

千赫兹亚纳秒径向偏振光

任俊杰, 高小强, 陈 檬

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 利用 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体被动调 Q 和 S 波片得到亚纳秒径向偏振光。采用峰值功率为 30 W、脉宽为 120 μ s、重复频率为 1 kHz 的脉冲半导体激光端面抽运方式, 得到了脉冲宽度为 878 ps、单脉冲能量为 76.8 μ J 的调 Q 激光脉冲输出, 其重频不稳定性小于 $\pm 0.003\%$, 幅值不稳定性小于 $\pm 3\%$ 。然后通过键合晶体后插入偏振片和 S 波片的方式, 得到纯度大于 96%、单脉冲能量为 27.5 μ J 的亚纳秒径向偏振光。

关键词 激光光学; 全固态激光; 被动调 Q; 亚纳秒; 径向偏振

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111403

Kilohertz Sub-Nanosecond Radially Polarized Light

Ren Junjie, Gao Xiaoqiang, Chen Meng

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

Abstract Sub-nanosecond radially polarized light is obtained by using passively Q-switching of Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG bounding crystal and S-waveplate. The pulsed diode laser end pumping method with peak power of 30 W, pulse width of 120 μ s, repetition frequency of 1 kHz, is used to obtain Q-switched laser pulse output with pulse width of 878 ps and single pulse energy of 76.8 μ J. The repetition frequency instability is less than $\pm 0.003\%$ and the amplitude instability is less than $\pm 3\%$. By inserting the polarizer and S-wave plate after bonding crystal, a sub-nanosecond radially polarized light with purity of more than 96% and single pulse energy of 27.5 μ J is obtained.

Key words laser optics; all-solid-state laser; passively Q-switching; sub-nanosecond; radial polarization

OCIS codes 140.3460; 140.3540; 140.3580; 140.3945

1 引 言

矢量偏振光由于其偏振特性在激光加工领域具有重要的应用前景^[1-2]。径向偏振光是一种特殊的矢量偏振光, 其偏振方向在光束截面上呈中心对称分布且光强呈现空心分布^[3]。电矢量轴对称分布的径向偏振光在科学研究及激光精细加工方面有着不可替代的优势^[4], 例如可应用于金属切割^[5]、粒子捕获^[6]、提高显微镜分辨率^[7]等。

在激光加工领域, 亚纳秒激光与纳秒激光相比, 具有热作用范围小、精度高等特点^[8-9]。在空间对地观测方面, 千赫兹量级的亚纳秒激光器性能优良且小而轻, 可作为未来新型探测系统的光源^[10]。径向偏振光与线偏振光和圆偏振光相比, 焦点处偏振方向始终垂直于切口, 加工材料对径向偏振光的吸收率不受切割方向影响, 因而在各个方向的切割效率均可达到最佳值^[2]。百皮秒径向偏振光在许多方面都有应用潜力, 研究被动调 Q 产生的亚纳秒径向偏振光具有重要意义。

径向偏振光的产生通常有两种方法, 一种是在腔内直接产生, 一种是在腔外通过插入特殊光学元件获得径向偏振光。腔内法一般是指利用晶体的双折射或热致双折射效应在腔内特定位置插入锥形布儒斯特棱

收稿日期: 2017-06-08; **收到修改稿日期:** 2017-06-19

基金项目: 北京市基金重点项目(KZ201510005001)

作者简介: 任俊杰(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事被动调 Q 固体激光器方面的研究。E-mail: 244678368@qq.com

导师简介: 陈 檬(1963—), 女, 博士, 研究员, 主要从事全固态纳秒、皮秒、倍频激光器件等方面的研究。

E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn(通信联系人)

镜、衍射光栅等其他选择元件,抑制其他偏振状态的振荡,只允许径向偏振方向振荡输出。腔外法通常是在线偏振光的基础上,通过插入调制元件将偏振状态改变,如空间光调制器、分段组合半波片等。腔内法对激光器谐振腔设计有较高要求,输出功率低,而现在已有良好的腔外偏振转换元件,可高效地将线偏振转换为径向偏振,本文采用的 S 波片即是一种高效的偏振转换元件。

