

文章编号:1001-5078(2023)06-0875-06

· 激光器技术 ·

10 W 二极管泵浦 Er : YAP 中红外激光器

方 聪,李 宝,陈 国,魏 磊,王克强,赵书云,王玉芳,韩 隆
(中电科光电科技有限公司,北京 100015)

摘 要:在室温条件下,采用脉冲激光二极管侧面泵浦原子数分数为 10 % 掺杂浓度的 Er : YAP 晶体,实现了工作波长为 2712 nm 的中红外固体激光器成功激射,并得到最大静态平均输出功率 10.12 W,光束质量 5.6,对应光-光转换效率 5.5 %,斜效率 6.4 %。这也是目前已报道的唯一实现平均功率 10 W 量级的 Er : YAP 激光器。此外,利用声光调 Q 技术,还实现了脉冲重复频率 500 Hz,脉冲宽度 63 ns,单脉冲能量为 5.8 mJ 的脉冲激光输出,为推动国内中红外波段激光应用提供了强有力的技术支撑。

关键词:中红外激光;3 μm ;Er : YAP

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.010

10 W diode-pumped Er : YAP mid-infrared laser

FANG Cong, LI Bao, CHEN Guo, WEI Lei, WANG Ke-qiang,
ZHAO Shu-yun, WANG Yu-fang, HAN Long
(CETC Electro-Optics Technology Co. Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract:In this paper, a mid-infrared laser with an operating wavelength of 2712 nm is successfully excited at room temperature using a pulsed laser diode to side-pump Er : YAP crystals with a doping concentration of 10 % atomic number. In the free running state, the maximum average output power is 10.12 W, the beam quality is 5.6, the optical to optical conversion efficiency is 5.5 %, and the slope efficiency is 6.4 %. This is the only reported Er : YAP laser to have achieved an average power in the 10 W range. In addition, using the acousto-optic Q-switching technology, a pulsed laser output with a repetition frequency of 500 Hz, a pulse width of 63 ns and single pulse energy of 5.8 mJ is achieved, providing strong technical support for the promotion of laser applications in the mid-infrared band in China.

Keywords:mid-infrared laser; 3 μm ; Er : YAP

1 引 言

位于 3 μm 附近中红外波段的激光光源在遥感、医疗、光电对抗和光谱学等领域都有着广泛的应用前景^[1]。相较于半导体激光器^[2-3]、光纤激光器^[4]和气体激光器^[5],固体激光器原理简单且结构轻巧,在高功率和高效率的激光输出方面具有独特的优势,一直以来都是国内外学者所研究的热点^[6]。目前,实现高功率 3 μm 固体激光器的技术手段主要包括光参量振荡器(OPO)^[7-9],光参量放大器(OPA)^[10-11]和半导体激光器直接泵浦 Ho³⁺, Er³⁺和 Cr²⁺掺杂离子的激光晶体等^[12-14]。其中,

976 nm 半导体激光二极管(LD)泵浦 Er³⁺离子掺杂激光晶体直接激射 3 μm 波段激光在提高光学转换效率的同时有效降低系统成本和复杂性,已被证明是产生 3 μm 激光的最有效的技术手段之一^[13,15]。然而,在 Er³⁺离子掺杂激光器系统中,由于 Er³⁺的 3 μm 激光上能级寿命远小于激光下能级寿命^[16],过低的掺杂浓度会导致严重的自终止效应,过高的掺杂浓度又会由于对泵浦光较高的吸收系数及本身存在的多声子弛豫过程^[17]而引起严重的热效应。因此,除了通过散热系统有效散热外,还应考虑使用具有低声子能量和出色热性能的基质材料来有效减

