

CNIC-01669
CAEP-0131

LD 泵浦的 Nd: YLF 激光放大技术

秦兴武 李明中 罗亦鸣 隋展
丁磊 梁樾 赵润昌 陈良明

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900)

摘 要

从理论模拟和实验两方面对环形 LD 泵浦的 Nd: YLF 激光放大系统进行了研究。激光放大系统采用离轴双程放大结构。实验结果表明: 系统在注入能量为 150 μJ , 放大输出为 109 mJ 时, 系统净增益为 1115; 采用环形 LD 紧密泵浦的 Nd: YLF 激光放大器, 有效地提高了二极管的转换效率, 在 1053 nm 处, 获得了 1.01 J 的振荡输出。

关键词: 环形 LD 侧面泵浦 激光放大
分类号: TN248.1

LD Pumped Nd: YLF Amplification Technology

(In Chinese)

QIN Xingwu LI Mingzhong LUO Yiming SUI Zhan
DING Lei LIANG Yue ZHAO Runchang CHEN Liangming
(Centre of Laser Fusion Research, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

A Ring-LD-pumped Nd: YLF laser amplifier system is theoretically and experimentally discussed. A structure of off-axes double passes amplifier is used. The results of experiment shown that 109 mJ output energy with a net gain of 1115 is obtained under 150 μ J input energy; a compact side-pumped structure is used to obtain a high transferring efficiency of LD array, 1.01 J output energy is achieved at 1053 nm.

Key words: Ring-LD, Side-pumped, Laser amplifier

Category: TN248.1

引言

在惯性约束聚变（ICF）中，固体激光器向着高光束质量、高能量或高峰值功率方向发展。以往大多数采用闪光灯泵浦的固体激光器，存在电-光转换效率低、热负载较高等缺点。激光二极管（LD）泵浦的固体激光器则有许多优点，如工作稳定性好，光束质量高，效率比闪光灯泵浦的固体激光器提高 2~2.5 倍，重复频率更高，结构更紧凑等。

美国利弗莫尔实验室（LLNL）采用端面泵浦方式，于 2000 年研制出一台激光二极管泵浦 Yb: S-FAP（掺 Yb³⁺ 的 Sr₅(PO₄)F 晶体），波长 1053 nm，工作频率 10 Hz，脉宽 1~10 ns，能量 100 J 的固体激光器。日本 Osaka 大学采用侧面泵浦方式也于同一年研制出一台激光二极管泵浦 Nd: glass（Zig-zag slab），波长 1053 nm，工作频率 10 Hz，脉宽 20 ns，能量 8.5 J 的固体激光器。我国在高功率二极管泵浦固体激光器方面的研究比较少，目前只有个别实验室进行二极管泵浦 Nd: YAG 再生放大器的研究。

在原型装置预放级重复频率多程放大器中，采用 LD 代替闪光灯作为泵浦源，其突出优点为能量输出的不确定性小，光束质量高，可克服采用闪光灯泵浦带来的热退偏和其它负作用；可以 10 Hz 的重复频率运行，为后续激光器件系统和靶场系统提供方便的调试光源。采用 LD 将提高整个驱动器系统的运转效率、稳定性和成功率。

