

激光二极管环形侧面抽运 YAG 激光器抽运光场分布研究

陈薪羽 金光勇 王超 于永吉 郭家喜 王奕博

(长春理工大学理学院激光技术研究所,吉林 长春 130022)

摘要 为了改善激光二极管(LD)侧面抽运固体激光器的光束质量,提高 TEM_{00} 模提取效率,提出了一种 LD 环形阵列侧向非均匀抽运方式。采用交错放置的两个半环形 LD 阵列(LDA)侧向直接抽运两根串接的激光棒,非抽运面进行热传导冷却。将 LD 面阵发出的光做高斯光束处理,利用高斯光束通过光学系统的变换规律,通过计算机模拟,研究了 LDA 环形侧向非均匀抽运条件下 Nd:YAG 的抽运光场均匀性,分析了抽运距离、工作物质吸收参数对抽运光场分布的影响。

关键词 激光技术;激光二极管;环形侧面抽运;抽运光场分布;模拟计算

中图分类号 TN248.1

OCIS 140.3480 140.3530 140.3580 140.5560

文献标识码 A

Pumping Light Distribution of Laser Diode Arched Side-Pumped YAG Laser

Chen Xinyu Jin Guangyong Wang Chao Yu Yongji Guo Jiayi Wang Yibo

(Institute of Laser Technology, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract In order to improve the beam quality of laser diode (LD) side-pumped solid laser and increase the efficiency of mode TEM_{00} , a ring LD arrays (LDA) non-uniform pumping mode was reported. Two crisscross semicircular LDA were used to side pumped two laser rods and were cooled by heat conduction at the other face. The optical rays from LDA were regarded as Gaussian beam approximately. With computer modeling in the conveyable regulation of Gaussian light, the pumping uniformity characteristics in crisscross semicircular LDA non-uniform side-pumped Nd:YAG laser were studied. The influences of pumping uniformity was analyzed at different distances and absorption coefficients.

Key words laser technology; laser diode; arched side-pump; pumping light distribution; analog calculation

1 引言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器具有体积小、寿命长和高效可靠等优点,已经成为固体激光器发展的主流方向,具有十分广阔的发展前景^[1,2]。LD 抽运固体激光器最常用的抽运方式是侧面抽运。侧面抽运效率不及端面抽运高,但侧面抽运易于实现大功率抽运和大功率输出,且简单易行。但这种抽运方式难于实现 LD 抽运模式和激光振荡模式的良好匹配,往往为多模输出,光束质量较差。

为了改善光束质量,提高 TEM_{00} 模提取效率,提出了 LD 阵列(LDA)环形侧向非均匀抽运方式。采用交错放置的两个半环形 LDA 侧向直接抽运 2 根串接的激光棒,并在其非抽运面进行热传导冷却,此时抽运光

收稿日期:2009-09-29;收到修改稿日期:2009-12-25

基金项目:吉教科合字 2007-36 资助课题。

作者简介:陈薪羽(1986—),女,硕士研究生,主要从事激光物理与新型激光器、非线性光学频率变换技术等方面的研究。

E-mail: jycxy0101@163.com

导师简介:金光勇(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事激光物理与新型激光器等方面的研究。

E-mail: jgycom@163.com

在激光介质的任何一个截面的分布都是非均匀的。但两个半环形 LDA 侧向非均匀抽运条件下出现的增益不均匀的现象由于交错放置进行了互补,实现输出激光的增益均匀化,有利于增大能量,提高效率和改善光束质量^[3~7]。本文利用抽运光分布的数学模型,通过计算机模拟,研究并讨论了这种抽运模式下各参量对抽运光分布均匀性的影响,为 LD 侧面抽运全固态激光器结构优化提供参考。

2 数值计算模型

LD 发出的光束在高斯近似下,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 $35^{\circ}\sim 42^{\circ}$ 。在侧面抽运下,由于在晶体棒横截面的抽运光分布为主要考虑对象,因此忽略慢轴方向的束散。抽运光强近似于角度的空间高斯分布可表示为^[8~10]

$$P(\theta) = A \exp(-\theta^2 / \theta_{1/2}^2), \quad (1)$$

式中 $\theta_{1/2}$ 为束散角 θ_{\perp} 的半峰全宽, A 为功率归一化常数,可表示为

$$A = P_0 / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(-\theta^2 / \theta_{1/2}^2) d\theta, \quad (2)$$

式中 P_0 为单位长度发光阵列的发射光功率。

因此计算激光介质抽运光强吸收分布的模型可简化为计算激光介质在 xy 横截面上的吸收分布。将激光介质横截面进行网格离散化,每个单元网格光功率为

$$P_{mn} = P_{in-out} = P_{in} [1 - \exp(-\alpha l)], \quad (3)$$

式中 α 为激光介质的吸收系数, P_{in} 为进入该单元网格的抽运光功率,也是上一个单元网格的出射光强, P_{out} 为该单元网格的出射光强,也是进入下一个单元网格的入射光强, l 为光线在每一个单元网格中的路径长度,且

$$l = \sqrt{(x_{out} - x_{in})^2 + (y_{out} - y_{in})^2}. \quad (4)$$

对激光介质内的每一条入射光线,追迹计算每一格激光介质对入射光功率的吸收,所有光线叠加的结果就是激光介质对抽运光的吸收分布,如图 1 所示。

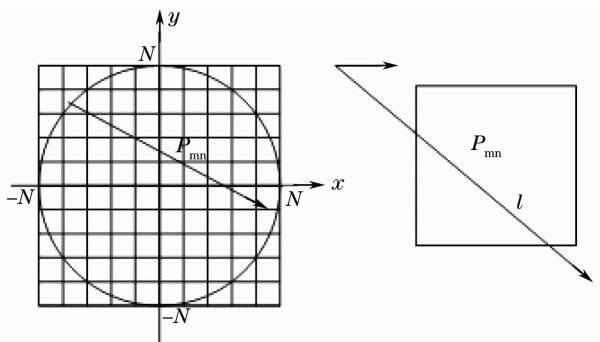


图 1 网格剖分示意图

Fig. 1 Graph of calculating grid model

3 数值模拟及结果分析

半环形 LDA 侧面抽运模块结构如图 2 所示。Nd:YAG 晶体的非抽运面采用钢焊的方法焊接在半环形金属热沉中,采用两个抽运模块交错对称抽运双棒串接的 Nd:YAG 晶体。两个抽运模块所产生的光场分布相互补充,从而使激光输出的空间分布近似为半圆形,获得较高的光束质量。抽运源采用单条峰值功率 100 W,抽运脉宽 200 μ s 的 LDA,将阵列封装在 LDD 紫铜热沉上的半环形中。每个半环形内封装 30 条 LDA。模拟选取两根 $\phi 4$ mm \times 36 mm 的 Nd:YAG 晶体,掺杂原子数分数为 1.1%,吸收系数 α 为 3.2 cm⁻¹。为了抑制晶体自发辐射效应的产生,将晶体的表面进行了打毛处理。LD 发光面与 Nd:YAG 中心的距离 d 分别为 2.5, 3.0, 3.5 mm。

根据所选用的 LD 厘米条参数,当 LD 厘米条发光面与激光晶体棒中心的距离 d 取不同的值时,激光晶体吸收抽运光能量的三维分布情况如图 3 所示。比较图 3 中的各图可以看出,随着抽运距离 d 值的增大,切向横截面内抽运光分布的均匀性呈逐渐均匀的趋势。通过多次模拟表明,在抽运距离 $d \leq 3$ mm 情况下,这种变化较为明显。而当 $d > 3$ mm 时,均匀性的变化呈逐渐放缓的趋势。这是因为随着抽运距离的增大,越来越多的光线需要经过边缘反射,导致抽运吸收更均匀。但是另一方面,

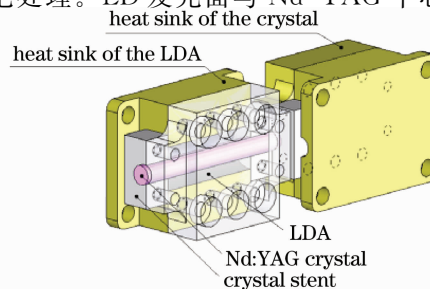


图 2 LDA 环形侧向均匀抽运模块截面图

Fig. 2 Cross section of LDA uniformly side-pumped module

随着距离的增大能量损耗也必然增加,因此激光晶体对抽运光的吸收率变低。

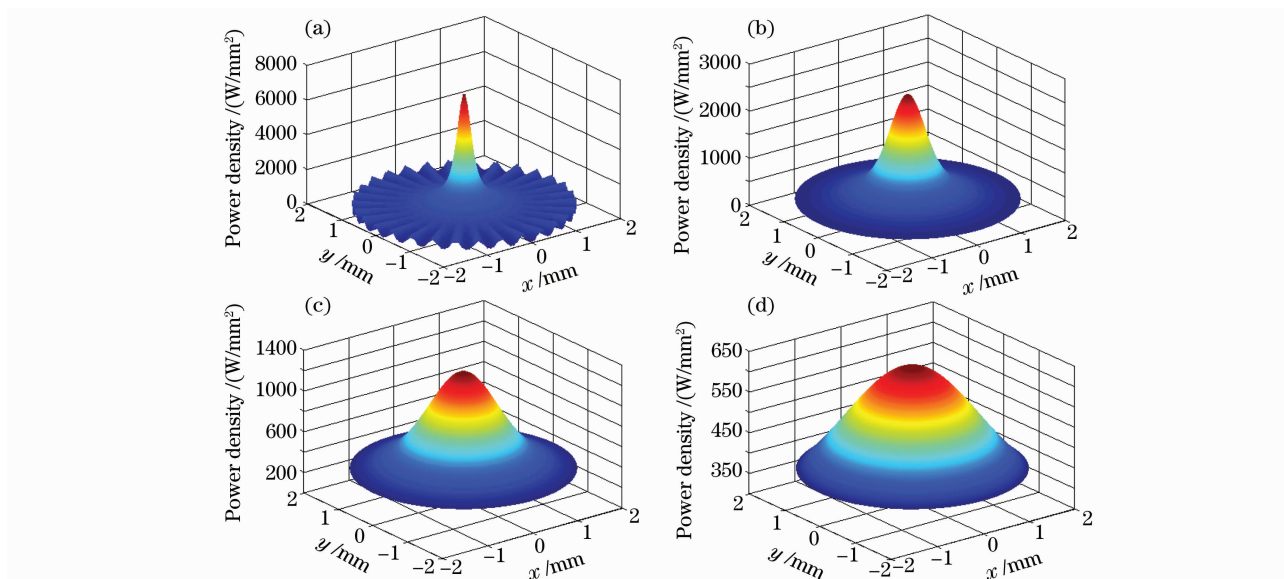


图3 LDA 环形侧面抽运 Nd:YAG 激光器抽运光分布图。(a) $d=2.5$ mm, (b) $d=3$ mm, (c) $d=3.5$ mm, (d) $d=4$ mm
Fig. 3 Pumping intensity distribution in double-arched LDA side-pumped Nd:YAG laser. (a) $d=2.5$ mm, (b) $d=3$ mm, (c) $d=3.5$ mm, (d) $d=4$ mm

在激光器设计中,由于不同的横模占据着不同切向横截面区域,不均匀的抽运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。而基模振荡区直径一般在 $1.5\sim 2$ mm 之间,可以通过适当改变 LD 厘米条发光面与激光晶体棒中心的距离,使激光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,基于仿真的结果,将双半环形 LDA 的发光面距离激光晶体棒中心的距离设定在 3.5 mm。

下面探讨影响抽运光分布的一个重要因素:晶体棒的吸收系数。Nd:YAG 的掺杂浓度不同时其吸收系数会发生改变,选取抽运距离 $d=3.5$ mm,吸收系数分别为 $\alpha=0.3, 0.6, 0.9$ mm^{-1} 时,利用抽运光分布的物理模型,得到如图 4 所示的二维光场分布模型图。

比较图 4 中的各图可以看出,当工作物质掺杂浓度较高,吸收系数较大时,吸收的抽运能量相对要多一些,但晶体棒中心的能量分布明显要高于边缘部分,中心分布近似成高斯形状,这种情况下如果掺杂浓度适当,有利于激光基模的振荡。当工作物质掺杂浓度较低,吸收系数较小时,吸收的抽运能量相对要少一些,但整体能量分布的均匀性更好。

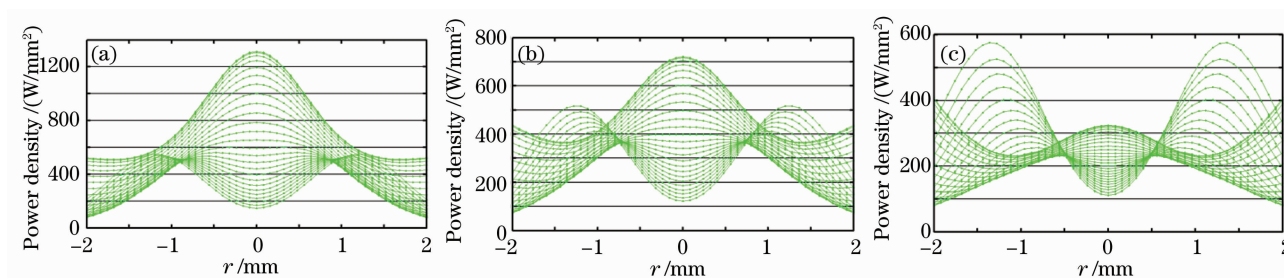


图4 LDA 环形侧面抽运 Nd:YAG 激光器抽运光分布图。(a) $\alpha=0.3$ mm^{-1} , (b) $\alpha=0.6$ mm^{-1} , (c) $\alpha=0.9$ mm^{-1}
Fig. 4 Pumping intensity distribution in double-arched LDA side-pumped Nd:YAG laser. (a) $\alpha=0.3$ mm^{-1} , (b) $\alpha=0.6$ mm^{-1} , (c) $\alpha=0.9$ mm^{-1}

晶体的增益场与基模是否能得到良好的匹配是影响侧面抽运光束质量和转换效率的关键因素。通过前面的计算机模拟,兼顾激光器的各项性能指标,权衡考虑各个参量,选取抽运距离 $d=3.5$ mm,掺杂原子数分数 1% ,吸收系数 $\alpha=0.3$ mm^{-1} ,即掺杂钕原子数分数为 1.1% 的 Nd:YAG 激光晶体作为工作物质。

实验模拟的 Nd:YAG 激光晶体棒的半径分别为 $2, 2.5, 3$ mm,掺杂原子数分数为 1.1% ,吸收系数约为

0.3 mm^{-1} 。LD 厘米条发光面与 Nd:YAG 激光晶体棒中心的距离 d 为 3.5 mm ，发散角半峰全宽为 20° ，模拟图如图 5 所示。

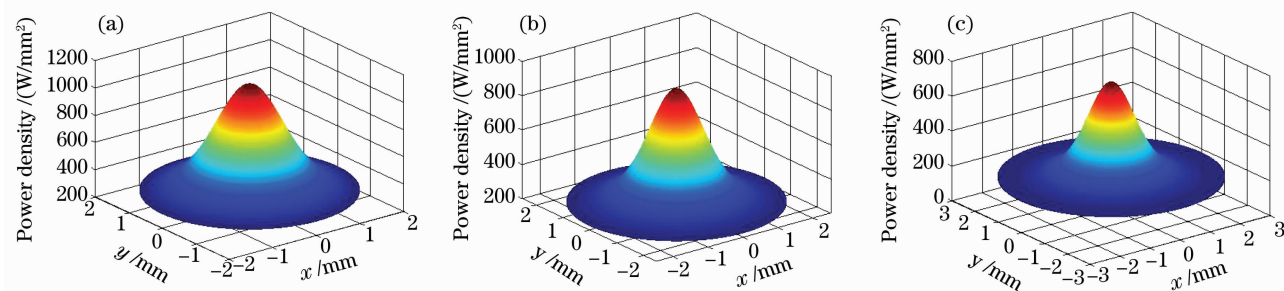


图 5 LDA 环形侧面抽运 Nd:YAG 激光器抽运光分布图。(a) $r=2 \text{ mm}$, (b) $r=2.5 \text{ mm}$, (c) $r=3 \text{ mm}$

Fig. 5 Pumping intensity distribution in double-arched LDA side-pumped Nd:YAG laser. (a) $r=2 \text{ mm}$, (b) $r=2.5 \text{ mm}$, (c) $r=3 \text{ mm}$

由图 5 可以看出,随着激光晶体棒半径的增加,激光晶体棒边缘处的抽运光分布明显增加,造成了激光晶体棒吸收的抽运光越来越多地集中在棒的边缘部分,吸收均匀性变差。综合考虑我们选择半径为 2 mm 的激光棒,激光基模直径一般不会超过 2.0 mm ,而且较细的激光棒也比较容易得到均匀的冷却。

激光晶体的增益场与基模是否能得到良好的匹配是影响侧面抽运光束质量和转换效率的关键因素。依据激光器的性能指标,权衡考虑各个参数,考虑两个 LD 厘米条直线排布间距和激光晶体机械封装要求等因素,确定激光晶体掺杂原子数分数为 1.1% ,吸收系数 $\alpha=0.32 \text{ mm}^{-1}$,激光晶体棒半径 $r=2 \text{ mm}$,长度 $l=36 \text{ mm}$,抽运距离 $d=3.5 \text{ mm}$,等间距环绕晶体棒的 LD 厘米条数量 $n=15$ 。激光晶体内吸收抽运光能量的分布情况如图 6 所示。

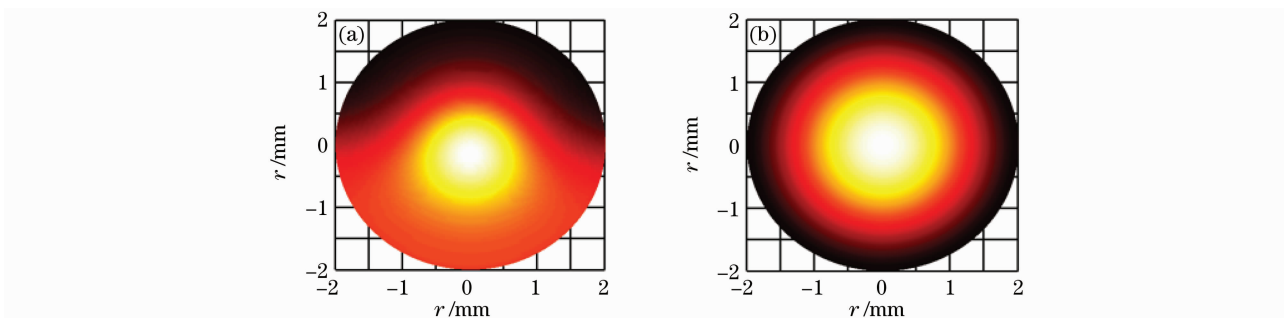


图 6 (a) 半环形; (b) 双半环形 LDA 侧面抽运模块抽运光分布情况 ($d=2 \text{ mm}$, $\alpha=0.32 \text{ mm}^{-1}$)

Fig. 6 Pumping intensity distribution in (a) single-arched, (b) double-arched LDA side-pumped Nd:YAG laser ($d=2 \text{ mm}$, $\alpha=0.32 \text{ mm}^{-1}$)

从图 6 中可以看出,由于两个半环形 LDA 侧面抽运模块的交错对称抽运结构,明显地改善了单个半环形 LDA 侧面抽运模块带来的不对称性,激光晶体对抽运光的吸收基本上呈现均匀分布,激光晶体内的增益场与谐振腔基模实现了良好的匹配,能够获得良好的光束质量。

当考虑基模输出时,由于基模振荡区直径在 $1.5 \sim 2 \text{ mm}$ 之间,可以通过适当提高晶体的掺杂浓度,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。但这种晶体中心呈高斯状凸起的能量分布,由于边缘相对较少的能量吸收,势必将会在晶体棒边缘形成热透镜效应,这对输出激光的转换效率和光束质量都会带来严重影响。而由图 6 可知,这种不采用任何光学组件直接抽运的方式同样可以获得较好的抽运均匀性,尽管整棒的抽运光都是均匀分布的,但是可以通过改变腔型结构,在腔中加入选模器件等方法获取基模激光输出。而且,这种整棒抽运光均匀分布相对中心呈高斯状凸起的分布边缘的能量吸收更均匀,热透镜效应更小,更有利于提高输出激光的转换效率和光束质量。

4 结 论

建立了 LD 环形侧面抽运全固态激光器抽运光分布的高斯模型。运用该模型通过计算机模拟,分析了抽运距离及工作物质吸收系数以及工作物质的半径对工作物质内抽运光分布均匀性的影响,为 LD 侧面抽运全固态激光器结构优化提供了参考。

参 考 文 献

- 1 She Hui, Tan Sheng. Development and application prospects of high energy laser weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 267~271
余 辉, 谭 胜. 高能激光武器的发展和应用前景[J]. 红外与激光工程, 2002, **31**(3): 267~271
- 2 Ren Guoguang, Huang Yunian. The present status and future of the tactical laser weapons[J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(4): 211~217
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 R. Beach, P. Reichert, W. Benett *et al.*. Scalable diode-end-pumping technology applied to a 100 mJ Q-switched Nd³⁺: YLF laser oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1326~1328
- 4 Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun *et al.*. Gain distribution characteristics in working midium side-pumped by diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 57~62
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
- 5 Junqing Meng, Weibiao Chen, Qiquan Hu. 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 Wang Chunyu, Zhu Xiaolei, Lu Yutian. Pumping intensity distribution in LDA side pumped solid state lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 961~965
王春雨, 朱小磊, 陆雨田. LD 侧面抽运固体激光器抽运光分布模拟[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 961~965
- 7 Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang *et al.*. Study on uniform of pump distribution in a LD side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 390~394
宁继平, 蔡志强, 陈志强 等. LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器抽运均匀性研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(4): 390~394
- 8 Yang Aifen, Bu Yinghua, Chen Dedong *et al.*. Characteristic of liner LDs side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 633~640
杨爱粉, 卜英华, 陈德东 等. 线阵激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器特性研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 633~640
- 9 Cai Zhiqiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. Simulation of absorbed power and temperature distribution in LD side pumped laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(11): 1305~1310
蔡志强, 姚建铨, 温午麒 等. LD 侧泵激光器抽运光和温度分布数值研究[J]. 光电子·激光, 2004, **15**(11): 1305~1310
- 10 Zhao Cunhua, Fan Zhongwei. The numerical calculation of a diode side-pumped solid-state laser[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(4): 404~406
赵存华, 樊仲维. 一种 LD 侧面抽运固体激光棒光线追迹的数值计算[J]. 激光技术, 2005, **29**(4): 404~406