



Yb:CNGG 有源反射镜的多程放大特性研究*

吴 哲¹, 管相合², 季来林², 华怡林^{3,4}, 高妍琦², 隋 展², 陈华才¹

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018; 2. 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 上海 201899;
3. 上海理工大学 光子芯片研究院, 上海 200093; 4. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要: 高效、高平均功率固体纳秒脉冲激光器在光电对抗、激光雷达、材料改性、激光加工等诸多领域发挥着越来越重要的作用,然而目前大多数纳秒级高平均功率激光器采用 Yb:YAG 或掺 Nd 材料作为增益介质,材料的高饱和通量或低储能密度会导致激光器放大链路复杂,体积庞大。研究比较了一种更适合作为高平均功率、高脉冲能量激光器增益介质的无序石榴石晶体 Yb:CNGG,研究了有源反射镜结构中 Yb:CNGG 的多程增益特性,分析了放大过程并建立了多程放大模型,在一定的泵浦条件下优化了晶体参数以实现更好的储能。开展了双程放大实验,在 15 kW/cm² 的泵浦功率密度下得到了 1.53 倍的增益。对比 Yb:CNGG 晶体与 Yb:YAG 晶体的多程放大能力,在相同的晶体参数和泵浦条件下,在入射能量 1 mJ 时 Yb:CNGG 可实现 2.11 J 的脉冲能量输出,优于 Yb:YAG 晶体 1.41 J 的能量输出。

关键词: Yb:CNGG; 激光放大器; 多程放大; 有源反射镜; 激光二极管

中图分类号: TN244

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220261

Research on multi-pass amplification characteristics of Yb:CNGG active mirror

Wu Zhe¹, Guan Xianghe², Ji Lailin², Hua Yilin^{3,4}, Gao Yanqi², Sui Zhan², Chen Huacai¹

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China;

3. Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

4. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: High efficiency and high average power nanosecond pulsed solid state lasers are playing an increasingly important role in photoelectric countermeasures, lidar, material modification, laser processing and many other fields. However, at present, Yb:YAG or Nd-doped materials are adopted as gain medium in most nanosecond high average power lasers. The high saturation flux or low energy storage density of the materials lead to complex laser amplification link and large laser volume. In this paper, a disordered garnet crystal Yb:CNGG that is more suitable as a gain medium for high average power and high pulse energy lasers is studied and compared. The multi-pass gain characteristics of Yb:CNGG in the structure of active mirror are researched. The amplification process is analyzed and the multi-pass amplification model is established. The crystal parameters are optimized under certain pumping conditions to achieve better energy storage. The double-pass amplification experiment was carried out, and a gain of 1.53 was obtained at the pump power density of 15 kW/cm². The multi-pass amplification capability of Yb:CNGG and Yb:YAG is compared. Under the same crystal parameters and pumping conditions, the pulse energy output of 2.11 J can be achieved by Yb:CNGG crystal at the incident energy of 1 mJ, which is better than the energy output of 1.41 J of Yb:YAG crystal.

Key words: Yb: CNGG, laser amplifier, multi-pass amplification, active mirror, laser diode

* 收稿日期:2022-08-24; 修订日期:2023-02-01

基金项目:空间碎片与小行星专项(KJSP2020010304)

联系方式:吴 哲, 958884600@qq.com。

通信作者:陈华才, huacaichen@cjlu.edu.cn;

管相合, guanxianghe@163.com。

高平均功率、高脉冲能量的激光系统因其在军事、物理、工业、科研等领域的广泛应用而受到越来越多的关注^[1-4],然而在追求较高的平均功率时,对系统的功重比要求越来越高。现阶段的高平均功率激光系统多可由前端、预放和主放三个部分组成,如 Mercury 系统^[5], LUCIA 系统^[6], DiPOLE 系列^[7]等。这种配置会使系统占用较大的空间,同时设备的运行和维护复杂。在材料的激光冲击强化或空间碎片的激光清除等众多应用场景中,都要求系统紧凑性高、可移动性强、易于管理,因此亟需针对高平均功率激光器提出优化方案,提高系统功重比、功体比,拓宽发展应用场景。