1 技术指标

LD 泵浦的 Nd: YLF 激光放大系统采用离轴双程放大结构，避免因放大器的热退偏效应而产生的漏光对前后级和系统信噪比的影响，该系统的技术指标如表 1 所示。

表 1 LD 泵浦的 Nd: YLF 激光放大系统的技术指标

工作波长	1053 nm
注入能量	150 μJ
输出能量	109 mJ
系统总增益	1115
光束口径	5 mm×5 mm

2 LD 泵浦 Nd: YLF 激光放大系统

2.1 系统设计

LD 泵浦的 Nd: YLF 激光放大系统采用离轴双程放大结构，系统的光路排布如图 1 所示，该系统主要包括一个单纵模振荡器，两个激光放大器。单纵模振荡器产生种子光脉冲，波长为 1.053 μm，能量约 1 mJ，光斑尺寸约为 2 mm，通过扩束系统和软边光阑空间整形后，光斑尺寸为 5 mm×5 mm（0.5×I/I₀ 强度），能量约为 50 μJ。经过一滤波器后，注入磁光隔离器，使光束偏振态旋转 45°，而后进入激光放大器。注入脉冲在激光放大器单程以“V”字型通过，通过空间滤波器滤波后进入下一个激光放大器，末端反射镜使光束小角度分离再次进入两个激光放大器，即每个激光头对光束进行四次放大。种子脉冲的注入和导出通过磁光隔离器和薄膜偏振片完成，3000 倍的总增益通过光束双程放大系统获得。通过双程放大后，脉冲能量提升到约 100 mJ。空间滤波器保证了系统的像传递。

系统主要工作参数:

工作波长:	1.053 μm
重复频率:	10 Hz
放大器构型:	离轴双通
注入能量:	50 μJ
光束尺寸:	5 mm $\times$ 5 mm ($0.5\times I/I_0$ 强度)
系统总增益:	3000 倍
系统总损耗:	50%
工作通量:	0.6 J/cm ²
输出能量:	100 mJ

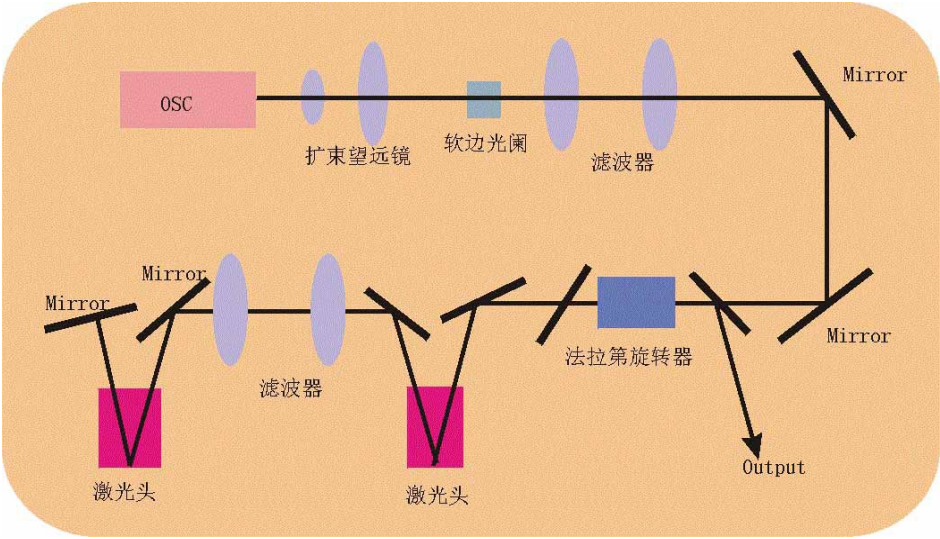


图 1 LD 泵浦的 Nd:YLF 激光放大系统光路排布示意图

2.2 系统模拟

根据系统设计要求，利用 Fresnel 对图 1 所示的系统进行模拟。在软边光阑处用方光束作为模拟光束，注入能量为 22 μJ ，光斑形状和波形如图 2 和图 3 所示。光束经过系统后，激光能量由 22 μJ 增加到输出时的 180 mJ，输出如图 4 所示，系统增益为 8182。该模拟是在单通增益 11.6 倍时得到的结果（这里的“单通”是指入射种子光经增益介质另一端面反射后，又从入射端面出射的“V”字型光路，泵浦功率为 3 kW）。通过模拟计算，得到系统单个激光头增益与泵浦功率的曲线，如图 5 所示，这里的增益仍是指激光走过“V”字型的单程增益。

图 6 为系统中各元件在放大过程中的输出能量的模拟结果。由图 7 中可以看出，各元件的 B 积分比较小，只有 0.012 432，表明该系统的光束的相位畸变很小。



