

文章编号:1001-5078(2007)10-1050-04

离轴端面泵浦对 DPSSL 性能影响的实验研究

车进喜¹, 成斌¹, 李兵斌², 唐映德², 过振²

(1. 中国人民解放军 63891 部队, 河南 洛阳 471003; 2. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要:以激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 激光器为研究对象, 通过实验研究了离轴泵浦条件下, 离轴量的大小对激光器性能的影响。实验结果表明, 当泵浦光离轴量增大时, 斜效率增大, 但输出光依次出现从低阶模到高阶模的变化, 激光器的振荡阈值升高, 光束质量变差; 在同一泵浦位置增大 LD 电流时, 输出光从高阶模向低阶模转化, 光斑中心向此时的泵浦中心轴靠拢。

关键词:激光器; 离轴泵浦; 端面泵浦; 激光二极管; 振荡模式

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

Experimental Research on the Influence of Off-axis Distance upon End-pumped DPSSL

CHE Jin-xi¹, CHENG Bin¹, LI Bing-bin², TANG Ying-de², GUO Zhen²

(1. 63891 Army Unit of PLA, Luoyang 471003, China; 2. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: LD end-pumped Nd:YAG laser is researched. The experiment is guided to test of the influence of off-axis distance upon of the laser's performance while pump light is off-axis. After analyzing the results, when the off-axis amount is increased, the slope efficiency is enlarged, however, the changing of output light from low rank modes to high ones appears in turn, the threshold of laser is raised and the beam quality is inferior. What's more, while the LD's pump current is enlarged, on the same off-axis pumping location, the changing of output light from high rank mode to low one appears in turn and the center of the spot closes to the axis of the very pump location.

Key words: laser; off-axis-pump; end-pumped; LD; oscillating modes

1 引言

激光二极管泵浦固体激光器 (DPSSL) 具有小型、紧凑、可靠、全固态等特性, 其中以 Nd 作为激活粒子的钕激光器使用更广泛。理想激光器的输出光束应只具有一个模式。然而若不采取选模措施, 多数激光器的工作状态往往是多模的。含有高阶横模的激光束光强分布不均匀, 光束发散角较大。含有多纵模的激光束单色性及相干性差^[1]。在端面泵浦时, 为了让激光器基模输出, 应使泵浦光轴和谐振腔轴重合, 从而使泵浦光在固体激光介质中与振荡光重叠, 但是这在调节上存在一定难度, 实际上泵浦光轴与谐振腔轴常有一定的偏离, 而不能得到理想的基模输出, 微小的光轴偏离, 它会对激光二极管泵浦固体激光器的输出光束产生重要影响^[2], 本文主要通过实验研究离轴泵浦对 Nd:YAG 激光器性能的影响, 并对实验结果进行了分析。

2 实验装置简介

实验装置如图 1 所示。

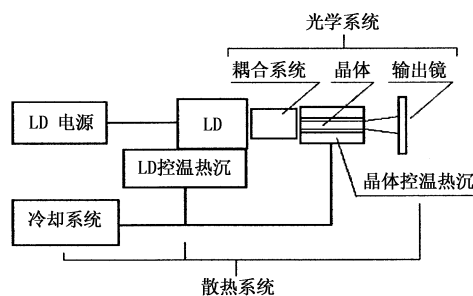


图1 实验装置示意图

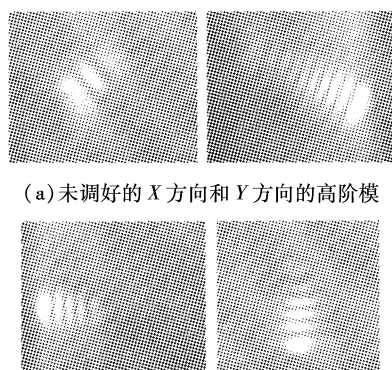
其中, LD 及电源为一子系统, 耦合系统由光纤和组合透镜组成, 晶体和输出镜构成谐振腔, 它与耦合系统一起构成了光学子系统。泵浦源为连续输出 10W 的 LD, 晶体为 $\phi 3\text{mm}$ 的 Nd:YAG 棒状晶体, 晶体前端面镀有 808nm 厚的全透膜, 1064nm 厚的全

