

激光与光电子学进展

LD 侧面泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 波导被动调 Q 激光器刘大鹏¹, 吴伟冲¹, 雷旬^{1,2,3,4**}, 朱占达^{1,2,3,4}, 惠勇凌^{1,2,3,4}, 李强^{1,2,3,4*}¹北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;²北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124;³激光先进制造北京市高等学校工程研究中心, 北京 100124;⁴跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 报道了一种 LD 侧面泵浦钕共掺磷酸盐玻璃波导被动调 Q 激光器。采用无胶键合技术, 在波导芯层(原子数分数 1% Er^{3+} , 21% $\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$)的四侧键合厚度为 0.1 mm 的掺钴硼硅酸盐玻璃($\text{Co}^{2+}:\text{glass}$)作为包层, 阻断放大自发辐射(ASE)的形成通路, 提高激光输出效率。波导两侧分别键合硼硅酸盐 K9 光学玻璃作为泵浦光传输层, 改善泵浦均匀性, 提高输出激光的光束质量。在自由运转模式下, 激光器输出的最大脉冲能量为 34.7 mJ, 斜率效率为 10.6%。被动调 Q 模式下, 获得稳定输出单脉冲能量 2.16 mJ、脉宽 4.7 ns、峰值功率 459 kW 的 1.535 μm 脉冲激光, 光束质量因子 $M^2=1.53$ 。实验结果表明, 在 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 的四侧键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 是抑制其内部 ASE 效应、提高激光器单脉冲能量输出的有效方法。

关键词 激光器; 固体激光器; 波导; 侧面泵浦; 被动调 Q

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220822

LD Side Pumped $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{Glass}$ Waveguide Passively Q-Switched LaserLiu Dapeng¹, Wu Weichong¹, Lei Hong^{1,2,3,4**}, Zhu Zhanda^{1,2,3,4}, Hui Yongling^{1,2,3,4}, Li Qiang^{1,2,3,4*}¹*Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*²*Beijing Engineering Research Center of Laser Technology, Beijing 100124, China;*³*Beijing Colleges and Universities Engineering Research Center of Advanced Laser Manufacturing, Beijing 100124, China;*⁴*Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology, Ministry of Education, Beijing 100124, China*

Abstract LD side pumped $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ waveguide passively Q-switched laser was reported. By adhesive-free bonding techniques, Co-doped borosilicate glass with a thickness of 0.1 mm was bonded on four sides of the core (atom fraction 1% Er^{3+} , 21% $\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$) of waveguide. The aim was to block the formation pathway of amplified spontaneous emission (ASE) and improve the output efficiency of laser. In order to improve the pump uniformity and output beam quality of laser, K9 borosilicate optical glass was bonded on both sides of waveguide as the transmission layer of pump. In free-running mode, laser output was obtained with the maximum pulse energy of 34.7 mJ and the slope efficiency of 10.6%. In passively Q-switched mode, a pulse laser was achieved with wavelength of 1.535 μm , single pulse energy of 2.16 mJ, pulse width of 4.7 ns, peak power of 459 kW, and beam quality factor $M^2=1.53$. Experimental results demonstrate that the bonding of $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ on the four sides of $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ is an effective method to inhibit ASE effect and improve the output pulse energy of laser.

Key words lasers; solid-state laser; waveguide; side pumped; passively Q-switched

1 引言

1.5 μm 波段的激光位于高透过率的“大气窗

口”,对空气、烟雾的穿透能力强,且对人眼的损伤阈值高,是研究人眼安全激光器的热点波段^[1-3]。其中,大能量、窄脉宽、体积小、结构紧凑性高的 1.5 μm 波

收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-03-29; 网络首发日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(62075003)、北京市自然科学基金、教委科研计划(4202007, KZ202110005010)

