时测量所得的脉冲序列图,可以看出,这两种情况的激光脉冲都比较稳定。单个脉冲的波形如图 6 所示,其脉冲宽度取脉冲波形的半峰全宽。从图 6 可以看出,这两种情况的脉冲宽度基本相同,约为 2.6 ns 。实验测得 α 分别为 0° 和 45° 时,输出激光光束质量为 1.17,图 7 所示为输出激光远场光斑形状和光束质量,其中 d 为

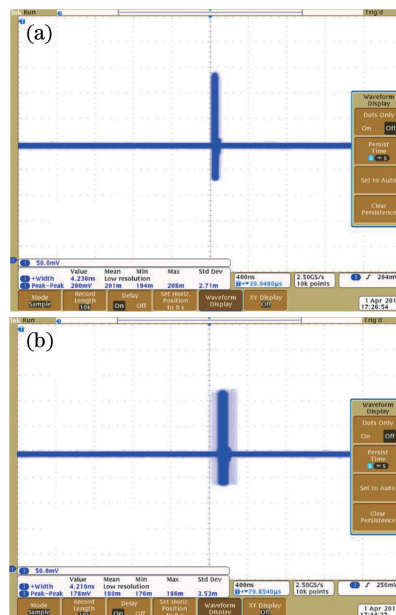


图 4 不同 α 下重复频率为 100 kHz 时输出脉冲的时间抖动。(a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 45^\circ$
Fig. 4 Output pulse time jitters when repetition rate is 100 kHz but for different α . (a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 45^\circ$

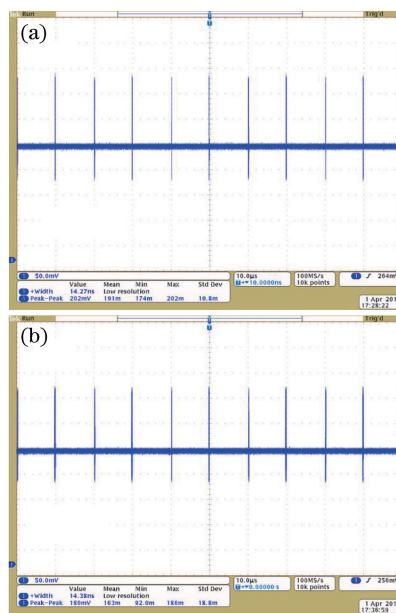


图 5 不同 α 下重复频率为 100 kHz 时的输出脉冲序列。(a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 45^\circ$
Fig. 5 Output pulse sequences when repetition rate is 100 kHz but for different α . (a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 45^\circ$

光斑直径。光束质量的测量方法:加入衰减片对光束进行衰减,再加入焦距为 $f = 150 \text{ mm}$ 的透镜对光束进行压缩,然后通过 CCD 分别测出光束束腰前后对称位置光斑的直径,拟合求得光束质量因子。

为进一步了解输出脉冲时间抖动随 α 的变化情况,采用偏振分束镜(PBS)和功率计对输出激光的

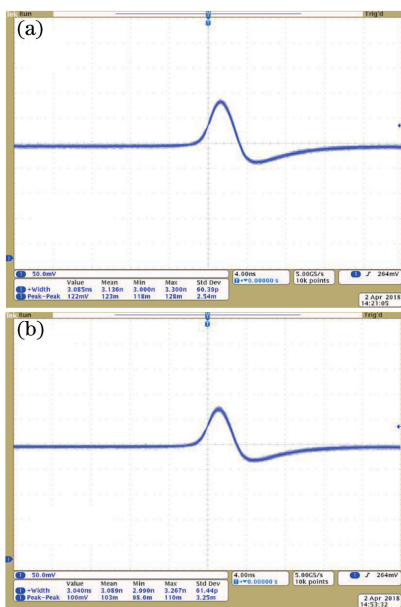


图 6 不同 α 下重复频率为 100 kHz 时的单脉冲波形。
(a) $\alpha=0^\circ$; (b) $\alpha=45^\circ$

Fig. 6 Single pulse waveform when repetition rate is 100 kHz but for different α . (a) $\alpha=0^\circ$; (b) $\alpha=45^\circ$

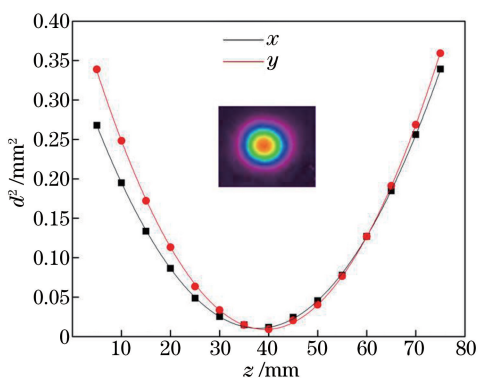


图 7 微型激光器输出光束质量及远场光斑形状
Fig. 7 Output beam quality and far-field beam spot shape of microchip laser

