

LD 侧面泵浦被动调 Q 环形腔单纵模激光器

赵桂娟^{1,2}, 王雨雷^{1,2*}, 陈彬^{1,2}, 颜秉政^{1,2}, 白振旭^{1,2}, 吕志伟^{1,2}¹河北工业大学先进激光技术研究中心, 天津 300401;²河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401

摘要 展示了一种环形腔全固态单纵模被动调 Q 激光器。采用激光二极管(LD)侧面泵浦的环形腔消除空间烧孔效应, 实现谐振腔内纵模数量的稳定;通过标准具控制激光器相邻纵模间的净增益差,实现高单纵模率激光输出。激光器以 10 Hz 的重复频率运行,脉宽为 23.6 ns,单脉冲能量为 6.1 mJ。该激光器在输出能量以及单纵模率方面具有较好的稳定性,其相对标准差为 1.56%,当连续记录一万发脉冲时,单纵模率为 100%。

关键词 激光器;单纵模;环形腔;被动调 Q;标准具;侧面泵浦

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1914003

LD Side-Pumped Passively Q-Switched Ring Cavity Single-Longitudinal-Mode Laser

Zhao Guijuan^{1,2}, Wang Yulei^{1,2*}, Chen Bin^{1,2}, Yan Bingzheng^{1,2}, Bai Zhenxu^{1,2}, Lü Zhiwei^{1,2}¹Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;²Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China

Abstract An all-solid-state single-longitudinal-mode passively Q-switched laser in a ring cavity is demonstrated. The laser diode (LD) side-pumped ring cavity is adopted to eliminate the spatial hole burning effect to stabilize the number of longitudinal modes in the resonator, and the etalon is used to control the net gain difference between adjacent longitudinal modes of the laser to realize the operation of a high single-longitudinal-mode ratio laser. The laser operates at a repetition rate of 10 Hz, producing pulses with a pulse width of 23.6 ns and a pulse energy of 6.1 mJ. The laser has strong stability in output energy and single-longitudinal-mode ratio, a relative standard deviation of 1.56% is demonstrated, and a single-longitudinal-mode ratio of 100% is achieved when 10000 pulses are recorded continuously.

Key words lasers; single-longitudinal-mode; ring cavity; passively Q-switching; etalon; side-pumping

1 引言

含有多纵模的激光器的单色性及相干性比较差,导致输出能量不稳定,甚至会出现拍频现象,产生激光脉冲尖峰,这是引起腔内元件损伤的主要原因。而单纵模激光器因其具有光滑的时间空间波形、长的相干长度、窄的谱线宽度等优势,可满足高分辨率激光光谱学^[1]、全息照相^[2]、引力波探测^[3-4]、相干光通信^[5]、激光纳导引星^[6-7]、非线性光学^[8-10]等应用的需求。因此,有必要设计与改进激光器以实现高单纵模率运转。单纵模选择技术主要分为两类^[11]:一类是通过控制激光器相邻纵模间的净增益差使激光器实现单纵模运转,主要包括短腔法^[12]、内腔标准具(F-P)法^[13-14]、耦合腔

法^[15]及非线性频率变换法^[7,16-18]等;另一类是通过消除空间烧孔效应使激光器实现单纵模运转,主要包括扭转模腔法^[19-20]和单向环形腔法^[21]。其中,控制激光器相邻纵模间的净增益差的方法一般用于驻波腔中,其结构紧凑有利于获得短脉冲单纵模输出,但是驻波腔中存在的空间烧孔效应导致空间模式竞争,使纵模输出不稳定。在驻波腔内插入 1/4 波片的扭转模腔是消除空间烧孔效应的有效方法,其操作较为容易,但对偏振态变化敏感,且热效应等因素对于偏振态的影响也会降低单纵模率^[22]。虽然环形腔相对于驻波腔结构较为复杂,但通过振荡激光单向行波运转的方式可抑制空间烧孔效应、消除空间模式竞争,进而实现激光器更加稳定的单纵模运转。

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-03-27; 录用日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(62075056,61927815)

