

端面泵浦 DPSSL 中空间耦合的精密调整技术

李兵斌, 唐映德, 过 振, 蔡德芳, 王石语, 文建国, 车进喜

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘 要:对光纤耦合激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 激光器泵浦光偏离谐振腔轴的情况进行了实验研究,提出了一种利用 CCD 精确调整泵浦光与振荡光空间耦合的方法。使用此方法调整泵浦光的空间位置,使其与振荡光达到最佳空间耦合,得到了椭圆率为 0.98, M^2 因子为 1.01 的近似理想高斯光束输出。该方法适用于各种激光介质的二极管端面泵浦固体激光器,提高了耦合精度,故具有一定的实际应用价值。

关键词:电荷耦合器件; 端面泵浦; 空间耦合; M^2 因子

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)05-0458-04

Technology of accurate adjustment for spatial coupling in end-pumped DPSSL

LI Bing-bin, TANG Ying-de, GUO Zhen, CAI De-fang, WANG Shi-yu, WEN Jian-guo, CHE Jin-xi
(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The situation of the pumping beam departing from the oscillating beam in a fiber-coupled laser diode end-pumped Nd:YAG laser is studied. A method of accurate spatial coupling between the pumping and the oscillating beam by use of CCD is presented. Using this method, the spatial position of pumping beam is adjusted, ideal Gaussian beam with ellipse rate of 0.98 and the M^2 factor of 1.01 are obtained after achieving the best spatial coupling between the pumping and the oscillating beam approximately. This technology can be used in other diode end-pumped solid-state lasers (DPSSL) with different laser materials, and it is practical for the improved accuracy.

Key words: CCD; End-pumped; Spatial coupling; M^2 factor

0 引 言

随着半导体激光器制造工艺的日益成熟,激光二极管泵浦固体激光器 (DPSSL) 已成为这一领域的热

门话题。由于端面泵浦具有高效率 and 结构紧凑等优点,在 DPSSL 的设计中被广泛采用^[1]。不同的激光二极管、激光介质和谐振腔结构使得大功率范围、多波段输出成为可能。

耦合技术是 DPSSL 研制中的核心技术之一,其

收稿日期:2003-10-28; 修订日期:2003-11-29

作者简介:李兵斌(1978-),男,辽宁铁岭人,硕士,主要从事 DPL 声光调 Q 技术、泵浦光耦合技术的研究工作。

功能是将泵浦光耦合到固体激光工作介质中。在 DPSSL 中,理想的耦合系统是获得能量大、质量好的激光输出的保证^[2]。理论上讲,泵浦光在固体激光介质中应该尽可能地与振荡光重叠,这样才可能获得高的效率和好的激光输出特性^[3],但实际上很难做到泵浦光与振荡光的精确重叠,经常会出现光束轴线不重合的情况,即所谓泵浦光的离轴情况,这会严重影响输出光束的质量。介绍了一种利用 CCD 观察激光光斑图像、根据光斑图像形态精确调整泵浦光与振荡光空间耦合的方法,从而可提高泵浦光与振荡光的耦合精度,得到近似理想的高斯光束输出。

1 实验装置与过程

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。图中泵浦源选用 SDL 10 W 光纤耦合激光二极管(LD),耦合光纤为单模光纤,数值孔径等于 0.22;为减少组合透镜对泵浦光功率的反射损耗,其表面镀有 808 nm 增透膜;激光介质选用华北光电技术研究所生产的 1.0% 掺杂 Nd:YAG 晶体,尺寸为 $\Phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,其泵浦端面镀有 808 nm 增透膜、1064 nm 全反膜,用以代替谐振腔的后反射镜;输出镜为透射率 15.7%、曲率半径 1 m 的凹面镜;衰减片选用中国计量科学研究院生产的激光中性衰减片;CCD 与图形采集卡均选用天敏产品。

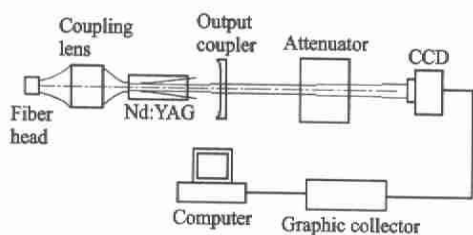


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment devices

1.2 实验过程

1.2.1 粗调过程

为实现耦合光空间位置的精密调整,将耦合光纤的输出端固定在一个五维精密调节支架上,可以微调

泵浦光的高低、左右、前后位置以及俯仰角和旋转角。为简化实验操作,将组合透镜固定在该调节支架上,它与光纤头的相对位置固定不变。

使用一束 He-Ne 激光(波长 632.8 nm,红色)作为参考光来确定组合透镜相对于光纤头的位置,如图 2 所示。

调整 He-Ne 激光器使其输出光平行于光学平台,在光路上放置一小孔光阑,使 He-Ne 光恰好通过小孔照射在光纤头的端面上,调整光纤头支架,使得反射光也通过小孔;在距离光纤头约 3~5 mm 处放置组合透镜,粗略调整其位置,使 He-Ne 光通过其中心轴线;微调组合透镜使反射光斑中心也在小孔处;固定组合透镜。

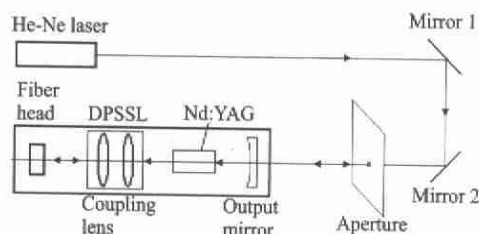


图 2 He-Ne 光调整光学元件共轴示意图

Fig. 2 Schematic of the co-axis adjustment of optical cells using He-Ne laser

使用同样的方法,依次放置 Nd:YAG 晶体、耦合输出镜,并调整其光轴与 He-Ne 同轴,完成粗调工作。

粗调时小孔光阑后面观察到的光斑如图 3 所示。图中的光斑是待调光学元件表面反射经由小孔入射的 He-Ne 光而形成的,由于小孔衍射作用,使得其具有同心圆的小孔衍射特征。



(a) 调整好 (b) 未调好
(a) Well adjusted (b) Poorly adjusted

图 3 光阑后面由光学元件反射的 He-Ne 光斑

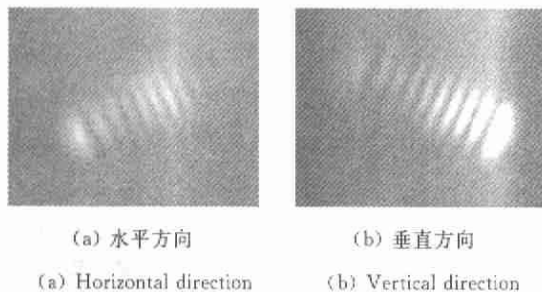
Fig. 3 He-Ne beam spot reflected by the optical cells at the back of aperture

1.2.2 细调过程

打开 LD 驱动电源,加载 9~15 A 驱动电流,调整光纤头支架前后平移旋钮,将泵浦光聚焦在激光介质的端面上,此时振荡光具有较低的阈值^[4]。微调输出镜角度,以阈值功率最低为佳。此时可以认为泵浦光与振荡光基本重叠,但是仍可能存在微小的光轴偏离 δ ,它会对 DPSSL 的输出光束产生重要影响^[5]。文中提出了一种使用 CCD 消除 δ ,实现泵浦光与振荡光精确耦合的有效方法,其过程如下:

