

表面颗粒污染物诱导薄光学元件初始损伤的机理*

孙晓艳¹⁾²⁾ 雷泽民¹⁾²⁾ 卢兴强^{1)†} 范滇元¹⁾

1)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2013年11月8日收到; 2014年2月25日收到修改稿)

基于光传输理论研究了前表面颗粒污染物诱导薄光学元件产生初始损伤的原因, 提出了颗粒遮光效应和颗粒造成的光学元件局部热变形两者共同作用对光束进行扰动的损伤机理. 研究表明: 对于高功率激光光束, 薄光学元件局部热变形对光束的扰动是产生较高光强调制的重要原因; 随着激光脉冲发射次数的增加, 局部热变形的表面形状、位相延迟幅度、热扩散长度不断变化, 会在光学元件内不同厚度处和后表面 xy 方向上的不同位置处产生较高的光强调制, 不仅容易引起后表面产生多个损伤点, 也可能在光学元件内就产生损伤, 并且在厚度方向上的损伤点是分散的.

关键词: 激光损伤, 光传输, 颗粒污染物, 热变形

PACS: 42.25.Fx, 42.60.Jf, 42.30.Lr, 65.40.De

DOI: 10.7498/aps.63.134201

1 引言

在高功率激光驱动器中, 为了节约成本, 驱动器大多运行在接近光学元件损伤阈值的情况下, 而光学元件的表面污染物不仅影响后续光束质量甚至会严重降低光学元件的抗损伤能力, 这使得整个驱动器的负载能力下降^[1-4]. 颗粒污染物是高功率激光系统中一种常见的污染物, 因此研究光学元件表面颗粒污染物对光束传输特性的影响将有助于提高激光驱动器的负载能力.

在国外的研究中, Genin等^[5,6]实验研究了不同性质和尺寸的颗粒污染物对光学元件损伤阈值的影响, 模拟研究了光学元件前表面颗粒污染物由于衍射效应对光学元件后表面激光损伤的影响. Honing等^[7]研究了表面有颗粒污染物的熔石英光学元件的损伤概率与损伤阈值的关系. Mainguy等^[8]研究了经污染物后的光束传输特性并给出了沿颗粒中心所在轴的光强变化的理论计算模型. 国

内研究人员广泛模拟研究了颗粒等缺陷对光束近场的调制^[9-11]以及可能产生的热像效应的演化规律^[12-21], 并实验研究了金属颗粒对光学元件损伤阈值的影响^[22,23]. 此外, 还有研究人员采用功率谱密度(PSD)方法来描述光学元件上的缺陷分布情况并研究了这种缺陷分布与光束近场质量的关系^[24,25]. 但是, 主要的研究都是基于颗粒这种缺陷本身对光束的扰动以及对所产生热像的分析, 对于诱导光学元件初始损伤产生的机理的研究并不充分.

本文考虑到在多次激光脉冲发射下光学元件表面颗粒污染物吸收激光能量引起升温, 这种升温经热传导会使污染物底部的光学元件局部受热而产生热变形, 并且位于光学元件前表面的颗粒更容易造成光学元件的损伤, 所以研究了前表面颗粒污染物和其引发的光学元件热变形共同作用对光束的扰动, 讨论了热变形的参数变化对光束调制的影响, 所得模拟结果可以认知影响高功率激光驱动器安全运行的内在因素.

* 国家自然科学基金(批准号: 60707019)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn

2 理论模型

激光会聚入射到薄膜样品表面, 薄膜吸收激光转化为热量并扩散到基底引起薄膜系统的温度升高, 并导致热膨胀形成表面热包^[26], 而光学元件表面的颗粒污染物同样会吸收热量, 并可认为颗粒温度较高也会引起光学元件表面的热变形, 如图 1 是在激光脉冲发射下前表面钛颗粒所在区域的光学元件热变形. 这种热变形会引起光程差的变化, 相当于引入了一个位相调制, 并且热扩散效应会使得它的面积大于颗粒污染物的面积, 所以即使颗粒完全遮光, 光学元件热变形也会对光产生一定的调制. 考虑到振幅型颗粒污染对激光近场的调制最弱^[11], 因而采用振幅型颗粒更有利于观察光学元件热变形引起的位相延迟对光束调制的影响, 所以模拟中采用的颗粒污染物都是振幅型颗粒.

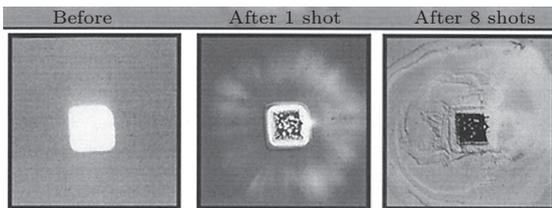


图 1 前表面钛颗粒所在区域的光学元件热变形^[6]

在计算中, 激光脉冲可表示为^[11]

$$E(r, t) = A_0 \exp \left[-\frac{\ln 2}{2} \cdot \left(\frac{r}{\sigma} \right)^{2m_1} \right] \times \exp \left[-\frac{\ln 2}{2} \cdot \left(\frac{t}{\tau} \right)^{2m_2} \right], \quad (1)$$

其中, A_0 为信号振幅, m_1 表示不同的脉冲空间分布 (当 $m_1 = 1$ 时为高斯分布, 当 $m_1 > 1$ 时为超高斯分布), r 表示空间径向坐标, σ 为脉冲横向半高半宽, m_2 表示不同的脉冲时间波形, t 为时间坐标, τ 为脉冲时间波形的半高半宽.