图2 注入脉冲空间波形

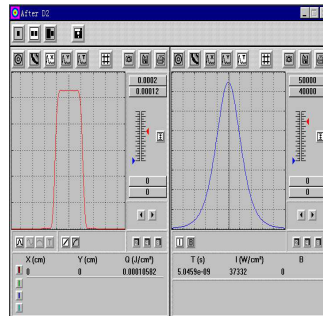


图3 光强沿 x 轴的分布及时间分布

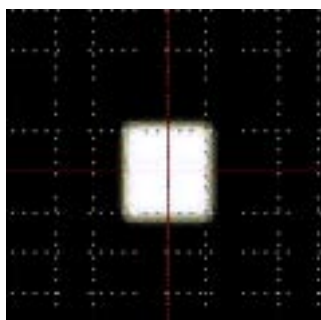


图4 输出脉冲空间波形

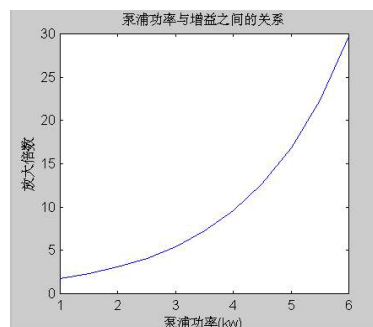


图5 增益与泵浦功率关系

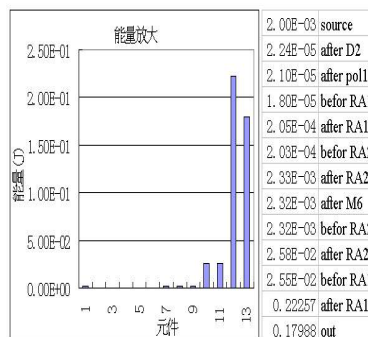


图6 各元件能量放大过程

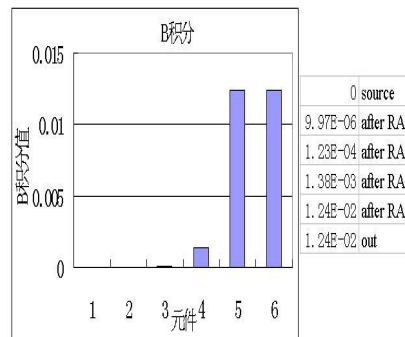


图7 各元件放大过程中的 B 积分

2.3 环形高功率 LD 泵浦 Nd: YLF 激光放大器

二极管激光发散角很大且光束截面 x, y 不对称, 通常高功率、大面积 LD 阵列进行端面或侧面泵浦时, 要通过耦合系统将泵浦光变换为光束截面较小的近高斯型光束后再注入介质, 以求得与腔模空间的最大交叠。复杂的耦合系统增加了泵浦光的损耗, 限制了激光器能量转换效率的进一步提高, 而且大多成本昂贵, 效果也不甚理想。

采用环形 LD 阵列紧密环绕棒状增益介质进行直接泵浦的方案, 用较简单的方法实现了较高的泵浦光能量转换效率和泵浦均匀性。环形 LD 侧面泵浦的结构示意图如图 8 所示, 由两个半圆形的二极管阵列组合而成。

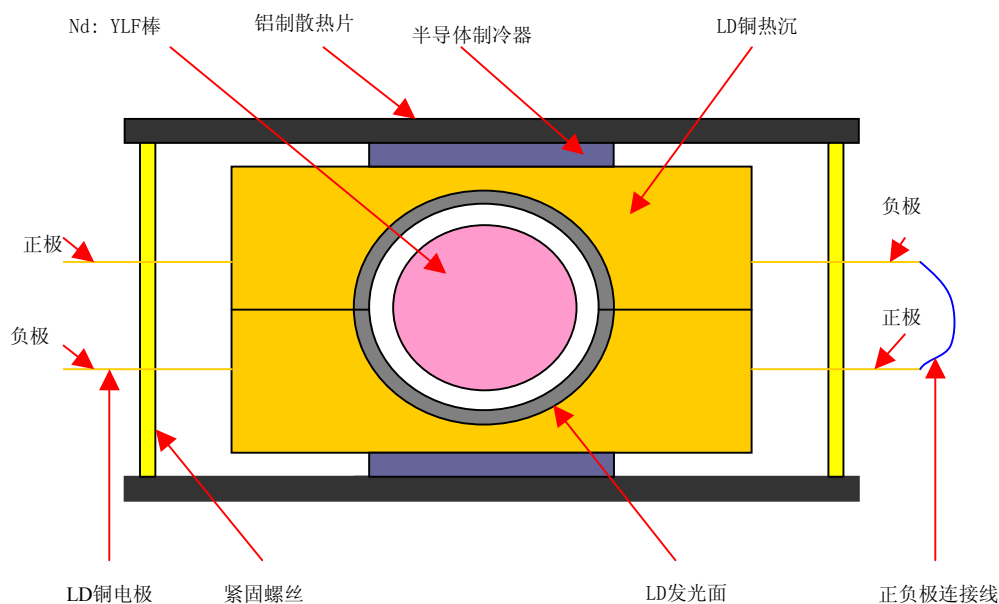


图 8 环形 LD 侧面泵浦结构图

由于二极管的泵浦波长随温度变化会发生漂移，降低了二极管泵浦光的利用效率。为使二极管的波长不发生漂移或降至最小，采用温度自动控制仪对二极管波长进行准确控制，温度自动控制仪如图 9 所示。温度控制仪可以手动和自动控制，其控温精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，通过热敏电阻探测 LD 的温度并反馈给温度控制仪，由预设温度和探测温度的偏差确定电压，并由温度控制仪提供确定的电压给半导体致冷器件，使探测的温度与预设温度一致，从而将 LD 的泵浦波长比较准确地控制在 798 nm 处，达到提高二极管泵浦光利用效率的目的。

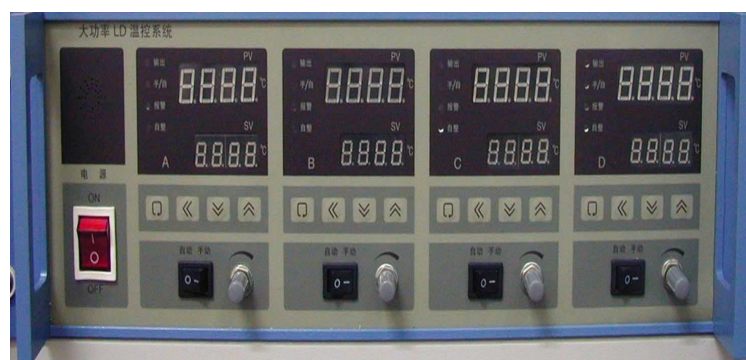


图 9 LD 温度控制仪

LD 的驱动源采用恒流驱动方式，其装置如图 10 所示，驱动电流为 1~100 A，电流不确定性为 0.1 A，重复频率为 1~10 Hz，驱动电压为 20~350 V，工作温度为 10~40 $^{\circ}\text{C}$ 。

内外同步功能, TTL 或 5V CMOS; 抗强电场干扰, 可以带 16 kW 的 LD 阵列负载。工作脉冲形状为方波, 无尖峰和反冲脉冲, 脉冲宽度为 50~400 μs , 如图 11 所示。



图 10 LD 驱动源

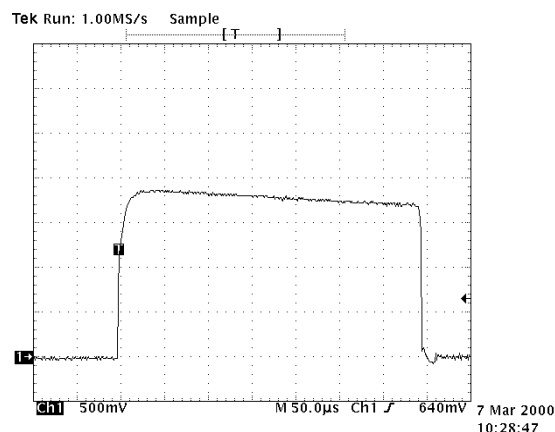


图 11 驱动源工作电压波形

环形高功率二极管泵浦的 Nd: YLF 激光放大器, 泵浦源由两个半圆形的二极管组成一个环形的泵浦结构, 工作物质置于其中 (如图 12 所示), 其实验装置如图 13 所示。二极管由信息产业部提供, 单个二极管阵列的功率为 1.5 kW。

