

# LD 侧泵 Nd:YAG 吸收特性对光束均匀性的影响

王钰翔, 王思博, 韩昌昊, 方 聪, 魏 磊, 郭 赞, 王克强  
(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

**摘要:**为实现均匀的激光输出,对吸收光场、增益场以及输出激光进行均匀性研究;本文从 Nd:YAG 的吸收特性出发,通过晶体棒掺杂浓度以及温度两个方面改变吸收系数。仿真方面使用 ZEMAX 软件建立了 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 晶体棒的吸收光场模型,模拟不同吸收系数下的吸收光场强度分布,对比分析了吸收系数对吸收光场分布的影响规律;实验方面测量不同吸收系数下晶体棒的增益分布对比验证仿真结果,并对输出激光的光束均匀性进行研究;结果得到了吸收系数与吸收光场、增益场以及输出激光均匀性之间的关系,随吸收系数增大中心强度逐渐下降,为实现高均匀性的大能量激光输出提供参考。

**关键词:**激光器;固体激光;Nd:YAG;吸收系数;增益分布;光束均匀性

**中图分类号:** TN243; TN248 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.006

## Influence of absorption characteristics of LD side-pumped Nd:YAG on beam uniformity

WANG Yu-xiang, WANG Si-bo, HAN Chang-hao, FANG Cong, WEI Lei, GUO Zan, WANG Ke-qiang  
(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

**Abstract:** To achieve uniform laser output, a uniformity study of the absorbed light field, the gain distribution, and the output beam uniformity is conducted in this paper. Based on the absorption characteristics of Nd:YAG, the absorption coefficient is modified by varying the doping concentration and temperature of the crystal rod. In terms of simulation, ZEMAX software is employed to model the absorbed light field in an LD side pumped Nd:YAG crystal rod. The intensity distribution of the absorption light field under different absorption coefficients is simulated, and the influence of this coefficient on the absorption light field distribution is comparatively analyzed. In terms of experiment, the gain distribution of crystal rods under different absorption coefficients is measured to validate the simulation results, and the uniformity of the output laser beam is also studied. The relationship between the absorption coefficient and the uniformity of the absorption light field, the gain distribution, and the output laser beam is obtained. It is found that as the absorption coefficient increases, the central intensity gradually decreases, providing a reference for achieving high-uniformity, high-energy laser output.

**Keywords:** laser; solid state laser; Nd:YAG; absorption coefficient; gain distribution; beam uniformity

### 1 引言

二极管侧面泵浦固体激光器单脉冲能量大、峰值功率高,在激光通讯、激光微加工、武器制导、激光卫星测距等领域都拥有着重要的应用<sup>[1-4]</sup>。在众多应用领域中,高均匀性的输出激光是实现高质量、高精度、高重复性激光应用的重要前提。在二极管泵浦固体激光器中,工作物质内泵浦光分布的均匀性

对输出激光的光束均匀性有着重要的影响<sup>[5]</sup>。为获取均匀的泵浦光分布,改变工作物质的吸收系数是一种重要的手段。研究工作物质的吸收特性,能够优化设计泵浦模块的吸收光场分布,对获取高光束均匀性的激光输出具有参考价值<sup>[6]</sup>。

2003 年,华北光电技术研究所赵鸿等人<sup>[7]</sup>采用计算机模拟的方式对二极管侧面泵浦条件下工作物

质的增益分布特性进行了研究,讨论了各参量对增益分布特性的影响。研究表明工作物质的增益分布特性与激光二极管的个数、分布方式、发散角以及工作物质的半径、吸收系数等参量有关;2008年,西安应用光学研究所张彪等人<sup>[8]</sup>对 LD 侧面泵浦激光晶体的增益分布进行研究,模拟了在 LD 侧面半环形泵浦增益介质时 LD 束腰半径、增益介质吸收系数等参数对泵浦光分布的影响;2014年,河北半导体研究所闫立华等人<sup>[9]</sup>对半导体侧面泵浦模块进行研究,建立了增益介质吸收光场分布模型,对吸收光场的均匀性进行了研究;2020年,哈尔滨工业大学武文涛等人<sup>[10]</sup>在 LD 侧泵模块吸收光场的分布模型基础上对增益场进行强度分布模拟,得到了工作物质内部的增益分布情况,并通过改变侧泵模块内部结构设计出新型的环状侧泵模块,有效改善了侧泵模块增益分布的均匀性;2024年,长春理工大学俞嘉威等人<sup>[11]</sup>对 LD 侧面泵浦的增益场均匀性进行研究,分析了在不同泵浦功率下吸收光场与增益场之间均匀性的关系。

