

利用 Cr^{4+} : YAG 晶体的各向异性 提高输出激光消光比的实验研究

张思^{1,2}, 汪楠², 王旭葆¹, 林学春^{2*}

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124;

²中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083

摘要 为了研究不同切割方向 Cr^{4+} : YAG 晶体的各向异性对激光器输出偏振特性的影响, 采用 1064 nm 线偏振脉冲光作为测试光源, 从输入光强功率密度、晶体初始透过率和晶体切割方向 3 个方面, 对 Cr^{4+} : YAG 晶体的各向异性进行实验研究。结果表明: 在一定功率密度范围内, 功率密度越高, Cr^{4+} : YAG 的各向异性越明显; Cr^{4+} : YAG 的初始透过率越低, 各向异性越明显; 相同功率密度下, [110]切割方向的 Cr^{4+} : YAG 在某一方向上的饱和透过率大于[100]切割方向的 Cr^{4+} : YAG 的透过率。分别选取[110]和[100]切割方向的 Cr^{4+} : YAG 作为调 Q 晶体, 搭建 808 nm LD 抽运 Nd : YAG/ Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 固体激光器, 得到[110]切割方向 Cr^{4+} : YAG 的输出激光消光比大于[100]切割方向 Cr^{4+} : YAG 的输出激光消光比。

关键词 激光器; 被动调 Q; Cr^{4+} : YAG; 各向异性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.161401

Improving Extinction Ratio of Output Laser with Anisotropy of Cr^{4+} : YAG Crystal

Zhang Si^{1,2}, Wang Nan², Wang Xubao¹, Lin Xuechun^{2*}

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract To explore the effect of the anisotropy of different cut directions of Cr^{4+} : YAG crystals on the polarization characteristics of laser output, the anisotropy of Cr^{4+} : YAG crystal is studied experimentally using 1064-nm linearly polarized pulsed light as the test light source. In the experiment, the input light power density, initial transmittance, and crystal cutting direction are considered. The experimental results demonstrate that within a certain range of power density, the higher the power density is, the more obvious the anisotropy of Cr^{4+} : YAG is. The results also show that anisotropy is obvious with low initial transmittance of Cr^{4+} : YAG. Under the same power density, the saturation transmittance of [110]-cut Cr^{4+} : YAG is greater than that of [100]-cut Cr^{4+} : YAG in a certain direction. The [110]-cut and [100]-cut Cr^{4+} : YAG crystals are used as saturable absorbers for an 808-nm LD pumped passively Q-switched Nd : YAG/ Cr^{4+} : YAG solid laser, and the experimental results demonstrate that the extinction ratio of the output laser with [110]-cut Cr^{4+} : YAG is greater than that with [100]-cut Cr^{4+} : YAG.

Key words lasers; passive Q-switching; Cr^{4+} : YAG; anisotropy

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3540

收稿日期: 2019-01-14; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-12

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(GJJSTD20180004)

* E-mail: xclin@semi.ac.cn

1 引言

利用被动调 Q 激光技术可以产生纳秒甚至亚纳秒激光脉冲,该类激光脉冲广泛应用于激光微加工、通信传感和雷达等领域^[1-5]。其中 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 具有吸收截面大、弛豫时间短、饱和光强小等优点,且物化性能稳定,是目前非常有前途的被动调 Q 晶体之一。 $\text{Nd} : \text{YAG} / \text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 激光器具有峰值功率高、脉宽窄的特点,然而,常用的 $\text{Nd} : \text{YAG}$ 属于各向同性晶体,其激光一般不具备明显且稳定的偏振特性^[6],这限制了激光器的倍频、和频等非线性频率变化。