通信作者: *ncltlq@bjut.edu.cn; **leihong@bjut.edu.cn

长人眼安全激光器在军事和民用方面具有迫切的应用需求。

目前,获得 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光输出的常见方式有:光学参量振荡(OPO)、受激拉曼散射(SRS)和直接泵浦掺杂离子的增益介质。其中,采用LD直接泵浦钕镱共掺磷酸盐玻璃($\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$)的方式,其结构更加简单紧凑、整体效率较高^[4-7]。2000年,瑞典皇家理工学院的 Karlsson 等^[8]首次采用 $\text{Co}^{2+}:\text{MALO}$ 作为被动调Q晶体,通过LD直接泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$, 获得峰值功率 2 kW、脉宽 2.3 ns 的单脉冲激光输出。近年来,俄罗斯 ITMO 大学的研究人员利用掺钴尖晶石($\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$)的可饱和吸收特性进行被动调Q,在低重复频率下实现了大能量、窄脉宽的脉冲激光直接输出。2016年, Vitkin 等^[9]采用LD巴条端面泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$, 在泵浦能量 84 mJ 处,调Q输出最大单脉冲能量 0.7 mJ、脉宽 10.5 ns、峰值功率 67 kW 的单脉冲激光,光光转换效率为 0.8%。次年,他们在原有实验基础上,采用LD巴条堆栈侧面泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$, 在泵浦能量 1100 mJ 下,调Q输出最大单脉冲能量 3.1 mJ、脉宽 20 ns、峰值功率 155 kW 的单脉冲激光,光光转换效率为 0.28%^[10]。综合对比分析上述研究现状可知:LD侧面泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 被动调Q激光器是获得mJ级大能量 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光直接输出的有效方式,但是在高泵浦能量密度下的光光转换效率低。

其关键原因可能是增益介质内部的放大自发辐射(ASE)效应过于严重。

针对这一问题,本文采用无胶键合技术,在 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 的四侧键合掺钴硼硅酸盐玻璃($\text{Co}^{2+}:\text{glass}$), $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 能够吸收 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段的光^[11], 可以增大自发辐射(SE)的损耗,阻断 ASE 的形成通路。实验利用 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶体作为被动调Q元件,实现了单脉冲能量 2.16 mJ、脉宽 4.7 ns、峰值功率 459 kW 的 $1.535\ \mu\text{m}$ 激光输出,光光转换效率为 0.55%,光束质量因子 $M^2=1.53$ 。实验结果表明,与未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导相比,键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导激光器被动调Q输出的单脉冲能量提高了 184.2%,峰值功率提高了 261%,其内部的 ASE 得到了有效抑制。

2 实验装置

$\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 波导的结构如图 1(a)所示,波导芯层材料为 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ (原子数分数 1% Er^{3+} , 21% $\text{Yb}^{3+}:\text{glass}$), 横截面尺寸为 $0.8\ \text{mm} \times 0.8\ \text{mm}$, 长度为 10 mm。芯层四侧键合厚度为 0.1 mm 的 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 作为包层,波导两侧分别键合硼硅酸盐 K9 光学玻璃作为泵浦光传输层。波导总体长度为 10 mm、宽度为 8.9 mm、厚度为 1 mm, 泵浦光入射窗口 ($0.3\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$) 镀中心波长为 940 nm 增透膜,泵浦光反射面镀中心波长 940 nm 全反射膜,波导前后端面未镀膜。

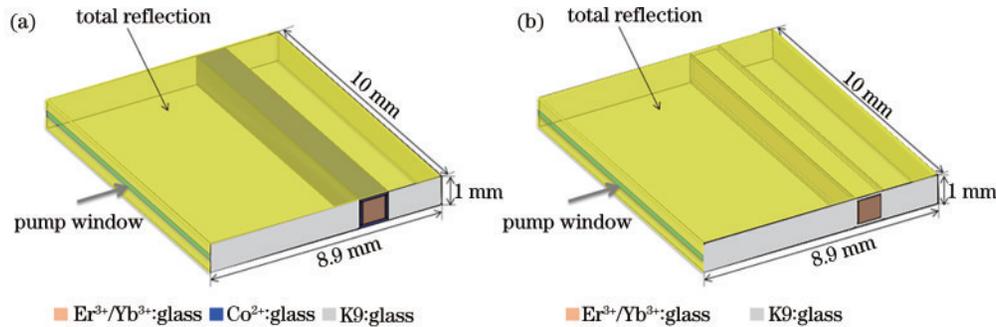


图 1 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 波导结构图。(a)键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$; (b)未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$

