



·强激光物理与技术·

2.94 μm 室温连续 Er:YAG 激光器的研制*

刘政邑^{1,2,3}, 叶先林^{1,2}, 张 淞^{1,2,3}, 魏星斌^{1,2}, 任怀瑾^{1,2}, 王卫民^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900; 3. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100088)

摘 要: 研制了一种结构简单的 LD 端面泵浦 2.94 μm Er:YAG 连续激光器。该激光器采用双端键合 YAG 端帽方式降低了晶体的端面温度。泵浦源采用小芯径的输出光纤和非球面镜耦合系统, 减小了小泵浦光斑在晶体中的发散速度, 并提高了泵浦均匀性。当泵浦光波长为 969.7 nm 时, Er:YAG 晶体前段对泵浦光的吸收较弱, 因此激光器增益介质前端热聚集效应得到了缓解。通过热像仪在实验中对键合和非键合 Er:YAG 晶体端面温度进行观测对比, 并使用 COMSOL 软件对激光器热分布进行了模拟分析, 证明了上述措施对减小高掺杂 Er:YAG 晶体热效应的有效性。最终成功实现了 155 mW 的 2.94 μm 连续激光输出。另外还观测到激光器输出波长随泵浦功率增加的红移现象并对其在能级跃迁层面进行了理论解释。

关键词: 2.94 μm 连续激光器; Er:YAG 激光器; 泵浦波长; 非球面耦合; 键合晶体

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220391

Development of 2.94 μm room temperature CW Er:YAG laser technology

Liu Zhengyi^{1,2,3}, Ye Xianlin^{1,2}, Zhang Song^{1,2,3}, Wei Xingbin^{1,2}, Ren Huaijin^{1,2}, Wang Weimin^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: In this paper, we report a simple structure, room-temperature operation, LD end-pumped 2.94 μm Er:YAG continuous wave laser. The laser uses double-ended bonded YAG end caps to reduce the end-surface temperature of the crystal. The pump source uses a small core diameter output fiber and an aspheric mirror coupling system, which reduces the dispersion rate of small pump spots in the crystal and therefore improves pumping uniformity. When the pump light wavelength is 969.7 nm, the absorption of pump light in the front section of Er:YAG crystal is weak, accordingly the thermal aggregation effect of the front end of the laser gain medium is mitigated. We observed and compared the temperature of the end faces of bonded and non-bonded Er:YAG crystals with a thermal imaging camera, simulated the thermal distribution using COMSOL software, and proved the effectiveness of the above measures in reducing the thermal effect of highly doped Er:YAG crystal. We finally succeeded in achieving a continuous laser output of 2.94 μm at 155 mW. We also observed the output wavelength's red-shift phenomenon with the pump power increase and explained it theoretically at the energy transfer level.

Key words: 2.94 μm CW laser, Er:YAG laser, pump wavelength, aspherical coupling mirror, bonding crystals

3 μm 波段的激光位于大气窗口, 且水对该波段吸收比较强烈。近年来在自由空间通信、医疗、气体检测等领域的应用需求越来越大。Er³⁺离子的⁴I_{11/2}→⁴I_{13/2}跃迁可以直接产生 3 μm 波段的激光。固体激光材料中, Er:YSGG、Er:YAP、Er:Lu₂O₃、Er:CaF₂、Er:YAG 等都有各自的优势, Er:YAG 具有生长技术成熟、易于掺杂、热导率高、抗损伤阈值高等优点, 并且具有在 3 μm 波段最长的 2.94 μm 跃迁。

Er:YAG 激光器在脉冲激光领域的研究最多、应用最广。1974 年, Zharikov 等人^[1]通过闪光灯泵浦 30% 掺杂浓

* 收稿日期: 2022-11-17; 修订日期: 2023-02-27
基金项目: 中国工程物理研究院创新发展基金项目
联系方式: 刘政邑, 15927397317@163.com。
通信作者: 魏星斌, wishingbeing@hotmail.com。

