

大口径轴向非均匀Nd:YAG晶体抽运设计

肖红^{1,2} 赵天卓¹ 樊仲维¹ 黄科¹ 余锦¹

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过抽运结构的优化设计,对YAG晶体的轴向吸收系数非均匀特性进行了补偿,实现了直径15 mm Nd:YAG晶体的轴向高均匀抽运。分析了轴向非均匀晶体吸收系数的影响,提出在控制抽运光中心波长的基础上,通过改变结构参数来补偿轴向吸收系数不均匀导致的抽运不均匀的方法。实验验证了轴向吸收系数为2.343~2.882 cm⁻¹的Nd:YAG棒的均匀抽运优化方案。

关键词 激光器;激光二极管;固体激光器;侧面抽运;抽运均匀性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602002

Pump Design of Large-Diameter Axial Non-Uniform Nd:YAG Crystal

Xiao Hong^{1,2} Zhao Tianzhuo¹ Fan Zhongwei¹ Huang Ke¹ Yu Jin¹

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract By optimizing the pump structure, the axially non-uniform absorption coefficient of YAG crystal is compensated. A 15 mm diameter Nd:YAG crystal is uniformly pumped. The effect of axially non-uniform absorption coefficient of Nd:YAG on the uniform pumping is analyzed. Then a new method that can optimize the gain distribution through the modulation of the distance and the central pump wavelength is given. A side-pumped amplifier structure is designed to verify the simulation results by experiment. The scheme used for obtaining uniform gain distribution for Nd:YAG rod with axially absorption coefficient with range of 2.343~2.882 cm⁻¹ has been proved experimentally.

Key words lasers; laser diode; solid state laser; side-pumped; uniform pumping

OCIS codes 140.3470; 140.3280; 140.5560; 140.2020

1 引言

高平均功率高光束质量激光器一直是激光领域的研究热点^[1-3]。均匀抽运对于大口径、高功率激光系统有重要意义,这是由于不均匀的抽运分布会导致更严重的热透镜、热致应力双折射、表面形变等一系列热效应,最终限制激光输出功率并影响输出的光束质量^[4-7]。

为了有效地抑制热效应,长期以来固体激光器的设计一直都遵循着均匀抽运的设计理念^[8-12]。2004年欧群飞等^[13]以激光二极管阵列抽运直径为3 mm的Nd:YAG棒为例计算温度分布和热应力分布。2010年邓清华等^[14]根据计算优化的结果,设计了9维激光二极管抽运钎玻璃放大器,采用的抽运环直径为6 mm,测得了均匀的抽运能量分布。2005年Hajiesmaeilbaigi等^[15]在实验中采用的侧泵结构的晶体棒直径为6 mm,抽运功率为1050 W,得到较为均匀的抽运能量分布。但上述研究成果都将晶体考虑成轴向均匀的,具有相同吸收系数的工作物质,但实际上由于晶体生长工艺特性,导致轴向Nd³⁺掺杂浓度存在10%~20%的梯度分布^[16],

收稿日期: 2014-12-09; 收到修改稿日期: 2015-01-08

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(YZ201216)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)

作者简介: 肖红(1989—),女,硕士研究生,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: xiaohongava@163.com

导师简介: 樊仲维(1965—),男,博士生导师,主要从事全固态激光技术方面的研究。

E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn(通信联系人)

晶体掺杂浓度不同会导致晶体对相同波长的光吸收系数存在差异,根据本文模拟计算结果,这会导致抽运分布的严重不均匀,进而影响增益特性。现有工作针对大口径侧面抽运圆棒状工作物质轴向非均匀性进行补偿的报道很少。

本文分析了轴向非均匀晶体吸收系数对Nd:YAG棒抽运均匀性的影响规律,提出了改变抽运环半径(激光二极管阵列到晶体棒中心的距离)的补偿方法。对于一根按照常规工艺方法生长的Nd:YAG晶体棒,实测得到吸收系数分布范围为2.343~2.882 cm⁻¹,这会导致中心能量密度变化;另一方面,随着抽运环半径从22 mm增加到77 mm,晶体棒吸收的总功率依次减小,能量密度均方根误差(RMS)值减小0.1967;此外,抽运光中心波长从805.5 nm变化到810 nm,能量密度RMS值变化了0.1017,为了实现均匀抽运必须要精确选择抽运光中心波长。因此,本文提出在精确控制抽运光中心波长,稳定晶体内部抽运能量均匀分布的基础上,通过改变抽运环半径来补偿Nd:YAG晶体轴向的不均匀性对均匀抽运的影响,并通过实验进行验证。

