

文章编号: 0258-7025(2002)04-0343-04

高功率激光在多级放大介质中的相对强度噪声

张科军^{1,2}, 景 峰², 林晓东¹, 陈建国¹, 李大义¹, 彭志涛², 刘兰琴², 刘 华², 苏春燕²

(¹ 四川大学光电系, 四川成都 610064; ² 中国工程物理研究院高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

提要 高功率激光在多级放大介质中传输时, 其行为与级间自由空间的距离有关。应用相对强度噪声(RIN)分析方法, 对多级传输的实验结果在频域内进行了定量分析, 分析了不同级间距对频率分布的影响。

关键词 多级放大介质, 相对强度噪声, 高功率激光

中图分类号 TN 012 文献标识码 A

Relative Intensity Noise of Beam from a High Power Laser after Passing through a Multi-stage Amplifier

ZHANG Ke-jun^{1,2}, JING Feng², LIN Xiao-dong¹, CHEN Jian-guo¹, LI Da-yi¹,
PENG Zhi-tao², LIU Lan-qing², LIU Hua², SU Chun-yan²

(¹ Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064)
(² National Key Laboratory of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900)

Abstract When a high power laser beam propagates through a multi-stage amplifier, distances separating different stages play an important role in deciding the characteristics of the output beam. The concept of the relative intensity noise (RIN) has been adapted to quantitatively analyse the experiment results.

Key words multi-stage amplified medium, spectrum characteristics, high-power laser

1 引 言

用于惯性约束聚变(ICF)的激光功率越来越高, 各种非线性光学现象变得越来越重要。一般来说, 实际光束与理想的均匀平面波是有差别的, 经放大、整形滤波等处理后获得的入射光束通常都带有一定的调制。此外, 一些光学器件本身的缺陷, 以及灰尘、热点等也会对光束质量造成影响。而由此引起的纹波调制会导致光束自聚焦^[1-4]。

当放大介质为多级时, 因为级间引入了自由传输空间, 这必然会对光的非线性传输产生影响。为了分析这种影响, 优化主放的性能, 我们进行了多级传输实验。实验中用 CCD 采集数据。由于 CCD 记录的是光场的时间积分, 因而得到的是相对的光强分布。在以往的分析处理中, 为了描述光束光强的分布情况, 往往采用一种带有统计特征的量——光束的对比度^[5,6]。在工程上来说, 对比度直观地给

出了光束光强的涨落情况。但是, 文献[7,8]指出, 在光的非线性传输过程中, 不同频率的增长快慢是不一样的, 其中某些频率成分的增长是非常危险的, 有可能造成介质的损害。这就有必要从频域内对光强的分布进行分析, 找出这些频率分布的规律, 并采取适当的措施加以抑制。

本文应用相对强度噪声^[9](RIN)的分析方法, 在输入光强分布相同的情况下, 对不同的自由传输空间, 分别作出了输入输出光束的一维平均的 RIN 曲线, 以此分析了空间频率的分布与级间自由传输间距的关系。

2 相对强度噪声

令 $I(x)$ 为一维光强函数, 则有平均光强

$$\bar{I} = 1/L \int_0^L I(x) dx \quad (1)$$

其中 L 为光强的分布长度。定义

$$\delta p(x) = p(x) - \bar{p}(x) \quad (2)$$

相对强度噪声 RIN 为

$$RIN = S_p(\kappa) / \bar{p}^2 \quad (3)$$

其中 κ 为空间频率。频谱密度 $S_p(\kappa)$ 的定义为

$$S_p(\kappa) = \lim_{L \rightarrow \infty} (1/L) |\delta \tilde{p}(\kappa)|^2 \quad (4)$$

$\delta \tilde{p}(\kappa)$ 是 $\delta p(x)$ 的傅里叶频谱。由于在计算机上只能做有限区间的频谱计算,因而,通常只好采用截断的办法,即

$$\delta p_L(x) = \begin{cases} \delta p(x) & (|x| \leq L/2) \\ 0 & (|x| > L/2) \end{cases} \quad (5)$$

于是,在 L 足够大的情况下,近似有

$$S_p(\kappa) \cong (1/L) |\delta \tilde{p}_L(\kappa)|^2 \quad (6)$$

把(6)式代入(3)式就得到

$$RIN = |\delta \tilde{p}_L(\kappa)|^2 / L \bar{p}^2 \quad (7)$$

RIN 可以被用来表征光强分布随平均光强值的起伏程度。

3 实验装置与实验图样

实验是在“星光 II”强激光器上进行的。波长 $1.053 \mu\text{m}$, 脉宽 670 ps , 入射光束的直径为 11 mm 的激光从无抽运的铍玻璃介质棒的一端入射进入介质,经过三段铍玻璃棒后从另一端射出。铍玻璃棒的孔径为 $20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 长为 15 cm 棒的线性折射率为 1.528 , 非线性折射率为 $2 \times 10^{-13} \text{ esu}$ 。光路的排布满足像传递条件,实验装置的简化示意图

