

文章编号:1001-5078(2024)12-1822-05

· 激光器技术 ·

LD 侧面泵浦 Nd : YAG 激光器的增益场均匀性研究

俞嘉威^{1,2}, 李 研³, 谢 雪^{1,2}, 马嘉声^{1,2}, 于永吉^{1,2}, 金光勇^{1,2}, 王 超^{1,2}

(1. 长春理工大学 重庆研究院, 重庆 401135; 2. 长春理工大学 物理学院 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022;
3. 武汉光谷航天三江激光产业技术研究院有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 为了获得更好的光束质量的输出, 对二极管侧面泵浦激光器内增益分布均匀性进行研究; 通过对工作物质内增益分布进行理论分析, 利用仿真软件建立增益场模型, 研究了 LD 单侧泵浦 Nd : YAG 激光器增益场模型; 模拟中通过对不同泵浦功率下的 LD 单侧泵浦 Nd : YAG 激光器增益场与吸收光场均匀性进行对比, 结果得到了不同泵浦功率下增益场分布均匀性与吸收光场均匀性分布并不一致, 并不是简单直观等效为线性关系, 为高低温环境下即开即用的 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 固体激光器获得高光束质量、高效率的激光输出提供理论参考提供理论参考。

关键词: 侧面泵浦; Nd : YAG; 增益场; 均匀性

中图分类号: O437; TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.003

Study on gain field uniformity of LD side-pumped Nd : YAG laser

YU Jia-wei^{1,2}, LI Yan³, XIE Xue^{1,2}, MA Jia-sheng^{1,2}, YU Yong-ji^{1,2}, JIN Guang-yong^{1,2}, WANG Chao^{1,2}

(1. Chongqing Research Institute, Changchun University of Science and Technology, Chongqing 401135, China;

2. Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application,

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. Wuhan Optics Valley Space Sanjiang Laser Industry Technology Research Institute CO., Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to obtain better beam quality output, the gain distribution uniformity in diode side-pumped laser is studied. The gain field model of LD single-side pumped Nd : YAG laser is established by using simulation software through theoretical analysis of the gain distribution in the working substance. In the simulation, the uniformity of gain field and absorbed light field of LD single-side pumped Nd : YAG laser under different pumping power is compared. The result shows that the distribution uniformity of gain field and absorbed light field under different pumping power is not consistent, which is not a simple and intuitive equivalent linear relationship. Theoretical reference is provided for the high beam quality and high efficiency laser output of out-of-the-box LD side-pumped Nd : YAG solid-state laser in high and low temperature environment.

Keywords: side pump; Nd : YAG; gain field; uniform

1 引言

随着激光二极管技术的不断提高, 二极管泵浦固

体激光器具有结构紧凑、稳定性高、光束质量高的特点, 在激光加工、激光测距、精确制导武器等领域有着

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. U20A20214; No. 62275031; No. 11974060); 重庆市自然科学基金项目 (No. CSTB2022NSCQ-MSX1027); 吉林省教育厅科学技术研究项目 (No. JJKH20230797CY); 吉林省自然科学基金项目 (No. 20210101154JC; No. 20240101304JC) 资助。

作者简介: 俞嘉威 (1998 -), 男, 硕士研究生, 主要从事无水冷全固态激光器方面的研究。E-mail: yujiawei0010@163.com

通讯作者: 王 超 (1980 -), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光与物质相互作用与全固态激光器方面研究。

E-mail: wangchaoopt@163.com

收稿日期: 2024-03-26

广泛的应用^[1-4]。在二极管泵浦固体激光器中,工作物质内的增益分布均匀性对激光器的转化效率和光束质量有着至关重要的影响,在激光二极管侧面泵浦固体激光器中,工作物质内这种增益分布的不均匀性更加明显,因此通过对工作物质内增益分布进行细致的研究,能对激光二极管侧面泵浦条件下激光器的泵浦结构进行优化设计,为获得高光束质量、高效率的激光输出^[5]有重要指导意义。

2003年,华北光电研究所赵鸿等人^[6],对二极管侧面抽运条件下工作物质的增益分布特性进行研究,并对激光二极管输出端与工作物质间的距离、激光二极管的发散角、工作物质的半径、吸收系数等参量进行研究。结论表明增益分布只与二极管抽运结构参量和工作物质的吸收系数有关,而与抽运功率无关;2007年,华北光电技术研究所李强等人^[7],对LD泵浦固体激光介质内增益分布与输出特性进行研究,对增益分布的模拟依据工作介质内部各处吸收的泵浦功率与增益强度成正比进行模拟。2008年,西安应用光学研究所张彪等人^[8],对高功率LD阵列侧面泵浦激光晶体的增益分布进行研究,对增益分布模拟的理论为:由于增益介质的增益与泵浦光的吸收成比例,通过模拟泵浦光场的分布来分析增益介质的增益分布。2012年,长春理工大学周焯等人^[9],对Nd:YAG晶体内部纵向增益分布进行模拟,其模拟增益分布的理论也是利用增益与泵浦功率成正比为理论依据进行模拟。2015年上海光机所吴永忠等^[10]对工作物质内增益场进行研究,对吸收系数、晶体尺寸等影响因素下的增益分布场通过实验测量,表明这些都是影响增益分布均匀性的因素,但对泵浦功率的影响并未做出深入研究。2020年,哈尔滨工业大学徐浩博等人^[11],设计出新型的环状测泵模块并对增益场分布进行模拟,但就增益分布模型的建立仍是在吸收光场的分布模型基础上等效为增益分布模型。工作物质内的增益分布的模拟均是通过利用工作物质内部各处吸收的泵浦功率与增益强度成线性关系,得到了工作物质内部的增益分布情况,也就是说可以利用吸收光场的分布模拟来代替增益分布。

本文将对工作物质内的增益分布进行深入研究,对比吸收光场与增益场的均匀分布情况,分析工作物质内增益分布的具体情况,建立LD侧面泵浦Nd:YAG激光器的增益分布数值模型,计算LD侧

面泵浦Nd:YAG激光器的增益分布情况,分析了不同泵浦功率的增益场均匀性的影响。

2 增益场模型建立

首先从侧面泵浦模型出发,研究LD侧面泵浦的吸收光场数值模型建立的过程,以此为基础,建立侧面泵浦晶体的增益场分布。

前人已经对LD侧面泵浦的吸收光场数值模型的建立及分析做过详尽的基础^[12],可直接选取模拟所用的晶体半径以及泵浦距离,因为激光的输出质量始于工作物质内增益分布息息相关,而吸收光场并不代表着增益场的分布,但增益场可直接影响激光器的输出光束质量。对于增益场数学模型的搭建我们可以利用激光增益与上能级反转粒子数之间的联系开展研究。

在传统四能级系统中,激光速率方程为:

$$\frac{dN(x,y,z)}{dt} = Rr(x,y,z) - \frac{N(x,y,z)}{\tau} - cN(x,y,z)\sigma Ss_0(x,y,z) \quad (1)$$

当泵浦功率高于阈值,并且封堵住光束或者取下谐振腔镜片以阻止激光作用时,此时速率方程应为:

$$\frac{dN(x,y,z)}{dt} = Rr(x,y,z) - \frac{N(x,y,z)}{\tau} \quad (2)$$

式中, N 表示反转粒子数; c 表示光在真空中的速度; σ 为受激发射截面; S 表示腔内光子数; τ 表示四能级系统的能级寿命; $r(x,y,z)$ 表示归一化的泵浦速率的空间分布; $s_0(x,y,z)$ 表示归一化腔内光子数的空间分布; R 为泵浦速率,表示工作物质在单位时间内吸收泵浦光后激发到上能级的反转粒子数分别为生物组织的吸收系数和约化散射系数,为:

$$R = \frac{\eta_p P_{\text{abs}}}{h_p} \quad (3)$$

$$P_{\text{abs}} = \eta_a P_{\text{in}} \quad (4)$$

其中, η_p 为量子效率; P_{in} 为泵浦功率; η_a 为工作物质的吸收效率。并且激光的增益与反转粒子的关系为:

$$g = \sigma N \quad (5)$$

通过增益系数的计算公式可以看出,增益系数的变化会随着反转粒子数的增大出现指数性的增长,当反转例子数趋于饱和状态时,增益系数也会达到饱和状态,并且会呈现波动性的变化。

利用上述理论,以吸收光场模型为基础,在各基本坐标单元上的基础上对光功率进行下一步运算,

由速率方程联立计算出增益系数,最终完成增益场的搭建。得到工作物质内部的增益分布情况。

3 计算结果及实验分析

3.1 不同泵浦功率下吸收光场与增益场分布模拟研究

在保持其他模拟参数恒定的情况下,通过控制变量法,设定泵浦功率为变量,进而对不同泵浦功率下的吸收光场分布与增益场分布进行模拟研究,不同泵浦功率下的吸收光场与增益场模拟参数如下表 1、2 所示。

不同泵浦功率时的吸收光场分布与增益场分布模拟如图 1 所示。

表 1 不同泵浦功率下吸收光场模拟参数

Tab. 1 Simulation parameters of absorption field under different pump power

Simulation parameters	value
Crystal radius R / mm	2
Refractive index of crystal n	1.86
temperature/ $^{\circ}\text{C}$	20
Crystal doping concentration/%	1
Crystal absorption coefficient α	5.85
LD divergence Angle θ / ($^{\circ}$)	20
Pumping power/W	50, 90, 150

表 2 不同泵浦功率下增益场模拟参数

Tab. 2 Simulation parameters of gain field under different pump power

Simulation parameters	value
Crystal radius R / mm	2
Refractive index of crystal n	1.86
temperature/ $^{\circ}\text{C}$	20
Crystal doping concentration/%	1
Crystal absorption coefficient α	5.85
LD divergence Angle θ / ($^{\circ}$)	20
Pump pulse width/ μs	200
Pumping power/W	50, 90, 150

从图 1 可以对比看出,在其他条件相同时,当泵浦时间一定,随着泵浦功率的增大,由吸收光场的三维对比图可以看出,根据增益分布与泵浦功率成线性关系可等效的将吸收光场看为增益分布,模拟结果可以看出工作物质内的增益分布强度与泵浦功率的大小无关,泵浦功率的大小只会影响增益的绝对大小而不影响其内部的分布的均匀性;而由增益场的对比图可以看出,增益分布的均匀性并不会随着泵浦功率增大而变的均匀,当泵浦功率越低增益分布中的强点值越低。随着泵浦功率的增大,强点值也越高,增益场分布强点值越高。由图可看出当泵浦功率较低时增益分布越均匀,‘高峰’与‘凹陷处’的差值较小,增益场分布更均匀。

