

高功率激光系统中随机分布缺陷产生的“热像”*

蔡朝斌 赵建林[†] 彭涛 李东

(西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 空间应用物理
与化学教育部重点实验室, 西安 710072)

(2010年9月8日收到; 2011年1月19日收到修改稿)

基于“热像”的衍射理论模型, 并利用空间频谱的传输矩阵, 理论分析了位置和尺寸均随机分布的缺陷在高功率激光系统中产生“热像”的机理, 作为理论分析结果的对比较验证, 数值模拟了高功率激光束受到这种随机分布缺陷调制后所形成“热像”的演化规律, 进而从统计平均的角度讨论了“热像”强度的变化趋势与缺陷分布数目和尺寸范围之间的关系. 结果表明, 当缺陷的尺寸接近某个特定值时, 受其调制的光束会形成强度最大的“热像”点, 且“热像”所在平面强度极大值点的横向位置与光学元件表面的缺陷横向分布相对应; 在一定范围内, “热像”的强度极大值随着缺陷数目和尺寸范围的增加而增加, 但当最具风险尺寸的缺陷在元件表面出现的概率达到一定程度后将趋于稳定. 这可为确定元件表面的洁净度要求提供一定的参考.

关键词: 热像, 随机分布缺陷, 高功率激光, 非线性介质

PACS: 42.55.-f, 42.40.My

1. 引言

高功率激光系统中的“热像”(hot-image)效应可能造成系统中的非线性介质以及非线性介质后特定位置处光学元件的损坏^[1]. 由于“热像”效应的损伤阈值往往比典型的小尺度自聚焦效应的损伤阈值低, 这使其成为阻碍高功率激光驱动器负载提高并导致输出光束质量降低的瓶颈因素之一. 迄今为止, 对“热像”效应的研究已经取得了可喜的进展. 1993年 Hunt等^[2]首次给出了“热像”形成的理论分析, 其中关于振幅调制型“热像”的理论分析后来被 Williams等^[3]的数值计算及实验结果所证实. Widmayer等^[4]实验研究了透明物体引起的“热像”效应. 谢良平等^[5-8]进一步改进了 Hunt的物理模型, 建立了“热像”形成的衍射理论模型以及相应的分析方法, 给出了薄片介质存在增益损耗情况下形成“热像”的位置和强度的解析表达式, 并从理论上首次预言了二级“热像”的存在. Wang等^[9-11]从光传输的角谱理论出发研究了“热像”强度与衍射物尺寸大小之间的关系, 并分析了宽频光束及级联介质中的“热像”效应. 彭涛等^[12-14]针对薄片近似的

局限性, 理论分析和数值模拟了厚介质存在增益损耗情况下“热像”的演化规律以及空间滤波器对“热像”效应的抑制作用.

以上工作均是针对光束受到单个缺陷调制形成“热像”的情况, 然而, 单个缺陷模型过于理想化, 在实际光学元件表面可能存在的缺陷种类较多且呈随机分布. 目前, 针对两点或多点规则分布的缺陷模型已经进行了初步的研究, 如 Peng等^[15]和 Li等^[16]分别分析了有限个缺陷及阵列缺陷形成“热像”的演化规律. 但是, 这种规则分布的缺陷模型仍较理想化, 与实际情况仍有一定差距, 需要进一步建立光学元件表面缺陷分布更普遍的模型, 并以此为基础来研究实际高功率激光系统中的“热像”效应, 从而使分析结果与实际更加接近. 对此, 张春玲等^[17]从统计角度初步建立了缺陷的空间分布模型, 同时研究了其对线性传输光场的影响; 周丽丹等^[18]建立了缺陷的随机分布模型, 并讨论了缺陷分布的统计参量对光束近场质量的影响. 本文通过引入位置和尺寸均随机分布的点缺陷模型, 理论分析在具有增益损耗的厚介质情况下, 光束受上述随机缺陷调制后产生“热像”的演化规律, 并从统计平均角度模拟分析随机缺陷的分布情况对“热像”强度及位

* 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(批准号: 10576023)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jlzha@nwpu.edu.cn

置的影响,使所得结果更加接近实际情况.

2. 随机分布缺陷调制形成“热像”的理论模型

如图 1 所示,高功率激光束受到随机分布缺陷调制后形成“热像”的过程可这样理解:激光束通过存在随机分布缺陷的光学元件时,由于缺陷对光束的调制作用,经过缺陷调制后的光场可以视为本底光与调制光的叠加,叠加光场经过一段距离的自由传播后,进入非线性介质并引起非线性介质的折射率分布发生改变,进而导致光场能量的横向分布发生变化,使光束在距离非线性介质后表面特定位置处形成与随机分布缺陷对应的光强极大值分布,这便是“热像”,所在平面即为“热像”平面.

