

激光二极管侧面泵浦的 高效率 Nd·YAG 激光器*

巩马理 翟刚 金锋 王甦 马楠 李晶 唐永林**
(西南技术物理研究所新激光技术实验室, 成都 610041)

摘 要 用准连续激光二极管列阵侧面泵浦 Nd·YAG 固体激光器, 获得 39.5 mJ 的静态输出, 器件重复频率为 50 Hz, 效率最高达 39.5%。对该器件进行了细致的实验研究, 验证了理论计算的正确性, 并对实验结果进行了分析。

关键词 激光二极管侧面泵浦, 固体激光器, Nd·YAG 激光器。

1 引 言

激光二极管泵浦固体激光器具有效率高、寿命长、结构紧凑、可靠性高等优点, 在激光材料加工、空间通讯、激光雷达等领域有巨大的应用前景。近年来由于微通道冷却高功率激光二极管阵列的进步, 大大促进了高功率二极管泵浦固体激光器的发展。侧面泵浦方式结构简单, 更有利于高功率二极管列阵激光耦合进激光介质, 同时, 泵浦光在激光棒内沿轴向接近均匀分布, 但是对于基模器件其中很大一部分泵浦光能量是被激光棒基模体积外的外层所吸收, 导致了侧面泵浦效率低于端面泵浦。本文作者研制了二极管侧面泵浦 Nd·YAG 激光器, 根据对泵浦模型计算机分析的结果, 指导器件设计, 获得了较好的结果。

2 激光二极管侧面泵浦 Nd·YAG 激光器的实验方案

选用五层结构准连续激光二极管阵列侧面泵浦 Nd·YAG 固体激光器。用大功率电致冷温控仪控制二极管温度(温控精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$), 使激光二极管发射波长为 808 nm, 对应于 Nd·YAG 的吸收带。泵浦脉宽为 200 μs , 最大泵浦能量为 100 mJ, 最高工作重复频率为 50 Hz。

本文采用的侧面泵浦方案(如图 1 所示)与文献[1]类似, 实验表明^[2], 对于直径为 4 mm 的 Nd·YAG 棒, 侧面泵浦时, 约有 30% 的泵浦光透过晶体, 这正与 808 nm 的激光二极管激光辐射在 1% 的 Nd 掺杂时的 3 mm 吸收长度相符。因此, 为提高泵浦效率, 有必要在晶体背面紧包一半圆柱形高反射聚光腔, 使未被吸收的泵浦光又被反射到晶体当中, 在晶体中的某一点附近, 形成集中泵浦光分布, 适当设计谐振腔, 使本征基模与泵浦光分布集中处尽可能

* 本文部分工作得到了四川省青年科技基金的资助。

** 四川联合大学光电技术系研究生。

收稿日期: 1996 年 6 月 21 日; 收到修改稿日期: 1996 年 10 月 18 日

相互重叠, 以实现高效率的基模匹配泵浦。用光线追迹法进行计算分析和实际测量表明, 采取适当的几何结构和尺寸, 激光棒内的泵浦光可以得到相当集中的分布。这意味着如果在这一集中的区域内选取适当的基模尺寸, 可以使器件获得较高效率的基模振荡, 通过计算与实验, 确定选用 $\phi 3.5 \text{ mm}$ 激光棒, 表面抛光, 此时泵浦光与激光基模的相互重叠更有效。根据计算机分析结果, 确定器件的最佳束腰尺寸为 $d = 1.23 \text{ mm}$ 。激光谐振腔选用以平面镜为输出镜的平-凹腔。对于基模器件, 由下式确定凹镜的曲率半径:

$$R = [(\pi/\lambda)^2 w_0^4 + L^2]/L' \quad (1)$$

式中, w_0 为束腰尺寸, L' 为等效腔长。考虑到热效应的影响, 为了得到稳定的输出, 实际选用的凹镜曲率半径应与计算结果略有不同。

3 实验研究与结果讨论

3.1 二极管侧面泵浦 Nd:YAG 激光器实验

选择几组不同透过率的输出镜, 对器件的输出特性进行实验, 并与计算值进行比较。激光介质与激光二极管间的距离为 0.2 mm 。结果如图 2 所示。在图中给出了透过率分别为 7%、19.2%、33.5% 时的输出特性曲线, 实线为实验值, 虚线为理论值, 两者基本相符。以上不同透过率时的最大输出分别为 39.5 mJ 、 34.2 mJ 、 27.9 mJ , 效率为 39.5%、34.2%, 和 27.9%。

进行了最佳透过率实验, 得到不同输出透过率时的脉冲输出能量曲线如图 3 所示, 图中 L 为激光二极管与激光介质间的距离(即泵浦距离)。泵浦能量为 100 mJ 。凹平镜的曲率半径为 8 m 。

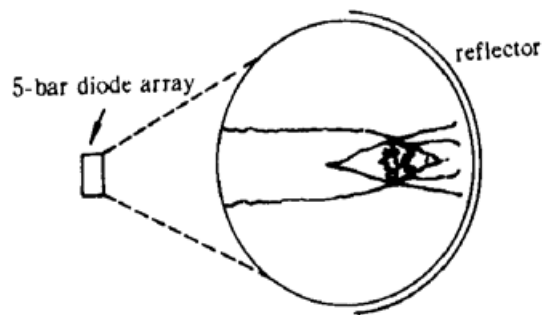


Fig. 1 Cross section of the LD side pumping geometry

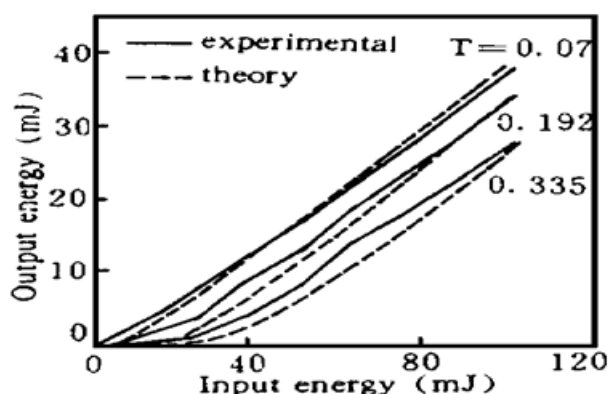


Fig. 2 Input versus output curve for different output coupler transmissivity

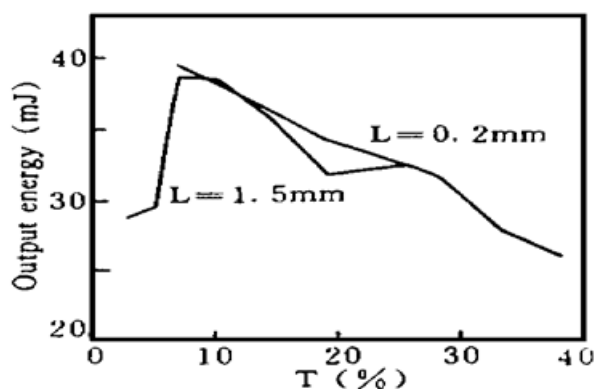


Fig. 3 Output pulse energy versus output coupler transmissivity

从图 3 两组不同泵浦距离的实验结果可看出, 该二极管泵浦固体激光器的最佳耦合输出透过率在 7% 左右, 这与传统灯泵浦脉冲器件的最佳透过率有所不同, 而与作者计算机模拟的计算结果相符合, 也与文献[2]中二极管泵浦固体激光器最佳耦合输出透过率为 10% 相近。这是因为器件的最佳耦合输出透过率与激光单程增益密切相关^[3], 而二极管泵浦固体激光器

中所选用的晶体长度一般较短, 单程增益较小。

在 $R = 8 \text{ m}$ 、 $T = 7\%$ 的条件下, 比较泵浦距离 $L_1 = 0.2 \text{ mm}$ 和 $L_2 = 1.5 \text{ mm}$ 时的输出情况, 如图 4 所示。从实验中可以看出, 当 Nd·YAG 晶体与二极管激光器间的距离越近, 输出越大, 这与计算结果也是相符的, 随着 L 的增大, 棒内的泵浦光分布较集中, 有利于获得基模。但同时随着 L 的增大, 泵浦光耦合进激光棒中的效率降低, 从而阈值提高并影响泵浦效率。因此需选择合适的 L 值, 以获得高效率基模输出。

在输出镜的透过率为 10% 时, 将谐振腔略微调偏, 可得到基模输出, 如图 5 所示, 基模最大输出为 16.9 mJ, 光-光效率为 16.9%, 斜效率 17%。