通信作者: *wyl@hebut.edu.cn

近年来,有报道证明采用腔内结合标准具的方法在环形腔中进行协助选模可以实现更加稳定的单纵模脉冲输出。在环形腔中,泵浦模块尺寸以及单向工作器件数量的限制会使腔长增加,导致纵模间隔较小,在激光建立时模式竞争不充分,难以直接实现单纵模输出,因此需要在环形腔中插入标准具协助选模。标准具法的选模原理是多光束干涉,只有某些特定频率的光可以在无损耗或低损耗的状态下透过标准具,而其他频率的光不满足相干加强的条件,导致损耗过大,无法实现激光振荡,进而无法实现单纵模输出^[23]。2014年,焦月春等^[24]在“8”型环形腔中通过插入声光调Q晶体与标准具,获得了重复频率为200 Hz、脉宽为26.6 ns、能量为570 μJ的单纵模脉冲光输出,该报道虽能获得短脉冲激光输出,但由于采用端面泵浦的方式,输出激光的能量较小,并且未对协助选模的标准具参数进行分析。2021年,Shen等^[25]在三镜环形腔中通过对结合标准具的各腔模的增益和损耗系数进行分析,使用两个标准具获得了脉宽为200 μs、单脉冲能量为37 mJ、重复频率为100 Hz的长脉冲激光输出;该报道虽分析了双标准具参数,但未研究标准具参数对单纵模率的影响,并且未采用合适的方法进行脉宽压缩,使得输出激光的脉宽较宽。固体激光器中通常采用调Q方式获得短脉冲输出^[26-27],被动调Q在噪声中产生的环路传输次数通常远大于主动调Q,这有利于进行纵模选择^[28]。而侧面泵浦的方式相较于端面泵浦的方式更容易获得大能量短脉冲输出^[29]。

本文设计并搭建了一台侧面泵浦的紧凑型四镜方

形环形谐振腔单纵模脉冲激光器,方形环形腔更容易放置腔内器件,能够最大程度地压缩腔长以获得单纵模短脉冲输出。通过在腔内使用半波片和旋光器组成的光学隔离器,使激光单向行波运转,从而抑制空间烧孔效应。利用傅里叶变换的方法对环形腔的模式分布进行分析,确定了在环形腔中协助选纵模所需标准具的厚度以及反射率。同时,使用初始透过率为40%的Cr:YAG可饱和吸收体进行被动调Q,获得了稳定的单纵模短脉冲输出,脉冲宽度为23.6 ns,脉冲能量为6.1 mJ,相对标准差为1.56%,光束质量因子为1.28,激光器连续记录一万发脉冲的单纵模率为100%。

2 实验装置及结果

为了获得较短脉冲单纵模输出,设计并搭建了一台紧凑的方形环形腔单纵模被动调Q激光器,实验装置如图1所示。采用中心波长为808 nm的LD泵浦源进行侧面泵浦,Nd:YAG晶体棒(Φ3×78 mm)的掺杂浓度(原子数分数)为1%,晶体被水冷处理,温度保持在23℃。平面反射镜(M₁、M₂和M₃)表面镀有1064 nm高反膜,输出耦合镜(M₄)表面镀有反射率为70%的1064 nm部分反射膜。法拉第旋光器(FR)与半波片(HWP)被放置在M₂与M₃之间,它们与四面腔镜组成一个行波腔,使谐振腔内的振荡光单向运转。腔内使用标准具进行协助选模,以获得稳定的单纵模输出。腔内使用孔径光阑(PH)对横模进行选择,使用初始透过率为40%的Cr:YAG可饱和吸收体进行被动调Q,谐振腔总长度为54 cm。

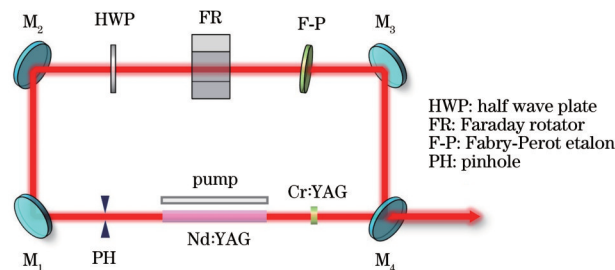


图1 LD泵浦1064 nm单纵模被动调Q激光器的实验设置

Fig. 1 Experimental setup of LD-pumped 1064 nm single-longitudinal-mode passively Q-switched laser