为了有效提升被动调 Q 激光器的偏振比,一方面可以采用高偏振输出的激光二极管进行抽运^[7];另一方面可以采用特殊切割角度的 $\text{Nd} : \text{YAG}$ ^[8]、 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 。2001 年, Bouwmans 等^[9]使用激光二极管抽运 $\text{Nd} : \text{YAG}$ 微片激光器,发现输出激光的偏振特性与抽运光偏振方向、晶体晶轴方向和腔内偏振本征态之间存在一定的关系;2009 年, Wang 等^[10]利用 $[\text{110}]$ 切割方向的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 作为调 Q 晶体,得到了消光比为 100 : 1 的稳定激光输出;2011 年, Bhandari 等^[11]利用 $\text{Nd} : \text{YAG} / [\text{110}] \text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 激光器进行实验,得到的消光比优于 100 : 1, 532 nm 倍频效率达到 85%;2014 年, Sun 等^[12]利用 $\text{Nd} : \text{YAG} / \text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 微片激光器进行实验,发现当抽运光偏振方向与 $[\text{001}]$ 切割方向 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的晶轴方向一致时,输出激光的稳定性大幅提高。

本文研究了 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的各向异性,采用 1064 nm 线偏振脉冲光,并沿 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶轴方向入射,从输入光强功率密度、晶体切割方向和初始透过率 3 个方面进行实验研究;采用不同功率密度的 1064 nm 线偏振光,测量不同初始透过率的 $[\text{100}]$ 和 $[\text{110}]$ 切割方向 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体在不同角度下的透过率;利用 808 nm LD 连续线偏振光抽运 $\text{Nd} : \text{YAG} / \text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 进行实验,使用具有相同初始透过率、切割方向分别为 $[\text{100}]$ 和 $[\text{110}]$ 的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体作为调 Q 晶体,对比输出激光的消光比。

2 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的透过率测量

利用不同功率密度的 1064 nm 线偏振脉冲光,测量不同切割方向和初始透过率的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的饱和过程, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的初始透过率分别为 30%、50% 和 70%, 每种晶体都选取 $[\text{100}]$ 、 $[\text{110}]$ 两个

切割方向。实验装置如图 1 所示,选用重复频率为 10 Hz、脉宽为 800 ps 的 1064 nm 激光作为测试激光,插入偏振片得到线偏振的入射激光,利用 1064 nm 部分透过率的镜片对入射激光的能量进行不同程度的衰减,从而得到不同功率密度的入射激光,入射激光的功率密度分别为 331.6, 172.4, 114.9 MW/cm^2 。1064 nm 激光沿 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶轴方向垂直入射至晶体表面,旋转待测 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体,以改变晶体晶轴与入射激光偏振方向之间的夹角。

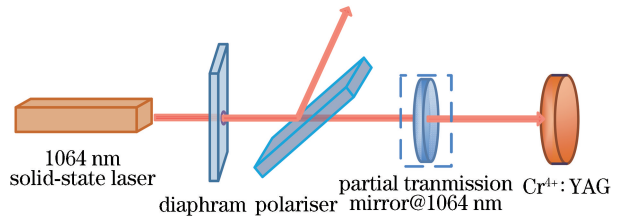


图 1 测试 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体各向异性的实验装置图

Fig. 1 Experimental equipment for testing anisotropy of $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ crystal

图 2 所示为 $[\text{100}]$ 和 $[\text{110}]$ 切割方向 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的晶轴方向与入射激光偏振方向相对位置示意图, θ 为入射激光的偏振方向与 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体 $[\text{001}]$ 晶轴的夹角。对于 $[\text{100}]$ 切割方向的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体,入射激光沿 $[\text{100}]$ 晶轴方向传播,旋转 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的过程中,其偏振方向在 $[\text{001}]$ 和 $[\text{010}]$ 两个晶轴所在平面内绕 $[\text{100}]$ 晶轴方向旋转,如图 2(a) 所示;对于 $[\text{110}]$ 切割方向的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体,入射激光的传播方向为 $[\text{110}]$ 晶轴方向,旋转 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体的过程中,其偏振方向在 $[\text{001}]$ 和 $[\text{110}]$ 所在平面内绕 $[\text{110}]$ 方向旋转,如图 2(b) 所示。