作者简介: 车进喜 (1978 -), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事光电对抗试验以及光电对抗试验方法的研究。E-mail: chejinxi@hotmail.com

收稿日期: 2007-01-09

反膜,后端面镀有 1064nm 厚的增透膜,与输出镜一起形成激光谐振腔,输出镜为曲率半径 1m 的球面镜,对 1064nm 透过率为 15.6%,驱动电源为采用恒流工作方式的 JWL-30。

由于实验目的是研究离轴泵浦对振荡模式的影响,所以调节整个光学系统同轴是首要问题。然后,要确定谐振腔的中心轴。实验中,取 Nd:YAG 晶体的前端面,即泵浦光的入射面为坐标原点平面,晶体轴向为 Z 方向,横截面为 XY 平面,水平方向为 X 方向,垂直方向为 Y 方向,调光的结果要使 X 方向的高阶模的光斑彼此平行且垂直于水平方向,Y 方向的高阶模的光斑彼此平行且垂直于水平方向,如图 2 所示。由于水平方向和垂直方向有相同的实验结果,所以文中只介绍水平方向即 X 方向的实验结果。



(a) 未调好的 X 方向和 Y 方向的高阶模
(b) 调好的 X 方向和 Y 方向的高阶模
图 2 X 方向和 Y 方向的高阶模

3 主要实验结论及简要分析

3.1 离轴泵浦对振荡模式的影响

泵浦光在偏离泵浦中心后将输出光的振荡模式产生影响,根据实验结果绘制的泵浦光偏移量与阈值电流的关系曲线如图 3 所示,图中横坐标表示泵浦光对泵浦中心的偏离量,纵坐标表示阈值电流,从图 3 可以看出,泵浦光偏离中心越远,输出光阈值电流越高,这是由于离轴后出现高阶模,而高阶模由于其传播方向与轴的夹角较大,因而几何偏折损耗比低阶模大^[1],则谐振腔的损耗变大,要使激光输出就必须提高阈值电流,所以输出光阈值电流随泵浦光离轴量的增大而增大。

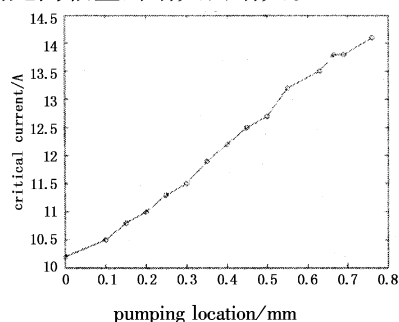


图 3 泵浦光偏移量与阈值电流的关系曲线

实验时,在输出光的光路上放置 CCD 摄像机拍摄输出光光斑,然后采用基于圆拟合的激光光斑中心检测算法^[3]计算出光斑中心,图 4 为根据实验结果绘制的泵浦光偏移量与输出光偏移量的关系曲线,横坐标为泵浦光偏移量,纵坐标为输出光偏移量。由图 4 可见,泵浦光偏移量和输出光的偏离量近似呈线性关系。图中直线的斜率为 1.327,说明在离轴后,输出光是向着泵浦光偏离的方向移动的,且输出光的偏离量接近于泵浦光偏离量。

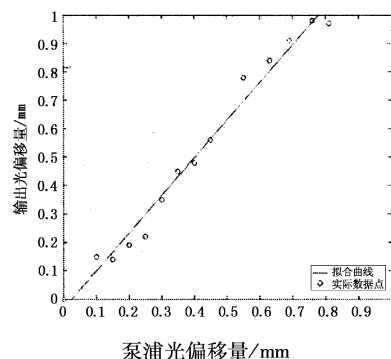
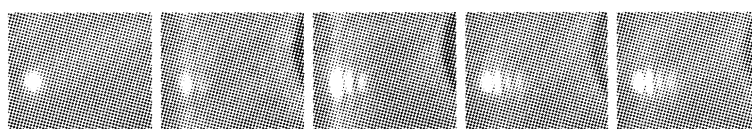


图 4 泵浦光偏移量与输出光偏移量的关系曲线

图 5 是在泵浦光逐渐偏离泵浦中心的情况下得到的输出光模式的变化情况, ΔX 为泵浦光偏离量(泵浦光对谐振腔几何腔轴的偏离量,单位:mm)。由图可见,输出光模式呈现从低阶到高阶的变化,这是由于离轴后,基模的阈值升高,不易起振,而离轴后在同一泵浦位置高阶模的阈值要比低阶模低,在每一位置的阈值附近总是高阶模在模式竞争中占优势,出现的总是高阶模,因而振荡光的模式出现由低阶向高阶的变化。



(a) $\Delta X=0$ (b) $\Delta X=0.4$ (c) $\Delta X=0.55$ (d) $\Delta X=0.7$ (e) $\Delta X=0.755$
图 5 在不同的泵浦光偏离量下得到的不同的输出光模式

3.2 离轴泵浦对光束质量的影响

离轴泵浦会对光束质量产生一定的影响,目前国际上普遍将光束衍射倍率因子 M^2 作为衡量激光束空域质量的参量。

M^2 因子的定义如下:

$$M^2 = \frac{w \times \theta}{w_0 \times \theta_0} \quad (1)$$

式中, w_0 为基模高斯光束的腰斑半径; θ_0 为基模高斯光束的远场发散角; w 为实际光束的腰斑半径; θ 为实际光束的远场发散角。

基模高斯光束具有最小的 M^2 值($M^2=1$),其束腰半径和发散角也最小,达到衍射极限。高阶、多模高斯光束或其他非理想光束(如波前畸变)的 M^2 值

均大于1。 M^2 值可以表征实际光束偏离衍射极限的程度, M^2 值越大,光束衍射发散越快。

光源的单色亮度 B_ν 定义为单位截面、单位频带宽度的单位立体角内发射的光功率:

$$B_\nu = \frac{\Delta P}{\Delta s \Delta \nu \Delta \Omega} \quad (2)$$

式中, ΔP 为光源的面元在频带宽度 $\Delta \nu$ 中,在立体角 $\Delta \Omega$ 内所发射的光功率。

由式(2)可知,光源的单色亮度 B_ν 反比于发光面积 Δs 要和发射立体角 $\Delta \Omega$ 。 Δs 和 $\Delta \Omega$ 可表示为 $\Delta s = \pi w^2$ 和 $\Delta \Omega = \frac{1}{4} \pi \theta^2$,其中 w 和 θ 为实际光束的腰斑半径和远场发散角。根据 M^2 因子定义,可得:

$$B_\nu \propto \frac{1}{(M^2)^2} \quad (3)$$

M^2 因子越小,激光束的亮度越高。由此可见, M^2 因子是表征光束空间相干性好坏的本质参量^[1]。

从图6可以看出,泵浦光离轴后,振荡光的 M^2 因子随着离轴量的增大而逐渐增大,说明光束质量变差。

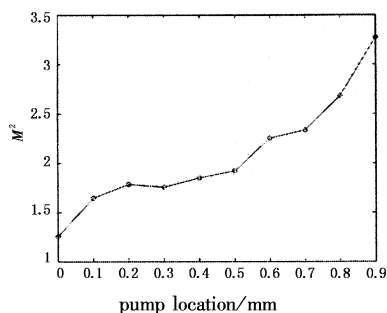


图6 泵浦光偏移量与 M^2 因子的关系曲线

从图7中可以看出,离轴后,振荡光的远场发散角基本不变。由于激光工作物质的热效应,泵浦功率越大,热透镜焦距越小,热透镜效应对激光器输出特性的影响越严重,且越小的泵浦光斑引起的热透镜效应越严重^[4],加大电流时,热透镜变大,而热透镜的曲率又比输出镜的曲率小,对发散角的变化起主要作用的是热透镜而不是输出镜;而热透镜在电流不变或变化不大时,曲率是基本不变的,它与泵浦位置没有关系,在实验中,离轴后电流变化量本身不大,而处理时用的是大电流时的数据,所以,发散角基本不变。