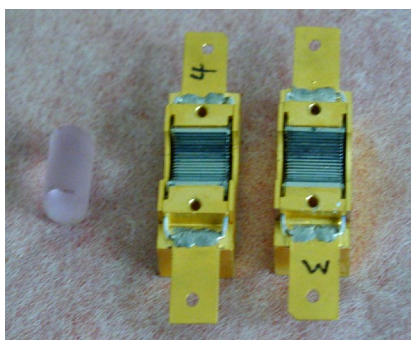


图 12 LD 及介质实物图

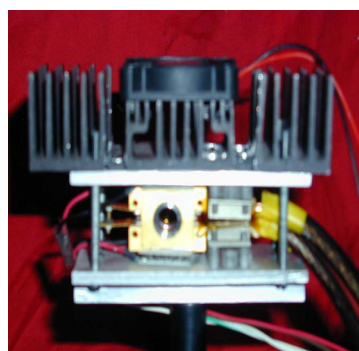


图 13 激光头实验装置图

用 OMA4 对环形高功率二极管的光谱进行测量, 结果如图 14 所示。由于激光头特殊结构的限制, 实验难以直接测量泵浦光的分布, 因此用计算机对泵浦光在介质棒一个横截面内的分布进行了模拟, 模拟的结果如图 15 所示。同时对输出激光的近场均匀性进行了测量, 结果如图 16 和图 17 所示。通过模拟结果可见, 在介质一个横截面内的大部分区域内, 泵浦光的分布都很均匀。而从近场图可以看出, 增益的分布在相应区域内也比较均匀, 这也间接地验证了泵浦的均匀性。之所以光强分布呈现出四周弱, 中间强的特点, 主要原因在于 YLF 中 Nd^{3+} 掺杂浓度比较低, 从而使泵浦光的吸收不够均匀, 增益过于集中在中心。在更换适当掺杂 Nd^{3+} 掺杂浓度的 YLF 后, 情况将得到改善。

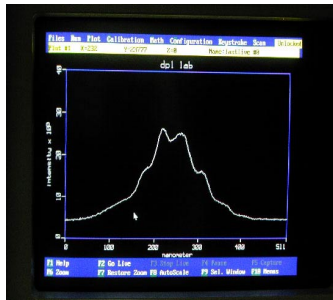


图 14 环形二极管泵浦源光谱分布



图 15 二极管泵浦光均匀性模拟图

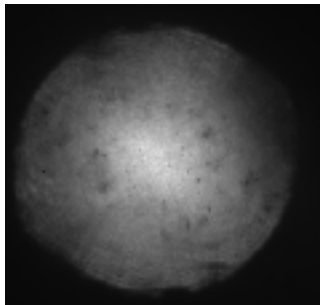


图 16 环形二极管的近场

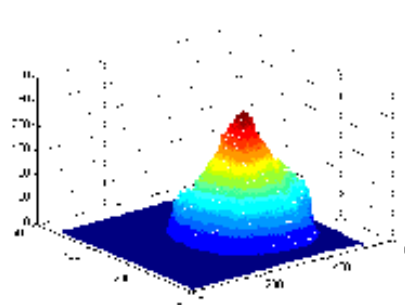


图 17 二极管泵浦光强度分析图

为了测量该激光放大器的性能，搭建了一振荡器，如图 18 所示。它由激光头、输出耦合镜和空间滤波器组成 $4f$ 系统结构，Nd: YLF 晶体的高反膜端面作为振荡器的一个腔镜。激光头的实验装置见图 13，LD 单个二极管阵列的功率为 1.5 kW，泵浦波长为 798 nm；Nd: YLF 的受激发射截面为 $18 \times (10 \sim 20) \text{ cm}^{-2}$ ，饱和通量为 1.03 J/cm^2 ，泵浦功率密度为 2.9 kW/cm^2 ，介质尺寸为 $\phi 9.6 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ ，一端镀 1053 nm 增透膜，另一端镀 1053 nm 高反膜和 798 nm 增透膜。对 Cr^{4+} : YAG 调 Q 晶体而言，一般的平平腔自由振荡产生的光功率密度不够，不能使晶体达到饱和，而采用 $4f$ 系统结构的谐振腔，既可产生自由振荡，又可增加自由振荡时的光功率密度，满足 Cr^{4+} : YAG 调 Q 晶体的饱和光功率密度。