Fig. 1 Structure diagrams of $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ waveguide. (a) Bonding $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$; (b) without bonding $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$

LD泵浦源选用西安炬光科技有限公司生产的巴条(型号 FL-GS04-1X1-200-940-Y), 泵浦方式为脉冲泵浦,泵浦中心波长为 940 nm,在泵浦脉宽 3 ms、重复频率 1 Hz 条件下输出的最大泵浦能量为 600 mJ。实验采用焦距为 2 mm 的柱面透镜对巴条快轴方向光束进行整形。LD巴条出射的激光经柱面透镜整形后,直接从波导一侧的泵浦光入射窗口进入并在波导内多次反射传输。基于 Zemax 非序列模式,对泵浦光的吸收效率和泵浦均匀性进行光线追迹。模拟计算下的泵浦吸收效率为 95%,波导芯层横截面的泵浦光吸收分布如图 2 所示。

根据能量均匀度计算公式^[12]可得

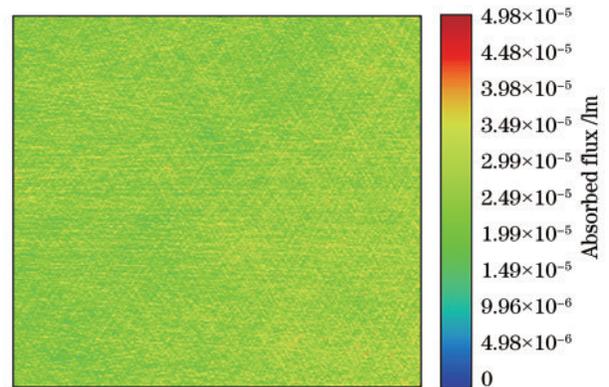


图 2 泵浦光的吸收分布图

Fig. 2 Absorption distributions of pump light

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - \bar{E}|}{n \cdot \bar{E}}, \quad (1)$$

式中： n 为采样点个数； E_i 为采样点数值； \bar{E} 为采样平均值。经计算得到波导芯层吸收泵浦光的能量均匀度为 93.7%。

LD 侧面泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 波导被动调 Q 激光器的实验装置如图 3 所示, 谐振腔采用平行平面腔, 后腔镜 (HR) 表面镀中心波长为 1535 nm 的全反射膜, 输

出耦合镜 (OC) 的透过率 $T_{\text{oc}}=30\%$, 腔长 $L=42 \text{ mm}$ 。实验将波导和 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ (初始透过率 $T=59.65\%$, 两通光面均未镀膜) 放置在后腔镜与输出耦合镜之间, 激光器通过 LD 脉冲泵浦获得 1535 μm 脉冲激光输出。其中, 采用波导上下两个大面散热冷却的方法, 用裹锡箔铝制夹具固定后安装在通水的紫铜热沉上, 水温控制在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 范围内。热沉上的波导如图 4 所示。

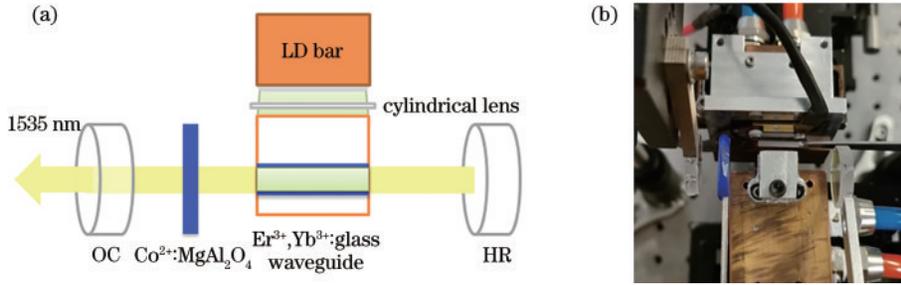


图 3 被动调 Q 激光器实验装置。(a) 结构图; (b) 实物图

Fig. 3 Experimental device of passive Q-switched laser. (a) Structure diagram; (b) physical photo



