

高功率固体激光近场强度功率谱密度特性分析

赵军普 胡东霞 周 维 代万俊 王文义 粟敬钦 彭志涛 张 昆 蒋学君

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 高功率固体激光驱动器的负载能力已经成为限制驱动器发展的瓶颈问题,负载能力研究的主要是激光束近场和光学元件的相互作用过程。采用功率谱密度(Power spectral density, PSD)方法分析了多程放大构型高功率固体激光驱动器实验输出近场强度的频谱在激光强度提升过程中的演变规律,分析了引起近场强度调制的主要因素。结果表明,高强度下,激光驱动器的输出近场存在明显的频谱特征,二维功率谱密度近似满足各向同性,近场调制主要源于小尺度自聚焦效应,PSD 曲线显示获得增长的频率主要是各级空间滤波器截止频率所限定的频段。

关键词 非线性光学; 高功率激光; 近场; 功率谱密度; 中频对比度; 特征频率

中图分类号 O437.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0118

Analysis of Near-Field Power Spectral Density in High-Power Solid-State Laser

Zhao Junpu Hu Dongxia Zhou Wei Dai Wanjun Wang Wenyi Su Jingqin Peng Zhitao
Zhang Kun Jiang Xuejun

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Load capability has become the bottle-neck in the progress of high-power solid-state laser facility, the research of which is mainly focusing on the interaction process of laser near-field and optics. Evolvement of experimental near-field intensity with the rise of laser intensity in a multiple-pass amplification laser driver has been researched by power spectral density (PSD). It is shown that, the near-field show obvious frequency-related characteristics, and two-dimensional PSD of near-field is isotropic. Modulation of near-field is due to small-scale self-focusing in high-intensity state. Growth of spatial frequency from PSD curve is mainly in the spatial frequency band, which is decided by the cut-off frequency of spatial filter pinhole.

Key words nonlinear optics; high-power laser facility; near-field; power spectral density; median-frequency contrast, characteristic frequency

1 引 言

高功率固体激光驱动器中,由于光学元件的加工误差等因素使得系统中存在或多或少的相位或振幅噪声,这部分噪声在传输过程中由于三阶非线性克尔(Kerr)效应将引起局部光强的急剧增强,出现广为熟知的“小尺度自聚焦”现象从而导致光束发生成丝现象破坏光学元件,这极大的限制了激光装置的负载能力。目前,国内外大型激光装置中广泛采用空间滤波技术抑制小尺度噪声的增长,该技术对于改善激光装置的光束质量,提高装置的可用性起

到了关键作用。对于光束近场强度调制的描述,目前使用比较多的参数为通量调制度和对比度。此外,2003年彭志涛等提出用功率谱密度方法评价自聚焦光束,并根据MOPA结构的星光II装置实验结果和理论模拟结果给出了判断自聚焦程度的B积分判据^[1]。2004年易煦农等提出用高阶对比度研究光束的自聚焦,指出高阶对比度在光束自聚焦成丝前后有显著的变化^[2]。在激光装置负载水平的牵引下,关于光束自聚焦的研究一直持续不断^[3~6]。

新一代激光装置主要采用了组合口径和多程放

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室(9140C6803020804)资助课题。

作者简介: 赵军普(1980—),男,实习研究员,主要从事强激光传输和光束质量控制技术方面的研究。

E-mail: scu junpu@126.com

大技术以提高装置的性价比,为了提高钹玻璃的储能提取效率,多程放大技术使光束多次通过同一放大介质,这样各程放大累加的噪声就存在密切的联系,使问题变得复杂起来。本文针对采用多程放大技术的激光装置 TIL,采用功率谱密度描述方法,结合装置变口径传输的特点,研究了装置实验近场的强度调制深度和调制结构问题,并和理论模拟计算结果进行了对比。

2 实验

2.1 光束近场强度的功率谱密度计算方法

功率谱密度(PSD)是一种基于傅里叶变换的描述方法,它反映的是各频率分量的傅里叶频谱强度,可以对频谱成分进行定量分析。设近场强度分布为 $I(x, y) = I_{\text{avg}}[1 + A(x, y)]$, 即 $A(x, y)$ 为以平均强度 I_{avg} 归一化后的近场调制分布函数。本文实验结果表明,在中低频段,近场强度二维 PSD 具有很好的各向同性特征,为方便分析在此采用一维形式,取近场平顶矩形区域,对取样区域内的每条采样线作 PSD 计算,然后对所得的多组 PSD 求平均得到表征近场特征的一维 PSD^[7,8]。

一维 PSD 的数值计算公式如下:

$$D_{\text{PS}} = \frac{|A(m)|^2}{N\Delta x} = \frac{\Delta x}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} A(n) \exp(-i2\pi nm/N) \right|^2, \quad (1)$$

式中 $A(n)$ 为一维采样线上强度调制分布, $A(m)$ 为 $A(n)$ 的傅里叶变换

$$A(m) = \Delta x \sum_{n=0}^{N-1} A(n) \exp(-i2\pi nm/N),$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1, -N/2 \leq m \leq N/2,$$

$\nu_x = m/N\Delta x$ 为空间频率, Δx 为采样点间隔, N 为采样点数。值得注意的是在利用 Matlab 等软件 FFT 算法计算 $A(m)$ 得到的是

$$B(m) = \sum_{n=0}^{N-1} A(n) \exp(-i2\pi nm/N),$$

Δx 是为 PSD 计算得到正确的单位和数值加入的系数。根据 Parseval 定理的离散化形式^[9]

$$\sum_{n=0}^{N-1} A(n) A^*(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} B(m) B^*(m) \quad (2)$$

结合 $A(m) = \Delta x B(m)$ 将(1)式代入(2)式两边同时除 N 得

$$\sum_{n=0}^{N-1} |A(n)|^2 / N = \sum_{n=0}^{N-1} D_{\text{PS}} / (N\Delta x), \quad (3)$$

其中 $\Delta \nu_x = 1/(N\Delta x)$, 由(3)式可得

$$\text{RMS}^2 = \Delta \nu_x \sum D_{\text{PS}}, \quad (4)$$

(3)式中 $A(n)$ 是归一化后的强度调制,无单位, Δx 单位是 mm, 故 D_{PS} 的单位也是 mm, $\Delta \nu_x$ 单位为 mm^{-1} 。由此说明在空域和频域中都可以得到描述近场均匀性的参数通量对比度,全频段 PSD 曲线(包括正频段和负频段,对于实数列正负频段对称)和横坐标轴围成的面积即为对比度的平方。

2.2 系统注入光束近场 PSD

前端种子脉冲经预放系统(图 1 中 Pre-Amp)注入装置主放大级,注入能量通常在 5 J 之内,实验数据统计表明在此范围内注入近场强度分布稳定,差别可以忽略,取其中一发数据为例以说明光束近场在传输和放大过程中的变化。该发能量 2.2 J,脉宽 0.9 ns。数据采集 CCD:12 bit 科学级,线性动态范围大于 100:1,空间分辨率 0.2 mm/pixel。

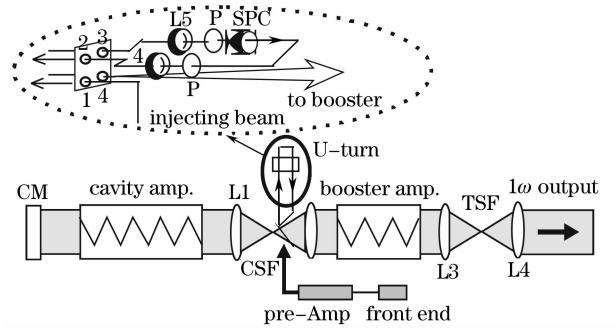


图 1 TIL 装置的单束光路结构示意图

Fig. 1 Simplified TIL optical chain for one beam

从图 2 可知,系统注入光束近场强度比较均匀,平顶区域强度直方图统计呈现高斯型分布,对比度 C 为 11.6%,调制度 1.36, PSD 曲线在对数坐标系中近似为线性。

2.3 系统输出光束近场 PSD

图 1 为光束注入主光路后,在主放大系统(图中 Cavity Amp)内部经过四程放大,四次通过焦平面上不同尺寸的小孔滤波,主放大输出后再经助推级(Booster Amp)单程放大,由于透镜 $L1 \sim L6$ 焦距均不相等,因此 TIL 装置除具有多程放大的特点外,还具有变口径传输的特点。光束精密诊断系统近场 CCD 对 $L4$ 输出光束近场取样衰减成像,近场强度分布如图 3 所示, CCD 相机参数:12 bit, 1024 pixel \times 1024 pixel,对近场空间分辨率 0.43 mm/pixel。

图 4 为采用二维傅里叶变换得到的近场二维 PSD 分布,为了重点观察中频段的特征,显示范围取 -0.3 mm^{-1} 到 0.3 mm^{-1} 频段,由图 4 可知,静态时频谱能量主要集中在零频附近,而随着装置输出

强度的提高,由于小尺度自聚焦效应在中频段逐渐演化出新的能量集中频率,即特征频率,由于二维

PSD具有很好的各向同性特征,因此可采用一维 PSD 进行分析。

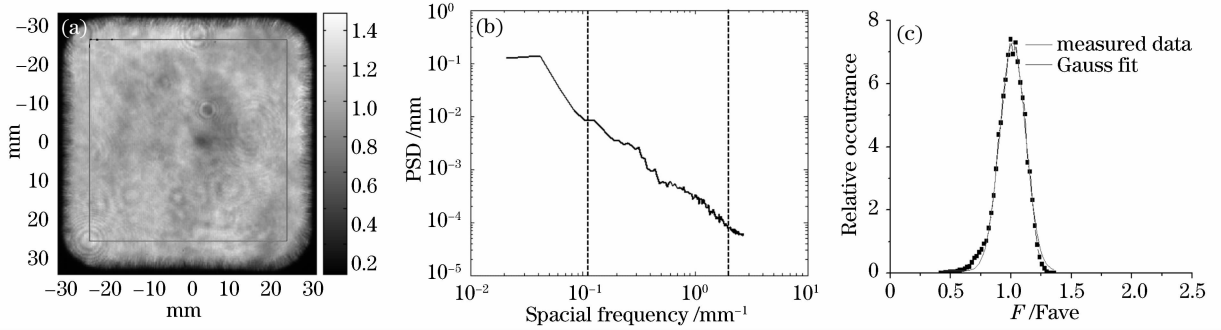


图 2 注入光束近场。(a) CCD 图像, (b) 近场一维 PSD, (c) 近场通量概率分布曲线

Fig. 2 Near-field of input beam. (a) CCD image, (b) one dimension PSD, (c) fluence probability distributions

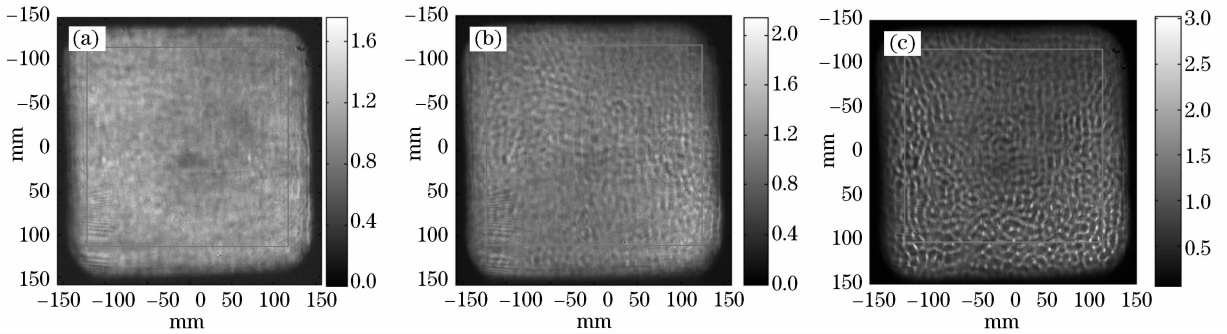


图 3 不同强度下输出近场。(a) 静态, (b) 2.58 GW/cm^2 , (c) 5.0 GW/cm^2

Fig. 3 Near-field of output beam of different intensities. (a) Static state, (b) 2.58 GW/cm^2 , (c) 5.0 GW/cm^2

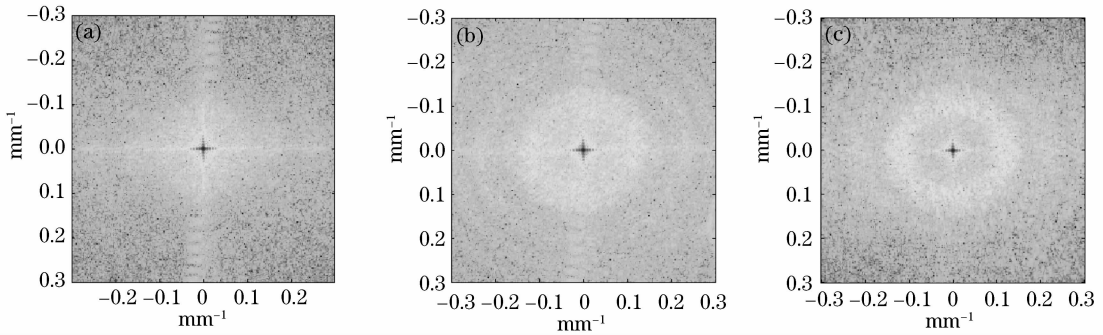


图 4 系统输出近场的相应二维 PSD 分布

Fig. 4 2D PSD distribution corresponding to near-field of output beam

3 分析与讨论

图 5 给出了激光强度提升过程中四种状态输出近场的功率谱密度曲线,为了和空域统计结果对比,同时给出通量概率分布曲线。比较图 3(a)、图 3(b) 容易发现两者调制结构存在明显差别,然而图 5(b) 中两种状态通量概率分布却近似相同,表示近场调制深度的参数对比度都为 15.7%,这说明了仅靠描述调制深度的参数调制度和对比度的不足。图 5(a) PSD 曲线显示出了两者的明显区别在于调制结构,

静态近场 PSD 低频和高频部分均略高于动态近场,中频段呈线性,这一方面说明静态近场比较均匀,另一方面也说明了静态下光强弱,近场图像容易受 CCD 热噪声等因素的影响而引入高频调制。按(4)式定义把随激光强度提升有明显变化的 0.03 mm^{-1} 到 0.5 mm^{-1} 的中频段积分值的平方根称为中频对比度,把中频段 PSD 增长峰对应的空间频率称为近场特征频率。则输出近场的特征频率在 0.1 mm^{-1} 附近,根据光束口径在传输过程中的变换关系,注入近

场的中频段为 $0.124 \sim 2.07 \text{ mm}^{-1}$ ，对应的峰值频率为 0.414 mm^{-1} 。 2.58 GW/cm^2 动态近场中频段有明显增长，和静态近场对比中频对比度分别为

8.3%和 6.2%，说明在描述近场时以中频对比度取代传统的对比度概念更为合适。

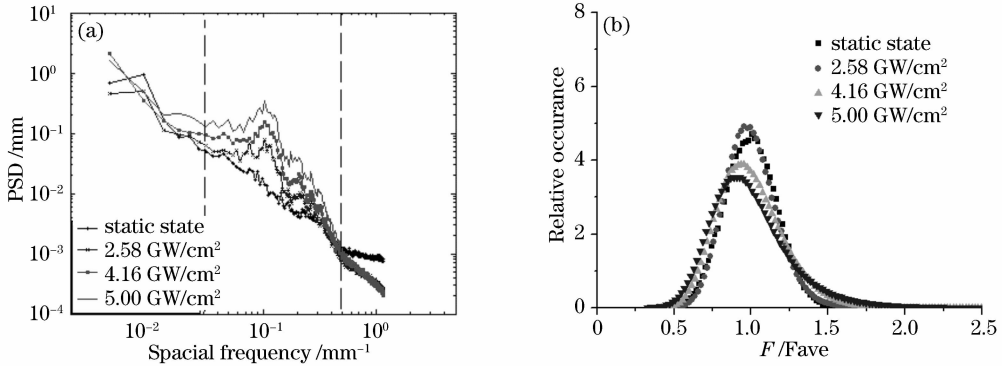


图 5 系统输出光束近场。(a)一维 PSD, (b)通量概率分布曲线

Fig. 5 1D PSD (a) and fluence probability distributions (b) in different states of near-field of output beam

根据 BT 理论,光束纹波最快增长频率应该随着功率密度的提高而向高频方向移动,而图 5 中三种状态高功率近场的特征频率却都为 0.1 mm^{-1} (空间周期为 10 mm),并且数值模拟计算显示在系统输出 2.85 GW/cm^2 ($\Delta B = 2.1$)时增长最快的纹波空间周期应该为 $2 \sim 3 \text{ mm}$ ^[10]。为了分析实验结果和理论模拟之间的差别来源,对多程放大结构光路按 MOPA 结构展开,并对传输过程中的光束口径进行归一化处理,发现中频段的起止频率与注入滤波孔截至频率(0.06 mm^{-1})和助推空间滤波器的截止频率(实验中选用 0.55 mm^{-1})基本吻合,即从调制结构而言近场强度调制主要是注入和输出空间滤波器截止频率所限定的频段的增长。特征频率和 CSF 四孔的截止频率(0.1 mm^{-1})吻合,如果以 CSF 四孔的截止频率为分界点,输出近场 PSD 中频段又可分为两段, $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}^{-1}$ 频段的增长仅发生在助推放大器段,而 $0.03 \sim 0.1 \text{ mm}^{-1}$ 频段的调制在主放大系统内部增长后可以顺利穿过最后一级滤波小孔(截止频率 0.1 mm^{-1})进入助推放大器,在助推空间滤波器中得到进一步的生长。进入助推空间滤波器时,高频调制已被截止,穿过主放空间滤波器四孔的空间频率成分中 0.1 mm^{-1} 的调制占据的权重最大,因而在助推段获得增益后凸显为特征频率。 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}^{-1}$ 频段的调制虽然比 0.1 mm^{-1} 的调制增益系数大,然而噪声源仅来自助推段,种子权重小,获得增益后也没有超过空间频率为 0.1 mm^{-1} 的调制,该频段出现的次级峰值代表的才是助推段增长最快的纹波频率。

4 结 论

高功率固体激光驱动器由于强光非线性效应和空间滤波器对高频噪声的抑制作用,光束近场强度调制结构呈现明显的各向同性特征,强度调制主要源于注入和输出空间滤波器截止频率所限定的频段的噪声源小尺度自聚焦效应,特征频率和各级空间滤波器的截止频率和最快增长频率有关。对强激光近场强度的功率谱密度特性进行分析,对于合理设计激光驱动器的空间滤波小孔,控制光束的均匀性提供了有益参考。

参 考 文 献

- 1 Peng Zhitao, Jing Feng, Liu Lanqin *et al.*. Power spectral density estimation of quality of the beam pass through an self-focusing media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(1): 87~90
- 2 彭志涛,景峰,刘兰琴等. 自聚焦激光束光束质量评价的功率谱密度方法[J]. *物理学报*, 2003, **52**(1): 87~90
- 3 Yi Xunong, Hu Wei, Luo Hailu *et al.*. Study of small-scale self-focusing in laser beams by high-order contrast[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2): 749~754
- 4 易煦农,胡巍,罗海陆. 用高阶对比度研究光束的小尺度自聚焦[J]. *物理学报*, 2005, **54**(2): 749~754
- 5 Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Filamentation of intense laser beam in high power laser and the B integral[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1331~1335
- 6 文双春,范滇元. 高功率激光放大器中光束的成丝和 B 积分[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1331~1335
- 7 Lin Xiaodong, Wang Xiao, Li Dayi *et al.*. Analysis of small-scale self-focusing effects in nonlinear media with gain[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(5): 418~420
- 8 林晓东,王道,李大义等. 非线性增益介质中的小尺度自聚焦特性分析[J]. *中国激光*, 2002, **29**(5): 418~420
- 9 Gu Yalong, Zhu Jianqiang. Small-scale self-focusing of divergent beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1734~1738
- 10 顾亚龙,朱健强. 发散光束小尺度自聚焦特性的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1734~1738

- 6 Zhao Jianlin, Peng Tao, Ye Zhijun. Hot-image effects in high-power solid-state laser systems [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1315~1322
赵建林, 彭涛, 叶知隽. 高功率固体激光系统中的“热像”效应 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1315~1322
- 7 J. Merle Elosn, Jean M. Bennett. Calculation of the power spectral density from surface profile data [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **43**(1): 201~208
- 8 Zhang Rongzhu, Cai Bangwei, Yang Chunlin *et al.*. Numerical method of the power spectral density [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(6): 661~664
张蓉竹, 蔡邦维, 杨春林 等. 功率谱密度的数值计算方法 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(6): 661~664
- 9 Xue Nianxi. *Matlab Application in Processing of Digital Signal* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003
薛年喜. *Matlab 在数字信号处理中的应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- 10 Liu Hongjie. Research on Character of median & high frequency phase aberration [D]. Mianyang: Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, 2005. 18~21
刘红婕. 高功率激光束中高频位相畸变特性的研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 2005. 18~21