

二极管阵列侧面泵浦固体激光介质的光场分布*

王建华¹, 金锋², 翟刚², 侯天晋², 时顺森², 李晶², 马楠², 陈仁²

(1.烟台大学光电信息科学技术学院, 山东烟台 264005; 2.西南技术物理研究所, 四川成都 610041)

摘要:研究LD阵列侧面泵浦Nd:YAG激光器泵浦光场的分布特点。首先,在已建立的二极管单bar侧面泵浦YAG晶体泵浦光场分布数值模型的基础上,进一步建立了适用于激光二极管阵列多侧面泵浦YAG晶体的泵浦光场分布数值模型。然后,根据所建模型,采用光线追迹的方法,借助Matlab编程模拟了单侧面、二侧面、三侧面、五侧面泵浦方式的泵浦光分布特点,分析了系统参数:介质半径、介质吸收系数、光束光腰半径、泵浦距离、二极管bar间距、介质表面粗糙程度对泵浦光分布特性的影响,总结出了一般规律。可为二极管泵浦固体激光器的结构设计和实验研究提供理论参考。在理论分析的基础上,进行了单侧面、二侧面泵浦方式的二极管阵列直接侧面泵浦固体激光器的实验研究。实验结果与理论分析结果基本相符,验证了所建数值模型的正确性。该数值模型的特点是:采用光线追迹方法;适用于漫反射表面工作物质;适用于多种侧面直接泵浦方式,具有可扩充性。

关键词:二极管侧面泵浦; 光场分布; 模拟计算; 泵浦均匀性

中图分类号: TN243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)04-0421-06

Pump uniformity study of solid state laser rods direct side-pumped by laser diode*

WANG Jian-hua¹, JIN Feng², ZHAI Gang², HOU Tian-jin², SHI Shun-sen²,
LI Jing², MA Nan², CHEN Ren²

(1. Institute of Science and Technology for Opto-electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. South-West Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The characteristics of the pumping light distribution in Nd:YAG rod direct side-pumped by diode bars are studied in this paper. Firstly, an approximation but simple analytical solution to the radial distribution of deposited energy in a diode-bar-pumped laser rod is provided based on the characteristics of the Gauss beam and the output of diode laser. Furthermore, the theoretical models of pumping energy distribution in a diode-array-pumped laser rod are made. Then, how the parameters (size of the medium, absorption coefficient of the medium, distance between the laser diodes, and so on) affect the homogeneity of pumping energy distribution in the medium is achieved according to the numerical simulation, and a set

收稿日期: 2004-09-04; 修订日期: 2004-10-14

* 基金项目: 高功率半导体激光国家重点实验室基金资助项目(51456050105BQ3901)

作者简介: 王建华(1978-), 女, 烟台招远人, 助教, 硕士, 主要从事固体激光器的研究工作。

of general rules is summarized, and that can offer reference to experimental investigation. The distribution of pumping light in Nd:YAG rod is measured with CCD camera which is in good agreement with computer numerical simulation. The experiment results are analyzed and discussed. The comparison results illustrate that the theoretical models are correct. Using ray trace algorithm, applying to the diffuse reflection surface medium and applying to multifarious direct side-pumping are the characteristics of the theoretical model.

Key words: Laser diode arrays side-pumping; Field distribution; Analog calculation; Pumping homogeneity

0 引言

二极管泵浦固体激光器较之传统的氙灯泵浦器件或其他类型的激光器有诸多优点,它代表了激光技术的一个重要发展方向,经过近 20 多年的发展已日趋成熟,并在激光加工、激光测距/目标指示、激光雷达等领域得到广泛应用^[1,2]。