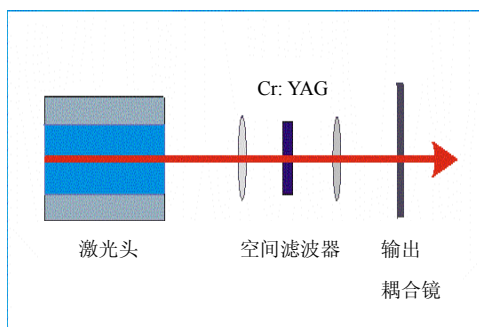


图 18 振荡器光路排布示意图

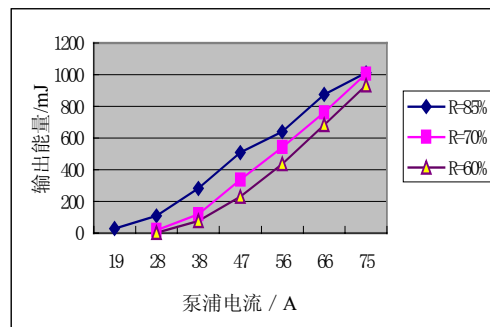


图 19 输出能量与泵浦电流关系

实验中采用了透过率分别为 15%，30%和 40%三种输出耦合镜，实验测量了在这三种

输出镜下的自由振荡输出能量与泵浦电流的关系, 所得结果如图 19 所示。从图 19 可以看出, 当 R (反射率) 为 60% 时, 光-光转换效率为 50.7%, 在泵浦电流为 75 A 时, 自由振荡输出 0.933 J; 在 R 为 70% 时, 光-光转换效率为 59.9%, 在同样的泵浦电流时, 振荡输出 1.011 J; 在 R 为 85% 时, 光-光转换效率为 60.3%, 在同样的泵浦电流时, 振荡输出 1.005 J。上述光-光斜效率分别为 68.8%, 70.4%, 66.3%。在输出耦合镜透过率为 40% 时, 用掺 Cr^{4+} : YAG 调 Q 晶体对其调 Q, 泵浦电流与输出能量曲线如图 20 所示, 最大输出能量为 250.6 mJ, 光-光转换效率为 18.6%, 调 Q 输出脉冲波形如图 21 所示, 脉宽为 87.9 ns。输出近场如图 22 所示。

