

高光束质量钕玻璃板条振荡放大系统的实验研究*

冯国英 吕百达 孔繁龙 蔡邦维

(四川大学激光物理与化学研究所 成都 610064)

黄永忠 徐天华

(西南技术物理研究所 成都 610041)

提要 建立了磷酸盐钕玻璃板条一级振荡二级放大系统。将新型 Cr^{4+} ·YAG 晶体用于激光介质为磷酸盐钕玻璃的振荡级中实现被动调 Q 激光输出。经过两级放大后得到近衍射极限 ($M_x^2 = M_y^2 = 1.5$) 的激光输出, 能量放大率为 10.1。

关键词 主振荡-功率放大器, 磷酸盐钕玻璃板条介质, Cr^{4+} ·YAG 调 Q 晶体

1 引 言

在主振荡-功率放大(MOPA)系统中, 振荡器工作在较低的能量下, 可以得到衍射极限质量的光束, 而输出功率和能量则取决于放大级^[1]。理论和实验研究表明, 光束在均匀面泵浦、面冷却的板条介质内采用“之”字形光路行进, 可有效地减小热效应, 获得高光束质量激光输出^[2,3]。实验得到光炉式硅酸盐钕玻璃板条放大器的储能效率为 2.53~3.18%, 高于同一材料棒状放大器的实验值^[4]。本文报道了我们建立的磷酸盐钕玻璃板条 MOPA 系统, 以及采用新型 Cr^{4+} ·YAG 晶体调 Q, 经两级放大后得到近衍射极限输出光束的实验结果。

2 原理及实验装置

高光束质量板条固体激光 MOPA 系统实验装置如图 1 所示。每根板条均被双灯对称泵浦, 聚光腔参数经过优化设计可较为均匀地泵浦介质的表面。横截面为矩形的板条状工作物质既可为 YAG, 又可为磷酸盐钕玻璃; 既可为直通板条, 也可为布儒斯特角板条; 既可作振荡器的工作介质, 又可作放大器的工作介质。针对振荡放大结构对电源提出了专门的要求以提高氙灯的辐射效率、延长氙灯寿命且振荡级和放大级间的时间延迟可调。激光电源总功率为 14 kW, 工作频率为 0.2 Hz, 1 Hz, 10 Hz 三档可调, 脉冲成型网络, 能兼顾 YAG 和钕玻璃激光 MOPA 系统供电要求。在本实验中, 用 LSR-1 型激光能量比率计(重庆光机所生产)测量激光输出能量。

新型 Cr^{4+} ·YAG 调 Q 晶体多用在 YAG 作为激光工作介质的激光器中进行被动调 Q, 目

* 国家高技术惯性约束聚变主题项目资助。本文主要内容曾在第四届全国激光技术青年学术交流会(青岛, 1997 年 6 月)上报告。

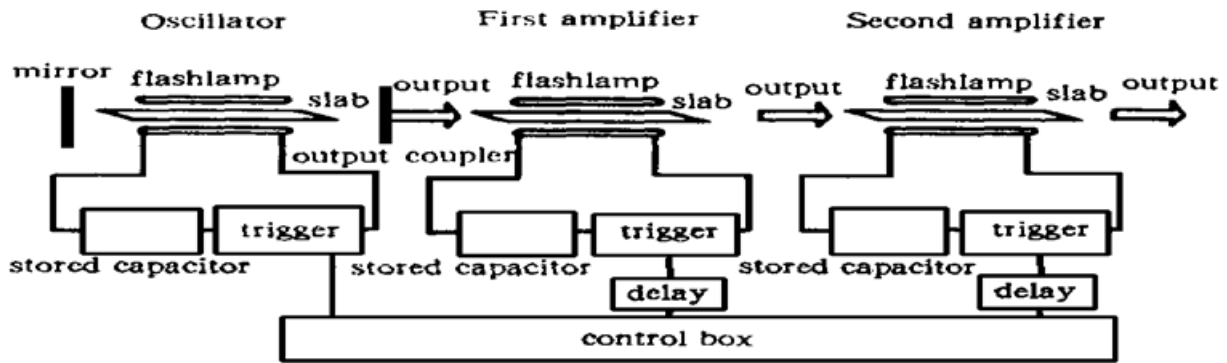


图 1 钕玻璃板条激光振荡-二级放大系统示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the Nd:glass slab oscillator and two-stage amplifier system

前尚未见用在磷酸盐钕玻璃作激光工作介质的激光器中的报道。已见报道的是在磷酸盐钕玻璃激光器中加入染料实现调 Q , 或在与磷酸盐钕玻璃激光波长匹配的 YLF 晶体激光器中加入 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 实现被动调 Q 等。若直接在磷酸盐钕玻璃激光器中加入 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 晶体实现调 Q , 其优点是结构简单、操作方便, 与后面放大级激光波长一致, 缺点是与其它晶体材料相比磷酸盐钕玻璃受激发射截面小, 在相同泵浦下增益较小, 要实现调 Q 并控制脉宽必须合理地设计腔参数。经理论分析和反复实验, 我们在磷酸盐钕玻璃板条激光器谐振腔内插入高质量的新型 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 调 Q 晶体, 实现了被动调 Q 输出。其关键是应仔细选择 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 晶体的几何参数和 Cr^{4+} 浓度, 以与板条激光介质的增益和谐振腔的输出耦合率等参数相匹配。

为得到高光束质量的激光输出, 在 MOPA 的振荡级和放大级均采用了磷酸盐钕玻璃布儒斯特角板条激光介质, 并在介质的两个毛面作了绝热处理, 利用介质的几何对称性和“ ∞ ”字形光路, 在均匀面泵浦、面冷却的条件下可有效消除一阶热效应。板条介质的加工质量对最终输出激光的光束质量影响很大, 因此, 必须保证板条介质的高加工精度。

建立钕玻璃板条振荡放大系统的目的是输出近衍射极限的激光。本文用自制的 2D CCD 光束质量诊断系统进行光束质量测量。束宽根据 ISO 标准(一阶矩定中心, 二阶矩定束宽)确定。CCD 相机采用 MTV1802 面阵 CCD, 为保证激光光斑尺寸测量的准确度和精确度, 对 CCD 探测器的面阵单元尺寸作了测量(测量结果为面阵单元尺寸为 $11.2 \mu\text{m} \times 8.4 \mu\text{m}$), 并对其线性响应度进行了补偿, 还采用多点拟合法^[5]减少随机误差, 提高测量精度。其基本测量原理是用消像差透镜将激光束会聚, 得到一“人工模拟束腰”, 沿传播轴 z 测量光束在不同位置处的束宽, 用双曲线拟合确定光束的传输轮廓, 最后确定光束质量因子。束宽 W 的双曲线拟合公式为

$$W^2 = Az^2 + Bz + C \quad (1)$$

式中, A , B 和 C 为双曲线的待定系数。用最小二乘法拟合在光束的各个不同位置处的光束宽度求出双曲线的系数后, 束腰宽度 W_0 和远场发散角 θ 用 A , B , C 表示为

$$W_0 = \sqrt{C - \frac{B^2}{4A}} \quad \theta = \sqrt{A} \quad (2)$$

由此可求出光束质量因子

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{AC - \frac{B^2}{4}} \quad (3)$$

3 实验结果

3.1 振荡级

谐振腔型选为平凹稳定腔, 板条尺寸为 4.8 mm × 10 mm × 130 mm, 重复频率为 0.2~ 1 Hz。当泵浦能量为 109 J 时, 得到脉宽为 100 ns, 能量为 6 mJ 的单横模调 Q 激光输出。

实验测得输出激光经过焦距 $f = 370$ mm 的透镜后在 x (板条厚度) 和 y (板条宽度) 方向的光束束宽 w_x, w_y 随传输距离 Z 的变化及拟合双曲线如图 2 所示, 由拟合结果计算可得 $M_x^2 = 1.1, M_y^2 = 1.1$ 。从光束剖面图(见图 3, L 表示实际长度标尺)可看到振荡级输出光束横截面光强度分布曲线为高斯分布。激光脉冲的时间波形如图 4 所示。可见, 振荡级输出光束质量为衍

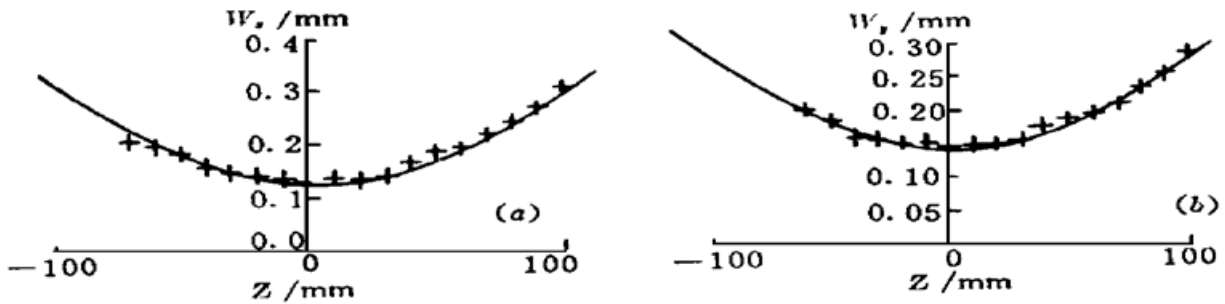


图 2 振荡级调 Q 输出激光在(a)x 方向和(b)y 方向的光束束宽 w_x 和 w_y 随传输距离 Z 的变化

Fig. 2 The measured beam width as a function of the propagation distance Z along (a) the x and (b) y directions for a Q-switching oscillator. + —measured value

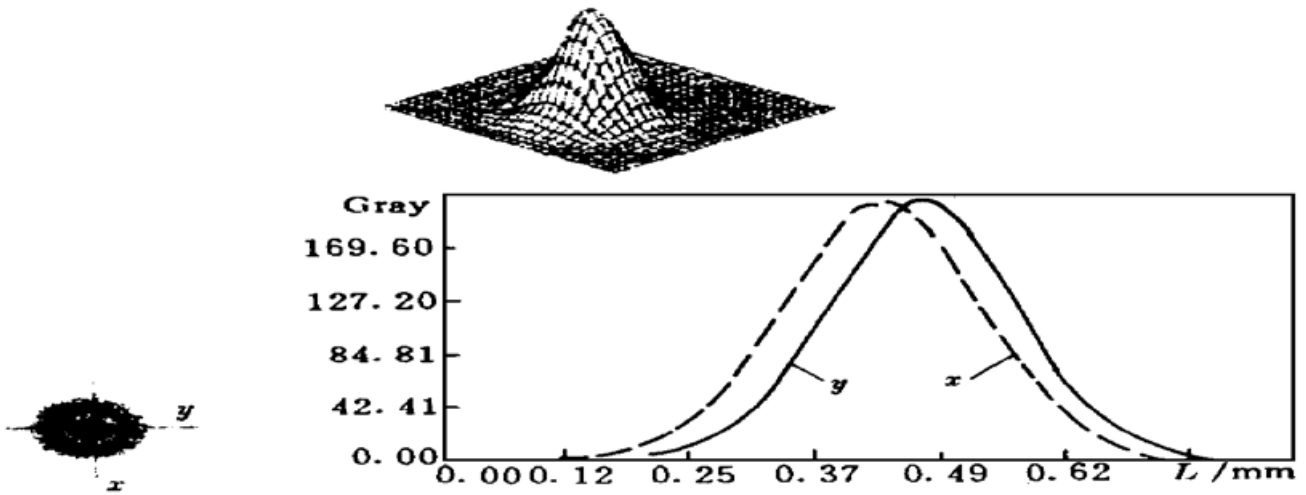


图 3 光束质量诊断仪测得的磷酸盐钕玻璃板条振荡级输出光束在 x 和 y 方向的剖面图

Fig. 3 The output beam profiles in the x and y directions of a Nd-glass oscillator recorded by a two-dimensional beam quality diagnostic system

图 4 用 TEK7904 示波器和 CCD 采集系统测得振荡级调 Q 输出激光的脉冲波形(100 ns/div)

Fig. 4 The output pulse profile of a Nd-glass slab Q-switching oscillator recorded by a TEK7904 oscillograph and CCD collection system (100 ns/division)



射极限的激光。

3.2 放大级

两放大级板条尺寸为 4.8 mm × 10 mm × 130 mm。在板条厚度和宽度方向上, 振荡级输出的激光经在不同泵浦能量下的第一放大级后的光束质量, 以及第一放大级泵浦能量为 400 J, 经在不同泵浦能量下的第二放大级后的光束质量的实验结果总结于图 5。由图可知, 当放大级泵浦能量为 300~ 400 J 时, 输出光束质量 $M_x^2 = 1.5, M_y^2 = 1.5$, 且随泵浦能量增加 M^2 因子变化不大。图 6 给出了用 CCD 测量得到的典型光束剖面图, 图中可见, 经二级放大后的光束横截面光强度轮廓曲线略有起伏, 但仍然接近高斯分布。

振荡级输出的能量为 6 mJ 的激光经在不同泵浦能量下的第一放大级后的能量, 以及第一放大级泵浦能量为 400 J, 经在不同泵浦能量下的第二放大级后的能量的实验结果总结于图 7。

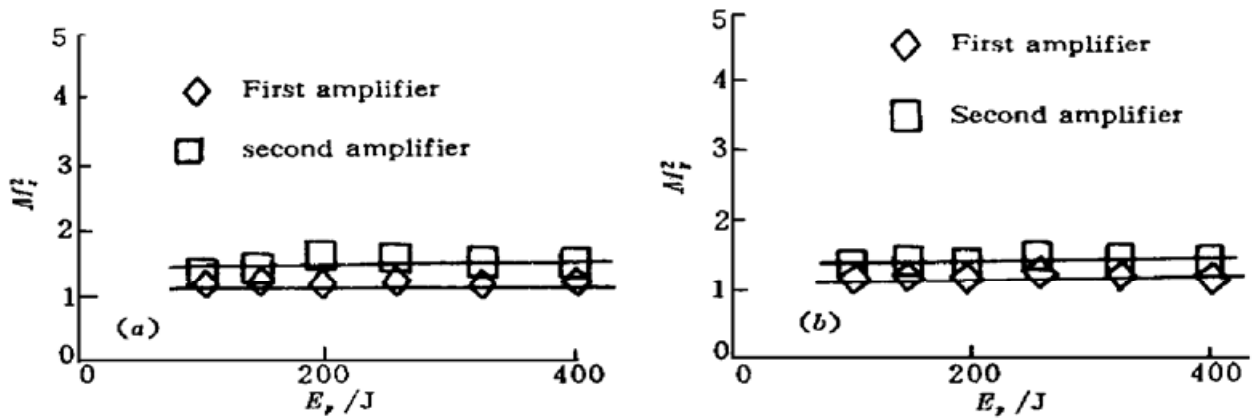


图 5 在板条厚度方向 (a) 和宽度方向 (b) 的光束质量因子 M_x^2/M_y^2 随两放大级泵浦能量 E_p 的变化
Fig. 5 The beam quality factors M_x^2 and M_y^2 along the x and y directions are plotted against pumping energy E_p of two amplifiers

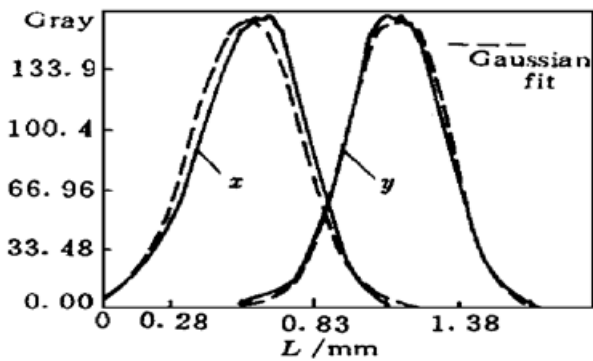


图 6 用 2D 光束剖面诊断仪测得的磷酸盐钕玻璃板条 MOPA 系统输出光束剖面图

Fig. 6 The output beam profiles of a Nd-glass slab MOPA system recorded by a two-dimensional beam quality diagnostic system

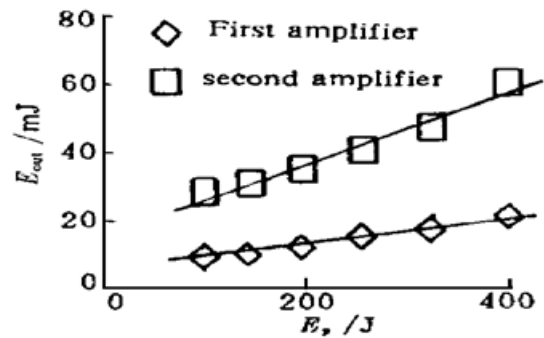


图 7 当振荡级调 Q 输出激光能量为 6 mJ 时, 从第一和第二放大级输出的能量 E_{out} 随两放大级泵浦能量 E_p 的变化

Fig. 7 The output energy from the first and the second amplifying stages is plotted against pumping energy E_p of two amplifiers at the 6 mJ output energy of the oscillator

由上述可知, 对磷酸盐钕玻璃板条 MOPA 系统调 Q 的主要实验结果为: 当振荡级泵浦能

量为 117 J, 重复频率为 0.2~ 1 Hz 时, 输出激光光束质量因子 $M_x^2 = 1.1, M_y^2 = 1.1$ 。经两级放大后, 由 MOPA 系统(第一、二放大级泵浦能量均为 400 J) 输出激光的能量为 60.7 mJ, 能量放大率为 10.1, 光束质量因子为 $M_x^2 = 1.5, M_y^2 = 1.5$ 。

4 结 论

实验研究表明, 对合理设计的磷酸盐钕玻璃布儒斯特角板条 MOPA 系统, 采用均匀面泵浦、面冷却技术, 能得到近衍射极限的调 Q 激光输出。实验中实现了新型 Cr^{4+} ·YAG 晶体用于磷酸盐钕玻璃的被动调 Q, 操作方便, 有推广应用意义。

致谢 实验所用磷酸盐钕玻璃由中国科学院上海光机所张俊洲研究员提供。作者与陈绍和教授曾就钕玻璃被动调 Q 技术进行十分有益讨论, 特此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-state Laser Engineering. Springer-Verlag New York Inc., 1976. 123~ 125
- 2 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser-part Ⅰ: Theory. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **20**(3): 289~ 301
- 3 T. J. Kane, J. M. Eggleston, R. L. Byer. The slab geometry laser-part Ⅱ: Thermal effects in a finite slab. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **21**(8): 1195~ 1210
- 4 Feng Guoying, Lü Baida, Kong Fanlong *et al.*. Measurement of small signal gain coefficient and storage efficiency of the multi-slab Nd-glass laser amplifier. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1996, **8**(2): 177~ 182 (in Chinese)
- 5 R. D. Jones, T. R. Scott. Error propagation in laser beam spatial parameters. *Optical and Quantum Electronics*, 1994, **26**(1): 25~ 34

Experimental Study of a Nd-glass Slab Oscillator and Two-stage Amplifier System of High Beam Quality

Feng Guoying Lü Baida Kong Fanlong Cai Bangwei

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064)

Huang Yongzhong Xu Tianhua

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041)

Abstract A Nd-glass slab oscillator and two-stage amplifier system has been built up. Using a novel Cr^{4+} ·YAG colour centre crystal, the Q-switching experiments, have been performed. After two-stage amplifications, the near diffraction limit beam quality of $M_x^2 = M_y^2 = 1.5$ and energy amplification of 10.1 have been achieved.

Key words master oscillator-power amplifier (MOPA), Nd-glass slab medium, Cr^{4+} ·YAG Q-switch crystal