图 3 给出了同一入射激光功率密度下,初始透过率为 30%, 切割方向分别为 $[\text{100}]$ 和 $[\text{110}]$ 的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体透过率随 θ 的变化规律。从图 3 可以得出, $[\text{100}]$ 切割方向的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体在两个相互垂直方向具有高透过率,而 $[\text{110}]$ 切割方向的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体只有一个方向具有高透过率。正如图 2 所示:对于 $[\text{100}]$ 切割方向的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体,当入射光偏振方向与 $[\text{001}]$ 或 $[\text{010}]$ 晶轴方向一致时,晶体透过率最大,所以晶体在旋转 360° 的过程中,高透过率出现 4 次。 $[\text{110}]$ 切割方向的晶体在垂直于入射光传播方向的晶面上只存在 $[\text{001}]$ 一个晶轴,故晶体在旋转 360° 的过程中,最高透过率出现两次;当入射光偏振方向位于 $[\text{100}]$ 和 $[\text{010}]$ 晶轴构成的平面上时,透过率会出现小高峰,所以透过率最高峰和小高峰交替出现。

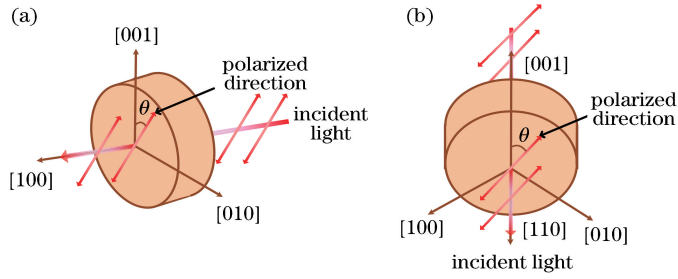


图 2 入射激光偏振方向与 Cr⁴⁺ : YAG 晶体晶轴的相对位置示意图。(a) [100]切割方向;(b) [110]切割方向
Fig. 2 Relative position between polarization direction of incident laser and crystal axis of Cr⁴⁺ : YAG.

(a) [100]-cut; (b) [110]-cut

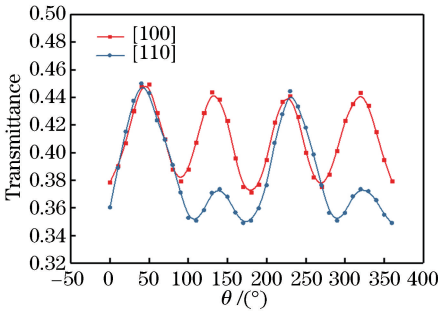


图 3 不同切割方向的 Cr⁴⁺ : YAG 对 1064 nm 激光的透过率(初始透过率 30%)

Fig. 3 1064 nm laser transmittance of Cr⁴⁺ : YAG in different cutting directions (initial transmittance is 30%)

图 4 给出了不同功率密度下初始透过率为

30%时,[100]和[110]切割方向的 Cr⁴⁺ : YAG 晶体透过率随 θ 的变化情况。从图 4 可以看出:二者的变化趋势基本相同,在一定入射激光功率密度范围内,功率密度越大,Cr⁴⁺ : YAG 晶体对 1064 nm 激光的各向异性越明显;随着 θ 旋转一周,Cr⁴⁺ : YAG 晶体的透过率呈周期变化。

在同一入射光功率密度下,随着 θ 的变化,不同初始透过率的 [100] 和 [110] 切割方向的 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的透过率变化情况如图 5 所示。从图 5 可以看出:无论是 [110] 还是 [100] 切割方向的 Cr⁴⁺ : YAG 晶体,在相同的功率密度下,初始透过率越大,各向异性越不明显;相反,初始透过率越小,各向异性越明显。

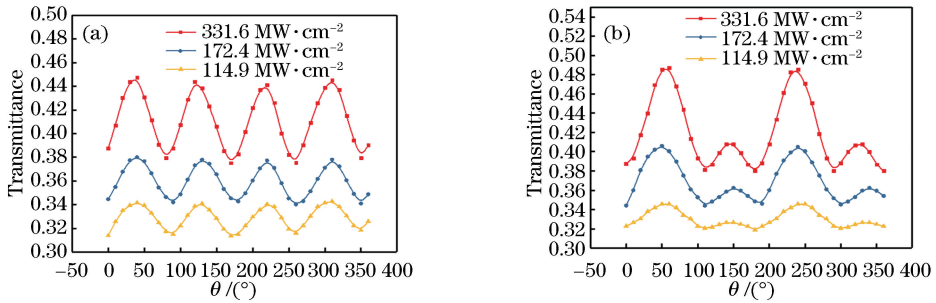


图 4 Cr⁴⁺ : YAG 在不同功率密度下对 1064 nm 激光的透过率(初始透过率为 30%)。(a) [100]切割方向;(b) [110]切割方向
Fig. 4 1064 nm laser transmittance of Cr⁴⁺ : YAG at different power densities (initial transmittance is 30%).