在被动调Q晶体的初始透过率固定的情况下,脉宽与腔长呈正相关。受实验器件本身尺寸的限制,为获得窄脉冲输出,选取谐振腔所能调节的最小长度54 cm。未插入标准具时,调节半波片,使腔长为54 cm的环形腔被动调Q激光器单向运转。使用光电探测器(THORLABS DET08C)对输出光进行探测,示波器(Tektronix MSO64)记录时域输出波形图。如图2所示,时域输出波形具有典型的多纵模拍频现象,在被动调Q过程中,荧光光子在脉冲增长的线性阶段开始时随机填充纵模,并且累积较快,以至于无法进行充分的纵模选择^[30]。

环形腔的纵模间隔计算公式为 $\Delta\nu_q = c/nL$,其中 c 为真空中光速, n 为折射率, L 为等效光学长度。经计

算可得54 cm环形腔的理论纵模间隔为0.46 GHz。图3(a)所示为54 cm腔长下输出波形的傅里叶变换频谱图,图中的两个峰值表明此时为两个纵模同时稳定的输出,而实际纵模间隔为0.95 GHz,约为理论纵模间隔的2倍。出现这种现象的原因是:输出激光线宽较宽,导致理论纵模间隔处的模式无法直接输出。由于有源腔激光器中线宽与腔长成反比,在保持其他实验参数不变的情况下,设置腔长为84 cm进行对比实验,计算所得纵模间隔为0.36 GHz,而实际纵模间隔为0.38 GHz,如图3(b)所示。实际纵模间隔与理论计算的纵模间隔相符,验证了线宽影响实际纵模间隔。

值得注意的是,环形腔的单向行波运转消除了纵模间的空间竞争,无驻波腔中模式空间竞争导致输出

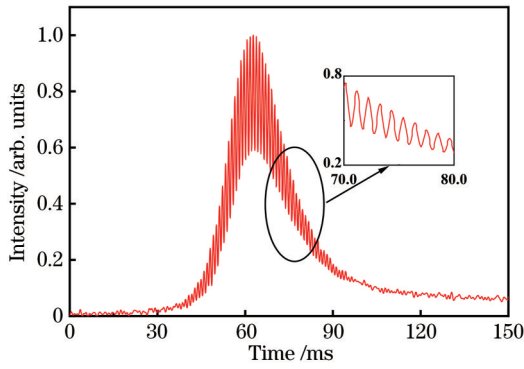


图 2 54 cm 腔长时单向环形腔调 Q 脉冲波形 (插图为 70~80 ns 处波形放大图)

Fig. 2 Q-switched pulse waveform of unidirectional ring cavity with 54 cm cavity length (illustration shows enlarged waveform at 70-80 ns)

纵模数量不稳定。环形腔中不同纵模间只存在自然竞争,侧面泵浦环形腔的空间结构导致纵模间隔较小,纵模的自然竞争不够充分,此时激光器为输出稳定的两个纵模输出。因此,此自由空间环形腔结构需要结合其他选模方法抑制多纵模的产生。

考虑到 54 cm 腔长下腔内只存在两个纵模,实际纵模间隔约为 0.95 GHz。为实现单纵模运转,需在腔

内插入一个标准具进行选模。由于环形腔中只存在两个纵模振荡,插入标准具的自由光谱范围应大于纵模间隔,标准具的自由光谱范围可表示为

$$\Delta\nu = \frac{c}{2n_1d}, \quad (1)$$

式中: n_1 为标准具折射率,取值为 1.5; d 为标准具厚度。由式(1)可知标准具厚度应小于 16 cm。要获得单纵模输出,标准具透射谱线宽度 $\delta\nu$ 还需满足 $\delta\nu < \Delta\nu_q, \delta\nu$ 的表达式为

$$\delta\nu = \frac{c(1-R)}{2\pi n_1d\sqrt{R}}, \quad (2)$$

式中: R 为标准具反射率。为了保证单纵模输出满足 $\delta\nu$ 小于纵模间隔,考虑到要获取短脉冲输出,应尽量缩小腔内器件尺寸,故选择标准具的厚度为 0.5 cm。在这种情况下,由式(2)计算得到的标准具的反射率要大于 86.5%。综上所述,在实验中选择厚度为 0.5 cm、反射率 R 为 90% 的标准进行协助选模,以实现单纵模输出。