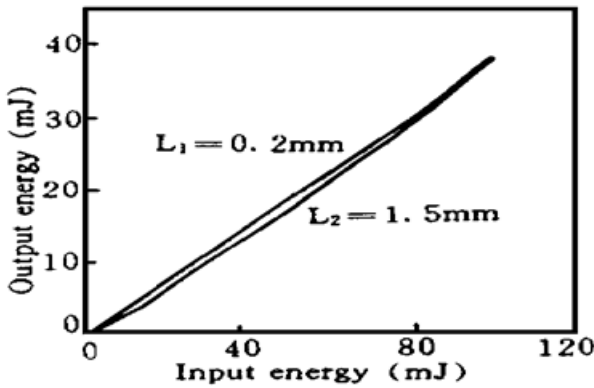


Fig. 4 Input versus output curve for different L

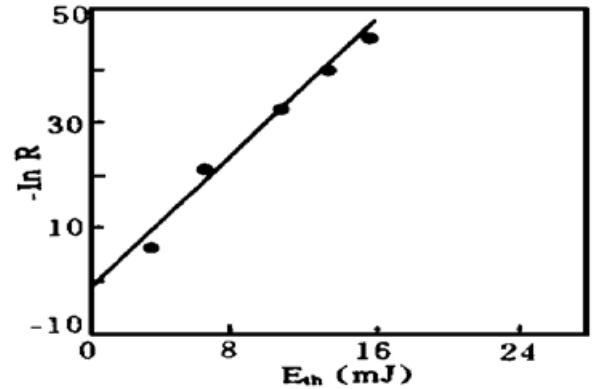


Fig. 5 Input versus output curve for TEM₀₀ mode operation

3.2 器件参数确定

对于四能级系统连续器件, 在阈值附近工作时存在如下关系^[3]

$$P_{th} = [\alpha - \ln(1 - T)]/2K \tag{2}$$

式中 P_{th} 为激光器的泵浦阈值(功率), α 为谐振腔内的光学损耗, T 为输出透过率, K 为泵浦系数。二极管泵浦脉冲固体激光器, 泵浦光脉冲前沿及后沿各有一弛豫振荡, 可近似将其视为脉宽为 τ_p 的方波, 因此可利用上式。在本实验中 $\tau_p = 200 \mu\text{s}$, $P_{th} = E_{th}/\tau_p$ 。在 $L = 0.2 \text{ mm}$ 、 $R = 8 \text{ m}$ 的情况下, 测量了器件阈值随输出透过率 T 的变化, 如图 6 所示。经拟合后 $-\ln(1 - T)$ 与阈值 P_{th} 的关系为一斜截直线, 将该直线延伸到 $P_{th} = 0$ 与纵轴相交, 即可确定出谐振腔内的光学损耗 $\alpha = \ln(1 - T) = 0.02$ 。

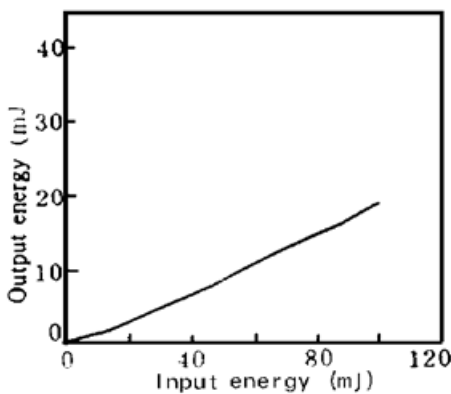


Fig. 6 Laser threshold versus output coupler transmissivity

同时, 由器件的最佳耦合输出透过率公式, 可得到

小信号增益系数

$$g_0 = (T_{opt} + \alpha)^2/2l\alpha = 0.12 \text{ cm}^{-1} \tag{3}$$

式中 $T_{opt} = 7\%$, 为前面得到的实验值。

器件提取率^[3]

$$\eta_E = [T_{opt}/(T_{opt} + \alpha)]^2 = 60.5\% \tag{4}$$

通过以上近似计算, 确定了二极管泵浦 Nd·YAG 激光器的一些基本参数, 为器件的进一步优化设计提供依据。

3.3 二极管侧面泵浦 Nd·YAG 激光器光束特性

采用透镜法测量了二极管侧面泵浦 Nd·YAG 激光器的光束发散角(透镜焦距 $f = 1\text{ m}$), 测得 x 、 y 方向静态多模输出发散角为: $\theta_x = 1.55\text{ mrad}$, $\theta_y = 1.21\text{ mrad}$; 基模输出的发散角为 $\theta_{00} = 0.69\text{ mrad}$ 。

用激光光束分析仪测得激光输出多模及基模时的光束分布, 如图 7 所示。 x 、 y 方向多模输出的光束质量参数分别为: $M_x^2 = 2.3$, $M_y^2 = 1.8$; 基模输出光束 $M^2 = 1.08$ 。

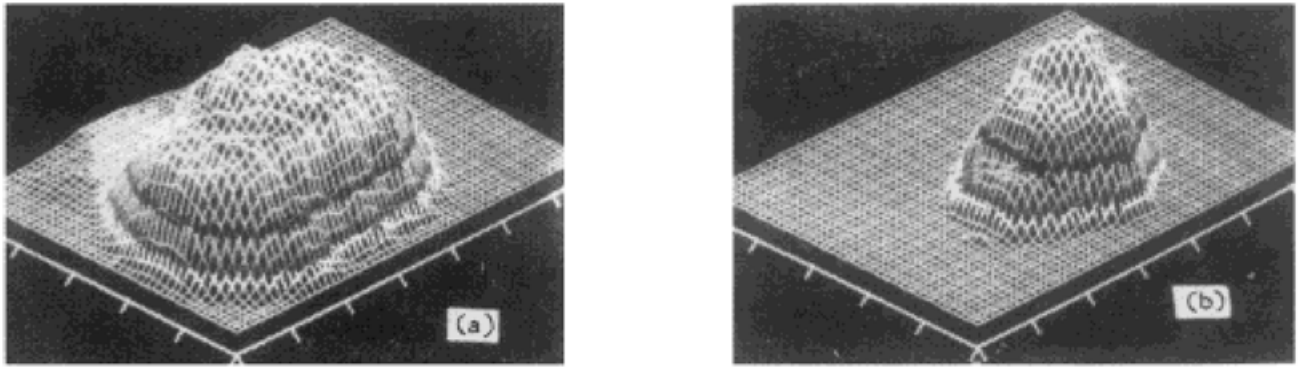


Fig. 7 (a) Beam profile for multimode operation, (b) Beam profile for TEM₀₀-mode operation

结束语 对二极管侧面泵浦 Nd·YAG 激光器进行了实验研究, 根据计算机分析结果指导器件参数的选择, 并通过实验对该泵浦方案的数学模型进行了验证, 确定了器件的一些基本参数, 取得了较为满意的结果, 获得静态 39.5 mJ 多模输出, 重复频率为 50 Hz, 光学效率为 39.5%, 斜效率为 39.7%。基模最大输出为 16.9 mJ, 光学效率为 16.9%, 斜效率 17%。该泵浦方案结构简单, 效率高, 有推广应用价值。对于二极管泵浦 Nd·YAG 激光器仍存在一定的热效应问题, 采用铜质半圆柱形聚光器, 晶体与聚光器相接触, 并与散热器相连, 能较好地改善晶体的散热。另外, 本器件的阈值较低, 在高功率泵浦下必然出现高阶模振荡, 通过略微调偏腔镜增大损耗以获得基模输出, 对基模效率有一定影响, 有必要进一步改进实验, 提高器件基模运转效率。

参 考 文 献

- [1] Larry R. Marshall, A. Kaz, R. L. Burnham, Highly efficient TEM₀₀ operation of transversely diode-pumped Nd·YAG lasers. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(3): 186~188
- [2] D. Golla, S. Knoke, W. Sch ne, High power continuous-wave diode laser-pumped Nd·YAG laser. *Appl. Phys. (B)*, 1994, **58**(5): 389~392
- [3] Walter Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 4th Ed., New York, Springer-Verlag, 1996: 100, 103

High-Efficiency Laser-Diode Side-Pumped Nd·YAG Laser

Gong Mali Zhai Gang Jin Feng Wang Su
Ma Nan Li Jing Tang Yonglin

(Advanced Laser Technology Laboratory, Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041)

(Received 21 June 1996; revised 18 October 1996)

Abstract High-efficiency laser-diode side-pumped Nd·YAG laser is demonstrated. Under 100 mJ pump energy, the output of 39.5 mJ was obtained with the optical conversion of 39.5%. The experimental results were analyzed for various laser parameters.

Key words LD side pumping, solid state laser, Nd·YAG laser.