(a) [100]-cut; (b) [110]-cut

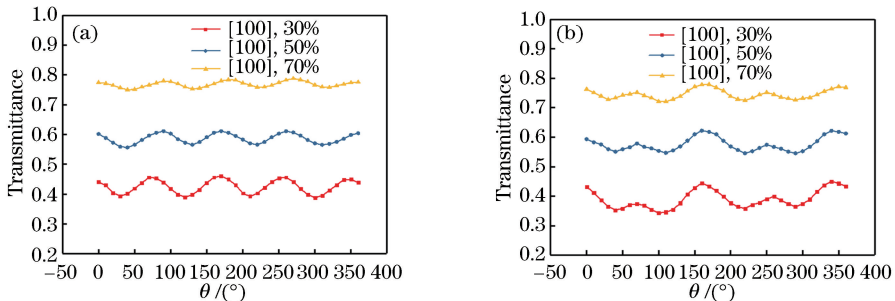


图 5 不同初始透过率的 Cr⁴⁺ : YAG 对 1064 nm 激光的透过率。(a) [100]切割方向;(b) [110]切割方向
Fig. 5 1064 nm laser transmittance under different initial transmissions of Cr⁴⁺ : YAG. (a) [100]-cut; (b) [110]-cut

3 高消光比被动调 Q 激光器

搭建如图 6 所示的实验装置,采用 808 nm LD 连续光经偏振分光棱镜(PBS)后的线偏振光作为抽运源,抽运功率为 3 W,经透镜组后光斑直径为 $400\ \mu\text{m}$,使用半波片改变抽运光的偏振方向。以切割方向 $[111]$ 的 Nd:YAG 作为工作物质,掺杂粒子数浓度为 1%,Nd:YAG 晶体尺寸为 $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$,谐振腔腔镜的

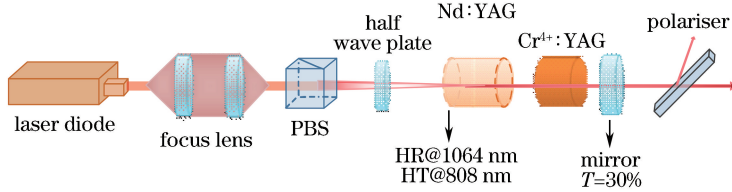


图 6 线偏振抽运 Nd:YAG/Cr³⁺:YAG 被动调 Q 激光器实验装置图

Fig. 6 Diagram of passively Q-switched Nd:YAG/Cr³⁺:YAG laser with linear polarization pump

旋转半波片改变抽运光的偏振方向,可以发现:对于切割方向为 $[110]$ 的 Cr³⁺:YAG 晶体,当抽运光偏振方向与 $[001]$ 晶轴重合时,得到的最大消光比为 380:1;对于切割方向为 $[100]$ 的 Cr³⁺:YAG 晶体,当抽运光偏振方向与 $[001]$ 和 $[010]$ 晶轴重合时,可以得到的最大消光比为 200:1。在相同的实验条件下,将 $[110]$ 切割方向的 Cr³⁺:YAG 作为调 Q 晶体时,其消光比大于 $[100]$ 切割方向的 Cr³⁺:YAG 晶体。