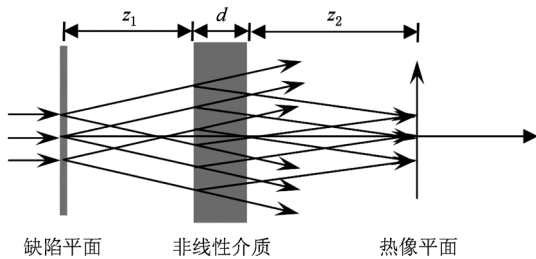


图 1 光束受随机分布缺陷调制后形成“热像”的过程

首先,在文献[18]给出的缺陷模型的基础上,对光学元件表面缺陷的属性作如下假设:1) 每个缺陷均为圆形且位置随机分布,缺陷概率密度函数 P 与缺陷尺寸 a 之间的关系为: $P(a) = Aa^{-m}$, 式中 A 和 m 为与光学元件相关的参数,取 $m = 2$;若 $a \in [a_1, a_2]$, $N = \int_{a_1}^{a_2} P(a) da$, 则 $A = \frac{(1-m)N}{a_2^{1-m} - a_1^{1-m}}$, 其中 a_1 和 a_2 为缺陷尺寸分布范围的边界, N 为缺陷数目. 2) 缺陷的振幅透过率均为高斯型,缺陷之间无重叠,缺陷分布函数为

$$\tau_1(x, y) = \sum_{n=1}^N \exp \left\{ -\ln(2) \left[\left(\frac{x - x_{n0}}{r_n/2} \right)^2 + \left(\frac{y - y_{n0}}{r_n/2} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 (x_{n0}, y_{n0}) 为第 n 个缺陷的中心点坐标, r_n 表示

该缺陷的半径.

假设入射光束的复振幅为 $E = E_0 \exp(ikz)$, 元件表面缺陷的复振幅透射系数为 $\tau_0(x, y) = 1 - \tau_1(x, y)$, 则经缺陷调制的光场复振幅为

$$E(x, y, 0) = E_0 \exp(ikz) \tau_0(x, y) = E_1(x, y, 0) + E_2(x, y, 0). \quad (2)$$

式中, $E_1(x, y, 0) = E_0 \exp(ikz)$ 和 $E_2(x, y, 0) = -E_0 \tau_1 \exp(ikz)$ 分别表示本底光场和调制光场. 引入光波空间频谱的传播矩阵, 可得到调制光波在观察平面的空间频谱为^[6]

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} u(q_x, q_y, d + z_1 + z_2) \\ v(q_x, q_y, d + z_1 + z_2) \end{bmatrix} \\ &= \exp \left[\frac{(\beta - \alpha)}{2} d \right] \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} \cosh(gd) & \frac{q^2}{2k_0 g} \sinh(gd) \\ \frac{2k_0 g}{q^2} \sinh(gd) & \cosh(gd) \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0(q_x, q_y, 0) \\ v_0(q_x, q_y, 0) \end{bmatrix}. \quad (3) \end{aligned}$$

式中, $u(q_x, q_y, d + z_1 + z_2)$ 和 $v(q_x, q_y, d + z_1 + z_2)$ 分别表示观察平面上调制光场空间频率矢量的实部和虚部, $u_0(q_x, q_y, 0)$ 和 $v_0(q_x, q_y, 0)$ 分别表示受缺陷调制后调制光场空间频率矢量的实部和虚部,

$\theta_1 = \frac{q_{\perp}^2 z_1}{2k_0}, \theta_2 = \frac{q_{\perp}^2 z_2}{2k_0}, g^2 = \frac{q_{\perp}^2}{4k_0^2} (q_c^2 - q_{\perp}^2), q_c^2 = 2k_0^2 n_2 | \bar{E} |^2 / (2n_0), q_{\perp}^2 = q_x^2 + q_y^2$, 其中 q_x, q_y 分别代表 x 和 y 方向的空间频率分量; $\begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}$ 和

$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}$ 分别为非线性介质后表面到观察平面和缺陷平面到非线性介质前表面的传输矩阵,