在环形腔内插入标准具后获得了脉冲宽度为 23.6 ns 的单纵模输出,如图 4(a)所示。插入标准具后输出脉冲包络平滑的波形,对其进行傅里叶变换,观察到其傅里叶变换频谱没有其他峰值,表明此时激光器为单纵模输出,如图 4(b)所示。

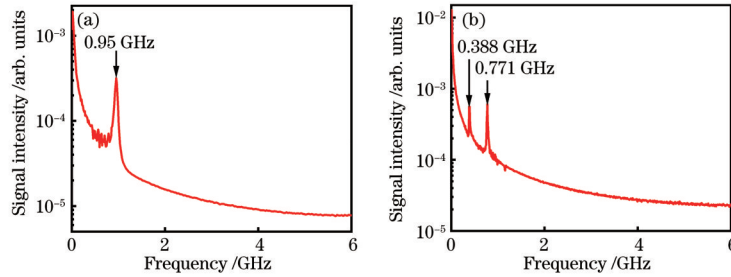


图 3 不同腔长下输出波形的傅里叶变换。(a) 54 cm; (b) 84 cm

Fig. 3 Fourier transforms of output waveforms under different cavity lengths. (a) 54 cm; (b) 84 cm

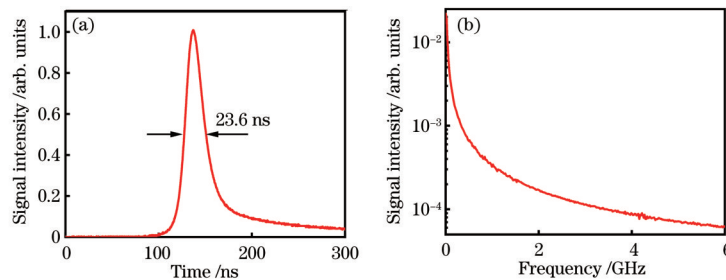


图 4 环形腔中插入标准具时调 Q 脉冲波形及其傅里叶变换。(a) 输出脉冲波形; (b) 波形的傅里叶变换

Fig. 4 Q-switched pulse waveform and its Fourier transform when etalon is inserted into ring cavity. (a) Output pulse waveform; (b) Fourier transform of waveform

采用自由光谱范围为 7.5 GHz、透过光谱宽度为 144 MHz 的标准具进行光谱测量,激光脉冲的干涉图处理结果如图 5(a)所示。经计算可得单纵模激光器的线宽为 0.39 GHz。这也证明了腔长为 54 cm 时纵模线宽较宽导致一倍纵模间隔处的模式无法输出,所

以实际纵模间隔为理论纵模间隔的 2 倍。

实验中对被动调 Q 环形腔单纵模激光器的输出参数进行测量。由于消除了空间烧孔效应,被动调 Q 环形腔激光器在输出能量以及单纵模率方面具有较好的稳定性。使用能量计(OPHIR PE50BB-DIF-C)

探测输出激光的能量稳定性,结果如图 5(b)所示,相对标准偏差为 1.56%。在消除了空间烧孔效应的环形腔中,连续记录一万发脉冲的单纵模率为 100%。

测量得到的光束质量因子 M_2 为 1.27,其拟合曲线和相应的空间光束轮廓如图 5(c)及其插图所示。

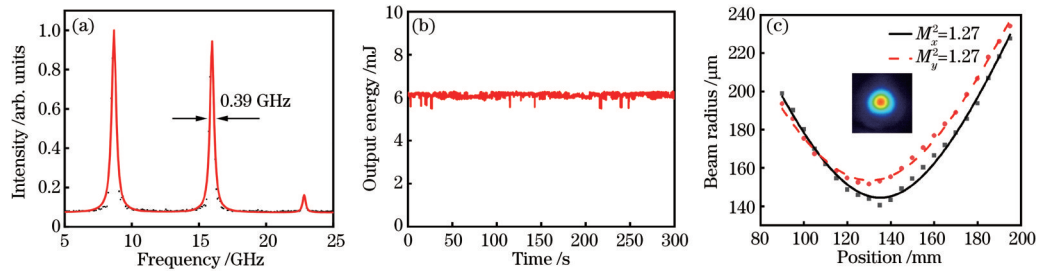


图 5 激光器输出参数。(a)激光器的输出线宽;(b)激光器的能量稳定性;(c) M^2 的测量结果(插图为焦点附近光斑)

