

## 914 nm LD 泵浦 RTP 电光调 Q 的高效率 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

胡 星,程德江,郭芷妍,姜梦华,惠勇凌,雷 劼,李 强

(北京工业大学 激光工程研究院,北京 100124)

**摘要:**报道了一种激光二极管(LD)端面连续抽运的高重频、高光光效率电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器。采用 RbTiOPO<sub>4</sub>(RTP)晶体对作为调 Q 元件,通过减小热效应和模式匹配技术,实现了高效率的高重频窄脉宽 1 064 nm 脉冲激光输出。一方面采用低吸系数的 914 nm 波长抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,使晶体内部热分布均匀,从而获得高量子效率的同时减小了热效应影响。另一方面通过优化泵浦光斑半径,实现泵浦光和振荡光好的模式匹配。在重频 200 kHz 时,获得了最高输出功率 16 W,脉宽 9 ns,单脉冲能量 80 μJ,光束质量  $M^2 < 1.2$  的稳定脉冲激光,泵浦吸收功率 31 W,对应的光光转化效率为 51.6%。据笔者所知,这是 RTP 电光调 Q 实现的最高效率的脉冲激光器。

**关键词:** 高效率; RTP 调 Q; 914nm 泵浦

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0105001

## Highly efficient RTP electro-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser by end-pumping at 914 nm

Hu Xing, Cheng Dejiang, Guo Zhiyan, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang

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

**Abstract:** An electro-optic (EO) Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with high repetition rate, end-pumped by continuous-wave (CW) laser diode (LD) was reported. Using RbTiOPO<sub>4</sub>(RTP) single crystal as an EO Q-switch, by matching mode of oscillation light and pump light, 1 064 nm laser output with high efficiency, high repetition and short pulse width was realized. On the one hand, low absorption coefficient of 914 nm wavelength was adopted to pump Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, so that the heat distribution inside the crystal was uniform, thereby achieving high quantum efficiency while reducing the thermal effect. On the other hand, the pump light spot radius was optimized to match mode of pump light and oscillation light. At the repetition rate of 200 kHz, the maximum average output power of 16 W, full width at half maximum of pulses of 9 ns, single pulse energy of 80 μJ and beam quality  $M^2 < 1.2$  are achieved at an absorption pump power of 31 W, corresponding to an optical conversion efficiency of 51.6%. To the best of our knowledge, this is the highest efficiency reported on the EO Q-switched laser by using RTP crystals.

**Key words:** high efficiency; RTP electro-optical Q-switched; 914 nm pumping

收稿日期:2018-08-13; 修订日期:2018-09-17

基金项目:国家自然科学基金(61378023);北京市自然科学基金(4174085);国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

作者简介:胡星(1988-),男,博士生,主要从事高功率固体激光器方面的研究。Email: xinghu@emails.bjut.edu.cn

导师简介:李强(1965-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事高功率固体激光器方面的研究工作。Email: ncltq@bjut.edu.cn

## 0 引言

激光二极管(LD)抽运的高重复率窄脉宽固体激光器(DPSSL),由于结构紧凑、转换效率高、光束质量好等优点,在激光雷达、空间通信、激光测距等领域具有重要应用<sup>[1-2]</sup>。目前,高重复率固体激光器大都采用被动 Q 开关或主动 Q 开关作为调 Q 元件<sup>[3-4]</sup>。其中被动调 Q 技术成本低、结构简单,但其脉冲重复频率不易控制,输出单脉冲能量相对较低<sup>[5]</sup>;而主动调 Q 技术具有脉冲重复频率可控、单脉冲能量大、峰值功率高等特点而被广泛使用。常用的主动调 Q 技术包括声光调 Q 技术和电光调 Q 技术<sup>[6]</sup>,与声光调 Q 技术相比,电光调 Q 技术具有开关速度快、脉冲宽度窄等优点,可以实现重复频率 Hz 到 kHz、脉冲宽度纳秒量级的脉冲输出。

2006 年德国凯泽斯劳滕工业大学 McDonagh 报道了 888 nm 双端泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 脉冲激光器,利用腔内两个对称凸面镜补偿热透镜,实现了重频 100 kHz,脉宽 6 ns,最高输出功率 41 W,光光转化率 40%<sup>[7]</sup>。2012 年清华大学柳强利用声光调 Q,采用类似结构实现了重频 200kHz,脉宽 16.65 ns,最高输出功率 57 W,光光转化率 43.7%<sup>[8]</sup>。2015 年中国科学院光电研究院石朝辉采用 880 nm 连续抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,实现了重频 500 kHz,脉宽 5 ns,最高平均输出功率 10 W 激光输出,光光转化率 33%<sup>[9]</sup>。分析国内外研究现状可以看出,获得高效率高重频激光输出可以通过两种途径获得:首先采用带内泵浦,可以提高量子效率,有效减小热透效应;其次,通过设计和优化振荡光和泵浦光获得好的模式匹配。常规 808 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 输出功率通常限制在十几瓦的输出,这是由于晶体内过高的热效应会导致光束质量的退化,甚至晶体断裂<sup>[10]</sup>。而采用 880 nm 或 888 nm 带内泵浦可以有效减小热负荷,增加输出功率的同时并保持高光束质量。

2009 年, Sangla 等首次报道另一种高效率的 914 nm 抽运方式,利用 914 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>, 获得 11.5 W 连续输出,光光效率高达 78.7%<sup>[11]</sup>。与 880 nm 泵浦相比,热负荷可以减小 18.5%,具有更高的量子效率。近几年也出现了关于 914 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 高重频领域研究的报道。2012 年北京工

业大学常亮利用 914 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>, 腔内两端加凸面镜补偿热透镜的方法,实现了重频 100 kHz,脉宽 43 ns,最高输出平均功率 31.8 W 脉冲激光输出,光光转化效率 47%<sup>[12]</sup>。2017 年笔者所在课题组利用 914 nm 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>, 通过调整泵浦光斑半径,实现好的模式匹配,获得了重频 7 kHz,脉宽 4 ns,光光转化效率 44%,最高输出功率 35 W 的脉冲激光输出<sup>[13]</sup>。

文中采用 RTP 晶体对作为调 Q 元件,通过 914 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 减小热效应和调整泵浦光斑实现好的模式匹配,在重频 200 kHz 时,获得了最高输出功率 16 W,脉宽 9 ns,单脉冲能量 80 μJ,光束质量  $M^2 < 1.2$  的稳定脉冲激光,泵浦吸收功率 31 W,对应的光光转化效率为 51.6%。据笔者所知,这是 RTP 电光调 Q 914 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 实现的最高效率。

## 1 实验装置及原理

激光器实验装置由图 1 所示可知,泵浦采用芯径为 400 μm、数值孔径(NA)为 0.22 的光纤耦合半导体激光器,中心波长为 914 nm,最大功率为 60 W,泵浦光经放大倍率为 1:1.25 的扩束聚焦系统耦合到激光晶体里,抽运光束腰直径为 0.5 mm。晶体沿  $a$  轴切割,尺寸为 3 mm×3 mm×(22+2)mm,22 mm 长掺杂浓度 0.7at%Nd<sup>3+</sup> 粒子 YVO<sub>4</sub> 键合 2 mm 非掺杂 YVO<sub>4</sub>,晶体前后表面都镀有 914 nm 和 1 064 nm 增透膜。激光晶体四面镀金,用铝箔包裹后固定在紫铜水冷热沉中,冷却水温为 22℃。激光谐振腔采用平平腔结构,腔长 100 mm, $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  均为平面镜, $M_1$ 、 $M_2$  分别为镀 914 nm 高透膜和 1 064 nm 高反膜的 0°全反镜和 45°双色镜, $M_3$  为镀 1064 nm 透过率 70%输出耦合镜。腔内采用薄膜偏振片 TFP 起偏。

RTP 晶体对尺寸为 4 mm×4 mm×14 mm。以  $x$  轴正向为通光方向,外加电场沿  $z$  轴方向,两块 RTP 晶体加电压方向互相垂直正交,入射的线偏振光与  $z$  轴成 45°以补偿自然双折射。RTP 1/4λ 电压为 1 080 V。实验所使用的高频高压电光驱动的上升沿、下降沿时间为 3 ns。实验采用加压式调 Q 方式,由偏振片,1/4 波片和两块加电场方向正交的 RTP 晶体共同构成 Q 开关。RTP 晶体上未加电压

时,旋转 1/4 波片,使经过起偏器的  $p$  线偏振光往返两次经过 1/4 波片后变  $s$  光,此时谐振腔处于高损耗状态无法起振,Q 开关关闭;在 RTP 晶体上加 1/4 波片电压后,两块 RTP 晶体相互补偿了自然双折射,线偏振光两次经过 1/4 波片和电光晶体后偏振方向转过  $180^\circ$ ,通过起偏器后形成振荡,Q 开关处于打开状态,实现调 Q 脉冲输出。

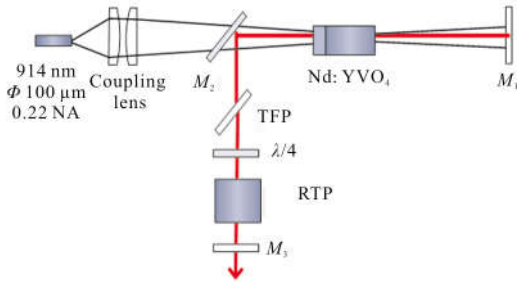


图 1 实验结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

## 2 实验结果与讨论

图 2 分别为 10、100、200 kHz 不同重频下的调 Q 输出的平均功率和单脉冲能量。当晶体吸收功率为

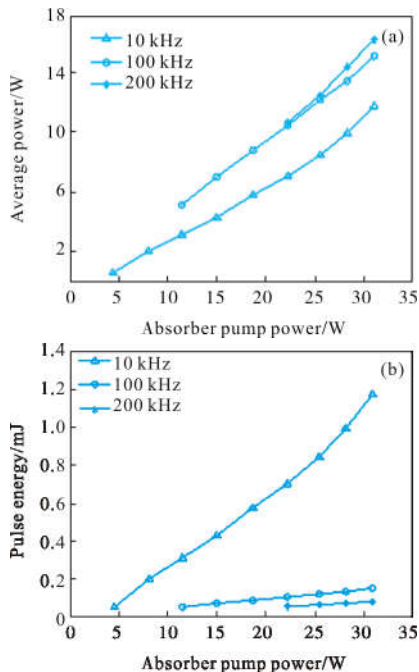


图 2 (a) 10、100、200 kHz 激光输出功率随晶体吸收功率的变化,

(b) 10、100、200 kHz 单脉冲能量随晶体吸收功率的变化

Fig.2 (a) average output power versus the absorption power at 10, 100, 200 kHz, (b) pulse energy versus the absorption power at 10, 100, 200 kHz

31 W 时,重频 10 kHz 的最大平均输出功率 11.8 W,单脉冲能量为 1.18 mJ,对应的光光转换效率为 38%;重频 100 kHz 的最大平均输出功率 15.16 W,单脉冲能量为 151.6  $\mu$ J,对应的光光转换效率为 48%;重频 200 kHz 的最大平均输出功率 16 W,单脉冲能量为 80  $\mu$ J,对应的光光转换效率为 51.6%。激光器的平均输出功率和单脉冲能量随吸收泵浦功率近线性增加,这是由于吸收泵浦功率在 12~31 W 变化时,测得热焦距为 565~165 mm,腔长 100 mm 的平平腔处于稳定区。

图 3 为分别为 10、100、200 kHz 不同重频下的调 Q 激光输出脉宽随泵浦功率变化关系图。在吸收泵浦功率 31 W 时,重频 10 kHz 获得最窄脉宽为 5.3 ns,对应的峰值功率为 222 kW;重频 100 kHz 获得最窄脉宽为 7.2 ns,对应的峰值功率为 21 kW;重频 200 kHz 获得最窄脉宽为 9.0 ns,对应的峰值功率为 8.9 kW。调 Q 激光的脉宽随着泵浦能量的增加而变窄。相同的泵浦能量下,输出激光的脉宽宽度随着重频的增加而变宽。

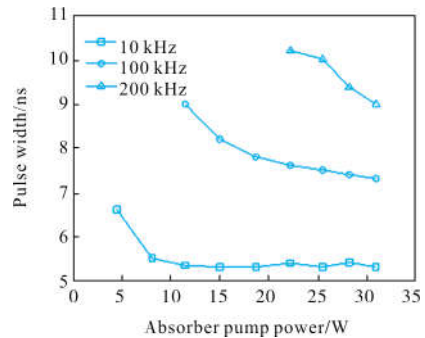
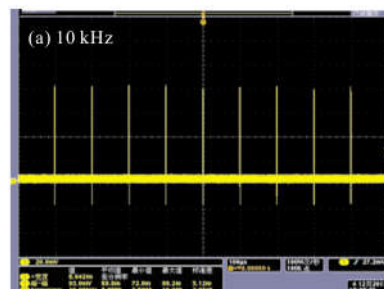


图 3 10、100、200 kHz 重复频率脉宽随吸收泵浦功率的变化

Fig.3 Single pulse width versus absorbed pump power of Q-switched pulsed laser at 10, 100, 200 kHz

图 4(a)、(c)、(e)为调 Q 工作状态下重频分别为 10、100、200kHz 条件下测量所得的光脉冲序列图,图 4(b)、(d)、(f)为对应的最窄脉宽图。重频 10、100、200kHz 时调 Q 脉冲能量不稳定性分别为 1%、1.5%、2.4%。



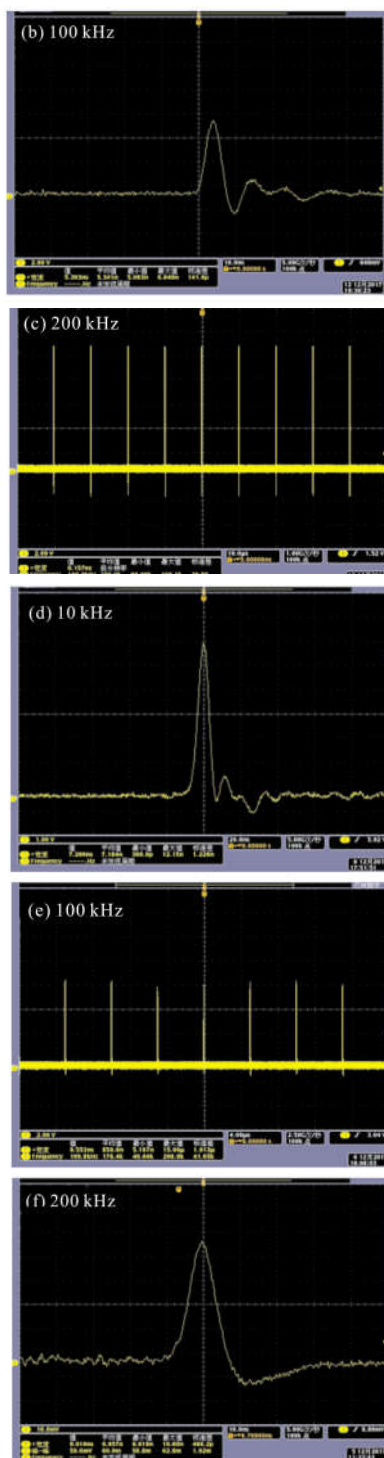


图 4 不同重复频率下调 Q 输出脉冲序列和单脉冲波形。(a)、(c)、(e) 分别为 10、100、200 kHz 时输出脉冲序列;(b)、(d)、(f) 分别重频 10、100、200 kHz 时单脉冲波形

Fig.4 Oscilloscope trace of (a),(c),(e) pulse trains 10, 100, 200 kHz respectively and (b),(d),(f)single pulse shape at the repetition rate of 10, 100, 200 kHz respectively

图 5 为重频 100 kHz, 平均输出功率为 15 W

时,输出激光的光束质量及远场光斑形状,利用偏振片后加入衰减片对光束进行衰减,通过  $f=100\text{ mm}$  的透镜对光束进行压缩,用 CCD 分别测出光束束腰前后对称位置光斑的直径,拟合求得输出激光光束质量  $M^2$  为 1.2。

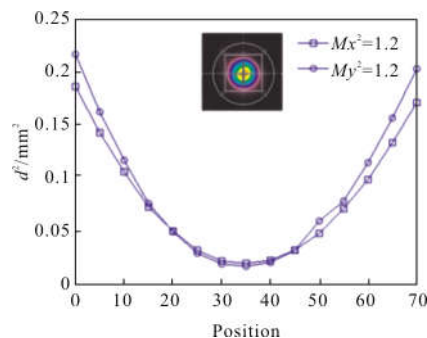


图 5 调 Q 激光器输出光束质量及远场光斑形状

Fig.5 Output beam quality and far field spot shape of Q-switched pulsed laser

实现高效率一方面是因为采用低吸系数的 914 nm 波长抽运,使晶体内部热分布均匀,从而获得高量子效率的同时减小了热效应影响。另一方面是因为泵浦光和振荡光实现好的模匹配。为实现好的模匹配,通常要求晶体内部泵浦光斑接近振荡光半径。我们根据 ABCD 传输矩阵优化了泵浦光斑半径,在考虑热透镜的情况下,模拟计算了不同抽运功率时晶体内部振荡基模半径变化,如图 6 所示。在此基础上,通过实验对比了不同泵浦光光斑半径对激光输出功率和光光转化效率的影响,泵浦光光斑半径分别为 200、250、400  $\mu\text{m}$  连续状态下激光输出参数如图 7 所示。在相同吸收泵浦功率下,减小泵浦光斑半径可以提高泵浦功率密度降低出光阈值,获得高的

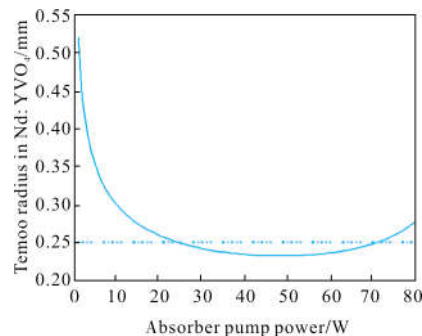


图 6 激光晶体内部基模半径随吸收泵浦功率变化规律

Fig.6 Variation of  $TM_{00}$  radius with the absorption power

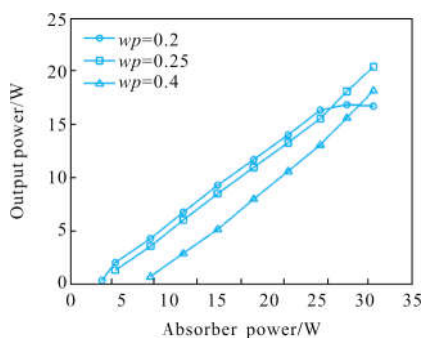


图 7 连续激光输出功率随晶体吸收功率的变化

Fig.7 Variation of output power with the absorption power

转化效率,但过小的泵浦光斑热效应显著,影响激光输出功率和稳定性。在满足输出功率和光束质量要求的条件下,最终优化出与腔模直径有效匹配泵浦光斑半径,约为 250  $\mu\text{m}$ 。

### 3 结论

报道了一种 914 nm LD 端面抽运的高光光转化效率的高重频窄脉宽电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器。在重频 200 kHz 时,获得了最高输出功率 16 W,脉宽 9 ns,单脉冲能量 80  $\mu\text{J}$ ,光束质量  $M^2 < 1.2$  的稳定脉冲激光,泵浦吸收功率 31 W,对应的光光转化效率为 51.6%。

### 参考文献:

[1] Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli, et al. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1654-1659. (in Chinese)  
朱小磊, 唐昊, 李小莉, 等. 高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1654-1659.

[2] Fan Haoran, Yu Yongji, Zhu He, et al. 500 kHz A-O Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser pumped by dual-end avalanche-locked 878.6 nm laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0606001. (in Chinese)  
范灏然, 于永吉, 朱贺, 等. 500 kHz 波长锁定 878.6 nm LD 双端泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 激光器 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 0606001.

[3] Li Jingzhao, Chen Zhenqiang, Zhu Siqi. High-peak-power and short-pulse laser with a Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG/YAG composite crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0606007. (in Chinese)

李景照, 陈振强, 朱思祁. 基于 Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>: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.

[4] Dai Qin, Cui Jianfeng, Li Yequi, et al. Pulse LD pumped kilohertz 1.57  $\mu\text{m}$  solid-state laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0105003. (in Chinese)  
岱钦, 崔建丰, 李业秋, 等. 脉冲 LD 泵浦千赫兹 1.57  $\mu\text{m}$  全固态激光器 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0105003.

[5] Jun Dong, Ken-Ichi Veda, Akira Shirakawa, et al. Composite Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG ceramics picosecond microchip lasers [J]. *Optics Express*, 2007, 15 (22): 14516-14523.

[6] Koechner W. Solid-State Laser Engineering[M]. Berlin: Springer, 2013.

[7] McDonagh L, Wallenstein R, Knappe R. 47 W, 6 ns constant pulse duration, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3303-3305.

[8] Hong H, Huang L, Liu Q, et al. Compact high-power, TEM<sub>00</sub> acousto-optics Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator pumped at 888 nm [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(3): 323-327.

[9] Liu X, Shi Z, Huang Y, et al. Very high repetition-rate electro-optical cavity-dumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with optics and dynamics stabilities[J]. *Optics Communications*, 2015, 336: 273-277.

[10] Peng X, Xu L, Asundi A. Power scaling of diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/sub4/lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(9): 1291-1299.

[11] Sangla D, Castaing M, Balembois F, et al. Highly efficient Nd:YVO<sub>4</sub> laser by direct in-band diode pumping at 914 nm [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2159-2161.

[12] Chang L, Yang C, Yi X J, et al. 914 nm LD end-pumped 31.8 W high beam quality EO Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser without intracavity polarizer [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(9): 1369-1372.

[13] Zhou Dandan, Yin Xingliang, Wang Yu, et al. High-efficiency electro-optical cavity dumped at 914 nm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101013.  
周丹丹, 尹兴良, 王煜, 等. 914 nm LD 泵浦高效率腔倒空电光调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101013.