

采用放大的自发辐射光源测试光学薄膜的损伤阈值

周 琼 张志祥 孙明莹 姚玉东 彭宇杰 刘德安 朱健强*

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 提出了一种精确评估光学薄膜损伤阈值的方法。放大的自发辐射(ASE)光源由于时间相干性和空间相干性较差,所以在近场区域光场强度分布均匀,聚焦后远场也没有被非均匀调制。采用 ASE 光束作为光学元件损伤阈值测试的辐照光源,可以提高辐照光源的均匀度,实现对光学薄膜损伤阈值的精确评估。ASE 光源由神光 II 高功率激光装置的一级钕玻璃棒状放大器输出,脉宽经过光电开关调制后为 9 ns,能量输出在几毫焦耳到几十焦耳范围内可调节,光谱半峰全宽(FWHM)为 1 nm。根据标准 ISO-11254,实验获得 ASE 测试 TiO₂ 高反膜的损伤阈值为 15.1 J/cm²,高于激光测试样品的损伤阈值 7.4 J/cm²(脉宽为 9 ns 时),更准确地评估了样品的损伤阈值。

关键词 激光光学;放大的自发辐射;部分相干性;损伤阈值测试;均匀的光强分布

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0814003

Using Amplified Spontaneous Emission Source to Test Damage Threshold of Optical Thin-Film

Zhou Qiong Zhang Zhixiang Sun Mingying Yao Yudong Peng Yujie
Liu Dean Zhu Jianqiang

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A method to accurately evaluate optical thin-film damage threshold is presented. The poor coherences in time and space of amplified spontaneous emission (ASE) result in a very smooth beam profile in the near-field region and uniform intensity distribution of the focused beamlet in the far-field region. In order to increase the uniformity of the irradiation source and test the damage threshold with a greater precision, ASE beam is used to test the damage threshold. ASE is generated by a rod amplifier of the Nd:glass in SG-II high power laser system. The pulse duration is 9 ns after an electro-optical switch with the output energy changing from a few millijoules to tens of joules. The spectral full width at half maximum (FWHM) is 1 nm. According to ISO-11254, the damage threshold of the TiO₂ high reflection film using ASE is 15.1 J/cm², which is higher than that of 7.4 J/cm² tested by laser with pulse duration of 9 ns. So a more accurate evaluation of the samples damage thresholds can be obtained using ASE as the irradiation source.

Key words laser optics; amplified spontaneous emission; partially coherence; damage threshold test; uniform intensity distribution

OCIS codes 140.3330; 030.1640; 050.1970; 140.3580

1 引言

为了准确评估高功率激光装置中大口径光学元

件的抗激光破坏能力,提高损伤测试的精度具有重要的研究意义。在光学元件的损伤阈值测试中,一

收稿日期: 2014-04-17; 收到修改稿日期: 2014-04-28

作者简介: 周 琼(1985—),女,博士研究生,主要从事高功率激光系统中放大的自发辐射方面的研究。

E-mail: zhouqiong85610@126.com

导师简介: 刘德安(1972—),男,研究员,主要从事高功率激光传输与反馈控制技术方面的研究。

E-mail: liudean@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: jqzhu@mail.siom.ac.cn

般采用激光束作为测试光源,观察光学元件在激光作用下性能或结构发生的变化,并获得元件在发生临界损伤时入射激光束的能量密度,包括损伤判定和阈值测试^[1-4]。目前国内外对改善损伤阈值测试精度的研究集中于测试光源对光学元件损伤的作用方式^[1,4]、损伤形貌判定^[5-6]及阈值计算^[4,7-9]等,辐照光源的光场强度均匀性对光学元件损伤阈值测试的影响仍有待研究。

光学元件表面介质膜的光学损伤主要由光学元件表面和介质膜的缺陷导致的,而缺陷的分布是由生长和加工等过程确定的,具有一定的随机性。另一方面,激光损伤测试中激光光斑的横向分布也有一定的随机性^[10]。窄带激光作为测试光源时由于其完全相干性和单色性,在传输过程中容易受到光学元件和环境等方面的空间噪声影响,包括由于非均匀抽运、增益饱和和热畸变对波前产生的低频调制,硬边光阑、灰尘和光学元件表面缺陷形成的衍射调制,杂散光与主光束产生的干涉等^[11]。上述噪声调制是造成测试光源光强分布均匀度降低的主要因素,并且在光强分布中具有随机性。当光学元件表面的缺陷密度分布一定时,这些噪声调制形成的局部高激光强度可能会在元件的缺陷处最先诱发损伤,因此损伤分布也同时具有空间随机性。实际引起损伤的通量密度将远远高于实验测得的整个大口径光斑的平均通量密度,所以采用激光光源作为测试光源,不能反映元件的真实损伤阈值,也对元件抗激光破坏能力的评估引入了误差。

