

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0005-03

百瓦级绿光 DPL 激光器技术研究

王卫民, 姚震宇, 庞毓, 高清松, 陈晓琳, 童立新, 张雷

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 对激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 板条双程功率放大器进行了研究, 激光器基模输出平均功率大于 200 W, 建立了激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 之字型板条激光主振荡-多程功率放大(MOPA)系统, 它由两级 Nd:YAG 板条双通功率放大器构成, 最后一级为单通功率放大器。在 500 Hz 重复频率时, 获得单脉冲能量为 410 mJ 的 1.06 μm 激光输出, 光束质量 M^2 小于 6.5, KTP 晶体在 80°C 温度下倍频, 输出 0.53 μm 绿光单脉冲能量 210 mJ, 光束质量 M^2 小于 6.5。

关键词 激光技术; 激光功率放大器; 固体激光器; 二极管激光器; 光束质量

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

Study on DPL Technology of Hectowatt Green Laser

WANG Wei-min, YAO Zhen-yu, PANG Yu, GAO Qing-song, CHEN Xiao-lin

TONG Li-xin, ZHANG Lei

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Diode laser arrays side-pumped Nd:YAG slab double-pass laser power amplifier is studied in the paper. Experimental results and numerical simulations of laser performance are presented. MOPA system has been built up using gaussian beam as source. Over 210 mJ energy per pulse green laser output at 500 Hz repetition rate is achieved. Beam quality M^2 is less than 6.5. The fluctuation of the laser output energy is less than 2%. The result shows that the experimental data have been consistent with the numerical calculation results.

Key words laser technique; laser power amplifier; solid-state laser; LD beam quality M^2

1 引言

在固体激光器的研究中, 为了获得高功率和高光束质量, 一般采用主振荡器-功率放大器结构^[1]。在 LD 抽运固体激光器中, 要实现激光器高功率、高光束质量、高效率工作, 需要选择合理的多程放大器构型, 设计合理的抽运耦合系统, 提高增益介质抽运密度, 采取有效措施实现放大器间光束口径与增益介质中抽运体积的匹配等^[2]。采用振荡器成功研制了单脉冲能量分别为 2.37 mJ, 18.23 mJ 的近衍射极限的 DPL 激光器^[3,4]。为进一步提高 DPL 激光器输出功率, 且激光器有较好的光束质量, 开展了多程功率放大器的实验研究和理论计算。

本文对激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器进行了研究, 采取有效措施既可获得高的光束质量, 又可获得高功率的激光输出。通过对 MOPA 结构优化设计, 使激光器(DPL)工作在最佳状态。开展激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 板条多程放大系统的

理论计算和实验研究, 在高重复频率下, 获得了高光束质量的高功率输出。同时开展了高重复频率下 DPL 的热效应补偿研究。

2 实验布局

激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 双程功率放大器的实验装置如图 1 所示。放大器由三个布儒斯特角梯形 Nd:YAG 板条构成, 吸收厚度为 5 mm。主振荡器产生的近衍射极限的 1.06 μm 高斯激光束通过扩束镜、法拉第旋光器和 $\lambda/2$ 波片以后, 进入功率放大器, 功率放大器采用两级双通功率放大器 and 一级单通功率放大器结构, 以便充分利用放大器内的储能, 提高激光系统的效率, 法拉第旋光器和 $\lambda/2$ 波片作为隔离器。三个 Nd:YAG 板条的通光口径为 5 mm \times 5 mm, 有效增益长度为 60 mm。在实验中, 采用多次测量取平均值方法, 获得板条的单程损耗为 5%, 激光器在不同重复频率下工作, 功率放大器

基金项目: 国家 863 激光技术领域资助项目。

作者简介: 王卫民, (1965-), 男, 中国工程物理研究院应用电子学研究所研究员, 博士, 主要从事二极管抽运高功率固体激光器技术研究。E-mail: weimin_653@163.com

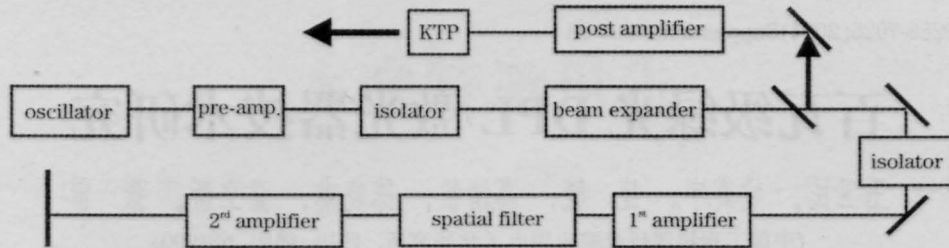


图1 实验装置布局

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

热透镜焦距数值不同。激光器在某一固定重复频率下工作,可以考虑使用单一的凸柱面镜进行补偿,其效果较好。使用 KTP 晶体腔外倍频,获得较高的 $0.53 \mu\text{m}$ 线偏光输出。采用 55.4° 角偏振片作为耦合输出,激光器的退偏小于 1%。

2.1 主振荡器

主振荡器使用平凹腔结构,选用准连续二极管激光器作抽运源,二极管激光器的占空比为 12%,峰值功率 500 W,用温控水冷循环系统控制发射波长与 Nd:YAG 吸收峰值相匹配。Nd:YAG 直径 $\phi 2 \text{ mm}$, 五维对称抽运,二极管激光用光纤柱面镜耦合进 Nd:YAG 棒,在谐振腔内用 $\phi 1.1 \text{ mm}$ 小孔限制激光器的横模。

激光器工作的重复频率从 20 Hz 到 500 Hz 可调,二极管激光器的抽运脉宽为 $250 \mu\text{s}$, KD*P 电光 Q 开关,主振荡器输出的单脉冲能量为 2~4 mJ,激光脉宽 15 ns,单横模工作 ($M^2 < 1.4$)。

预放所使用的抽运模块与主振荡器抽运模块相同,经预放后,输出的单脉冲能量为 8 mJ,光束质量 M^2 小于 1.4。

2.2 功率放大器

功率放大器增益介质 Nd:YAG 板条大小为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 117 \text{ mm}$,使用 144 个激光二极管“bar”双侧面抽运,二极管峰值功率 40 W,二极管激光波长 806~810 nm,板条角度为 30.92° ,冷却温度 20°C 。Nd:YAG 板条全反射面传导冷却,板条两个毛面为二极管激光抽运面。

2.2.1 小信号增益系数

用微弱信号单通输入法,测量能量放大倍数,利用

$$G = \exp(g_0 l) \quad (1)$$

计算获得小信号增益系数 g_0 , (1) 式成立的条件是 $E_{\text{in}} \ll E_s$, 其中 E_{in} 为输入到放大器模块的单位面积上的能量, E_s 为饱和能量密度, E_{out} 为输出能量密度

$$G = E_{\text{out}}/E_{\text{in}} \quad (2)$$

驱动电流 43 A,脉宽 $250 \mu\text{s}$,冷却循环水温度 20°C ,流量 1.1 加仑。在不同的重复频率下的,小信

号增益值列于表 1。

表 1 不同重复频率下小信号增益的测量值

Table 1 Small signal gain in different pulse rates

Pulse rates/Hz	100	200	300	400	500
Signal gain	10.24	10.87	10.87	9.75	8.65

测量的退偏为 0.8%,在 500 Hz 重复频率下,测得的小信号增益为 8.7,当冷却循环水温度为 17°C 时,测量小信号增益为 9.15。

2.2.2 热透镜焦距的测量

为了使测试结果尽量准确,使 He-Ne 激光变成平行光,通光口径大于 $\phi 7.1 \text{ mm}$,通过加载额定电流的放大器模块(500 Hz),在输出端通过 M^2 测试仪测试光束的发散角,就可以获得放大器模块水平方向的焦距。

放大器模块两个方向的热透镜焦距相差较大,其中垂直方向的焦距大于 5 m,在测试过程中,可以不考虑这个方向的聚焦情况,测得板条水平方向的热焦距为 -35.5 cm 。

2.3 热焦距补偿

考虑到放大器模块两个方向的热透镜焦距数值不同,其中垂直方向的焦距大于 5 m 以上,在热透镜的补偿中可以不考虑此方向。对于水平方向的热透镜效应,可以考虑使用单一的凸柱面镜进行补偿。根据理论计算结果,设计了焦距为 34 cm 和 45 cm 两种凸柱面镜。在实验中,当激光器工作在 500 Hz 重复频率下,在每个抽运模块的前后各加一块柱面镜进行热焦距的补偿,其补偿效果较好。当激光器工作在 400 Hz 重复频率下,第一、二两级放大器各加一面柱透镜对热焦距补偿,而第三级放大器加两面柱透镜进行补偿,其效果较好。补偿后热焦距大于 3 m。

2.4 KTP 晶体倍频

选择工作在 80°C 温度下的超纯 KTP 晶体作为倍频器件,使用半导体器件使 KTP 晶体恒定在 80°C 工作。KTP 晶体的大小为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,通光长度为 10 mm。激光束的光斑尺寸为 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,KTP 晶体倍频效率可达到 50%。

3 多程功率放大器理论计算

Nd:YAG 板条“之”字型光路多程放大器的理论计算公式:

$$F_{K+1} = TE_{\text{sat}} \cos \theta f(2-f) \times \ln \left[G_K \left(\exp \left(\frac{F_K}{E_{\text{sat}} \cos \theta f(2-f)} \right) - 1 \right) + 1 \right] \quad (3)$$

其中 K 为放大程数, F_K 为第 $K+1$ 程放大器的输入能量密度, F_{K+1} 为放大后的输出能量密度, 放大介质的增益为 G_K , 其表达式为:

$$G_{K+1} = G_K \exp \left[-p \frac{\Delta F_K}{E_{\text{sat}}} \right] \quad (4)$$

其中, $\Delta F_K = \frac{F_{K+1}}{T} - F_K$, p 的取值范围: $\frac{k_1}{k_1+k_2} < p < 1$,

p 还可定量估算为: $p = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{T_0}{\tau_f} \right)$, T_0 是相邻两程放大之间的时间间隔, τ_f 为激光上能级寿命。

计算结果: 不同输入能量时, 光束经过第一、第二和第三个板条及返回进行第二程放大的输出能量变化如图 2 所示。

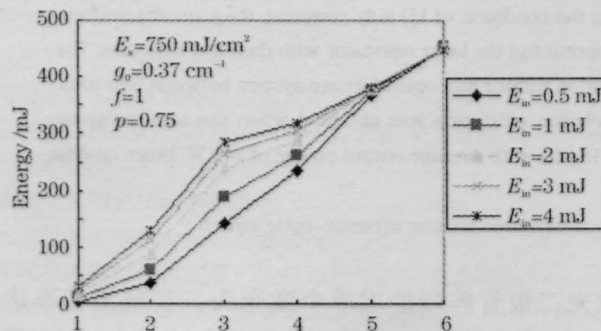


图 2 数值计算结果

Fig.2 Simulatal output energy

4 实验结果及分析

对激光二极管抽运 Nd:YAG 板条主振荡器-功率放大器进行了实验, 放大器选用三级结构, 500 Hz 重复频率下, 每个放大器的储能为 280 mJ 左右, 放大器模块在不同的重复频率下的储能有较大的差别, 即随着重复频率的升高, 储能降低。

在实验中, 采用多次测量平均值的方法, 获得放大器模块的静态单程损耗为 5% 左右。在双程放大结构中, 系统含有一个振荡器、预放和三个功率放大器, 为了使振荡器输出光斑大小与放大器口径匹配, 用望远镜对振荡器输出的光束进行扩束, 法拉第旋转器与

表 2 输出的单脉冲能量(0.53 μm)

Table 2 Output single pulse energy (0.53 μm)

Frequency	10Hz	100Hz	200Hz	300Hz	400Hz	500Hz
Energy	230	215	232	230	245	210

$\lambda/2$ 波片、偏振片组成隔离器, 将振荡器与功率放大器间的退偏光隔离开, 当振荡器输出的线偏振光第一次通过 45° 角法拉第旋转器和 $\lambda/2$ 波片组时, 光的偏振方向旋转 45° 角, 先后通过二个放大器, 经 0° 角全反射镜反射, 第二次通过二级放大器和 45° 角法拉第旋转器和 $\lambda/2$ 波片组, 激光束的偏振方向与振荡器输出光束偏振方向相差 90° , 最后经偏振片输出, 输出光束经第三级单通放大器后, 通过 80° 温控的 KTP 晶体倍频, 产生 532 nm 的绿光输出。

整个系统 1.06 μm 激光在 400 Hz 重复频率下有最大输出, 单脉冲能量为 474 mJ, 激光脉冲宽度为 15 ns。激光器在 400 Hz 重复频率下, 输出 0.53 μm 绿光为 245 mJ。表 2 为激光器在不同重复频率下输出的单脉冲能量(0.53 μm), 使用 M^2 -2000 测量光束质量 M^2 小于 6.5, 如图 3 所示。

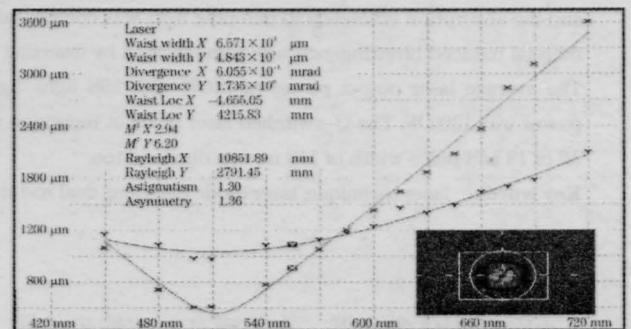


图 3 500 Hz 0.53 μm 绿光光束质量的测量结果

Fig.3 Beam quality of 0.53 μm green laser at 500 Hz

参考文献

- 1 W. Kochner, Solid-State Laser Engineering [M]. 4th ed Berlin: Springer-verlag, 1996
- 2 J. L. Dallas R. S. Afzal Modeling of a diode-side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Appl. Opt.* 1998, **37**(12):2365-2370
- 3 Wang Weimin, Yang Chenglong, Tang Chun *et al.* Diode-laser side-pumped 100 Hz E-O Q-switch TEM00 laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(10):1403-1406
王卫民, 杨成龙, 唐淳等, 二极管激光侧抽运单横模 100 Hz 电光调 Q 激光器[J]. *光学学报*, 1997, **17**(10): 1403-1406
- 4 Wang Weimin, Gao Qingsong, Yin Xianning *et al.* Diode laser arrays side-pumped double-slab laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(5):527-530
王卫民, 高青松, 尹湘平等, 二极管面阵侧抽运 Nd:YAG 双板条激光器[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(5):527-530