通常二极管泵浦固体激光器的泵浦方式主要有端面泵浦和侧面泵浦两种。侧面泵浦较之端面泵浦更易注入高的泵浦功率,更适合于高功率器件,但在侧面泵浦方式下,泵浦光与激光器谐振腔基模的空间匹配低,严重影响激光光束质量。固体激光介质的光场分布是直接影响激光器的效率和激光光束质量的重要因素,国内外已有单 bar 二极管侧面泵浦激光器光场分布的数值模型^[3-9]以及相关研究,国外也有少数专用软件如 LASCAD、OPTICHAMBER 等用于模拟激光介质泵浦光场分布特性,但均是对于一些特定泵浦方式下的情形进行模拟,存在一定的局限性。

高功率二极管泵浦固体激光器器件大多采用高功率二极管阵列作为泵浦源,为此我们在前期工作的基础上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,计算了几种典型条件下,固体激光介质中泵浦光的光场分布情况,并讨论了多种结构参数对泵浦光场分布均匀性的影响。

1 二极管阵列泵浦模型

对于单 bar 单侧面泵浦情形已得出数值模型^[10]。泵浦光在晶体横截面内场分布可用下列方程表示:

$$I(x, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w_x} \exp \left\{ -2 \left[\frac{x^2}{w_x^2(z)} \right] - \alpha s \right\} \quad (1)$$

式中 α 为晶体吸收系数; s 为泵浦光在晶体中的吸收距离; w_x 为激光强度值降为 $1/e^2$ 处的光束半径,其表达式为:

$$w_x = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda(z+l)}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (2)$$

采用光线追迹的方法,根据公式(1)可模拟计算二极管直接侧面泵浦固体激光器的光场分布。由于工作物质的增益与所吸收的泵浦光成比例,所以可通过模拟泵浦光场分布来分析工作物质增益分布的情况。

基于二极管单 bar 单侧面泵浦数值模型,可以得到二极管阵列多侧面泵浦工作物质的数值模型。激光二极管阵列单侧面泵浦的数值模型可视为多个单 bar 泵浦基础上物理叠加得到,晶体通常置于抛光的铜热沉中,此时可视为与晶体半侧面镀有反射膜等同,如图 1 所示。

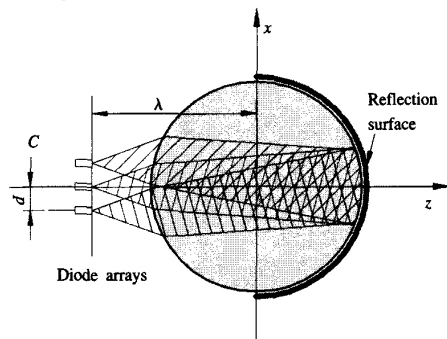


图 1 二极管阵列单侧面泵浦示意图

Fig.1 Pumping diode arrays laser beam (Gaussian) propagating along z axis

参照图1,激光光束在晶体表面点 (x, z) 处光强为:

$$I(x, z) = \sum_{m=-1}^{+1} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{\omega_x(z)} e^{-\frac{2[(z+l)^2 + (x-md)^2]}{\omega_x^2(z)}} \quad (3)$$

式中 I_0 是发光面处的功率密度; d 为激光列阵间距; $\omega_x(z)$ 为 x 方向光束束腰; m 为二极管 bar 的编号(例如 $q=3$ 个 bar, 则 m 为 $-1, 0, 1$; q 表示 bar 的数量)。

$$\omega_x^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda(z+l)}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中 ω_0 为发光面处的光束光腰半径。进入激光晶体内界面点 (x, z) 处的光强为:

$$I_T(x, z) = I(x, z) \cdot T(x, z) \quad (5)$$

式中 $T(x, z)$ 为晶体界面上 s 偏振光的菲涅耳透过率^[1]:

$$T(x, z) = \frac{\sin[2\theta_i(x, z)] \sin[2\theta_t(x, z)]}{\sin^2[\theta_i(x, z) + \theta_t(x, z)]} \quad (6)$$

式中 $\theta_i(x, z), \theta_t(x, z)$ 为在晶体表面处 (x, z) 点的光线的入射角与折射角。

在晶体内某点 (x_B, z_B) 处,沿光线方向微线段 Δd 内,晶体吸收的泵浦光强为:

$$I_B(x_B, z_B) = I_T(x, z) e^{-\alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta d}) \quad (7)$$

