

双拱形 LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 光场均匀性研究

于永吉,王 超,陈薪羽,金光勇,郭家喜,郝大伟
(长春理工大学理学院 激光技术研究所,吉林 长春 130022)

摘要:采用一种双拱形激光二极管阵列对双棒串接的 Nd:YAG 进行同心泵浦,将双拱形激光二极管面阵发出的光作高斯光束处理,通过计算机模拟,研究了双拱形 LDA 侧面泵浦条件下 Nd:YAG 的泵浦光场均匀性,分析了泵浦结构各参量对泵浦光场均匀性的影响。证实了只要选取适当的泵浦参数,采用这种泵浦结构可以提高激光输出能量和光束质量。实验测试了该泵浦结构下 Nd:YAG 激光器的输出能量和光束质量,实验结果与理论分析结果基本相符,验证了所建模型的正确性。

关键词:双拱形 LDA;侧面泵浦;光场均匀性;模拟计算

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A

Study for pumping uniformity in double-arched LDA side-pumped Nd:YAG laser

YU Yong-ji, WANG Chao, CHEN Xin-yu, JIN Guang-yong, GUO Jia-xi, HAO Da-wei
(Changchun University of Science and Technology, School of Science, Institute of Laser Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The pumping uniformity of double-arched laser diode arrays side-pumped Nd:YAG laser was reported. The optical rays from double-arched laser diode planar arrays were regarded as gauss beam approximately. With computer modeling and experimental test, the pumping uniformity characteristics in double-arched laser diode arrays side-pumped Nd:YAG were studied. It was proved that laser output energy and laser beam quality were improved as long as the proper pumping parameters was chosen in the side-pumping method. The output energy and laser beam quality were tested by using the side-pumped structure in Nd:YAG laser. The experiment results were analyzed and discussed. The comparison results illustrate that the theoretical models are correct.

Key words: double-arched LDA; side-pumped; pumping uniformity; analog calculation

1 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器(DPSSL)因其具有高效率、长寿命及结构紧凑等优点,已经成为固体激光器发展的主流方向,并在激光加工、激光测距、目标指示、激光雷达等领域得到广泛应用^[1-2]。激光二极管的泵浦方式主要有端面泵浦和侧面泵浦两种。端面泵浦容易实现泵浦光和激光模式的匹配,因而效率高,光束质量好,是小功率激光器件的理想选择^[3-4]。侧面泵浦较之端面泵浦,虽然基模提取效率低、光束质量差,但是可以靠简单的增加泵浦长度来承载更多的泵浦能量,从而

获得大功率激光输出^[5-6]。因此,在要求较大输出功率的激光器中,普遍采用侧面泵浦的方式泵浦固体激光介质。

为了改善侧面泵浦的基模提取效率和输出光束质量,泵浦源通常采用多个激光二极管阵列(LDA)侧面环绕泵浦的结构,基于这种结构我们设计了双

基金项目:吉林省教育厅基金(吉教科合字2007-36)资助。

作者简介:于永吉(1983-),男,在读硕士,主要从事激光物理与新型激光器,全固态激光器及非线性频率变换技术等方面研究。
E-mail: yuyongjiyuyongji@163.com

收稿日期:2009-02-13; **修订日期:**2009-04-17

拱形 LDA 侧面交错泵浦双棒串接的 Nd:YAG 晶体, 这种同心泵浦可以使晶体内的增益场与谐振腔基模实现良好的匹配。本文利用泵浦光分布的高斯模型, 通过计算机模拟, 研究并讨论了这种泵浦结构各参量对泵浦光分布均匀性的影响, 并通过实验予以验证。

2 泵浦光分布的高斯模型

激光二极管发出的光束呈高斯近似, 其慢轴 ($\theta_{//}$) 方向的束散角典型值为 $10^\circ \sim 12^\circ$, 快轴 (θ_{\perp}) 方向的束散角典型值为 $35^\circ \sim 42^\circ$ 。在侧面泵浦下, 由于在晶体棒横截面的泵浦光分布为主要考虑对象, 因此忽略慢轴方向的束散, 泵浦光在工作物质中的光场分布如图 1 所示。

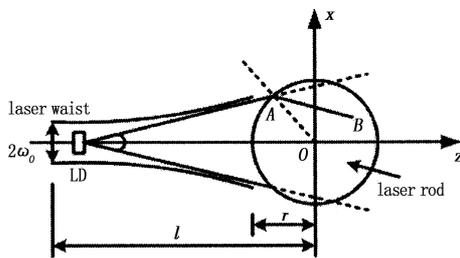


图1 沿 z 轴传播的泵浦光束(高斯)