$\begin{bmatrix} \cosh(gd) & \frac{q^2}{2k_0 g} \sinh(gd) \\ \frac{2k_0 g}{q^2} \sinh(gd) & \cosh(gd) \end{bmatrix}$ 为光波在非线性介质中的传输矩阵. 由此可得到调制光场在观察平面上的复振幅表达式为

$$\begin{aligned} E_2(x, y, d + z_1 + z_2) &= F^{-1} \{ u(q_x, q_y, d + z_1 + z_2) + iv(q_x, q_y, d + z_1 + z_2) \} \\ &= \exp \left[\frac{(\beta - \alpha)}{2} d \right] F^{-1} \left\{ \left[\left(\cosh(gd) + i \left(\frac{k_0 g}{q^2} - \frac{q_{\perp}^2}{4k_0 g} \right) \sinh(gd) \right) \right] (u_0 + iv_0) e^{-i(\theta_1 + \theta_2)} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + i \left[\left(\frac{k_0 g}{q_{\perp}^2} + \frac{q_{\perp}^2}{4k_0 g} \right) \sinh(gd) \right] (u_0 - iv_0) e^{-i(\theta_1 - \theta_2)} \} \\
 = & - \exp \left[\frac{(\beta - \alpha)d}{2} \right] F^{-1} \left\{ \left[\cosh(gd) + i \left(\frac{k_0 g}{q_{\perp}^2} - \frac{q_{\perp}^2}{4k_0 g} \right) \sinh(gd) \right] e^{-i(\theta_1 + \theta_2)} \right\} \otimes (\tau_1(x, y) E_0) \\
 & - \exp \left[\frac{(\beta - \alpha)d}{2} \right] F^{-1} \left\{ i \left[\left(\frac{k_0 g}{q_{\perp}^2} + \frac{q_{\perp}^2}{4k_0 g} \right) \sinh(gd) \right] e^{-i(\theta_2 - \theta_1)} \right\} \otimes (\tau_1^*(x, y) E_0). \tag{4}
 \end{aligned}$$

考虑“热像”平面上的光强分布, 即当 $z_1 = z_2$ 时^[6, 8], (4)式中第一部分为发散光波, 第二部分为缺陷的共轭

光波, 第一部分的光强值相对于第二部分非常小, 可以忽略不计. 于是得到“热像”平面上的光强分布为

$$\begin{aligned}
 I = & \exp[(\beta - \alpha)d] \left| 1 - F^{-1} \left\{ i \left[\left(\frac{k_0 g}{q_{\perp}^2} + \frac{q_{\perp}^2}{4k_0 g} \right) \sinh(gd) \right] \right\} \otimes \tau_1^*(x, y) \right|^2 I_0 \\
 = & \exp[(\beta - \alpha)d] \left| 1 - \frac{q_{\perp}^2}{8k_0} F^{-1} \left\{ i \frac{e^{gd} - e^{-gd}}{g} \right\} \otimes \tau_1^*(x, y) \right|^2 I_0. \tag{5}
 \end{aligned}$$

式中, $\tau_1^*(x, y)$ 表示 $\tau_1(x, y)$ 的共轭函数, \otimes 为卷积运算符号, $F^{-1}\{\cdot\}$ 表示傅里叶逆变换运算. 可以看出, 对于“热像”位置处光强变化及分布的影响, 一部分与 g 有关, 即与各种不同空间频率 q_{\perp} 有关. 调制光的频谱存在多种空间角频率, 且每种调制频率对应一个增长因子, “热像”面光场强度是多个空间角频率的调制光与背景光叠加的结果. 另一部分与表达式 $\tau_1^*(x, y)$ 有关, 即与“缺陷”的分布参数有关. 根据小尺度自聚焦的 B-T 理论^[19], “热像”点的峰值强度是含有最快增长频率的那部分调制光与本底光叠加而形成的. 为能够求出“热像”峰值强度的解析表达式, 同时又不使得理论分析过于复杂, 本文不考虑各调制光之间的能量竞争和耦合过程, 并且假设调制光以最快增长频率和对应的增长因子传播, 分别取 q_m 和 g_m 为最快增长频率和最快增长因子, 则上式可简化为

$$\begin{aligned}
 I = & \exp[(\beta - \alpha)d] \left| 1 - \frac{q_c^2}{8k_0} \left\{ i \frac{e^{g_m d} - e^{-g_m d}}{g_m} \right\} \tau_1^*(x, y) \right|^2 I_0 \\
 = & \exp[(\beta - \alpha)d] \left| 1 - \frac{q_c^2}{8k_0} \left\{ i \frac{e^{g_m d} - e^{-g_m d}}{g_m} \right\} \right. \\
 & \times \left. \sum_{n=1}^N \exp \left\{ -\ln(2) \left[\left(\frac{x - x_{n0}}{r_n/2} \right)^2 + \left(\frac{y - y_{n0}}{r_n/2} \right)^2 \right] \right\} \right|^2 I_0. \tag{6}
 \end{aligned}$$

(6)式即为光束受到随机缺陷调制后所产生“热像”的横向强度分布. 可以看出, $\tau_1^*(x, y)$ 决定了“热像”平面上光强的横向位置分布, 每一个缺陷在其“热像”平面上均会产生一个与之对应的强度极大值点, 即“热像”点, 且横向位置完全对应.