2 理论模拟

2.1 参量设计

本文用Zemax软件进行模拟,采用的七维侧泵激光放大器结构如图1所示,石英玻璃管外径为30 mm,厚度为3 mm,水层厚度为4.5 mm,Nd:YAG晶体棒直径为15 mm,平均掺杂原子数分数为0.6%。抽运环半径用R表示。具体参数如表1所示,其中快慢轴发散角用半高全宽(FWHM)表示。

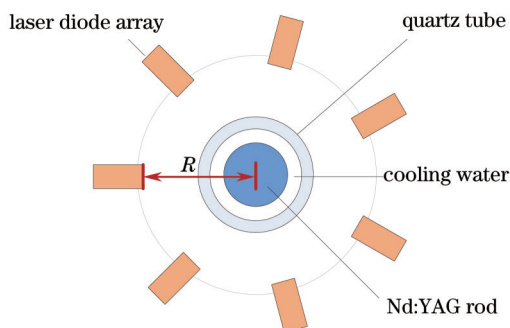


图1 抽运结构图

Fig.1 Configuration of pump head

表1 激光二极管阵列光学参数

Table 1 Optical specifications of laser diode

Parameters	Specifications value
Fast axis divergence (FWHM) / (°)	36
Slow axis divergence (FWHM) / (°)	8
Number of emitter	62
Emitter pitch / μm	150
Emitter width / μm	100
Optical output power / W	200

2.2 计算及评价方法

单个激光二极管阵列光强分布 $I(\theta_x, \theta_y)$ 用公式可以表示为

$$I(\theta_x, \theta_y) = I_0 \exp \left\{ -2 \left[\left(\frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^{2G_x} + \left(\frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^{2G_y} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 I_0 为抽运光光强, α_x 是 X 轴发散角度; α_y 是 Y 轴发散角度; G_x 是 X 轴方向超高斯因子; G_y 是 Y 轴方向超高斯因子。本次模拟计算中采用 $G_x = 1, G_y = 1$ 。

对于高斯分布 ($G_x = 1$), α_x 值可以确定为

$$\alpha_x = (0.8493218) \theta_{FWHM}. \quad (2)$$

Y 轴方向同理。借鉴参考文献[14]的评价方式,选用均方根值来评价晶体棒内的抽运功率分布均匀情况,其计算

式用 σ 表示为

$$\sigma = \frac{1}{P_{x'}} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [P_x(i, j) - P_{x'}]^2 / (m \times n)}, \quad (3)$$

式中 $P_{x'}$ 表示该晶体棒内的平均抽运功率, i 和 j 分别表示 x 轴和 y 轴方向上点的位置, m 和 n 分别表示 x 轴和 y 轴方向上点的个数, $P_x(i, j)$ 为该点的抽运功率。RMS 值 σ 越小, 抽运均匀性越好。

2.3 模拟结果

2.3.1 晶体轴向非均匀吸收系数对抽运能量分布的影响

晶体掺杂浓度的不同主要体现在晶体对相同波长抽运光的吸收系数不同。实际测量中得到的一根晶体棒在波长 808.0 nm 的吸收系数为 2.343~2.882 cm^{-1} , 模拟中针对以上情况, 选用晶体的吸收系数分别为 2.343、2.430、2.677、2.726、2.749、2.882 cm^{-1} 。用该波长进行计算, 光谱宽度为 3 nm, 其他条件相同的情况下, 计算得到抽运能量沿棒横截面分布为彩色图, 如图 2 所示。