图 4 波导与热沉整体图

Fig. 4 Photo of waveguide and heat sinks

此外, 实验还采用了一块未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 的波导, 将其置于相同的谐振腔结构中进行对比实验, 分析二者在自由运转和被动调 Q 两种情况下脉冲激光输出性能的差异。未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导的结构如图 1(b)

所示, 其芯层结构尺寸、波导整体尺寸、镀膜层与键合 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 的波导完全一致。

3 实验结果及分析

实验在泵浦脉宽为 3 ms、重复频率 1 Hz 条件下进行, 通过多次测量获得激光器自由运转和被动调 Q 的输出能量曲线如图 5 (红线-圆点) 所示, 两种状态下单脉冲能量随泵浦电流的增加均呈线性增长, 并且没有出现饱和的趋势。当泵浦能量 $E_{\text{inc}}=600 \text{ mJ}$ 时, 自由运转输出的最大单脉冲能量为 34.7 mJ, 斜效率为 10.6%。腔内加入 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$, 调 Q 在泵浦能量 390 mJ 处稳定输出的最大单脉冲能量为 2.16 mJ, 光光转换效率为 0.55%。

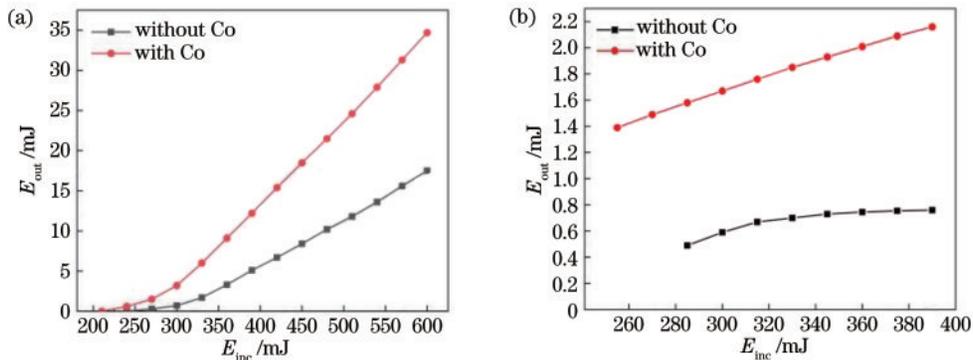


图 5 不同波导输出能量随泵浦能量变化的曲线。(a) 自由运转; (b) 被动调 Q

Fig. 5 Curves of output energy of different waveguides with pump energy. (a) Free oscillation; (b) passively Q-switched

实验使用泰克公司的 DPO-4104B 型示波器和 Thorlabs 公司的 PDA10CF 型高速响应光电探测器测量脉宽, 调 Q 输出最大单脉冲能量下的脉冲波形如图 6(a) 所示, 脉宽为 4.7 ns, 对应的峰值功率为 459 kW。光束质量的测量是使用焦距 $f=100 \text{ mm}$ 的

凸透镜聚焦输出光束, 采用刀口法测量焦点两侧的光斑半径, 最后通过拟合曲线计算出光束质量。光束质量拟合曲线如图 7 (红线-圆点) 所示, 经计算可得: 调 Q 输出最大单脉冲能量下的光束质量因子 $M^2=1.53$ 。