度的 Er:YAG, 制作了第一台 Er:YAG 激光器。而后随着 LD 泵浦技术的应用, Er:YAG 激光器的发展突飞猛进。相对于传统的灯泵浦 LD 具有效率高、体积小、寿命长等优点, 并且能大幅减少产生的废热^[2]。LD 侧面泵浦是实现大功率激光输出的有效方式。2017 年, Xu 等人使用 150 Hz、300 μs 的泵浦源, 侧面泵浦双端键合 YAG 的 50% 掺杂浓度的 Er:YAG, 得到了平均功率为 10 W 的准连续激光, 光-光转化效率和斜率效率分别为 5.6% 和 9.1%^[3]。LD 侧面泵浦存在效率较低、光束质量差的问题, 而 LD 端面泵浦具有更好的模式匹配效率和输出光束质量。2010 年, Voronov A 等人使用 3 ms 的脉冲光端面泵浦 Er:YAG 得到了 0.5 W 平均功率的激光输出, 并使用 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 被动调 Q 得到了 3 μJ 、180 ns 的巨脉冲^[4]。目前国内外对连续 Er:YAG 激光器的研究较少, 国际上给出详细设计参数的研究中, 获得最高指标为 Chen D W 团队报道的 1.15 W, 光束质量 $M^2 > 2$ ^[5-6]。该团队使用束腰半径为 45 μm 的泵浦光斑注入 2 mm 长的 Er:YAG 键合晶体, 并在晶体端面直接镀膜构成谐振腔。但是由于晶体镀膜容易受到晶体产热影响, 不仅成本较高且较高功率下腔膜容易受损。另外小光斑泵浦限制了其晶体长度, 难以继续进行功率提升。

对于本文中使用的 50% 掺杂浓度的 Er:YAG 晶体, 室温下 Er^{3+} 离子的 $^4\text{I}_{11/2}$ 上能级寿命 (0.12 ms) 短于 $^4\text{I}_{13/2}$ 下能级寿命 (7 ms)^[2], 导致 $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 能级跃迁存在自终止效应, 需要通过提高 Er^{3+} 掺杂浓度来增大上转换速率以实现有效的激光输出, 但高掺杂的 Er:YAG 具有高吸收、高阈值、废热严重的缺点^[6-7]。脉冲泵浦方式峰值功率高, 容易达到出光阈值, 并且当脉冲间隔较大时, 产生的热量可以在间隔期内充分散发。连续泵浦方式持续产热, 没有散热间隔期, 因此积热严重, 并且其峰值功率远低于脉冲泵浦, 可能导致激光晶体未达到阈值即因积热损坏^[8]。此外, 长增益介质的应用是提升输出功率的必要条件, 因此还要解决晶体对泵浦光的强吸收效应。以上特点决定了连续 Er:YAG 激光器设计的困难性。为解决上述问题, 获得高效的中红外连续 Er:YAG 激光器, 本文的技术研究重点为以下 3 个方面: (1) 小芯径尾纤泵浦源的选择和耦合系统的设计, 小芯径光纤的光束质量更好, 可以保证泵浦光斑足够小且发散足够慢以达到 Er:YAG 较高的出光阈值, 使用非球面透镜组合的耦合系统以减小泵浦系统的球差, 使泵浦光的能量分布更加集中; (2) 强烈热效应的缓解, 通过键合 YAG 来减小端面热膨胀、提高温度分布均匀性和减小温度梯度; (3) 泵浦波长的选择, 通过控制泵浦源的冷却水温微调泵浦波长, 避开 Er:YAG 最强吸收峰来减少晶体前端的强烈吸收, 使泵浦光在整个晶体内均匀分布, 以缓解热量集中效应。通过这些改进的设计, 实现了 5.0 W 泵浦功率下 155 mW 的连续激光输出, 斜效率为 5.4%。

1 实验装置

图 1 是实验装置图, 泵浦源为 970 nm 可调的半导体激光器, 芯径为 105 μm , 数值孔径为 0.22, 最大输出功率 30 W。增益介质为双端键合 YAG 的 50% 掺杂浓度的 Er:YAG 晶体, 键合部分的 YAG 长度为 2 mm, 掺 Er^{3+} 部分的长度为 10 mm, 横截面尺寸为 3 mm \times 3 mm。耦合系统 F_1 为焦距 10 mm 非球面镜, F_2 为焦距 30 mm 非球面镜, 准直聚焦后泵浦光束腰直径为 0.31 mm。采用结构紧凑的平凹腔, 腔长为 16 mm, 全反镜为平面镜, 镀有 960~980 nm 的增透膜和 2.94 μm 的高反膜。输出镜是曲率半径为 500 mm 的凹面镜, 对 2.94 μm 激光反射率为 99%, 对 960~980 nm 高透。输出光通过分光镜将泵浦光与中红外光分开, 45° 分光镜对 960~980 nm 光高透, 对 2.94 μm 光高反。晶体用铝箔包裹置于紫铜水冷夹具, 通过调节 LD 泵浦源的冷却水温来改变泵浦波长。为防止低温晶体表面结露或者高温冷却效果较差, 晶体冷却水温选择与室温相同的 20 $^{\circ}\text{C}$ 。