二极管泵浦具有有源反射镜结构的全固态激光放大器作为一种新兴的结构,可以满足高平均功率和脉冲能量激光器小型化的需求。目前,多种不同增益介质的有源反射镜激光放大器已经实现了高功率高脉冲能量的激光输出。2017年,清华大学在室温下使用二极管泵浦 Nd:YAG 有源反射镜多程放大器,在 1~10 Hz 的重复频率下得到了 12.2 J 的纳秒脉冲输出^[8], Nd:YAG 晶体因其高增益效率和低激光阈值的特点,常被用于近远红外固态激光及其倍频、三倍频领域;2019年,该课题组使用 50 mm 的大孔径 Nd:LuAG 陶瓷作为分布式有源反射镜放大链的增益介质,在重复频率 10 Hz 时得到了 10 J 的纳秒脉冲输出^[9],作为 YAG 的同构体, LuAG 因其物化特性优于 YAG 而被广泛关注, Nd:LuAG 晶体小的发射截面和长的荧光寿命使其有更高的泵浦阈值可以进行高能储存,更适合被用作二极管泵浦固态激光器的增益介质,目前主要被用于固态激光器产生连续激光和调 Q 激光;2018年, Brendan 等研制了基于低温冷却 Yb:YAG 有源反射镜的啁啾脉冲放大器,在 500 Hz 的重复频率下产生了 1 J 的脉冲输出^[10], Yb:YAG 晶体由于其高量子效率、长荧光寿命、宽发射带宽、可高浓度掺杂等优点,已广泛应用于高效、高功率激光领域,实现高功率的连续或脉冲激光输出,是目前最常用的掺 Yb³⁺激光晶体。上述各种系统都具有多级放大模组,系统面积动辄数十平方米,有必要寻找一种更合适的增益介质来提升系统效率,简化系统复杂性。

本文介绍了掺 Yb³⁺无序石榴石晶体 Yb:CNGG 在二极管泵浦的有源反射镜结构中的应用,对 Yb:CNGG 多程放大器的增益过程进行了理论分析并建立了多程放大模型,优化了多程放大模型中 Yb:CNGG 的掺杂原子分数和厚度以获得更强的增益。在有源反射镜结构下对 Yb:CNGG 晶体开展了双程放大实验,验证了多程放大模型的可靠性,并对比了 Yb:CNGG 晶体与 Yb:YAG 晶体的多程放大能力,证明了 Yb:CNGG 晶体在多程放大和激光器小型化领域的潜力。

1 理论分析

1.1 多程放大模型

作为一种无序型石榴石晶体, Yb:CNGG 晶体在一定程度上兼具玻璃和晶体的优点。CNGG 晶体的无序性质导致了强烈的斯塔克分裂和非均匀加宽,赋予了 Yb:CNGG 晶体很宽的吸收光谱和发射光谱,同时 Yb:CNGG 晶体具有较高的热导率,约为磷酸盐玻璃的三倍。Yb:CNGG 及一些增益介质的常用参数见表 1^[11-12]。相比于 Yb:YAG 等传统掺 Yb 材料, CNGG 晶体独特的晶格结构使 Yb:CNGG 具有较大的吸收截面和发射截面,增强了其泵浦吸收能力和增益能力。相比于致玻璃等掺 Nd 材料, Yb:CNGG 具有掺 Yb 材料量子效率高、荧光寿命长、导热系数高等优点,使其可以实现更高的储能密度和更少的产热。

表 1 Yb:CNGG, Yb:YAG 和 Nd:glass (LHG-5) 的常用参数对比

Table 1 Comparison of common parameters of Yb:CNGG, Yb:YAG and Nd: Glass (LHG-5)

crystal	absorption wavelength/nm	absorption cross section/(10 ⁻²⁰ cm ²)	emission wavelength/nm	emission cross section/(10 ⁻²⁰ cm ²)	fluorescence lifetime/ms	thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Yb:CNGG	941	1.6	1028	2.4	0.79	4.7
Yb:YAG	941	0.76	1030	2.03	0.95	10
Nd:Glass (LHG-5)	840	3.0	1054	4.1	0.29	1.19

Yb:CNGG 晶体独特的物理性质和优良的激光特性使其可以在小体积内实现高储能,但 Yb:CNGG 的饱和通量密度较高,增益系数较小,储能提取较为困难。因此适合采用多程放大的方式,先在前期积累一定的增益,待放大光束的通量密度接近或超越晶体的饱和通量密度时再对晶体的储能实现有效的提取。

Yb 的能级结构非常简单,只有基态²F_{7/2}和激发态²F_{5/2}两个的电子态,泵浦和激光跃迁过程发生在斯塔克子能级之间,通过描述泵浦和激光过程中的粒子数变化得出晶体各处的上能级粒子数比例,多次迭代种子光放大过程,即可得到晶体各处的储能分布和种子光强度。对于准三能级的 Yb 离子而言,泵浦和激光过程中的粒子数变化可

以表示为^[13]

$$\begin{cases} \Delta N_p = f_{Li}N_L - f_{Uj}N_U = N_{Yb}(f_{Li} + f_{Uj})(f_p - X_U) \\ \Delta N_l = f_{Um}N_U - f_{Ln}N_L = N_{Yb}(f_{Lm} + f_{Un})(X_U - f_l) \end{cases} \quad (1)$$

式中: 下标 p 和 l 分别表示泵浦和激光过程; N_L 、 N_U 和 N_{Yb} 分别表示下能级、上能级和总的 Yb 粒子数密度; f_{Li} 、 f_{Lm} 、 f_{Un} 、 f_{Uj} 为泵浦和激光过程中参与跃迁的 Stark 子能级的玻尔兹曼热分布因子, 下标 L 、 U 分别表示 Yb 离子的下能级和上能级, i 、 j 分别表示泵浦跃迁的子能级, 下标 m 、 n 表示激光跃迁子能级, 可根据 Yb 离子的能级结构计算出上述分布因子。并且定义

$$f_p = \frac{f_{Li}}{f_{Li} + f_{Uj}}, \quad f_l = \frac{f_{Lm}}{f_{Lm} + f_{Un}}, \quad X_U = \frac{N_U}{N_{Yb}} \quad (2)$$

$$N_{Yb} = c_{Yb}n_{Yb}N_A\rho/M \quad (3)$$

式中: c_{Yb} 为 Yb 离子的掺杂原子分数; n_{Yb} 为单分子中 Yb 离子的取代个数; N_A 为阿伏伽德罗常数; ρ 和 M 分别为 CNGG 晶体的密度和摩尔质量。

图 1 为端面泵浦的 Yb:CNGG 晶体结构图。图中+、-表示晶体中种子光和泵浦光的传播方向, 定义由 $z=0$ 向 $z=L$ 的传播方向为光束传播正方向。

定义归一化后的泵浦强度和激光强度分别为 $I_p = P/P_{sat}^p$ 与 $I_l = I/I_{sat}^l$, 其中 P 和 I 分别为物理上的泵浦强度和激光强度; I_{sat}^p 和 I_{sat}^l 分别为泵浦饱和强度和激光饱和强度, 可以表示为

$$\begin{cases} I_{sat}^p = \frac{h\nu_p}{(f_{Li} + f_{Uj})\tau_f\sigma_p} \\ I_{sat}^l = \frac{h\nu_l}{(f_{Lm} + f_{Un})\tau_f\sigma_l} \end{cases} \quad (4)$$

式中: h 为普朗克常数; ν_p 和 ν_l 分别为泵浦光和激光的频率; τ_f 为 Yb:CNGG 晶体的荧光寿命; σ_p 为 Yb:CNGG 晶体在 940 nm 处的吸收截面; σ_l 为 Yb:CNGG 晶体在 1028 nm 处的发射截面。

对于常规脉冲储能型激光器而言, 种子光往往是在反转粒子数最大时注入, 因此在种子光注入之前只有泵浦过程, 泵浦光在晶体各处的泵浦强度可以表示为

$$I_p(z) = I_p \exp[-\alpha_0(L-z)] + R_p I_p \exp(-\alpha_0 L) \exp(-\alpha_0 z) \quad (5)$$

式中: L 为增益介质的长度; R_p 为 940 nm 高反膜的反射率; α_0 为吸收系数, 可以表示为^[14]

$$\alpha_0 = \sigma_p N_{Yb} (f_{Li} + f_{Uj}) \quad (6)$$

根据泵浦光在晶体各处的强度, 可以得到泵浦后的晶体上能级粒子浓度比例

$$X_U(z) = \frac{f_p I_p(z)}{1 + I_p(z)} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(1 + I_p(z) \right) \frac{\tau_p}{\tau_f} \right] \right\} \quad (7)$$

式中: τ_p 为泵浦脉宽。

光子在晶体中传播时, 泵浦产生的反转粒子会对其产生增益, 传输至 $z=L$ 处的光子会被 1028 nm 高反膜反射再次经过晶体, 种子光的放大过程可以表示为

$$dI_l(z) = I_l(z)(f_{Lm} + f_{Un})\sigma_l N_{Yb}(X_U - f_l) \quad (8)$$

$$I_l(z+dz) = I_l(z) + dI_l(z) \quad (9)$$

$$I_l^-(L) = R_l I_l^+(L) \quad (10)$$

式中: R_l 为 1028 nm 高反膜的反射率; I_l^+ 和 I_l^- 分别表示沿正向传播和沿反向传播的种子光强度。

同时, 光子经过晶体各处后会改变该处的反转粒子数, 新的上能级粒子浓度比例 X_U' 作为光子再次经过该处时的初始上能级粒子浓度比例, 可以表示为

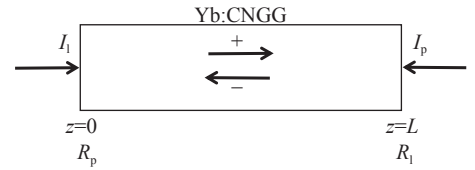


Fig. 1 Schematic of two-dimensional rectangular slab structure

图 1 二维矩形板条结构示意图

$$X'_U = \frac{X_U}{\exp\left\{[1 + I_1(z)] \frac{\tau_1}{\tau_u}\right\}} + \frac{f_1 I_1(z)}{1 + I_1(z)} \left\{1 - \exp\left[-(1 + I_1(z)) \frac{\tau_1}{\tau_f}\right]\right\} \quad (11)$$

当被放大的光子经过高反膜的反射再次回到初始位置即完成了一程放大,联立式(5)~(11),结合各项实验参数和边界条件并进行多次迭代,即可对多程放大系统的放大过程进行模拟。

1.2 晶体优化模型

Yb:CNGG 晶体被用作放大系统的增益介质时,若掺杂原子分数过低,低吸收系数会降低晶体的泵浦吸收能力,若掺杂原子分数过高,由于准三能级系统中透明阈值的存在,会对系统造成较大的损耗。因此为确保最终足够的能量输出,需对晶体参数进行优化。同等泵浦功率密度下,储能密度主要由激活离子密度和泵浦吸收能力决定,二者皆与晶体厚度和掺杂原子分数有关。当泵浦功率密度一定时,掺杂原子分数决定了晶体中 Yb³⁺的密度,进而影响晶体的吸收系数,吸收系数和晶体厚度共同决定了晶体的储能密度。因此,通过计算吸收系数和储能密度,可以推断出各位置的平均增益系数和储能分布。

薄片放大器多采用薄厚度、高掺杂,因此高平均功率、高脉冲能量激光系统中的增益介质厚度大多为毫米量级。因此选择 2~7 mm 的几种常用的晶体厚度,通过改变掺杂原子分数以确保足够的泵浦光吸收效率,提高增益和储能均匀性。将单程定义为种子光由前表面入射晶体,被后表面反射并离开有源反射镜结构。以单程增益倍数 M 作为评价标准,得到了不同厚度 d 下其与掺杂原子分数 a 的依赖关系,结果如图 2 所示。在计算过程中,泵浦功率密度设定为 15 kW/cm²,泵浦脉宽为 600 μs,晶体横向孔径为 15 mm×15 mm。

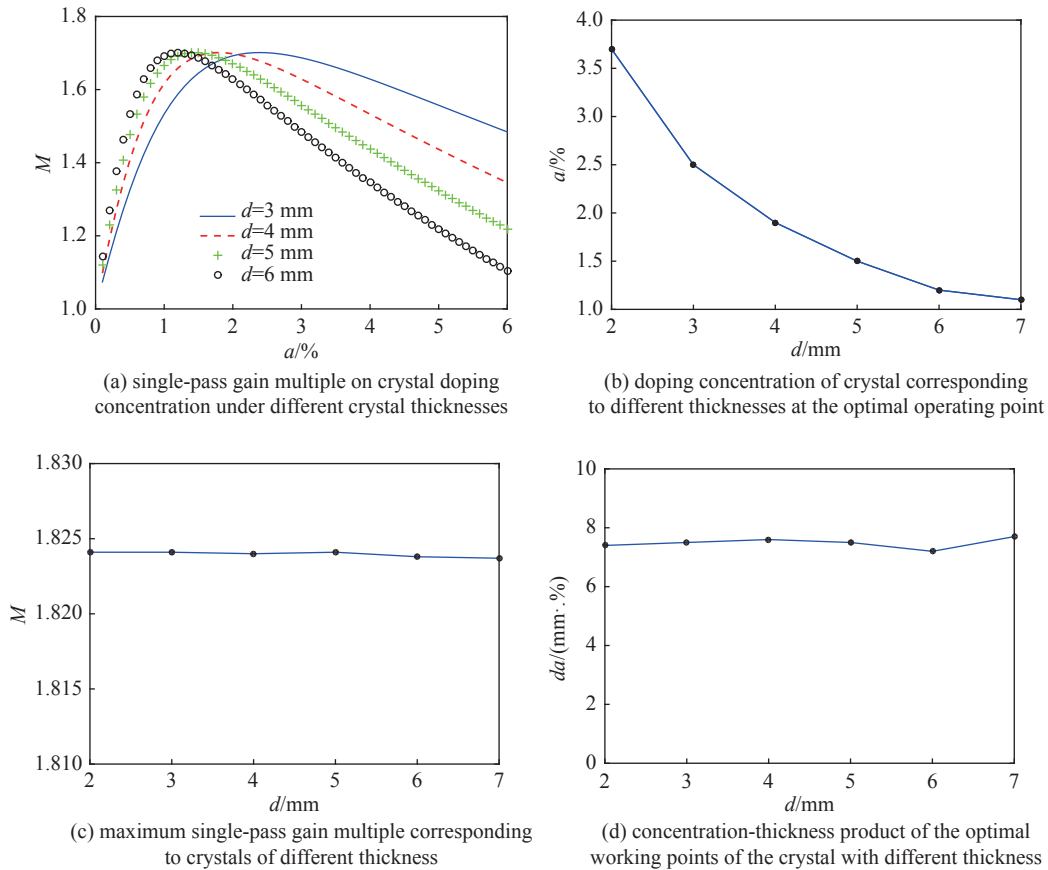


Fig. 2 Single gain multiples of crystals at different thicknesses and doping concentrations

图 2 晶体在不同厚度和掺杂原子分数下的单程增益倍数

如图 2(a)所示,晶体厚度 d 一定时,随着掺杂原子分数 a 的增加, M 值先随之增加,当掺杂原子分数 a 增加到某一值后,由于掺杂原子分数过高,基态粒子数过多,泵浦能量不足以使粒子数形成有效逆转,因此 M 值逐渐减小。同时,每一个厚度 d 存在一个与之对应的掺杂原子分数 a ,使晶体的 M 值最大化,即晶体工作在最优工作点。如图 2(b)所示,当晶体工作在最优工作点时,随着晶体厚度 d 的增加,对应的掺杂原子分数 a 逐渐减小,厚度从 2 mm 逐渐增大到 7 mm 时,对应的掺杂原子分数由 3.7% 减小到 1%。同时对比各厚度最优工作点下的 M 值,发现随着

厚度 d 的增加, 最优 M 值的振幅较小, 因此当厚度在该范围内变化时晶体的最大单程增益几乎不会发生改变, 如图 2(c) 所示。最后, 对最优工作点的浓度厚度积进行了评价, 如图 2(d) 所示。浓度厚度积保持同一水平, 波动可忽略不计, 可作为理论预测理想工作点时厚度和掺杂原子分数选择的经验公式。

由图 2(c) 得到的结论, 晶体厚度在 2 mm 至 7 mm 范围内时各厚度能达到的最大增益几乎一致, 考虑到薄片激光放大系统通常采用高功率泵浦和水冷冷却, 应选用较厚的晶体以满足晶体结构强度的需求, 同时晶体过厚会对散热造成不利影响。因此, 综合考虑到晶体的结构强度和散热难度, 在泵浦功率密度为 15 kW/cm^2 、泵浦脉宽为 $600 \mu\text{s}$ 的泵浦条件下, 选择厚度为 6 mm 的 Yb:CNGG 晶体作为激光放大系统的增益介质。根据图 2(a) 所示的 6 mm 晶体厚度下单程增益倍数随晶体掺杂原子分数的变化曲线, 选取 1.2% 的掺杂原子分数使系统的单程增益达到最大。因此, 在泵浦功率密度为 15 kW/cm^2 、泵浦脉宽为 $600 \mu\text{s}$ 的泵浦条件下, 应选择厚度为 6 mm、掺杂原子分数为 1.2% 的 Yb:CNGG 晶体作为激光放大系统的增益介质。

2 实 验

为了验证上述放大模型的准确性, 构建了原理图如图 3 所示的 Yb:CNGG 双程激光放大器, 测量了双程放大系统增益倍数随泵浦功率密度的变化趋势, 对放大模型得到的激光输出特性进行了实验验证。

采用光纤激光器作为种子源, 以 20 Hz 的重复频率, 在 1028 nm 处产生脉宽 5 ns、单脉冲能量 5 nJ、光束口径 1 mm 的脉冲光。采用 1.8% 掺杂的 Yb:CNGG 晶体作为增益介质, 厚度为 4.3 mm, 横向尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。激光入射和出射的晶体前表面镀有 940 nm 的高反膜和 1028 nm 的增透膜, 晶体后表面镀有 940 nm 的增透膜和 1028 nm 的高反膜, 增透膜的透过率与高反膜的反射率均为 0.99。晶体后表面为产热最高的面, 使其与冷却水直接接触, 实现晶体的高效散热。采用激光二极管阵列泵浦 Yb:CNGG 有源反射镜, 泵浦波长为 940 nm, 泵浦脉宽为 $600 \mu\text{s}$, 泵浦峰值功率密度为 15 kW/cm^2 。泵浦光经过冷却水后入射晶体, 未被晶体吸收的泵浦光被晶体前表面的 940 nm 高反膜反射后再次经过晶体形成双通泵浦。

将种子光以布儒斯特角入射双程放大系统, 经过晶体后表面 1028 nm 高反膜的反射后出射晶体完成单程放大, 随后被放大的种子光经过外部反射镜的反射再次以相同的方式经过晶体, 完成双程放大。

图 4 展示了重复频率 20 Hz 时, 不同泵浦功率密度下 Yb:CNGG 双程放大器增益倍数的理论曲线和实验结果。从图 4 中实验数据可以看出, 随着泵浦功率密度的增加, 放大器对种子光的增益逐渐增大, 在 15 kW/cm^2 的泵浦功率密度下达到最大放大倍数 1.53。同时根据图中曲线可知, 仿真结果与实验结果吻合较好, 理论建模结果合理, 因此可将该模型扩展至类似结构的的多程有源反射镜放大系统。

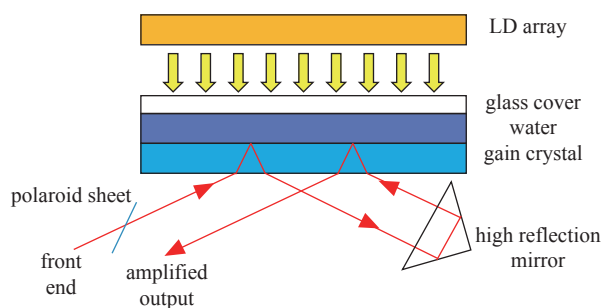


Fig. 3 Schematic diagram of the two-pass laser amplification system

图 3 双程激光放大系统示意图

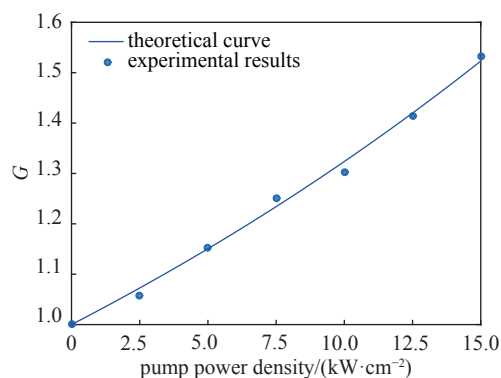


Fig. 4 Theoretical curves and experimental results of gain multiple changing with pump power density

图 4 增益倍数随泵浦功率密度变化的理论曲线及实验结果

3 Yb:CNGG 晶体在多程放大系统中的优势

为对 Yb:CNGG 晶体的多程增益能力进行分析, 本文以 Brendan 等人给出的 Yb:YAG 多程放大模型^[8]为例, 分别将相同晶体参数的 Yb:YAG 晶体和 Yb:CNGG 晶体作为增益介质, 进行多程放大模拟并对比结果。多程放大构型如图 5 所示。系统采用两级放大, 第一级放大为四程放大, 采用 LD 端面泵浦的方式, 使用两个泵浦波长 940 nm、峰值功率 5 kW、脉宽 $450 \mu\text{s}$ 的 LD 作为泵浦源, 泵浦光束直径为 4 mm, 采用厚度 5 mm、掺杂原子分数 2% 的晶体作为增益介质。第二级放大为双程放大, 采用 LD 端面泵浦的方式, 使用泵浦波长 940 nm、峰值功率 12 kW、脉宽