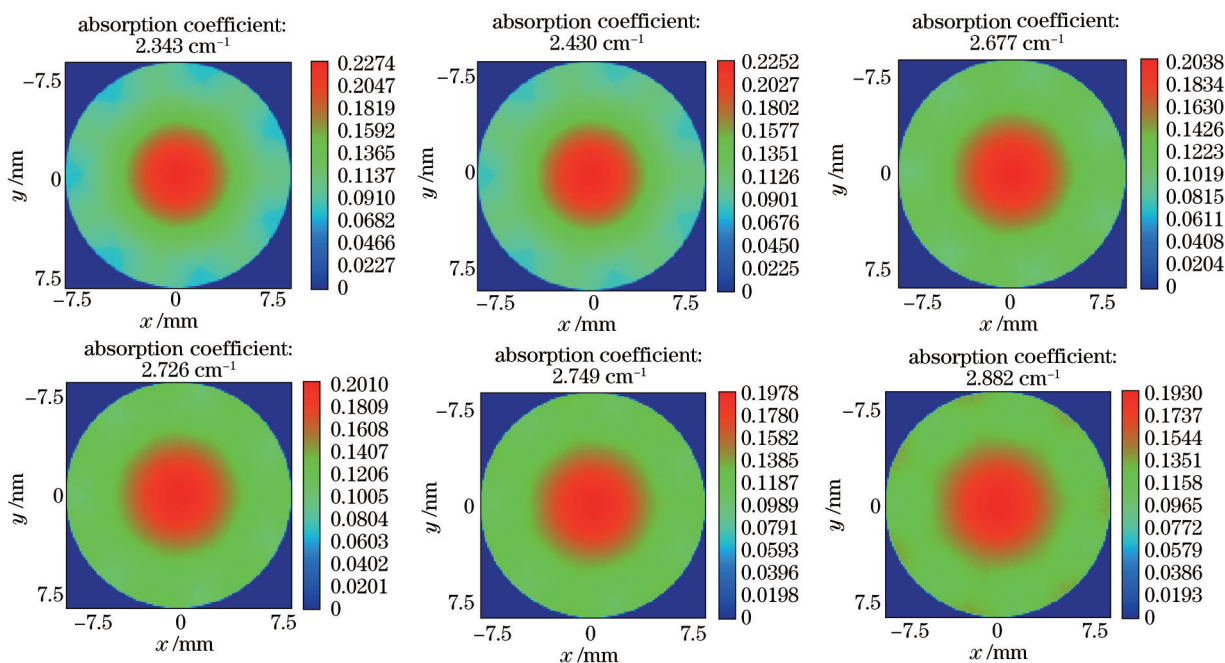


图 2 不同吸收系数的晶体棒抽运能量分布图

Fig.2 Distribution of absorbed energy of Nd:YAG with different absorption coefficients

图 2 中右侧纵轴表示各颜色对应单位面积吸收的抽运功率值, x 轴和 y 轴建立了棒截面的坐标系。由图可以看出, 上述吸收系数情况中抽运能量依然主要沉积在棒中心位置, 并且晶体吸收系数与抽运能量密度的最高值分布变化呈相反趋势。这是因为吸收系数越高, 抽运能量在棒边缘被吸收的越多, 到达棒中心的能量就越低。因此对于能量分布中心强边缘弱的情况有所缓解。

应用 2.2 节给出的评价方法对上图进行分析, 分别计算棒截面上 x 轴和 y 轴的 RMS 值, 即 σ_x 和 σ_y , 结果

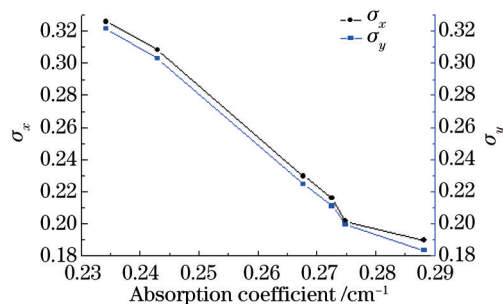


图 3 不同吸收系数下的 RMS 值

Fig.3 RMS for different absorption coefficients of Nd:YAG

如图3所示。

图3中 x 轴的RMS值普遍比 y 轴的大,以下的模拟中也出现此现象,这是由于采用奇数的二极管阵列抽运,取的 x 轴接近其中一个阵列,导致抽运光沿 x 轴RMS值增大。

由以上两图看出,吸收系数为 $2.343\sim 2.882\text{ cm}^{-1}$ 情况下,随着吸收系数增大,晶体吸收的抽运光功率依次递减,RMS值依次递减,抽运能量分布愈加均匀。以 x 轴为例,吸收系数为 2.882 cm^{-1} 的情况比 2.343 cm^{-1} 的RMS值小 0.1363 ,证明了上述结论。

2.3.2 抽运环半径对抽运能量分布均匀性的补偿

模拟过程中采用的抽运光中心波长为 808.0 nm ,光谱宽度为 3 nm ;晶体棒对波长 808.0 nm 的吸收系数约为 2.749 cm^{-1} 。当 R 取值分别为 $22, 37, 47, 57, 67, 77\text{ mm}$ 时,其他条件相同的情况下,通过计算得到的Nd:YAG棒横截面的抽运能量分布的伪彩色图如图4所示。