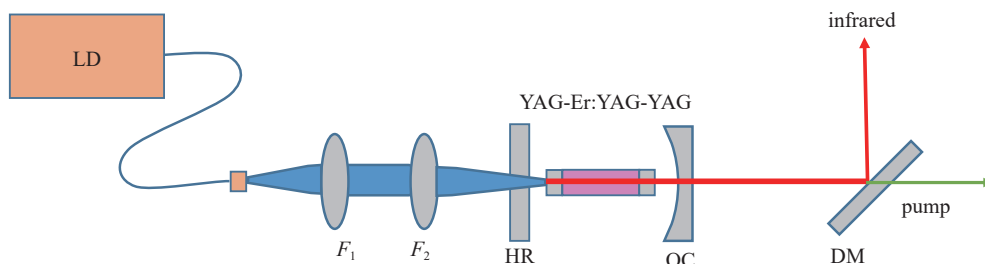


Fig. 1 Experimental setup of Er:YAG laser

图 1 Er:YAG 激光器实验装置图

2 实 验

2.1 键合晶体与非键合晶体对比

为减轻高掺杂 Er:YAG 严重的热效应, 实验中通过使用键合晶体来提升激光器性能, 并对键合晶体和非键合晶

体进行了对比研究。键合晶体的概念首次由 Bowman 提出^[9], 他们发现键合后的 Tm/Ho:YAG 输出功率是非键合的 2 倍。无键合晶体在侧面接触热沉, 加速散热, 但是晶体的出入光面无法被覆盖, 导致其在吸收泵浦光热量的同时却只能与空气进行热交换, 散热速度慢。键合晶体可以从两方面缓解热效应: 一是键合的 YAG 几乎不产热, 其侧面贴合在热沉上, 端面与 Er:YAG 键合, 接触散热速度比空气热交换散热速度快, 因而可以直接降低 Er:YAG 进光面的温度并改善内部温度梯度分布^[10]; 二是端面热变形, 如果 Er:YAG 端面直接暴露在空气中, 大量的废热导致其端面膨胀变形, 晶体端面极易损坏。但键合的 YAG 由于端面贴合, 减缓了 Er:YAG 端面热变形, 且 YAG 的热效应很弱, 作为晶体通光面膨胀极小^[11]。

图 2 为使用热像仪直接观测到的键合晶体和非键合晶体的前端面温度图。此时泵浦光功率为 5.0 W, LD 冷却水温度为 30 °C。因为输出光功率相对于泵浦光功率较小, 为了方便观察把腔镜移开, 直接测量散热夹具中的晶体端面温度。通过在热像仪所成的图像上画线, 读取线上的温度值, 测量结果如图 3(a) 所示, 无键合晶体的前端面最大温度已达到量程上限 160 °C, 远大于键合晶体的 25 °C, 证明键合对于减小端面膨胀有效。之后使用 COMSOL 结合测量值对温度分布进行模拟计算, 图 3(b) 是仿真得到的晶体横截面中心沿晶体长度方向的温度变化曲线, 非键合晶体前端面温度高达 172 °C, 键合之后最大温度降至 95 °C, 且整体温度分布均匀性也有很大提升。图 4 是模拟得到的晶体中心温度剖面图, 说明键合的方法对缓解激光器热效应的效果是显著的。实验中测得两种晶体的后端面温升都比较小, 接近冷却水温, 与 COMSOL 模拟的结果相同。这是因为晶体对泵浦光的吸收较强, 导致泵浦光大部分在晶体前端被吸收, 因此可以在后续的实验中尝试通过缩短晶体进而缩短腔长来获得更高效的激光输出。

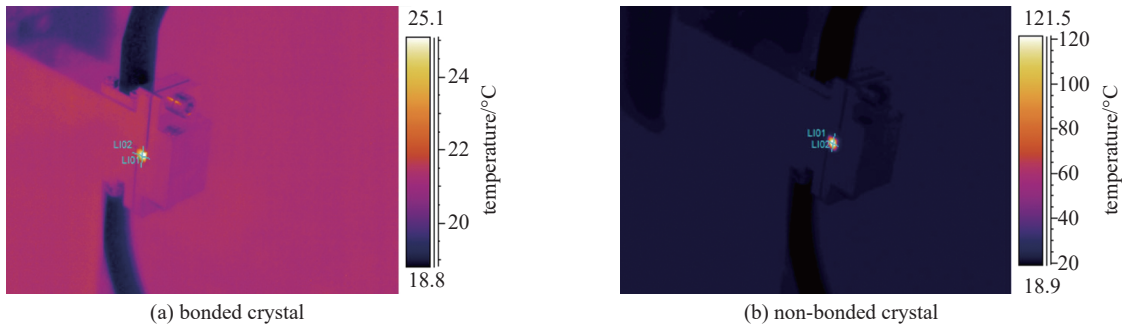


Fig. 2 Temperature distribution of the front surface of the crystal

图 2 晶体前端面温度分布

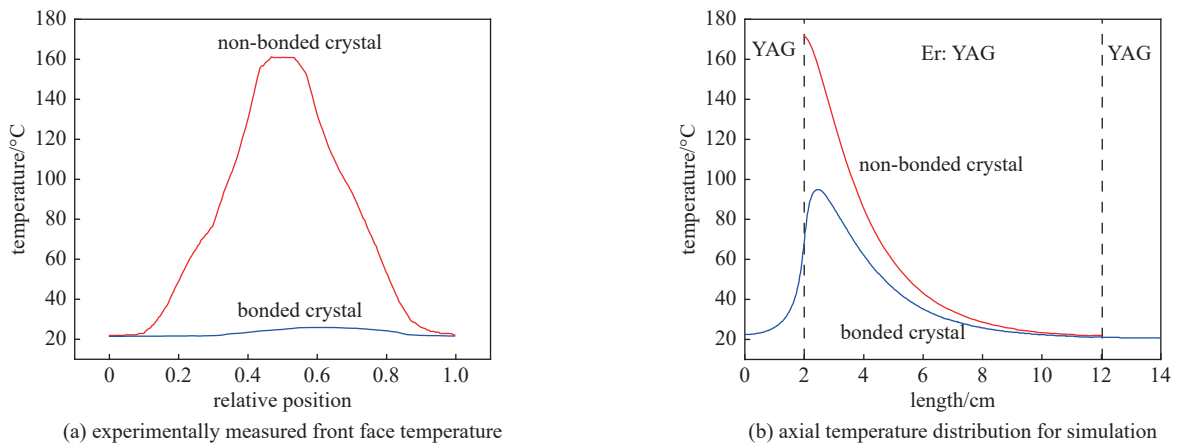


Fig. 3 Temperature distribution curves of bonded/non-bonded crystal

图 3 键合/非键合晶体温度分布曲线

2.2 激光器输出性能

为了探究最合适的泵浦波长, 对泵浦光与输出性能的关系进行了理论分析和实验对比。表 1 为实验测得的泵浦波长随冷却温度的变化, 使用的光谱仪型号为 YOKOGAWA-AQ6370C。泵浦源冷却温度分别为 18、24、30、36 °C 时对应的泵浦波长分别为 964.8、967.4、969.7、972.2 nm。图 5(a) 为 50% 掺杂浓度的 Er:YAG 晶体在室温下考虑晶体界面菲涅尔反射等因素时对应的吸收光谱^[12], 晶体对泵浦光的吸收效率可近似表示为

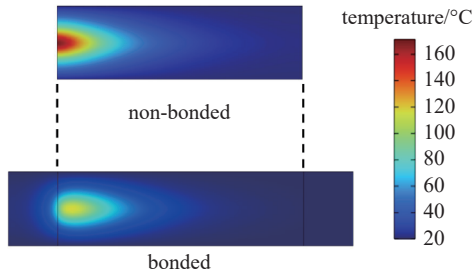


Fig. 4 Simulated temperature distribution profile

图 4 晶体内部温度分布剖面模拟图

表 1 泵浦波长随冷却温度的变化
Table 1 Pump wavelength with different cooling temperature

temperature/°C	wavelength/nm
18	964.8
24	967.4
30	969.7
36	972.2

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha l) \quad (1)$$

式中: η 是吸收效率; α 为吸收系数, 单位为 cm^{-1} ; l 是晶体的吸收长度, 单位为 cm 。

实验中首先使用了无键合的 Er:YAG 晶体, 因为连续光泵浦时高掺杂 Er:YAG 严重的热效应和较高的起振阈值, 在获得激光输出之前晶体就被损坏。使用键合晶体时, 在所用的几种泵浦波长下均得到了激光输出。图 5(b) 为使用 COMSOL 模拟得到的不同泵浦波长下键合晶体的温度分布曲线, 可以看出, 增益介质对 964.8 nm 和 967.4 nm 的泵浦光吸收强烈导致热量在前端聚集, 晶体最大温度较高, 温度梯度大。当泵浦波长为 969.7 nm 时, 增益介质对泵浦光的吸收相对平缓且温度分布也相对合理。对于 972.2 nm, 虽然此时晶体对泵浦光吸收更加缓慢、热效应更弱, 但是吸收量的减少导致大部分增益介质无法达到出光阈值。

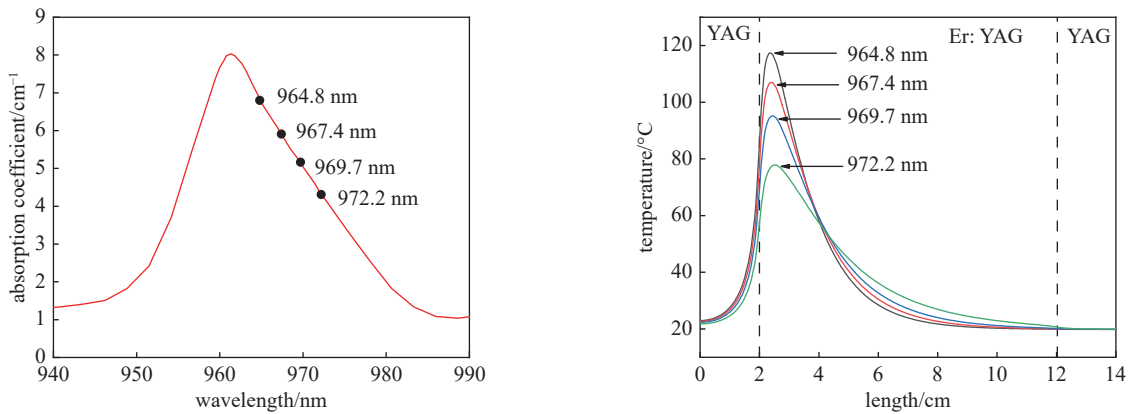


Fig. 5 Pump light absorption and temperature distribution curves

图 5 泵浦光吸收和温度分布曲线

图 6(a) 是输出功率随泵浦功率的变化曲线, 此时输出镜对 $2.94 \mu\text{m}$ 的反射率为 99%, 在实验过程中尝试了反射率为 95% 和 97% 的输出镜但均未获得连续光输出, 这和 Er:YAG 的较大起振阈值有关。从图 6(a) 可以看出, 泵浦波长为 969.7 nm 时激光输出效率最高、功率最大, 此时激光器的阈值为 2.2 W。在泵浦功率为 5.0 W 时得到了最大输出功率 155 mW, 继续增加泵浦功率, 输出功率开始下降, 热效应限制了功率的继续提升。图 6(b) 是使用 90/10