如图 1。用 512×512 像素的 CCD 记录介质棒两个端面的激光时间积分场, CCD 的分辨率为 $14 \mu\text{m}$ 。

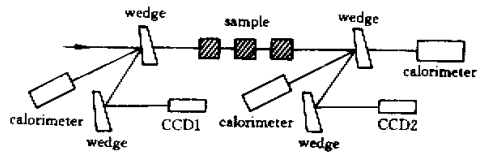


图 1 非线性光传输实验光路图

Fig.1 Schematic of the experiment setup

“星光 II”装置输出能量常规可达 200 J , 加 $\phi 20 \text{ mm} \sim 60 \text{ mm}$ 的不同光阑,经一级 $2:1$ 空间滤波器后,强度可达到 5 GW/cm^2 以上,满足实验需要。

多级传输的实验结果如图 2,3 所示。图 2(a)给出了在输入光束的平均光强为 2.6 GW/cm^2 时, CCD 记录到的输入端光强分布;图 2(b)和(c)给出了铍玻璃棒的间距分别为 4 cm 和 14 cm , 输出光束的平均功率分别为 1.6 GW/cm^2 , 1.1 GW/cm^2 时, CCD 记录到的输出端光强分布。图 3(a)给出了在输入光束的平均光强为 2.4 GW/cm^2 时, CCD 记录到的输入端光强分布;图 3(b)和(c)给出了铍玻璃棒的间距分别为 4 cm 和 14 cm , 输出光束的平均功率分别为 1.3 GW/cm^2 , 1.01 GW/cm^2 时, CCD 记录到的输出端光强分布。图 4,5 分别是对应于图 2 和图 3 的场图分布。

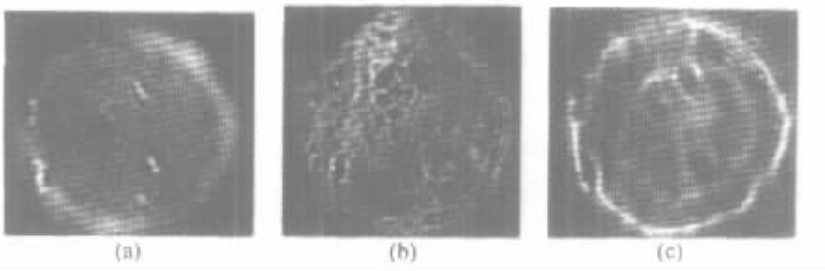


图 2 CCD 采集的输入和输出图像

(a) 输入图像 (b) 级间距为 4 cm (c) 级间距为 14 cm

Fig.2 CCD recorded images for the input beam (a) and the output beam (b), (c) with the free space 4 cm and 14 cm , respectively

4 用 RIN 对实验结果的分析

从图 2 能定性地看出光束通过多级放大后的某些特征变化。由于输入功率密度很高,因而预计会产生自聚焦现象。由图 2(b)可以看出,输出光束已

经出现了明显的自聚焦征候。其中,图 2(a)中的那些亮暗点首先由于自聚焦效应而分裂,甚至部分成丝,而边缘的亮斑分裂得最厉害。这些都是小尺度自聚焦的明显迹象。图 2(c)与图 2(b)相比,由于放大级间自由传输空间距离不同,光束最后的传输结

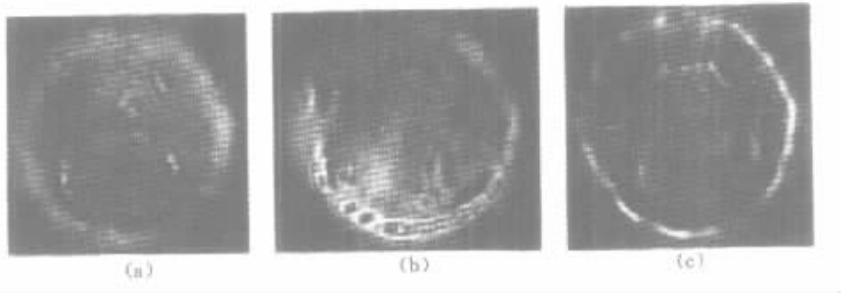


图 3 CCD 采集的输入和输出图像

(a) 输入图像 (b) 级间距为 4 cm (c) 级间距为 14 cm

Fig.3 CCD recorded images for the input beam (a) and the output beam (b) , (c) with the free space 4 cm and 14 cm , respectively

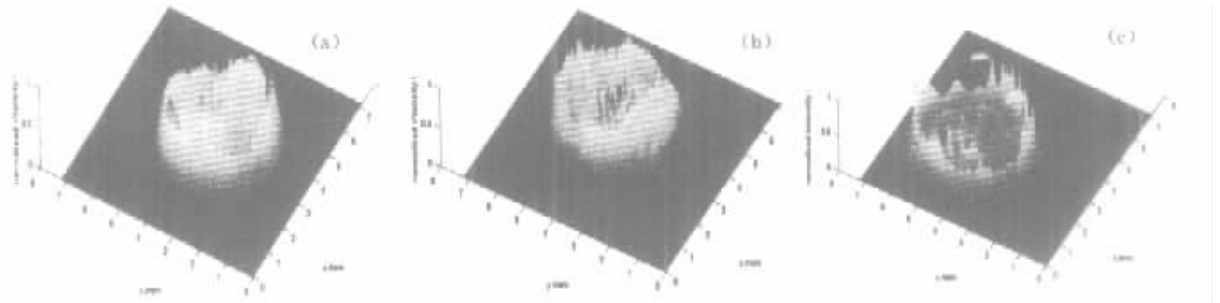


图 4 图 2 的场图分布

Fig.4 Distribution of the field map of Fig.2

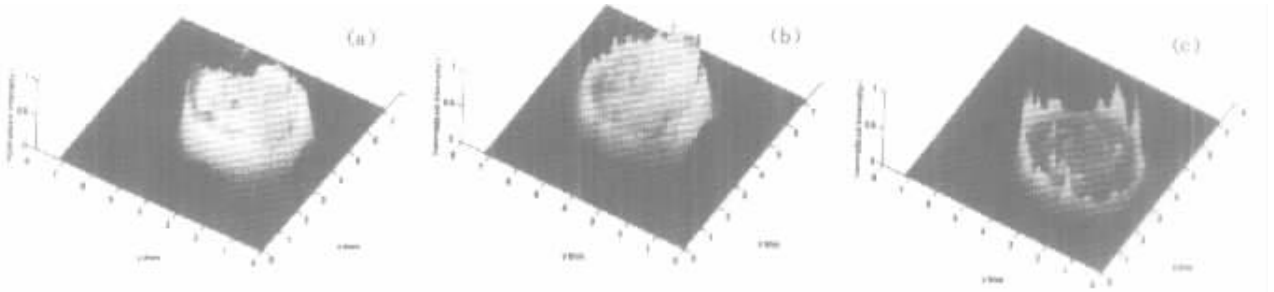


图 5 图 3 的场图分布

Fig.5 Distribution of the field map of Fig.3

果却相差很大。在图 2 (b) 中观察到的小尺度自聚焦的情况在 2 (c) 中已不复存在, 在图 2 (c) 中仅在光束的边缘部分可以观察到环状自聚焦的现象。

上述实验结果说明, 多级放大的级间距的大小, 对光束传输的影响巨大。我们可以定性地理理解一下该现象。在忽略介质增益的情况下, 由非线性近轴波方程^[2, 3]知道, 在钕玻璃介质中传播的强激光受到两种作用: 聚焦作用和衍射作用。聚焦作用使能量集中, 而衍射作用却使能量发散。哪种作用占上风, 将直接影响能量的分布。当光束在自由空间中传输时, 它仅有衍射作用。衍射的距离越长, 能量的损失也就越大, 再进入钕玻璃介质中时, 能量下降必

然使聚焦的作用下降, 因而图 2 (b) 的小尺度自聚焦现象强一些。

下面, 我们将应用 RIN 的分析方法对图 2 和图 3 的输入输出图像的频谱加以分析, 找出多级放大的级间距对频谱分布的影响。

图 6.7 给出了 RIN 的计算分析结果。在计算 RIN 时, 我们从 CCD 获得的光强分布中, 在频域内沿某一水平或垂直方向取一系列的直线, 将这些线的 RIN 值做总体平均, 获得图像的一条平均的一维 RIN 曲线。由于通常难以测到较为精确的绝对光强值, CCD 记录的也只是光强的相对值, 即相对分布, 因此, 在处理数据时, 采用归一化后的相对光强, 同

时对 CCD 场图进行了减本底处理。

由图 6 可以看出,输出图像的 RIN 曲线 b、c 相对于输入图像的 RIN 曲线 a 来说有明显的不同。对于输出图像,总体来说,经过放大介质后, $0.14 \sim 3 \text{ mm}^{-1}$ 的低频部分的 RIN 值整体上略微降低,而 $3 \sim 14 \text{ mm}^{-1}$ 的中高频部分的 RIN 值有明显的增长。图 7 的 RIN 曲线与图 6 相比,变化趋势基本一致,只是由于入射光强的不同,变化区间和数值稍有不同。这就说明,非线性折射率的变化主要引起中高频成分的增长,中高频成分易于诱发光束分裂甚至成丝现象,进而造成介质破坏。

比较图 6 曲线 b、c 发现,级间距为 4 cm 的输出图像在 $3 \sim 14 \text{ mm}^{-1}$ 的中高频部分,它相对于输入图像的 RIN 值的生长明显要比级间距为 14 cm 的高,而在 $0.14 \sim 3 \text{ mm}^{-1}$ 的低频区间,级间距为 4 cm 的输出图像的 RIN 值整体上下降稍小。

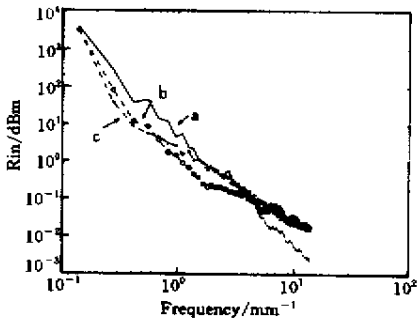


图 6 曲线 a、b 和 c 分别对应于图 2(a)(b)(c)的一维 RIN 曲线

Fig. 6 One-dimension curves of RIN for Fig. 2

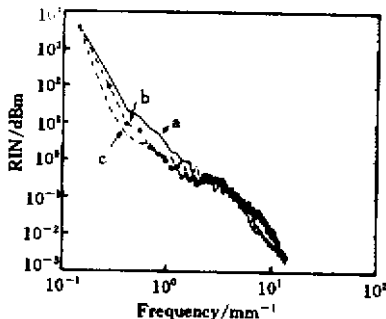


图 7 曲线 a、b 和 c 分别对应于图 3(a)(b)(c)的一维 RIN 曲线

Fig. 7 One-dimension curves of RIN for Fig. 3

图 7 的 RIN 曲线与图 6 相比,变化趋势也基本一致。这就说明,在光强分布大致相同的输入情况下,不同频率的 RIN 值的生长与自由传输空间的距离紧密联系。级间距较小时,中高频的 RIN 增长较

大,同时低频部分的 RIN 整体上下降较小。级间距较大时,它的低频部分的 RIN 整体上下降较大,中高频部分的 RIN 增长较小。另一方面也从频域内说明了在光强分布相同的输入情况下,级间距不同,它的自聚焦现象不同的原因。

5 结 论

对于多级传输实验来说,多级之间的自由传输空间的距离具有重大的影响。我们应用相对强度噪声的分析方法,在输入光强分布大致相同的情况下,对于不同的自由传输空间,分别作出了一维平均的 RIN 曲线。分析了不同的自由间距对频率的影响。研究表明,强激光所导致的非线性折射率的变化主要引起中高频成分的增长,中高频成分易于诱发光束分裂甚至成丝现象,进而造成介质破坏。同时,当级间距较小时,中高频的 RIN 增长较大,低频部分的 RIN 整体上下降较小。当级间距较大时,它的低频部分的 RIN 整体上下降较大,中高频部分的 RIN 增长较小。

参 考 文 献

- 1 W. H. Williams, J. M. Auerbach, M. A. Hessian *et al.*. Modeling characterization of the National Ignition Facility focal spot [C]. *SPIE*, 1998, **3264** 93 ~ 97
- 2 J. A. Fleck, J. R. Mirrors. Calculation of the small scale self-focusing ripple gain spectrum for the cyclops laser system: a status report [R]. *UCID-17356*, 1976
- 3 J. T. Hunt, K. R. Manes, P. A. Renard. Hot images from obscurations [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30) 5973 ~ 5982
- 4 M. D. Feit, J. A. Fleck, Jr. . Beam nonparaxiality, filament formation, and beam breakup in the self-focusing of optical beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(3) 633 ~ 640
- 5 Jing Feng, Zhang Xiaomin, Zhu Qihua *et al.*. Study on Characteristics of intense beam propagation in Nd^{3+} doped glass media [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2000, **12**(5) 551 ~ 555 (in Chinese)
- 6 M. Hessian, P. Renard, J. Auerbach *et al.*. The use of beam propagation modeling of beamlet and Nova to ensure a "safe" National Ignition Facility laser system design [C]. *SPIE*, 1997, **3047** 84 ~ 95
- 7 J. A. Fleck, J. R. Mirris, E. S. Bliss *et al.*. Small-scale self-focusing effects in a high power glass laser amplifier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**(5) 353 ~ 363
- 8 Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Small-scale self-focusing of intense laser beams in nonlinear media with loss [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **B9**(4) 356 ~ 360 (in English)
- 9 G. P. Agrawal, N. K. Dutta. *Semiconductor Laser* [M], chapter 6, second edition, New York: Van Nostrand, 1992