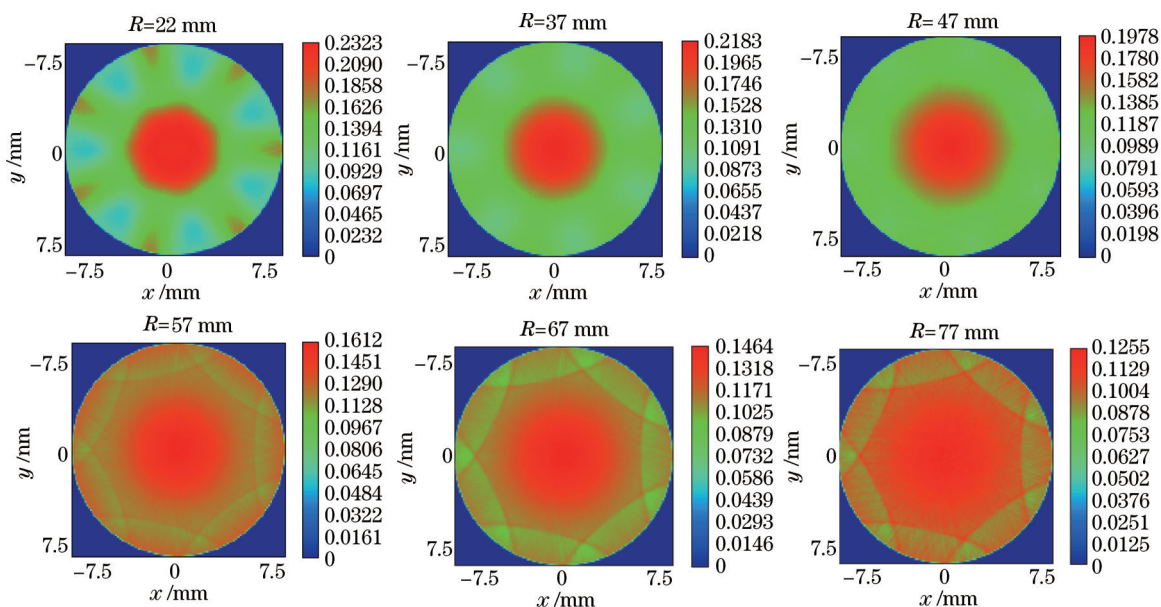


图4 不同抽运环半径下的抽运能量分布图

Fig.4 Distribution of absorbed energy for different distances between diode array and the center of rod

由图4可以看出,上述抽运环半径情况下,光强都主要沉积在棒的中心部分,棒边缘部分吸收的能量相对较小,且 R 越小,这种趋势越明显。当 R 为 37 mm 时,棒中心抽运能量均匀,而在边缘的抽运能量分布明显不均匀。但是随着抽运环半径的增加,晶体棒总抽运能量会逐渐减小。当 R 分别为 $22, 37, 47, 57, 67, 77\text{ mm}$ 时,晶体棒吸收的总功率分别为 $1238.3, 1233.98, 1224.92, 1208.48, 1184.40, 1153.66\text{ W}$,由此可以计算得效率分别为 $88.5\%, 88.1\%, 87.5\%, 86.3\%, 84.6\%, 82.4\%$ 。

计算得到的棒截面上 x 轴和 y 轴的RMS值如图5所示,横轴表示抽运环半径值,左侧纵轴代表棒横截面 x 轴的RMS值,右侧纵轴代表棒横截面 y 轴的RMS值。

由图5可见,抽运环半径越大,RMS值越小,抽运能量分布越均匀。以 x 轴为例, R 为 57 mm 时比 22 mm

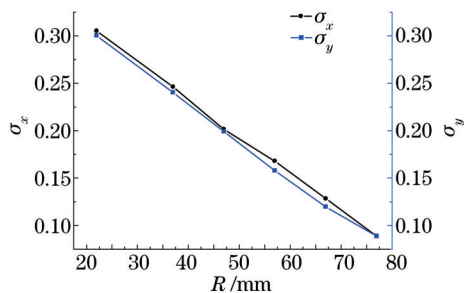


图5 不同抽运环半径情况下的RMS值

Fig.5 RMS for different distance between diode array and center of rod

的RMS值小了0.1373。但是为了得到较高的抽运能量分布,需要适当地拉近抽运环半径。半径从37 mm变化到47 mm的过程中效率降低0.6%,均匀性变化18.2%,而从47mm到57mm的过程中,效率降低1.2%,均匀性变化16.6%。根据上述计算得到的效率和晶体棒截面上 x 轴和 y 轴的RMS值的曲线图可知, R 分别为47 mm和57 mm的情况下,效率高,抽运能量分布均匀性较好。综合考虑近距离漏光较少,可以有效避免激光二极管的损坏,延长使用寿命,因此保守的选取 R 大小为47 mm。

