

# LD 侧面泵浦结构对增益分布特性的影响分析

李久喜, 金煜坚, 王鹏飞

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘要:**通过光线追迹软件模拟及 Matlab 数据处理,从激光工作物质截面内吸收能量与所需面积关系方面对比分析了半环形结构激光二极管泵浦与类梯形结构激光二极管泵浦方式下增益分布特性的差异。通过理论计算及实际测量得出类梯形结构二极管泵浦情况下激光晶体内的增益分布更为均匀。

**关键词:**侧面泵浦;增益分布;光线追迹;泵浦均匀性

**中图分类号:** O59    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.009

## Analysis of effect of pumping structure on gain distribution characteristics in side-pumped working medium

LI Jiu-xi, JIN Yu-jian, WANG Peng-fei

(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The characteristics of the pumping light distribution in working medium side-pumped by diode bars with different pumping structure is analyzed in this paper. With computer modeling and experimental test, the gain distribution characteristics in the working medium side-pumped by two different pumping structures is discussed by means of studying the proportion relationship between the absorbed pumping energy and the area needed. The comparison result illustrates that the homogeneity of the pumping light distribution in working medium is better in quasi-trapezoid diode structure.

**Key words:** laser diode side-pumped; gain distribution; ray tracing method; pumping homogeneity

### 1 引言

无水冷的二极管侧面泵浦激光器具有体积小、质量轻、结构紧凑及易于实现较高功率泵浦的优点。在工程应用中,由于激光工作物质需要及时散掉所产生的热量,激光二极管往往在激光工作物质的一侧进行泵浦,而另外一侧则通过热沉以传导冷却的方式进行散热。由于这种散热结构的限制,二极管侧面泵浦情况下工作物质截面内增益分布难以达到较理想的均匀分布。尽管如此,我们还是需要找到更好的增益分布,改善与谐振腔模的空间匹配,从而得到更好的光束质量。

国内外研究表明,二极管侧面泵浦条件下,工作物质增益分布与泵浦结构有很大关系,通过对泵浦结构的合理设计及优化,能够在很大程度上改善工

作物质中的增益分布特性,保证高光束质量激光输出<sup>[1-2]</sup>。本文通过对二极管侧面泵浦条件下工作物质内增益分布特性的研究,对比分析了半环形泵浦结构与类梯形泵浦结构下增益分布特性的差异,最终通过采用分布均匀性较好的泵浦结构获得了高光束质量激光输出。

### 2 二极管阵列泵浦数学模型

激光增益介质对泵浦光的吸收对应着介质内的增益分布。通常,单条 LD 在平行于 p-n 结方向发散角为 10°左右,因其发光面较长,故入射到激光晶体上一般成均匀分布;在垂直于 p-n 结方向发散角

**作者简介:**李久喜(1979-),男,硕士,工程师,从事半导体二极管泵浦激光器技术研究工作。E-mail: lijixi@sina.com

**收稿日期:**2011-02-23; **修订日期:**2011-07-06

为  $40^\circ \sim 60^\circ$ <sup>[3]</sup>, 且呈高斯分布。那么单条 LD 在垂直于 p-n 结方向上发射的光功率分布为<sup>[4]</sup>:

$$P(\theta) = A \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_{1/2}^2}\right)$$

其中, 功率归一化系数:

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

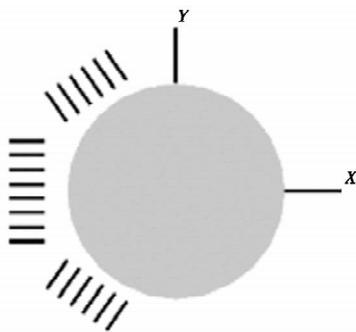
式中,  $P_0$  为单位长度发光线列的发射光功率;  $\theta_{1/2}$  为垂直于 p-n 结方向发散角的半宽。

工作物质对泵浦光的吸收可表示为:

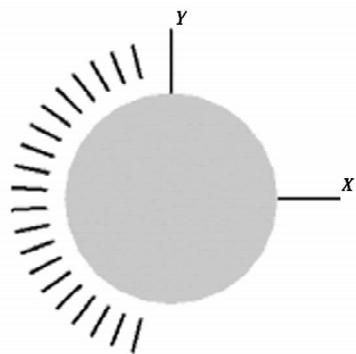
$$P_{ab} = P_{in} [1 - \exp(-\alpha l)]$$

其中,  $P_{in}$  为泵浦光入射光功率;  $\alpha$  为工作物质的吸收系数;  $l$  为泵浦光在晶体中的吸收距离。对于多阵列多向泵浦的情况, 可通过坐标轴变换得到每个线阵在同一点的光强分布, 再进行叠加。

本文对两种泵浦结构下的增益分布进行模拟, 如图 1(a)、图 1(b) 所示。一种由 20 条 bar 组成类梯形 LD 阵列, 另一种则由相同数量 bar 组成半环形阵列。工作物质采用直径为 6 mm 的 Nd:YAG 晶体, 二极管距离晶体侧面最近处 0.5 mm, LD 快轴发散角  $60^\circ$  且呈高斯分布。



(a) 类梯形 LD 阵列泵浦结构图



(b) 半环形 LD 阵列泵浦结构图

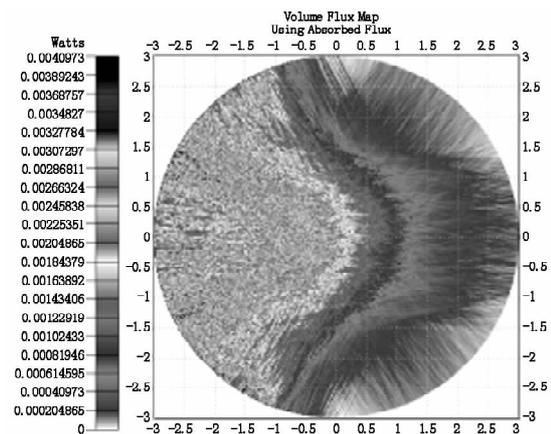
图1 LD 阵列泵浦结构图

### 3 两种泵浦结构下的增益分布特性及数据分析

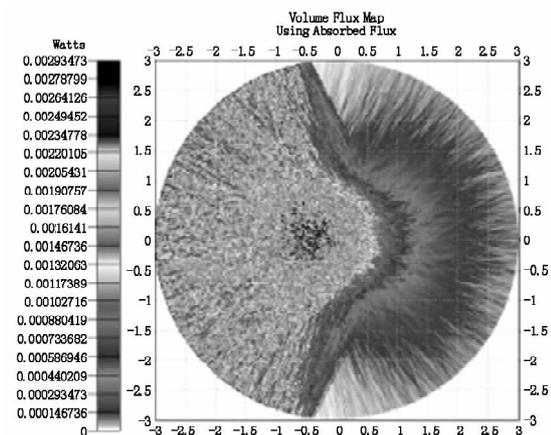
工作物质内增益分布特性实际上是指工作物质内各区域间增益分布的相对大小, 它只与二极管泵

浦结构参量和工作物质的吸收系数有关, 而与泵浦功率无关。泵浦功率的大小只会影响工作物质内各区域增益的绝对大小, 而不会改变工作物质内各区域间增益的分布的相对大小, 也就是说不会改变工作物质内的增益分布特性。所以可以在光线追迹软件 TracePro 中自由设定 LD 的泵浦功率值, 最后考虑其吸收能量分布。

用光线追迹软件 TracePro 对以上两种侧面泵浦结构下的晶体截面吸收强度进行了模拟。整个模型简化为只计算激光棒在横截面内的吸收分布。将激光工作物质的横截面进行网格离散化, 计算时每一网格单元的值代表了单元面积内激光介质吸收的泵浦光能量的相对值, 所有网格单元的值共同表征了激光介质对泵浦光能量的吸收。模拟结果如图 2(a)、图 2(b) 所示。



(a) 类梯形 LD 泵浦光强分布

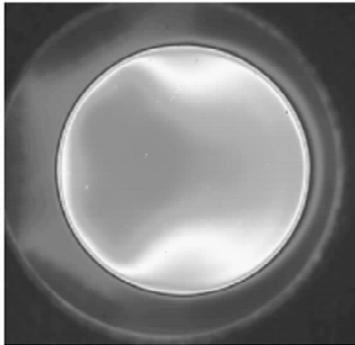


(b) 半环形 LD 泵浦光强分布

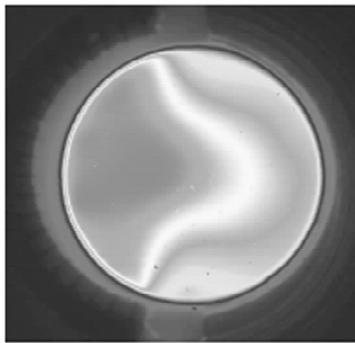
图2 LD 泵浦光强分布图

由于在工作物质中增益越高的区域自发辐射和受激辐射就越强, 产生的荧光强度也越大。因此, 可以通过测量工作物质的荧光分布特性比较直观地研究工作物质的增益分布特性。图 3(a)、图 3(b) 分

别为 Spricon 光束分析仪实际拍摄的两种不同泵浦结构下的荧光分布图,可以看出模拟结果与实际增益分布有一致的分布特点。



(a) 类梯形 LD 泵浦荧光分布



(b) 半环形模块泵浦荧光分布

图3 LD 泵浦荧光分布图

为了进一步定量描述不同泵浦结构下工作物质截面内吸收强度的特性差异,将激光介质的横截面进行网格离散化,每一网格单元的值代表了单元面积内激光介质吸收的泵浦光能量的相对值,并对生成的数据进行统计分析。

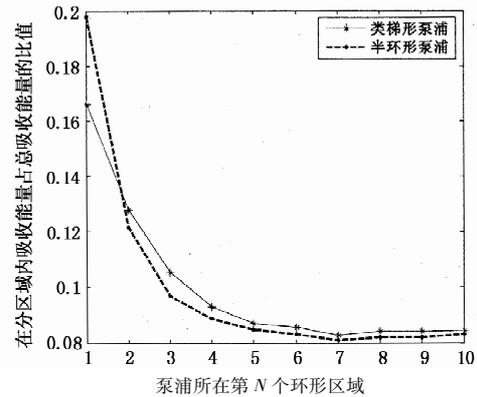
这里对激光晶体截面内增益分布的均匀性分析采用以下两种统计方法:

第一种方法:以晶体截面中心为圆心做  $N$  个面积相等的同心圆环,则沿半径方向每个同心圆面积为整个截面面积的  $1/N, 2/N, \dots, N/N$ 。同时分别计算每个同心圆环内所吸收能量占截面总吸收能量的百分比,既等面积下能量分布情况,从圆心到半径方向,每个圆环区域标记为 No. 1, No. 2,  $\dots$ , No.  $N$ ;

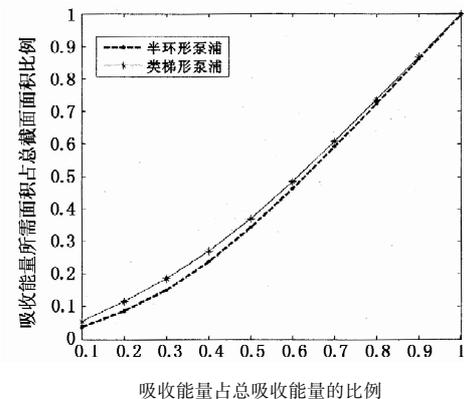
第二种方法:以晶体截面中心为圆心划分  $N$  个圆环区域,统计当区域内所吸收能量占总能量  $1/N, 2/N, \dots, N/N$  时所需要的圆面积占总截面面积的比例,即相同能量下面积分布情况。以上方法从截面面积与所吸收能量关系方面反映晶体截面内能量分布情况。这里选取  $N = 10$  来进行计算分析。

采用第一种方法的计算结果如图 4(a) 所示。可以看出,在半环形 LD 阵列泵浦情况下,靠近晶体

中心区域 10% 面积内内所吸收泵浦光能量更加集中,远离中心区域时所吸收能量则小于类梯形泵浦结构,容易看出环形泵浦结构下对泵浦光更容易产生吸收强点,从图形上看到类梯形泵浦结构下对泵浦光的吸收曲线则更为平滑;第二种方法计算结果如图 4(b) 所示,可以看出从靠近晶体中心区域直至整个激光工作介质截面范围内,吸收同样比例的泵浦光能量,环形泵浦结构下所需要截面面积始终小于类梯形的泵浦结构,同样说明在环形泵浦结构下,泵浦光能量更加集中于晶体截面中心。可以说明类梯形 LD 阵列泵浦下增益分布更为均匀,这样就减小了由于局部较强的激光振荡引起的光学元件损伤的几率,提高激光器的可靠性。



(a) 等环形面积时所吸收能量分布情况



(b) 等吸收能量时所需截面面积变化情况

图4 等环形面积时所吸收能量分布及等吸收能量时所需截面面积变化情况

更为均匀的荧光分布,有利于增大激光振荡模式中低价模体积,从而减小发散角;同时有利于增大激光晶体内部有效激光振荡截面面积,根据 Degnan<sup>[5]</sup>关于主动调  $Q$  方式下谐振腔参数对激光脉冲的影响分析,大的激光振荡截面面积有利于得到较宽的激光脉冲。基于这些特性,我们在实验中采用类梯形 LD 侧面泵浦直径 6 mm Nd:YAG 晶体,采用电光调  $Q$  方式,得到脉冲能量大于 80 mJ, 频率

20 Hz, 发散角小于 2.0 mrad, 脉冲宽度大于 12 ns 的指标, 分别如图 5、图 6 所示, 获得了较好的光束质量。

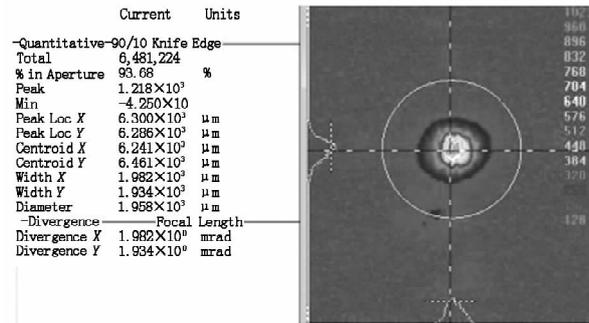


图5 脉冲远场光斑图像

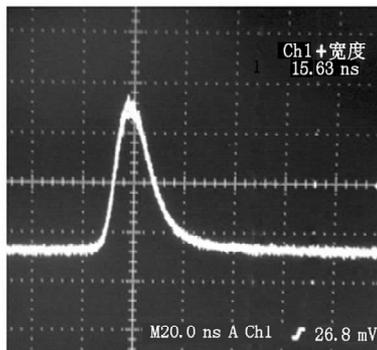


图6 激光脉冲波形

## 5 结论

通过光线追迹方法分析不同泵浦结构下泵浦光场分布的差异, 提出了两种评价侧面泵浦增益分布特性的方法, 从激光工作物质截面内吸收泵浦光能量与所需面积关系方面对其增益分布情况进行计算分析, 得出类梯形结构的 LD 阵列的泵浦结构相比半环形 LD 阵列而言其激光增益介质内的增益分布更为均匀。更均匀的增益分布能够较好地与激光谐振腔低阶模匹配, 增大低阶模振荡体积, 提高输出激

光的光束质量, 减小了光学元件损伤几率。由于在泵浦光分布特性方面目前没有标准统一的评价方法, 以上评价方法直观的描述了泵浦光能量在激光工作介质截面内的分布情况, 同时可以作为其他类似侧面泵浦结构下增益分布的评价方法, 为以后的科研实践提供参考。

## 参考文献:

- [1] Yang Xiaodong, et al. The method and setup for optimizing the configuration of a diode side-pumped module [J]. Laser Journal, 2010, 31(1): 20-21. (in Chinese)  
杨晓冬, 等. LD 侧泵模块结构参数优化实验研究方法  
与装置[J]. 激光杂志, 2010, 31(1): 20-21.
- [2] Chen Xinyu, Jin Guangyong, Wang Chao, et al. Pumping light distribution of laser diode arched side-pumped YAG laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47, 091401. (in Chinese)  
陈薪羽, 金光勇, 王超, 等. 激光二极管环形侧面泵浦 YAG 激光器泵浦光场分布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47, 091401.
- [3] Ning Jiping, et al. Study on uniform of pump distributivity in a LD side-pumped Nd:YAG laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(4): 390-394. (in Chinese)  
宁继平, 等. LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器泵浦均匀性研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 390-394.
- [4] Chen Lin, Hou Xia, Lu Yutian. Analog calculation and evaluation of LDA direct side-pumping [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 825-828. (in Chinese)  
湛霖, 侯霞, 陆雨田. 激光二极管阵列侧面直接泵浦方式的模拟计算和效果评估[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 825-828.
- [5] John J Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser [J]. IEEE J. QE, 1989, 25: 214.