2011 年, Xia 等^[11]采用 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体和光子晶体光栅镜,获得了被动调 Q 径向脉冲激光输出,输出激光峰值功率为 1.5 kW,脉冲宽度为 18.9 ns。2015 年,韩侠辉等^[12]采用同样方法,通过优化参数获得了激光脉冲宽度为 3.2 ns、单脉冲能量为 50.1 mJ、重复频率为 8.1 kHz、径向偏振纯度为 95.8% 的被动调 Q 径向偏振光。

本文利用 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体和腔外 S 波片,获得了亚纳秒的径向偏振激光输出,整个激光器结构简单而紧凑。同时,在理论上研究了被动调 Q 激光器输出脉宽的影响因素,并在实验中得到证实。此外,对由于抽运脉宽等因素造成的脉冲抖动现象也做了实验研究,最终得到了高稳定性、高纯度的亚纳秒径向偏振光。

2 实验设计

2.1 理论

对于 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 而言,首先求解被动调 Q 速率方程,得到脉冲宽度的表达式:

$$t = \frac{2l'}{c} \left[\ln \left(\frac{1}{R} \right) + L' \right] \cdot \left\{ \frac{1 - (n_f)/(n_i) - (l_s r n_0)/(l r_s n_i) [1 - (n_f)/(n_i)^{a'}]}{1 - (n_t)/(n_i) + [\ln(1/R) + L'] / (2\sigma_i l) \ln(n_t/n_i) - (l_s r n_0)/(l r_s n_i) [1 - (n_t)/(n_i)^{a'}]} \right\}, \quad (1)$$

式中 c 为真空中光速; n_i 、 n_f 、 n_t 分别是激光晶体的初始反转粒子数密度、阈值反转粒子数密度和脉冲结束后的反转粒子数密度; l 、 l_s 、 l' 分别是激光晶体的长度、可饱和吸收体的长度、谐振腔的物理长度; R 、 σ 、 r 分别是输出镜的反射率、受激发射截面积、反转粒子数衰减因子; $n_0 = (\ln 1/T_0)/(\sigma_{gs} l_s)$ 是饱和吸收体的掺杂粒子数密度,与初始透射率 T_0 相关; $r_s = 1/[1 - (\sigma_{es}/\sigma_{gs})]$ 、 $a' = \sigma_{gs}/(r\sigma)$ 和 $L' = 2\sigma_{es} n_0 l$ 是被动调 Q 速率方程的引入参数,其中 σ_{gs} 和 σ_{es} 分别是饱和吸收体 Cr⁴⁺:YAG 的基态吸收截面积和激发态吸收截面积^[13-15]。从 (1) 式中可知影响脉宽的几个重要因素为谐振腔的长度 $l' = l + l_s$ (键合晶体)、输出镜的反射率 R 、Cr⁴⁺:YAG 的初始透射率 T_0 等。

激光的输出脉宽与饱和吸收体 Cr⁴⁺:YAG 的初始透射率呈正比,初始透射率越大,脉冲宽度越大^[15]。为了获得亚纳秒脉冲输出,初始透射率应该在合理范围内选择较小值。考虑实验室条件和工艺限制等综合因素,饱和吸收体的初始透射率设计值为 50%。谐振腔的长度和输出镜反射率的数值模拟均以初始透射率等于 50% 为前提。

1) 谐振腔的长度。图 1 是数值模拟的谐振腔长度和脉冲宽度的关系图。从图 1 中可看出,随着腔长的增加,输出脉宽线性增大,要实现亚纳秒的脉宽输出,腔长的选择应小于 10 mm。综合考虑激光晶体的增益和输出脉宽,初定设计值为 8 mm。

2) 输出镜的反射率。图 2 是数值模拟的输出镜的反射率和脉冲宽度的关系图。从图 2 中可以看出,随着输出镜反射率的增加,脉冲宽度减小。输出镜反射率的数值推算结果是以初始透射率等于 50% 和谐振腔长度等于 8 mm 为前提的。如图 2 所示,反射率等于 50%,脉宽约为 800 ps,这与图 1 中谐振腔长度 8 mm,脉宽约为 800 ps 的模拟结果一致,故反射率设计值为 50%。

运用以上数值模拟得到的各项参数,再利用光纤耦合半导体激光器进行端面抽运,并在 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体前后端面镀上 1064 nm 全反膜和输出膜的情况下实现亚纳秒激光输出。