2.3.3 抽运光中心波长对抽运能量分布均匀性的影响

针对一段平均掺杂原子数分数为0.6%的晶体棒进行光谱测试,得到对波长805.5~810.0 nm每隔0.5 nm波段的吸收系数依次为1.744、1.597、1.601、1.818、2.169、2.749、3.339、2.769、1.659、0.957 cm^{-1} 。其他条件相同的情况下,针对上述波长进行模拟,当光谱宽度为3 nm,得到抽运能量分布如图6所示。

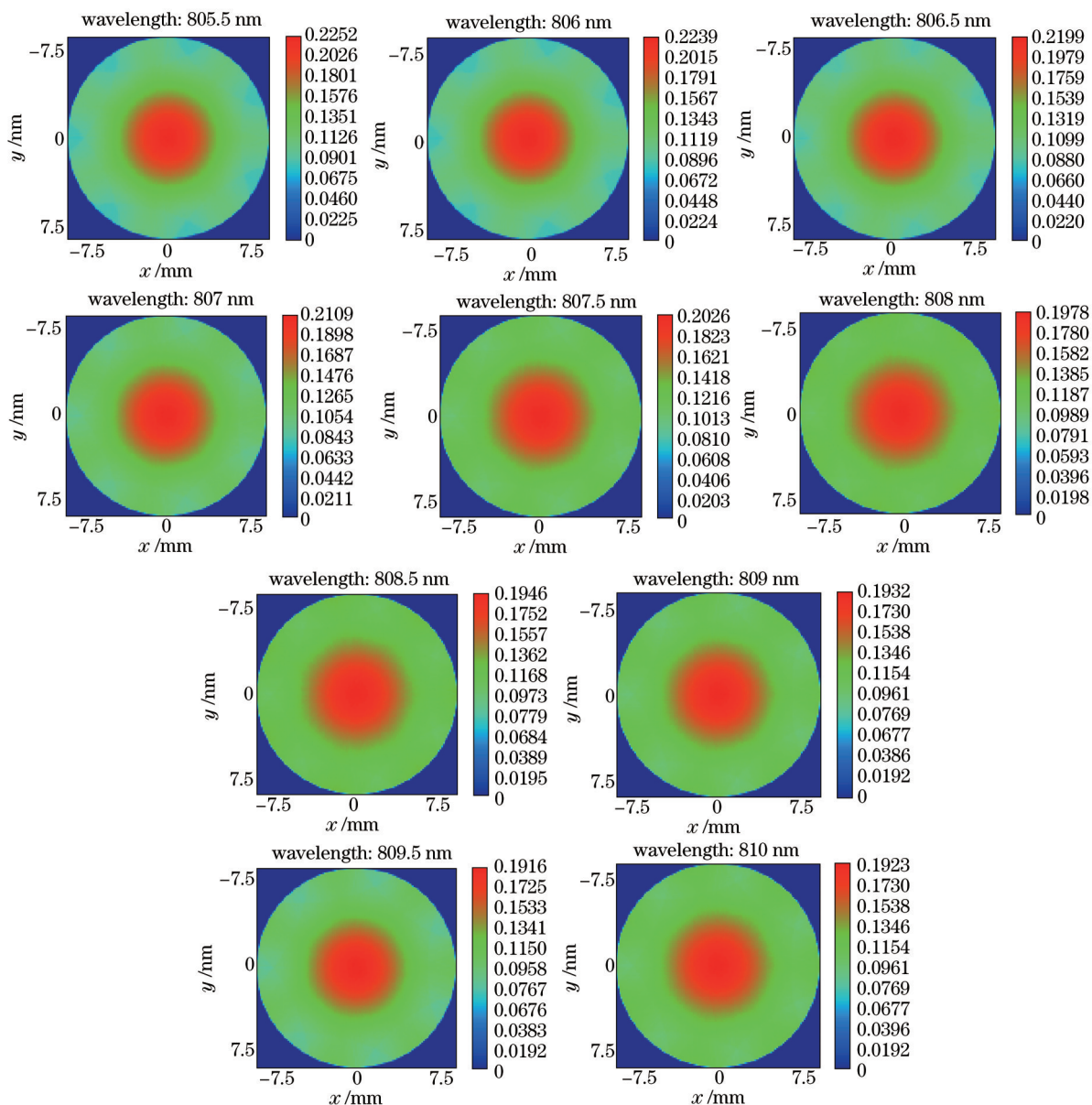


图6 不同波长的抽运能量分布图

Fig.6 Distribution of absorbed energy for different wavelengths

对上图进行分析,计算棒截面上 x 轴和 y 轴的RMS值,结果如图7所示。

由图7可见,波长在807.5~809 nm范围内的RMS值最低,即此光谱范围内抽运均匀性较高。这是由于此段光谱吸收系数较高,是吸收峰,晶体对该波长的能量吸收较多,因此该晶体棒中心抽运能量相对于其他

波长低,整体抽运能量分布较均匀。结果表明,波长偏离吸收峰的程度对抽运能量分布有重要影响,对中心波长的控制应在 807.5~809 nm 范围内。

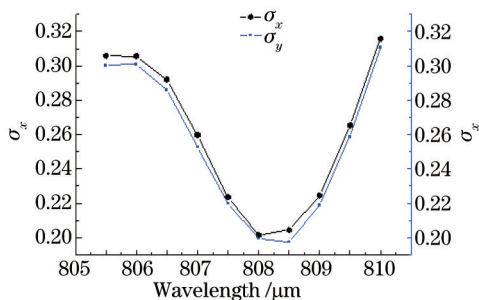


图7 不同波长情况下的RMS值

Fig.7 RMS for different wavelengths

3 实验测试