改变抽运光偏振方向与 Cr³⁺:YAG 晶体晶轴

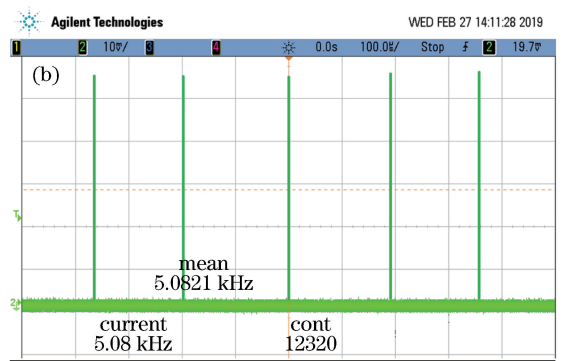
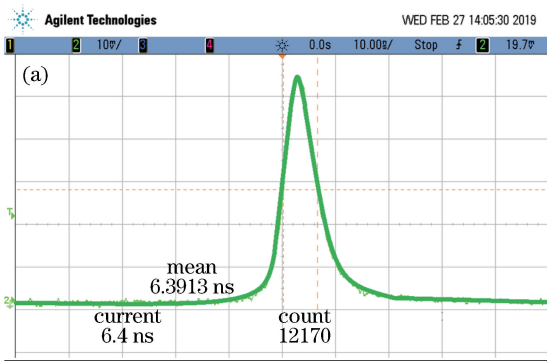


图 7 $[100]$ 切割方向的 Cr³⁺:YAG 被动调 Q 激光器的输出激光脉冲。(a)脉宽;(b)重复频率

Fig. 7 Output pulse of $[100]$ -cut Cr³⁺:YAG Q-switched laser. (a) Pulse width; (b) repetition rate

4 结 论

利用 1064 nm 线偏振脉冲激光测试了 Cr³⁺:YAG 晶体的各向异性,结果表明,Cr³⁺:YAG 晶体的各向异性受入射光功率密度、初始透过率和晶体切割方向的影响。入射光功率密度在一定范围内时,切割方向和初始透过率相同的 Cr³⁺:YAG 晶体所处功率密度越大,各向异性越明显;同一功率密

晶体一端镀有 1064 nm 高反(HR)膜和 808 nm 高透(HT)膜,另一端面镀有 1064 nm 增透(AR)膜,使用初始透过率为 80%,切割方向分别为 $[110]$ 和 $[100]$ 的 Cr³⁺:YAG 晶体作为调 Q 晶体,尺寸均为 $\phi 5\ \text{mm}\times 1.8\ \text{mm}$,晶体两端通光面均镀有 1064 nm 增透膜,输出镜采用透过率为 $T=30\%$ 的平面镜,谐振腔采用腔长为 32 mm 的对称平平腔。通过旋转半波片,改变抽运光偏振方向与 Cr³⁺:YAG 晶体晶轴的夹角。

的夹角,分别测量输出激光的脉宽、功率和重复频率。 $[100]$ 切割方向 Cr³⁺:YAG 晶体作为调 Q 晶体时,输出脉冲如图 7 所示,脉宽为 6.39 ns,重复频率为 5.08 kHz,输出功率为 340 mW,峰值功率为 10.47 kW,单脉冲能量为 66.91 μJ ;而 $[110]$ 切割方向 Cr³⁺:YAG 晶体作为调 Q 晶体时,输出脉冲如图 8 所示,脉宽为 5.13 ns,对应的重复频率为 2.73 kHz,输出功率为 220 mW,峰值功率为 15.54 kW,单脉冲能量为 79.71 μJ 。

度下,相同切割方向的 Cr³⁺:YAG 晶体的初始透过率越低,其各向异性越明显;在相同初始透过率条件下,相比于 $[100]$ 切割方向, $[110]$ 切割方向的 Cr³⁺:YAG 晶体的各向异性更明显,且更易得到相对稳定的偏振输出激光。

实验选用初始透过率均为 80%,切割方向分别为 $[100]$ 和 $[110]$ 的 Cr³⁺:YAG 晶体作为调 Q 晶体,搭建了 LD 偏振抽运 Nd:YAG 被动调 Q 激光