S 波片是由飞秒脉冲激光在熔融石英窗口中直接产生的空间变化的亚波长光栅。这些光栅结构分别诱导慢轴和快轴方向与光栅方向平行和垂直,从而形成双折射,产生类似于慢轴方向连续变化的半波片^[16]。当线偏振光的振动方向与 S 波片光轴方向平行时,输出光即是径向偏振光,实验所用 S 波片双面镀有 1064 nm 增透膜(透射率大于 95%),偏振转换效率大于 75%。

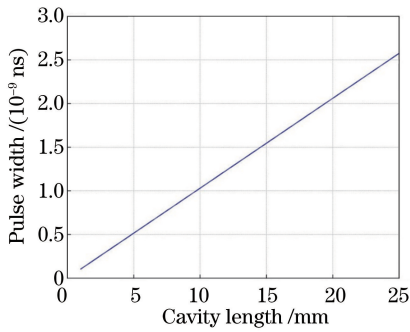


图1 脉冲宽度与腔长的关系

Fig. 1 Relationship between pulse width and cavity length

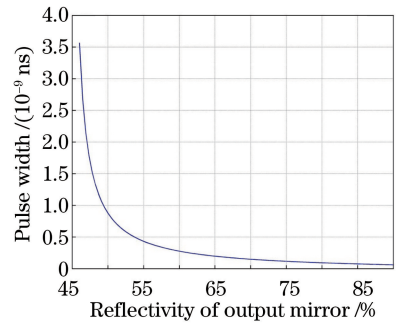


图2 脉冲宽度与输出镜反射率的关系

Fig. 2 Relationship between pulse width and reflectivity of output mirror

2.2 实验装置

基于 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体的被动调 Q 实现亚纳秒径向偏振光的实验装置如图3所示。抽运源是光纤耦合半导体激光器,中心波长为 808 nm,耦合光纤的芯径为 400 μm,数值孔径(NA)为 0.22。耦合系统采用两个焦距 $f=50$ mm 的凸透镜,耦合比为 1:1。为了获得亚纳秒激光输出,将激光晶体 Nd:YAG 和饱和吸收体 Cr⁴⁺:YAG 键合在一起,并且将激光器的后腔镜和输出镜膜系分别镀在晶体的两个端面。依据数值模拟的结果,采用总长度为 8 mm 的键合晶体,其中增益晶体长度为 6 mm。前端面 S1 在 1064 nm 高反,在 808 nm 高透;后端面 S2 在 1064 nm 部分反射,反射率 $R=50\%$ 。键合晶体中 Nd:YAG 的掺杂粒子的分数为 1.1%,Cr⁴⁺:YAG 的初始透射率为 50%。整个晶体用铜包裹,放入通有 20 °C 冷却水的热沉中。在键合晶体后是薄膜偏振片(TFP)和 S 波片。实验中,采用 Tektronix DPO 7104 数字示波器和 InGaAs 快速光电探测器进行脉冲波形、脉宽、重复频率的测量。采用 OPHIR 公司的能量计进行单脉冲能量的测量。使用 CCD 图像分析仪观察输出光斑的分布状态。

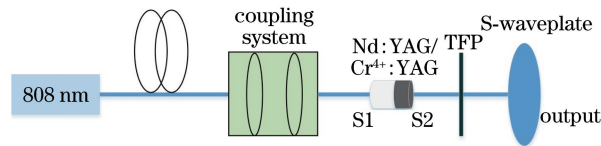


图3 亚纳秒径向偏振光实验装置图

Fig. 3 Diagram of experimental setup of sub-nanosecond radially polarized light

3 实验结果与分析

实验采用脉冲抽运的方式,调节抽运源的峰值功率至 30 W,抽运脉宽 230 μs,重复频率 1 kHz,得到脉冲宽度为 865 ps、单脉冲能量为 216 μJ 的调 Q 脉冲输出,脉冲波形如图 4 所示。随后将抽运源重频分别设置为 10,50,100,500 Hz,其他实验条件保持不变,再次测量脉宽和单脉冲能量。图 5 为脉宽、单脉冲能量随重频变化的关系曲线图,从图 5 中可看出,随着重频的升高,脉宽和单脉冲能量呈逐渐递减趋势。