在图 1 中, 二极管线阵的输出光束沿 z 轴方向从左侧泵浦晶体棒, 晶体棒半径为 r_0 , 初始光腰位于晶体外面。考虑到晶体棒对泵浦光的吸收作用, 忽略晶体表面对泵浦光的反射损耗, 则泵浦光在晶体横截面内光场分布可表示为^[7]:

$$I(x, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{\omega_x} \exp \left\{ -2 \left[\frac{x^2}{\omega_x^2(z)} \right] - \alpha s \right\} \quad (1)$$

式中, I_0 为泵浦光光强; α 为晶体吸收系数; s 指泵浦光在晶体中的吸收距离, 即图 1 中 AB 段距离, 其近似解为:

$$s = AB = \sqrt{r_0^2 - x^2} + z \quad (2)$$

ω_x 表示激光强度值降为 $1/e^2$ 处的光束半径, 其表达式为:

$$\omega_x^2 = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, ω_0 为泵浦光的束腰半径; λ 为泵浦光波长。假设 LD bars 的束腰位于其发射面上, 半径为 ω_0 , LD 距离晶体棒的泵浦距离为 d , 以其横截面的圆心为原点建立直角坐标系, 则 ω_x 的表达式变为:

$$\omega_x^2 = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda(d + r_0 + z)}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

当入射的泵浦光功率较大时, 泵浦光可能穿透晶体棒到达 LD 的对面, 为增强泵浦光分布的均匀

性, 可在介质的非泵浦侧面上镀高反膜, 使泵浦光在介质表面发生全反射返回介质被吸收。此时介质中总的光强分布为:

$$I_s(x, z) = I(x, z) + I_{\text{反}}(x, z) \quad (5)$$

对于多侧面环绕泵浦的情况, 可通过坐标轴变换得到每个线阵在同一点的光强分布。将介质内点 (x, z) 的坐标沿顺时针方向旋转角度 θ , 则坐标变为 (x_θ, z_θ) , 在坐标变换过程中, 变换关系为:

$$\begin{cases} y_\theta = y \cdot \cos\theta + x \cdot \sin\theta \\ x_\theta = -y \cdot \sin\theta + x \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (6)$$

将通过以上坐标变换得到的 (x_θ, z_θ) 的值代入式(5), 得到 LD 旋转角度 θ 后在点 (x, z) 的光强, 从而 n 个 LD 在不同角度上在点 (x, z) 产生的总光强为:

$$I_{\text{总}}(x, z) = \sum_n [I_s(x, z) + I'_s(x, z)] \quad (7)$$

3 数值模拟及结果分析

图 2 为双拱形 LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器泵浦模块截面示意图, 工作物质的热沉包围了 Nd:YAG 晶体一半的体积, 泵浦光仅从工作物质上半部分的拱形 LDA 进入晶体内部并被其吸收。与普通侧面泵浦激光器不同的是, 在整机结构中, 将两根 Nd:YAG 晶体棒串接, 并且使两个泵浦模块交错对称排列, 结构如图 3 所示。两个模块各自在工作物质中的非轴对称泵浦通过这种方式(或结构)实现了空间(轴向)互补, 从而消除了激光在不对称泵浦空间传输过程中由于增益不均匀和热不均匀造成的光束畸变, 获得较高的光束质量。模块中采用两根直径 4 mm, 长 36 mm 的 Nd:YAG 晶体, 为了抑制晶体内自发辐射效应的产生, 将晶体的表面进行了打毛处理。泵浦源采用单条峰值功率 100 W, 泵浦脉宽 200 μs 的 LD bars, 将 bars 封装在 LD 紫铜热沉上的拱形中。每个拱形内封装 30 条 LD bars, 共使用 60 条 LD bars 对两根 Nd:YAG 晶体进行泵浦。利用温差电制冷器(TEC)分别对激光二极管和晶体热控温, 精度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。LD 阵列发光面与晶体棒的距离 d 可通过晶体支架(crystal stent)进行调节。