假设一个圆形颗粒污染物位于光学元件前表面, 其透过率为 $T(r)$ 且对光有一定的吸收. 颗粒吸收激光会产生温升, 这里认为颗粒很薄而忽略颗粒的热膨胀, 只考虑颗粒的温升经过热传导使得颗粒底部的光学元件区域局部受热产生热变形, 而光束经过光学元件时无论是否有热变形都认为是全透的. 图 2 是上述扰动的示意, 圆形颗粒的半径为 r_1 , 造成的热变形区域半径为 r_2 , 经过颗粒、热变形后入射到光学元件的光场复振幅为

$$U_t(r) = U_i(r)^* \begin{cases} T(r) \exp[i\theta(r)], & r \leq r_1, \\ \exp[i\theta(r)], & r_1 < r \leq r_2, \\ 1, & \text{其他,} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $U_i(r)$ 是入射到颗粒上的光场复振幅, $\theta(r)$ 是热变形引入的位相调制.

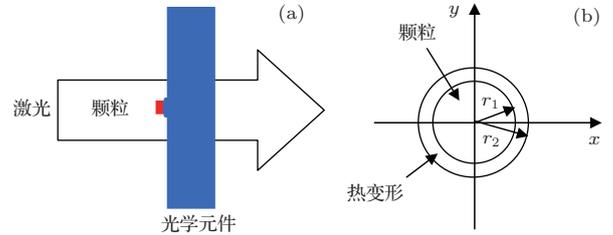


图 2 前表面颗粒扰动示意图

当颗粒污染物位于光束的中心, 由于光束截面的光强为超高斯分布, 当光束口径远大于颗粒物尺寸时, 单取入射到颗粒物上的光束来看为近似平顶分布, 产生的表面热变形也会近似平顶分布^[27]. 由于超高斯分布可以用来描述平顶分布^[28], 以下假设热变形表面形状满足超高斯分布, 并将这种局部的热变形简化为 2 维的超高斯分布^[29], 得到

$$\theta(r) = A \exp \left[-\ln 2 \cdot \left(\frac{r}{\alpha} \right)^{2n} \right], \quad (3)$$

其中, $A = \frac{2\pi}{\lambda} (N - 1)h$ 是热变形中心的位相延迟幅度, λ 是激光的波长, N 是热变形的折射率系数, h 是热变形的高度, n 是超高斯分布的阶数, α 是超高斯分布的半高半宽, 设 r_2 是 0.1% 零强度口径使得 α 满足 $\exp \left[-\ln 2 \cdot \left(\frac{r_2}{\alpha} \right)^{2n} \right] = 0.2\%$.

高功率激光驱动器中的激光束传输主要涉及到衍射、非线性自聚焦和光束的放大或衰减三种物理过程^[11], 当光束入射到熔石英光学元件中, 仅考虑衍射、非线性自聚焦两种效应, 光束的传输满足 NLS 方程:

$$2ik_0 \frac{\partial E}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 E + 2k_0^2 \frac{n_2}{n_0} |E|^2 E = 0, \quad (4)$$

其中, n_0 是介质的线性折射率, n_2 是非线性折射率系数, k_0 是传播常数. 当介质厚度较小时不会在介质中产生聚焦^[30], 所以在薄光学元件中颗粒物对光强的调制主要来自衍射效应.

在某个光束截面内, 采用最大相对光强 $I_{\max}(z) = \max(I(x, y, z)/I_{\text{in}})$ 来表述相对入射光强而言最大的光强增大倍数. 由于光强超过光学

元件的损伤阈值时将引起光学元件的损伤, 因此主要以最大相对光强值来判断是否会对光学元件产生损伤, 最大相对光强值越大表示产生损伤的概率越大.

3 数值模拟

基于NLS方程(4)式, 采用分步傅里叶方法模拟了在薄光学元件前表面的颗粒污染物对高功率激光光束在光学元件内部最大光强的变化和后表面光强分布的影响. 在数值模拟中, 以10 mm厚度的大口径熔石英玻璃为薄光学元件, 其线性折射率为1.4767, 非线性折射率系数为 1.1×10^{-13} esu; 光束平均通量密度为 1 J/cm^2 , 5阶超高斯圆截面分布, 口径为1 cm, 波长为351 nm, 脉宽为3 ns, 时间波形为矩形; 颗粒污染物为圆形, 厚度忽略, 位于光束中心; 在 1.44 cm^2 采样区间内的采样点为 2048×2048 .