为了提高光斑强度分布的均匀性,可以采取随机相位板(RPP)均匀照明技术^[12-13]、诱导空间非相

干(ISI)技术^[14]、光谱色散平滑(SSD)技术^[15]和产生放大的自发辐射(ASE)的部分相干光(PCL)技术^[16-17]等方法。

PCL是一种通过增大光源的光谱宽度和发散角,降低其时间和空间相干性,从而减少由于噪声调制对光强均匀性产生影响的技术。ASE是产生部分相干光的一种方法,它是一种介于自发辐射与激光之间的过渡状态,带宽在自发辐射与激光之间,发散角比激光略大^[16-17]。因此空间噪声引起的调制较少,ASE的光束横截面强度起伏较少。采用ASE光源测试元件的损伤阈值时,可以忽略噪声调制导致的元件损伤空间随机分布,只从元件本身缺陷分布等因素评估其抗激光破坏能力。

本文提出并验证了采用高功率激光装置中输出的ASE光源测试光学材料损伤阈值的方案。利用神光II装置中输出的具有一定光谱带宽、光斑分布均匀的ASE光源,按照国际标准ISO-11254和国家标准GB/T-16601建立了新型损伤阈值测试装置,采用1-on-1^[18]的方法,获得TiO₂高反射膜的损伤阈值为15.1 J/cm²,明显高于激光测试的损伤阈值7.4 J/cm²(脉宽为9 ns时),更加准确地评估了样品的零损伤概率阈值。

2 实验研究

2.1 实验方法与装置

光学薄膜损伤阈值测试的装置按照国际标准ISO-11254和国家标准GB/T-16601建立,ASE光束诱导光学薄膜损伤阈值的测试装置如图1所示。

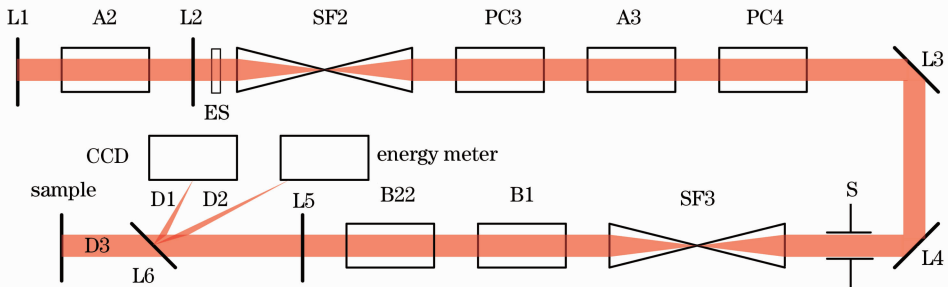


图1 采用ASE光束作为测试光源的光学元件损伤阈值测试装置示意图

Fig. 1 Diagram of a damage threshold testing facility using ASE as the irradiation source

ASE光源由神光II装置产生,在放大器A2的钕玻璃棒(直径为20 mm)两端分别放置了0°全反镜L1和单面增透镜L2,经过放大器A2,A3,B1和B22,并由放大器的电源供电。ASE光源经过电光开关(ES)、空间滤波器SF2和SF3、光隔离器PC3

和PC4以及软边光阑S等到达测量光路部分。其中各级放大器和各级隔离器正常工作,空间滤波器小孔尺寸按正常输出条件选择。ASE光源经过45°高反镜L3和L4后,在输出方向设置直径为50 mm,焦距为890 mm的平凸透镜L5,取样率为

5%的取样镜 L6。经过 L6 的 ASE 光束被分成 D1, D2 和 D3 三部分。D1, D2 分别被 CCD 探测器和能量计接收, 获得光斑分布和能量大小; D3 入射到样品表面。样品被固定在三维平移台上, 采用 K9 玻璃为基底材料, 其中一面镀 TiO₂ 高反射膜, 薄膜表面接受损伤阈值测试。

实验时首先对样品的损伤阈值范围进行粗略测试, 然后再进行能量密度的细微调节, 从而准确地确定损伤阈值。实验通过控制放大器电源电压, 对 ASE 光束的能量进行粗略调节后, 使得照射到薄膜样品表面的能量密度在损伤阈值附近。将固定样品的三维平移台沿光轴方向前后移动, 通过改变光斑面积调节能量密度。测试光源采用大光斑辐照测试

点, 直径范围为 4~7 mm, 所以样品材料不均匀性、表面缺陷密度及环境不稳定等因素对损伤阈值的作用不受光斑大小的影响。实验根据 ISO-11254, 采用 1-on-1 方法测试激光损伤阈值: 样品上每个测试点只接受一个脉冲辐照, 不管是否损伤, 都移动样品至下一个未辐照点。在粗略测试获得的破坏阈值附近, 按照从小到大的顺序逐渐增大光束的能量密度, 得到不同能量密度时样品的损伤形貌。

采用激光作为辐照光源进行光学薄膜损伤阈值测试时, 实验装置如图 2 所示, 激光种子源由主振荡器输出, 空间滤波器 SF2 之后的光路与 ASE 装置完全相同。测试步骤与 ASE 诱导样品损伤测试的步骤相同。

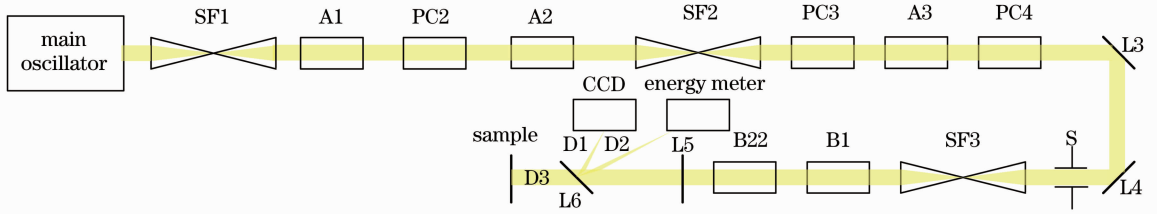


图 2 采用激光作为测试光源的光学元件损伤阈值测试装置示意图

Fig. 2 Diagram of a damage threshold testing facility using laser as the irradiation source

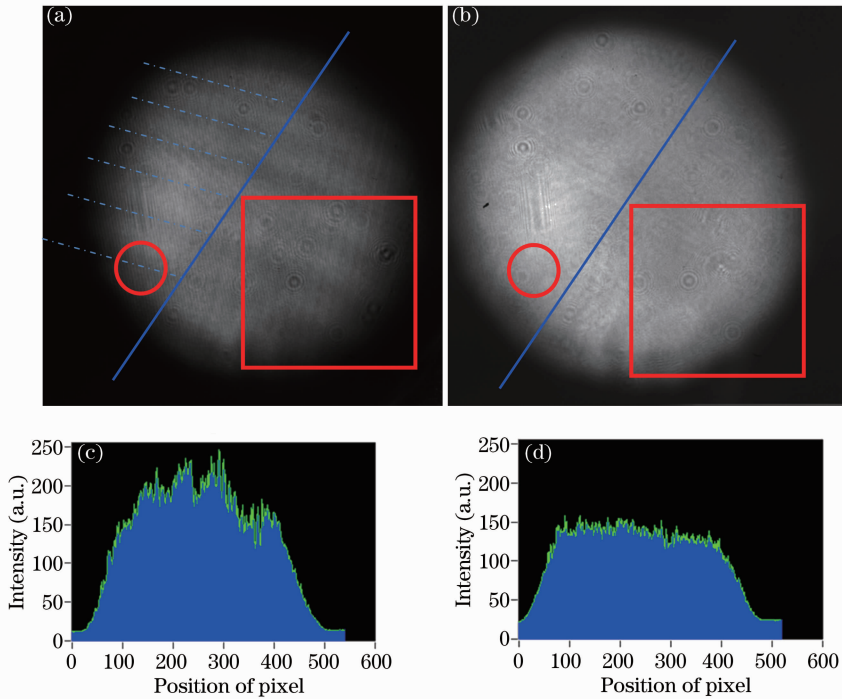


图 3 光斑强度分布图。(a)激光光强二维分布图; (b) ASE 光强二维分布图; (c)激光光强一维分布图; (d) ASE 光强一维分布图。[图(a)中点划线表明了低频干涉条纹的位置]

Fig. 3 Intensity distributions of light spot. (a) Two-dimensional intensity distribution of laser; (b) two-dimensional intensity distribution of ASE; (c) one-dimensional intensity distribution of laser; (d) one-dimensional intensity distribution of ASE. [The dot-dashed lines in (a) are used only to guide the location of the interference fringes]

2.2 实验结果分析

实验获得的 ASE 光谱半峰全宽(FWHM)约为 1 nm, 脉冲宽度为 9 ns, 激光光谱带宽在微米量级, 脉冲宽度为 3 ns。图 3(a)和(b)分别为 CCD 测试得到的激光和 ASE 的光斑强度分布, 图 3(c)和(d)分别为激光和 ASE 光强一维分布图。由于激光良好的相干性, 当它通过光学平板如透镜、衰减片和取样镜等, 在平板两个表面之间反射的激光束叠加在一起会产生干涉条纹, 因此在激光的光强分布中可以观测到清晰的干涉条纹, 如图 3(a)中点划线标示的间距较大的干涉条纹(即低空间频率), 将红圈内的图案放大后[见图 4(a)]也可以观察到一组间距较小、明暗相间的干涉条纹。而 ASE 光束为部分相

干光(ASE 光源的光谱图如图 5 的插图所示), 带宽的增加导致 ASE 干涉条纹的对比度降低, 所以图 3(b)中间距较大的干涉条纹和图 4(b)中间距较小的干涉条纹不再清晰可辨。另外, ASE 和激光近场中均有若干衍射环分布, 这是由于光束经过光路中一些有限的孔径, 例如灰尘颗粒和硬边光阑等, 发生菲涅耳衍射造成的。图 6 是图 3 红色方框的细节放大图, 如图 6 所示, 对比两者的衍射环图样发现, 激光的高频调制比 ASE 的高频调制明显, 且衍射环个数也明显多于 ASE 的。上述实验结果表明, ASE 光源在样品表面的强度低频和高频调制均明显小于激光光源, 因而更有利于光学元件损伤阈值的测试。

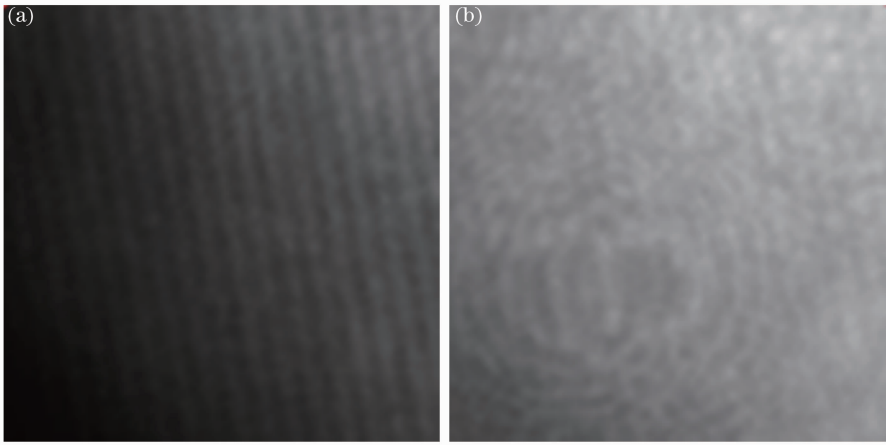


图 4 干涉条纹对比图(图 3 红色圆圈内细节放大图)。(a)激光; (b) ASE

Fig. 4 Comparison of interference fringes (enlarged drawing of red circles in Fig. 3). (a) Laser; (b) ASE

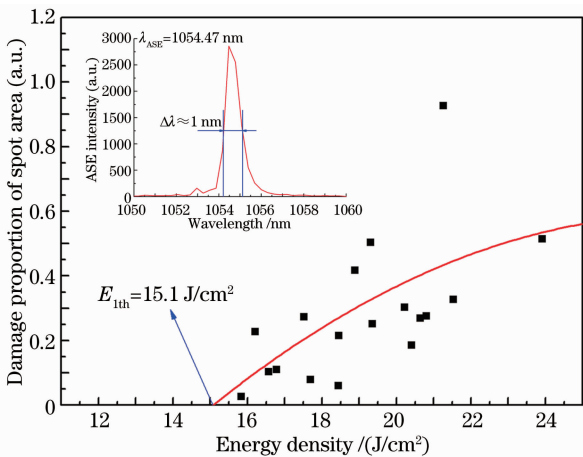


图 5 采用 ASE 光源对样品进行损伤阈值测试的非线性拟合结果(内图为 ASE 的光谱图)

Fig. 5 Damage threshold nonlinearly fitted results using ASE as the testing source (inset: spectrum of ASE)

实验中样品损伤阈值的确定是通过计算损伤面积占光斑面积比例的方法得出的, 即在对测试结果进行统计分析的基础上, 取对应于损伤面积占光斑面积比例为零的临界能量密度值为损伤阈值。该损伤阈值确定方法如下: 每一个能量密度段辐照 10 个点, 统计各个能量密度范围造成样品损伤的比例。以能量密度值为横坐标, 损伤面积占光斑面积的比例为纵坐标, 拟合出两者的关系曲线, 曲线与横坐标轴交点处的能量密度大小即为损伤阈值。按上述方法非线性拟合得到 ASE 光源诱导样品损伤的阈值 E_{th} 为 15.1 J/cm^2 (如图 5 所示)。而采用脉宽为 3 ns 的激光光源时, 拟合曲线得到样品的损伤阈值约为 4.3 J/cm^2 。根据脉宽 t_p 与损伤阈值 E_{th} 的关系^[19]

$$E_{th} = a * t_p^{0.5},$$

则系数 $a = E_{th} / t_p^{0.5} = 4.3 / 3^{0.5} = 2.483$ 。所以当激光

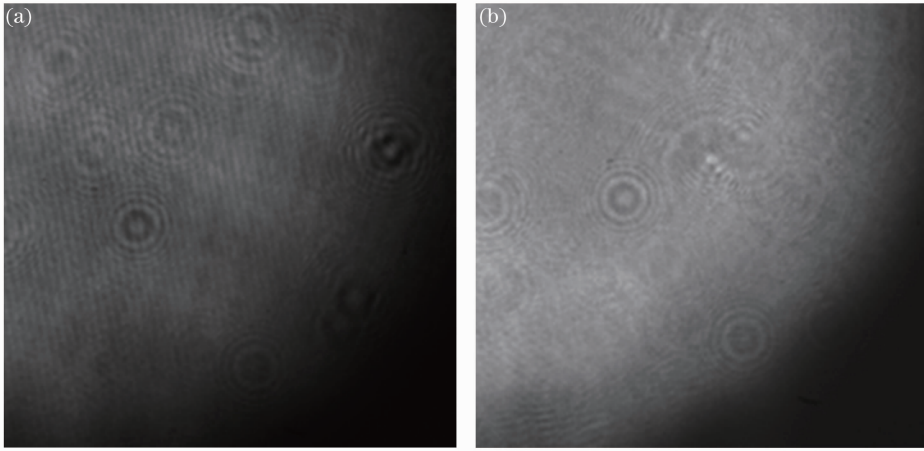


图6 衍射环对比图(图3红色方框内细节放大图)。(a)激光；(b) ASE

Fig. 6 Comparison of diffraction patterns (enlarged drawing of red boxes in Fig. 3). (a) Laser; (b) ASE

的脉宽为 9 ns 时,样品的损伤阈值 E_{2th} 为 7.4 J/cm^2 。可以看出在同等实验条件下,相等脉宽大小的光源进行样品损伤阈值测试时,ASE 诱导样品损伤的 E_{1th} 明显大于激光诱导损伤的 E_{2th} ,前者几乎为后者的两倍。

实验使用 50 倍 Leica 020-525.030 显微系统和 JVC TK-C1381 彩色相机对样品损伤后的形貌进行表征,结果如图 7 和表 1 所示。其中图 7(a)为采用激光诱导样品产生的损伤形貌,实验测得能量密度分别为 5.5 J/cm^2 和 16.19 J/cm^2 ,辐照光斑直径分别为 4.67 mm 和 3.24 mm 。图 7(b)为采用 ASE 诱导样品产生的损伤形貌,实验测得能量密度分别为 16.21 J/cm^2 和 18.89 J/cm^2 ,辐照光斑直径分别为 6.47 mm 和 6.11 mm 。当激光的测试能量密度达到 5.5 J/cm^2 时,样品就已经在薄膜表面呈现小部分剥落及麻点等损伤形貌,损伤面积约占光斑面积的 1.62% 。随着激光辐照光斑的能量密度增大到 16.19 J/cm^2 ,即略高于 ASE 诱导样品损伤阈值 15.1 J/cm^2 时,样品薄膜表面形成大面积剥落,损伤面积占光斑面积的 15.77% 。ASE 的测试能量密度为 16.21 J/cm^2 时,样品只有小面积的坑状损伤,损

伤面积只占光斑面积的 0.223% 。当 ASE 的测试能量密度为 18.89 J/cm^2 ,比 15.1 J/cm^2 增长 20% 时,损伤面积占光斑面积的比例不到 1% 。

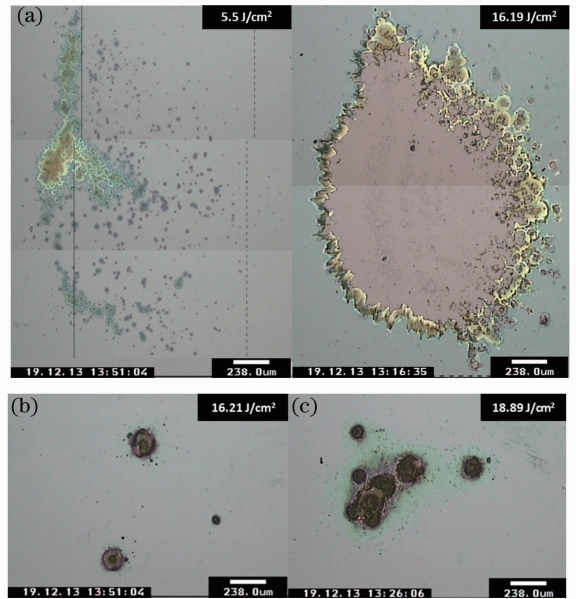


图7 样品损伤形貌表征。(a)激光；(b) ASE

Fig. 7 Damage morphology of samples induced

by (a) laser and (b) ASE

表1 样品损伤测试结果比较

Table 1 Comparison of results in damage testing of samples

	Diameter of irradiation spot /mm	Energy intensity of irradiation spot /(J/cm ²)	Percentage of the damage area to the light spot area /%
Laser	4.67	5.5	1.62
	3.24	16.19	15.77
ASE	6.47	16.21	0.223
	6.11	18.89	0.899

以上实验结果表明,激光诱导样品损伤的能量密度远小于 ASE,随着激光能量密度的增大,造成

样品的损伤比 ASE 更加严重。激光在传输过程中,非均匀抽运,增益饱和效应和热畸变会导致光束波

前产生低频调制,硬边光阑、灰尘和光学元件表面缺陷形成衍射调制,杂散光与主光束产生干涉。这些调制造成激光的近场分布产生了波前畸变。当光束经过透镜聚焦后激光的远场分布将出现热斑结构,导致光强在远场区域分布不均匀^[16-17]。而强度起伏的区域将更容易在光学元件的缺陷处诱发损伤,造成损伤的通量密度大于测试光源光斑的平均通量密度(即实验测试得到的通量密度),因此统计获得的损伤阈值 E_{2th} 就会小于实际造成破坏的能量密度值,采用这样的激光测试光源不能真实反映样品的损伤特性。但是利用部分相干光可以消除热斑结构,提高光强分布的均匀性。ASE 光源是具有一定带宽和发散角的部分相干光,相干时间远远小于脉宽,此时瞬时相干结构变化很快,相干性造成的不均匀调制在一个脉冲完成之前将很快消失,因此叠加于 ASE 近场分布中的空间噪声调制较少,近场波前可以近似为平面波,没有波前畸变,近场分布较均匀。当 ASE 光束经过透镜聚焦后,远场区域也就没有热斑结构,即没有强度起伏的区域。采用 ASE 光源测试元件的损伤阈值时,不需考虑这些强度起伏导致的元件损伤,只从元件本身缺陷分布等因素评估其抗激光破坏能力,因此实验中 ASE 诱导样品损伤阈值 E_{1th} 能更真实地反映样品的损伤特性,也明显高于激光诱导样品损伤阈值 E_{2th} 。