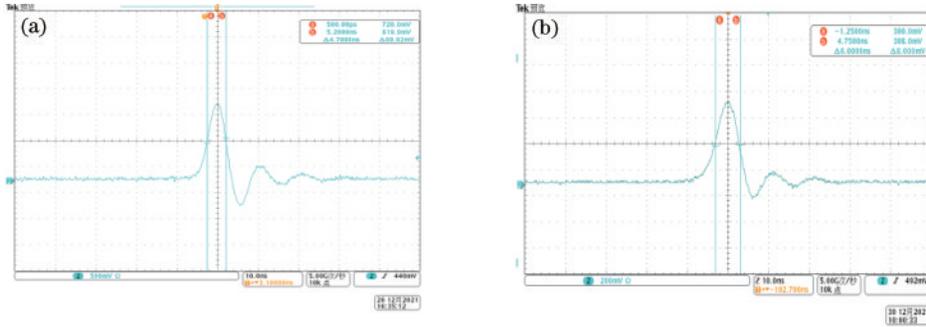
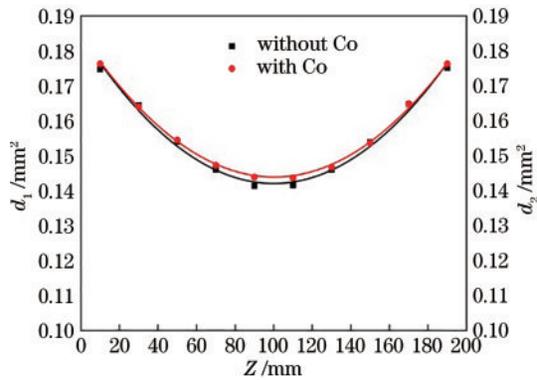
图 6 不同波导输出脉冲波形图。(a)键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$; (b)未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ Fig. 6 Pulse waveforms of different waveguides. (a) Bonding $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$; (b) without bonding $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 

图 7 被动调 Q 状态下光束质量拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of beam quality in passively Q-switched state

为验证波导芯层四侧键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 能够抑制波导内部的 ASE, 实现激光器的高效率激光输出, 实验分别比较了键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 和未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导激光器在自由运转和被动调 Q 下的最佳输出激光性能。未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导在自由运转和被动调 Q 下的输出能量曲线如图 5(黑线-方形)所示, 自由运转下, 输出激光的阈值泵浦能量为 243 mJ, 当泵浦能量 600 mJ 时, 输出最大脉冲能量为 17.5 mJ, 斜效率为 5.8%。在腔内加入 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$, 调 Q 在泵浦能量 390 mJ 处输出的最大单脉冲能量为 0.76 mJ, 对应的光光转换效率为 0.19%, 脉冲宽度为 6 ns, 峰值功率为 127 kW, 光束质量因子 $M^2=1.52$ 。未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导调 Q 输出最大单脉冲能量下的脉冲波形图如图 6(b)所示, 光束质量拟合曲线如图 7(黑线-方形)所示。与未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导相比, 键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导自由运转输出激光的阈值泵浦能量(210 mJ)降低了 13.6%, 最大脉冲能量提高了 98.3%。被动调 Q 输出的最大单脉冲能量提高了 184.2%, 峰值功率提高了 261%。

实验结果表明, 在 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 四侧键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 吸收层有效抑制了 ASE, 提高了激光输出效率。在上述实验条件下, 继续增加泵浦能量至 435 mJ, 获得调 Q 输出最大单脉冲能量为 2.4 mJ, 峰值功率大于 510 kW, 对应的腔内能量密度为 9.1 J/cm^2 。长时间工作下发现, $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶体通光面的中心区域

有轻微的损伤。 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 的激光损伤阈值约为 10 J/cm^2 , 造成损伤的原因一方面可能是 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶体通光面未镀膜, 另一方面则是腔内的能量密度太大。因此, 实验在确保光学元件表面不受损的情况下, 将被动调 Q 状态下的最大泵浦能量控制在 390 mJ。在下一步的工作中, 我们将改善腔内的能量密度, 并且对调 Q 元件的通光面镀中心波长 1535 nm 增透膜, 进一步提高单脉冲能量输出。