式中 s 为点 (x, z) 到点 (x_B, z_B) 的线段距离。

考虑到泵浦侧对面反射膜的反射作用,则可用类似方法得到反射泵浦光的光强分布 $I_R(x_B, z_B)$, 这时工作物质内吸收的泵浦光分布为:

$$I_p(x_B, z_B) = I_B(x_B, z_B) + I_R(x_B, z_B) \quad (8)$$

多个二极管阵列多侧面泵浦结构的泵浦光在 YAG 棒内的光强分布就是几个不同位置的二极管阵列泵浦光强分布的叠加。忽略图1中泵浦侧对面所镀的反射膜,将坐标沿顺时针方向旋转一定的角度 ang , 坐标 (x, z) 变换成 (x', z') , 同时也将泵浦阵列平面 C 旋转角度 ang 到 C' , 则对 (x, z) 坐标系中的任一点 x_B, z_B , 在 (x', z') 坐标系中变换为 (x'_B, z'_B) 。

$xz-x'z'$ 坐标系的变换关系为:

$$\begin{cases} x' = x \cos(ang) + z \sin(ang) \\ z' = -x \sin(ang) + z \cos(ang) \end{cases} \quad (9)$$

在 $x'z'$ 坐标系中各参数之间的关系并没有改变, 同样原理, 利用上述公式(3)~(7)得到含有变量 x', z' 的泵浦光强分布 $I'(x', z')$, 将公式(9)代入后得到 $I'_B(x_B, z_B)$, 再与 $I_B(x_B, z_B)$ 相加得到在 C 和 C' 位置的泵浦光共同作用下 B 点处的光强:

$$I_{\Sigma}(x_B, z_B) = I_B(x_B, z_B) + I'_B(x_B, z_B) \quad (10)$$

同样可以算出在多个二极管阵列共同作用下 B 点的泵浦光强分布:

$$I_{\Sigma}(x_B, z_B) = I_B(x_B, z_B) + I'_B(x_B, z_B) + I''_B(x_B, z_B) + I'''_B(x_B, z_B) + \dots \quad (11)$$

侧面泵浦结构通常是在整个圆周内(或半圆周内), 二极管阵列环绕介质棒呈几何均匀形式排列。在理论计算时, 设置好原始坐标, 然后将坐标以一定的角度顺时针或逆时针依次旋转, 得到的结果依次相加, 从而获得多侧面阵列泵浦系统的泵浦光强分布。

2 计算结果及分析

2.1 单侧面阵列泵浦

图2是单侧面泵浦(一侧镀反射膜)时, 晶体棒截面上沿 z 轴的径向泵浦光强度分布曲线。随着二极管 bar 的数目增加, z 轴上的泵浦光强明显增加, 分布均匀性提高。均匀的泵浦光分布有利于获得均匀的增益分布, 提高模式匹配效率, 从而获得高质量的激光输出。

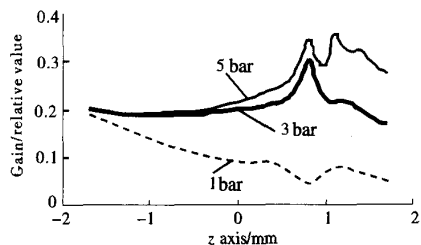


图2 单侧面泵浦时 z 轴上的泵浦光强度分布
(晶体一侧镀反射膜)

Fig.2 Calculated pumping energy distribution along z axis
(one side of laser rod with reflecting surface)

图 3 为 5 个二极管 bar 单侧面直接泵浦工作物质时,模拟工作物质横截面泵浦光强度分布得到的二维分布示意图。工作物质直径 3.5 mm,长 6 mm,泵浦侧镀有泵浦光的增透膜,泵浦侧对面镀有泵浦光的高反射膜。从仿真结果可以看到,泵浦光分布在棒截面上呈现长椭圆形,并且在靠近反射膜一侧出现亮点。在单侧面泵浦时,加镀反射膜提高了对泵浦光的利用率。