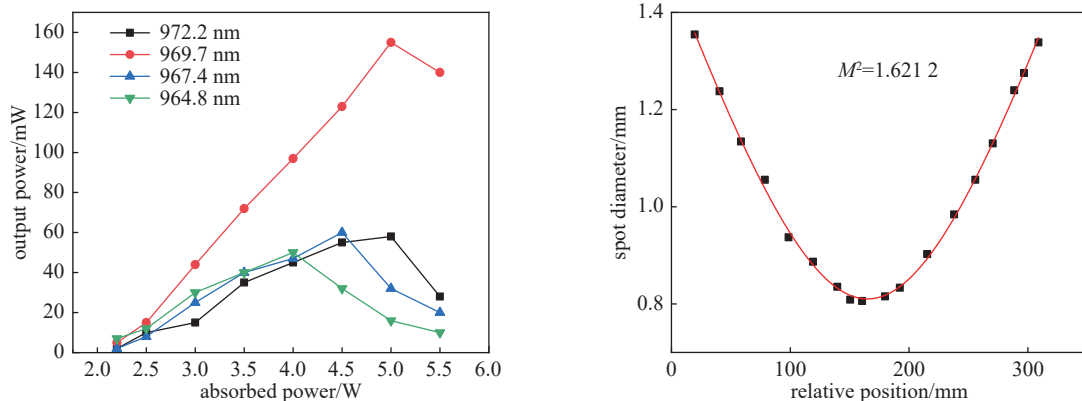


Fig. 6 Output power and beam quality

图 6 输出功率和光束质量

刀口法测得的光斑直径随相对位置变化的曲线，经过拟合得到光束质量因子 $M^2=1.6212$ 。

2.3 输出光谱

为继续探究该激光器的输出特性，测量分析了输出光谱的变化情况，如图 7 所示，使用的光谱仪型号为 BRISTOL INSTRUMENTS 772B。实验首先在小泵浦功率下观察到中红外光输出，通过调节电流将输出功率控制在 5 mW，输出光经准直衰减后进入光谱仪，此时只有 2831 nm 光输出，如图 7(a)所示。继续增加泵浦电流，当输出光功率达到 10 mW，出现 2831 nm 光和 2937 nm 光同时振荡的情况，如图 7(b)所示。当输出功率超过 25 mW，只有 2937 nm 光输出，如图 7(c)所示。随着输出功率增加，输出波长红移的现象在 Er³⁺掺杂激光器中不是个例，如日本的 Hiorki K 等人在 Er:YAP 的实验中发现了泵浦功率由低到小时，输出波长出现 2769~2920 nm 的红移现象^[13-14]。Yao W 等人在 Er:Lu₂O₃ 的实验中发现了输出波长从 2740~2845 nm 的红移现象^[15]。图 7(d)是输出功率为 155 mW 时测得的光谱图，此时中心波长为 2937 nm，线宽 (FWMH) 为 0.2 nm。

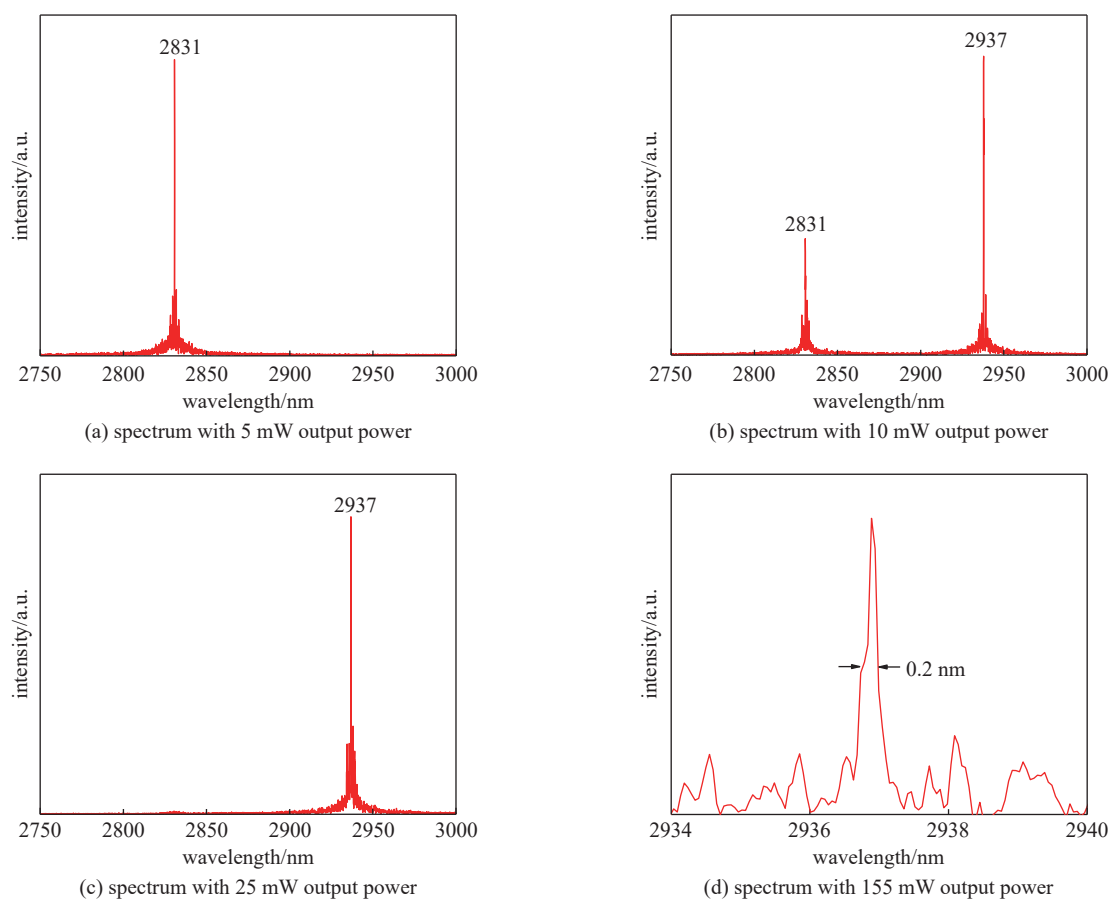


Fig. 7 Spectra at different output power

图 7 不同输出功率时的光谱

为解释实验中的输出波长变化现象，从能级跃迁的角度对其进行了理论分析。室温下 Er:YAG 的能级 Stark 分布如图 8 所示^[16]。2831 nm 对应的是 ⁴I_{11/2} 的第 6 个 Stark 能级到 ⁴I_{13/2} 的第 7 个 Stark 能级的跃迁，2937 nm 对应的是 ⁴I_{11/2} 的第 2 个 Stark 能级到 ⁴I_{13/2} 的第 7 个 Stark 能级的跃迁。由于 2831 nm 与 2937 nm 对应的下能级相同，所以考虑波长红移是上能级的粒子分布变化造成的。小信号增益系数可以表示为

$$g = \sigma_{\lambda}(\alpha_{\lambda}N_2 - \beta_{\lambda}N_1) \quad (2)$$

式中： σ_{λ} 为波长 λ 对应的发射截面，单位为 cm^2 ； α_{λ} 和 β_{λ} 为上能级和下能级对应的玻耳兹曼占有因子； N_2 和 N_1 为上能级和下

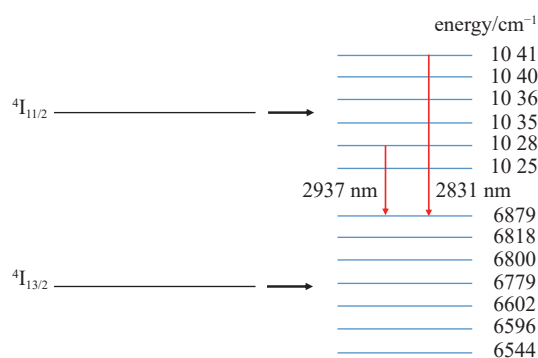


Fig. 8 Stark energy level distribution

图 8 Stark 能级分布

能级对应的粒子数密度。因为 2831 nm 和 2937 nm 共享一个下能级, 即 $\beta_{\lambda}N_1$ 相等, 所以这里只考虑 σ_{λ} 和 $\alpha_{\lambda}N_2$ 对小信号增益系数的影响。对于 2831 nm 跃迁, $\sigma_{2831} = 4.35 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\alpha_{2831} = 0.11573$ 。对于 2937 nm 跃迁, $\sigma_{2937} = 3.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\alpha_{2937} = 0.21786$ [16]。在较低泵浦功率下, 跃迁到 $^4I_{11/2}$ 能级的光子数 N_2 较小, 分布到各 Stark 能级的光子数 $\alpha_{\lambda}N_2$ 也相应地较小, 此时发射截面 σ_{λ} 的大小决定小信号增益系数 g 的大小, 因此 2831 nm 的激光在增益竞争中胜出。随着泵浦光增强, N_2 迅速增加, 此时 $\alpha_{\lambda}N_2$ 的大小决定 g 的大小, 因此玻尔兹曼占有因子更大的 2937 nm 跃迁在增益竞争中胜出。

3 结 论

本文报道了一台使用长增益介质的 LD 端面泵浦 2.94 μm 连续 Er:YAG 激光器。针对 50% 掺杂浓度的 Er:YAG 强吸收、高阈值、废热严重的特点, 从选择泵浦波长、使用键合晶体、改善耦合系统三个方面进行了优化设计。对比了不同泵浦波长时激光器的性能, 在波长为 969.7 nm 时, 5.0 W 的泵浦功率下得到了 155 mW 的激光输出, 斜率效率为 5.4%, 光束质量 $M^2=1.6212$ 。在实验中发现了输出波长从 2831 nm 向 2937 nm 红移的现象并从能级跃迁角度对其进行了解释。分析对比了键合晶体和非键合晶体的热问题, 用热像仪直接观察实验中晶体的端面温度分布, 结合 COMSOL 模拟分析, 发现键合晶体对改善热效应有显著的作用。后端面温度接近冷却水温, 说明后续可以通过缩短晶体长度来进一步缩短腔长或者使用双端面泵浦以提高激光器性能。

参考文献:

- [1] Zharikov E V, Zhekov V I, Kulevskii L A, et al. Stimulated emission from Er^{3+} ions in yttrium aluminum garnet crystals at $\lambda = 2.94 \mu\text{m}$ [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1975, 4(8): 1039-1040.
- [2] 方聪, 王思博, 惠勇凌, 等. 掺铒中红外激光器的进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56: 180002. (Fang Cong, Wang Sibao, Hui Yongling, et al. Progress on erbium-doped mid-infrared laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56: 180002)
- [3] Xu Zhi, Wang Pengyuan, Liu Wanfa, et al. 2.94 μm diode side pumped Er:YAG laser[C]//Proceedings of SPIE 10254. 2017: 91-96.
- [4] Voronov A A, Kozlovskii V I, Korostelin Y V, et al. Passive Q-switching of the diode-pumped Er: YAG laser cavity with the Q-switch based on the Fe^{2+} : ZnSe crystal[J]. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2010, 37(6): 169-172.
- [5] Dinerman B J, Moulton P F. 3- μm cw laser operations in erbium-doped YSGG, GGG, and YAG[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(15): 1143-1145.
- [6] Chen D W, Fincher C L, Rose T S, et al. Diode-pumped 1-W continuous-wave Er: YAG 3- μm laser[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(6): 385-387.
- [7] Ye Xianlin, Liu Zhengyi, Zhang Song, et al. High efficiency and high beam quality Er: YSGG mid-infrared continuous-wave laser[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 127: 104427.
- [8] Ye Xianlin, Xu Xiafei, Ren Huaijin, et al. Study of LD side-pumped two-rod Er: YSGG mid-infrared laser with 61-W output power[J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127608.
- [9] Bowman S R, Lynn J G, Searles S K, et al. Power scaling of diode-pumped 2 micron lasers[C]//Proceedings of the LEOS'93. 1993: 692.
- [10] Li T, Zhao S Z, Zhuo Zhuang, et al. Passively mode-locked $\text{YVO}_4/\text{Nd: YVO}_4$ composite crystal green laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 6(1): 30-33.
- [11] Clarkson W A. Thermal effects and their mitigation in end-pumped solid-state lasers[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, 34(16): 2381-2395.
- [12] 徐赛. LD泵浦3微米Er固体激光器输出特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 30-35. (Xu Sai. Studies on output performance of 3 micron band Er-doped solid state lasers pumped by LD[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 30-35)
- [13] Kawase H, Yasuhara R. 2.92- μm high-efficiency continuous-wave laser operation of diode-pumped Er: YAP crystal at room temperature[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12213-12220.
- [14] Yao Weichao, Uehara H, Kawase H, et al. Highly efficient Er: YAP laser with 6.9 W of output power at 2920 nm[J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 19000-19007.
- [15] Yao Weichao, Uehara H, Tokita S, et al. LD-pumped 2.8 μm Er: Lu_2O_3 ceramic laser with 6.7 W output power and >30% slope efficiency[J]. *Applied Physics Express*, 2021, 14: 012001.
- [16] Sang Youbao, Liu Dong, Xia Xusheng, et al. A multi-wavelength pulsed mid-infrared laser based on Er: YAG[J]. *Optics Communications*, 2021, 485: 126667.