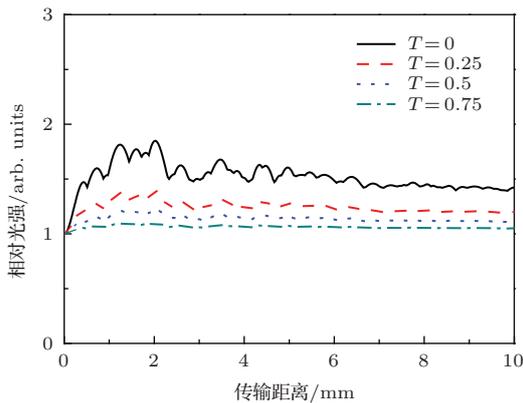


图3 只考虑前表面颗粒遮光效应时光学元件内最大相对光强的变化

为了显示热变形对光束的调制作用, 首先单纯分析颗粒遮光效应的影响. 对于不同光透过率的 $250 \mu\text{m}$ 颗粒扰动, 光学元件内的最大相对光强的变化如图3所示, 由图可以看出, 单纯的颗粒遮光经衍射作用后不会在光学元件内引起很高的光强调制, 不容易造成光学元件的损伤. 一般光学元件的体损伤阈值大于表面损伤阈值[31], 这使得在光学元件表面更容易产生损伤, 因此需要研究被扰动光束在光学元件后表面的情况. 图4是光学元件后表面的光场及沿 x 方向的一维强度分布, 对于光透过率 T 为0.75, 0.5, 0.25, 0的颗粒, 相应的最大相对光强值分别为1.05, 1.11, 1.20, 1.42. 由此可以看出, 只考虑污染物的遮光效应时, 仅得到光学元件

后表面的光束分布不均匀, 形成中心较暗的同心衍射环, 但这种光强调制不足以引起损伤. 接着在颗粒扰动的基础上同时考虑光学元件热变形的影响, 当这种热变形满足 $2r_2 = 350 \mu\text{m}$, $n = 6$, $A = 2\pi$ 时, 得到如图5所示的光学元件内的最大相对光强变化和如图6所示的光学元件后表面的光强分布.

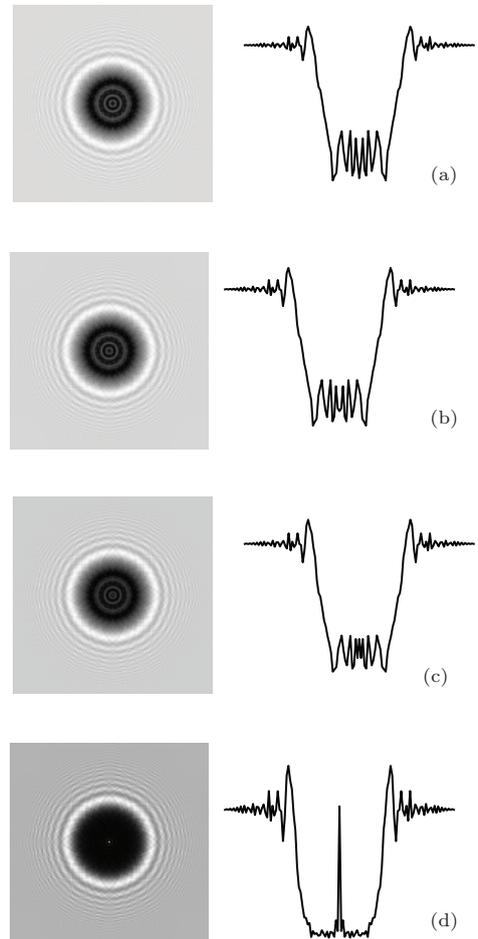


图4 前表面颗粒遮光效应对后表面光强分布的影响 (a) $T = 0.75$; (b) $T = 0.5$; (c) $T = 0.25$; (d) $T = 0$

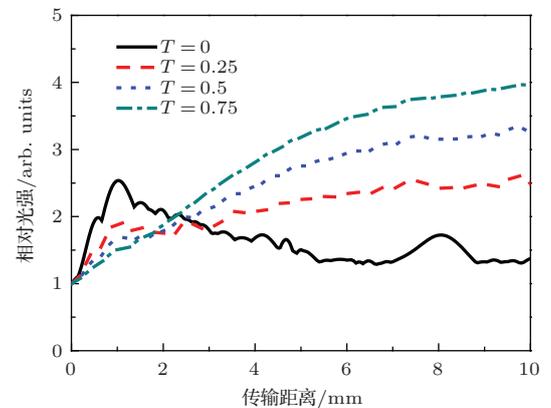


图5 考虑前表面颗粒遮光效应和光学元件局部热变形时光学元件内最大相对光强的变化

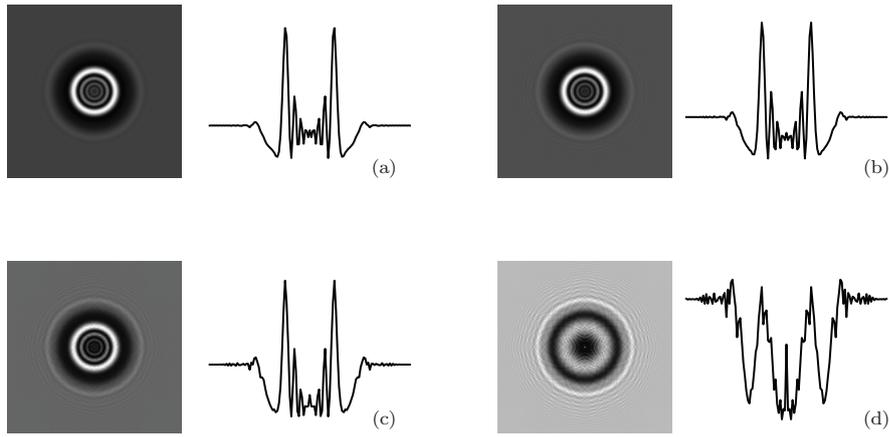


图6 前表面颗粒遮光效应和光学元件局部热变形对后表面光强分布的影响 (a) $T = 0.75$; (b) $T = 0.5$; (c) $T = 0.25$; (d) $T = 0$

