

文章编号: 0258-7025(2004)04-0390-05

LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器抽运 均匀性研究

宁继平, 蔡志强, 陈志强, 詹仰钦

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部开放实验室, 天津 300072)

摘要 通过对激光二极管(LD)侧面抽运激光介质的分析研究,建立了二极管侧面抽运激光介质所吸收的抽运光功率分布的数学模型。采用光线追迹法模拟计算出单个二极管在不同抽运参数下直接抽运激光棒时,激光棒所吸收的抽运光功率的分布。比较了介质的吸收系数和二极管到激光棒距离的不同给抽运的均匀性带来的差异。计算了在有冷却系统的条件下,多个二极管阵列抽运时的抽运光功率分布,得到了较好的抽运均匀性。

关键词 激光技术;侧面抽运;光线追迹法;抽运功率矩阵;重叠效率因子

中图分类号 TN 245;TN 248.1 **文献标识码** A

Study on Uniform of Pump Distributivity in a LD Side-Pumped Nd:YAG Laser

NING Ji-ping, CAI Zhi-qiang, CHEN Zhi-qiang, ZHAN Yang-qin

(Photoelectronic Information Science & Technology Laboratory, College of Precision Instrument
& Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A mathematic model of the pump power absorption and distribution in the LD side-pumped solid-state laser medium is set up. The pump power distribution in the single diode directly pumped laser rod with different pumped parameters is simulated using the method of ray trace. The effect of the different active medium's absorption coefficient and distance between the diode and the laser rod on the pump power distribution in the laser rod is studied. The Gauss distribution of the pump power in the multiarray LD side-pumped laser rod is got under the condition of the laser rod with cooling system.

Key words laser technique; side-pumped; method of ray trace; pump power matrix; overlap factor

1 引 言

半导体激光二极管(LD)抽运的固体激光器因其具有的各种优点,得到了广泛的应用。但是,要获得高的能量输出,相对端面抽运^[1]而言,侧面抽运是更好的工作方式。然而在通常情况下,侧面抽运又难于实现 LD 抽运模式和激光振荡模式的良好匹配,往往为多模输出。为了改善侧面抽运情况下的激光光束质量,必须研究激光介质对抽运模式的吸收情况,从而为抽运结构及激光器参数的设计、光束质量及激光输出功率的提高、克服热效应等问题提供研究基础。所以模拟计算抽运光在激光介质中的

均匀性对设计固体激光器具有重要指导作用。本文运用光线追迹法,通过数值模拟,计算出一个典型激光抽运系统激光棒中抽运光的分布情况。

2 理论简化模型

激光棒中增益的分布对应于激光介质对抽运光能的吸收。本文将对激光棒对抽运光能的吸收进行数值模拟计算。要精确计算抽运光在激光介质中的分布,有很多复杂因素,模型复杂,计算的工作量大。因此有必要对物理模型进行简化。

1) LD 发射光谱的简化模型。通常单条 LD 的

收稿日期:2002-12-30;收到修改稿日期:2003-04-14

作者简介:宁继平(1945—),女,天津大学精密仪器与光电子工程学院教授,博士生导师,博士,主要从事光电子技术、光通信器件与技术方面的研究。E-mail:yongshen@public.tpt.tj.cn

发光区域为 $1\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, 其发散角在平行于 $p-n$ 结方向 10° 左右, 因其发光面比较长, 故入射到激光晶体上之后, 一般成均匀分布; 在垂直于 $p-n$ 结方向发散角为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。 $1\ \mu\text{m}$ 相对于激光晶体的尺寸小 3 个数量级以上, 因此把垂直于 $p-n$ 结方向发射的光近似看成点光源发射的光, 且光强呈高斯分布。

设单条 LD 单位长度上发射的光呈高斯分布, 其功率为 P_0 , 把功率在角度方向离散化

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

其中 A 为功率归一化系数

$$\int P(\theta) d\theta = P_0 \Rightarrow \int A \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_{1/2}^2}\right) d\theta = P_0 \quad (2)$$

所以 $A = P_0 / \int \exp(-\theta^2 / \theta_{1/2}^2) d\theta$ 。 $\theta_{1/2}$ 为 LD 光束发散角半宽, 计算中取为 20° 。 在编程计算中, 求 A 时采