需要说明的是, 上述分析仅考虑了纯振幅型缺陷的调制. 实际光学元件表面也可能存在一定相位型或振幅相位复合型缺陷. 对于此类缺陷, 可以根据混合型调制系数(包括振幅和相位调制系数)进行相应的推导, 推导过程与上面类似, 最终结论与纯振幅型缺陷调制的结论一致.

3. 随机分布缺陷调制形成“热像”的演化规律

参考实际元件表面测量结果^[20]以及中高频^[21]“缺陷”分布特征, 对光学元件表面的实际缺陷分布进行模拟分析. 模拟参数选取如下: 计算平面为 2 cm × 2 cm, 采样点数为 1024 × 1024, 缺陷的直径范围在 50—400 μm 之间, 缺陷数目为 100, 由计算机分两次生成的随机分布缺陷分布如图 2(a), (b) 所示. 其余参数选取如下: 初始入射光束为束腰半径等于 0.7 cm 的 6 阶超高斯光束, 其峰值强度为 5 GW/cm²; 缺陷所在平面与非线性介质前表面之间的距离 $z_1 = 80$ cm; 非线性介质厚度 $d = 10$ cm, 线性折射率 $n_0 = 1.6$, 非线性系数 $\gamma = 3.153 \times 10^{-16}$ cm²/W, 增益和损耗系数 β 和 α 分别为 0.07 cm⁻¹ 和 0.04 cm⁻¹; 所采用分步傅里叶算法的步长为 1 cm. 如无特别说明, 以下结果中所选参数均与上述情况相同. 图 3 为光束受到某一随机分布缺陷调制并经过非线性介质后, 其峰值强度随传输距离的变化情况, 图 4(a), (b) 分别为光束受到图 2(a), (b) 所示缺陷调制后对应“热像”面处的光强横向分布.