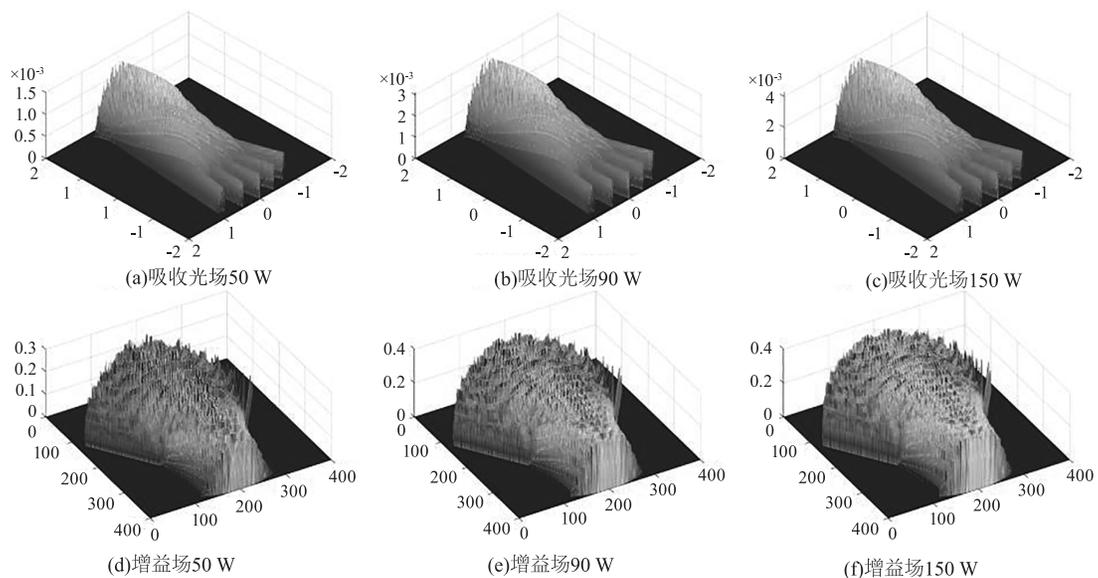


图 1 不同泵浦功率下吸收光场与增益场分布对比图

Fig. 1 Comparison of distribution of absorption field and gain field under different pump power

所以前人对增益场的描述仅仅只是将吸收光场等效为增益场,没有对增益场进行深入研究,所作出的总结也是吸收光场所得到的结论;但是通过对吸

收光场进行进一步的增益研究之后,可看出增益场并不是简单的吸收光场的等效,而是与吸收光场完全不同的变化。

3.2 不同泵浦功率下增益场实验研究

不同泵浦功率下增益场测量实验采用 OPHIR Spiricon 公司的 SP3054U 光束质量分析仪,采用掺杂浓度为 1 at. % 的圆棒状 Nd:YAG 晶体,其尺寸为 $\phi 4 \times 50$ mm,泵浦模块直接泵浦晶体,放置于晶体的侧面,有效的缩短距离。在增益场实验装置搭建完成后,微调光束质量分析仪位置,通过 Beam-Gage 软件观察图像,直至获得最清晰完整的晶体增益分布,以对晶体增益场进行测量。为了获得清晰成像在光束质量分析仪前一倍焦距处放置直径为 10 mm,焦距为 50 mm 的聚焦透镜 f ,同时防止因为能量太强而损害到光束质量分析仪,在光束质量分析仪前加上了衰减片。不同泵浦功率下增益场测量装置示意图如图 2 所示。

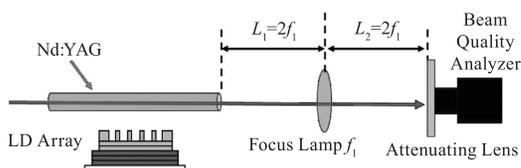


图 2 不同泵浦功率下增益场测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gain field measurement device under different pump power

50 ~ 150 A 时不同泵浦功率下晶体增益分布测量结果如下图 3 所示。能够发现,晶体的中心存在两个强点,泵浦分布明显不均匀。随着泵浦能量的增加,晶体的增益分布呈现了‘强者恒强’的趋势,晶体左右两个强点增益不断增加,分析左侧强点为晶体侧面打毛处理对泵浦光线的漫反射作用导致的结果,在上述的模拟中未能考虑到这一点。对图像的分析发现随着泵浦能量的增加,晶体中心泵浦区域不断收窄,泵浦均匀性并没有随着能量的增加而更加均匀,反而加剧了晶体增益分布的不均匀性,晶体中增益强区不断加强,而增益暗区的提升并不明显,增益‘高峰’与‘凹陷处’的差值越大,增益场分布更不均匀。

3.3 不同泵浦功率下激光光斑实验研究

LD 阵列单侧泵浦 YAG 传导冷却激光器实验装置示意图及实验装置实物图如图 4、5 所示。选用双凹腔结构,全反镜曲率半径为 2000 mm,镀有 1064 nm 高反射率膜,输出镜曲率半径为 5000 mm,在通光面镀有 1064 nm 波长的高透膜,透过率为 20 %。来实现能量的稳定输出。激光器腔长为 150 mm,对激光近场光斑采用束质量分析仪直接测量法进行了测量,在出光口处 50 mm 处放置光束质量分析仪与

计算机连接,使用配套软件读取数据。

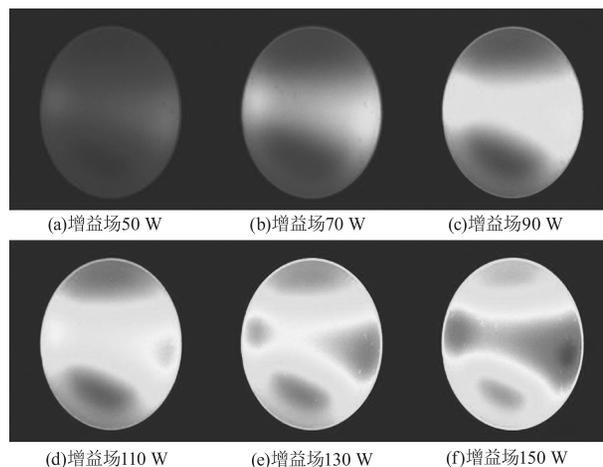


图 3 不同泵浦功率下增益场分布对比测量图

Fig. 3 Comparative measurement of gain field distribution at different pump power

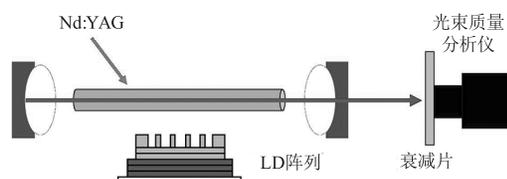


图 4 不同泵浦功率下光斑测量装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of light spot measuring device under different pump power

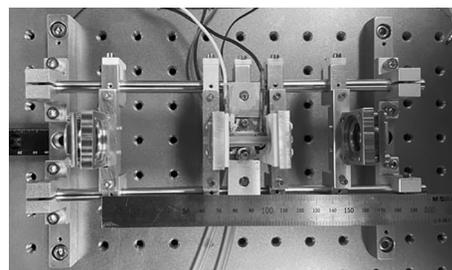
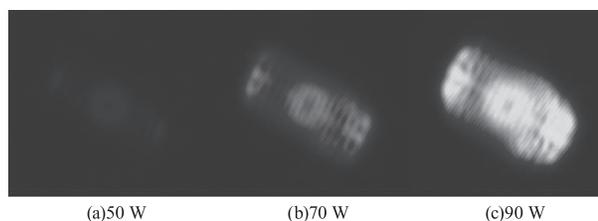


图 5 不同泵浦功率下光斑测量装置实物图

Fig. 5 Actual picture of light spot measuring device under different pump power

对不同泵浦电流下的激光输出光斑进行测量,50 ~ 150 A 时的激光输出光斑图如下图 6 所示,激光光斑能量分布与晶体的增益分布遥相呼应,此时的激光光斑呈现长条椭圆状,光斑能量分布不均、上下两侧有强点,未能实现圆形光斑输出。



(a)50 W

(b)70 W

(c)90 W

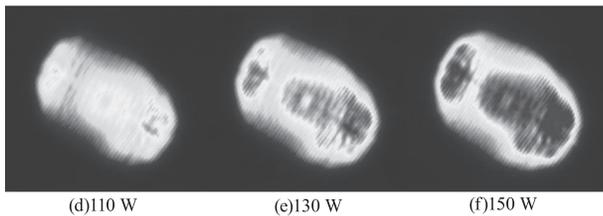


图6 不同泵浦功率下光斑分布对比测量图

Fig. 6 Comparison and measurement of light spot distribution under different pump power

4 结 论

本文通过建立 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 激光器晶体增益场分布模型,模拟计算了不同泵浦功率条件下增益场均匀性的分布,通过对吸收光场和增益场均匀性的对比研究,得到增益场与吸收光场的均匀性有着很大的区别,增益场在低泵浦功率时,增益场强度与泵浦功率呈线性关系;但是随着泵浦功率的增大,增益场强度随着泵浦功率增大不在保持线性关系,随着泵浦功率的增大,增益场分布越均匀,且当增益逐渐趋于饱和后,增益分布均匀性会随着泵浦功率的增大会出现在小范围内的不规则变化。研究增益场的均匀性为满足宽温度范围即开即用的激光器获得高光束质量、高效率的激光输出做出重要指导意义。