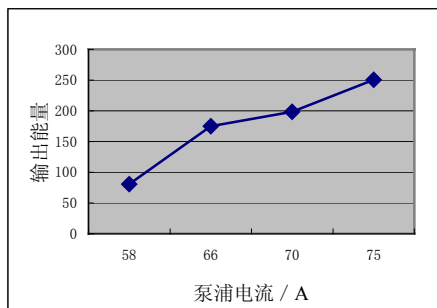


图 20 调 Q 输出能量

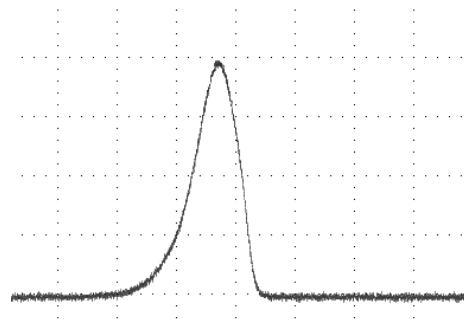


图 21 调 Q 输出脉冲波形

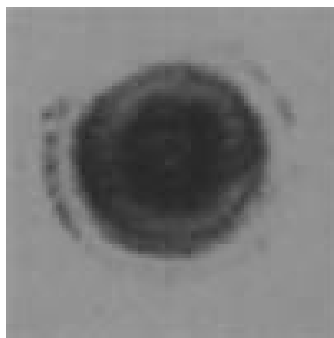


图 22 调 Q 输出近场

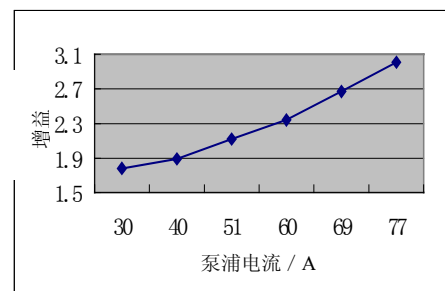


图 23 激光放大器的增益曲线

采用行波放大, 测量激光放大器的泵浦电流与增益的关系, 注入脉冲在激光头的工作物质以“V”字形通过。实验测得激光头在不同泵浦电流下的增益曲线如图 23 所示, 激光头在泵浦电流为 75 A, 注入能量为 125 μJ , 输出能量为 1.202 mJ 时, 二极管的泵浦功率为 2.81 kW, 单通增益为 3.01。

2.4 LD 泵浦 Nd: YLF 激光放大系统的实验内容和结果

实验装置图如图 24 所示。该系统采用了两个如图 13 所示的激光头, 采用行波放大, 分别对每个激光头在不同泵浦电流下的增益进行测量, 测量结果如图 25 和图 26 所示, 在泵浦电流为 78 A 时, 激光头 1 单通增益为 2.66 倍, 激光头 2 单通增益为 3.01 倍。

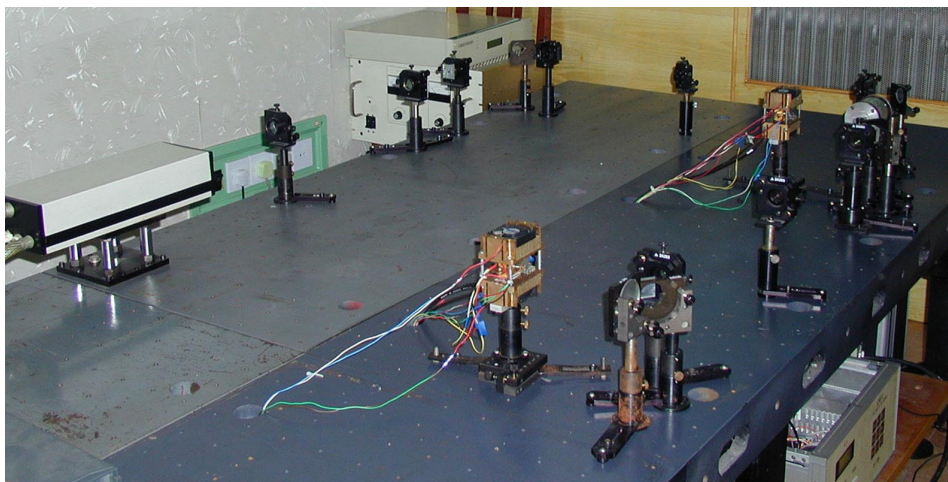


图 24 实验装置图

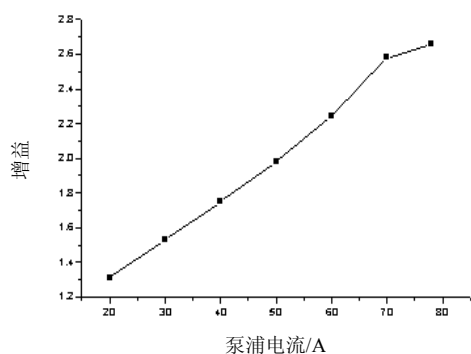


图 25 激光头 1 增益与泵浦电流曲线

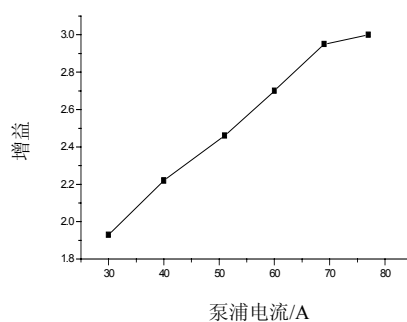


图 26 激光头 2 增益与泵浦电流曲线

系统从偏振片注入脉冲，通过系统双程放大后，偏振方向改变了 90° ，再由偏振片导出。经过测量，整个系统的静态损耗为 34.7%，由于单纵模振荡器产生的激光脉冲不是完全的线偏振光，造成系统的静态损耗偏大，主要表现在偏振片的偏振损耗、法拉第静态

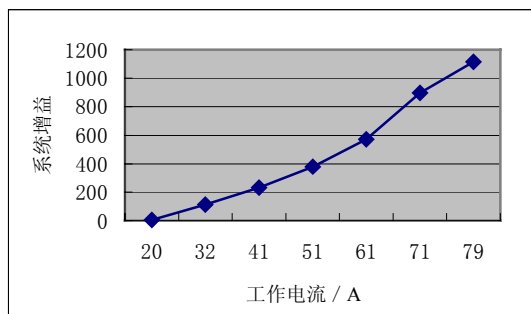


图 27 系统增益与泵浦电流关系曲线

损耗和 Nd: YLF 晶体的损耗。图 27 为系统净增益与泵浦电流的关系, 在泵浦电流为 78 A 时, 系统的净增益为 1115 倍。在相同泵浦电流、不同输入能量情况下, 测得系统的净增益如图 28 所示。由图 28 可见, 系统远远没达到饱和。系统在注入能量为 137.4 μJ 时, 输出能量为 100 mJ, 图 29 为放大输出近场图。

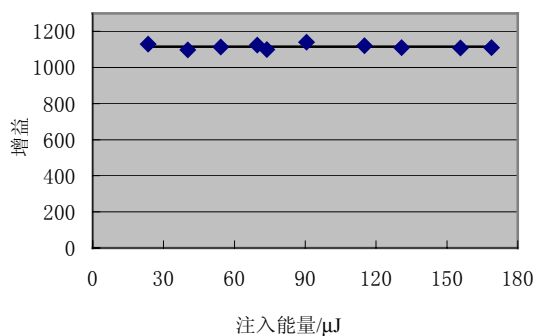


图 28 系统增益与不同注入能量的关系

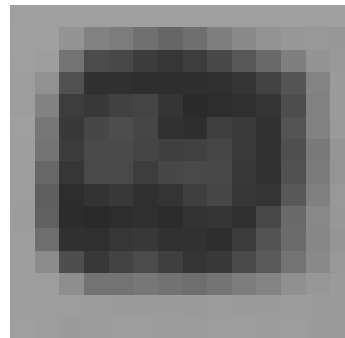


图 29 系统输出近场

3 创新点和特色

(1) 与以往的端面和侧面泵浦的激光器相比, 研制成功的紧密环形 LD 泵浦的激光放大器具有泵浦几何简单、结构紧凑、泵浦光利用率高、能量转换效率高等优点;

(2) 采用双通离轴行波放大构型, 减少放大器数量, 避免因放大器的热退偏效应而产生的漏光对前后级和系统信噪比的影响, 获得较高增益能力;

(3) 采用高精度驱动源, 降低了工作电流的抖动, 提高了系统能量输出的稳定性;

(4) 采用温控自动控制系统, 将二极管的泵浦波长准确地控制在介质的高峰值吸收带宽内, 提高了二极管的利用效率;

(5) 采用软边光阑对注入光束进行整形, 实现了较大口径方型光束放大, 能方便地与预放系统接口。

4 总 结

采用 LD 泵浦的 Nd: YLF 离轴双程放大系统, 有效地避免了因放大器的热退偏效应而产生的漏光对前后级和系统的信噪比的影响。系统注入能量为 150 μJ 时, 系统输出 109 mJ, 净增益为 1115, 可满足原型装置预放级重复频率多程放大器的要求。这种新型泵浦技术在固体激光技术领域中将具有十分广阔的科研以及商业应用前景。

参考文献

- 1 Song J, Liu A P, Shen D Y, Ueda K. High optical-to-optical efficiency of LD pumped cw Nd: YAG laser under pumping distribution control. Appl. Phys., 1998, B 66: 539~542
- 2 Shuchi Fujikawa, Tetsuo Kojima, Koji Yasui. High power high efficient diode-side-pumped Nd: YAG laser. OSC TOPS Vol.10 Advanced Solid State Laser, 1997
- 3 Hans Bruesselbach, David S. Sumida, et al. High-power diode side-pumped Yb: YAG laser. OSC TOPS Vol.10 Advanced Solid State Laser, 1997