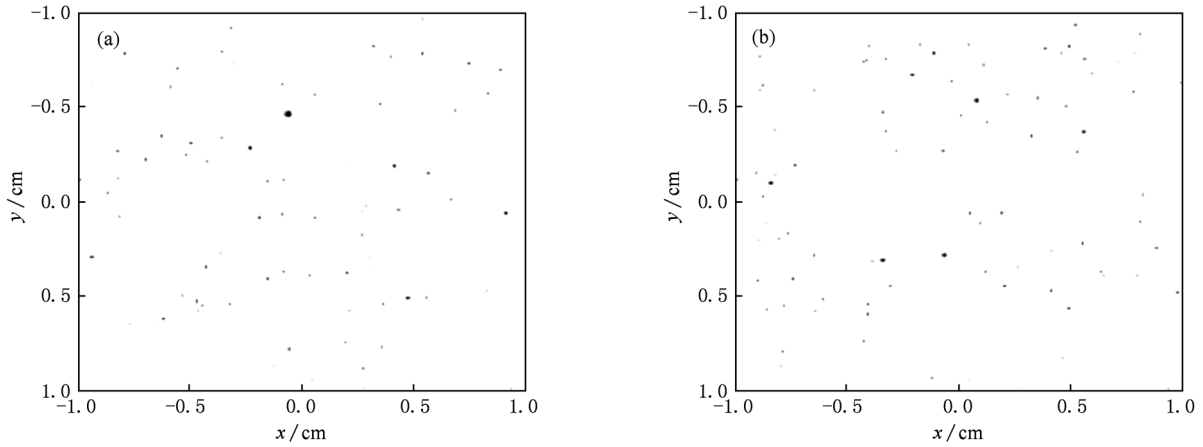


图2 模拟随机分布缺陷

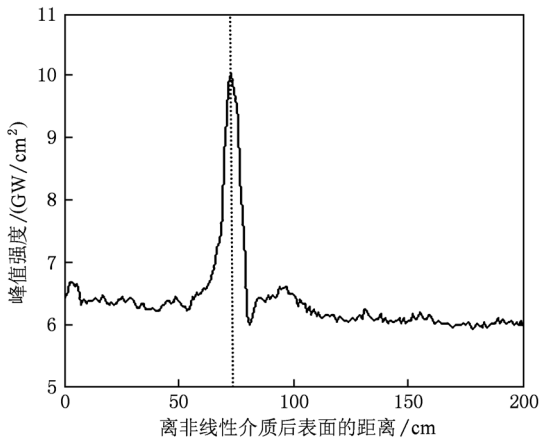


图3 自非线性介质出射后光强峰值随传输距离的变化

从图3可以看出,在虚线位置处($z_2 = 74$ cm)得到光强峰值的最大值,该位置即为“热像”所在平面.通过对多次模拟结果进行分析发现,当缺陷平面与介质前表面距离固定时,“热像”面的位置与介质后表面距离基本保持不变,这与文献[6,7]中的结论一致.另外,将多组模拟参数代入(6)式中,计算得出的“热像”峰值强度比模拟计算的值大.原因主要在于分析“热像”强度的解析表达式时做了简化考虑,即假设调制光均以最快增长频率和对应的增长因子传播,因此(6)式是一种相对理想的结果,即针对缺陷的尺寸刚好具有最大损伤风险尺寸时所得到的结果(忽略缺陷间的影响).模拟计算考虑调制光波之间的能量竞争和耦合等非线性过程,而这二者将会导致“热像”峰值强度的降低.由图4(a),(b)可以看出,在“热像”平面上,只有少数缺陷点才能形成明显的“热像”点,这是由于在非线性介质中,

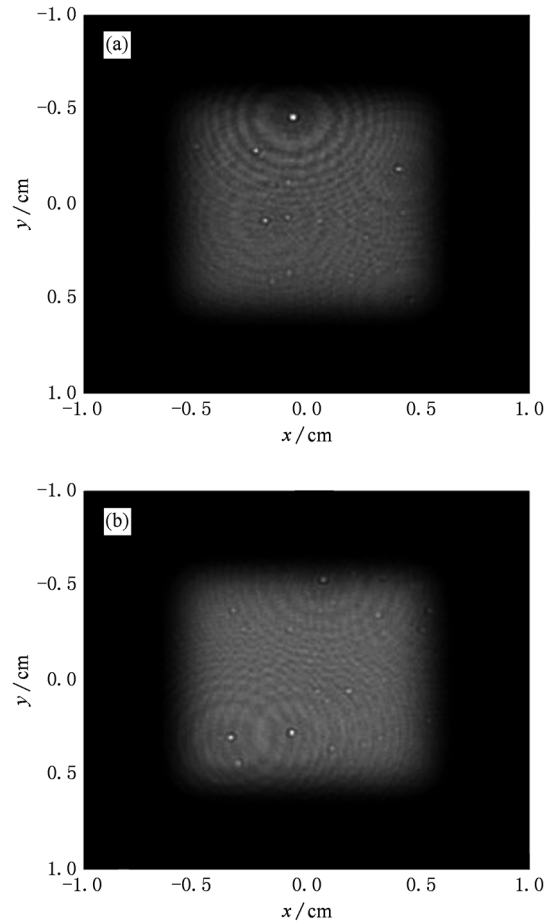


图4 超高斯光束受随机缺陷调制形成“热像”强度的横向分布

与各缺陷点对应的各种空间频率的调制光的生长因子不同,而且在传输过程中还存在能量竞争,只有那些增长因子较大且在能量竞争中处于优势的调制光波才会占据优势并形成明显的“热像”点.由

于缺陷的横向位置随机分布,光束受其调制后所形成“热像”的强度横向分布也是随机的. 但通过对比图 2 与图 4 可知,“热像”强度极大值点的分布与缺陷点的横向分布相对应,这与第 2 部分的理论分析吻合.

由 B-T 理论和文献[9]可知,对于单个缺陷所引起的“热像”,在光强和介质参数一定的条件下,随着缺陷点尺寸的增加,对应“热像”的强度先增加,达到某个最大值后开始减小,与该强度最大的“热像”点所对应的缺陷点尺寸 a_{\max} 称为最具损伤风险的缺陷尺度. 图 4 中看到的少数几个“热像”强度极大值点就是光束受到尺寸为 a_{\max} 或者接近 a_{\max} 的少数缺陷点调制后形成的. 利用 a_{\max} 满足的关系式: $a_{\max} \propto \pi/q_m$, $q_m = (k_0^2 n_2 |E|^2 / n_0)^{1/2}$, 代入所选参数可估算出所对应的 a_{\max} . “热像”极大值点的形成会威胁到非线性介质本身及下游光路中的光学元件,由于强度最大的“热像”点对光学元件带来的损伤威胁最严重,所以这里重点分析缺陷数目、尺寸范围及非线性介质参数对“热像”强度极大值点的影响.