调节 CCD 的位置,让输出激光经激光衰减片后垂直打在 CCD 的像元阵列上,其输出信号经视频卡输入计算机,运行天敏摄像软件 10Moons 可以实时观察光斑的变化。首先调节光纤头支架的垂直方向旋钮,直到出现清晰的高阶模激光图案,观察该高阶模的各个子光斑是否彼此平行且分布在垂直方向,若不满足,微调光纤头支架的水平方向旋钮,使垂直方向的高阶模的子光斑彼此平行且分布在垂直方向,再把垂直方向调回中心,即阈值最低处;然后调节水平方向旋钮,让水平方向出现高阶模,看其各个子光斑是否彼此平行且分布水平,若不满足,调节垂直方向旋钮,使水平方向的高阶模的子光斑彼此平行且分布水平,再把水平方向调回中心,即阈值最低处。此时,可以认为 δ 已被消除,泵浦光与振荡光实现了精确耦合。

图 4 与图 5 为用 CCD 拍摄到的高阶模图像,其中图 4 为未调好的,图 5 为已调好的。

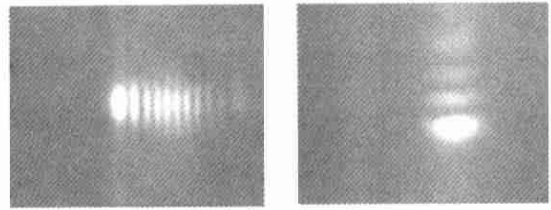


(a) 水平方向 (b) 垂直方向
(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

图 4 未调好的水平和垂直方向高阶模图像

Fig. 4 Unadjusted pictures of the high order modes in horizontal and vertical direction

实验过程中需要注意的是,为了观察到清晰的光斑图像,要适当地改变 LD 驱动电流和激光中性衰减



(a) 水平方向 (b) 垂直方向
(a) Horizontal direction (b) Vertical direction

图 5 调好的水平和垂直方向高阶模图像

Fig. 5 Adjusted pictures of the high order modes in horizontal and vertical direction

片的个数。另外,由于输出激光的波长(1064 nm)处于人眼无法看见的红外波段,阈值工作时激光器的输出处于微瓦级的闪烁中,再加上透射泵浦光的影响,几乎无法用 CCD 或功率计来探测,但是使用红外探测卡能很好地解决这个问题,可以清晰地观察到阈值时的激光抖动现象。

2 实验结果分析

整个粗调过程中 LD 不需要工作,主要观察 He-Ne 光,而细调过程则是观察 DPSSL 的输出光,因此 LD 要处于工作状态。由于其输出中心波长对工作温度敏感(温度每增加 1℃,波长增加 0.3 nm^[6]),因此工作时需用半导体制冷器(TEC)和循环冰水将温度控制在 5℃左右,此时,其中心波长恰好为 Nd:YAG 的中心吸收波长(808 nm)。实验测得 5℃时光纤耦合 LD 输出与驱动电流的关系曲线,如图 4 所示。图中的直线是阈值以上数据点通过最小二乘法直线拟合的结果,根据拟合参数可以得出直线方程:

$$P = 0.6385I - 5.9077 \quad (1)$$

实际测得的输出功率在一个很小的范围内随时间波动,给定电流可以由公式(1)计算相应的输出功率,该数值始终处于实际输出功率的波动范围之内,因而公式(1)对于该光纤耦合 LD 具有普遍意义。由于无法从自发辐射光中分离出激光,实际很难测量阈值电流,由公式(1)可以求出阈值电流为 9.2417 A,该值可以认为是该光纤耦合 LD 输出自发辐射光与激光的数值分界点。

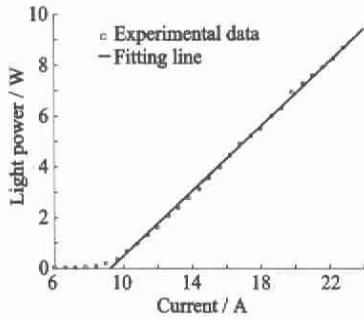


图 6 光纤耦合 LD 的输出功率随驱动电流的变化

Fig. 6 Output power of the fiber-coupled LD as a function of the driving current

上述高阶模都是在泵浦光偏离振荡光轴线的情况下产生的。Y. F. Chen 等人对 LD 端面泵浦固体激光器中泵浦光离轴的情况进行了详细的理论分析,厄米-高斯光束振荡阈值功率与泵浦光的离轴量 δ 之间的关系满足下式^[3]:

$$NP_{th}(TEM_{n0}) = (1+a^2)\exp\left(\frac{2\delta^2}{1+a^2}\right) \left/ \sum_{k=0}^n \frac{2^k k!}{2^{2n} n!} \left(\frac{2a^2}{1+a^2}\right)^k \times \left\{ \sum_{j=0}^{[(n-2k)/2]} \binom{n}{k+2j} \frac{(k+2j)!}{k!j!} \left(\frac{a^2-1}{a^2+1}\right)^j H_{n-k-2j} \left(\frac{2\delta}{1+a^2}\right) \right\}^2 \right. \quad (2)$$

式中 $NP_{th}(TEM_{n0})$ 为 TEM_{n0} 模的归一化阈值功率; $a = \bar{\omega}_p / \omega_t$ 和 $\delta = \Delta x / \omega_t$ 分别为无量纲的平均泵浦尺寸和泵浦光偏移量。数值求解公式(2)可以得到不同泵浦尺寸下各阶模式的阈值随泵浦光偏移量的变化关系。由参考文献[5]的求解结果可知,不同泵浦光偏移量下各阶振荡光的阈值并不相同,仅在零偏移量时基模具有最低的阈值,随着泵浦光偏移量的增大,高阶模将因具有较低的阈值而预先起振。

经过细调,实现了泵浦光与振荡光的精确耦合($\delta = 0$),此时的激光输出图样如图 7 所示。图 8 为该光斑图样经过平滑、差值等手段得到的归一化三维光强分布,其椭圆率(椭圆短轴与长轴之比)为 0.98。测得此时输出光束的 M^2 因子为 1.01,接近理论衍射极限。

3 结 论

实验结果表明,当泵浦光偏离振荡光轴线时,高阶横模将有可能因为其具有较低阈值而预先起振,借



图 7 光斑图案

Fig. 7 Picture of the laser spot

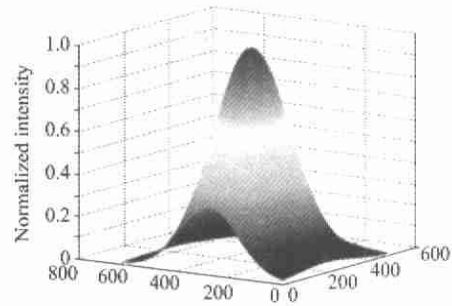


图 8 归一化光强分布

Fig. 8 Distribution of normalized intensity

助 CCD 可以观察到高阶模输出的光斑图案,根据光斑图像,易于实现泵浦光与振荡光的精确耦合,从而可获得近似理想的高斯光束输出。该方法为解决端面泵浦 DPSSL 的泵浦光与振荡光的精确耦合问题提供了一种有效手段,具有一定的实际应用价值。

参 考 文 献:

- [1] 巨养锋,阮双琛,龙井化. 纵向泵浦激光器输出镜反射率的优化[J]. 光电子·激光, 2002, 13(5): 480-482.
- [2] 王石语,薛海中,唐映德,等. 泵浦光分布对 DPL 光束质量的影响[J]. 西安电子科技大学学报(自然版), 2003, 33(1): 75-80.
- [3] Tso Yee Fan, Robert L Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. IEEE J of Quantum Electron, 1988, 24(6): 895-911.
- [4] Hall D G. Optimum mode size criterion for low-gain lasers[J]. Appl Opt, 1981, 20(9): 1579-1583.
- [5] Chen Y F, Huang T M, Kao C F, et al. Generation of hermite-gaussian modes in fiber-coupled laser-diode end-bumped lasers[J]. IEEE J of Quantum Electron, 1997, 33(6): 1025-1031.
- [6] 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 285-288.