在图6中, 对于光透过率 T 为0.75, 0.5, 0.25, 0的颗粒, 相应的最大相对光强值分别为3.94, 3.24, 2.49, 1.37. 由图5和图6可知, 对于严重遮光的颗粒而热变形面积又没有足够大时, 热变形对光的调制作用不明显, 而对于部分遮光的颗粒, 热变形对光束有较明显的调制. 对比图3和图5、图4和图6可以看出, 热变形是引起较高光强调制的重要因素. 没有考虑热变形的情况可以应用到单个脉冲作用时, 因为作用时间只有几个纳秒, 在如此短暂的时间内, 热传递没有充分进行, 就没有造成光学元件的局部热变形, 所以一般单次脉冲辐射造成的损伤不大. 在多次激光脉冲发射下, 热变形成为诱导初始损伤的一个重要因素. 由于热变形的参数会随

激光发射次数而变化, 接下来将依次研究热变形的表面形状、位相延迟幅度、热扩散长度的影响.

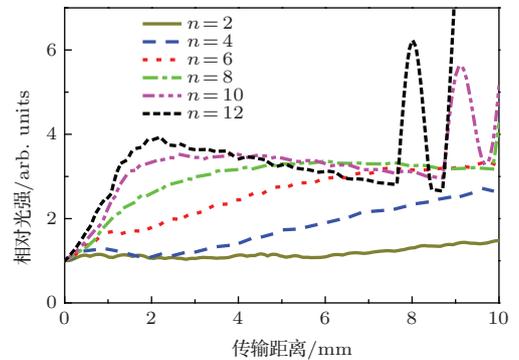


图7 不同热变形表面形状情况下, 在光学元件内最大相对光强随传输距离的变化

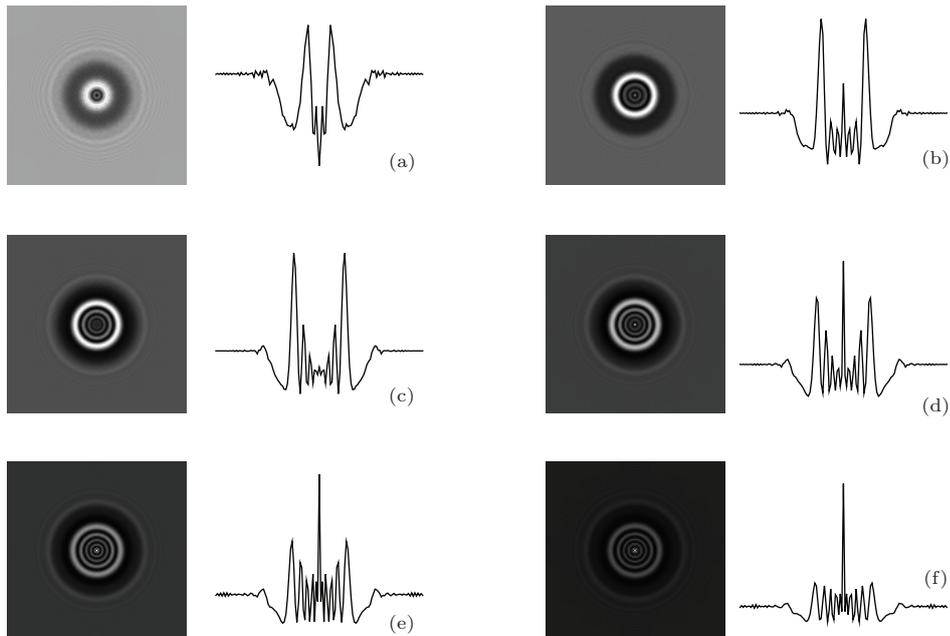


图8 不同热变形表面形状对后表面光强分布的影响 (a) $n = 2$; (b) $n = 4$; (c) $n = 6$; (d) $n = 8$; (e) $n = 10$; (f) $n = 12$

热变形表面形状受各种因素影响而存在小幅度变化, 这里采用变化超高斯分布的阶数 n 来大致模拟表面形状对光强调制的影响. 设置模拟参数 $2r_1 = 250 \mu\text{m}$, $T = 0.5$, $2r_2 = 350 \mu\text{m}$, $A = 2\pi$, 得到被扰动光束在光学元件内部的最大相对光强变化和后表面的光强分布分别如图 7 和图 8 所示. 在图 8 中, 当 $n = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ 时, 对应的最大相对光强值分别为 1.48, 2.62, 3.24, 4.25, 5.13, 8.72. 由图 7 和图 8 可以看出热变形表面形状对光学元件内光强的调制有很大的影响, 随着 n 值的增加, 在光学元件内的最大相对光强值不随传输距离单调递增, 而是出现光强抖动变化, 被扰动的激光束会在传输方向中心出现一个强度亮斑. 增强的光强调制达到一定程度后可能在光学元件内就造成损伤, 而光学元件内部的损伤将进一步调制光束. 当激光发射次数增加引起 n 不断变化时, 光学元件后表面 xy 方向上的最大光强调制出现的位置不同, 损伤点可能会出现在光学元件后表面 xy 方向上的不同位置处, 如从图 9 中可看到在多次激光发射下前表面颗粒污染物对后表面造成多个分散的损伤点.