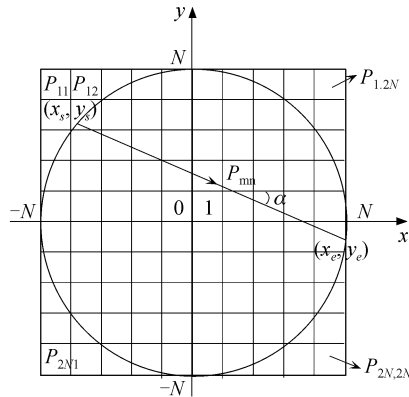


图 1 网格剖分示意图
Fig. 1 Schematic of grid

其中正方形的边长为 1, 实际长度为 $\delta = r_{\text{rod}}/N$, r_{rod} 为激光棒的半径。对棒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。问题的关键是计算光线在每一格晶体中的长度和它所吸收的功率大小。

光线传播方向与 x 轴正方向的夹角为 α , 作如下规定: 以 x 轴为始边, 逆时针旋转到光线, α 为正; 顺时针旋转到光线, α 为负。光线在棒内的起点为 (x_s, y_s) , 终点为 (x_e, y_e) 。因此光线方程为

$$y = y_s + \tan\alpha(x - x_s) \quad (x_s \leq x \leq x_e) \quad (3)$$

单元格 P_{mn} 的坐标范围为

$$\begin{cases} n - N - 1 \leq x < n - N \\ N - m \leq y < N - m + 1 \end{cases} \quad (4)$$

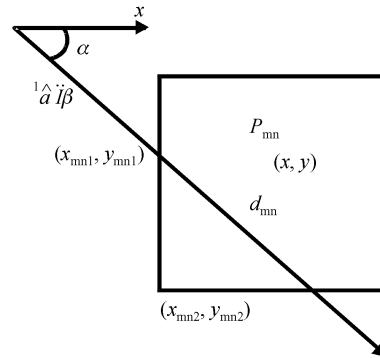
光线与单元格的交点坐标为 (x_{mn1}, y_{mn1}) 和 $(x_{mn2},$

用的方法是将发散角为 60° 的激光在角度方向离散化, 分成很多条近似从点光源发出的携带功率为 $P(\theta)$ 的光线, 故 $A = \Sigma P(\theta)$ 。这样做的目的是将功率 P_0 集中在所采样的光线中发射出去。

2) 仅考虑抽运光入射到 YAG 棒内的情况, 不计在介质表面的反射损耗, 不考虑冷却玻璃管和水对抽运光的反射及吸收损耗。假设光都是折射的, 其中激光介质表面抛光, 镀对 808 nm 的增透膜。为了充分利用抽运光, 在冷却套玻璃管表面镀条状的增透膜和高反膜。

3) 圆周分布的几个二极管阵列按角度均匀排列, 发出的抽运光是一致的。

在以上简化的基础上, 以激光棒截面中心为原点建立直角坐标系, 将截面离散化, 分成正方形小格, 同时构造一个维数为 $2N \times 2N$ 的功率矩阵 P , 如图 1 所示。



y_{mn2})。利用两点距离公式可以计算出该光线在单元格 P_{mn} 的长度 d_{mn} , 于是该单元格所吸收的功率为

$$P_{mn} = P_{mn-in} [1 - \exp(-a_0 \delta d_{mn})] \quad (5)$$

其中 P_{mn-in} 为输入该单元格的光功率, a_0 为激光介质的吸收系数。

根据(3)~(5)式, 可以计算出激光介质对该条光线的吸收功率分布矩阵。所有抽运光线的功率分布矩阵叠加的结果, 就是整个 LD 抽运的功率分布。

3 LD 直接抽运 Nd:YAG 棒的功率分布矩阵

LD 抽运激光棒时, 抽运光为非近轴光线, 引入子午光线(纸平面内即子午面内的非近轴光线)的传播矩阵。利用光线追迹法追迹 LD 发射的子午光

线,按照上面介绍的方法就可以编程计算出 LD 抽运情况下的功率分布矩阵。

3.1 单个二极管直接抽运模型

不加水冷套和光学耦合系统,利用单个 LD 直接抽运 Nd:YAG 棒,结构如图 2 所示。LD 到激光棒的距离为 d_0 , 激光棒半径为 2 mm。

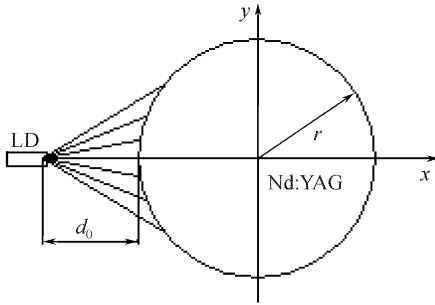


图 2 LD 直接抽运时激光棒的截面图
Fig. 2 Section of a diode-side-pumped laser rod

图 3(a)~(d)展示了在距离 d_0 和吸收系数 a_0 不同时激光晶体吸收的抽运光功率分布图。在吸收系数(掺杂浓度)一定的情况下,如图(a)与(b),可以看出,距离 d_0 越大,抽运分布均匀性越好。但抽运光斑尺寸加大,不利于激光基模振荡,且如果 d_0 过大,有部分抽运能量不能被激光介质所吸收,将导致抽运能量利用率下降,因此 d_0 存在着一个最佳值。

图 3(a)与(c),(b)与(d)为抽运距离一定时的情况。可以看出,掺杂浓度很高时,大部分能量在激光介质的边缘部分就被吸收,棒的中心抽运功率相对较少,使抽运功率的分布很不均匀,另外,过高的浓度也容易引起浓度猝灭问题。然而减小掺杂浓度,激光介质吸收的光能减少,激光输出功率降低,故激光工作物质的掺杂浓度有一个最佳值。因此,必须选择合适的抽运距离、掺杂浓度和激光棒的尺寸。

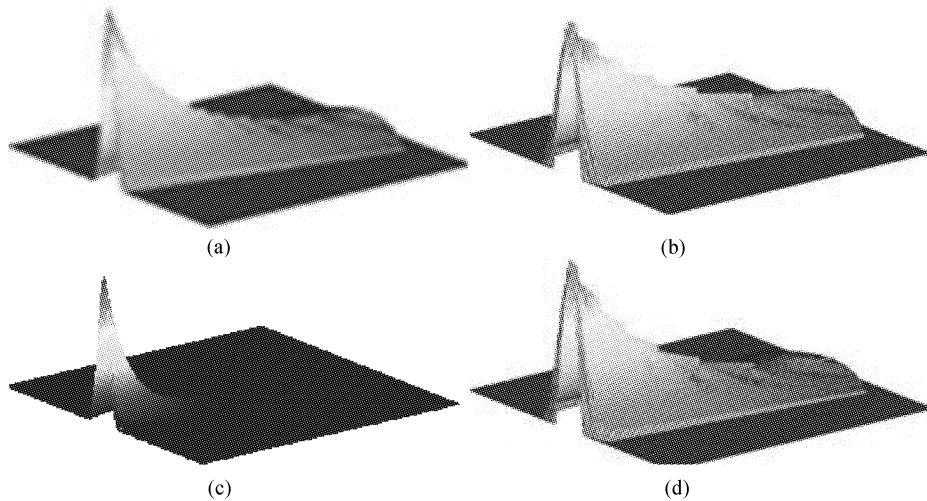


图 3 在不同距离 d_0 , 不同吸收系数下激光晶体吸收的抽运光功率分布图

Fig. 3 Pump distributions in the laser rod cross section for different d_0 and absorptive index a_0
(a) $d_0 = 0.5$ mm, $a_0 = 3$ cm⁻¹; (b) $d_0 = 1$ mm, $a_0 = 3$ cm⁻¹; (c) $d_0 = 0.5$ mm, $a_0 = 20$ cm⁻¹; (d) $d_0 = 1$ mm, $a_0 = 5$ cm⁻¹

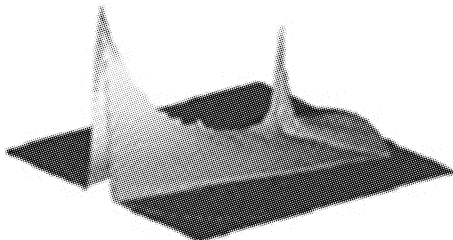


图 4 抽运光功率分布图
Fig. 4 Pump distributions plot in the laser rod cross section

取 $d_0 = 0.5$ mm, $a_0 = 5$ cm⁻¹, 对激光棒在抽运光的入射面镀 808 nm 增透膜, 在对面镀高反膜, 抽

运功率分布如图 4 所示。从图 4 可以看出, 由于激光介质背面对抽运光的高反, 使抽运光在激光介质中形成会聚中心, 该中心具有很高的功率密度, 如果参数选择得当, 有助于抽运功率集中在棒中心, 且能充分利用抽运光能量。

3.2 冷却情况下的抽运功率分布

如图 5 所示, 中心是 Nd:YAG 棒, 外面是壁厚为 1 mm 的冷却玻璃套, 玻璃套到棒的距离为 1 mm。二极管抽运光不经过准直聚焦等光学耦合系统, 直接入射。图 5 展示的是追迹的光线横截面图, 图 6 所示为单个 LD 抽运时的功率分布。计算时取 LD 到玻璃套的距离 $d_0 = 0.5$ mm, 激光介质吸收系

数 $a_0 = 5 \text{ cm}^{-1}$, 激光介质半径为 2 mm, 玻璃的折射率 $n_{\text{glass}} = 1.5$, 水的折射率 $n_{\text{water}} = 1.33$, 棒的折射率 $n_{\text{rod}} = 1.82$ 。从图 6 可以看出, 吸收的功率主要集中在抽运方一侧, 通过激光棒的长度越长, 抽运功率越小。因此, 如果采用更多的二极管阵列从侧面抽运, 棒中心吸收的功率就会因各个二极管阵列抽运的叠加而得到加强。

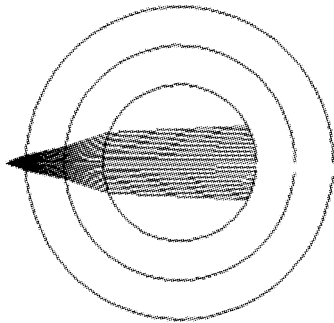


图 5 激光棒截面图

Fig. 5 Schematic of laser rod cross section (inside circle represents laser rod, the ouput two circles cooling tube)

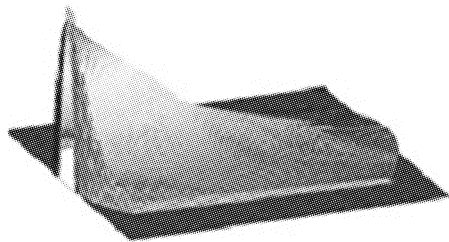


图 6 抽运光分布图

Fig. 6 Pump distribution plot in the cooling laser rod

3.3 多个二极管阵列抽运模型

为了得到尽可能均匀的抽运功率分布, 在安排抽运二极管时应该使二极管沿激光棒均匀放置。采用 5 个二极管阵列同时抽运时, 抽运横截面示意图如图 7。

图 8, 9 是 5 面抽运时激光介质吸收的抽运功率分布和等高线图。图 8 是图 6 在 5 个方向叠加的结果。可以看出, 5 个激光二极管从介质侧面均匀抽运, 使激光棒中心的抽运功率分布近似成高斯形状, 这样有利于激光振荡模的形成和振荡。但在激光棒的边沿抽运光分布不均匀, 有暗区存在。为了充分利用抽运光, 在抽运光的入射区域内, 镀 808 nm 增透膜, 其余部分镀 808 nm 高反膜, 将没有被激光介质吸收的抽运光反射回去, 实现再利用。图中的抽运光斑很大, 半径在 1 mm 左右, 因此激光器要实现

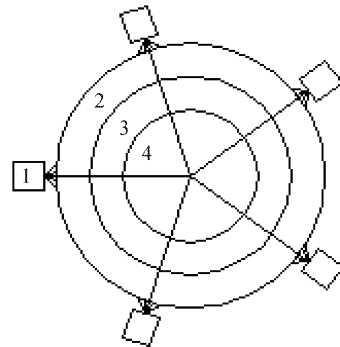


图 7 5 个 LD 侧面抽运结构图

1: 激光二极管阵列; 2: 玻璃管; 3: 冷却水; 4: Nd:YAG 棒

Fig. 7 Schematic of the pump module with five one-dimensional diode stacks

1: LD array; 2: glass tube;