3 结 论

提出了一种采用高功率激光装置输出的 ASE 诱导光学薄膜损伤阈值测试的辐照光源新方法。与激光光斑强度分布相比,ASE 光源的强度分布较均匀,各种空间噪声引起的调制较少且调制深度较小,光束经过聚焦之后远场区域也难以观察到热斑结构,能够排除辐照光源强度均匀性等因素对测试的影响。实验结果表明,ASE 光源诱导样品损伤的阈值明显高于激光辐照样品时的损伤阈值,验证了采用 ASE 诱导样品损伤可实现对光学元件损伤的准确评估,并且发现无论 ASE 的近场还是远场都适合进行光学元件的损伤特性研究。本项工作还将进一步优化 ASE 光强分布的均匀性及测试方案,以期能更准确地评估光学元件的损伤。同时采用 ASE 等部分相干光源作为测试光源可以进行光学元件损伤在线检测以及对元件预处理、提高损伤阈值等方面的探索。

参 考 文 献

- 1 E J Hacker, H Lauth, P Weibrod. Review of structural influences on the laser damage thresholds of oxide coatings [C]. SPIE, 1996, 2714: 316-330.
- 2 A F Stewart, A H Guenther. Laser-induced damage: an introduction [J]. Appl Opt, 1984, 23(21): 3741-3742.
- 3 T W Walker, A H Guenther, P Nielsen. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings-part I: experimental [J]. IEEE J Quantum Electron, 1981, 17(10): 2053-2065.
- 4 J Becker, A Bernhardt. ISO11254: an international standard for the determination of the laser induced damage threshold [C]. SPIE, 1994, 2114: 703-713.
- 5 J H Su, J Lou. Laser-induced damage threshold detection for optical thin films and research on damage morphology [C]. SPIE, 2009, 7283: 72831Z.
- 6 L J Shaw-Klein, S J Burns, S D Jacobs. Model for laser damage dependence on thin-film morphology [J]. Appl Opt, 1993, 32(21): 3925-3929.
- 7 J W Arenberg. Calculation of uncertainty in laser damage thresholds determined by use of the damage frequency method [C]. SPIE, 1997, 2428: 489-502.
- 8 Guo Yajing, Tang Shunxing, Ji Lailin, *et al.*. Experimental study of multiple wavelength laser-induced damage in SiO₂ based on near field and image segmentation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0114001.
郭亚晶, 唐顺兴, 季来林, 等. 基于激光近场和图像分割技术的复合波长诱导熔石英损伤实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0114001.
- 9 Guo Yajing, Tang Shunxing, Tang Qing, *et al.*. Study of laser-induced damage in fused silica irradiated by 351 nm laser near-field [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502004.
郭亚晶, 唐顺兴, 唐清, 等. 基于激光近场辐照的 351 nm 激光诱导熔石英损伤研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502004.
- 10 W Rudolph, L Emmert, Z Sun, *et al.*. Laser damage in thin films-what we know and what we don't [C]. SPIE, 2013, 8885: 888516.
- 11 B M Van Wonerghem, J R Murray, W C Behrendt, *et al.*. Performance of a prototype for a large-aperture multipass Nd: glass laser for inertial confinement fusion [J]. Appl Opt, 1997, 36(21): 4932-4953.
- 12 Y Kato, K Mima. Random phase shifting of laser beam for absorption profile smoothing and instability suppression in laser produced plasmas [J]. Appl Phys B, 1982, 29(3): 186-188.
- 13 Y Kato, K Mima, N Miyanaga, *et al.*. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression [J]. Phys Rev Lett, 1984, 53(11): 1057-1060.
- 14 R H Lehmbert, S P Oenschain. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets [J]. Opt Commun, 1983, 46(1): 27-31.
- 15 S Skupsky, R W Short, T Kessler, *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light [J]. J Appl Phys, 1989, 66(8): 3456-3462.
- 16 H Nakano, T Kanabe, K Yagi, *et al.*. Amplification and propagation of partially coherent amplified spontaneous emission from Nd:glass [J]. Opt Commun, 1990, 78(2): 123-127.
- 17 H Nakano, T Kanabe, N Miyanaga, *et al.*. Spectrally dispersed amplified spontaneous emission for improving irradiation uniformity into high power Nd:glass laser system [J]. J Appl Phys, 1993, 73(5): 2122-2131.
- 18 ISO 11254-1: 2000. Laser and Laser-Related Equipment-Determination of Laser-Induced Damage Threshold of Optical Surfaces-Part1: 1-on-1 test [S]. 2011.
- 19 K R Mann, H Gerhardt, G Pfeifer, *et al.*. Influence of the laser pulse length and shape on the damage threshold of UV optics [C]. SPIE, 1991, 1624: 436-443.