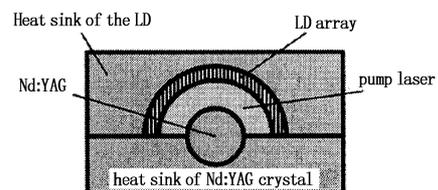


图2 泵浦模块截面图

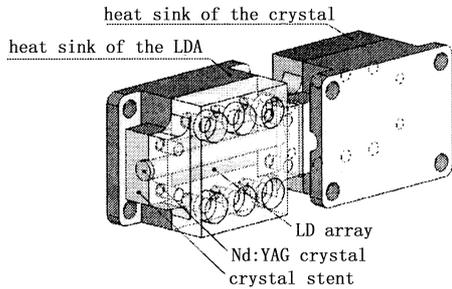


图3 双拱形 LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器结构图

用上述高斯模型对晶体吸收泵浦光的情况进行模拟。图4为单个LD在没有考虑泵浦光反射吸收和考虑泵浦光反射吸收两种情况下的光场分布示意图。由图4可以看出,介质中考虑泵浦光反射吸收比没有考虑泵浦光反射吸收光场分布更为均匀,因此在设计该泵浦结构时,应在非泵浦侧面的热沉上镀高反金属膜,使得透射的泵浦光反射回晶体中,在增加泵浦光分布均匀性的同时也提高了整个系统的光-光转换效率。

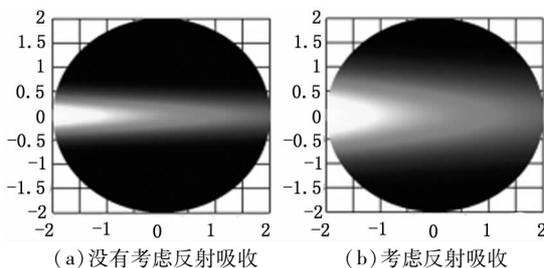


图4 单个LD的泵浦光场分布

在泵浦模块的设计中,为防止激光二极管对称击穿现象,将LD bars按照拱形排列分别封装在两个模块中。图5为单拱形LD泵浦模块多侧面泵浦光场的分布示意图。从图中可以看出,随着泵浦方向的增加,激光介质被拱形LDA包围部分的泵浦光

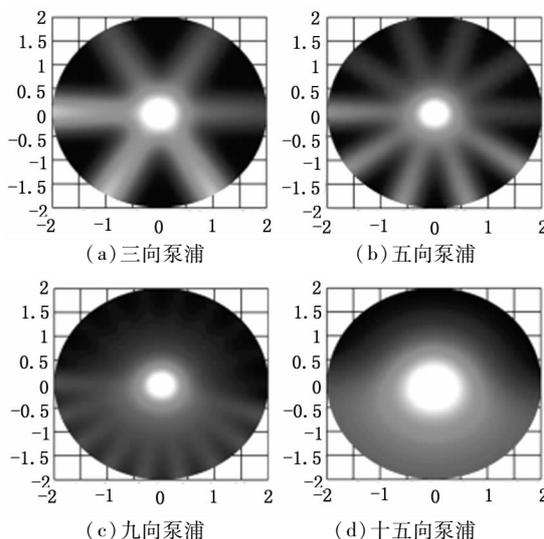


图5 多向泵浦光场分布模型图

场分布越来越趋于均匀化,当泵浦方向为十五向时,泵浦光线覆盖了整个包络部分,均匀性达到极佳状态。根据理论模型结合实际结构设计需要,将每个拱形内封装的30条LD bars按照线性排列成两组,每组阵列列为15条LD bars,使单根Nd:YAG晶体切向面的泵浦光场呈半圆形均匀分布。两个模块通过交错对称排列,使两个半圆形光场形成空间叠加,最终达到满棒切向面泵浦光场均匀化。

针对实验中所选用的参数,当LD bars发光面与晶体棒的距离 d 取不同的值时,晶体内部吸收泵浦光能量的三维分布情况如图6所示。比较图6中的各图可以看出:随着泵浦距离 d 值的增大,横截面内泵浦光分布的均匀性呈逐渐均匀的趋势。这是因为随着泵浦距离的增大,越来越多的光线需要经过边缘反射,导致泵浦吸收更均匀。但是另一方面,随着距离的增大能量损耗也必然增加,因此晶体对泵浦光的吸收率变低。

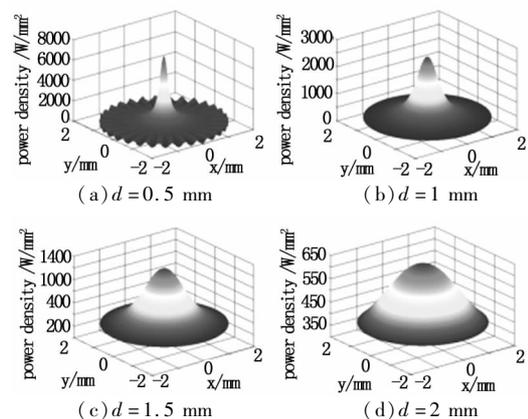


图6 双拱形 LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器泵浦光分布图

在激光器设计中,由于不同的横模占据着不同横截面区域,不均匀的泵浦使每个横模的增益均不相同,激光振荡通常为多模,光束质量较差。所以应尽量减少振荡模数,增大基模体积。可以通过适当改变LD bars发光面与晶体棒的距离,使晶体棒中心强度略高,近似成高斯形状,以达到激光基模输出。为了使激光器获得较好的光束质量,基于模拟的结果,将双拱形LDA的发光面距离晶体棒的距离设定在1.5 mm。