梳理目前已有的均匀性方面的研究,大多集中于吸收光场与增益场的关系方面,而缺乏对最终的输出激光光束均匀性的研究。本文从增益介质的吸收特性出发,建立了 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 晶体棒的吸收光场模型,并对激光器输出激光的光束均匀性进行研究,分析增益介质吸收特性对激光光束均匀性的影响。

## 2 理论基础

增益介质的吸收系数是表征光在增益介质中传播时被吸收特性的物理量,反映了单位距离内光被吸收的程度,其数学表达式为:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (1)$$

其中,  $I(z)$  是传播距离  $z$  后的光强;  $I_0$  是初始光强;  $\alpha$  是吸收系数。吸收系数对吸收光场的分布起到决定性的作用,对输出激光的强度分布有着重要影响。

在跃迁过程中,吸收系数由吸收截面和低能级粒子数密度决定,可表示为:

$$\alpha_{\text{abs}} = \sigma_{\text{abs}} N_1 \quad (2)$$

其中,  $\sigma_{\text{abs}}$  为吸收截面;  $N_1$  为低能级粒子数密度。吸收截面  $\sigma_{\text{abs}}$  受到吸收光子波长的显著影响,当光子能量  $h\nu$  严格匹配能级差  $E_2 - E_1$  时,  $\sigma_{\text{abs}}$  达到峰值。低能级粒子数密度  $N_1$  则受到增益介质掺杂浓度的影响,在低掺杂浓度条件下呈线性关系。

在 LD 侧面泵浦的 Nd:YAG 激光器中,可以通过改变温度条件从而影响 LD 发射的泵浦光波长,改变增益

介质的吸收系数;也可以通过改变增益介质的掺杂浓度影响粒子数密度从而改变增益介质的吸收系数。

## 3 吸收光场模型建立

为探究增益介质吸收特性对吸收光场的影响,需要建立侧面泵浦模块的模型。在典型的侧泵模块中,LD 阵列沿圆周分布环绕在晶体棒外侧,该阵列由数个二极管 bar 条组成。LD 阵列提供泵浦光,晶体棒吸收泵浦光获得增益。在泵浦未达到饱和时,泵浦功率在晶体中的吸收程度可以描述为:

$$A_d = 1 - \exp(-\alpha L) \quad (3)$$

式中  $A_d$  为泵浦光通过长度为  $L$  的增益介质被吸收的功率比例;  $\alpha$  为增益介质的吸收系数。

对于单侧面单 LD 泵浦 Nd:YAG 晶体吸收光强表达式为:

$$I(x_i, y_i) = \sqrt{\frac{z}{\pi}} \frac{I_0}{\omega(x_i)} \exp\left\{-2\left[\frac{y^2}{\omega^2(x_i)}\right] - \alpha l_i\right\} \quad (4)$$

其中,  $I_0$  为光束中心沿晶体棒轴向方向上单位长度上的光强;  $\omega(x_i)$  为泵浦光光束半径;  $\alpha$  为晶体吸收系数;  $l_i$  为泵浦光在晶体棒中的传播距离。  $x, y$  满足如下关系:

$$l_i = \sqrt{R^2 - y_i^2} + x_i \quad (5)$$

$$x_i = x \cos(i\theta - \theta) + y \sin(i\theta - \theta) \quad (6)$$

$$y_i = y \cos(i\theta - \theta) - x \sin(i\theta - \theta) \quad (7)$$

其中,  $R$  为晶体半径;  $\theta$  为相邻 LD 之间的夹角,  $\theta = 2\pi/N, i = 1, 2, 3 \dots N$ 。则  $N$  个方向的 bar 条侧面泵浦晶体棒任意一点的光强为:

$$I_N(x, y) = I(x_1, y_1) + I(x_2, y_2) + \dots + I(x_N, y_N) \quad (8)$$

基于此模型,模拟了在相同泵浦向数、晶体半径以及泵浦距离的条件下,不同的增益介质吸收系数下吸收光场均匀性的差异,其参数如表 1 所示。

表 1 吸收光场模拟参数

Tab. 1 Absorbed light field simulation parameters

模拟参数	参数数值
晶体半径 R/mm	5
晶体折射率 n	1.86
温度/°C	25
晶体掺杂浓度/%	0.6, 0.8, 1
晶体吸收系数 $\alpha$	8.28, 11.04, 13.8
LD 发散角 $\theta$ /(°)	30
泵浦功率/W	160

在该参数下的吸收光场仿真结果如图 1 所示。

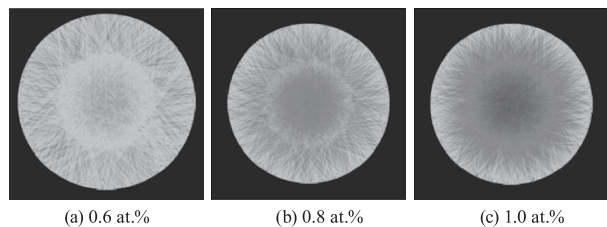


图 1 不同吸收系数下增益介质的吸收光场  
Fig. 1 Absorbed light field of the gain medium under different absorption coefficients

仿真结果显示,在其他条件相同,仅改变掺杂浓度使增益介质吸收系数减小时,吸收光场中心的分布强度呈现由弱到强的趋势,从图中可以看出增益介质的吸收系数对吸收光场的分布具有明显的影响,选取合适的吸收系数有助于提高吸收光场的均匀性。

#### 4 实验研究与结果分析

##### 4.1 不同条件下侧泵模块增益分布研究

侧泵模块发射的荧光能够反映出该模块的增益场分布情况,对不同吸收系数下侧泵模块发射的荧光进行测量,实验装置如图 2 所示,其中,侧泵模块内的增益介质为掺杂浓度分别为 0.6 at. %, 0.8 at. %, 1at. % 的 Nd:YAG 晶体棒,尺寸为  $\phi 10 \text{ mm} \times 142 \text{ mm}$ ; 耦合透镜采用直径为 30 mm,焦距为 250 mm 的正透镜; 荧光光斑经过耦合透镜聚焦于光束质量分析仪,光束质量分析仪前放置衰减片,防止仪器损伤。

测量实验中,泵浦模块中侧面泵浦晶体棒发射荧光,经正透镜缩小成像在光束质量分析仪的探测面上,为避免过曝损害光束质量分析仪,在光路中加入衰减装置衰减荧光光斑能量。实验对比了不同晶体棒掺杂浓度以及不同温度的条件下的增益分布图像,分析晶体吸收特性对增益分布的影响。

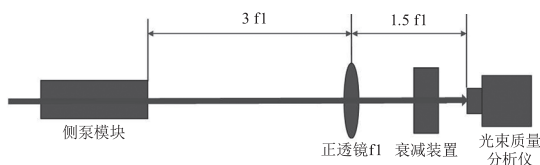


图 2 增益分布测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gain distribution measurement device

在晶体掺杂浓度均为 0.8 at. % 的条件下,不同温度的增益分布图像如图 3 所示。

根据测量结果,晶体棒的增益分布中间强,边缘弱,随温度升高,晶体的增益分布中心强度上升,整体荧光分布的不均匀度增加。

在温度为 25 °C 的条件下,使用不同掺杂浓度的晶体棒得到的增益分布图像如图 4 所示。

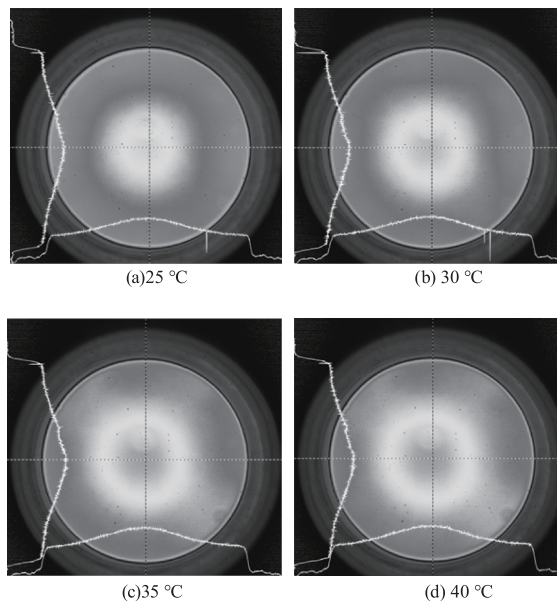


图 3 不同温度下增益分布测量图

Fig. 3 Measurement of gain distribution at different temperatures

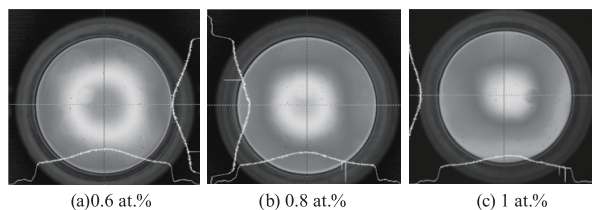


图 4 不同掺杂浓度下增益分布测量图

Fig. 4 Measurement of gain distribution under different doping concentrations

由图 4,随着晶体掺杂浓度的提高,增益分布呈现出中心强度下降的趋势,增益分布更加均匀。

能够看出,无论采用哪种方式改变吸收系数,晶体的增益分布始终随吸收系数减小中心逐渐增强。改变吸收系数得到的增益分布的强度分布变化规律与仿真结果中吸收光场的强度分布变化规律一致,在晶体的吸收系数为某一特定的值时有较好的均匀性,如果吸收系数大于或者小于该特定的值时,将会得到中间弱/强,边缘强/弱的增益分布,不均匀度增加。

##### 4.2 光束均匀性实验

LD 侧泵 Nd:YAG 激光器实验装置如图 5 所示。使用平凸腔结构输出大能量激光,其中,全反镜使用镀有 1064 nm 高反射率膜层的平-平镜,输出耦合镜采用变反射率的 VRM 镜,曲率半径  $R = \pm 1500 \text{ mm}$ ,透过率  $T = 70 \%$ 。激光器采用双棒串接的结构,并在其中插入 90 °石英转镜以减小热致双折射效应,并分别在两侧泵模块前加入曲率为  $R = -1800 \text{ mm}$  的负透镜以补偿模块产生的热透镜效应。激光器总腔长为 700 mm,输出的近场激光光斑由光束质量分析仪进行测量。为避免大能量激光损坏测量仪器,

实验中使用 45° 反射镜衰减激光能量并在光束质量分析仪前插入衰减片对激光进行二次衰减。衰减后的光斑入射到距出光口 150 mm 处的仪器探测面,使用 beamgage 软件观察测量图像。

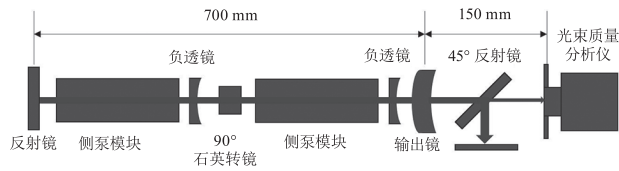


图 5 激光均匀性测量装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser uniformity measuring device

实验中,泵浦电流为 50 A,频率为 100 Hz,泵浦脉宽为 220 μs,在冷却液初始温度为 25 °C 的条件下,测量不同掺杂浓度的 Nd:YAG 晶体棒输出的近场激光光斑,得到的光斑如图 6 所示。

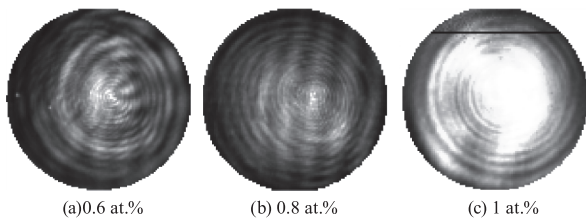


图 6 不同掺杂浓度下激光强度分布测量图

Fig. 6 Measurement of laser intensity distribution under different doping concentrations

根据图 6,光斑整体呈圆形,其中强度分布为强弱相间的环形分布,主要原因为输出镜上镀有高斯膜层,其透过率分布呈圆环状,输出激光强度分布呈圆环状。此外,激光强度分布受晶体棒掺杂浓度影响,随吸收系数的减小中心由弱到强,与测量的增益场强度分布结果一致。

在使用 0.8 at. % 掺杂浓度的 Nd:YAG 晶体棒的条件下,设定不同冷却液温度测量的近场激光光斑如图 7 所示。

由图中可以看出,相较于不同掺杂浓度的强度分布变化,不同温度下激光光斑的强度分布变化较小,从图像上不易直接定性分析光斑强度分布的变化规律,需要对图像进行数据处理后进行定量分析。

### 4.3 实验结果与分析

光束均匀性评价需要能够客观地描述输出激光的均匀性,一个好的评价方法需要反映出光束均匀性的真实信息。本文采用均方根误差  $M_{RMS}$  对测量光斑均匀性进行评价。其定义式如下所示:

$$M_{RMS} = \sqrt{(I_j - \bar{I})^2 / N} \quad (9)$$

式中,  $\bar{I}$  为光斑的能量平均值;  $I_j$  为光斑上任意观点处的能量;  $N$  表示总取样点数;当  $M_{RMS}$  越小,说明

光束均匀性越好。该指标能够客观全面地反映出光斑整体能量分布的均匀性,有效衡量光斑的空间能量波动情况。

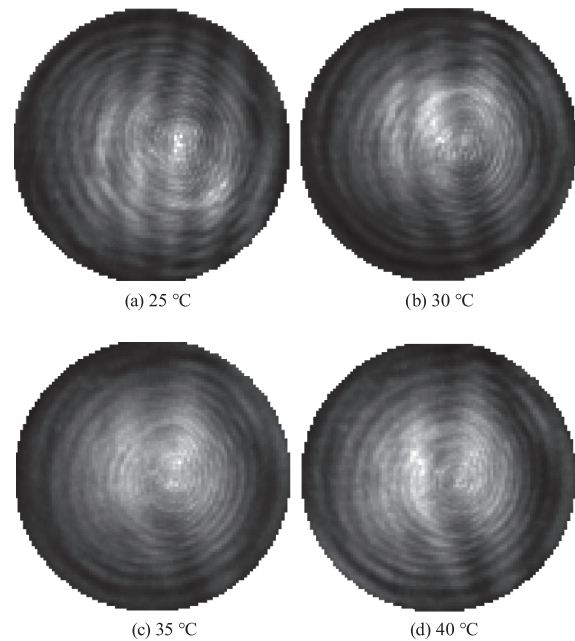


图 7 不同温度下激光强度分布测量图

Fig. 7 Measurement diagram of laser intensity distribution at different temperatures

在对测量到的光斑图像进行数据处理后,得到不同掺杂浓度下的光斑均匀性数据,如表 2 所示。

表 2 25 °C 下不同掺杂浓度的晶体棒输出光斑的均方根误差

Tab. 2  $M_{RMS}$  of output beam spot of crystal rod with different doping concentrations at 25 °C

掺杂浓度/at. %	均方根误差
0.6	0.1843
0.8	0.1727
1	0.2757

从表中可以看出,当掺杂浓度为 0.8 at. % 时,得到的强度分布的均方根误差最小,光束均匀性更好。

对 0.8 at. % 掺杂浓度的 Nd:YAG 晶体棒在不同冷却液温度下的光束均匀性进行数据处理,得到的数据如表 3 所示。

从表中可见,随着温度的升高,输出激光光斑的均方根误差逐渐增加,对应光束均匀性逐渐变差。由强度分布随吸收系数变化规律可知,温度升高吸收系数下降,中心强度分布将会更强;由均匀度变差可知,此时中心强度较强,为获取更为均匀的激光,应结合冷却液温度与掺杂浓度等能够调节增益介质吸收系

数的方式对输出激光的光束均匀性进行改善。

表 3 0.8 at. % 掺杂浓度的晶体棒在不同冷却液温度下输出光斑的均方根误差

Tab.3  $M_{\text{RMS}}$  of output beam spot of crystal rod with a doping concentration of 0.8 % under different cooling liquid temperatures

温度/°C	均方根误差
25	0.1727
30	0.1877
35	0.1827
40	0.1988

## 5 结论

本文从增益介质吸收特性出发,对 LD 侧面泵浦的 Nd:YAG 晶体棒的吸收光场、增益分布以及激光器输出激光的光束均匀性进行了研究。通过改变增益介质的掺杂浓度以及冷却液温度等方式调节晶体棒的吸收系数,文章分析了吸收光场、增益分布以及激光光束均匀性与增益介质吸收特性之间的变化规律,为百赫兹级的高重频大能量激光器实现高均匀性的激光光斑输出提供了参考。

## 参考文献:

- [1] Fu X, Liu T H, Lei X X, et al. High energy diode-pumped rep-rated nanosecond solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15):1501003. (in Chinese)  
付星, 刘廷昊, 雷新星, 等. 二极管泵浦重复频率纳秒高能固体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(15):1501003.
- [2] De Vido M, Quinn G, Clarke D, et al. Demonstration of stable, long-term operation of a nanosecond pulsed DPSSL at 10 J, 100 Hz[J]. Optics Express, 2024, 32(7):11907-11915.
- [3] Mason P, Barrett H, Banerjee S, et al. Generation of Joule-level green bursts of nanosecond pulses from a DPSSL amplifier[J]. Optics Express, 2023, 31(12):19510-19522.
- [4] Wang J L, Cheng X J, Zhang Z H, et al. Temperature-dependent performances of diode-pumped Yb:YAG disk lasers[C]//2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim incorporating the Australasian Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy and the Australian Conference on Optical Fibre Technology. Piscataway: IEEE, 2011:1237-1239.
- [5] Wang X F, Cao T F, Fang Z P. Theoretical study of high power LD unidirectional side-pumped laser module[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(5):641-645. (in Chinese)  
王小发, 曹腾飞, 方泽鹏. 高功率 LD 侧面单向泵浦激光模块的理论研究[J]. 半导体光电, 2021, 42(5):641-645.
- [6] Wang J H, Jin F, Zhai G, et al. Pump uniformity study of solid state rods direct side-pumped by laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4):421-426, 458. (in Chinese)  
王建华, 金锋, 翟刚, 等. 二极管阵列侧面泵浦固体激光介质的光场分布[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4):421-426, 458.
- [7] Zhao H, Jiang D S, Wang J J, et al. Gain distribution characteristics in working medium side-pumped by diode Bars[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1):57-62. (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):57-62.
- [8] Zhang B, Yang A F, Yang Z J, 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] Yan L H, Ren H, Liu X W, et al. Absorption property of LDA side pumped laser crystal[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(7):720-724. (in Chinese)  
闫立华, 任浩, 刘小文, 等. 半导体侧泵模块激光晶体吸收光场分析[J]. 激光与红外, 2014, 44(7):720-724.
- [10] Wu W T. Research on laser-diode-pumped burst-mode lasers with high repetition-rate and high energy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)  
武文涛. LD 泵浦的高重频大能量脉冲串激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [11] Yu J W, Li Y, Xie X, et al. Study on gain field uniformity of LD side-pumped Nd:YAG laser[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(12):1822-1826. (in Chinese)  
俞嘉威, 李研, 谢雪, 等. LD 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的增益场均匀性研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(12):1822-1826.