不同性质的颗粒物质对光的吸收强烈不同, 因此在相同作用时间内产生的热变形高度也不同, 会对光束产生不同的位相延迟. 设置模拟参数 $2r_1 = 250 \mu\text{m}$, $T = 0.5$, $2r_2 = 350 \mu\text{m}$, $n = 6$, 改变热变形中心的位相延迟, 得到被扰动光束在光学

元件内部的最大相对光强变化和后表面的光强分布分别如图 10 和图 11 所示. 在图 11 中, 当 $A = \pi$,

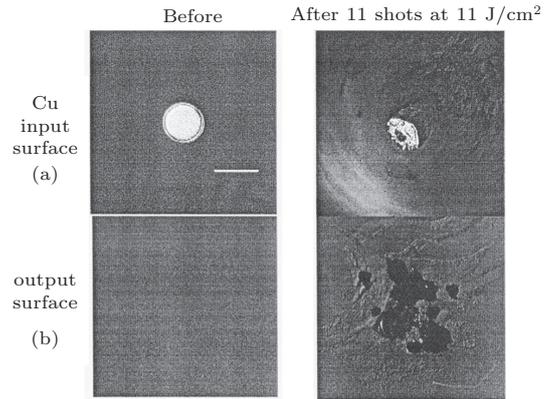


图 9 前表面 Cu 颗粒造成光学元件后表面损伤 [5]

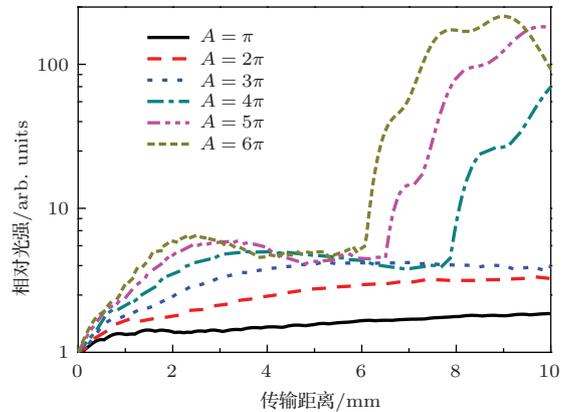


图 10 不同热变形中心位相延迟情况下, 在光学元件内最大相对光强随传输距离的变化

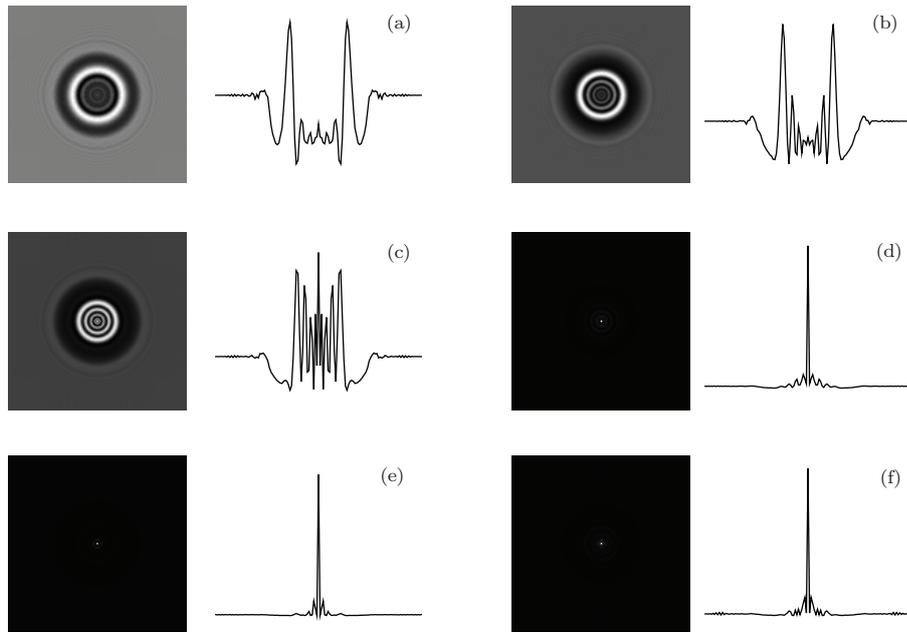


图 11 热变形中心位相延迟幅度对后表面光强分布的影响 (a) $A = \pi$; (b) $A = 2\pi$; (c) $A = 3\pi$; (d) $A = 4\pi$; (e) $A = 5\pi$; (f) $A = 6\pi$

$2\pi, 3\pi, 4\pi, 5\pi, 6\pi$ 时, 对应的最大相对光强值分别为 1.86, 3.24, 3.99, 69.63, 178.54, 93.08. 可以看出热变形的位相延迟是导致高光强调制的关键因素, 当位相延迟达到 4π 后, 光强调制迅速增大, 在传输方向形成一个亮斑, 较高的光强极容易在光学元件内部产生损伤. 随着脉冲发射次数的增加, 热变形的高度也随着增加, 产生的位相延迟会越来越严重, 此时颗粒挡光效应的影响渐渐减弱, 对光强调制的作用主要来自于热变形. 在实际中, 由激光照射金属材料而飞溅出来的金属颗粒很可能会附着在光学元件的表面, 而金属颗粒对光具有强烈的吸收 [23], 引发的热变形较严重, 很容易造成光学元件损伤, 甚至金属颗粒温度剧烈升高还会造成前表面的烧蚀炸裂.