少晶体中的热积累,以达到提高激光转换效率,实现高功率激光输出的目的。

掺铒铝酸钇晶体(Er:YAP)是一种极具前景的激光材料,不仅具有较低的声子能量和出色的热性能,而且导热系数和热膨胀系数也与 YAG 相似^[18]。自 1982 年俄罗斯 Alexander A. Kaminskii 院士^[19]研究了 Er:YAP⁴I_{11/2}和⁴I_{13/2}能级分别有 6 个和 7 个 Stark 子能级,其相应的 42 个跃迁的荧光波长从 2.6255 μm 延伸到 2.9205 μm 后,便得到了广泛的关注。1987 年,Stalder 等人^[20]研究了 Er:YAP 晶体的光谱和偏振特性,实现了 2.7~3 μm 范围内多个波长的激光输出;随后,1990 年曾瑞荣等人^[21]对 a 轴原子数分数为 10% 掺杂浓度的 Er:YAP 晶体在 2.7~3 μm 波段的激光性能进行了研究,并通过氙灯抽运,获得了能量为 240 mJ@1Hz 的激光输出;之后 2012 年,游振宇等人^[22]优化 Er:YAP 晶体原子数分数为 20%,同样利用氙灯抽运的方式,实现了最大能量 700 mJ@1Hz,最大平均功率 1.56 W@1 Hz 的中红外波段激光输出;2019 年,权聪等人^[23]探究输出镜透过率与重复频率的依赖关系,利用原子数分数为 10% 的 Er:YAP 晶体通过氙灯抽运最终在重复频率 5 Hz,输出镜透过为 15% 条件下,获得了相应平均功率为 6.42 W 的激光输出。除了氙灯抽运,LD 端面泵浦也是掺杂 Er³⁺激光器系统较为常用的技术手段。2018 年,权聪等人^[24]报道了具有 2710 nm 和 2728 nm 双波长输出的 LD 端面泵浦 Er:YAP 激光器,在连续波(CW)和脉冲模式下分别实现了 739 mW 和 738 mW 的最大平均功率,即光到光效率分别为 10.1% 和 12.3%;2019 年,Y. Yao 等人^[25]展示了端面泵浦 Er:YAP 晶体的激光性能,在 5.5 W 吸收泵浦功率下获得了 1.02 W 的最大连续激光输出功率,此外,该团队还以多层 ReSe2 材料作为可饱和吸收体,首次实现了具有 2.73 μm 和 2.80 μm 双波长输出的稳定 Q 开关 Er:YAP 晶体激光器;同年,H. Kawase 等人^[26]采用 LD 端面泵浦 Er:YAP 晶体,获得了连续输出功率为 1.17 W、斜率效率为 29% 的中红外激光输出,并首次使用单层石墨烯可饱和吸收体被动调 Q 实现 460 ns 的最短脉冲宽度、重频 114 kHz 的 5.1 μJ 最大脉冲能量;2020 年,日本学者 Weichao Yao 等人^[27]利用 b 轴原子数分数为 5% 掺杂浓度的 Er:YAP 晶体和双镜激光腔结构,通过专门设计的水冷铜支架高效散热,实现了高达 6.9 W 的 2920 nm 中红外波段激光输出。此外,利用二极管泵浦

5 at% 掺杂浓度的 Er:YAP 晶体,也可实现最大输出功率为 0.674 W 的 2.9 μm 连续波激光输出^[28]。然而,截止目前,通过氙灯抽运或 LD 端面泵浦 Er:YAP 晶体以实现中红外波段激光输出的技术手段所获得的激光器普遍存在输出平均功率低(低于 10 W)、光-光转换效率小、体积大、结构复杂和散热不足的问题。

因此,本文为实现高功率中红外波段激光的高效输出,创新性的采用三向分布 LD 侧面泵浦结构,通过泵浦原子数分数为 10% 掺杂浓度的 Er:YAP 晶体,在室温条件下成功实现工作波长为 2712 nm 的激光激射,并获得了静态平均输出功率高达 10.12 W、光-光转换效率为 5.5%、斜率效率为 6.4% 的中红外激光输出。据我们所知,这也是目前 Er:YAP 激光器实现的最高平均输出功率。不仅如此,本文还对该系统进行了声光调 Q 输出性能测试,在脉冲重复频率 500 Hz 条件下实现了单脉冲能量 5.8 mJ 的脉冲激光输出。

2 实验

如图 1 所示,三价铒离子具有较为复杂的能级结构,存在激发态吸收(ESA)、能量传递上转换(ETU)、交叉驰豫(CR)等多种能量转换过程。针对 976 nm 波长 LD 直接泵浦 Er³⁺离子中红外上能级⁴I_{11/2},在仅考虑 ETU 作用时其量子效率的理论上限满足:

$$\eta = 2 - \frac{\beta^2 W_2}{\sigma^2 W_1} \quad (1)$$

其中,σ,β 分别为上、下能级 Stark 子能级的玻尔兹曼因子;W₁,W₂ 为能量传递上转换 TEU1 和 ETU2 过程的速率。根据公式(1),进一步可得到中红外激光上能级与下能级的反转粒子数密度 Δn₂₁ 满足:

$$\Delta n_{21} = \sigma N_2 - \beta N_1 \approx \sigma \sqrt{\frac{R_{02} N_0}{W_2}} \left(1 - \frac{\beta}{\sigma} \sqrt{\frac{W_2}{W_1}} \right) \quad (2)$$

式中,R₀₂ 为泵浦速率;N₀ 是基态能级粒子数密度。

通过公式(2)可以发现:在特定泵浦速率下,Δn₂₁ 随着 W₁ 的增加而增加,而 W₁ 又与晶体的掺杂浓度正相关。为了得到量子效率较大的中红外 Er:YAP 激光器,应尽可能选择高的晶体掺杂浓度;然而,前文中已经提及,过高的掺杂浓度会导致严重的热效应,直接降低激光器的输出功率。因此,为了实现高功率和高效率的中红外波段激光输出,需要综合考虑晶体掺杂浓度和散热系统两个方向影响因素。

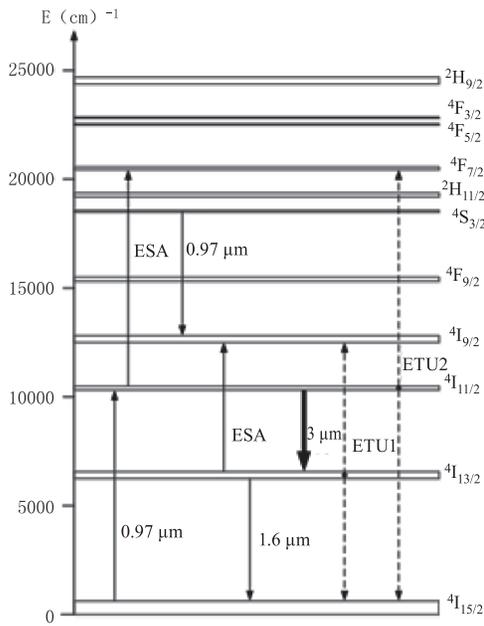


图 1 Er : YAP 部分能级结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the partial energy level structure of Er : YAP

Er : YAP 激光系统由全反镜 M1、Er : YAP 晶体、LD 泵浦源、声光 Q 开关 (Q-switch) 和输出镜 M2 组成。谐振腔采用双凹腔稳定结构以补偿 Er : YAP 晶体在高功率激光操作系统中产生的热透镜效应的同时实现更大的稳定区域。其中,全反镜 M1 为平凹镜,曲率半径为 80 mm,镀有反射率 $R > 99\% @ 2.6 \sim 3 \mu\text{m}$ 的膜层;输出镜 M2 也为平凹镜,曲率半径为 120 mm。为探究输出镜不同透过率对激光器性能的影响,M2 分别镀有 $T = 5\%$ 、 8% 及 $10\% @ 2.6 \sim 3 \mu\text{m}$ 膜层。如图 2(a) 所示,整个系统腔长为 178 mm,其中为了方便放入声光调 Q 开关器件,晶体输出端到输出镜 M2 的距离设置为 65 mm。如图 2(b) 所示为 LD 泵浦源具体结构示意图,其由三组 968 nm 非稳波长脉冲二极管线阵组成,一组线阵由四个二极管单管组成,单管的快慢轴发散全角分别为: 60° 和 10° ,峰值功率为 200 W,占空比为 10%,平均功率 240 W,整体固定在环绕式循环水冷热沉上。而根据 LD 泵浦线阵快慢轴发散角,为保证泵浦光全部均匀照射在晶体上,以达到提高泵浦光的利用效率,从而提提高光 - 光转换效率,三向均匀分布的 LD 泵浦线阵垂直于激光方向的泵浦细节示意图如图 2(c) 所示,各线阵单元间夹角为 120° 。

实验中所采用的 Er : YAP 晶体离子掺杂浓度为 10 at. %,尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$ 。为更好地散热和获得沿径向方向相对均匀的热膨胀,以避免高热梯度

导致的晶体破裂,Er : YAP 晶体沿 b 轴切割,且在两端面做平行光学抛光处理后蒸镀 $2.6 \sim 3 \mu\text{m}$ 增透膜。整个 Er : YAP 晶体放置于设计的环境侧面泵浦聚光腔中,其中水冷温度为 25°C ,LD 采用光纤耦合输出。对所使用的晶体样品在 968 nm 附近泵浦光的吸收系数进行了测试,结果如图 3(a) 所示,可以看到,掺杂浓度为 10at. %,Er : YAP 晶体在 968 nm 附近的吸收比例约为 66.9%;进一步地,利用公式 $I = I_0 (e^{-\alpha l} - \delta)$, (其中, I_0 和 I 分别为初始泵浦光和单次透过晶体光强度, l 为测试晶体长度),计算得到相应浓度晶体的吸收系数 α ,并拟合出不同泵浦波长的吸收系数曲线如图 3(b) 所示,可见测试波动小于 5%。在这里需要说明的是,因为测试晶体样品的两端面均未镀增透膜,所以考虑单个端面菲涅尔衍射损耗 δ 约为 4%。

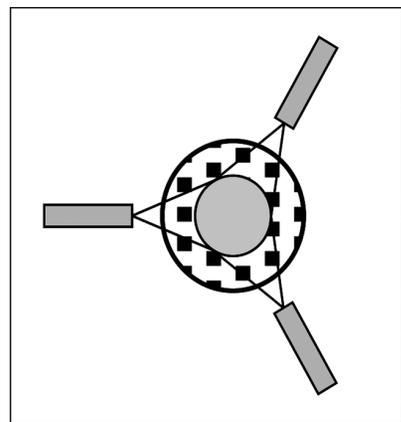
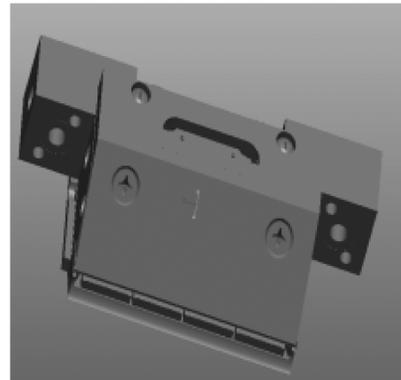
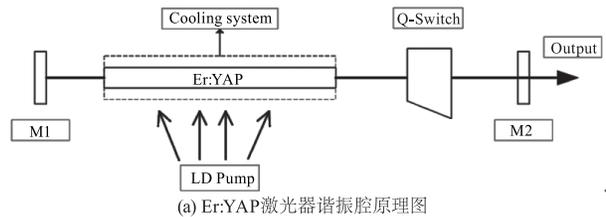
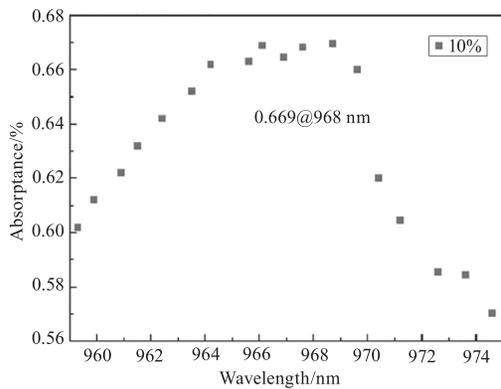
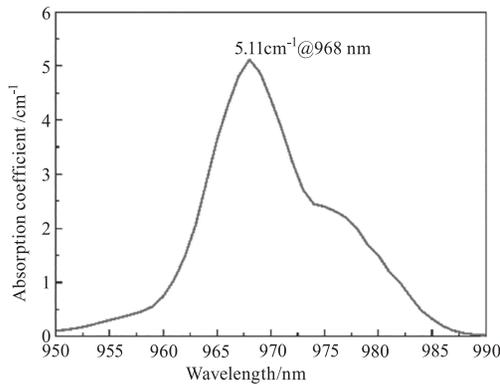


图 2 三向分布 LD 侧面泵浦 Er : YAP 激光晶体的中红外激光器结构示意图

Fig. 2 The Schematic diagram of mid-infrared laser structure of three-directionally distributed LD side-pumped Er : YAP laser crystal



(a) 掺杂浓度为 10at.% 的 Er:YAP 晶体单次吸收泵浦光的比例



(b) 掺杂浓度为 10at.% 的 Er:YAP 晶体吸收系数

图 3 Er : YAP 晶体特性

Fig. 3 The characteristics of Er : YAP crystal

3 实验结果和讨论

3.1 2.7 μm 静态输出性能

在自由运转模式下,采用不同透过率的输出镜,得到了相应的输出功率。图 4 为不同输出镜透过率下激光输出功率与泵浦功率之间的关系变化图,可以发现,一方面,随着泵浦功率的增加,激光器输出功率线性增加;另一方面,随着 Er : YAP 激光器输出镜透过率由 $T = 5\%$ 增加至 $T = 10\%$ 时,所对应的激光器最大输出功率由 8.28 W 增加至 10.12 W,增幅约为 22%,且其所对应吸收泵浦光的斜率效率也由 5.3% 增加至 6.4%。此外,从图 4 中还可发现,随着不断增加泵浦功率,不同透过率输出镜对应的输出功率均未出现明显饱和,这归功于采用双凹腔来补偿晶体因为热带来的热透镜效应,在 10 W 的中红外激光输出水平,热透镜未导致谐振腔处于非稳态区域。图 5 为最大输出功率时的光谱图,可以明显看到,激光输出中心波长为 2712 nm。

在 10.12 W 大输出功率下由中红外波段 CCD 相机记录了激光光斑,如图 6 所示,在 x 和 y 两个方向上,光斑图案为近圆形。通过透镜聚焦激光束,并

使用 10/90 刀口法测量不同位置的光束半径,采用双曲线方程拟合测量了光束质量 M^2 在 x 和 y 方向分别为 5.61 和 5.58,两个方向之间光束质量较为一致,这是由于泵浦光对晶体的泵浦均匀性较好所得到的。

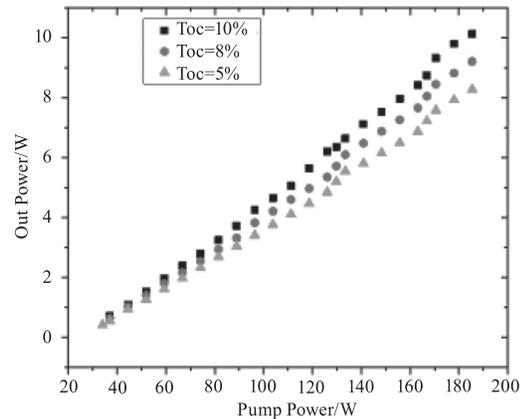


图 4 不同输出镜透过率下的输出功率曲线

Fig. 4 The output energy of Er : YAP crystal versus input energy under different transmissivity of output mirrors

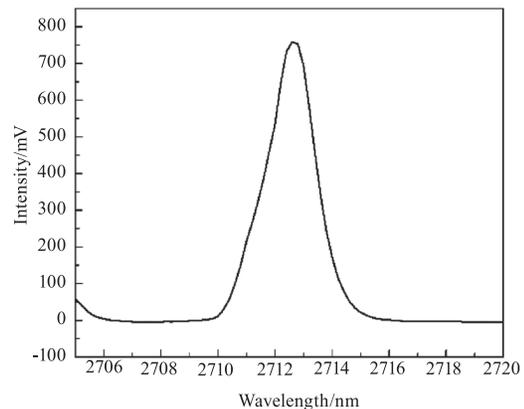


图 5 Er : YAP 晶体激光器激光波长

Fig. 5 The wavelength performances of the mid-infrared laser of Er : YAP crystal

3.2 2.7 μm 脉冲光性能

采用两面镀膜二氧化碲晶体进行声光调 Q,对 Er : YAP 激光系统的脉冲输出性能进行了实验研究,得到透过率为 10% 的输出镜所对应的脉冲输出最大平均功率为 2.9 W,脉冲重复频率为 500 Hz,脉冲宽度约为 63 ns,如图 7 所示,对应单脉冲能量为 5.8 mJ。

理论上激光调 Q 脉冲输出性能还可进一步提升,但是,当得到 5.8 mJ 的最大脉冲能量输出,进一步增加泵浦功率时,声光 Q 开关已损坏,包括晶体表面的增透膜基质本身,因此,调 Q 开关的抗损伤能力差限制了 Er : YAP 激光器脉冲输出性能。

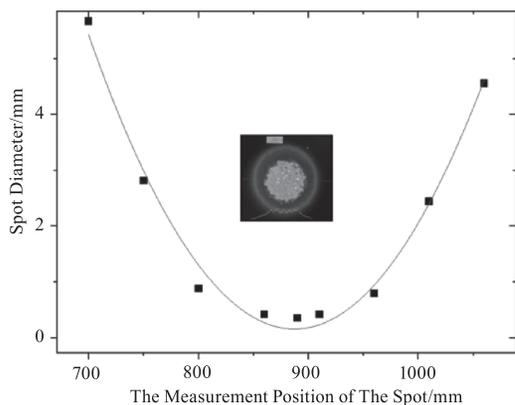


图6 激光近场光斑随透镜间距离的变化曲线和束腰处近场光斑

Fig. 6 Laser beam diameter versus propagation distance and spot image in near waist

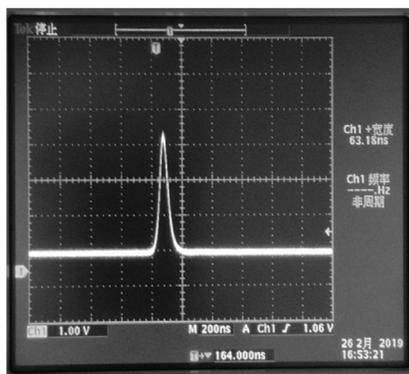


图7 2712 nm 脉冲激光脉宽测试

Fig. 7 The performances of the mid-infrared laser of Er : YAP crystal in pulsed mode

4 结 论

本文采用 968 nm 波长 LD 侧面泵浦掺杂浓度为 10 % 的 Er : YAP 晶体,在室温条件下成功实现了中心波长为 2712 nm 的中红外激光输出。并在输出镜透过率为 10 % 的情况下,获得激光器最大平均功率为 10.12 W,光-光转换效率为 5.5 %,斜率效率为 6.4 %。这也是截止目前,所知国内外公开报道的中红外固体激光器平均功率输出的最高记录。此外,通过声光调 Q 技术,本文还实现了脉冲重复频率 500 Hz,脉冲宽度 63 ns,单脉冲能量 5.8 mJ 的中红外固体激光输出,并且在未来的研究工作中,通过优化提高调 Q 开关的抗损伤能力,有望进一步提高该系统脉冲激光输出性能。

参考文献:

[1] S Parker. Surgical lasers and hard dental tissue [J]. Br. Dent. J. 2007,202(8):445-454.
 [2] Vurgafman I, Meyer J R. Analysis of limitations to wall-plug efficiency and output power for quantum cascade la-

sers [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(12):123108.

- [3] SONG Shu-fang, XING Wei-rong, LIU Ming. Theory and research advancement of quantum cascade lasers [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(9):972-976. (in Chinese)
 宋淑芳,邢伟荣,刘铭.量子级联激光器的原理及研究进展[J].激光与红外,2013,43(9):972-976.
 [4] Yulong Cui, Zhiyue Zhou, Wei Huang, et al. Progress and prospect of mid-infrared fiber laser technology [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9):0900001. (in Chinese)
 崔宇龙,周智越,黄威,等.中红外光纤激光技术研究进展与展望[J].光学学报,2022,42(9):0900001.
 [5] Chang T, Wood O. An optically pumped CO₂ laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, 8(6):598.
 [6] Zhu Canlin, Kang Minqiang, Deng Yi, et al. Research progress on directly pumping mid-infrared solid-state lasers [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(7):956-962. (in Chinese)
 朱灿林,康民强,邓颖,等.直接激励中红外固体激光器研究进展[J].激光与红外,2022,52(7):956-962.
 [7] M Vainio, J Peltola, S Persijn, et al. Single resonant cw OPO with simple wavelength tuning [J]. Opt. Express, 2008, 16(15):11141-11146.
 [8] J Liu, P Tang, Y Chen, et al. Highly efficient tunable mid-infrared optical parametric oscillator pumped by a wavelength locked, Q-switched Er : YAG laser [J]. Opt. Express, 2015, 23(16):20812-20819.
 [9] L He, T Hou, L Wei, et al. Experimental study on mid-infrared ZGP optical parametric oscillator [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(9):991-993. (in Chinese)
 何利杰,侯天禹,魏磊,等.中红外磷锗锌光参量振荡器实验研究[J].激光与红外,2014,44(9):991-993.
 [10] Y Peng, X Wei, X Luo, et al. High-power and widely tunable mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN [J]. Opt. Lett, 2016, 41(1):49-51.
 [11] Shen Zaoguo, Dong Tao, Yang Yi, et al. Study on fiber laser pumped optical parametric oscillator [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(5):502-505. (in Chinese)
 沈兆国,董涛,羊毅,等.光纤激光器泵浦光参量振荡器[J].激光与红外,2014,44(5):502-505.
 [12] H Nie, H Xia, B Shi, et al. High-efficiency watt-level continuous-wave 2.9 μm Ho, Pr : YLF laser [J]. Opt. Lett, 2018, 43(24):6109-6112.
 [13] B J Dinerman, P F Moulton. 3 μm cw laser operations in erbium-doped YSGG, GGG, and YAG [J]. Opt. Lett, 1994, 19(15):1143-1145.
 [14] I Moskalev, S Mirov, M Mirov, et al. Gapontsev, 140 W Cr:ZnSe laser system [J]. Opt. Express, 2016, 24(18):21090-21104.