图 6 是不同频率时的波形图,从图 6 中可以看到低重频时有稳定的单脉冲波形,在 100 Hz 以上,主脉冲后会有尾脉冲。关于这一现象已有研究报道,Ng 等^[17]认为是由于激光晶体中处于低能级粒子的寿命有限造成的;Niu 等^[18]认为是由双纵模振荡产生的,优势振荡模式产生主脉冲,另一振荡模式对应于次脉冲。此外,可以确定的是在强抽运功率下,Cr⁴⁺:YAG 作为饱和吸收体的被动调 Q 会出现尾脉冲^[17-19]。实验中尾脉冲是在抽运平均功率逐渐增加的前提下出现的,因此在同一重频下,平均功率越大,尾脉冲的强度越强,在 1 kHz 重频下,调节占空比,使得抽运脉宽尽量减小,尾脉冲的强度会减弱,图 7 是脉宽分别为 230 μs 和 170 μs 的波形对比图。

随后将耦合系统的耦合比由 1:1 调整为 5:2,此时晶体抽运光斑直径约为 160 μm。由峰值功率 30 W、脉宽 230 μs、重复频率 1 kHz 的相同抽运源抽运,获得了脉冲宽度为 905 ps、单脉冲能量为 160.2 μJ、

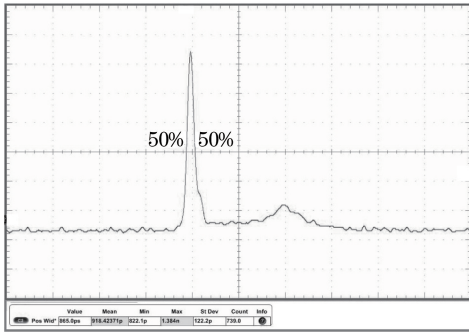


图 4 1 kHz 调 Q 脉冲波形图

Fig. 4 1 kHz Q-switched pulse waveform

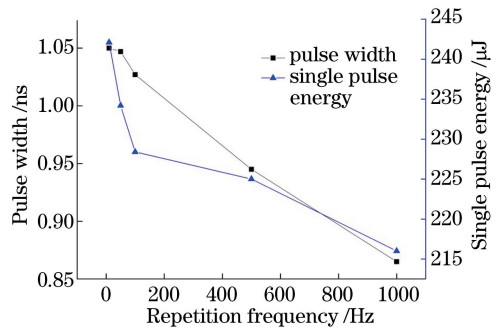


图 5 脉宽、单脉冲能量随重复频率的变化关系

Fig. 5 Relationship between pulse width and single pulse energy with repetition frequency

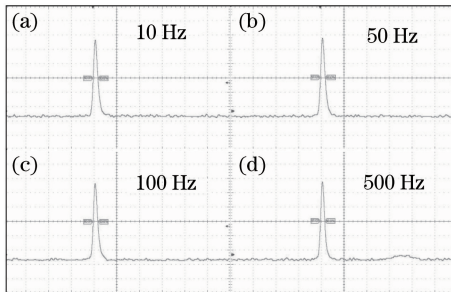


图 6 不同重复频率时的脉冲波形图。

(a) 10 Hz; (b) 50 Hz; (c) 100 Hz; (d) 500 Hz

Fig. 6 Pulse waveform at different repetition frequencies.

(a) 10 Hz; (b) 50 Hz; (c) 100 Hz; (d) 500 Hz

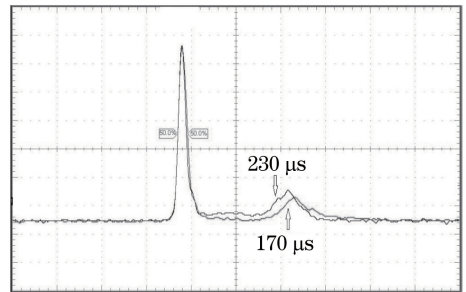


图 7 脉宽分别为 230 μ s 和 170 μ s 的波形对比图

Fig. 7 Waveform comparison with the pulse width of 230 μ s and 170 μ s

无尾脉冲的调 Q 脉冲,其输出脉冲波形如图 8 所示。与 1:1 的耦合相比,在同等抽运的情况下,脉宽只有 4% 的变化,但是单脉冲能量减小了 26%。用 Laser CAD 软件模拟 10 mm 的短腔,腔内的光斑直径约为 320 μ m。耦合比为 5:2 的抽运光斑直径约为 160 μ m,远远小于腔内振荡光的光斑直径,导致光-光转换效率降低。因此,获得的单脉冲能量小,波形中无尾脉冲。进一步将抽运脉宽由 230 μ s 调至 120 μ s,得到脉宽 878 ps、单脉冲能量 76.8 μ J 的调 Q 脉冲。