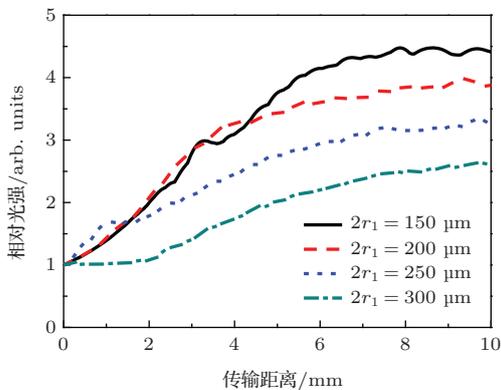


图 12 不同颗粒半径情况下, 在光学元件内最大相对光强随传输距离的变化

热变形的热扩散长度随着热传导的不断进行而增加, 为了充分说明热扩散长度的影响, 分别固定热变形半径和颗粒半径来进行模拟. 固定热变形半径时, 设置模拟参数 $T = 0.5, 2r_2 = 350 \mu\text{m}, n = 6, A = 2\pi$, 改变颗粒半径, 得到在光学元件内的最大相对光强变化和光学元件后表面的光强分布分别如图 12 和图 13 所示. 可以看出颗粒尺寸对光强的变化幅度有一定的影响, 当只改变颗粒半径时, 颗粒尺寸越大, 产生的光强调制越弱. 接下来固定颗粒半径为 $2r_1 = 150 \mu\text{m}$, 其他参数不变, 只改变热变形半径, 同样得到在光学元件内的最大相对光强变化和光学元件后表面的光强分布分别如图 14 和图 15 所示. 可以看出热变形半径对光强调制的影响很大, 在其他参数相同时, 热变形半径越小, 引起的光调制越大, 可以在光学元件后表面产生中心为亮斑的衍射环, 并且最高的光强调制可能出现光学元件内部而不是光学元件后表面, 这

可能使得光学元件内部最先出现损伤. 由图 13 和图 15 可以看出, 只考虑颗粒尺寸和热变形半径两个因素时, 颗粒尺寸和热变形半径越小, 产生的光强调制越大, 其中热变形半径的大小对光强调制的影响比颗粒尺寸产生的影响大.

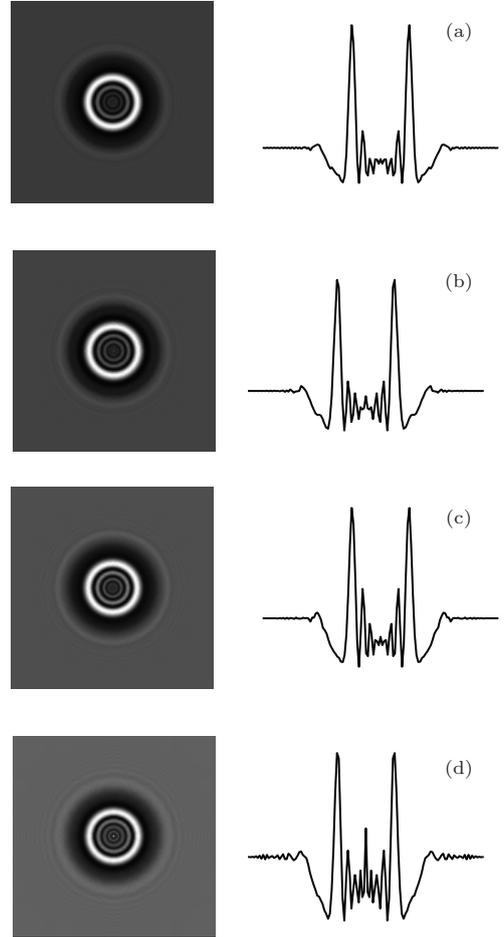


图 13 颗粒半径对后表面光强分布的影响 (a) $2r_1 = 150 \mu\text{m}$; (b) $2r_1 = 200 \mu\text{m}$; (c) $2r_1 = 250 \mu\text{m}$; (d) $2r_1 = 300 \mu\text{m}$

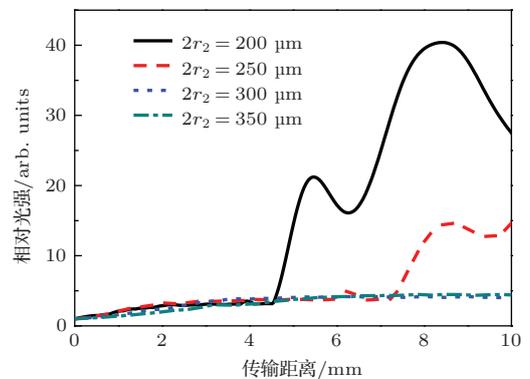


图 14 不同热变形半径情况下, 在光学元件内最大相对光强随传输距离的变化

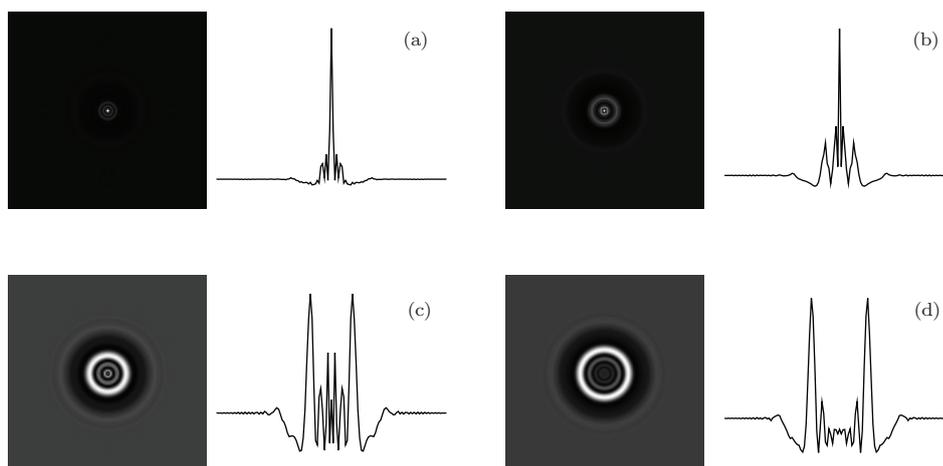


图 15 热变形半径对后表面光强分布的影响 (a) $2r_2 = 200 \mu\text{m}$; (b) $2r_2 = 250 \mu\text{m}$; (c) $2r_2 = 300 \mu\text{m}$; (d) $2r_2 = 350 \mu\text{m}$

4 结 论

在高功率激光驱动器中, 颗粒污染物的存在是不可避免的, 研究和分析颗粒状扰动诱导薄光学元件产生初始损伤的机理可以认知规律, 为提升激光驱动器负载能力寻求策略. 本文数值模拟了前表面颗粒污染物对薄光学元件内部最大相对光强变化及后表面光强分布的影响. 结果表明颗粒污染物自身的遮光效应不足以产生能造成光学元件损伤的光强调制, 而在多次激光脉冲发射下, 颗粒污染物会使其附着处的光学元件区域发生热变形, 这种热变形和颗粒挡光效应共同作用是造成光学元件内部或后表面局部高光强的主要原因; 局部热变形的表面形状、位相延迟幅度、热扩散长度会随脉冲发射次数的增加而变化, 这使得在光学元件内厚度方向上或后表面 xy 方向上产生最高光强调制点的位置不同, 而这些较高的光强调制位置会产生对应的损伤点; 颗粒污染物对光吸收越强烈, 造成的光学元件热变形越严重, 由此对光束的调制越大, 越容易引起光学元件的损伤, 所以应尽可能避免这类颗粒附着在光学元件表面.

参考文献

- [1] Bien-Aime K, Neauport J, Tovenca-Pecault I, Fargin E, Labrugere C, Belin C, Couzi M 2009 *Appl. Opt.* **48** 2228
- [2] Zhou X D, Huang J, Wang F R, Liu H J, Jiang X D 2011 *SPIE* **8206** 820619
- [3] Genin F Y, Sheehan L M, Yoshizama J M, Dijon J, Garrec P 1997 *SPIE* **3244** 155

- [4] Feit M D, Rubenchik A M, Faux D R, Riddle R A, Shapiro A, Eder D C, Penetrante B M, Milam D, Genin F Y, Kozlowski M R 1996 *SPIE* **2966** 417
- [5] Genin F Y, Kozlowski M R, Brusasco R 1997 *SPIE* **3407** 987
- [6] Genin F Y, Feit M D, Kozlowski M R, Rubenchik A M, Salleo A, Yoshizama J 2000 *Appl. Opt.* **39** 3654
- [7] Honig J, Norton M A, Hollingsworth W G, Donohue E E, Johnson M A 2004 *SPIE* **5647** 129
- [8] Mainguy S, Tovenca-Pecault I, Garrec B L 2005 *SPIE* **5991** 59910G
- [9] Su Q Q, Zhang G W, Tao H, Pu J X 2011 *Chinese J. Lasers* **38** s102004 (in Chinese) [苏倩倩, 张国文, 陶华, 蒲继雄 2011 中国激光 **38** s102004]
- [10] Su Q Q, Zhang G W, Tao H, Pu J X 2011 *Chinese J. Lasers* **38** 1002005 (in Chinese) [苏倩倩, 张国文, 陶华, 蒲继雄 2011 中国激光 **38** 1002005]
- [11] Zhang G W, Lu X Q, Cao H B, Yin X H, Lv F N, Zhang Z, Li J H, Wang R G, Ma W X, Zhu J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024201 (in Chinese) [张国文, 卢兴强, 曹华保, 尹宪华, 吕凤年, 张臻, 李菁辉, 王仁贵, 马伟新, 朱俭 2012 物理学报 **61** 024201]
- [12] Xie L P, Jing F, Zhao J L, Su J Q, Wang W Y, Peng H S 2004 *Opt. Commun.* **236** 343
- [13] Xie L P, Zhao J L, Su J Q, Wang W Y, Peng H S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2175 (in Chinese) [谢良平, 赵建林, 栗敬钦, 景峰, 王文义, 彭翰生 2004 物理学报 **53** 2175]
- [14] Xie L P, Su J Q, Jing F, Zhao J L, Wang W Y, Wang X, Peng Z T 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 571 (in Chinese) [谢良平, 栗敬钦, 景峰, 赵建林, 王文义, 王道, 彭志涛 2004 强激光与离子束 **16** 571]
- [15] Peng T, Zhao J L, Xie L P, Ye Z J, Li Q, Su J Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3255 (in Chinese) [彭涛, 赵建林, 谢良平, 叶知隽, 李强, 栗敬钦 2007 物理学报 **56** 3255]
- [16] Peng T, Zhao J L, Li D, Ye Z J, Xie L P 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1884
- [17] Wang Y W, Hu Y H, Wen S C, You K M, Fu X Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5855 (in Chinese) [王友文, 胡勇华, 文双春, 游开明, 傅喜泉 2007 物理学报 **56** 5855]