3: cooling water; 4: Nd:YAG rod

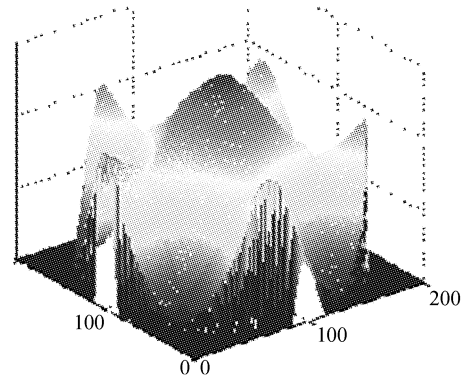


图 8 5 面抽运时激光棒内抽运功率的分布

Fig. 8 Pump distribution plot in the laser rod cross-section with five LD stacks

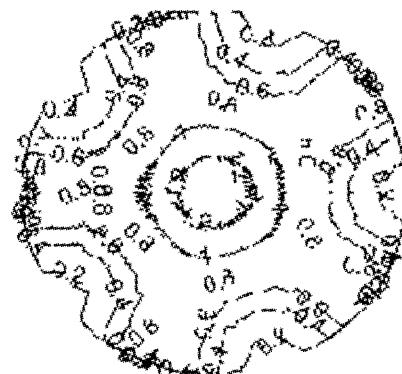


图 9 5 面抽运时的等高线图

Fig. 9 Contour plot in the laser rod cross-section with five LD stacks

单模振荡是异常困难的, 高功率激光输出通常为多模。

为了提高激光介质中心的功率和抽运的均匀

性,如果棒的空间能够容纳的话,也可增加抽运 LD 的数量^[2]。但安排它们的位置时,应尽量避免两个 LD 正对着抽运^[3,4],因为正对着抽运容易因抽运功率吸收不完全引起对面二极管的损坏。因此,在均匀抽运的前提下,抽运 LD 的数量是有一定限制的。

我们计算了 3 个,9 个激光二极管阵列抽运的情况,如图 10,11。比较图 3,6,8,9,10,11,可以看出,激光二极管数量从 1 个增加到 9 个^[5]的过程中,

激光棒中心吸收的功率越来越多,激光棒边缘吸收的功率相对值下降,暗区比原来有明显的减小,抽运的均匀性得到了很大的提高,而均匀性的提高可以减小抽运不均匀产生的热效应。还可以看出,在多个 LD 抽运的情况下,激光棒中心的抽运功率分布近似成高斯形状,这有利于激光基模的振荡。如果在此基础上,充分利用抽运反射光,相信会有更好的均匀性。

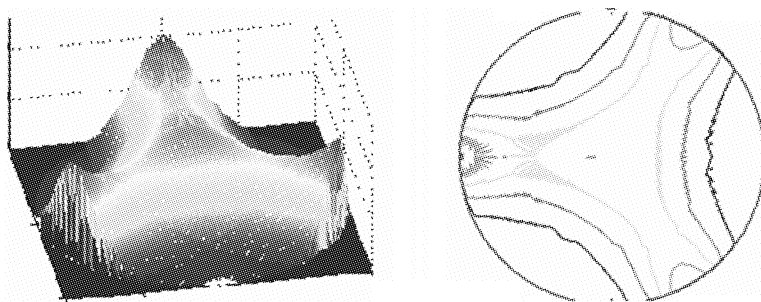


图 10 3 面抽运时的功率分布及等高线图

Fig. 10 Pump distribution and contour plots in the laser rod with three LD stacks

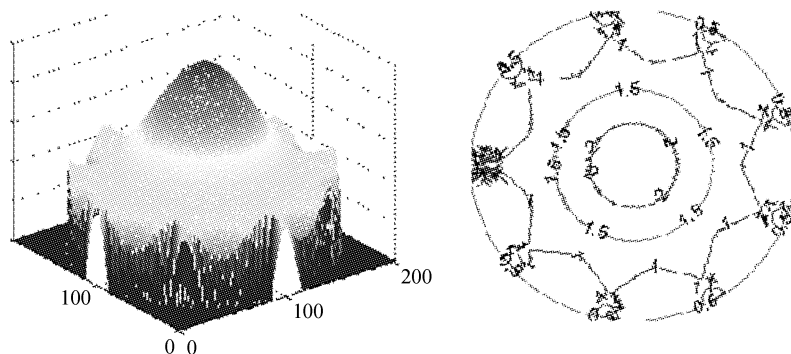


图 11 9 面抽运时的功率分布及等高线图

Fig. 11 Pump distribution and contour plots in the laser rod with nine LD stack

4 结 论

本文建立了半导体激光侧面抽运激光介质中抽运光功率分布的数学模型。模拟计算了均匀分布在激光介质周围的激光二极管数量不同时,抽运光功率在激光介质中的分布情况。讨论了激光介质中掺杂离子浓度,LD 与激光棒之间的距离等参数对抽运功率分布的影响,从而找到高功率 LD 侧面抽运时,获得高光束质量、高功率输出的最佳结构与参数。

参 考 文 献

1 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
- 2 F. Brioschi, E. Nava, G. C. Reali. Gain shaping and beam quality in diode-laser multiarray side-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1070~1074
- 3 Susumu Konno, Tetsuo Kojima, Shuichi Fujikawa *et al.*. High brightness 138 W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2):105~107
- 4 Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto *et al.*. 208-W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10):679~681
- 5 D. Golla, S. Knoke, W. Schöne *et al.*. 300-W cw diode-laser side-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10):1148~1150