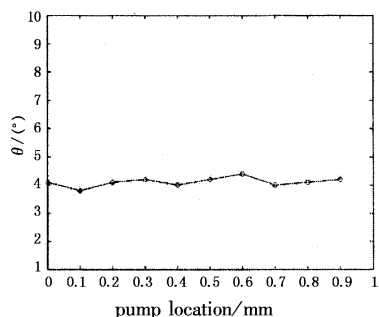


图7 泵浦光偏移量与远场发散角的关系曲线

同时,从图8可以看出振荡光的束腰半径也随离轴量的增大而逐渐增大。而束腰半径逐渐变大,即高阶模的光斑比低阶模大,又因远场发散角变化不大(实验中只有1mrad的变化范围),因而根据式(1),随着模阶次的升高,束腰半径逐渐变大是导致 M^2 因子变大的主要原因。

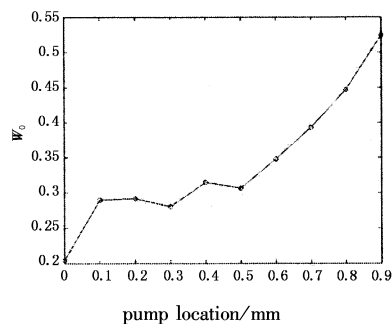


图8 泵浦光偏移量与振荡光束腰半径的关系曲线

可见,离轴后光束质量因子 M^2 逐渐变大,光束质量降低。

3.3 同一泵浦位置下电流对输出光位置及模式的影响

当激光器稳定工作时,在激光晶体内部形成了一个相对稳定的温度场和热应力场分布,晶体的抽运端面同时产生一定程度的热形变^[5]。热效应的产生使得激光晶体具有了热透镜效应,即对于腔内振荡光的作用结果可用一个透镜所起的效果来近似^[6]。激光晶体的热效应是影响激光器高功率运转的重要因素之一^[7]。

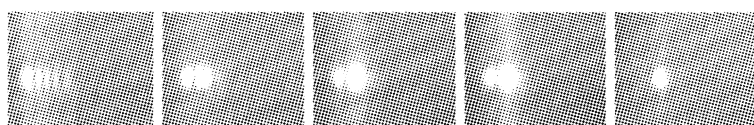
DPL随着泵浦功率的增大,晶体热效应越来越严重,直接影响激光器的输出特性^[8]。

当激光器高功率运转时,激光晶体的热效应是激光系统设计、优化时首先要考虑的因素之一^[7,9]。

实验中发现,在同一泵浦位置时,改变泵浦电流即泵浦功率会使输出光的光斑中心和振荡光的模式发生改变。

图9是在某一泵浦位置时改变泵浦电流得到的输出光的光斑,设 I 为泵浦电流, $\Delta X'$ 为输出光光斑中心的偏离量。此时泵浦光对泵浦中心有0.755mm的偏离量,输出光为四阶模,当加大电流时,输出光的模式发生了变化,而且光斑中心位置也发生了变化,在开始加大电流时, $\Delta X - \Delta X'$ 在减小,所以光斑中心向此时的泵浦中心轴靠拢,输出光位置向泵浦中心轴靠拢是由于加大电流时,逐渐出现基模,而基模往往都是集中在腔的轴线附近^[1],因而输出光逐渐向泵浦中心轴靠拢。但是电流加得过大时,光斑中心又会偏离浦中心轴,再次偏离是由于大电流时,

热效应对腔的结构的影响变得显著,输出光的模式出现由高阶到低阶的变化,是由于在该泵浦位置输出光的阈值是高阶模大于低阶模,因此开始加的小电流高于高阶模的阈值,高阶模能够起振,而其他模式不能起振,当加大电流时,逐渐达到其他模式的阈值,其他模式就起振,但是,由于激光工作物质的热效应的影响,使晶体结构发生变化,小电流时是对低阶模损耗大,对高阶模损耗小,加大电流后,热透镜变大,腔的对称性变好,对低阶模损耗变小,对高阶模损耗变大,因而加大电流后,低阶模在模式竞争中占优势,所以最终出现的是低阶模。



