

高功率 LD 阵列侧面泵浦激光晶体的增益分布研究

张彪, 杨爱粉, 杨照金, 杨鸿儒
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:研究了 LD Bar 侧面半环形直接泵浦 Nd:YAG 激光增益介质的泵浦光分布特点。建立了不同泵浦参数下棒状增益介质内的泵浦光能量分布数值模型, 通过光线追迹方法, 并利用 Matlab 软件进行了数值模拟计算, 分析了几个泵浦参数对泵浦光分布的影响, 总结了一般的规律, 分析了产生差异的原因, 提出了选取泵浦参数时需注意的问题。可为激光二极管环绕泵浦固体激光器的泵浦结构设计提供理论上的指导。

关键词:半导体激光器; 侧面泵浦; 光场分布

中图分类号: TN243

文献标识码: A

Study of the Pump Uniformity of the Solid State Laser Rods Side-pumped by Laser Diode

ZHANG Biao, YANG Ai-fen, YANG Zhao-jin, YANG Hong-ru
(Xi'an Institute of Applied optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The character of the pumping light distribution in Nd:YAG rod gain medium direct side-pumped by diode bars with half-ring form are studied in this paper. An analytical solution to the radical distribution of the pump light in the rod gain medium is provided based on the different parameters. Through the method of ray trace the simulated numerical calculation and the variation laws are made with the software Matlab, the influence to the distribution of pumping light is analyzed with the parameters of the pumping-structure and shows the laws of the influence, then analyses the reason why the difference occurs, and in the end the principle about how to take those parameters have been suggested. The theory can offer reference to design the solid state laser rods side-pumped by laser diode.

Key words: LD; side pumped; field distribution

1 引言

半导体泵浦固体激光器(DPSL)以其效率高、热效应小、体积小、质量轻、效率高、寿命长、光束质量好、可靠性强等一系列优势,自20世纪90年代开始得到了迅速的发展。DPSL一般采用的泵浦方式有端面泵浦和侧面泵浦两种,端面泵浦装置简单,泵浦光与激光谐振腔的模式匹配情况较好,激光晶体对泵浦光的吸收较为充分,能够较容易的获得低阈值、斜效率高的激光输出。但若获得高功率的激光输出,必须采用更大功率的半导体激光阵列进行泵浦,造成激光系统结构复杂化,所以高功率的DPSL中普遍采用侧面泵浦的结构方式^[1-2]。

高功率侧面泵浦DPSL的结构中,泵浦光由激光介质的侧面直接入射。泵浦光从介质的一侧入射,泵浦结构上的原因往往造成泵浦光分布的不均匀,由于泵浦功率较强,大量的泵浦功率转化为热功率,从而导致在晶体横截面内的温度不均匀分布,产生光学畸变,严重影响到输出激光的光束质量以及输出功率的降低,大大影响了二极管泵浦固体激光器的总体电光效率。

作者简介:张彪(1979-),男,西安应用光学研究所在职博士研究生,工程师,主要从事高功率固体激光器技术研究。E-mail: zhangzhaoxia81@stu.snnu.edu.cn

收稿日期:2008-03-20

因此在大功率 LD 泵浦情况下,如何选取侧面泵浦结构的参数,提高激光器的工作性能有重要实用意义。本文在已有理论的基础上^[3-5],建立了二极管阵列侧面泵浦固体激光介质的光场分布数值模型,采用光线追迹法,计算了 LD 半环形泵浦固体激光介质中泵浦光的光场分布情况,并讨论了几种泵浦参数对泵浦光场分布的影响。

2 LD 阵列侧面泵浦模型

二极管激光器输出的光束呈高斯分布,其慢轴($\theta_{//}$)方向的束散角典型值为 $10^\circ \sim 15^\circ$,快轴($\theta_{\perp}$)方向的束散角典型值为 $35^\circ \sim 45^\circ$ 。由于 LD 阵列发光面尺寸较长(10mm),泵浦光照射到激光介质上,除介质两端外,中间大部分区域上的泵浦光强可认为是均匀分布的。因此,只需计算介质内垂直于介质长度方向上某一截面内的泵浦光分布情况,就可知道整个介质内部的泵浦光分布情况,由于增益介质的增益与泵浦光的吸收成比例,从而可通过模拟泵浦光场的分布来分析增益介质的增益分布。

对于单 Bar 侧面泵浦棒状增益介质的情况已有数值模型,泵浦光在增益介质横截面内的光场分布可用下列方程表示^[6]:

$$I(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{\omega_y(x)} \exp \left[-\frac{2y^2}{\omega_y^2(x)} - \alpha(\sqrt{R_0^2 - y^2} + x) \right] \quad (1)$$

式中, I_0 为泵浦光光强; α 为介质吸收系数; R_0 为增益介质半径; $\omega_y(x)$ 为高斯光束在传播方向上 x 处 y 方向上的半宽度,表达式为:

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

式中, ω_0 为泵浦光的束腰半径; λ 为泵浦光波长。

如图 1 所示,假设 LD 的束腰位于其发射面上,半径为 ω_0 ;LD 距离棒状增益介质的泵浦距离为 a ,介质的横截面曲率半径为 R_0 ,以其横截面的圆心为原点建立直角坐标系,则 $\omega_y(x)$ 的表达式变为:

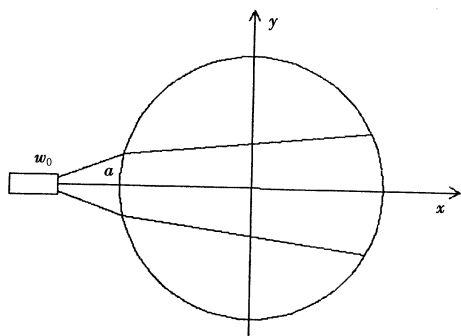


图1 单个 Bar 侧面泵浦棒状介质示意图

$$\omega_y^2(x) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda(a + R_0 + x)}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

光束进入激光介质内部,在介质表面会有部分损耗,则:

$$I_{\text{内}}(x, y) = I(x, y) \cdot T_{\text{透}}(x_0, y_0) \quad (4)$$

其中, $T_{\text{透}}(x_0, y_0)$ 为入射到点 (x, y) 的光线经过介质侧面点 (x_0, y_0) 处时的透射率,其表达式为:

$$T_{\text{透}}(x_0, y_0) = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right] \quad (5)$$

式中, θ_1, θ_2 分别为光线在点 (x_0, y_0) 处的入射角和折射角。

由 LD 发出的光线在介质表面的最大入射角度为 22.5° (以 LD 的最大发散角为 45° 计算),由图 2 可知,LD 发出的光线在介质表面的透过率基本相同,对分析泵浦光在介质的光场分布影响很小,可以忽略。

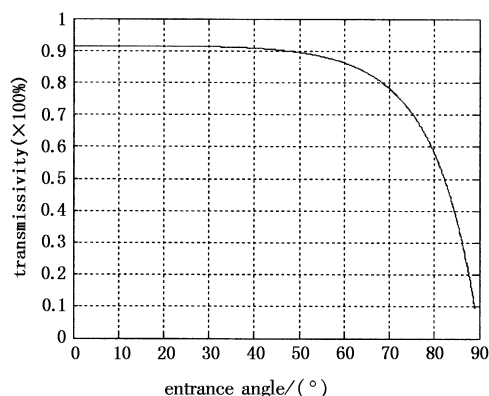


图2 透射率随入射角度的变化

当入射 LD 的光功率较大时,泵浦光可能穿透增益介质到达 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反射膜,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:

$$I_s(x, y) = I_{\text{内}}(x, y) + I_{\text{反}}(x, y) \quad (6)$$

要得到高能量的激光输出,就要采用多个 LD 泵浦的结构方式,如将图 1 中的 LD 以坐标原点为中心旋转几个角度,在每个角度上在放置 LD,用 n 个 LD 进行泵浦,从而提高了泵浦光的入射功率。将介质内点 (x, y) 的坐标沿顺时针方向旋转角度 θ ,则坐标变为 (x_θ, y_θ) ,此时也将图 1 的坐标平面以原点为中心旋转了角度 θ ,在坐标变换过程中,变换关系为:

$$\begin{cases} y_\theta = y \cdot \cos\theta + x \cdot \sin\theta \\ x_\theta = -y \cdot \sin\theta + x \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (7)$$

将通过以上坐标变换得到的 (x_θ, y_θ) 的值代入式(6),得到 LD 旋转角度 θ 后在点 (x, y) 的光强,从而 n 个 LD 在不同角度上在点 (x, y) 产生的总光强为:

$$I_{\text{总}}(x, y) = \sum_n [I_s(x, y) + I'_s(x, y)] \quad (8)$$

为提高泵浦光在介质内的分布均匀性,LD 都是环绕介质棒几何均匀排列的,以图 1 所示的位置为原始坐标系,其他均为旋转坐标系,最终得到在原始坐标系下的多 LD 侧面泵浦光场在介质内的分布情况。

3 计算结果及分析

采用 Matlab 软件进行程序设计,开发了计算机模拟程序。输入泵浦结构方面的各个参数,如增益介质吸收系数和半径、LD 个数及其束腰半径、LD 与增益介质之间的泵浦距离等参数,就可以计算出激光棒横截面内泵浦光的分布情况。

单个和 3 个 LD 的泵浦光分布情况如图 3 所示。

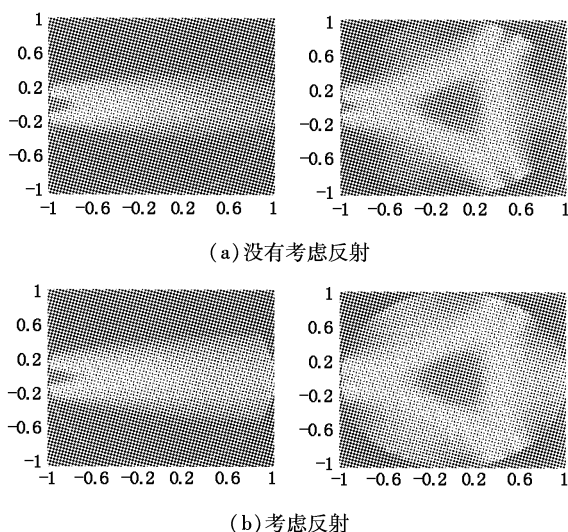


图 3 单个和 3 个 LD 的泵浦光分布

由图 3 可以看出,介质中考虑泵浦光反射的增益分布比与没有考虑反射的增益分布更为均匀,因此在设计泵浦结构时,应在非泵浦侧面镀反射膜,使得透射的泵浦光反射到晶体中,在增加光增益分布均匀性的同时也提高了整个激光系统的电光转换效率。

在实际工程应用上,由于体积和质量各方面的严格要求,LD 泵浦的固体激光器一般不采用水冷的冷却方式,而采用风冷,主要的设计理念就是减小整个激光系统的体积和质量。目前适合风冷的 DPSL 一般采用半环形的泵浦结构方式^[7]进行泵浦,因此讨论泵浦结构中各个参数对泵浦光在增益介质中分

布的影响具有较为重要的现实意义。

不同泵浦参数时激光棒截面内的泵浦光分布如图 4 所示。

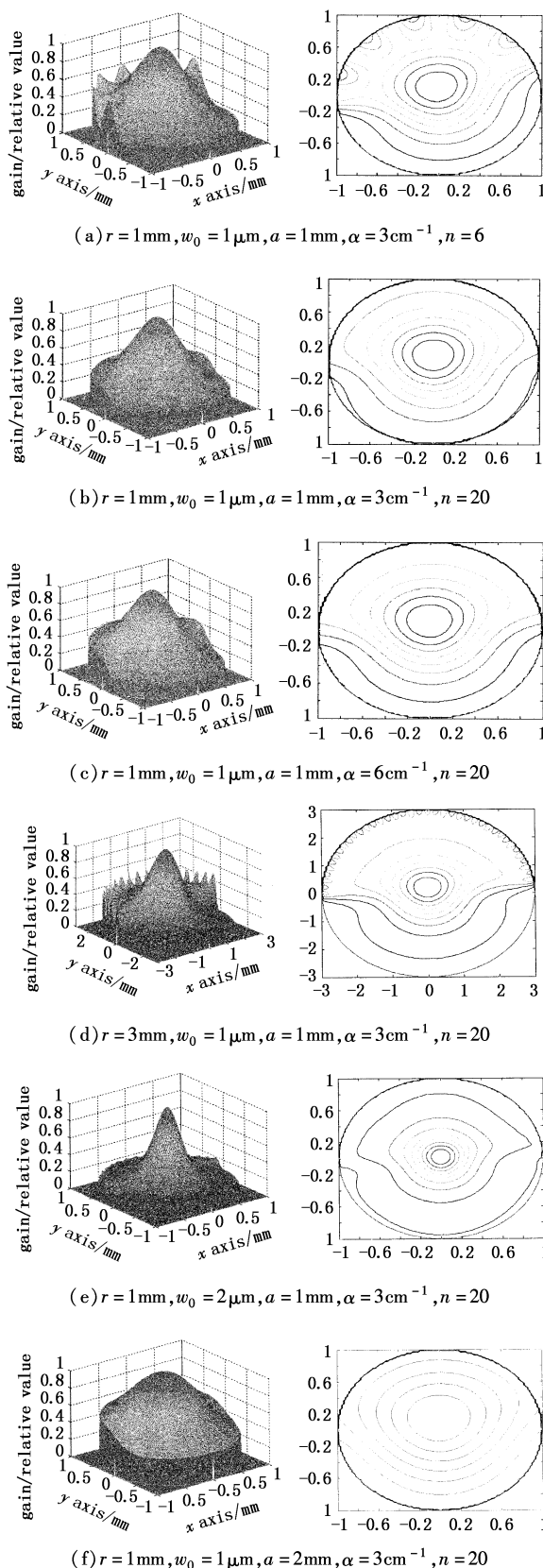


图 4 不同泵浦参数时激光棒截面内的泵浦光分布图

图4中, r 为增益介质横截面的曲率半径, w_0 为LD的束腰半径, a 为LD到增益介质的泵浦距离, α 为增益介质的吸收系数, n 为LD的个数。比较图4(a)和图4(b)可以看出:LD的个数越多,增益介质中泵浦光分布的均匀性也就越好,同时随着泵浦功率的提高,系统的输出光功率也会得到提高;比较图4(c)和图4(b)可以看出:在LD半环形泵浦的情形下,吸收系数 α 对泵浦光的分布均匀性的影响较小,但随着 α 的增大,介质边缘对泵浦光的吸收增强,使得边缘处的增益变大,而介质中心处的光增益减弱,不利于具有低阶模式的激光输出。若 α 太小,泵浦光的大部分会由增益介质透射出去,即使透射面镀全反膜,也会影响到增益介质的吸收,从而影响系统的整体电光效率。因此应选取比较适中的吸收系数值,使泵浦光绝大部分被增益介质吸收,进而提高泵浦光的分布均匀性。比较图4(d)和图4(b)可以看出:在其他参数相同的情况下,增益介质的半径 r 越小,泵浦光的分布越好。介质的半径越大,泵浦光到达介质中心时剩余的光能量也就越小,中心处的光增益也就越小,不利于具有高光束质量的激光输出。比较图4(e)和图4(b)可以看出:LD的束腰半径较大时,增益介质中心处的增益也就较大,边缘处的光增益较小。主要是由于束腰半径大,光束能量分布较为分散,介质边缘处吸收较小,大部分被介质中心处吸收,此时的增益分布有利于低阶模的激光振荡,同时抑制高阶模激光的产生。比较图4(f)和图4(b)可以看出:LD的泵浦距离在结构允许的情况下应尽量小一些。由于LD快轴的发散角较大,过大的泵浦距离使得泵浦光能量分散的较快,到达介质中心时可能已经充满了介质,使得介质中心处的光增益较小,不利于抑制高阶模激光的振荡。

4 结 论

通过对半导体侧面半环形泵浦激光介质泵浦光分布的模拟计算,分析了泵浦结构中各个参数对泵浦光分布的影响规律。在工程应用型的半环形的

DPSL系统中,泵浦结构设计应尽可能考虑在增益介质的一侧镀全反膜,有利于泵浦光分布均匀性的提高,提高系统的整体电光效率;在选取其他泵浦参数时,尽量采用较多数量的LD且对称泵浦,其他参数应根据实际的需要选取,在设计前最好进行理论方面的模拟计算,以达到较为理想的泵浦光分布,避免设计时的盲目性。

本文依据激光二极管的传输特性建立了二极管侧面泵浦固体激光器泵浦结构的数值模型,运用该模型模拟了在LD侧面半环形泵浦增益介质时LD束腰半径、增益介质吸收系数等参数对泵浦光分布的影响,为二极管侧面泵浦固体激光器的结构设计和实验研究提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 罗亦鸣,李明中,秦兴武,等. 大功率环形LD侧面泵浦 $\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$ 激光器的特性[J]. 强激光与粒子束,2002,14(3):331-333.
- [2] 朱海永,张戈,等. 高功率连续侧面泵浦1341.4nm $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器[J]. 强激光与粒子束,2006,18(9):1413-1416.
- [3] Farruch U O, Buocristiani A M, Byvik C E. An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods [J]. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24 (11): 2253 - 2264.
- [4] 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):421-458.
- [5] 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.
- [6] Wenjie Xie, Sui-chung Tam, Yee-loy 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.
- [7] 李强,何利杰,等. LD泵浦固体激光介质内增益分布与输出特性研究[J]. 激光与红外,2007,37(10):1047-1049.