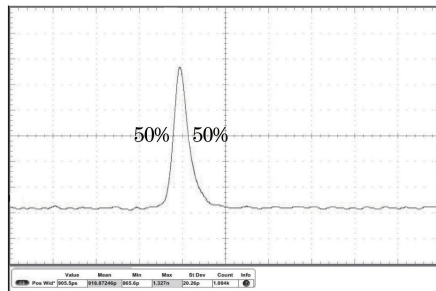


图 8 改变耦合比后的脉冲波形图

Fig. 8 Pulse waveform after changing coupling ratio

采用示波器余晖累积方法,分别测量了抽运脉宽为 230 μ s 和 120 μ s 的调 Q 脉冲波形余晖累积图,如图 9 所示。从图 9 中可看出脉宽减至 120 μ s,幅值稳定性得到明显改善,经计算频率不稳定性均小于 $\pm 0.003\%$,幅值不稳定性由 $\pm 12\%$ 下降至 $\pm 2.7\%$ 。

图 10(a)为 CCD 图像分析仪测得的重频为 1 kHz、脉宽为 878 ps 的调 Q 脉冲放入偏振片和 S 波片后输出的光斑分布。在 S 波片后再插入一个偏振片,偏振片反射和透射的偏振方向不同,输出光斑始终为两瓣分布,如图 10(b)、(c)所示,说明 S 波片后输出的激光是径向偏振光。然后,分别用能量计和示波器测量 S 波

片后的径向偏振光,单脉冲能量为 $27.5 \mu\text{J}$,脉冲宽度未改变,S波片前后平均功率减小了 28.4% 。最后,采用狭缝和检偏器测量径向偏振光的纯度^[1],经检测其纯度在 96% 以上。

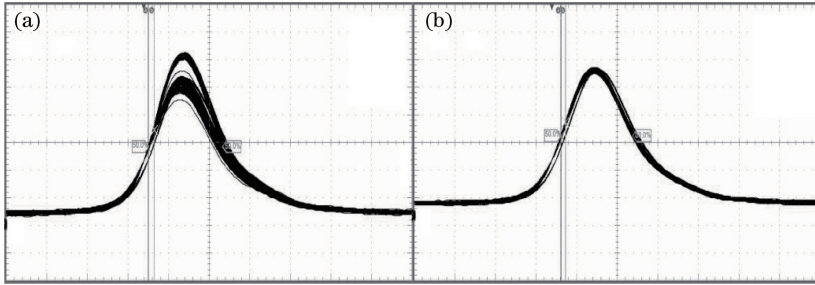


图 9 抽运脉宽为(a) $230 \mu\text{s}$ 和(b) $120 \mu\text{s}$ 的波形余晖累积图

Fig. 9 Waveform after glow cumulative chart with the pumping pulse width of (a) $230 \mu\text{s}$ and (b) $120 \mu\text{s}$

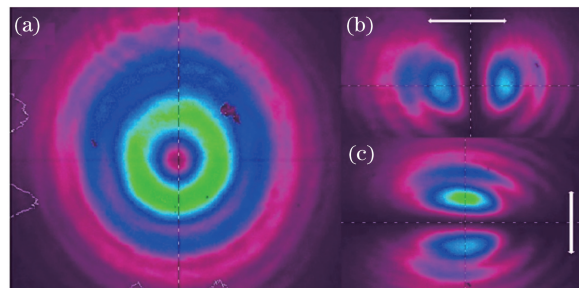


图 10 (a)径向偏振光经过偏振片前的光斑分布图;径向偏振光经过偏振片后的(b)反射和(c)透射光斑分布图

Fig. 10 (a) Spot distribution of radially polarized light before passing through a polarizer; (b) reflected and (c) transmission spot distribution of radially polarized light after passing through a polarizer