消光比进行测量,测量结果如图 8 所示。实验测得输出激光消光比也随 α 发生周期性变化。当 α 为 0° 、 90° 、 180° 和 270° 时,输出激光消光比最高,约为 300:1,同时输出激光偏振方向也与晶轴方向平行。当 α 为 45° 、 135° 、 225° 和 315° 时,输出激光是非偏振光。因此,在偏振抽运条件下,当抽运光偏振方向与切割方向为 $[001]$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体晶轴平行时,可同时实现小脉冲时间抖动和高消光比的偏振激光输出。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在小信号(小于 $2 \text{ MW}/\text{cm}^2$) 时的透过率是各向同性的,随着入射光透过率的增大($2\sim 100 \text{ MW}/\text{cm}^2$),晶体内部用于吸收 $1 \mu\text{m}$ 附近激光的电偶极子的振动方向与 YAG 晶轴平行,

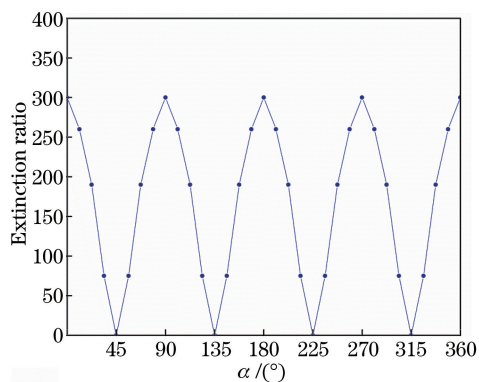


图 8 输出激光消光比随 α 的变化曲线

Fig. 8 Output laser extinction ratio versus α

但 1064 nm 偏振激光的透过率会表现出各向异性^[11-12](图 9)。对于切割方向为 $[001]$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体,在一定入射光功率密度下,内部电偶极子的振动方向与晶体 $[100]$ 和 $[010]$ 晶轴平行,腔内 1064 nm 激光容易在 $[100]$ 和 $[010]$ 这两个晶轴方向起振;同时考虑到 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在室温下的吸收光谱^[13](图 10), $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在 $1 \mu\text{m}$ 处存在一个很宽的吸收带,可吸收 Nd:YAG 增益介质中的 1064 nm 自发辐射噪声和经过 Nd:YAG 晶体吸收后剩余的 808 nm 抽运光。

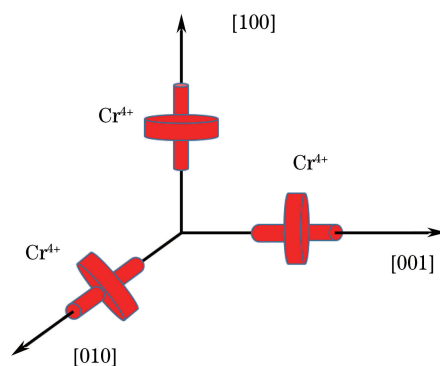


图 9 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体中 Cr^{4+} 的三种取向的结构示意图

Fig. 9 Structural diagram of three orientations of Cr^{4+} in $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal

在本实验中,当抽运光偏振方向与 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的 $[010]$ 晶轴方向平行时(图 1),即夹角 α 为 0° 或 180° 时,经过 Nd:YAG 晶体吸收后剩余的 808 nm 抽运光可以对 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体进行漂白(图 10),考虑到 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在一定入射光功率密度下,其内部电偶极子的振动方向与晶体的 $[100]$ 和 $[010]$ 晶轴方向对应,如图 9 所示,此时剩余抽运光偏振方向与 $[010]$ 晶轴方向上电偶极子的振动方向对应,因此,剩余抽运光全部用于漂白该晶轴方向上的电偶极子,在一个抽运周期内, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

晶体在该方向优先达到饱和并被漂白,每个脉冲期间 Q 开关的开关速度增加,从而输出脉冲时间抖动明显减小。同样,当抽运光偏振方向与 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的 $[100]$ 晶轴方向平行时,即当夹角 α 为 90° 或 270° 时,输出脉冲时间抖动与夹角 α 为 0° 或 180° 时的结果相同。而当抽运光偏振方向与 $[010]$ 或 $[100]$ 晶轴方向不平行时,即夹角 α 不等于 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 或 270° 时,由于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体内部电偶极子的振动方向与晶体的 $[100]$ 和 $[010]$ 晶轴方向对应,剩余偏振抽运光只有其投影分量与 $[010]$ 晶轴方向上电偶极子的振动方向对应,用于漂白该晶轴方向上电偶极子的抽运光强度减小,导致一个抽运周期内 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的漂白能力变弱, Q 开关打开的速度变慢,因此输出脉冲时间抖动增大。