参考文献:

- [1] Chen Lin, Hou Xia, Lu Yutian. Analog calculation and evaluation of LDA direct side-pumping [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 825. (in Chinese)
 谌霖, 侯霞, 陆雨田. 激光二极管阵列侧面直接抽运方式的模拟计算和效果评估 [J]. 光学学报, 2002, 22(7): 825.
- [2] Xu Jinlong, Guo Jun. Gain distribution characteristics of laser emitting diode (LD) side pump Nd : YAG [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science Edition, 2007(8): 15 - 20. (in Chinese)
 徐金龙, 郭军. 激光二极管侧面泵浦 Nd : YAG 的增益分布特性 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2007(8): 15 - 20.
- [3] Wei Yonghui, Wang Shiyu, Guo Zhen, et al. Efficiency loss induced by non-uniform gain distribution in high power solid state lasers [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(4): 542. (in Chinese)
 位永辉, 王石语, 过振, 等. 高功率固体激光器增益非均匀分布引起的效能亏损效应研究 [J]. 应用光学, 2019, 40(4): 542.
- [4] Jie Mao, Chao Wang, Tixiang Hong, Yongji Yu. Three-nanosecond-equal interval sub-pulse Nd : YAG laser with multi-step active Q-switching [J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(7): 071404.
- [5] Mengmeng Lee, Tingting Yang, Chao Wang, et al. Long pulse millisecond pumped high-average-power linearly polarized single Nd : YAG rod laser [J]. Optics Communications, 2019, 453: 124370.
- [6] Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wan Jianjun, et al. Gain distribution characteristics in working medium side-pumped by diode bars [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 57. (in Chinese)
 赵鸿, 姜东升, 王建军, 等. 二极管侧面抽运条件下工作物质增益分布特性研究 [J]. 光学学报, 2003, 23(1): 57.
- [7] Li Qiagn, He Lijie, Jin Yujian. Research on the gain distribution in the laser medium and the characteristics of diode-pumped solid state laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(10): 1047 - 1049. (in Chinese)
 李强, 何利杰, 金煜坚. LD 泵浦固体激光介质内增益分布与输出特性研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37(10): 1047 - 1049.
- [8] Zhang Biao, Yang Aifen, Yang Zhaojin, et al. Study of the pump uniformity of the solid state laser rods side-pumped by laser diode [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9): 883 - 886. (in Chinese)
 张彪, 杨爱粉, 杨照金, 等. 高功率 LD 阵列侧面泵浦激光晶体的增益分布研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 883 - 886.
- [9] Zhou Huang, Wang Xiaohua, Wang Fei, et al. The longitudinal gain distribution simulated in LD end-pumped Nd : YAG crystal [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 35(1): 6 - 8, 12. (in Chinese)
 周煌, 王晓华, 王菲, 等. LD 端面泵浦 Nd : YAG 晶体内部纵向增益分布模拟 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2012, 35(1): 6 - 8, 12.
- [10] Ming Yin, Guoying Feng, Shutong Wang, et al. Spatial and temporal distribution of Q-switched laser pulses in multi-mode regimes [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(12): 121405.
- [11] Wentao Wu, Xudong Li, Rempeng Yan, et al. Low heat-effect side-pumping gain module with evenly Gaussian to flat-top fluorescence distribution [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106203.
- [12] Li Yao, Li Yang, Wang Chao. Absorption light field of side-pumped Nd : YAG crystal in LD planar arrays [J]. Chinese Optics, 2018, 11(2): 206. (in Chinese)
 李耀, 李阳, 王超. LD 面阵侧面泵浦 Nd : YAG 晶体吸收光场研究 [J]. 中国光学, 2018, 11(2): 206.