4 结 论

通过求解被动调 Q 速率方程,得到脉冲宽度随腔长、饱和吸收体初始透射率、输出镜反射率的变化规律,获得键合晶体可以实现亚纳秒脉冲输出的最佳参数。使用峰值功率 30 W 、脉宽 $230 \mu\text{s}$ 、重复频率 1 kHz 的脉冲抽运,得到了脉冲宽度为 865 ps 、单脉冲能量为 $216 \mu\text{J}$ 的调 Q 脉冲,实验结果与数值模拟结果相一致,输出脉冲存在拖尾小脉冲。然后调至耦合比为 $5:2$,在相同抽运条件下,获得脉冲宽度为 905 ps 、单脉冲能量为 $160.2 \mu\text{J}$ 的调 Q 脉冲,且无尾脉冲。最后将抽运脉宽由 $230 \mu\text{s}$ 调至 $120 \mu\text{s}$,得到脉宽为 878 ps 、单脉冲能量为 $76.8 \mu\text{J}$ 的调 Q 脉冲,其重频不稳定性小于 $\pm 0.003\%$,幅值不稳定性小于 $\pm 3\%$ 。在键合晶体后加入偏振片和 S 波片,得到单脉冲能量为 $27.5 \mu\text{J}$ 、纯度为 96% 以上的亚纳秒径向偏振光。

参 考 文 献

- [1] Li Zhengwei, Chen Meng, Li Gang. Side-pumped Nd:YAG mode-locked radially polarized laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102006.
李政委, 陈檬, 李港. 侧面抽运 Nd:YAG 锁模径向偏振光[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102006.
- [2] Xia Kegui, Li Jianlang. Recent development in radially polarized solid-state laser with composite laser crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080015.
夏克贵, 李建郎. 基于键合晶体的径向偏振固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080015.
- [3] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2009, 1(1): 1-57.
- [4] Niziev V G, Nesterov A V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32(13): 1455-1461.
- [5] Hnatovsky C, Shvedov V, Krolikowski W, et al. Revealing local field structure of focused ultrashort pulses[J].

- Physical Review Letters, 2011, 106(12): 123901.
- [6] Liu Y, Cline D, He P. Vacuum laser acceleration using a radially polarized CO₂ laser beam[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1999, 424: 296-303.
- [7] Kim J, Kim D C, Back S H, *et al.* Demonstration of high lateral resolution in laser confocal microscopy using annular and radially polarized light[J]. Microscopy Research and Technique, 2009, 72(6): 441-446.
- [8] Hwang D, Ryu S G, Misra N, *et al.* Nanoscale laser processing and diagnostics[J]. Applied Physics A, 2009, 96(2): 289-306.
- [9] Nakano H. Femtosecond and nanosecond laser peening of stainless steel[J]. Journal of Laser Micro, 2010, 5(2): 175-178.
- [10] Liu Qi, Meng Junqing, Zu Jifeng, *et al.* High repetition frequency narrow pulse electro-optically Q-switched laser for space applications[J]. Chinese J 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.
- [11] Xia K G, Li J L. Radially polarized and passively Q-switched Nd:YAG laser with composite structure of gain medium[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(10): 51-53.
- [12] Han Xiahui, Xia Kegui, Li Guiyun, *et al.* 3.2 ns high peak power radially polarized pulsed output from passively Q-switched microchip laser with composite structure of YAG/Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG crystal[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702010.
韩侠辉, 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(7): 0702010.
- [13] Xiao G, Bass M. A generalized model for passively Q-switched lasers including excited state absorption in the saturable absorber[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(1): 41-44.
- [14] Degnan J J. Optimization of passively Q-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(11): 1890-1901.
- [15] Li Bin, Ding Xin, Sun Bing, *et al.* Laser-diode-pumped coaxial double crystals Nd:YAG/Nd:YVO₄ Cr:YAG passively Q-switched laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0402003.
李斌, 丁欣, 孙冰, 等. 激光二极管抽运 Nd:YAG/Nd:YVO₄ 共轴双晶体 Cr:YAG 被动调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0402003.
- [16] Lin D, Daniel J M, Gecevičius M, *et al.* Cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser with radially polarized output[J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5359-5361.
- [17] Ng S P, Tang D Y, Qian L J, *et al.* Satellite pulse generation in diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO₄ lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(7): 625-632.
- [18] Niu L, Gao C, Zhu S, *et al.* Single- and dual-pulse oscillation in a passively Q-switched Nd:YAG microchip laser[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20628-20633.
- [19] Dong J, Ueda K, Yang P. Multi-pulse oscillation and instabilities in microchip self-Q-switched transverse-mode laser[J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16980-16993.