- [15] T Li, K Beil, C Kränkel, et al. Efficient high-power continuous wave Er : Lu₂O₃ laser at 2.85 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(13) : 2568 – 2570.
- [16] Fang Cong, Wang Sibao, et al. Progression erbium-doped mid-infrared laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18) : 180002. (in Chinese)
方聪, 王思博, 等. 掺铒中红外激光器的进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18) : 180002.
- [17] L Mescia, P Bia, S Girard, et al. Temperature dependent modeling of cladding-pumped Er³⁺/Yb³⁺-codoped fiber amplifiers for space applications [J]. *Lightwave Technol.*, 2018, 36(17) : 3594 – 3602.
- [18] M J Weber, M Bass, K Andringa, et al. Czochralski growth and properties of YAlO₃ laser crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, 15(10) : 342 – 345.
- [19] Kaminskii A A, Fedorov V A, Ivanov A O, et al. Three-micron lasers based on YAlO₃ crystals with a high concentration of Ho³⁺ and Er³⁺ [J]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1982, 266(1) : 85 – 88.
- [20] Stalder M, Luethy W, Weber H P. Five new 3 μm laser lines in YAlO₃ : Er [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(8) : 602 – 604.
- [21] Zeng Ruihong, Shen Hongyuan, Huang Chenghui, et al. 2.7 μm Er : YAP laser [J]. *Chinese Journal of Laser*, 1990, 17(S1) : 60 – 62. (in Chinese)
曾瑞荣, 沈鸿元, 黄呈辉, 等. 2.7 μm 的 Er : YAP 激光器 [J]. *中国激光*, 1990, 17(S1) : 60 – 62.
- [22] You Zhenyu, Wang Yan, Li Jianfu, et al. Study on the properties of infrared laser in YAP crystal [C] // Proceedings of National Laser Conference, 2012. (in Chinese)
游振宇, 王燕, 李坚富, 等. Er : YAP 晶体中波红外激光性能的研究 [C] // 第二十届全国激光学术会议, 2012.
- [23] Quan Cong, Sun Dunlu, Luo Jianqiao, et al. Mid-infrared laser performances of Er : YAP crystal pumped by xenon lamp [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2019, 46(4) : 20 – 26. (in Chinese)
权聪, 孙敦陆, 罗建乔, 等. 氙灯抽运 Er : YAP 晶体的中红外激光性能 [J]. *中国激光*, 2019, 46(4) : 20 – 26.
- [24] C Quan, D Sun, J Luo, et al. 2.7 μm dual-wavelength laser performance of LD end-pumped Er : YAP crystal [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(22) : 28421 – 28428.
- [25] Y Yao, N Cui, Q Wang, et al. Highly efficient continuous-wave and ReSe₂ Q-switched 3 μm dual-wavelength Er : YAP crystal lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2019, 44(11) : 2839 – 2842.
- [26] H Kawase, H Uehara, H Chen, et al. Passively Q-switched 2.9 μm Er : YAP single crystal laser using graphene saturable absorber [J]. *Appl. Phys. Express*, 2019, 12(10) : 102006.
- [27] Weichao Yao, Hiyori Uehara, Hiroki Kawase, et al. Highly efficient Er : YAP laser with 6.9 W of output power at 2920 nm [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(13/22) : 19000 – 19007.
- [28] H Kawase, R Yasuhara. 2.92 μm high-efficiency continuous-wave laser operation of diode-pumped Er : YAP crystal at room temperature [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(9) : 12213 – 12220.