4 结 论

本文报道了一种大能量、高峰值功率、结构紧凑性高的 LD 侧面泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 波导被动调 Q 激光器。通过对比实验分别对键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 和未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导在自由运转和被动调 Q 下的输出特性进行了对比。根据对比实验结果: 与未键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导相比, 键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 波导调 Q 输出的最大单脉冲能量提高了 184.2%, 光光转换效率从 0.19% 提高至 0.55%。因此可以看出, 在 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 波导芯层的四侧键合 $\text{Co}^{2+}:\text{glass}$ 能够很好抑制其内部的 ASE, 有效提高了 LD 泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 波导被动调 Q 激光器的单脉冲能量输出, 该研究为进一步提高 LD 泵浦 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{glass}$ 被动调 Q 激光器的激光输出效率提供了新的方法和思路。

参 考 文 献

- [1] Shirakov A, Burshtein Z, Goldstein A, et al. Use of $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ transparent ceramics in passive Q-switching of an Er: Glass laser at $1.534 \mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2020, 28(15): 21956-21970.
- [2] 张宇露, 惠勇凌, 姜梦华, 等. LD 泵浦铒镱共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 微型激光器实验研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 0305004. Zhang Y L, Hui Y L, Jiang M H, et al. Experimental study of LD-pumped erbium ytterbium co-doped phosphate glass passively Q-switched microlaser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 0305004.
- [3] 陈雨金, 林炎富, 黄建华, 等. 基于掺 Er^{3+} 晶体的 1550 nm 波段全固态激光研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500018.

- Chen Y J, Lin Y F, Huang J H, et al. Research progress in 1550-nm all-solid-state lasers based on Er^{3+} -doped crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500018.
- [4] Guo J, He G Y, Jiao Z X, et al. Efficient high-peak-power and high-repetition-rate eye-safe laser using an intracavity KTP OPO[J]. Laser Physics, 2015, 25(3): 035403.
- [5] Ivanov P S, Mochalov I V, Sandulenko A V. 1.5 μm miniature and chip longitudinally diode pumped passively Q-switched Raman laser[C]//2014 International Conference Laser Optics, June 30-July 4, 2014, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2014.
- [6] Dymshits O, Vitkin V, Alekseeva I, et al. Transparent glass-ceramics based on Co^{2+} -doped $\gamma\text{-Ga}_x\text{Al}_{2-x}\text{O}_3$ spinel nanocrystals for passive Q-switching of Er lasers[J]. Journal of Luminescence, 2021, 234: 117993.
- [7] Qi Y, Bai Z X, Wang Y L, et al. Research progress of all-solid-state passively Q-switched Er: Yb: glass lasers [J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 116: 103727.
- [8] Karlsson G, Pasiskevicius V, Laurell F, et al. Diode-pumped Er-Yb: glass laser passively Q switched by use of $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ as a saturable absorber[J]. Applied Optics, 2000, 39(33): 6188-6192.
- [9] Vitkin V V, Polyakov V M, Kharitonov A A, et al. Compact 0.7 mJ/11 ns eye-safe erbium laser[J]. Laser Physics, 2016, 26(12): 125801.
- [10] Vitkin V, Loiko P, Dymshits O, et al. Passive Q-switching of an Er, Yb: glass laser with Co: Mg(Al, Ga) $_2$ O $_4$ -based glass-ceramics[J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2142-2149.
- [11] Duan X, Yuan D, Pan D, et al. Spectroscopic properties of cobalt-doped nanosized glass-ceramics[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(3): 362-365.
- [12] 黄珊, 邓磊敏, 杨焕, 等. 基于 ZEMAX 的半导体激光器匀光设计[J]. 激光技术, 2014, 38(4): 522-526.
- Huang S, Deng L M, Yang H, et al. Homogenization design of laser diode based on ZEMAX[J]. Laser Technology, 2014, 38(4): 522-526.