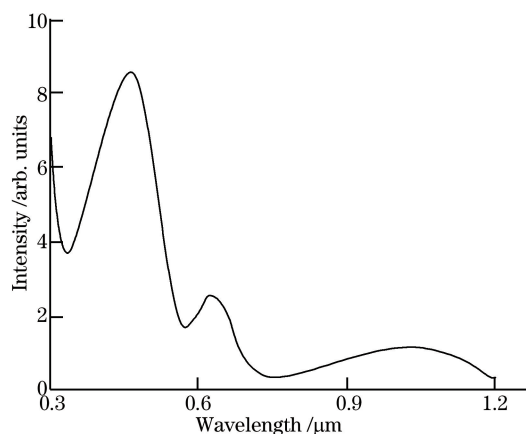


图 10 室温下 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的吸收谱

Fig. 10 Absorption spectrum of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal at room temperature

4 结 论

报道了一种性能稳定的小时间抖动、高重复频率的激光二极管端面抽运 $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 微型激光器。根据切割方向为 $[001]$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在一定入射光功率密度下的极化取向特性,以 808 nm 单管激光二极管为抽运源,使抽运光偏振方向与 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的晶轴方向平行,将 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体吸收后剩余的抽运光全部用于漂白 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体该晶轴方向上电偶极子对,从而加快了每个脉冲期间 Q 开关的开关速度,实现了小时间抖动线偏振脉冲激光输出。当重复频率为 100 kHz 时,激光输出脉冲时间抖动为 $0.1 \mu\text{s}$,时间抖动不稳定性小于 $\pm 0.5\%$,幅值不稳定性小于 $\pm 0.67\%$,脉冲宽度为 2.6 ns,单脉冲能量为 $4.8 \mu\text{J}$,光束质量为 1.17,消光比大于 300:1。因此,采用偏

振抽运的方式,通过优化切割方向为 $[001]$ 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体取向,可以有效减小 $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 微型激光器输出脉冲的时间抖动,进一步提高激光器的应用性能。

参 考 文 献

- [1] Zayhowski J J. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 303/304: 393-400.
- [2] Dong J, Wang G Y, Ren Y Y. Advances in passively Q-switched solid-state lasers based on composite materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0601003.
董俊,王光宇,任滢滢. 基于复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601003.
- [3] Liu Q, Meng J Q, Zu J F, *et al.* High repetition frequency narrow pulse electro-optically Q-switched laser for space applications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601005.
刘琪,孟俊清,祖继锋,等. 适于空间应用的高重复频率窄脉冲电光调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601005.
- [4] Lai N D, Brunel M, Bretenaker F, *et al.* Stabilization of the repetition rate of passively Q-switched diode-pumped solid-state lasers[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(8): 1073-1075.
- [5] Khurgin J B, Jin F, Solyar G, *et al.* Cost-effective low timing jitter passively Q-switched diode-pumped solid-state laser with composite pumping pulses [J]. Applied Optics, 2002, 41(6): 1095-1097.
- [6] Tian X, Yan P, Liu Q, *et al.* Pre-pumped passively Q-switched Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ microchip laser[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(9): 536-537.
- [7] Gong M, Wang Y, Wang D, *et al.* Stable 100 kHz operation of passively Q-switched microchip laser[J]. Electronics Letters, 2006, 42(13): 760-762.
- [8] Sakai H, Kan H, Taira T, *et al.* > 1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ microchip laser[J]. Optics Express, 2008, 16(24): 19891-19899.
- [9] Bhandari R, Taira T. Megawatt level UV output from $[110]$ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched microchip laser[J]. Optics Express, 2011, 19(23): 22510-22514.
- [10] Sun Z, Li Q, Su Y L, *et al.* Controllable polarization for passively Q-switched Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ laser[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56: 269-272.

- [11] Eilers H, Hoffman K R, Dennis W M, *et al.* Saturation of 1.064 μm absorption in Cr: Ca:Y₃Al₅O₁₂ crystals[J]. Applied Physics Letters, 1992, 61(25): 2958-2960.
- [12] Brunel M, Emile O, Vallet M, *et al.* Experimental and theoretical study of monomode vectorial lasers passively Q-switched by a Cr⁴⁺:yttrium aluminum garnet absorber[J]. Physical Review A, 1999, 60(5): 4052-4058.
- [13] Yu X L, Li Z Y, Yang B J, *et al.* Investigation of the property of new laser gain media of the Cr⁴⁺:YAG crystals[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(6): 811-814.
余先伦, 李载玉, 杨伯君, 等. Cr⁴⁺:YAG 晶体作为激光器增益介质的特性研究[J]. 量子电子学报, 2004, 21(6): 811-814.