Fig. 5 Output parameters of laser. (a) Output linewidth of laser; (b) energy stability of laser; (c) measurement result of M^2 (illustration is spot near focal point)

3 结 论

研制了一台紧凑的 LD 侧面泵浦被动调 Q 环形腔单纵模激光器,对输出脉冲波形进行傅里叶变换处理后的频谱进行分析,通过频谱图确定了激光器输出的纵模数量及纵模间隔。根据精确的纵模数据设计单纵模输出所需的标准具参数,最终消除了纵模的空间竞争及自然竞争,实现了稳定的高单纵模率短脉冲激光输出。激光器在 10 Hz 重复频率下工作,脉冲宽度为 23.6 ns,单脉冲能量为 6.1 mJ,相对标准偏差为 1.56%,光束质量因子 M^2 为 1.27。单纵模率稳定,连续记录一万发脉冲的单纵模率为 100%。对纵模的分析工作对稳定输出的环形谐振腔单纵模激光器的设计提供了参考,所搭建的稳定性良好的单纵模脉冲激光器可作为高单纵模率、高能量激光放大系统的种子源使用。

参 考 文 献

- [1] Chen C, Fu J Q, Gai Y Y, et al. Damaged bridges over water: using high-spatial-resolution remote-sensing images for recognition, detection, and assessment[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2018, 6(3): 69-85.
- [2] Ohira T, Segawa T, Nagai K J, et al. Large area InP submicron two-dimensional (2D) periodic structures fabricated by two-time laser holography[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(2B): 1085-1089.
- [3] Bode N N, Meylahn F, Willke B. Sequential high power laser amplifiers for gravitational wave detection[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 29469-29478.
- [4] 陈忆兰, 朱小磊, 张俊旋, 等. 单频 2 μm 波段全固态脉冲激光器技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050006.
Chen Y L, Zhu X L, Zhang J X, et al. Development of pulsed single-frequency 2 μm all-solid-state laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050006.
- [5] Guan H, Novack A, Galfsky T, et al. Widely-tunable, narrow-linewidth III-V/silicon hybrid external-cavity laser for coherent communication[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 7920-7933.
- [6] Huo X W, Qi Y Y, Zhang Y, et al. Research development of 589 nm laser for sodium laser guide stars [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134: 106207.
- [7] 尤巍, 杨学宗, 陈卫标, 等. 589 nm 激光钠导星技术研究综述(特邀)[J]. 光电技术应用, 2021, 36(5): 1-14, 22.
You W, Yang X Z, Chen W B, et al. Review of 589 nm sodium laser guide stars (invited) [J]. Electro-Optic Technology Application, 2021, 36(5): 1-14, 22.
- [8] Wang H L, Cha S, Kong H J, et al. Rotating off-centered lens in SBS phase conjugation mirror for high-repetition-rate operation[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9895-9905.
- [9] Bai Z X, Zhao Z A, Tian M H, et al. A comprehensive review on the development and applications of narrow-linewidth lasers[M]//Microwave and optical technology letters. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2021.
- [10] Bai Z X, Yuan H, Liu Z H, et al. Stimulated Brillouin scattering materials, experimental design and applications: a review[J]. Optical Materials, 2018, 75: 626-645.
- [11] 张宽收, 卢华东, 李渊骥, 等. 高功率低噪声全固态连续波单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501002.
Zhang K S, Lu H D, Li Y J, et al. Progress on high-power low-noise continuous-wave single-frequency all-solid-state lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501002.
- [12] Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Single-longitudinal-mode 1521 nm passively Q-switched Er: Yb: YAl₃(BO₃)₄ pulse microchip laser[J]. Optics Express, 2019, 27(18): 26080-26086.
- [13] Liu W, Ju Y L, Dai T Y, et al. Single-longitudinal-mode Ho: LuAG laser at 2.1 μm [J]. Laser Physics, 2016, 26(2): 025002.
- [14] Mi S Y, Chen Y, Liu G Y, et al. Measurement of optical homogeneity of ZnGeP₂ crystal using a 2.02 μm single-longitudinal-mode Tm: LuAG ring laser[J]. Applied