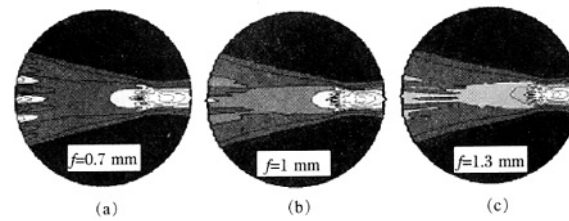


图 3 单侧面 5 个 bar 泵浦(一侧镀反射膜)

Fig.3 Calculated pumping energy distribution in medium one side pumped by 5 diode bars(one side of laser rod with reflecting surface)

二极管激光器单侧面泵浦 Nd:YAG 晶体,YAG 晶体另一侧未镀反射膜。激光二极管阵列含有 5 个 bar,峰值功率为 300 W,每个 bar 的发光面 $1\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ mm}$,bar 间距为 0.4 mm。Nd:YAG 晶体棒侧面光滑,棒直径为 3.5 mm,晶体吸收系数为 4 cm^{-1} 。根据所建数值模型,仿真单侧面泵浦结构的泵浦光场分布,如图 4 所示。其中,假设晶体表面为镜反射表面的理想情况得到(a)、(b)模拟结果;考虑晶体表面为漫反射

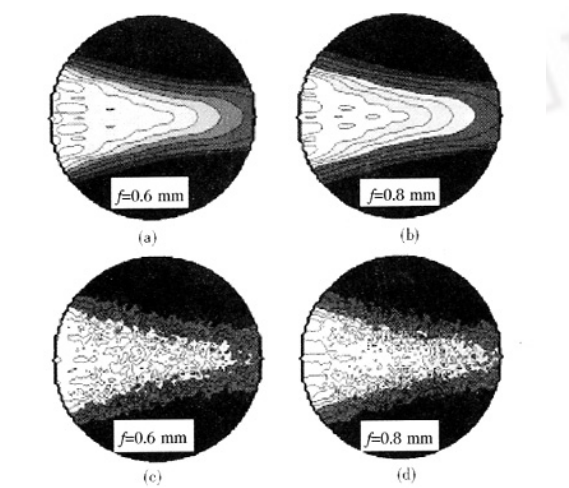


图 4 单侧面 5 个 bar 泵浦模拟结果

Fig.4 Calculated pumping energy distribution in medium one side-pumped by 5 diode bars

表面时,得到(c)、(d)的模拟结果。

由图 4 可见,激光棒表面为光滑的理想情况时,截面上泵浦辐照面积较小,泵浦光分布较集中。而表面打毛时,泵浦光辐照面积扩大,有利于获得相对均匀的泵浦光分布。

针对单侧面阵列泵浦结构,根据所建数值模型,分析了系统结构参数:泵浦距离(二极管发光面到晶体的距离)、晶体吸收系数、晶体半径、光束发散角等对晶体截面内泵浦光场分布的影响。图 5~图 8 是将 Matlab 运算所得数据整理得到的光强分布曲线图。

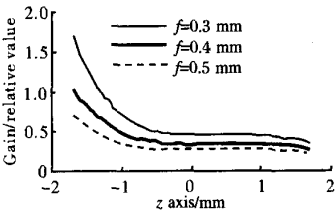


图 5 不同泵浦距离时阵列(5 个 bar)单侧面泵浦 z 轴泵浦光强度分布曲线图($r=1.75\text{ mm}$, $\alpha=0.4\text{ mm}^{-1}$, $\omega_0=1\text{ }\mu\text{m}$)

Fig.5 Calculated pumping energy distribution along z axis ($r=1.75\text{ mm}$, $\alpha=0.4\text{ mm}^{-1}$, $\omega_0=1\text{ }\mu\text{m}$)