3.1. 缺陷尺寸范围一定,缺陷数目不同的情况

实际高功率激光系统中,光学元件表面可能存在缺陷尺寸分布范围一定,而缺陷数目不同的情况. 数值模拟分析了光束受到此类缺陷调制后所形成“热像”的演化规律. 所选参数如下:计算平面上的缺陷数目分别为 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40. 对每组缺陷数目分别模拟计算 10 次,在介质厚度和入射光强不同的条件下,统计出现“热像”强度最大值的分布情况. 图 5(a) 是在入射光强为 5 GW/cm^2 , 介质厚度分别为 20 cm, 15 cm 和 10 cm 的情况下,得到的“热像”强度最大值随缺陷数目的变化关系(图中离散点为数据点,实线为这些点的拟合曲线,下同);图 5(b) 是在介质厚度为 10 cm, 入射光强分别为 5 GW/cm^2 , 4 GW/cm^2 和 3 GW/cm^2 的情况下得到的“热像”强度最大值(统计平均值)随缺陷数目的变化关系. 可以看出:1)在一定范围内,当非线性介质厚度和入射光强均给定时,光束受随机分布缺陷调制后所产生的“热像”强度最大值与该随机缺陷的数目有关,且随着缺陷数目的增加,“热像”强度的最大值也逐渐增加;2)当入射光强给定时,光束受相同数目随机缺陷调制后所产生的“热像”强度最大值随非线性介质厚度的增加而增大(图 5(a));3)当非线性介质厚度给定时,光束受相同数

目随机缺陷调制后所产生的“热像”强度最大值随入射光强的增大而增大(图 5(b)).

计算得出与图 5(a) 中厚度 $d = 10 \text{ cm}$, 15 cm 和 20 cm 对应的 a_{\max} 分别为 $252 \mu\text{m}$, $234 \mu\text{m}$ 和 $219 \mu\text{m}$;与图 5(b) 中 $I = 3 \text{ GW/cm}^2$, 4 GW/cm^2 和 5 GW/cm^2 对应的 a_{\max} 分别为 $325 \mu\text{m}$, $282 \mu\text{m}$ 和 $252 \mu\text{m}$. 这说明随着厚度和光强的增加,对应 a_{\max} 越小,光学元件表面出现与 a_{\max} 对应的缺陷的概率越大,因此由 a_{\max} 调制形成强度最大的“热像”出现的概率也随之增加,从而统计出现“热像”强度的最大值随介质厚度和光强的增大而增大. 另外,从图 5(a) 中 $d = 20 \text{ cm}$ 与(b)中 $I = 5 \text{ GW/cm}^2$ 对应的曲线的末端趋势可以看出,统计平均的峰值强度增长趋势趋于稳定,这是因为当数目增大到一定程度,尺寸接近或者等于 a_{\max} 的缺陷在光照区域稳定的出现,统计的结果也就趋于稳定.

