

自聚焦激光束光束质量评价的功率谱密度方法^{*}

彭志涛 景 峰 刘兰琴 朱启华 陈 波 张 昆
刘 华 张清泉 程晓峰 蒋东镇 刘红婕 彭翰生

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 919 信箱 988 分箱 621900)

(2000 年 11 月 16 日收到 2002 年 4 月 25 日收到修改稿)

把功率谱密度分析的方法引入到激光束光束质量的评价中,分析了自聚焦激光束的近场分布,研究了强激光非线性自聚焦的一般规律,给出了在一定强度调制下的光束经过铍玻璃介质发生自聚焦成丝效应的 B 积分阈值条件,实验和理论模拟结果基本一致.

关键词:功率谱密度,非线性自聚焦,铍玻璃介质

PACC: 4265

1. 引 言

在高功率激光系统中,介质的非线性折射率引起的小尺度自聚焦效应将会带来对光束相位和强度分布的影响,增加光学元件遭受成丝破坏的风险^[1,2].产生光束小尺度纹波调制的机制分为两类:振幅和位相调制.振幅调制引起的光束自聚焦是造成介质损伤的主要因素.根据小信号的 Bespalov-Talanov 理论^[3],只有特定空间频率(或称为模式)的调制具有最快的增长速度,其增长幅度可以用 B 积分参数来描述.目前,有关光束的自聚焦成丝已经引起了激光器研制人员的重视.美国 LLNL 实验室已开展了这方面的研究工作^[4].随着我国新一代高功率激光器的研制,光束自聚焦成丝破坏也将是面临的一个重要问题,目前极需这方面的研究数据.从 1999 年开始,我们在“星光 II”强激光器上进行了一系列的实验研究^[5].国内有对增益介质中的小尺度自聚焦效应的理论研究^[6,7].

光束质量的好坏,直接影响着系统的总体效率.好的光束质量,光学元件自聚焦成丝损坏对应的 B 积分较小^[8],因此,控制光束的近场调制度,可以在损伤风险相同的条件下,提高大口径光学元件的平均工作通量,减小系统造价.光束的强度分布可以用对比度来表征,但用对比度来表征光束质量反映不

出光强细节变化,为此我们发展了光强 PSD 的方法来反映光强的频谱分布,分析光束质量的变化.

2. 基本理论

功率谱密度(PSD)的分析方法最早被引入对元件表面粗糙度的量度^[9].1975 年至 1979 年,Stover, Church 和 Elson 的研究工作奠定了光学元件表面频谱分析的基础,他们从理论上确定了光学元件表面起伏与角散射之间的关系,Janeczko 于 1989 年提出采用表面功率谱密度标准来评价光学元件的表面粗糙度.

光强 PSD 定义为光强各频率分量 Fourier 振幅的归一值,光强的一维 PSD 表示为

$$\text{PSD}(k) = \frac{|K(k)|^2}{L}, \quad (1)$$

式中 L 为光束口径, $K(k)$ 为光强各频率分量 Fourier 振幅

$$K(k) = \int_0^L K(x) \exp(-ikx) dx \quad (2)$$

表示归一化光强随频率的分布, $K(x)$ 是一维方向的光强值.

PSD 有利于对方光束进行 Fourier 频谱分析.利用 Fourier 变换,可以定量的给出光强的空间频谱分布,从而确定各频率段对光强的影响.根据小尺度自聚焦 BT 理论,只有特定空间频率(中高频)的调制

^{*} 中国工程物理研究院行业科学技术预先研究基金(批准号:1999Z0201)和国家高技术惯性约束聚变领域项目(批准号:863-416-5-2)资助的课题.

具有最快的增长速度,采用光强的 PSD 正好可以确定各频率段光强的分布,表征光束质量.

另一方面,根据 PSD 的实质,可以将 PSD 与光束的粗糙度(RMS)联系起来,根据 Parseval 定理,PSD 与 RMS 的关系为

$$\text{RMS}^2 = \Delta k \sum_k \text{PSD}(k). \quad (3)$$

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.光束质量的好坏指光强分布的均匀程度,即相对分布.因此,在处理数据时,我们采用平均光强归一化后的相对光强.同时在计算 RMS 时,对 CCD 场图进行了减本底处理.

一般来说,要获得光场的 PSD,就需要将光场不同轮廓线的 PSD 估计值做总体平均.由单个轮廓线计算的 PSD 没有意义,因为曲线图是非常嘈杂且不可重复的.为了从光场轮廓线数据获得总体平均的 PSD,有两点必须加以考虑.由光场的不同位置就可以得到大量轮廓线,每条轮廓线计算出一维 PSD 估计值,将结果总体平均就可获得一个光滑的、白噪声的曲线.

光滑未经上面那样处理的单个轮廓线的 PSD 估计值.当轮廓线长度代表的光场空间频率低于所需 PSD 的空间频率时,也就是说,当所考虑光场特征的相干长度小于总的轮廓线长度的相干长度时,可以将光场细分为许多小区域,对每一区域用 CCD 分别摄像,PSD 的估计值由每个小区域计算并做总体平均.当然,当用此方法时,原来光场低频部分会丢失信息.

在计算光场的 PSD 的过程中,从 CCD 获得的光场中选一内接正方形,沿平行或垂直正方形一边取一系列的曲线,将这些线的 PSD 值做总体平均获得平均的 PSD 曲线.

3. 实验结果分析

实验是在“星光 II”强激光器上进行的.波长为 $1.053\mu\text{m}$,脉宽 670ps 的激光经过 $\phi 20\text{mm}$ 的软边光阑,再经过缩束比为 1.8 的空间滤波器,然后入射到硅酸盐介质棒 n_{0312} 端面上,用透镜把介质两端面的光成像到 CCD 的光敏元件上,介质端面和 CCD 的光敏元件上的光强分布满足严格的像传递关系.入射到介质端面上的激光能量和从另一端面出射的能量用卡计测量.用条纹相机测量激光脉宽.激光的平均强度基本上不随传播距离变化.用 512×512 像素的科学 CCD 记录介质棒两个端面的激光时间积分场,CCD 的分辨率为 $24\mu\text{m}$,CCD 上测到的光束口径为 $\phi 7\text{mm}$.硅酸盐玻璃 n_{0312} 的线性折射率 $n_0 = 1.52$,非线性折射率 $n_2 = 1.57 \times 10^{-13} \text{ e. s. u.}$.为了避免 CCD 窗口玻璃对激光束带来干涉,在本次实验中去掉了 CCD 的窗口玻璃,从 CCD 采集的光场看,干涉条纹基本消失.

为了研究激光在单根硅酸盐介质中传输,输出光束质量随 B 积分的变化规律.对选择 B 参数的合理性给出实验依据,我们研究了激光在 $\phi 40\text{mm}$ 、长 46cm 单根硅酸盐介质中传输,出射光束质量的变化.入射光束口径 20mm.

从 CCD 记录的光场看,在 B 积分比较小时,光束质量没有明显的变化,当 B 积分继续增加,光束质量还是没有明显变坏,但当 B 积分增量增加到 1.8 以后,光束质量开始急剧变坏, B 积分越大,光束成丝分裂的越厉害,自聚焦效应越明显.图 1 是 CCD 记录的硅玻璃棒的输入输出光场的强度分布(滤波小孔孔径 3.0mm), B 积分为 3.74,光束分裂为上百个直径几十微米的细光束,光束已经严重分

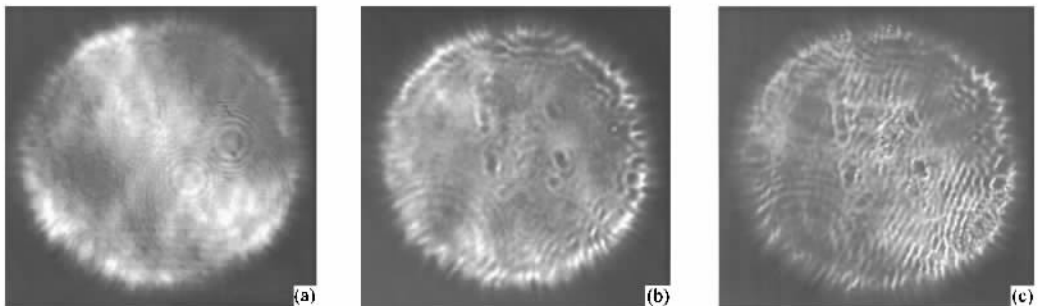


图 1 CCD 测得的 $\phi 40\text{mm}$ 硅玻璃后端面的强度分布 (a) 输入光场, (b) 输出光场 ($B = 2.04$), (c) 输出光场 ($B = 3.74$)

裂,出现了明显的自聚焦现象.在测得这种自聚焦场图后,我们观察介质棒,发现了很明显的丝状损伤,表明介质已遭到自聚焦成丝破坏.

为了寻找光束质量开始急剧变坏时对应的 B 积分,我们计算了实验所测的光场的 PSD 曲线和 RMS 值.用光束对比度来衡量光束的质量,通常得不到光场一些细节差别,而 PSD 曲线可以定量的给出不同空间频率的光强分布.图 2 是实验所测光场的一维平均 PSD 曲线,频率的单位是 mm^{-1} .从图上可以看出,对于不同的 B 积分,在低、高频段,PSD 差别较小,而中频段光强的 PSD 差别很大,这是由于对不同的 B 积分,同样频率的调制,非线性增长速度是不同的. B 积分越大,非线性增长速度较快的纹波对应的频率越高,同样频率的纹波调制的增长速度更快,这同 B-T 理论预言的结论是一致的.根据 PSD 的实质,可以将 PSD 与光束分布的粗糙度联系起来,给出不同频段的光束粗糙度.

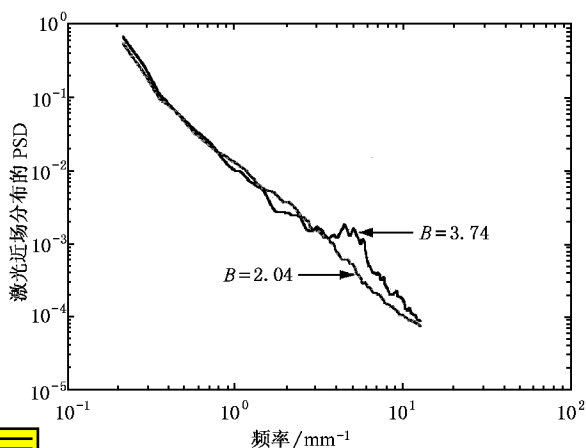


图 2 激光近场分布的 PSD

图 3 是实验和理论模拟得到的光束 RMS 和 B 积分曲线(SF 小孔直径为 3.0mm),其中 B 积分的误差为 12%,RMS 的误差为 15%.由于用这种方法计算光束质量,可以去除低频调制信息和本底光强,只考虑中高频段调制的影响,因而可以更加清楚的反映小尺度自聚焦对光束的质量的影响.实验研究表明,从图 3 可以看出,对于经 3.0mm 的空间滤波器小孔的入射光束,在 B 积分小于 1.5 输出光束的质量基本上不随入射光强度变化,在 B 积分大于 1.5,随着入射光强度的增强,输出光束质量逐渐变差;当 B 积分大于 1.8,光束质量急剧变差,表明非线性效应对光束的影响开始剧烈起来,理论模拟得到的

RMS 和 B 积分的曲线也显示出同实验相同的增长趋势,但在 B 积分大于 2.2 以后,理论模拟获得的 RMS 增长更快,这可能是由于光束的峰值强度在极短距离内迅速增长的过程与 SRS, SBS,非线性吸收,非线性折射率饱和和介质击穿等有很密切的关系,稳态非线性近轴波方程没有考虑这些因素^[10-12],这可能是理论和实验差别较大的主要原因,同时,实验中激光器输出的光场质量较差,给数据的分析带来了很大的困难.而且,CCD 存在较严重的噪声,CCD 前的衰减片间的干涉以及 CCD 局部饱和,也影响测量精度.

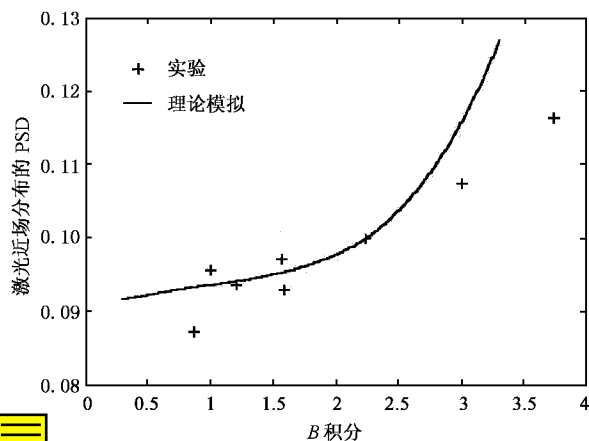


图 3 激光近场粗糙度 RMS 和 B 积分曲线

如果要保证输出光束质量不显著变差,减小自聚焦造成的成丝破坏,就要控制级间的 B 积分增量.对于“星光 II” $\phi 135\text{mm}$ 的输出级,为安全起见,级间的 B 积分增量最好限制在 1.8 以下.

4. 结 论

在高功率激光系统中,介质的非线性折射率引起的小尺度自聚焦效应将会带来对光束相位和强度分布的影响,增加光学元件遭受成丝破坏的风险.为了探索强激光非线性自聚焦的一般规律,对选择 B 参数的合理性给出实验依据,我们利用“星光 II”激光装置,观察到了激光在硅酸盐介质传输非线性自聚焦现象.

首次用 PSD 方法分析了光束强度分布的粗糙程度,研究了输出光束质量随 B 积分的变化规律.为了反映光场的细节差别,用 PSD 曲线定量地给出不同空间频率的光强分布.由于用这种方法计算光束质量,去除了低频调制信息和本底光强,只考虑中

高频段调制的影响,因而可以更加清楚的反映了小尺度自聚焦对光束的质量的影响.研究表明对于不同的 B 积分,在低、高频段,PSD 差别较小,而中频段光强的 PSD 差别很大.根据 PSD 的实质,将 PSD 与光束的粗糙度联系起来,计算了实验所测光场频率大于 1mm^{-1} 的光场的 RMS 值,给出了光束 RMS 与 B 积分的关系曲线,研究了输出光束质量随 B 积分

的变化规律.实验研究表明,在入射光束质量变化不大的情况下, B 积分比较小时,输出光束的质量基本上不发生变化;当 B 积分增大到一定值后,随 B 积分的增大,光束分裂为许多细光束,光束质量急剧变差.实验显示,对于“星光 II”激光装置的输出光束, B 积分小于 1.8,非线性效应对输出光束质量的影响比较小.

- [1] Murray J, Sacks R, Auerbach J *et al* 1997 *Laser Requirements and performance* UCRL-LR-105821-97-3
- [2] Shen Y 1975 *Prog. Quantum Electron.* **4** 1
- [3] Kelley P L 1965 *Phys. Lett.* **15** 1005
- [4] Wegner P, Van Wouterghem B, Burkhart S *et al* 1999 *Beamlet Experiments* UCRL-LR-105821-99-1 A3-61
- [5] Jing F, Zhang X M, Zhu Q H *et al* 2000 *High Power Laser and Particale Beams* **12** 551(in Chinese) 景 峰、张小民、朱启华等 2000 *强激光与粒子束* **12** 551
- [6] Wen S C and Fan D Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1286(in Chinese) [文双春、范滇元 2000 *物理学报* **49** 1286]
- [7] Wen S C and Fan D Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 460(in Chinese) [文双春、范滇元 2000 *物理学报* **49** 460]
- [8] Bespalov V I *et al* 1966 *Soviet Physics JETP Letters* **3** 307
- [9] Fleck J A *et al* 1978 *IEEE J. Quantum Electron* **Qe-14** 353
- [10] Elson J M and Bennett J M 1995 *Applied Opticals* **34** 201
- [11] Feit M D and Fleck J A 1988 *J. Opt. Soc. Am.* **B 5** 633
- [12] Magnus Karlsson 1992 *Phys. Rev.* **A 46** 2726
- [13] Tang Y L, Li D Y, Chen J G *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1248 (in Chinese) 唐永林、李大义、陈建国等 1999 *物理学报* **48** 1248

Power spectra density estimation of quality of the laser beam passing through an self-focusing media *

Peng Zhi-Tao Jing Feng Liu Lan-Qin Zhu Qi-Hua Chen Bo Zhang Kun Liu Hua
Zhang Qing-Quan Cheng Xiao-Feng Jiang Dong-Bin Liu Hong-Jie Peng Han-Sheng

(*Laser Fusion Research Center, Chinese Academy of Engineering and Physics, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China*)

(Received 16 November 2000 ; revised manuscript received 25 April 2002)

Abstract

The method of Power spectra density was introduced to estimate the quality of a high intensity laser beam, and the near-field of the self-focusing laser beam was analyzed. We obtained a certain ΔB restriction of the laser beam. The results of numerical simulations were coincident with the experimental data very well.

Keywords : Power spectra density, nonlinear self focusing effect, Nd^{3+} glass laser

PACC : 4265

* Project supported by the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics, China(Grant No. 1999Z0201)and the National High-Tech Development Program of China(Grant No. 863-416-5-2).