荧光测试的实验装置如图8所示。用七维激光二极管阵列等间隔形成环垂直抽运直径为 15 mm 的 Nd:YAG 晶体棒,其掺杂原子浓度如 2.3.3 节所述,荧光经过焦距为 150 mm 的成像透镜在 Spiricon SP620U 光束质量分析仪中成像。

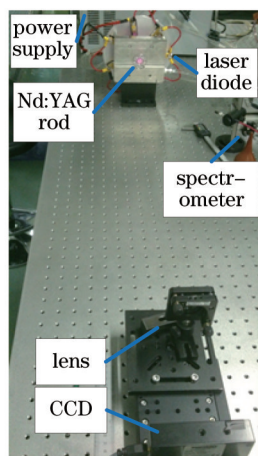


图8 实验装置测试图

Fig.8 Scheme of experimental setup

激光二极管阵列输出激光峰值功率为 200 W,重复频率为 200 Hz,脉冲宽度为 250 μs;石英玻璃管外径为 30 mm。

当抽运光中心波长为 808.5 nm 时,在其他实验条件相同的情况下,测出了抽运环半径分别为 22、37、47、57 mm 的抽运能量分布如图9所示。

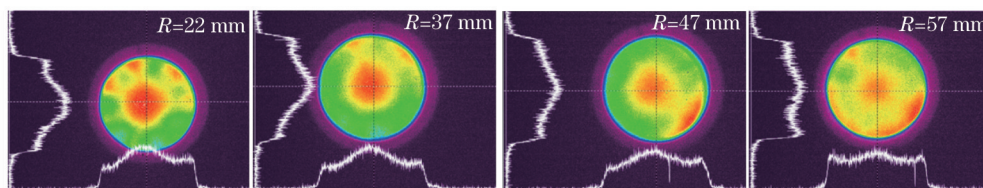


图9 实验测得的不同抽运环半径的抽运能量分布

Fig.9 Distribution of absorbed energy for different distances between diode array and the center of rod by experiment

由图9可以看出,实验结果与 2.3.2 节模拟结果大致相符,整体上各个抽运环半径情况下的光强分布普遍呈现出中心强度高,边缘强度低的趋势。

对上图进行分析,计算棒截面上沿 x 轴和 y 轴的 RMS 值,结果如图 10 所示。由图 10 可以看出,当抽运环半径为 22 mm 时,沿 x 轴的 RMS 值比 y 轴大,这与后面几种情况不一致,这是由于散热问题造成的不均匀和