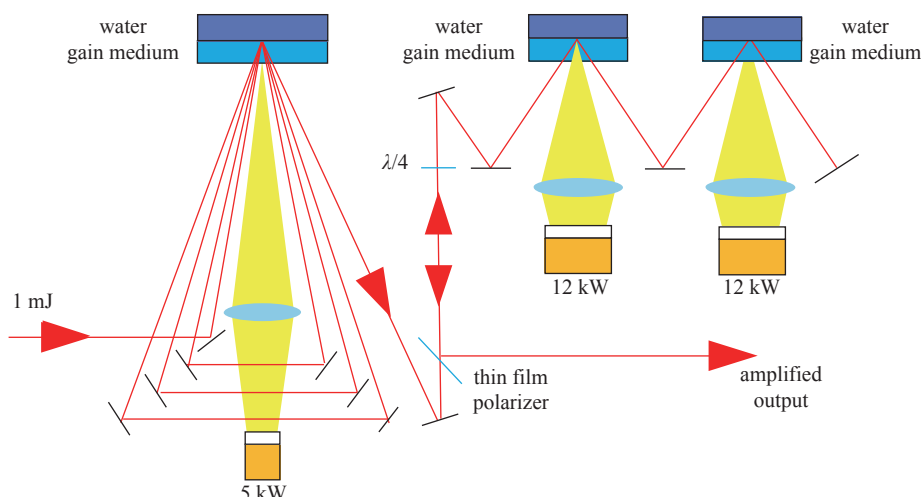


Fig. 5 Schematic diagram of the multi-pass laser amplification system

图5 多程激光放大系统示意图

500 μs 的 LD 作为泵浦源, 泵浦光束直径为 16 mm, 采用两片厚度 2 mm、掺杂原子分数 3% 的晶体作为增益介质。晶体的高反面与高速流动的冷却水直接接触, 降低高功率泵浦引起的温升。

初始能量 1 mJ 的脉冲种子光在反射镜的反射下经过第一级放大器的有源反射镜四次, 种子光通过薄膜偏振片后被注入第二级放大器, 并通过每个有源反射镜两次。在两次通过四分之一波片后, 种子光沿反向路径出射放大器并被薄膜偏振片反射得到输出光束。

分别使用相同参数的 Yb:YAG 和 Yb:CNGG 作为增益介质, 对上述多程激光放大系统进行模拟, 得到了两种晶体作为增益介质时, 多程放大器输出能量随输入能量的变化趋势, 如图 6 所示。采用 Yb:YAG 作为增益介质时, 当输入脉冲能量为 1 mJ 时, 前四程和后两程的泵浦吸收效率分别为 87.6% 和 71.5%, 多程放大系统输出能量为 1.41 J。采用 Yb:CNGG 作为增益介质时, 当输入脉冲能量为 1 mJ 时, 前四程和后两程的泵浦吸收效率分别达到 97.8% 和 90.1%, 多程放大系统输出能量为 2.11 J。

仿真结果表明, 在相同的晶体参数和泵浦条件下, 相较于 Yb:YAG 晶体, Yb:CNGG 晶体可以达到更高的吸收效率和输出能量。Yb:CNGG 晶体较大的吸收截面增强了其泵浦吸收能力, 使晶体可以在相同的泵浦条件下吸收更多的泵浦能量, 提高晶体的吸收效率以实现更高的储能密度, 同时, Yb:CNGG 晶体较大的发射截面使其具有较低的饱和通量密度, 系统更容易工作在饱和状态下, 晶体内的高储能更容易被信号光提取。较大的储能密度和较小的饱和通量密度使 Yb:CNGG 晶体可以在相同的晶体参数和泵浦条件下获得比 Yb:YAG 晶体更高的增益倍数, 最终实现更高的能量输出。

Yb:CNGG 晶体高储能密度的特性降低了系统对晶体厚度和泵浦功率密度的要求, 可以有效地减小晶体和泵浦源的体积, 更薄的晶体厚度有利于晶体的散热进而减小对水冷系统的需求, 低饱和和通量密度的特性使信号光可以在更少的程数下提取到相同的能量, 有利于减少多程放大系统的程数。上述特性展现出了 Yb:CNGG 晶体在多程放大领域和高功率激光系统小型化领域的潜力, 为小体积内输出高平均功率、高脉冲能量激光提供了可行性。

4 结论

本文针对三能级的 Yb:CNGG 激光放大器的放大过程进行了理论分析并建立了多程放大模型, 并基于实验泵浦条件对 Yb:CNGG 晶体的储能进行优化, 确定了在泵浦功率密度为 15 kW/cm^2 、泵浦持续时间 600 μs 的泵浦条件下掺杂原子分数为 1.2%、厚度为 6 mm 的晶体最优工作参数。随后搭建了 Yb:CNGG 双程放大器, 在泵浦功率密

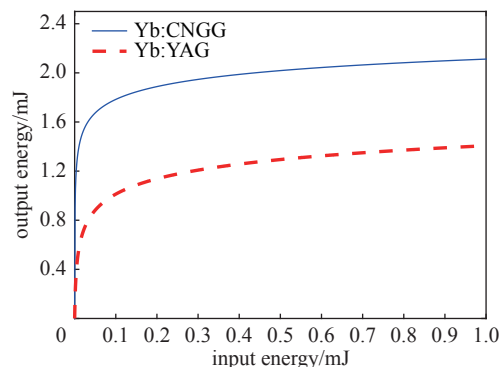


Fig. 6 Relationship between output energy and input energy of multi-pass amplifier when Yb:CNGG or Yb:YAG is used as a gain medium

图6 Yb:CNGG 或 Yb:YAG 作为增益介质时, 多程放大器输出能量随入射能量的变化趋势

度为 15 kW/cm^2 、重复频率为 20 Hz 的二极管泵浦下, Yb:CNGG 双程放大系统得到了 1.53 的增益倍数, 与多程放大模型吻合较好, 验证了多程放大模型的准确性。最后, 对相同晶体参数的 Yb:CNGG 晶体和 Yb:YAG 晶体进行了多程放大模拟, 在相同的晶体参数和泵浦条件下, Yb:CNGG 晶体作为增益介质时, 在入射能量 1 mJ 时可实现 2.11 J 的脉冲能量输出, 优于 Yb:YAG 晶体作为增益介质时 1.41 J 的能量输出, 证明了 Yb:CNGG 晶体在多程放大领域的潜力, 为高平均功率、高脉冲能量激光的小型化提供了可行性。

参考文献:

- [1] Liu Jie, Duan Yanmin, Li Zhihong, et al. Recent progress in nonlinear frequency conversion of optical vortex lasers[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 865029.
- [2] Zeng Huangjun, Lin Zhanglang, Xue Wenzhe, et al. SESAM mode-locked Yb: $\text{Ca}_3\text{Gd}_2(\text{BO}_3)_4$ femtosecond laser [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11: 9464.
- [3] Bogdanovich M, Grigor'ev A, Dudikov V, et al. Pulsed high-repetition rate diode-pumped Nd: YAG laser source with advanced ring Q-switch modulator[J]. *Results in Optics*, 2021, 3: 100077.
- [4] Stjernström M, Laurell F, Brismar H. Diode-pumped solid state laser light sources for confocal laser scanning fluorescence microscopy[J]. *Journal of Laser Applications*, 2008, 20(3): 160-164.
- [5] Bayramian A, Armstrong P, Ault E, et al. The mercury project: a high average power, gas-cooled laser for inertial fusion energy development[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 52(3): 383-387.
- [6] Albach D, Arzakantsyan M, Bourdet G, et al. Current status of the LUCIA laser system[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244: 032015.
- [7] Banerjee S, Ertel K, Mason P, et al. DiPOLE: A multi-slab cryogenic diode pumped Yb: YAG amplifier[C]//Proceedings of SPIE Volume 8780, High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology; and Research Using Extreme Light: Entering New Frontiers with Petawatt-Class Lasers. , 2017: 878006.
- [8] Liu Tinghao, Sui Zhan, Chen Lin, et al. 12 J, 10 Hz diode-pumped Nd: YAG distributed active mirror amplifier chain with ASE suppression[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21981-21992.
- [9] Liu Tinghao, Feng Tao, Sui Zhan, et al. 50 mm-aperture Nd: LuAG ceramic nanosecond laser amplifier producing 10 J at 10 Hz[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15595-15603.
- [10] Reagan B A, Baumgarten C, Jankowska E, et al. Scaling diode-pumped, high energy picosecond lasers to kilowatt average powers[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e11.
- [11] Zhang Huaijin, Liu Junhai, Wang Jiyang, et al. Spectroscopic properties and continuous-wave laser operation of a new disordered crystal: Yb-doped CNGG[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9464-9469.
- [12] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. New York, NY: Springer, 2002.
- [13] 於海武, 徐美健, 段文涛, 等. Yb离子抽运动力学及脉冲储能特性研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(7): 4158-4168. (Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao, et al. Investigation on pumping dynamics and pulsed energy storage performance of Yb ions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(7): 4158-4168)
- [14] Bourdet G L. Theoretical investigation of quasi-three-level longitudinally pumped continuous wave lasers[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 966-971.