(a) $I = 14.7\text{ A}$, (b) $I = 15.4\text{ A}$, (c) $I = 15.6\text{ A}$, (d) $I = 15.7\text{ A}$, (e) $I = 16.2\text{ A}$,
 $\Delta X' = 0.19\text{ mm}$ $\Delta X' = 0.48\text{ mm}$ $\Delta X' = 0.49\text{ mm}$ $\Delta X' = 0.60\text{ mm}$ $\Delta X' = 0.93\text{ mm}$

图9 同一泵浦位置改变电流时输出光模式的变化

3.4 离轴泵浦对斜效率的影响

斜效率的定义式为:

$$\eta = \frac{p_{\text{out}} - p_0}{p_{\text{in}} - p_{\text{th}}} \quad (4)$$

式中, p_{out} 为激光器的输出功率; p_0 为激光器的阈值输出功率(在理想情况下为零); p_{in} 为激光二极管的输出功率; p_{th} 为阈值时激光二极管的输出功率。斜效率反映了激光器对泵浦光的利用效率^[10]。

在进行实验时,在同一泵浦位置给 LD 施加多个不同电流,得到该泵浦位置斜效率的平均值,然后再改变泵浦位置,重复上述工作,这样就可以得到不同泵浦位置的斜效率,也就得到了在不同离轴量的情况下激光器对泵浦光的利用效率。

图 10 是根据实验结果绘制的泵浦位置与斜效率的关系曲线。从图中可以看出,离轴量越大,斜效率越高。首先,斜效率体现的是泵浦光在克服损耗后的那部分光对输出光的转换效率,而模的阶次越高,该模式在腔内分布的范围越广,模体积就越大,而模体积大,对该模式的振荡有贡献的激发态粒子

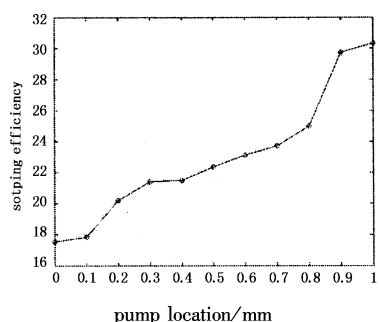


图10 泵浦光偏移量与斜效率的关系曲线

数就越多^[1],也就是在克服损耗后的泵浦光在高阶模时比在低阶模时能使更多的粒子从高能级向低能级向低能级跃迁产生激光,因而离轴后斜效率是随着离轴量增大逐渐增加的。

4 结束语

通过实验,研究了泵浦光的偏离量对激光器输出光性能的影响,结果表明,泵浦光离轴后,虽然斜效率提高了,但是出现了高阶模,而高阶模的方向性较差,输出光的性能降低,这对于实际使用要求激光器工作在低阶模是不利的,因此,在激光器的设计制造及调光时,还是应该尽量让泵浦光中心与腔轴中心重合,以便得到较高质量的输出光束。

参考文献:

- [1] 周炳琨,高以智,陈家骅,等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社. 第4版, 2000,46-48,54,87-88,162.
- [2] Y F Chen, T M Huang, C F Kao, 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.
- [3] 孔兵,王昭,谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 275-279.
- [4] 黄峰,汪岳峰,牛燕雄. LD 端面泵浦的高重频 Nd:YAG 激光器的热效应研究[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 1057-1069.
- [5] Ananada K Cousins. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods[J]. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28(4): 1057-1069.
- [6] M E Innocenzi, H T Yura, C L Frucher, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state lasers[J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 56(19): 1831-1833.
- [7] Y F Chen, T M Huang, C F Kao, et al. Optimization in scaling fiber-coupled laser-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power; influence of thermal effect[J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(8): 1424-1429.
- [8] 杨永明,文建国,王石语,等. LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器中的热透镜焦距[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1770-1772.
- [9] Agnesi A. Design and characterization of a diode-pumped, single longitudinal and transverse mode, intracavity-doubled CW Nd:YAG laser[J]. Appl. Optics, 1997, 36(3): 597-601.
- [10] 王石语,薛海中,唐映德,等. 泵浦光空间分布对 DPL 性能的影响[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(1): 75-80.