不稳定。抽运环半径对于抽运均匀性的影响很大,随着抽运环半径的增大,RMS值逐渐减小,抽运均匀性更好。以沿 x 轴为例,抽运环半径为 47 mm 的 RMS 值比 37 mm 小 0.0492,而抽运环半径为 57 mm 的 RMS 值比 47 mm 小 0.1078,抽运能量分布最为均匀。这是因为随着抽运环半径的增大,晶体棒中心吸收强度逐渐减弱,边缘强度逐渐增强,导致晶体棒中的抽运能量分布趋于均匀。但是考虑抽运效率和抽运能量等因素,应该适当地拉近抽运环半径。以本实验的参数,考虑抽运能量的条件下,bar 条发光距离晶体棒中心为 47 mm 时,抽运能量分布较理想。

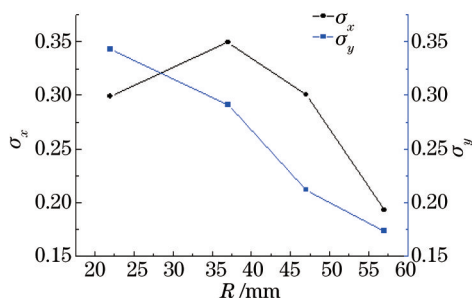


图 10 实验测得的不同抽运环半径情况下的 RMS 值

Fig.10 Experimental RMS for different distances between diode array and the center of rod

相对于实验结果受散热和 bar 条一致性等问题影响,理论模拟的抽运能量分布更加均匀。

抽运光中心波长对抽运均匀性影响很大,例如抽运环半径选用 57 mm 时,在其他实验条件相同的情况下,得到抽运光中心波长分别为 805.6、806.4、807.5、808.5 nm 情况下激光晶体棒抽运能量分布如图 11 所示。

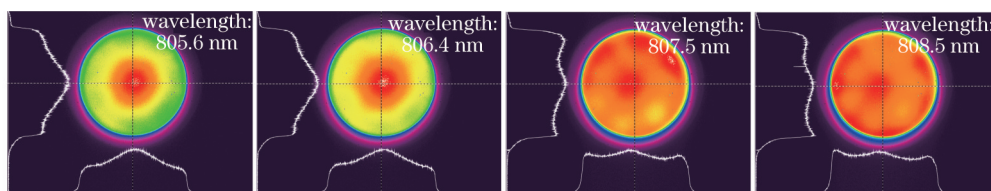


图 11 实验测得的不同抽运光中心波长下抽运能量分布

Fig.11 Distribution of absorbed energy for different pump wavelengths by experiment

对图 11 进行分析,计算棒截面上沿 x 轴和 y 轴的 RMS 值,结果如图 12 所示。

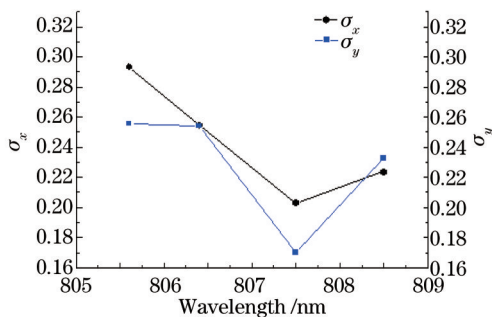


图 12 实验测得的不同波长情况下的 RMS 值

Fig.12 Experimental RMS value for different wavelengths

由上图可以看出,实验结果与模拟计算中的结果是相符合的,随着波长逐渐接近吸收峰 807.5~809 nm 的过程中,RMS 值逐渐减小,即抽运能量分布趋于均匀。上图中沿 x 轴的 RMS 最大值与最小值相差 0.0903。为了实现均匀抽运的目的,抽运光中心波长应选择接近该吸收峰。

4 结 论

理论模拟和实验测试结果表明,将抽运光中心波长精确控制在 807.5~809.0 nm 的前提下,针对特定的晶体吸收系数,通过控制抽运环半径等因素,可以实现激光放大器晶体轴向的均匀抽运,改善晶体的增益特性。精确控制抽运环半径,可以定量的调节抽运能量分布的均匀性。对于快轴发散角度 36° (FWHM),直

径 15 mm, 掺杂原子数分数为 0.6% 的 Nd:YAG 棒来说, 抽运环半径在 47 mm 附近时, 吸收抽运能量较高且分布均匀; 随着吸收系数增大, 大部分抽运光能量被介质表面区域吸收, 到达中心部分的能量就降低, 所以抽运能量分布趋于均匀。