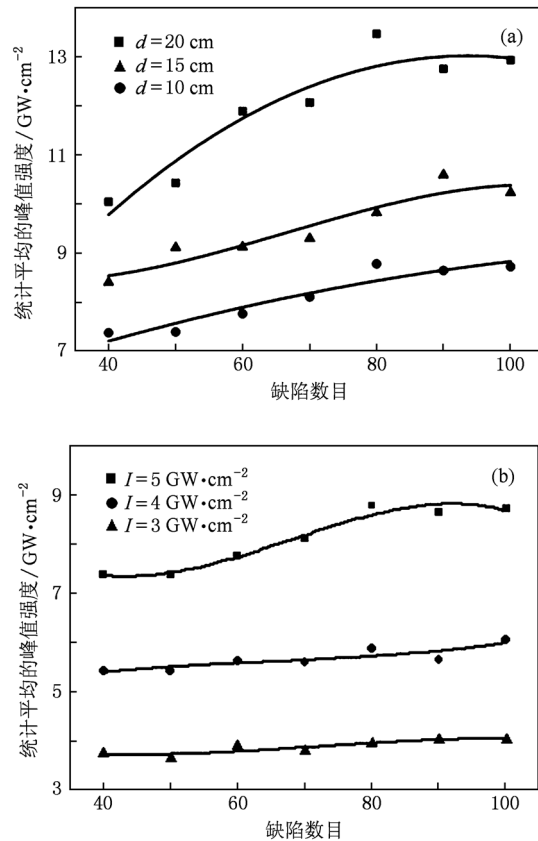


图 5 “热像”强度随缺陷数目的变化关系 (a) 不同非线性介质厚度;(b) 不同入射光强度

3.2. 缺陷数目一定,缺陷尺寸范围不同的情况

在实际高功率激光系统中,光学元件表面的缺

陷分布还可能存在着另一种情况,即缺陷数目可能相对一致,但缺陷尺寸分布范围却不尽相同. 同样数值模拟分析了这种缺陷分布对“热像”产生的影响. 模拟所选参数如下:缺陷数目为 100,尺寸范围分别为 50—100 μm , 50—150 μm , 50—200 μm , 50—250 μm , 50—300 μm , 50—350 μm , 50—400 μm ; 对每组缺陷尺寸范围分别模拟计算 10 次,介质厚度为 10 cm. 图 6 给出了当入射光强分别为 5 GW/cm^2 , 4 GW/cm^2 和 3 GW/cm^2 时,“热像”强度最大值(统计平均值)随缺陷尺寸范围的变化关系. 可以看出,在一定范围内,随着缺陷尺寸范围的扩大,“热像”强度最大值也逐渐增大. 但达到某个确定值后,“热像”强度最大值的变化趋势趋于稳定(如 $I = 5 \text{GW}/\text{cm}^2$ 对应的曲线的末端趋势趋于稳定). 同时,随着入射光强的增大,光束受到相同尺寸范围缺陷调制后所产生“热像”的强度也明显增大.

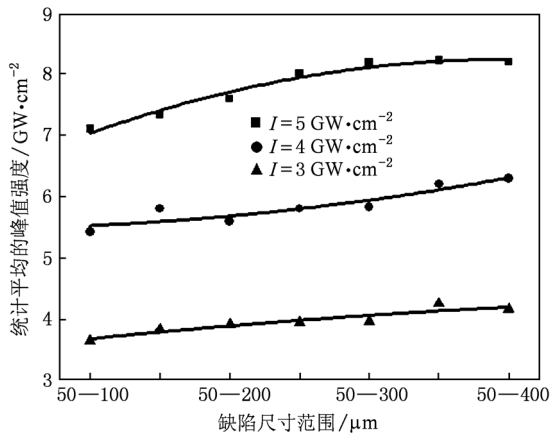


图 6 “热像”强度随缺陷尺寸范围的变化关系

理论计算得出与图 6 中 $I = 5 \text{GW}/\text{cm}^2$, 4 GW/cm^2 和 3 GW/cm^2 对应的 a_{max} 分别为 252 μm , 282 μm 和 325 μm , 若缺陷的尺寸范围上限低于 a_{max} , 则对应的“热像”强度会随着尺寸范围的扩大而增大, 因为缺陷尺寸越接近 a_{max} , 对应产生“热像”的强度越大; 若缺陷的尺寸范围包含 a_{max} , 则光学元

件表面有一定概率出现与 a_{max} 对应的缺陷, 一旦尺寸为 a_{max} 的缺陷在元件表面稳定出现时, “热像”强度最大值也就趋于稳定. 由此不难理解, 由于无论入射光强为 5 GW/cm^2 , 4 GW/cm^2 还是 3 GW/cm^2 , 对应的 a_{max} 均高于 250 μm . 因此, 图 6 中缺陷的尺寸范围低于 250 μm 时, 随着缺陷尺寸范围的扩大, “热像”强度最大值增加. 同时也不难理解, 由于此时与 a_{max} 对应的缺陷在元件表面稳定出现, 因而 $I = 5 \text{GW}/\text{cm}^2$ 对应的曲线末端的趋势趋于稳定.

4. 结 论

理论分析和数值模拟研究了高功率激光系统中光束受缺陷随机分布(位置和尺寸均随机分布)调制后所形成“热像”的演化规律, 并从统计平均的角度模拟讨论了“热像”强度最大值点的变化趋势与缺陷分布的数目和尺寸范围之间的关系. 结果表明, 具有不同空间频率的调制光波以各自相应的增长因子随传播距离变化, 由于能量竞争、耦合和最具损伤风险的缺陷尺度的存在, 大量的缺陷中只有少数缺陷点才可以调制光束形成“热像”强度极大值点. 同时, “热像”强度极大值点的横向位置分布与缺陷横向分布一一对应, 相关数值模拟结果证实了这一点. 统计分析表明, 在一定范围内, 随机分布缺陷调制产生“热像”强度的最大值, 在缺陷尺寸范围扩大和数目增加的情况下均呈现增强的趋势, 但当最具损伤风险尺度的缺陷在元件表面出现的概率达到一定程度后, 统计的结果都趋于稳定, 也就是说, 在高功率激光系统中, 当光学元件的表面粗糙度或者洁净水平一定时, 可以估算出光束受其调制后所形成“热像”强度的范围. 上述结果可以为元件表面的洁净度要求(包括缺陷数目和尺寸, 特别是尺寸为 a_{max} 的缺陷)提供一定的参考, 从而提高激光系统中光学元件的安全性.