在增益介质选择上,我们往往根据实际情况选择适合的晶体。而不同晶体的吸收系数差异很大,且钕离子掺杂浓度的不同其吸收系数也会发生改变。针对Nd:YAG晶体掺杂 Nd^{3+} 的浓度不同,泵浦距离 $d = 1.5\text{ mm}$,吸收系数为 $\alpha = 0.3\text{ mm}^{-1}$, 0.6 mm^{-1} , 0.9 mm^{-1} 时,利用泵浦光分布的高斯模型,得到如图7所示的二维光场分布模型图。

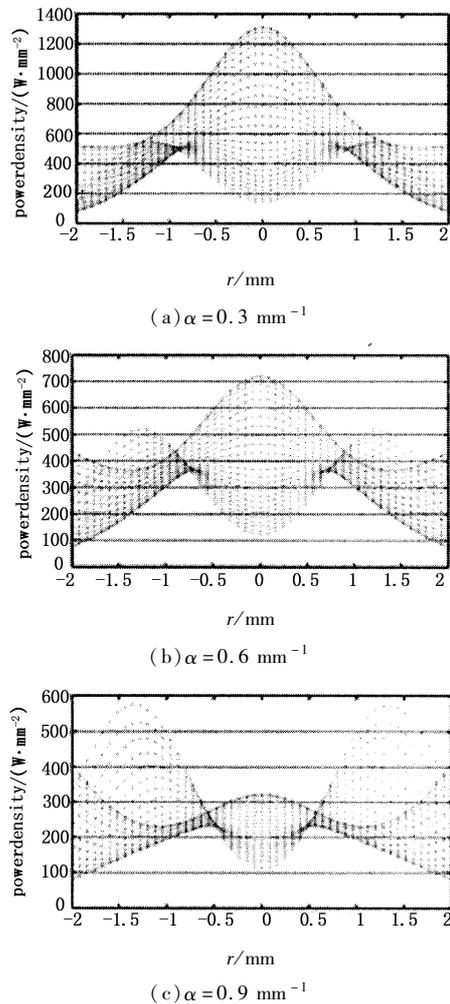


图7 双拱形 LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器泵浦光分布图(2D)

由图7可以看出:当工作物质的吸收系数较小时,晶体棒中间的增益明显要高于两端,中心分布近似成高斯形状,这种情况下有利于激光基模的振荡。为了抑制边缘的热效应问题,可以采用复合晶体,即只在激光基质材料的中间部分掺杂激活离子,两端不掺杂,这样可以有效消除晶体棒周围的泵浦光吸收。当吸收系数逐渐变大时,晶体棒吸收的泵浦光能量越来越集中在棒的边缘,而形成激光振荡的中心能量分布却很少,这意味着较大的吸收系数将导致泵浦光分布更不均匀,激光振荡的模式和增益分布严重失配。所以像 Nd:YVO_4 , Nd:GdVO_4 这样吸收系数很大的工作物质,通常情况不适合在侧面泵浦下运转。综合这些因素,选择掺杂 Nd^{3+} 浓度为 1.1% 的复合型 Nd:YAG 晶体作为工作物质。

4 实验研究

利用泵浦光分布的高斯模型,通过计算机编程模拟分析,双拱形 LDA 侧面泵浦模块的结构参数选取为:①非泵浦侧面的紫铜热沉上镀 808 nm

的高反金属膜;②每个拱形内封装的 30 条 LD bars 按照线性排列成两组,每组阵列列为 15 条 LD bars;③双拱形 LDA 的发光面距离晶体棒的距离 d 设定在 1.5 mm;④选择掺杂 Nd^{3+} 浓度为 1.1% 的复合型 Nd:YAG 晶体作为工作物质。实验中泵浦源采用上述的泵浦结构,两端的 YAG 尺寸为 $\phi 4 \times 3$ mm,图8为实验装置示意图。整机采用传导冷却,通过紫铜热沉热汇和温差电制冷器(TEC)控温,利用散热片和风扇强制对流换热,省却了庞大的水冷系统,实现了激光器的便携性。谐振腔采用平-平腔结构,全反镜 M1 表面镀 1064 nm 高反膜($R > 99.8\%$),输出镜 M2 表面镀对 1064 nm 透过率为 15% 的减反膜,腔长为 160 mm。利用中国计量院 PE25 型号能量探头测量重复频率为 20 Hz 时激光输出单脉冲能量随注入泵浦电流不同的变化关系,如图9所示。