晶体棒轴向掺杂和吸收系数的不均匀是受工艺限制难以避免的, 通过合理设计抽运环半径的方法来补偿晶体棒轴向非均匀吸收系数差异, 实现大范围均匀抽运可以提高工作物质的抽运能量密度承载能力, 获得更高的储能密度。

参 考 文 献

- 1 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- 2 Ma Yunfeng, Yu Jin, Niu Gang, *et al.*. Research on 21 W and 56 MHz Nd:YVO₄ picosecond pulse laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0302010.
麻云凤, 余 锦, 牛 岗, 等. 21 W、56 MHz Nd:YVO₄ 皮秒脉冲激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0302010.
- 3 Li Nan, Pang Yu, Lu Yanhua, *et al.*. 800 mJ high beam quality all-solid-state 1319 nm pulsed laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0802007.
李 楠, 庞 毓, 鲁燕华, 等. 800 mJ 高光束质量全固态 1319 nm 脉冲激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802007.
- 4 Wang Dan, Zhou Tangjian, Wang Juntao, *et al.*. Hundreds watts Nd:YAG slab laser amplifier with high beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002001.
汪 丹, 周唐建, 王君涛, 等. 百瓦级高光束质量 Nd:YAG 板条激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002001.
- 5 Liu Jing, Shi Xiangchun, Li Lei, *et al.*. Experimental research on gain characteristic in large aperture active mirror slab amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402007.
刘 晶, 施翔春, 李 磊, 等. 大口径有源反射镜片片状放大器增益特性实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402007.
- 6 Tong Lixin, Gao Qingsong, Jiang Jianfeng, *et al.*. Research of thermal effects compensation of high power diode laser module[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(B04): 125-128.
童立新, 高清松, 蒋建锋, 等. 高功率二极管抽运模块热效应补偿研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(B04): 125-128.
- 7 Chen Y F, Su K W, Zhang H J, *et al.*. Efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG/BaWO₄ intracavity Raman laser[J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3335-3337.
- 8 Xu Yiting, Xu Jialin, Cui Qianjin, *et al.*. High efficiency multi-kW diode-side-pumped Nd:YAG laser with reduced thermal effect[J]. Chin Phys Lett, 2010, 27(2): 024201.
- 9 Amarjeet Singh, Pranab Kumar Mukhopadhyay, Sunil Kumar Sharma, *et al.*. 82 W continuous-wave green beam generation by intracavity frequency doubling of diode-side-pumped Nd:YAG laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 49(3): 398-405.
- 10 Tianzhuo Zhao, Jin Yu, Chaoyang Li, *et al.*. Beam shaping and compensation for high-gain Nd:glass[J]. Journal of Modern Optics, 2012, 60(2): 109-115.
- 11 S Mondal, S P Singh, K Hussain, *et al.*. Efficient depolarization-loss-compensation of solid state lasers using only a Glan-Taylor polarizer[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 154-159.
- 12 Zhang Yongliang, Wei Xiaofeng, Yan Xiongwei, *et al.*. Research of gain uniformization in high power solid state laser amplifier[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1646-1648.
张永亮, 魏晓峰, 严雄伟, 等. 高功率固体激光放大器中增益均匀化研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1646-1648.
- 13 Ou Qunfei, Chen Jianguo, Feng Guoying, *et al.*. Analyses of thermal depolarization in ring laser diode array side-pumped rod laser[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(7): 797-801.
欧群飞, 陈建国, 冯国英, 等. 环形激光二极管抽运激光棒的热致退偏分析[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 797-801.
- 14 Deng Qinghua, Ding Lei, He Shaobo, *et al.*. Evaluating specifications on coupled pump distribution in LDA side-pumped rod gain medium[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1176-1181.
邓青华, 丁 磊, 贺少勃, 等. 激光二极管阵列侧面抽运棒状增益介质抽运储能分布的评价方法[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1176-1181.
- 15 F Hajiesmaeilbaigi, H Razzaghi, M M Esfahani, *et al.*. Experimental study of a high-power CW diode-side pumped Nd:YAG rod laser[J]. Laser Phys Lett, 2005, 2(9): 437-439.
- 16 Wang Yajun, Yang Wenmei, Zheng Yao Hui, *et al.*. Influence of pump wavelength and Nd³⁺ doped concentration on the performance of intracavity doubling single-frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602005.
王雅君, 杨文梅, 郑耀辉, 等. 抽运波长及 Nd³⁺ 掺杂浓度对内腔倍频单频激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602005.

栏目编辑: 宋梅梅