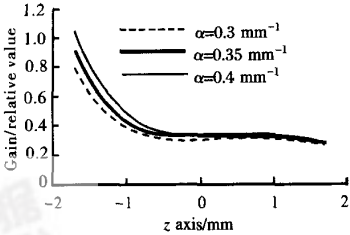


图 6 不同吸收系数条件下阵列(5 个 bar)单侧面泵浦 z 轴泵浦光强度分布曲线图($r=1.75\text{ mm}$, $f=0.4\text{ mm}$, $\omega_0=1\text{ }\mu\text{m}$)

Fig.6 Calculated pumping energy distribution along z axis ($r=1.75\text{ mm}$, $f=0.4\text{ mm}$, $\omega_0=1\text{ }\mu\text{m}$)

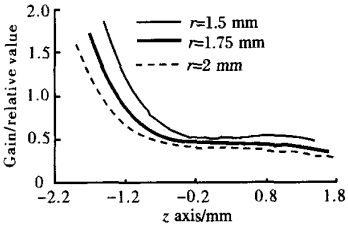


图 7 不同晶体半径时阵列(5 个 bar)单侧面泵浦 z 轴泵浦光强度分布曲线图($f=0.3\text{ mm}$, $\alpha=0.4\text{ mm}^{-1}$, $\omega_0=1\text{ }\mu\text{m}$)

Fig.7 Calculated pumping energy distribution along z axis ($f=0.3\text{ mm}$, $\alpha=0.4\text{ mm}^{-1}$, $\omega_0=1\text{ }\mu\text{m}$)

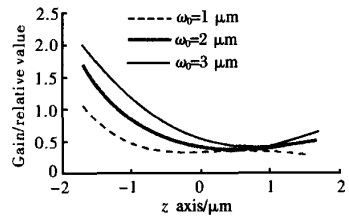


图 8 不同泵浦束腰条件下阵列(5 个 bar)单侧面泵浦 z 轴泵浦光强度分布曲线图($\alpha=0.4\text{ mm}^{-1}$, $f=0.4\text{ mm}$, $r=1.75\text{ mm}$)

Fig.8 Calculated pumping energy distribution along z axis ($\alpha=0.4\text{ mm}^{-1}$, $f=0.4\text{ mm}$, $r=1.75\text{ mm}$)

图 5 表明,直接泵浦的系统结构中,泵浦距离越小,泵浦光分布越理想;图 6 表明,该结构中,晶体吸收系数越大越好,但工程应用时应根据器件总体技术指标选择晶体;图 7 表明,该结构中,晶体半径越小,泵浦光分布越理想;图 8 表明,由于泵浦光光腰半径与束散角直接相关,在该系统结构中,泵浦光束散角越小越好。

2.2 多侧面阵列泵浦

本文所建数值模型,不仅可以完成对二极管阵列单侧面泵浦系统的泵浦光场仿真,而且可根据 DPSSL 的具体泵浦结构,仿真阵列多侧面泵浦和特殊侧面泵浦形式的泵浦光强分布情况。图 9 是对二极管阵列多侧面泵浦晶体的泵浦光场仿真结果。图 10 是相应的泵浦光强等高线分布示意图。

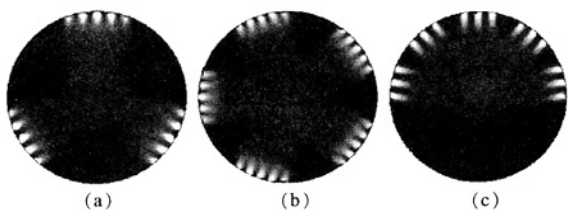


图 9 多侧面泵浦晶体的泵浦光强分布示意图($f=0.5\text{ mm}$, $r=2.5\text{ mm}$, $\alpha=0.4\text{ mm}^{-1}$, $\omega_0=1\text{ }\mu\text{m}$)

Fig.9 Calculated pumping energy distribution for multi-sided pumping configuration ($f=0.5\text{ mm}$, $r=2.5\text{ mm}$, $\alpha=0.4\text{ mm}^{-1}$, $\omega_0=1\text{ }\mu\text{m}$)

可以看出,五侧面泵浦与三侧面泵浦方式相比泵浦光能量的分布较均匀,已呈现出中间高边缘低的理想径向分布,并且晶体中央泵浦光强的梯度变化较边缘的明显减小;对于传导冷却的侧面直接泵浦,泵浦

光能量分布也呈现中心强边缘弱的径向分布。多侧面泵浦结构有利于获得理想的泵浦光场分布,但系统的空间几何结构又对增加泵浦侧面数形成了限制,因此实际应用中的泵浦系统多为三侧面、五侧面泵浦结构。本文所建模型可根据具体泵浦几何结构改变参数设置,从而得到较逼真的泵浦光场分布仿真示意图。

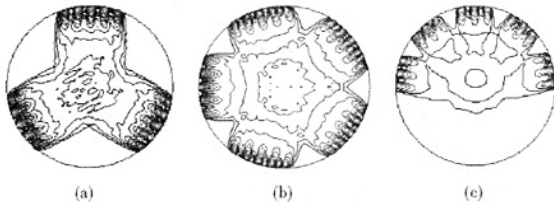


图 10 多侧面泵浦晶体的泵浦光强等高线分布示意图
Fig.10 Calculated pumping energy distribution contour for multi-sided pumping configuration

2.3 仿真结果分析

总结上述阵列多侧面泵浦光场的模拟计算结果和其他模拟计算,可以看到,二极管侧面泵浦固体介质系统中,二极管输出光束的发散角、泵浦距离、泵浦结构、介质的吸收系数等参量对泵浦均匀性都有很大的影响。

单侧面泵浦时,泵浦光强在棒截面呈强点偏向泵浦侧的长方形;YAG 晶体另一侧加镀反射膜后,呈现强点偏向反射膜一侧的长椭圆形,相对光强较未加反射膜时的分布更集中,更有利于扩大泵浦光和基模的交叠面积。

多侧面泵浦工作物质时,泵浦光强的分布随着泵浦方向的增加,中心强点增强,各泵浦侧光强相对变弱,整个截面上的泵浦光分布呈中心对称的径向分布。可见,在其他参数设置不变的情况下,二极管多侧面环绕泵浦工作物质可优化泵浦的辐射分布,提高泵浦均匀性,使增益分布更有利于提高输出激光的光束质量。

二极管发光面距离晶体的位置改变,泵浦均匀性随之改变。泵浦光束的发散角是一定的,随着泵浦距离增大,照射到棒截面的光斑面积也增大,泵浦区域增大,泵浦的均匀性就提高。

经整形后的泵浦光束光腰半径的大小对泵浦均

匀性也有很大的影响,光腰半径较小,则光束衍射角较大,晶体横截面的照射面积大,均匀性就好,所以可以通过改变光束束腰大小来控制泵浦均匀性的变化。

介质棒半径和吸收系数越小,泵浦均匀性越好。棒半径小,相对辐照面积大,均匀性相对提高;吸收系数小,泵浦光强在晶体截面内的梯度变化小,改善了均匀性。但在吸收系数和系统其他结构参数一定的情况下,介质半径大小的变化对泵浦光强场分布的影响并不明显,可以不考虑。

介质棒外表打毛,形成漫反射表面,泵浦能量分布的均匀性提高。

上述参数设置的改变对泵浦光强分布的影响各不相同,因此在泵浦结构设计时要综合考虑各因素,获取最佳的参数取值,实现最佳的泵浦几何结构。由数值模型仿真结果得出的分析理论,可以在实践中根据具体的技术指标,指导和优化结构设计,提高实验操作的目的性;避免了器件实验的盲目性,减少了实验经费的开支,其重要价值不可忽视。

3 实验结果

在单侧面泵浦结构器件中,激光二极管阵列由 5 个 bar 组成,峰值功率 300 W,bar 间距 0.4 mm,每个 bar 发光面 $1\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ mm}$ 。Nd:YAG 晶体棒侧面光滑,直径为 3.5 mm,长 60 mm,吸收系数为 4 cm^{-1} 。泵浦结构中,二极管阵列距离棒表面 0.3 mm,晶体放置在光滑圆弧凹面的铜热沉上。该凹面紧贴晶体一侧,对泵浦光束有反射作用。仿真结果如图 11(a)所示。

二侧面泵浦结构的器件中,晶体直径为 4.5 mm,长 55 mm,吸收系数为 4 cm^{-1} 。二极管激光器双侧面泵浦 YAG 晶体输出功率 $2\times 2400\text{ W}$ ($4\times 600\text{ W}$),与晶体间距为 0.5 mm。仿真结果如图 11(b)所示。

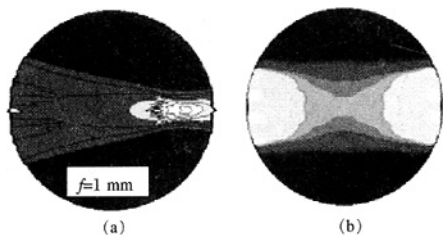


图 11 泵浦光分布示意图

Fig.11 Calculated pumping energy distribution

利用上述两种结构的器件分别做了晶体横截面泵浦光分步测试实验,采用 Sensor Physics 公司的光束测量装置,使用的是 8 bit CCD 数据采集卡。测得单侧面泵浦结构的器件中泵浦光分布示意图如图 12(a)所示,二侧面泵浦器件中泵浦光分布示意图如图 12(b)所示。

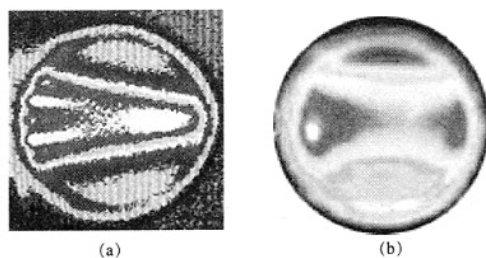


图 12 泵浦光分布示意图

Fig.12 Measured pumping energy distribution

实验结果与模拟计算结果基本相符。图 12(b)中,由于同一电源驱动下的两组激光二极管输出功率大小有差异,致使测得泵浦光分布一侧强而另一侧较弱。由此可见,实验结果证实了数值模型的可靠性。在二极管泵浦固体激光系统的设计中,完全可以通过第 1 节中的数值模型来设计和优化结构参数,从而减少大量的实验工作,提高实验的目的性。

4 结论

二极管泵浦固体激光技术是当前国际上固体激光领域的研究热点,新颖的阵列侧面泵浦结构层出不穷。本文依据二极管激光器输出光束特性,建立了模拟计算二极管阵列侧面泵浦固体激光器的数值模型,运用该数值模型可以模拟分析泵浦距离、吸收系数等参量对泵浦均匀性的影响,可为二极管泵浦固体激光器的结构设计和实验研究提供理论指导。实验结果证实了数值模型的可靠性。

参考文献:

- [1] SHE Hui,TAN Sheng.Development and application prospects of high energy laser weapon[J].Infrared and Laser Engineering(余

(下转第 458 页)

声影响得到了很好的抑制,桥梁目标的边缘被很好地检测出来。

对背景单一的目标图像而言,根据本算法选取一个全局阈值来分割目标是适当的,如图 2、图 3 所示。而对于背景比较复杂的目标图像来说,单凭一个全局阈值可能无法取得满意的分割效果,因此,背景较复杂的红外目标的边缘检测算法是以后研究的重点。

红外图像边缘检测是图像处理领域的难题之一。结合红外图像的特点,本文提出了一种基于红外图像边缘检测算法。实验结果表明,与传统的方法相比,该算法具有更好的效果。

参考文献:

- [1] Bezdek J C, Chandrasekhar R, Attikiouzel Y. A geometric approach to edge detection[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 1998, 6(1): 52-75.
- [2] Ho K H L. FEDGE-fuzzy edge detection by fuzzy categorization and classification of edges[A]. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence Workshop[C]. Canada: Montreal, 1995. 182-196.
- [3] Russo F. FIRE operators for image processing[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 103(2): 265-275.
- [4] Cheung K F, Chan W K. Fuzzy one-mean algorithm for edge detection[A]. IEEE International Conference on Fuzzy Systems[C]. Japan: Yokohama, 1995. 2039-2044.
- [5] Kuo Y H, Lee C S, Liu C C. A new fuzzy edge detection method for image enhancement[A]. IEEE International Conference on Fuzzy Systems[C]. Spain: Barcelona, 1997. 1069-1074.
- [6] JIN Li-zuo, XIA Liang-zheng. A new definition of fuzzy partition entropy and its application to image segmentation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves(金立左, 夏良正. 模糊划分熵的新定义及其在图像分割中的应用. 红外与毫米波学报), 2000, 19(3): 219-223.
- [7] ZHANG Hong-qun, ZHANG Xue, XIAO Wang-xin. Adaptive thresholds edge detection for image based on wavelet transform[J]. Infrared and Laser Engineering(张宏群, 张雪, 肖旺新. 小波变换地自适应阈值图像边缘检测方法. 红外与激光工程), 2003, 32(1): 32-36.
- [8] Kittler J, Illingworth J. Minimum error thresholding[J]. Pattern Recognition, 1986, 19(1): 41-47.
- [9] Gonzalez R C, Wintz P. Digital image processing[M]. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- [10] Sun W, Xia L Z. A new fuzzy edge detection algorithm[J]. Journal of Southeast University, 2003, 19(3): 132-136.
- [1] Bezdek J C, Chandrasekhar R, Attikiouzel Y. A geometric approach to edge detection[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 1998, 6(1): 52-75.
- [2] REN Guo-guang, HUANG Yu-nian. The present status and future of the tactical laser weapons [J]. Laser & Infrared(任国光, 黄裕年. 战术高能激光武器的发展现状和未来. 激光与红外), 2002, 32(4): 211-217.
- [3] Ajer H, Landrs S, Rustad G, et al. Efficient diode-laser side-pumped TEM₀₀ mode Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 1992, 17(24): 1785-1787.
- [4] Burnham R, Hays A D. High-power diode-array-pumped frequency-doubled CW Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 1989, 14: 27-29.
- [5] Xie Wen-jie, Tam Siu-chung, Lam Yee-loy. Simple method to calculate the radial energy and temperature distributions in diode-pumped solid state laser rods[J]. Opt Eng, 2001, 40(8): 1568-1572.
- [6] Larry R Marshall, Kaz A, Burnham R L. Highly efficient TEM₀₀ operation of transversely diode-pumped Nd:YAG lasers[J]. Optics Letters, 1992, 17(3): 186-188.
- [7] Gu Jian-hui, Tam Siu-chung, Lam Yee-loy, et al. Pump uniformity study of a side-pumped DPSS laser[A]. SPIE[C]. 2001, 4267: 89-95.
- [8] Walter Koechner; SUN Wen. State Laser Engineering[M]. Beijing: Science Press(W 克希耐尔; 孙文. 固体激光工程. 北京: 科学出版社), 2002. 324-330.
- [9] MAO Shao-qing, HUANG Tao, WEN Zhong-yi, et al. Calculation and analyze of homogeneity of diode side pumped solid laser [J]. Laser Technology (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. 激光技术), 1997, 21(3): 185-188.
- [10] WANG Jian-hua, ZHAI Gang, JIN Feng, et al. Pump uniformity study of solid-state laser rods directly side pumped by laser diode[J]. Laser Technology (王建华, 翟刚, 金锋, 等. LD 直接侧面泵浦棒状介质的光场研究. 激光技术), 2004, 28(1): 36-38, 41.
- [11] LIANG Quan-ting. Physical Optics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press(梁铨廷. 物理光学. 杭州: 浙江大学出版社), 1997. 30-33.

(上接第 426 页)

辉, 谭胜. 高能激光武器的发展和应用前景. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 267-271.