[1] Baranova N B, Bykovskii N E, Zel'dovich B Ya, Senatskii Yu V 1975 *Sov. J. Quantum Electron.* **4** 1362
 [2] Hunt J T, Manes K R, Renard P A 1993 *Appl. Opt.* **32** 5973
 [3] Williams W H, Renard P A, Manes K R, Hunt J T, Reynard P A, Milam D, Eimerl D 1996 *UCRL-LR-105821-96-1*

[4] Widmayer C C, Milam D, DeSzoek S P 1997 *Appl. Opt.* **36** 9342
 [5] Xie L P, Zhao J L, Su J Q, Jing F, Wang W Y, Peng H S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2175 (in Chinese) [谢良平、赵建林、粟敬钦、景峰、王文义、彭翰生 2004 物理学报 **53** 2175]

- [6] 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** 547 (in Chinese) [谢良平、粟敬钦、景峰、赵建林、王文义、王道、彭志涛 2004 强激光与粒子束 **16** 547]
- [7] Xie L P, Zhao J L, Jing F 2005 *Appl. Opt.* **44** 2553
- [8] Xie L P, Jing F, Zhao J L, Su J Q, Wang W Y, Peng H S 2004 *Opt. Commun.* **236** 343
- [9] Wang Y W, Deng J Q, Chen L Z, Wen S C, You K M 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 024205-1
- [10] Wang Y W, Wen S C, Zhang L F, Hu Y H, Fan D Y 2008 *Appl. Opt.* **47** 1152
- [11] Wang Y W, Wen S C, You K M, Tang Z X, Deng J Q, Zhang L F, Fan D Y 2008 *Appl. Opt.* **47** 5668
- [12] 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、粟敬钦 2007 物理学报 **56** 3255]
- [13] Peng T, Zhao J L, Xie L P, Ye Z J, Wei H H, Su J Q, Zhao J P 2007 *Appl. Opt.* **46** 3205
- [14] Peng T, Zhao J L, Li D, Ye Z J, Cai Z B 2010 *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **49** 11101p1
- [15] Peng T, Zhao J L, Li D, Xie L P, Ye Z J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1884
- [16] Li D, Zhao J L, Peng T, Ye Z J 2008 *Opt. Eng.* **47** 114202-1
- [17] Zhang C L, Jing F, Yang X L, Hu D X, Peng Z T, Liu H J 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 166 (in Chinese) [张春玲、景峰、杨小丽、胡东霞、彭志涛、刘红婕 2006 中国激光 **33** 166]
- [18] Zhou L D, Su J Q, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Li P, Zhang X M 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 326 (in Chinese) [周丽丹、粟敬钦、刘兰琴、王文义、王方、莫磊、李平、张小民 2009 强激光与粒子束 **21** 326]
- [19] Bespalov V I, Talanov V I 1966 *JETP Lett.* **3** 307
- [20] Honig J 2004 *Opt. Eng.* **43** 2094
- [21] Lawson J K, Wolfe C R, Manes K R, Trertholme J B, Aikens D M, English E Jr. 1995 *SPIE* **2536** 38

Hot-images induced by the random distribution defects in high power laser systems *

Cai Zhao-Bin Zhao Jian-Lin[†] Peng Tao Li Dong

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 8 September 2010; revised manuscript received 19 January 2011)

Abstract

Based on the diffraction theory model of hot-images, the formation mechanism of the hot-images induced by the defects with random size and position distribution in a high power laser system is theoretically investigated by using the propagation matrix of the spatial spectrum. For the comparison with the theoretical results, the evolution of the hot-images induced by defects with random distribution is also numerically investigated. Furthermore, the relationship describing the tendency of the hot-image intensity with the number or size range of the defects is analyzed by employing statistical theory. The results show that the hot-image intensity will reach a maximum if the size of the corresponding defect approaches a specific value, and that there exists a corresponding relation between the transverse position of the hot-image point with the maximum intensity and the defect distribution. It is also found that the intensity of the hot-image has an upward trend with both the size range and the number of defects within a certain scope increasing. However, the tendency will be steady when the probability of the defects with the most risk of damage size reaches a certain value. Such results maybe provide a guidance for improving cleanliness of the optical components.

Keywords: hot-image, random distribution defects, high power laser, nonlinear medium

PACS: 42.55.-f, 42.40.My

* Project supported by the Joint Foundation of the National Natural Science Foundation Committee of China and China Academy of Engineering Physics (Grant No. 10576023).

[†] Corresponding author. E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn