

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.01.019

李旭, 邓涛, 边嘉仪, 等. 基于 Yb: YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 晶体的波长可调谐被动调 Q 激光器的研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48 (1): 240-249.

# 基于 Yb: YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 晶体的 波长可调谐被动调 Q 激光器的研究

李旭, 邓涛, 边嘉仪, 熊陶, 唐曦, 高子叶

西南大学 物理科学与技术学院/微纳结构光电子学重庆市重点实验室, 重庆 400715

**摘要:** 近红外全固态波长可调谐被动调 Q 激光器输出的激光具有峰值功率高、光束质量优异、波长更加灵活适配等特点, 然而全固态波长可调谐被动调 Q Yb: YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (Yb: YCOB) 激光器还未见报道。为此, 开展了二极管泵浦的波长可调谐被动调 Q Yb: YCOB 激光器的实验研究。谐振腔中未插入波长调谐元件时, 实现了工作波长位于 1 032 nm 的调 Q 激光输出。谐振腔中插入三棱镜作为激光波长调谐元件时, 实现了波长可调谐被动调 Q 激光输出。实验结果表明: 当泵浦功率为 5 W, 输出镜的透射率分别为 1.6%、2.5% 和 5.0% 时, 调 Q 激光的波长调谐范围分别为 1 016~1 038 nm、1 019~1 036 nm 和 1 019~1 035 nm, 对应的波长调谐宽度分别为 22 nm、17 nm 和 16 nm, 为 Yb: YCOB 晶体在波长可调谐激光器领域的应用提供了新的实验依据。

**关键词:** 被动调 Q; 波长调谐; Yb: YCOB 晶体;

全固态激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2026)01-0240-10

## Research on Wavelength-Tunable Passively Q-Switched Laser Based on Yb: YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> Crystal

LI Xu, DENG Tao, BIAN Jiayi,  
XIONG Tao, TANG Xi, GAO ZiyeSchool of Physical Science and Technology, Southwest University/Chongqing Key Laboratory of  
Micro & Nano Structure Optoelectronics, Chongqing 400715, China

**Abstract:** The output of near-infrared all-solid-state passively Q-switched laser is characterized by its high

收稿日期: 2024-08-08

基金项目: 国家重点研发计划子课题项目(2023YFB2905400); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0120); 国家自然科学基金项目(61805205)。

作者简介: 李旭, 硕士研究生, 主要从事全固态脉冲激光技术研究。

通信作者: 高子叶, 博士, 副教授。

peak power, excellent beam quality, and more flexible and adaptable wavelengths. However, there are no reports on all-solid-state wavelength-tunable passively Q-switched Yb : YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (Yb : YCOB) lasers. In this study, a diode-pumped wavelength-tunable passively Q-switched Yb : YCOB laser was experimentally investigated. When no wavelength-tunable element was inserted in the cavity, the output of Q-switched laser with a wavelength at 1 032 nm was achieved. When a prism was inserted into the cavity as a laser wavelength-tunable element, the output of wavelength-tunable passively Q-switched laser was achieved. The experimental results show that when the pump power is 5 W and the transmittance of the output mirror is 1.6%, 2.5% and 5.0%, the wavelength-tunable range of the Q-switched laser is 1 016~1 038 nm, 1 019~1 036 nm, and 1 019~1 035 nm, with wavelength-tunable width of 22 nm, 17 nm, and 16 nm, respectively. This study provides new experimental evidence for the application of the Yb : YCOB crystal in wavelength-tunable lasers.

**Key words:** passively Q-switched; wavelength-tunable; Yb : YCOB crystal; all-solid-state laser

近红外全固态被动调 Q 激光器能够输出高峰值功率、高重复频率和短脉冲的激光, 具有结构紧凑、稳定性好、效率高等优点, 广泛应用于激光医学、光谱分析、材料加工、光通信等领域<sup>[1-3]</sup>。被动调 Q 是目前获得调 Q 激光的技术之一, 其利用可饱和吸收体的可饱和吸收效应实现脉冲的输出, 具有结构简单、可自启动等优点, 得到了广泛的使用。Cr : YAG/V : YAG<sup>[4-6]</sup>、半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorption Mirror, SESAM)<sup>[7-10]</sup>、石墨烯<sup>[11-13]</sup>、二硫化钨<sup>[14]</sup>、碳纳米管<sup>[15]</sup>等材料作为可饱和吸收体已经应用于近红外被动调 Q 全固态激光器, 并实现了调 Q 激光的输出。其中, SESAM 具有低阈值、可自启动、集成度高等优点<sup>[16]</sup>, 备受研究者关注。

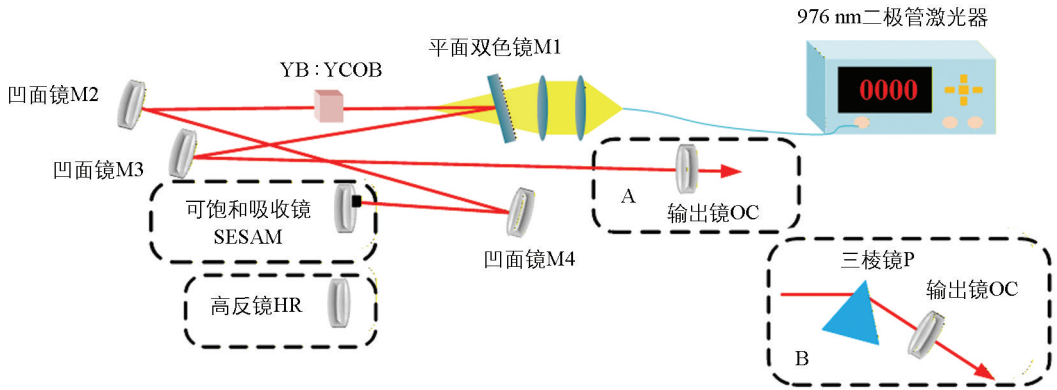
能够实现 1 μm 激光输出的增益介质主要有 Nd<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup> 离子掺杂激光材料。Nd<sup>3+</sup> 离子掺杂激光材料具有量子效率高、吸收光谱宽、辐射寿命长等优点, 但 Nd<sup>3+</sup> 离子是典型的四能级结构, 能级结构较 Yb<sup>3+</sup> 离子复杂<sup>[17]</sup>。另一种常用的掺杂激光材料 Yb<sup>3+</sup> 离子具有寿命长, 发射光谱宽等激光性能, 而且 Yb<sup>3+</sup> 离子只有<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 和<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 2 个量子态能级, 能级结构简单, 更适合当今的新型高能激光应用<sup>[18]</sup>。Yb : YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (Yb : YCOB) 晶体是一类具有较宽发射光谱和优良激光性能的新型激光增益介质, 已成为国内外科研工作者的研究热点<sup>[19]</sup>。Zhang 等<sup>[20]</sup>采用提拉法生长了 Yb : YCOB 晶体, 并测量了该晶体的吸收光谱和荧光光谱, 发现该晶体的发射波长范围为 930~1 130 nm, 而且在波长为 976.4 nm 处具有很强的吸收峰, 因此二极管激光器是 Yb : YCOB 晶体的理想泵浦源。Yoshida 等<sup>[21-22]</sup>与 Gao 等<sup>[23]</sup>先后基于 SESAM 被动锁模 Yb : YCOB 激光器实现了飞秒激光脉冲的输出。Gao 等<sup>[24]</sup>在 Yb : YCOB 中实现了克尔透镜锁模, 获得了 73 fs 激光脉冲的输出。在此基础上, 基于克尔透镜锁模 Yb : YCOB 激光器实现了波长可调谐范围为 1 039~1 049 nm 的飞秒激光<sup>[25]</sup>。Chen 等<sup>[26]</sup>采用 GaAs 作为可饱和吸收体在 Yb : YCOB 晶体中实现了工作波长为 1 032 nm 附近的被动调 Q 激光。Yang 等<sup>[27]</sup>采用了 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 拓扑绝缘体作为可饱和吸收体, 在 Yb : YCOB 中实现了双波长(1 030.3 nm 和 1 033.3 nm) 的被动调 Q 激光输出。Tian 等<sup>[28]</sup>基于 WS<sub>2</sub> 可饱和吸收体实现了双波长(1 033.5 nm 和 1 036.4 nm) 被动调 Q Yb : YCOB 激光器。

上述调 Q 激光器都工作在固定波长, 然而波长可调谐被动调 Q Yb : YCOB 激光器还未见报道。基于此, 本文提出了一种基于 SESAM 波长可调谐被动调 Q Yb : YCOB 激光器的实验方案, 并详细分析不同透射率输出镜下调 Q 激光的输出特性。

## 1 被动调 Q Yb : YCOB 激光器

被动调 Q Yb : YCOB 激光器的光路如图 1 所示。泵浦源是一个商用的 976 nm 的二极管激光器, 其具有 105 μm 的纤芯直径和 0.22 的数值孔径, 泵浦激光通过 1 : 1 聚焦耦合系统耦合到 Yb : YCOB 晶体中。激光增益介质采用尺寸为 3×3×2 mm<sup>3</sup>、Yb<sup>3+</sup> 离子掺杂浓度为 10 at. %、沿 x 向切割的 Yb : YCOB 晶体。

为了有效地散热,将 Yb:YCOB 晶体用铝箔包裹,并置于水冷铜块上,在整个实验过程中将水温控制在  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。M1 是平面双色镜,朝谐振腔外的一面在  $976\pm 10\text{ nm}$  处镀有增透膜,另一面在  $1\ 000\sim 1\ 100\text{ nm}$  处镀有高反膜,用于透过泵浦激光并反射增益激光。M2 和 M3 是曲率半径均为  $200\text{ mm}$  的凹面镜,在  $940\sim 1\ 100\text{ nm}$  范围内镀有高反膜。M4 是具有  $300\text{ mm}$  曲率半径、镀有  $900\sim 1\ 100\text{ nm}$  高反膜的凹面镜,用于将增益激光聚焦到 SESAM 上提供高激光功率密度并且反射增益激光。SESAM(BATOP GmbH)是半导体可饱和吸收镜,工作中心波长为  $1\ 064\text{ nm}$ ,饱和通量为  $120\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,饱和吸收率为  $0.7\%$ ,弛豫时间为  $1\text{ ps}$ 。HR 是高反镜,在  $970\sim 1\ 120\text{ nm}$  范围内镀有高反膜。OC 是不同透射率的输出镜,透射率(Transmission)  $T$  分别为  $1.6\%\ @\ 1\ 040\pm 50\text{ nm}$ 、 $2.5\%\ @\ 1\ 000\sim 1\ 100\text{ nm}$  和  $5.0\%\ @\ 680\sim 1\ 100\text{ nm}$ ,用于反射增益激光并且输出部分增益激光。P 是材料为 SF6 的三棱镜,将其作为激光波长调谐元件。实验中采用功率计(Thorlabs-PM100D Thorlabs-CAL)测量激光的输出功率,相机式光束质量分析仪(CCD)测量光斑强度分布,光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6374)测量激光的光谱,示波器(Agilent Technologies DSO9254A)测量激光的脉冲序列。



A 指未插入调谐元件时,调 Q 激光器的输出端;B 指插入调谐元件时,可调谐被动调 Q 激光器的输出端。

图 1 被动调 Q Yb:YCOB 激光器实验装置图

首先,谐振腔中未插入三棱镜时,采用 SESAM 作为可饱和吸收体,如图 1 中 A 所示,实现了稳定的调 Q 激光输出。图 2 为调 Q 激光的平均输出功率随泵浦功率大小变化的曲线。对于  $T=1.6\%$ 、 $2.5\%$  和  $5.0\%$  的输出镜,调 Q 激光的泵浦阈值功率分别为  $1.6\text{ W}$ 、 $1.2\text{ W}$ 、 $1.6\text{ W}$ ,最高输出功率、斜率效率、光光转换效率分别为  $146\text{ mW}$ 、 $2.73\%$ 、 $2.43\%$ , $148\text{ mW}$ 、 $2.91\%$ 、 $2.47\%$ , $237\text{ mW}$ 、 $4.81\%$ 、 $3.95\%$ 。在泵浦功率为  $3\text{ W}$ 、 $T=2.5\%$  时,激光光斑强度分布如图 2 中插图所示,表明调 Q 激光运转在基模。

图 3 显示了泵浦功率为  $3\text{ W}$ , $T=1.6\%$ 、 $2.5\%$  和  $5.0\%$  时,调 Q 激光的时间序列和光谱。图 3a、3d、3g 表明在不同透射率下调 Q 激光脉冲均较为稳定。如图 3b、3e、3h 所示,当泵浦功率为  $3\text{ W}$ , $T=1.6\%$ 、 $2.5\%$  和  $5.0\%$  时,调 Q 激光的脉冲宽度分别为  $12.84\ \mu\text{s}$ 、 $12.08\ \mu\text{s}$  和  $11.25\ \mu\text{s}$ 。由于谐振腔长度较长,所以输出的调 Q 激光的脉冲宽度在  $\mu\text{s}$  量级<sup>[29]</sup>。同时可以看出随着输出镜透射率的增大,脉冲宽度变窄,原因是输出镜透射率越大,谐振腔内的能量放出的速度越快,导致脉冲的宽度变窄<sup>[30]</sup>。如图 3c、3f 和 3i 所示,在不同透射率下调 Q 激光的中心波长均位于  $1\ 032\text{ nm}$  左右,表明谐振腔内

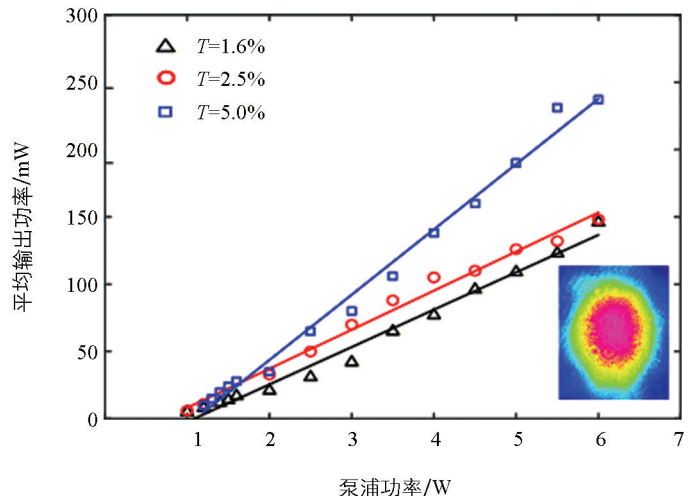


图 2 被动调 Q Yb:YCOB 激光器的平均输出功率曲线以及光斑强度分布图

没有波长调谐元件时, 输出镜的透射率未影响输出激光的波长。

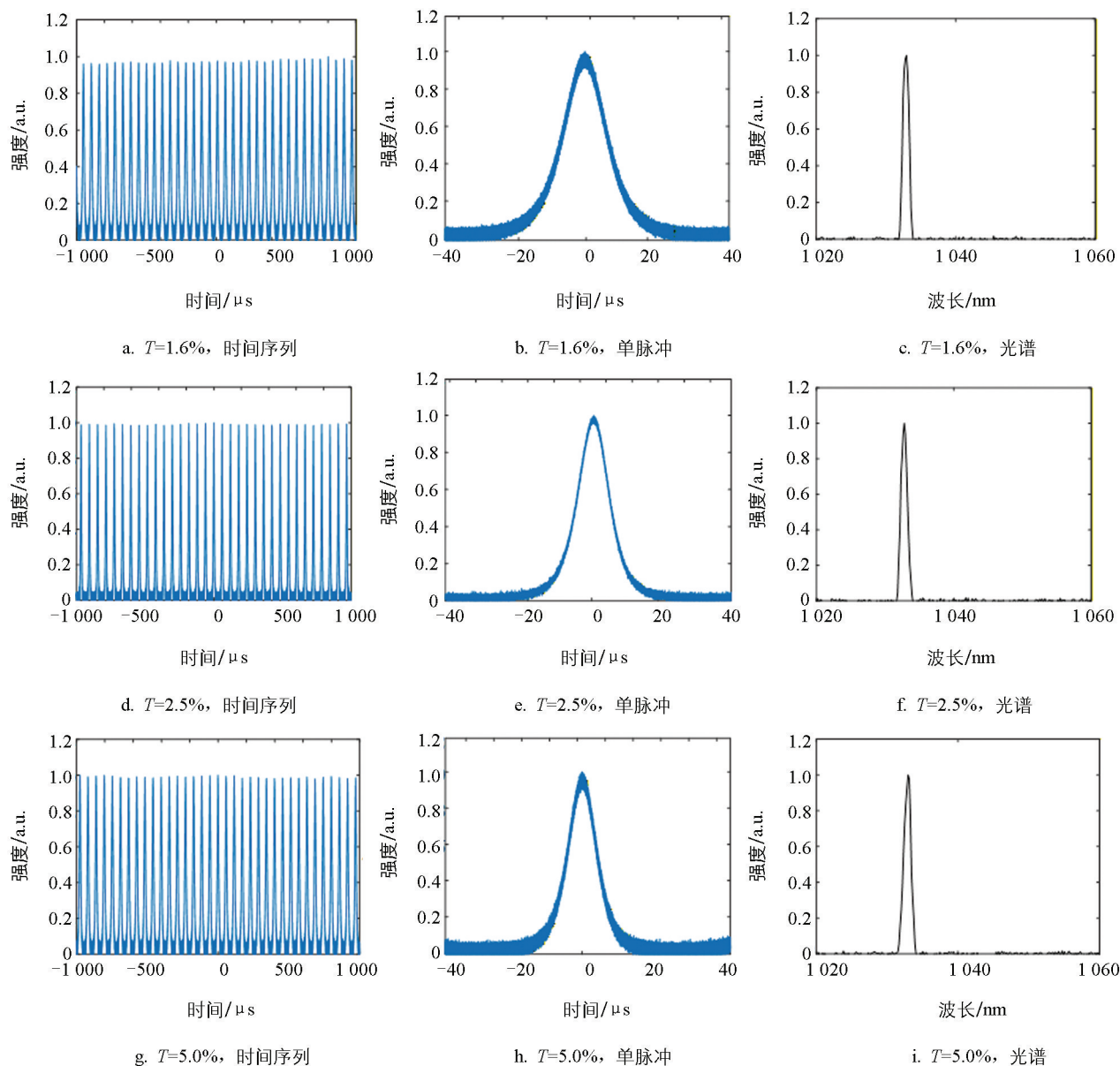


图 3 泵浦功率为 3 W 时, 不同透射率下调 Q 激光的时间序列和光谱图

被动调 Q 激光器的性能受到多个参数的影响, 其中重复频率和脉冲宽度是至关重要的指标。从理论上分析, 随着泵浦功率的进一步增大, 被动调 Q 脉冲的重复频率会随之增大, 在阈值附近的低泵浦功率下, 脉冲宽度急剧减小, 在高泵浦功率下缓慢减小<sup>[1]</sup>。因此, 本文记录了在不同泵浦功率和不同透射率输出镜下调 Q 激光的重复频率和脉冲宽度, 如图 4 所示。为了防止泵浦功率过大而损坏激光晶体, 在实验调节过程中将泵浦功率控制在 6 W 以内。从图 4 可以看出, 对于不同透射率的输出镜, 调 Q 激光的重复频率皆呈现起伏增加的趋势, 这一现象与理论预测基本吻合。对于  $T=1.6\%$ 、 $2.5\%$  和  $5.0\%$  的输出镜, 调 Q 激光重复频率的变化范围分别为  $13.25\sim 27.14$  kHz、 $18.53\sim 37.66$  kHz 和  $14.66\sim 37.77$  kHz, 脉冲宽度变化范围分别为  $8.41\sim 23.61$   $\mu\text{s}$ 、 $6.06\sim 17.06$   $\mu\text{s}$  和  $7.03\sim 22.65$   $\mu\text{s}$ 。对于这 3 个输出镜, 在较低泵浦功率下, 调 Q 激光的脉冲宽度均急剧减小, 而在较高泵浦功率下, 下降趋势均相对缓慢, 结果表明脉冲宽度的变化趋势与理论上基本相同。调 Q 激光的脉冲能量是平均输出功率与重复频率的比值, 而峰值功率是调 Q 激光的脉冲能量与脉冲宽度的比值, 通过计算得到了脉冲能量和峰值功率基于泵浦功率不断增大的变化关系, 如图 5 所示。对于这 3 个输出镜, 随着泵浦功率的增加, 脉冲能量和峰值功率均波动增加。

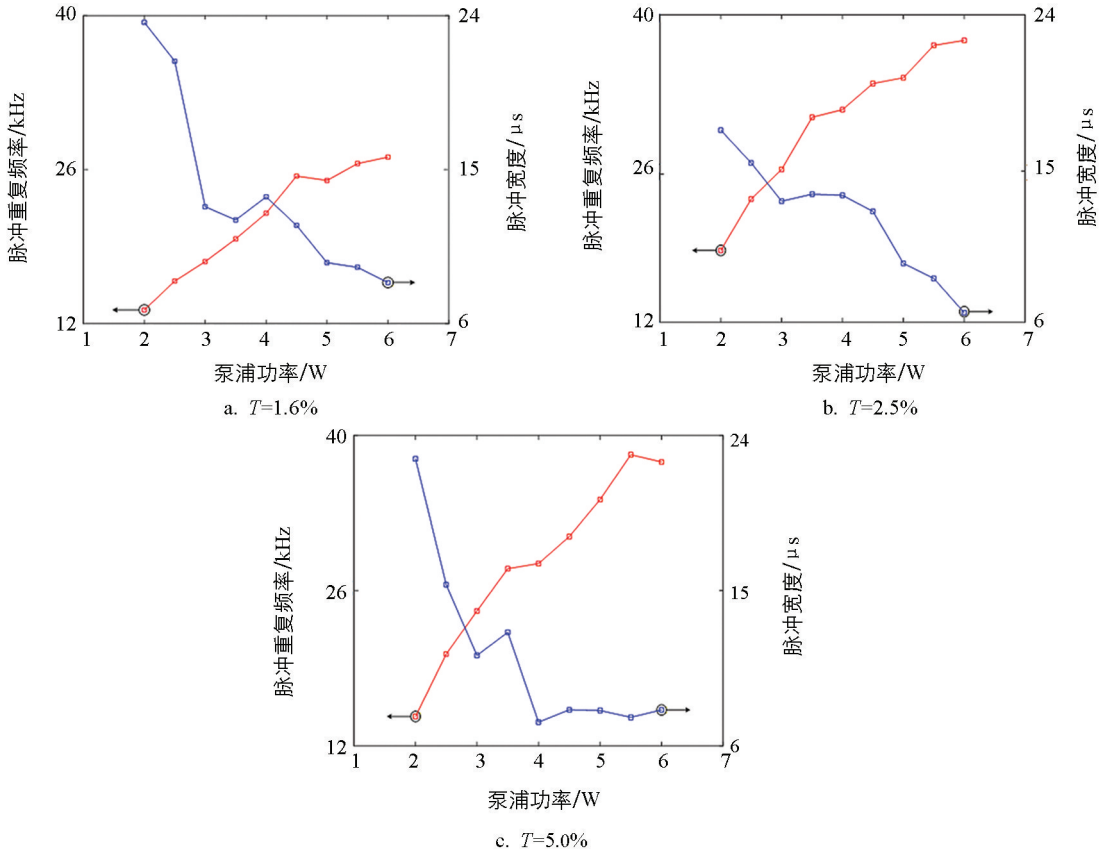


图 4 不同透射率下, 脉冲重复频率、脉冲宽度与泵浦功率的关系

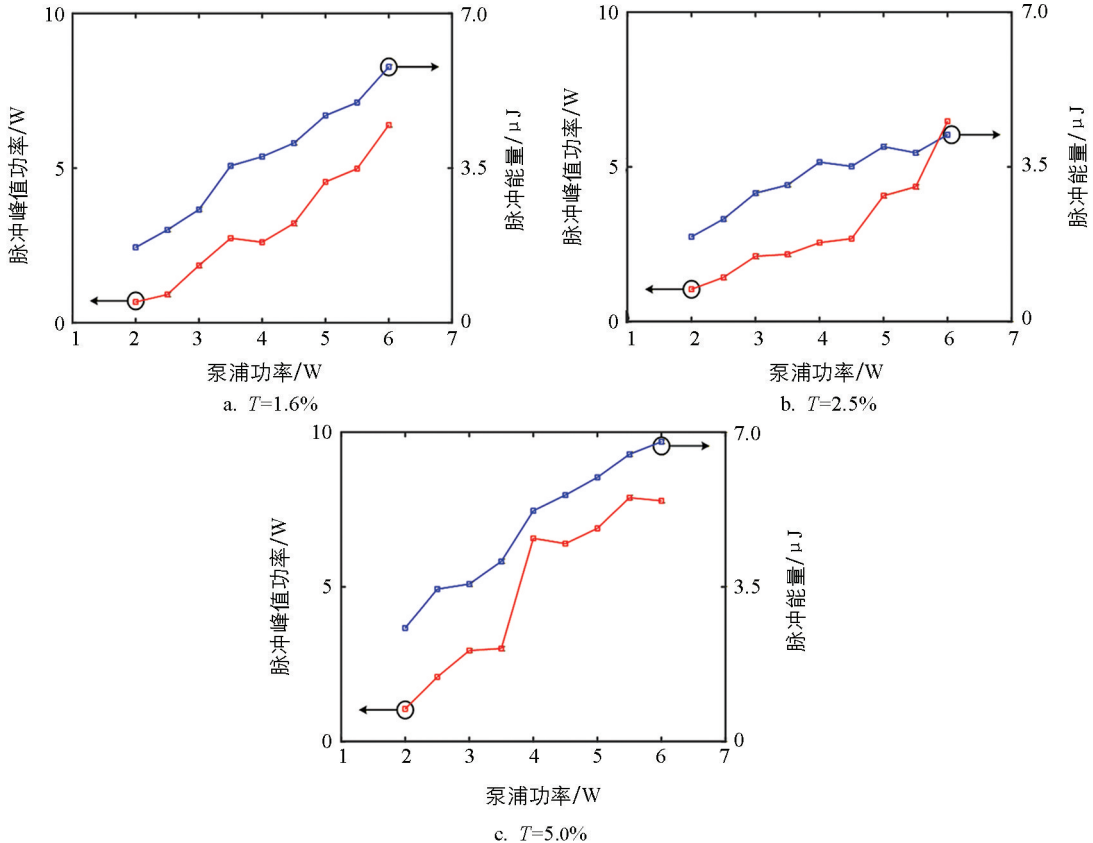


图 5 不同透射率下, 脉冲峰值功率、脉冲能量与泵浦功率的关系

## 2 波长可调谐被动调 Q $\text{Yb} : \text{YCOB}$ 激光器

为了研究激光器波长调谐性能, 在输出镜一臂插入三棱镜, 光路图如图 1 中 B 所示。通过调整端镜的倾角, 实现了波长可调谐激光的输出, 实验结果如图 6 所示。在泵浦功率为 5 W,  $T=1.6\%$ 、 $2.5\%$  和  $5.0\%$  时, 调 Q 激光的波长调谐范围分别为  $1\ 016\sim 1\ 038\ \text{nm}$ 、 $1\ 019\sim 1\ 036\ \text{nm}$  和  $1\ 019\sim 1\ 035\ \text{nm}$ , 对应的波长调谐宽度分别为 22 nm、17 nm 和 16 nm。为了比较调 Q 激光和连续激光的波长调谐宽度, 将 SESAM 换成 HR, 研究了连续  $\text{Yb} : \text{YCOB}$  激光器的波长调谐特性。相同泵浦功率和输出镜下, 连续激光的波长调谐范围分别为  $1\ 006\sim 1\ 050\ \text{nm}$ 、 $1\ 005\sim 1\ 047\ \text{nm}$  和  $1\ 013\sim 1\ 041\ \text{nm}$ , 对应的波长调谐宽度分别为 44 nm、42 nm 和 28 nm。结果表明: 随着输出镜透射率的增大, 调 Q 激光和连续激光的波长调谐范围均变窄, 原因可能是随着输出镜透射率增大, 腔内的功率密度减小, 无法形成调 Q 激光或连续激光。此外, 由图 6 可知, 波长位于  $1\ 032\ \text{nm}$  附近的激光强度较高, 波长偏离  $1\ 032\ \text{nm}$  的激光强度较低, 这是由于  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂浓度为 10 at. % 的  $\text{Yb} : \text{YCOB}$  晶体的最强发射峰位于  $1\ 032\ \text{nm}$  附近<sup>[26]</sup>。表 1 总结了输出激光在连续光状态和调 Q 状态下的波长调谐范围与调谐宽度。

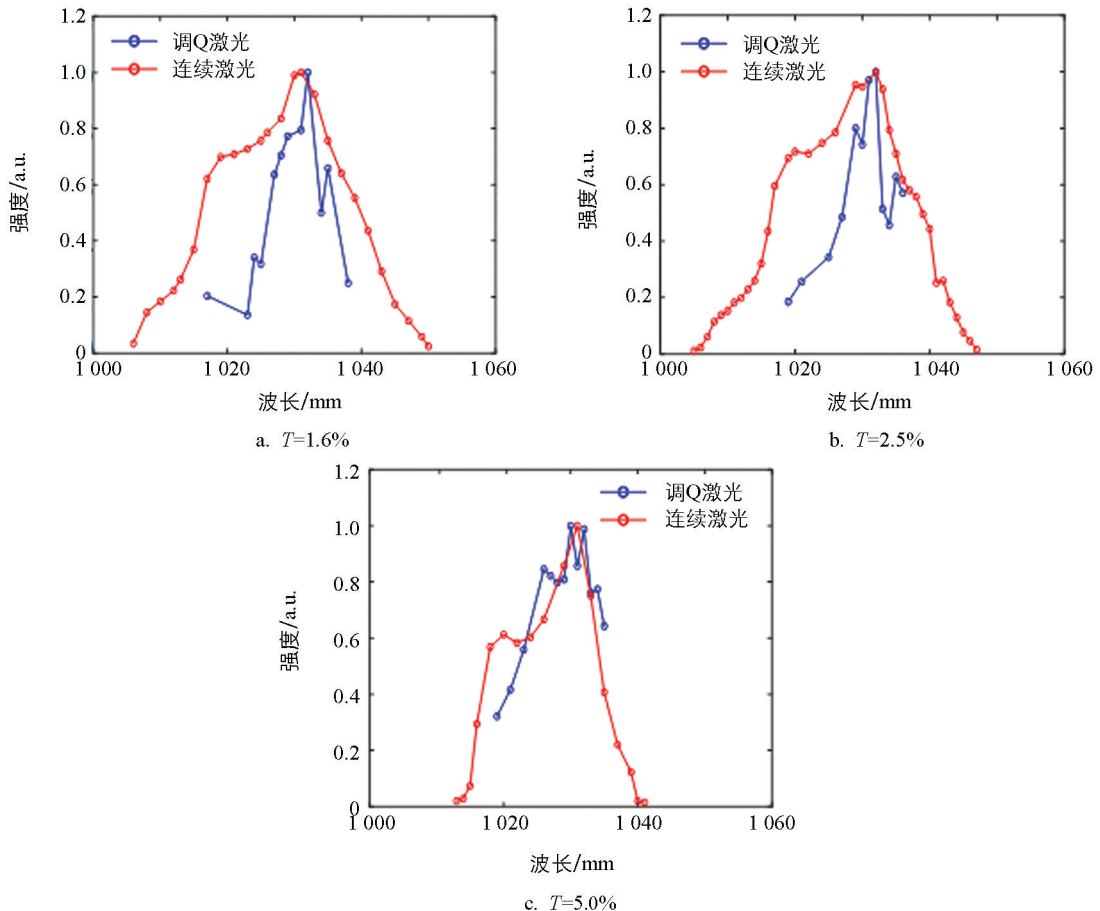


图 6 泵浦功率为 5 W 时, 不同透射率下  $\text{Yb} : \text{YCOB}$  激光器连续和调 Q 激光的波长调谐曲线

本文研究了激光波长对调 Q 激光的重复频率、脉冲宽度等关键参数的影响, 如图 7 所示。当泵浦功率固定为 5 W,  $T=1.6\%$ 、 $2.5\%$  和  $5.0\%$  时, 调 Q 激光的重复频率随着激光波长的变化曲线与图 6 中调 Q 激光波长调谐曲线的变化趋势基本一致, 而脉冲宽度的变化趋势与图 6 中调 Q 激光波长调谐曲线的变化趋势基本相反, 即波长位于  $1\ 032\ \text{nm}$  附近时, 重复频率达到最大值, 脉冲宽度达到最小值; 偏离

1 032 nm 时, 重复频率下降, 脉冲宽度上升。图 7 中当输出镜透射率为 1.6% 和 2.5% 时, 脉冲宽度在输出中心波长附近出现了急剧变化的趋势, 原因是输出激光位于中心波长附近时, 腔内净增益增强, 输出功率增大, 且较小透射率的输出镜腔内功率密度更大。图 8 显示了调 Q 激光的脉冲能量和峰值功率与激光波长的关系, 从整体上看, 调 Q 激光的脉冲能量和峰值功率的变化趋势几乎与图 6 中调 Q 激光波长调谐曲线的变化趋势一致, 说明脉冲能量和峰值功率随着激光强度的增大而增大, 但也存在个别下降的点, 原因可能是激光器正常运行过程中冷却系统和泵浦系统的振动使得激光器的输出功率不稳定, 会产生一定的上下幅值的变化。

表 1 连续激光和调 Q 激光的波长调谐范围及宽度

| 输出激光类型 | 输出镜透射率/% | 波长调谐范围/nm   | 波长调谐宽度/nm |
|--------|----------|-------------|-----------|
| 连续激光   | 1.6      | 1 006~1 050 | 44        |
|        | 2.5      | 1 005~1 047 | 42        |
|        | 5.0      | 1 013~1 041 | 28        |
| 调 Q 激光 | 1.6      | 1 016~1 038 | 22        |
|        | 2.5      | 1 019~1 036 | 17        |
|        | 5.0      | 1 019~1 035 | 16        |

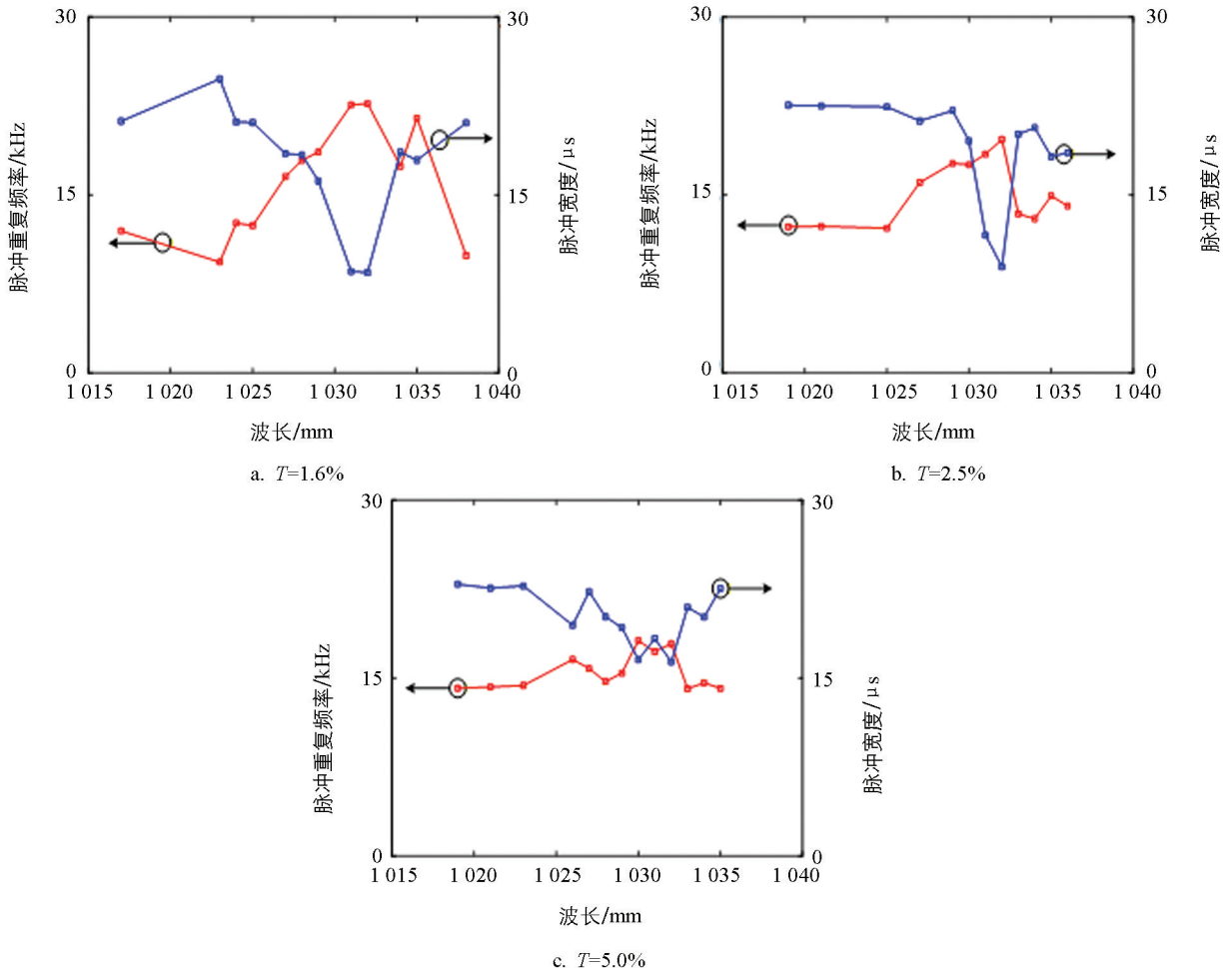


图 7 不同透射率下, 脉冲重复频率、脉冲宽度随输出波长的变化曲线

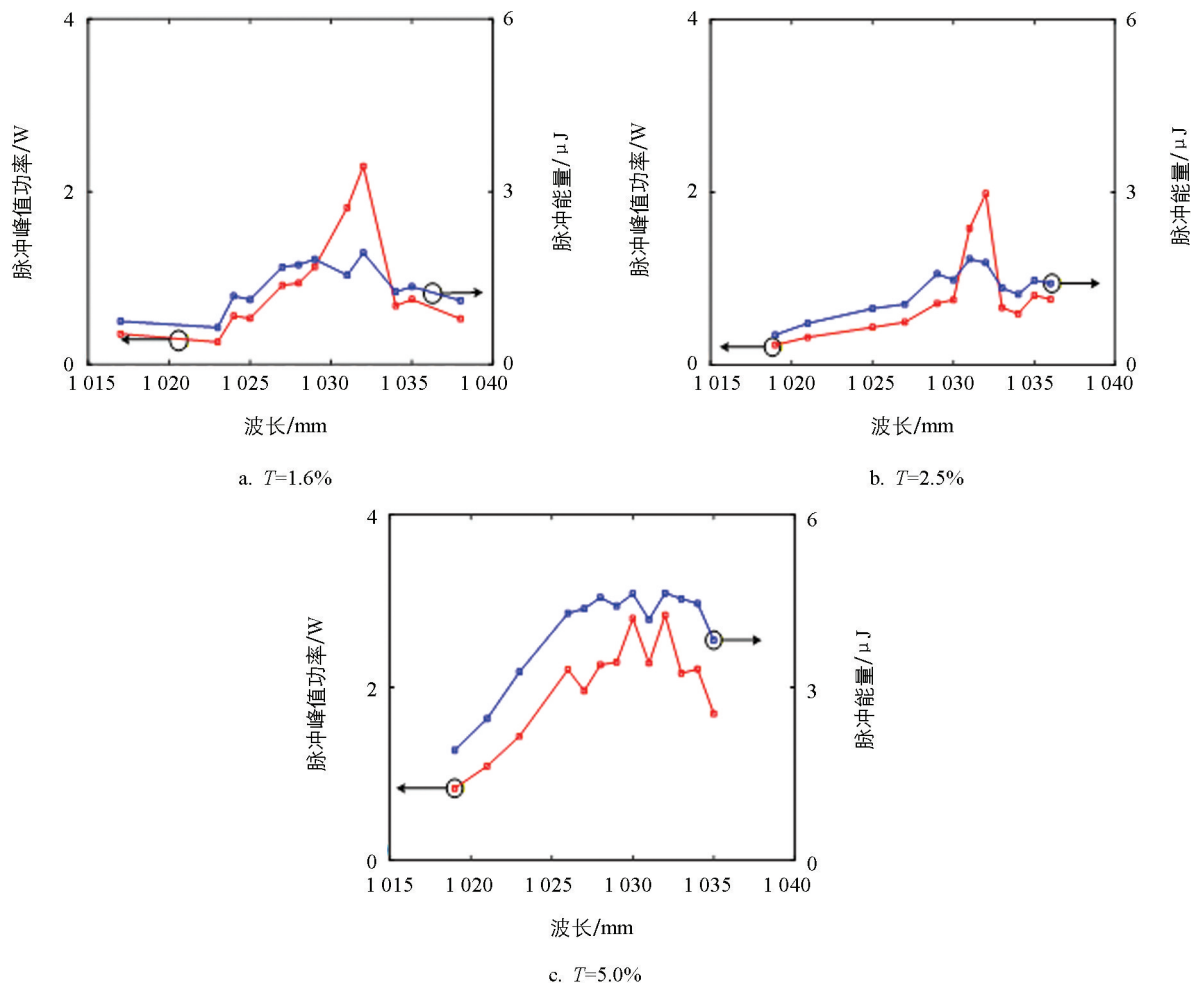


图 8 不同透射率下, 脉冲峰值功率、脉冲能量随输出波长的变化曲线

### 3 结论

本文实验研究了二极管泵浦的波长可调谐被动调 Q  $\text{Yb}:\text{YCOB}$  激光器的性能。将 SESAM 应用到二极管泵浦的  $\text{Yb}:\text{YCOB}$  激光器中, 谐振腔中无波长调谐元件时, 实现了稳定的 1 032 nm 工作波长被动调 Q 激光的输出。在谐振腔中插入三棱镜时, 实现了波长可调谐被动调 Q 激光的输出。输出镜的透射率分别为 1.6%、2.5% 和 5.0% 时, 调 Q 激光的波长调谐范围分别为 1 016~1 038 nm、1 019~1 036 nm 和 1 019~1 035 nm, 波长调谐宽度分别为 22 nm、17 nm 和 16 nm。未采用 SESAM 时, 实现了波长可调谐连续激光的输出。输出镜的透射率分别为 1.6%、2.5% 和 5% 时, 连续激光波长调谐范围分别为 1 006~1 050 nm、1 005~1 047 nm 和 1 013~1 041 nm, 波长调谐宽度分别为 44 nm、42 nm 和 28 nm。本文系统搭建了波长可调谐被动调 Q  $\text{Yb}:\text{YCOB}$  激光器, 拓展了近红外可调谐激光光源的技术路径, 所获得的调谐范围与稳定的调 Q 特性, 为其后续在光谱检测、激光雷达与精细加工等领域的应用提供了可靠的实验基础。

### 参考文献:

- [1] DONG J. Numerical Modeling of CW-Pumped Repetitively Passively Q-Switched  $\text{Yb}:\text{YAG}$  Lasers with  $\text{Cr}:\text{YAG}$  as Saturable Absorber [J]. Optics Communications, 2003, 226(1-6): 337-344.

- [2] JIANG H D, WANG J Y, ZHANG H J, et al. Spectral and Luminescent Properties of  $\text{Yb}^{3+}$  Ions in  $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Crystal [J]. *Chemical Physics Letters*, 2002, 361(5-6): 499-503.
- [3] SU L B, ZHANG D, LI H J, et al. Passively Q-Switched  $\text{Yb}^{3+}$  Laser with  $\text{Yb}^{3+}$ -Doped  $\text{CaF}_2$  Crystal as Saturable Absorber [J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2375-2379.
- [4] HUANG C H, LIN W F, FANG Q N, et al. Spectroscopy and Efficient Dual-Wavelength Laser Performances of a Nd : GYSAG Crystal [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(11): 2994-2997.
- [5] 陈雪花, 陈丁华, 范嗣强. 端面泵浦、被动调 Q 激光器实验研究 [J]. *激光杂志*, 2018, 39(6): 26-29.
- [6] SHEN Y X, FU X H, FU X P, et al. Timing Jitter Reduction of CW-LD-Pumped 1.34  $\mu\text{m}$  High-Repetition-Rate Nd :  $\text{YVO}_4/\text{V} : \text{YAG}$  Laser with Optimal Spatial Overlap Rate [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 165: 109618.
- [7] WANG J C, GUAN C, LIU Y, et al. LD-Pumped Watt-Level SESAM Passively Q-Switched Alexandrite Laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(5): 265-268.
- [8] HONG K G, HUNG B J, WEI M D. Low Threshold of a Continuous-Wave Mode-Locked and Azimuthally Polarized Nd :  $\text{YVO}_4$  Laser with a Semiconductor Saturable Absorber Mirror [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(12): 125603.
- [9] GAO Z Y, XIA G Q, TANG R, et al. Diode-Pumped High-Efficiency Passively Q-Switched Yb :  $\text{CaYAlO}_4$  Laser [J]. *Optical Review*, 2018, 25(6): 729-733.
- [10] 唐睿, 高子叶, 吴正茂, 等. 基于 SESAM 被动调 Q 的激光二极管泵浦 Yb :  $\text{CaYAlO}_4$  脉冲激光器 [J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 167-178.
- [11] ZHAI X J, DING Y, MIN H H, et al. An Infrared Passively Q-Switched Laser Based on Graphene/BN Heterojunction [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 134: 104851.
- [12] MA L N, LI S L, WANG H L, et al. Ion Irradiation of Monolayer Graphene-Nd : YAG Hybrid Waveguides: Fabrication and Laser [J]. *Optics Express*, 2023, 31(11): 17769-17781.
- [13] ZHAO C R, WANG Z P, YU P Z, et al. High Performance 1.9  $\mu\text{m}$  Passively Q-Switched Bulk Laser with Germanene as a Saturable Absorber [J]. *Optics Express*, 2023, 31(15): 24717-24729.
- [14] DONG L, ZHOU Y S, HAN W J, et al. Investigation of a New  $\text{Yb}_{0.19}\text{Y}_{0.34}\text{Lu}_{0.12}\text{Gd}_{0.35}\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Mixed Oxyborate Crystal for Near-IR Microchip Lasers [J]. *Optical Materials*, 2022, 123: 111846.
- [15] ZHANG X D, ZHAO S Z, LI Y, et al. Diode-Pumped Passively Q-Switched Nd :  $\text{YVO}_4$  Laser Using a Reticularly Ordered Single-Walled Carbon Nanotube Saturable Absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 97: 84-89.
- [16] 张秋月, 林楠, 黄婷, 等. 1 064 nm 半导体可饱和吸收镜的特性 [J]. *光学学报*, 2023, 43(22): 216-223.
- [17] ZHAO M F, LIU X Q, XU X D, et al. Ultrafast Operation on a Novel Nd :  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$  Disordered Crystal Laser [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 124: 104227.
- [18] VOOTUKURU J R, HEMAKUMAR U, RENIGUNTA P S, et al. Energy Transfer Characteristics of  $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -Codoped Phospho-Silicate Oxyfluoride Glasses For  $\sim 1.0 \mu\text{m}$  Laser Applications [J]. *Applied Physics A*, 2023, 129(11): 744.
- [19] 孟宪林, 张怀金, 祝俐, 等. Yb : YCOB 晶体制备及其光谱与激光二极管抽运激光特性 [J]. *光学学报*, 2000, 20(3): 419-422.
- [20] ZHANG H J, MENG X L, ZHU L, et al. Growth, Stark Energy Level and Laser Properties of Yb :  $\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$  Crystal [J]. *Materials Research Bulletin*, 2000, 35(5): 799-805.

- [21] YOSHIDA A, SCHMIDT A, PETROV V, et al. Diode-Pumped Mode-Locked  $\text{Yb} : \text{YCOB}$  Laser Generating 35 fs Pulses [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4425-4427.
- [22] YOSHIDA A, SCHMIDT A, ZHANG H J, et al. 42-fs Diode-Pumped  $\text{Yb} : \text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$  Oscillator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 24325-24330.
- [23] GAO Z Y, ZHU J F, TIAN W L, et al. Diode-Pumped Self-Starting Mode-Locked Femtosecond  $\text{Yb} : \text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Laser [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(5): 054207.
- [24] GAO Z Y, ZHU J F, TIAN W L, et al. Generation of 73 fs Pulses from a Diode Pumped Kerr-Lens Mode-Locked  $\text{Yb} : \text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5870-5872.
- [25] GAO Z Y, ZHU J F, WU Z M, et al. Tunable Second Harmonic Generation from a Kerr-Lens Mode-Locked  $\text{Yb} : \text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Femtosecond Laser [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(4): 044202.
- [26] CHEN X W, HAN W J, XU H H, et al. High-Power Passively Q-Switched  $\text{Yb} : \text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Laser with a GaAs Crystal Plate as Saturable Absorber [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3225-3230.
- [27] YANG J N, MA Y J, TIAN K, et al. High-Power Passive Q-Switching Performance of a  $\text{Yb} : \text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Laser with a Few-Layer  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Topological Insulator as a Saturable Absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(10): 3146-3154.
- [28] TIAN K, YANG J N, YI H Y, et al. High-Power  $\text{Yb} : \text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  Laser Passively Q-Switched by a Few-Layer  $\text{WS}_2$  Saturable Absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 1-5.
- [29] PARALI U, SHENG X, MINASSIAN A, et al. Diode-Pumped Alexandrite Laser with Passive SESAM Q-Switching and Wavelength Tunability [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 970-976.
- [30] 叶茂生, 赵柏秦, 李加庚. 固体激光器弛豫振荡尖峰脉冲参数的影响因素分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 880-884.

责任编辑 柳剑