- Optics, 2020, 59(19): 5864-5869.
- [15] Li J, Yang S H, Zhao C M, et al. High efficient single-frequency output at 1991 nm from a diode-pumped Tm: YAP coupled cavity[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12161-12167.
- [16] Lux O, Sarang S, Kitzler O, et al. Intrinsically stable high-power single longitudinal mode laser using spatial hole burning free gain[J]. Optica, 2016, 3(8): 876-881.
- [17] Sarang S, Kitzler O, Lux O, et al. Single-longitudinal-mode diamond laser stabilization using polarization-dependent Raman gain[J]. OSA Continuum, 2019, 2(4): 1028-1038.
- [18] Yang X Z, Kitzler O, Spence D J, et al. Single-frequency 620 nm diamond laser at high power, stabilized via harmonic self-suppression and spatial-hole-burning-free gain[J]. Optics Letters, 2019, 44(4): 839-842.
- [19] Wu E, Pan H, Zhang S, et al. High power single-longitudinal-mode operation in a twisted-mode-cavity laser with a c-cut Nd: GdVO₄ crystal[J]. Applied Physics B, 2005, 80(4/5): 459-462.
- [20] Jin D, Bai Z X, Wang Q Z, et al. Doubly Q-switched single longitudinal mode Nd: YAG laser with electro-optical modulator and Cr⁴⁺: YAG[J]. Optics Communications, 2020, 463: 125500.
- [21] Yang X Z, Bai Z X, Chen D J, et al. Widely-tunable single-frequency diamond Raman laser[J]. Optics Express, 2021, 29(18): 29449-29457.
- [22] 牛昌东, 戴瑞峰, 刘瑞科, 等. 固体激光器单纵模选择技术及应用[J]. 光电技术应用, 2020, 35(5): 38-47.
Niu C D, Dai R F, Liu R K, et al. Single-longitudinal-mode selection technology and application of solid-state laser[J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35(5): 38-47.
- [23] Lei Y, Mao A F, Li Y L, et al. Research on single longitudinal mode laser based on F-P etalon and Q-switched delay[J]. Optik, 2018, 167: 1-6.
- [24] 焦月春, 马亚云, 李渊骥, 等. 全固态单纵模脉冲 Nd: YVO₄ 环形激光器[J]. 量子光学学报, 2014, 20(1): 81-84.
Jiao Y C, Ma Y Y, Li Y J, et al. All-solid-state single-longitudinal-mode pulse Nd: YVO₄ ring laser[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2014, 20(1): 81-84.
- [25] Shen Y, Bo Y, Zong N, et al. A 37 mJ, 100 Hz, high energy single frequency oscillator[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(8): 084208.
- [26] 李永智, 张萌, 闫东钰, 等. 基于 Yb: YAG/YAG/Cr: YAG/YAG 复合晶体的高效被动调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2101005.
Li Y Z, Zhang M, Yan D Y, et al. Highly efficient passively Q-switched laser based on Yb: YAG/YAG/Cr: YAG/YAG composite crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2101005.
- [27] 雷芻, 刘奇, 王煜, 等. 近衍射极限输出的大芯径尺寸晶体波导被动调 Q 脉冲激光器[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214001.
Lei H, Liu Q, Wang Y, et al. Passively Q-switched pulse laser with large core size crystal waveguide near diffraction-limit beam quality output[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214001.
- [28] Sooy W R. The natural selection of modes in a passive Q-switched laser[J]. Applied Physics Letters, 1965, 7(2): 36-37.
- [29] 李隆, 张秋娟, 张春玲, 等. 脉冲激光二极管巴条侧面泵浦 Nd: YAG 陶瓷瞬态热效应研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20200495.
Li L, Zhang Q J, Zhang C L, et al. Transient thermal effect of Nd: YAG ceramics with pulsed laser diode bar side-pumped[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20200495.
- [30] Negri J R, Pirzio F, Agnesi A. Passively Q-switched single-frequency Nd: YVO₄ ring laser with external feedback[J]. Optics Express, 2018, 26(9): 11903-11908.