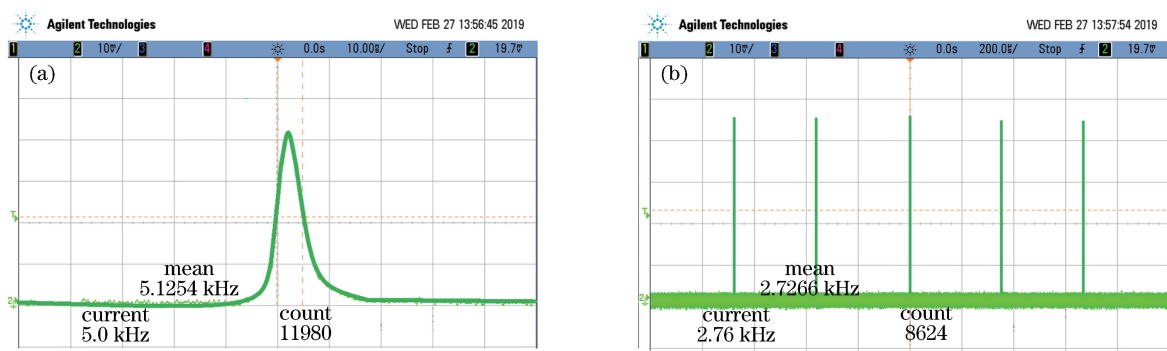


图 8 [110]切割方向的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器的输出激光脉冲。(a)脉宽;(b)重复频率

Fig. 8 Output pulse of [110]-cut $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ Q-switched laser. (a) Pulse width; (b) repetition frequency

器。发现切割方向为[110]的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为调 Q 晶体时,输出激光消光比大于切割方向为[100]的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体,前者的消光比可达 380 : 1,后者的消光比为 200 : 1。输出激光的消光比影响 Nd : YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器的倍频效率,高消光比的输出激光在提高倍频效率方面具有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] Chen L, Wang X, Yang T, *et al.* Superhydrophobic micro-nano structures on silicone rubber by nanosecond laser processing [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(44): 445301.
- [2] Lu J, Ding J Y, He Y, *et al.* High repetition rate sub-nanosecond dual-wavelength solid-state laser for airborne lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082804.
陆俊, 丁建永, 贺岩, 等. 机载激光雷达用高重复频率亚纳秒双波长全固态激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082804.
- [3] Pribil K, Flemmig J. Solid state laser communications in space (SOLACOS) high data rate satellite communication system verification program [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2210: 39-48.
- [4] McManamon P F, Kamerman G, Huffaker M. A history of laser radar in the United States [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7684: 76840T.
- [5] Lu L B, Wang H P, Guan Y C, *et al.* Laser microfabrication of biomedical devices [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102005.
卢立斌, 王海鹏, 管迎春, 等. 激光微加工技术制备生物医用器械的现状与进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102005.
- [6] Wang Y, Jiang M H, Hui Y L, *et al.* Passively Q-switched Nd: YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ microchip laser with

low time jitter and high repetition rate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1014004.

王煜, 姜梦华, 惠勇凌, 等. 小时间抖动、高重复频率 Nd: YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 微型激光器 [J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1014004.

- [7] Zheng Q, Jiang Y L, Qian L S. Search on the polarization of a LD-pumped Nd: YAG/ $\text{Cr}:\text{YAG}$ laser [J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(4): 248-249.
郑权, 姜耀亮, 钱龙生. LD 抽运 Nd: YAG/ $\text{Cr}:\text{YAG}$ 激光器偏振特性的研究 [J]. *激光与红外*, 2002, 32(4): 248-249.
- [8] Pflaum C, Hartmann R, Graupeter T. Analysis of depolarization effects in Nd : YAG crystal [C]// *Advanced Solid State Lasers*, November 16-21, 2014, Shanghai, China. Washington, D. C.: OSA, 2014: ATu2A. 3.
- [9] Bouwmans G, Ségard B, Glorieux P. Polarisation dynamics of monomode Nd³⁺ : YAG lasers with Cr^{4+} saturable absorber: influence of the pump polarisation [J]. *Optics Communications*, 2001, 196: 257-268.
- [10] Wang Y, Gong M, Yan P, *et al.* Stable polarization short pulse passively Q-switched monolithic microchip laser with [110] cut $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(11): 788-790.
- [11] Bhandari R, Taira T. > 6 MW peak power at 532 nm from passively Q-switched Nd: YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ microchip laser [J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19135-19141.
- [12] 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.