- [18] Wang Y W, Wen S C, Zhang L F, Hu Y H, Fan D Y 2008 *Appl. Opt.* **47** 1152
- [19] Wang Y W, Deng J Q, Chen L Z, Wen S C, You K M 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 024205
- [20] Hu Y H, Wang Y W, Wen S C, Fan D Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 114207
- [21] Cai Z B, Zhao J L, Peng T, Li D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114209 (in Chinese)[蔡朝斌, 赵建林, 彭涛, 李东 2011 物理学报 **60** 114209]
- [22] Miao X X, Cheng X F, Yuan X D, Lv H B, Ye Y Y, He S B, Zheng W G 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 1740 (in Chinese) [苗心向, 程晓锋, 袁晓东, 吕海兵, 叶亚云, 贺少勃, 郑万国 2010 强激光与粒子束 **22** 1740]
- [23] Wang L B, Ma W X, Ji L L, Zhao D F 2012 *Chin. J. Laser* **39** 0502004 (in Chinese) [王立斌, 马伟新, 季来林, 赵东峰 2012 中国激光 **39** 0502004]
- [24] Zhou L D, Su J Q, Li P, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Cheng W Y, Zhang X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6279 (in Chinese)[周丽丹, 粟敬钦, 李平, 刘兰琴, 王文义, 王方, 莫磊, 程文雍, 张小民 2009 物理学报 **58** 6279]
- [25] Zhou L D, Su J Q, Li P, Wang W Y, Liu L Q, Zhang Y, Zhang X M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024202 (in Chinese)[周丽丹, 粟敬钦, 李平, 王文义, 刘兰琴, 张颖, 张小民 2011 物理学报 **60** 024202]
- [26] Fan S H, He H B, Fan Z X, Shao J D, Zhao Y A 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5774 (in Chinese)[范树海, 贺洪波, 范正修, 邵建达, 赵元安 2005 物理学报 **54** 5774]
- [27] Li B C, Martin S, Welsch E 2000 *Appl Opt* **39** 4690
- [28] Parent A, Morin M, Lavigne P 1992 *Optical and Quantum Electronics* **24** S1071
- [29] Liu H J, Jing F, Zuo Y L, Wei X F, Hu D X, Peng Z T, Li Q, Zhou W, Zhang K, Jiang L, Li Z J, Zuo M 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1850 (in Chinese) [刘红婕, 景峰, 左言磊, 魏晓峰, 胡东霞, 彭志涛, 李强, 周维, 张昆, 姜蕾, 李志军, 左明 2006 强激光与粒子束 **18** 1850]
- [30] Chen X Q, Chen Z Y, Pu J X, Zhu J Q, Zhang G W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044213 (in Chinese) [陈雪琼, 陈子阳, 蒲继雄, 朱健强, 张国文 2013 物理学报 **62** 044213]
- [31] Chen F, Meng S X 1998 *Progress in Physics* **18** 187 (in Chinese) [陈飞, 孟绍贤 1998 物理学进展 **18** 187]

Mechanism of original damage of thin optical components induced by surface particle contamination*

Sun Xiao-Yan¹⁾²⁾ Lei Ze-Min¹⁾²⁾ Lu Xing-Qiang^{1)†} Fan Dian-Yuan¹⁾

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

2) (*School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 8 November 2013; revised manuscript received 25 February 2014)

Abstract

Based on the optical transmission theory, the reason why front-surface particle contamination may induce the original damage of thin optical components is considered, and a damage mechanism is put forward: The localized thermal deformation of an optical element induced by the thermal effect of particle contamination together with the shading effect of it can disturb the laser beams. Simulated results show that for a high power laser, the localized thermal deformation of thin optical components, which disturbs the laser beam, is an important cause to produce strong light intensity modulations. The surface shape, phase delay, and thermal diffusion length of a localized thermal deformation are constantly changing with the increase of laser pulse shot number, so the highest light intensity modulation will be produced at different positions in the thickness direction or the xy direction on the rear-surface of an optical element. This not only can easily induce some damages on the rear-surface of the optical element, but also cause the interior damages scattered in the thickness direction.

Keywords: laser damage, optical transmission, particle contamination, thermal deformation

PACS: 42.25.Fx, 42.60.Jf, 42.30.Lr, 65.40.De

DOI: [10.7498/aps.63.134201](https://doi.org/10.7498/aps.63.134201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.60707019).

† Corresponding author. E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn