

文章编号: 0258-7025(2009)06-1337-04

高效激光二极管侧面抽运 Nd : YAG 模块

杨晓冬¹ 薄 勇² 彭钦军² 许祖彦² 邵建新³ 陈美华¹ 周 杰¹

(¹嘉应学院物理与光信息科技学院, 广东 梅州 514014; ²中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; ³石河子大学物理系, 新疆 石河子 832003)

摘要 提出了定量表征激光棒内吸收抽运光分布均匀性特征参量——吸收抽运光分布均方根偏差相对值, 利用该参量以及自行编制的光线追迹程序, 定量分析了五向侧面抽运 Nd : YAG 模块内吸收抽运光分布均匀性及耦合吸收效率随激光二极管(LD)Bar 条与 Nd : YAG 棒表面间距的变化规律, 确定了侧面抽运模块优化结构参数; 在此基础上研制了抽运频率为 100 Hz, 占空比为 2% 的侧面抽运 Nd : YAG 模块, 其 808 nm 最大平均抽运功率为 200 W, 1064 nm 短腔最大输出功率为 95 W, 光-光转换效率为 47.5%。

关键词 光学器件; 激光二极管抽运; 侧面抽运 Nd : YAG 模块; 光线追迹; 抽运光分布均匀性

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1337

Highly Efficient Laser Diode Side-Pumped Nd : YAG Module

Yang Xiaodong¹ Bo Yong² Peng Qinjun² Xu Zuyan² Shao jianxin³
Chen Meihua¹ Zhou Jie¹

(¹Scholl of Physics and Optical Information Technology, Jiaying College, Meizhou, Guangdong 514015, China
²Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
³Department of Physics, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract A parameter that quantificationally evaluates the homogeneity of the absorbed pump light distribution in a laser rod is proposed, which is root mean square error relative value of absorbed pump light distribution in the laser rod. By using this parameter and the ray tracing code, the couple efficiency and the pump light distribution homogeneity of a five-fold side-pumped Nd : YAG module for different distance between LD and the side surface of the Nd : YAG rod are quantificationally investigated, and structure parameters are optimized. At 100 Hz and 2% duty cycle, the maximum average pump power of the module at 808 nm is 200 W. Arranging one such pump module in a plane-plane short cavity, 95 W multi-mode laser output at 1064 nm can be delivered. The corresponding optical to optical efficiency is 47.5%.

Key words optical devices; laser-diode pumped; side-pumped Nd : YAG module; ray tracing code; homogeneity of the pump light distribution

1 引 言

激光二极管(LD)抽运固体激光器的抽运耦合结构,对于激光器的输出功率和光束质量有非常重要的作用^[1~4]。在端面抽运、侧面抽运激光棒以及侧面抽运板条这三种主要抽运结构中,侧面抽运激光棒结构具有成本低、结构简单、稳定性好以及能够实现高功率激光输出等显著优点^[1~8]。但在高功率运转时,侧面抽运激光棒内通常存在较为严重的热光效应,从而限制高功率、高光束质量激光的同时获

得。均匀的吸收抽运光分布可以有效减弱激光棒内的热光效应,因此实现均匀的吸收抽运光分布以及较高的耦合吸收效率成为高性能侧面抽运模块设计的关键。为实现这一目标,同时降低侧面抽运模块的研制成本,缩短研制时间,模块设计者通常采用光线追迹程序数值分析激光棒内吸收抽运光分布的均匀性和耦合吸收效率与侧面抽运模块结构参数的关系,确定侧面抽运模块的优化结构参数^[1~3, 9, 10]。但由于缺乏对激光棒内吸收抽运光分布均匀性的定量

收稿日期: 2008-08-12; 收到修改稿日期: 2008-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50590404)和广东省自然科学基金(8451401501000668)资助课题。

作者简介: 杨晓冬(1968—),男,博士,副教授,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: xjyxd@126.com

表征, 研究中无法定量分析抽运耦合结构参数对吸收抽运光均匀性的影响, 模块内吸收抽运光分布的均匀性只能根据数值计算所得到的抽运光分布图片定性判断, 影响了侧面抽运模块的优化设计效果。

为定量研究侧面抽运模块内吸收抽运光分布的均匀性, 提出了表征激光棒内吸收抽运光分布均匀性的特征参量, 利用该参量和自行编制的光线追迹程序, 定量分析了抽运耦合结构参数对侧面抽运 Nd:YAG 模块吸收抽运光分布均匀性和耦合吸收效率的影响。依据计算结果研制了均匀抽运、高效 100 Hz 侧面抽运 Nd:YAG 模块。将此模块作为放大器使用于主振荡级十多级功率放大器 (MOPA) 系统内, 曾获得 100 Hz, 单脉冲能量 5.25 J, 光束质量为 $M^2 = 3.6$ 的高光束质量激光输出, 整个 MOPA 系统的光-光转换效率为 37%^[11]。

2 模块结构

为了保证模块的稳定性以及较高的耦合吸收效率, 侧面抽运模块采用直接耦合结构。图 1 为侧面抽运 Nd:YAG 模块结构示意图。一根长度为 105 mm, 直径为 7 mm 的激光棒位于石英冷却水管中心, 激光棒的掺杂原子数分数为 0.6%; 石英管内径为 8.5 mm, 厚度为 1 mm; 5 个 100 Hz 脉冲 LD Bar 条阵列对称环绕在 Nd:YAG 激光棒周围, 每个 LD Bar 条阵列包含 20 个长度为 10 mm 的脉冲 LD Bar 条 (海特光电有限公司提供)。这 20 个 LD Bar 条在水冷无氧铜热沉表面沿慢轴方向均匀地排列为 4 行, Bar 的慢轴方向与 Nd:YAG 棒的中心轴平行。从激光二极管发射的波长为 808 nm 的抽运光通过石英玻璃水管和冷却水直接进入 Nd:YAG 激光棒。在这种直接耦合结构中, LD 与 Nd:YAG 棒之间没有使用微透镜或导光玻璃块等光学变换元件, 从而减少抽运光在上述光学变换器件表面的菲涅耳反射损耗, 有利于提高模块的抽运耦合效率, 同时也使装置更为简单稳定。为了提高模块的抽运耦合效率, 在 5 个 LD Bar 条阵列的对面, 环绕激光棒对称固定了 5 片铜制镀金反光片, 以将透过 Nd:YAG 棒的抽运光以及在石英管表面和 Nd:YAG 棒表面反射的抽运光重新反射回激光棒。反光片的反光面形状为柱面, 对抽运光的反射率约为 85%。这些铜制反光块还作为模块机械支撑架, 精确固定 LD Bar 条阵列的位置, 以保证棒内抽运光分布的对称性。在重复频率为 100 Hz 时, 单个侧面抽运模块能够发射的最大抽

运光脉冲能量为 2 J, 抽运脉冲宽度为 0.2 ms。

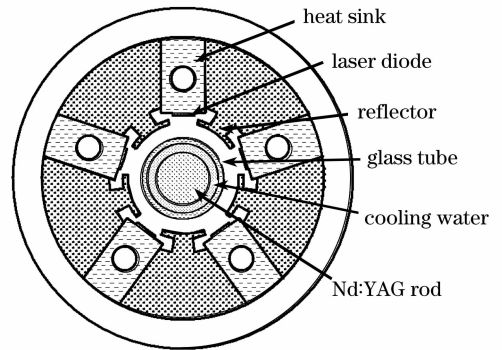


图 1 侧面抽运 Nd:YAG 模块结构示意图

Fig. 1 Schematics of the side-pumped Nd:YAG module

3 光线追迹程序及吸收抽运光均匀性表征参量

LD 发射抽运光为非对称的椭圆形光束, 沿快轴和慢轴方向的全角发散角分别为 $40^\circ, 10^\circ$ (海特光电公司提供数据)。在 LD Bar 阵列中, 沿慢轴方向 LD 排列非常紧密, 相邻 LD 发射的光束在激光棒内互相重合。考虑平均效果并忽略端面效应, 可不考虑沿慢轴方向光束的发散, 假设沿激光棒中心轴方向抽运光强度相同。

在这种模型下, LD Bar 发射的抽运光强度可以表示为以光线快轴方向发散角为自变量的高斯函数, 其表达式为

$$I(\theta) = \frac{\sqrt{2}P_0}{\theta_0 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{2\theta^2}{\theta_0^2}\right), \quad (1)$$

式中 θ 为抽运光束中某条光线与阵列表面法线的夹角, P_0 为 LD Bar 条的平均抽运功率, θ_0 为 LD 发射光束沿快轴方向的半角发散角。数值计算时, 将上述光束很密集地分解为一系列角宽度为 $d\theta$ 的子光束, 每一子光束的功率值可表示为

$$dP(\theta) = I(\theta)d\theta, \quad (2)$$

子光束在激光棒及石英水管表面的传播满足折射定律, 在反光片表面满足反射定律; 为计算激光棒横截面内吸收抽运光的分布, 以激光棒的中心为原点, 将激光棒圆形横截面均匀地划分为 n 个小面元。仿真计算时, 先求出每一子光束单独通过激光棒横截面时, 小面积元 i 所吸收的光功率, 面元 i 吸收的总功率为所有子光束单独贡献给该面元的吸收光功率和。其中, 面元 i 吸收子光束 $dP(\theta)$ 的功率可以表示为

$$dP(\theta)_{\text{abs},i} = dP(\theta)_i [1 - \exp(-\alpha\Delta d)], \quad (3)$$

式中 $dP(\theta)_i$ 为进入面元 i 之前子光束的光功率, Δd

为子光束在面元 i 内的传播距离, α 为 Nd:YAG 棒的吸收系数, 其数值近似与 Nd^{3+} 离子的掺杂浓度成正比。

为了定量分析模块的结构参数对吸收抽运光均匀性的影响, 引入了定量表征吸收抽运光分布均匀性的参量——吸收抽运光分布偏差均方根相对值 (r_{ARMS}), 其定义为

$$r_{\text{ARMS}} = \frac{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{\text{abs},i} - P_{\text{aver}})^2}}{P_{\text{aver}}}, \quad (4)$$

式中, $P_{\text{abs},i}$ 为 Nd:YAG 棒横截面内的面元 i 吸收的总光功率, n 为激光棒圆形横截面内小面元的总数, P_{aver} 为圆形横截面内吸收功率的平均值, 其表达式为

$$P_{\text{aver}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{\text{abs},i}. \quad (5)$$

由 r_{ARMS} 的定义式可以看出, r_{ARMS} 值表征吸收抽运光分布均匀性具有以下两方面的特性:

1) 在抽运功率一定时, r_{ARMS} 值的大小可以定量表征激光棒内吸收抽运光分布的均匀性。由(4)式可以看出, 在确定的抽运功率下, 当激光棒横截面吸收抽运光分布完全均匀时, 各面元吸收的抽运光 $P_{\text{abs},i}$ 都为 P_{aver} , r_{ARMS} 值为 0, 其值最小; 当吸收抽运光分布不均匀时, 激光棒横截面各点吸收抽运光 $P_{\text{abs},i}$ 不相同, r_{ARMS} 不再等于 0, 且横截面内吸收抽运光分布的起伏越大, 均匀性就越差, r_{ARMS} 的值也越大。

2) r_{ARMS} 值不受抽运功率变化的影响, 可以客观表征不同抽运功率条件下, 激光棒内抽运光分布的均匀性。对于抽运结构参数确定的侧面抽运结构, 抽运功率增大, 激光棒内吸收抽运光分布的起伏将增大, 棒内吸收抽运光分布的均方根偏差 $1/n \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{\text{abs},i} - P_{\text{aver}})^2}$ 将随抽运功率成比例增加, 但由于棒内吸收功率分布的平均值 P_{aver} 也将随抽运功率成比例增加, 因此 r_{ARMS} 值保持不变。数值计算结果也表明, 对于固定的抽运结构参数, 抽运功率 P_0 的变化对于耦合吸收效率和 r_{ARMS} 值都不会产生影响。

4 数值计算和实验结果

在图 1 所示的侧面抽运模块中, LD 与激光棒表面间的距离是决定模块的耦合吸收效率以及吸收抽运光分布均匀性的重要因素。研究表明, 当距离增大时, 模块的吸收效率下降, 但激光棒内吸收抽运光的均匀性通常变好。因此确定 LD 与激光棒表面

距离的最佳值, 对提高模块的耦合效率和均匀性有重要的意义。

为了确定 LD 与激光棒表面间的最佳距离, 编写了光线追迹程序, 并计算了耦合吸收效率和 r_{ARMS} 值随 LD 与激光棒表面间距离的变化曲线, 计算结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 随着 LD 与激光棒间距的增加, 吸收耦合效率及 r_{ARMS} 值都下降。当距离大于 6 mm 时, r_{ARMS} 曲线下降趋于平缓, 但吸收耦合效率仍迅速下降。这说明, 在图 1 所示的侧面抽运模块中, 当 LD 与激光棒间距离大于 6 mm 时, 继续增加距离对吸收抽运光分布的均匀性改善不大, 但耦合吸收效率迅速下降。因此, 对图 1 所示的抽运模块, LD 与激光棒表面间的最佳距离为 6 mm, 在此距离下, 模块的抽运耦合效率约为 87%。

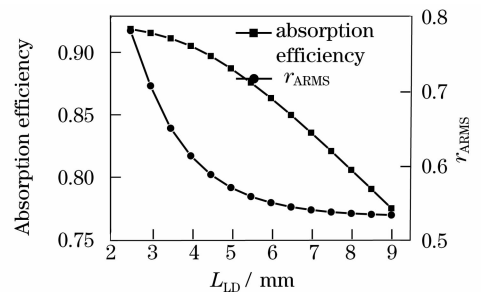


图 2 耦合吸收效率和 r_{ARMS} 值随 LD 与激光棒表面间距离的变化曲线

Fig. 2 Plot of the couple absorption efficiency and r_{ARMS} versus the distance between LD and side surface of the Nd:YAG rod

图 3 给出 LD 与激光棒表面间距离为 6 mm 时, 计算所得激光棒内吸收抽运光分布图片。图 4 为利用 CCD 照相机实验测得激光棒横截面内的荧光强度分布图。从两图中可以看出, 吸收抽运光在激光棒内对称分布, 激光棒中心的吸收抽运光强度略微高于周围激光介质吸收的抽运光强度。比较图 3 和图 4 还可发现, 在图 4 中, 靠近棒边缘的荧光强度起伏较小, 对称性好。在 S. Lee 等的研究中也发现类似现象^[1]。出现上述现象可能是由于激光增益介质所发射的部分荧光经过激光棒侧壁反射成像所造成的。图 4 实际为增益介质发射的荧光照耀激光棒的端面(靠近 CCD 相机的一端)后, 该端面在 CCD 上所成的实像。由于模块内激光棒的实际长度为 105 mm, 增益区距离端面的最短距离大约为 20 mm, 从激光棒内发射的荧光有一部分被激光棒侧壁反射后照耀在激光棒的端面。由于荧光发射方向为任意方向, 这部分荧光照射到端面后无序分布, 最后的平均效果为端面边缘光

强度的起伏变小,对称性变好。

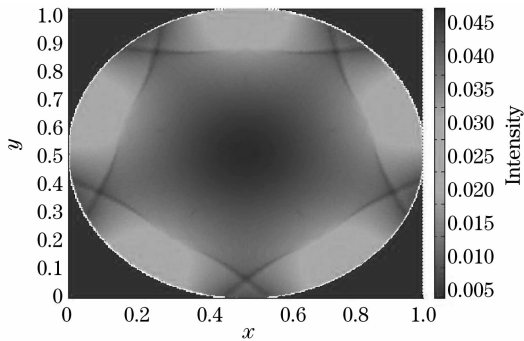


图3 计算所得激光棒内的吸收抽运光分布
Fig. 3 Calculated absorbed pump light distribution in the laser rod

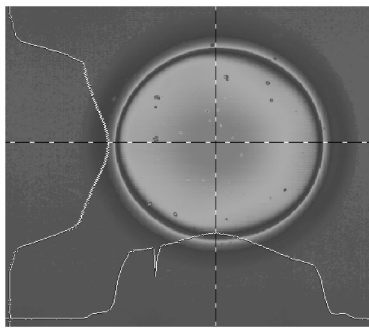


图4 测量所得激光棒横截面荧光强度分布
Fig. 4 Measured fluorescence intensity in the cross section of the rod

LD 侧面抽运模块的短腔多模输出功率可有效表征模块抽运耦合效率以及模块内可提取功率值。实验测量了图 1 所示的侧面抽运模块在平-平短腔内的 1064 nm 多模激光输出功率曲线。平-平腔的腔长为 20 cm, 输出镜透过率为 40%; 测量中, 模块的抽运频率为 100 Hz, 占空比为 2%。测量结果如图 5 所示。从图 5 可得, 多模激光最大平均输出功率为 95 W, 对应的光-光转换效率为 47.5%。将该侧面抽运模块作为多级 MOPA 系统的放大器, 曾获得 100 Hz, 单脉冲能量 5.25 J, $M^2 = 3.6$, 光-光转换效率达 37% 的 1064 nm 高光束质量激光输出^[11]。

5 结 论

提出了定量表征侧面抽运激光棒内吸收抽运光分布均匀性的参量, 编写了研究吸收抽运光分布的光线追迹程序, 定量分析了 LD 侧面抽运 Nd: YAG 模块的吸收效率及吸收抽运光分布均匀性与模块结构参数的关系。在此基础上研制了高性能、高效 LD 侧面抽运 Nd: YAG 模块。将此模块作为多级放大系统的放大器获得 100 Hz, 单脉冲能量为 5.25 J 的高光束质量激光输出。侧面抽运模块的性

能达到预计的设计要求。

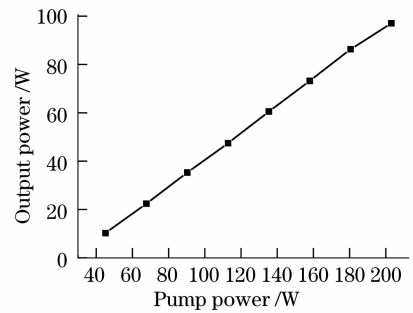


图5 多模激光输出功率曲线
Fig. 5 Plot of multi-mode laser output

参 考 文 献

- 1 S. Lee, S. K. Kim, M. Yun *et al.*. Design and fabrication of a diode-side-pumped Nd: YAG laser with a diffusive optical cavity for 500-W output power [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1089~1094
- 2 J. Yi, H. J. Moon, J. Lee. Diode-pumped 100-W green Nd: YAG rod laser [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(18): 3732~3737
- 3 R. Kandasamy, S. Raghavachari, P. Misra *et al.*. Highly efficient continuous-wave operation of a Nd: YAG rod laser that is side pumped by p-polarized diode laser bars [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(31): 5855~5859
- 4 Xu Haiping, Xu Haiyan, Zhang Pen *et al.*. LD side-pumped Nd: YAG/S-KTP intracavity frequency-doubled high power CW red laser at 660 nm [J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, **28**(3): 332~335
徐海萍, 徐海燕, 张 鹏 等. LD 侧泵 Nd: YAG/S-KTP 腔内倍频高功率 660 nm 连续红光激光器 [J]. *应用光学*, 2007, **28**(3): 332~335
- 5 Tang Chun, Gao Qingsong, Tong Lixin *et al.*. 160 W diode-pumped E-O Q-switched master oscillator power amplifier green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1455~1458
唐 淳, 高青松, 童立新 等. 160 W 激光二极管抽运电光调 Q 主振荡功率放大器绿光激光器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1455~1458
- 6 Wang Jianhua, Jin Feng, Zhai Gang *et al.*. Pump uniformity study of solid state laser rods directly side-pumped by laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(4): 421~426
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
- 7 Yang Tao, Wang Jianjun, Jiang Dongsheng *et al.*. All-solid-state red laser with 83 W output power at 659.5 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1178~1181
杨 涛, 王建军, 姜东升 等. 83 W 659.5 nm 全固态红光激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1178~1181
- 8 Xiaodong Yang, Yong Bo, Qingjun Peng *et al.*. 2277-W continuous-wave diode-pumped heat capacity laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 266~268
- 9 Mao Shaoqing, Huang Tao, Wen Zhongyi *et al.*. Calculation and analyze of homogeneity of diode side pumped solid laser [J]. *Laser Technology*, 1997, **21**(3): 185~188
毛少卿, 黄 涛, 温中一等. 半导体侧面泵浦固体激光器均匀性的计算和分析 [J]. *激光技术*, 1997, **21**(3): 185~188
- 10 Wang Jianjun, Jiang Dongsheng, Zhao Hong. Research on diode side-pumped TEM₀₀-mode lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, **20**(5): 286~288
王建军, 姜东升, 赵 鸿. 二极管侧面泵浦固体激光器 TEM₀₀ 模输出研究 [J]. *激光与红外*, 2000, **20**(5): 286~288
- 11 Peng Qinjun, Yang Xiaodong, Bo Yong *et al.*. 5.25 J, 100 Hz high beam quality diode-pumped solid state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 212
彭钦军, 杨晓冬, 薄 勇 等. 5.25 J, 100 Hz 高光束质量全固态激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 212