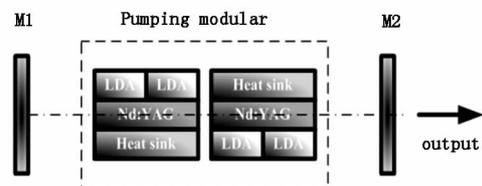


图8 实验装置示意图

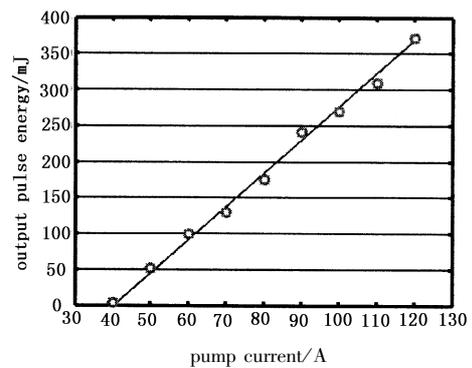


图9 输出单脉冲能量与注入泵浦电流的关系

由图9可以看出激光器的阈值电流为 40 A,所用 LD 在驱动电流 120 A 时单条峰值功率 100 W,脉宽 200 μs ,总的泵浦单脉冲能量为 1200 mJ,在注入电流为 120 A 时,获得 1064 nm 激光最大单脉冲能量输出 375 mJ,光-光转换效率为 31.3%,并且无饱和现象出现,这说明继续增加注入能量可以获得更高的单脉冲能量输出。采用 Spiricon 公司的 LBA-712PC-D 型号光束质量分析仪测得 1064 nm 激光输出的远场光束质量如图 10 所示,在水平和垂直方向光束质量 M^2 因子约为 3.2。通过移动刀口法测得远场光束发散角小于 3 mrad,为近基模输出。

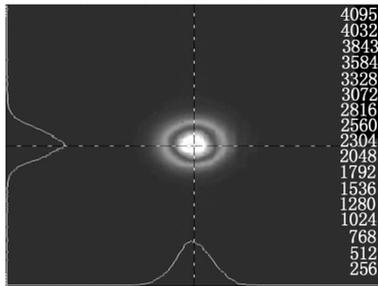


图 10 1064 nm 激光光束质量

实验结果表明,采用双拱形 LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 的泵浦结构,利用泵浦光分布高斯模型的模拟分析选取适当的结构参数,可以获得较高的单脉冲能量输出和较好的光束质量,与理论分析结果基本相符。

5 结论

本文利用泵浦光分布的高斯模型,对双拱形 LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的泵浦光分布均匀性进行了模拟,分析了泵浦结构各参量对泵浦光分布均匀性的影响。通过实验测试了激光器的单脉冲输出能量和远场光束质量,实验结果证实了数值模型模拟结果的正确性。运用高斯数值模型模拟结果得出的分析理论,可以在实践中根据具体的技术指标,为 LD 侧面泵浦全固态激光器的结构优化设计

和实验研究提供理论参考。

参考文献:

- [1] Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. IEEE J of Quan Elec, 1988, 24(6): 895 - 912.
- [2] 任国光, 黄裕年. 战术高能激光武器的发展现状和未来 [J]. 激光与红外, 2002, 32(4): 211 - 217.
- [3] 曹洪忠, 檀慧明, 王保山, 等. LD 端面泵浦 Yb:YAG/LBO 525nm 绿光激光器 [J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 117 - 119.
- [4] 林洪沂, 檀慧明, 田玉冰, 等. LDA 端面泵浦声光调 Q Yb:YAG 1.03 μm 激光器 [J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 25 - 27.
- [5] Junqing Meng, Weibiao Chen, Xia Hou, et al. Comparison of different side-pumping configurations for high power laser diode pumped solid-state laser [J]. Chin. Opt. Lett., 2003, 1(9): 538 - 540.
- [6] 毕进子, 陈卫标, 余婷, 等. 激光二极管侧面抽运调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器 [J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 488 - 489.
- [7] Wenjie Xie, Sui-chung Tam, Yee-loi lam, et al. Influence of the thermal effect on the TEM₀₀ Mode output power of a laser-diode side pumped solid-state laser [J]. Applied optics, 2000, 39(30): 5482 - 5487.