

厚介质情况下激光“热像”的演化规律分析*

彭 涛¹⁾ 赵建林^{1)†} 谢良平¹⁾ 叶知隽¹⁾ 李 强²⁾ 栗敬钦²⁾

1) 西北工业大学理学院光信息技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710072)

2) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2006 年 8 月 30 日收到, 2006 年 9 月 27 日收到修改稿)

以“热像”形成的衍射理论模型和分步傅里叶算法为基础, 模拟研究了厚介质情况下“热像”的形成特点. 重点分析了散射点调制系数(包括振幅调制和相位调制)、散射点与介质前表面之间的距离、散射点大小、入射光强等参数的变化对“热像”点位置以及强度的影响. 数值模拟结果与解析理论结果进行了对比, 在散射点调制系数和入射光强的变化对“热像”的影响两种情况下, 得出了与解析理论基本一致的结论; 在散射点大小的变化对“热像”的影响情况下, 得出了与解析理论预言不同的结论. 此外, 还发现散射点与介质前表面距离为零时, 在介质后表面也可能出现“热像”效应.

关键词: 热像, 小尺度自聚焦, 分步傅里叶算法, 散射点

PACC: 4265J

1. 引 言

高功率激光系统的“热像”(hot-image)效应是一种特殊的小尺度自聚焦现象, 它不仅可能对激光器系统中的非线性介质造成损伤, 而且还可能引起介质后方特定位置处光学元件的损坏, 即使激光系统的最高能流比典型的预期损伤阈值低很多, 也常常会发现系统中的某些光学元件意外地遭受损坏. 因此, “热像”效应已成为制约高功率激光系统安全运行的重要因素之一. 1993 年, Hunt 等^[1]提出, “热像”损伤可能是光学元件上的污点或缺陷引起的散射光与原光束在非线性介质中相互作用后而形成的亮斑造成的. 随后 Williams 等^[2]的数值计算以及实验结果, 在很大程度上验证了 Hunt 理论在解释振幅调制产生“热像”方面的正确性. Widmayer 等^[3]进行了透明物体形成“热像”的实验, 发现透明物体有可能比不透明物体产生强度更大的“热像”, 且并不遵循 Hunt 理论得出的强度关系式. 谢良平等^[4-6]建立了“热像”效应的衍射理论分析方法, 得到了振幅相位混合调制产生的“热像”出现的位置及其强度随光束 B 积分、衍射物振幅和相位调制系数等参数满足的解析关系.

然而, 迄今为止所得出的“热像”强度和位置的解析表达式, 均建立在薄片近似基础上, 该近似处理在求解非线性近轴波动方程时忽略了衍射效应项, 而实际高功率固体激光器系统中的非线性介质均不满足薄片近似条件, 这些理论因而也只能从大体趋势上反映出激光“热像”的演化特性. 在不忽略衍射效应项影响的情况下, 非线性近轴波动方程没有解析解. 因此, 有必要通过数值模拟的方式来更为精确地分析“热像”的演化规律. 本文从“热像”形成的衍射理论模型出发, 用 MATLAB 语言模拟分析厚介质情况下“热像”的形成规律, 重点考虑散射点调制系数(包括振幅调制和相位调制)、散射点与非线性介质前表面之间的距离、散射点大小、入射光强等参数的变化对“热像”点强度以及位置的影响. 此外还将分析散射点位于介质前表面时形成“热像”的情况.

2. “热像”形成的数值研究

2.1. “热像”效应的衍射理论模型

如图 1 所示, “热像”的形成过程可以分为三个环节^[4]: ① 强激光束受到光学元件上的散射物调制后到非线性介质前表面的散射过程; ② 光束在介质

* 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

中的非线性传输过程；③ 光束从介质出射后的自由传输过程。环节①和③涉及光束在线性介质中的传输问题，可以用自由空间中的衍射理论来描述；环节②涉及光束与介质的非线性相互作用问题，需要用非线性近轴波动方程来描述。

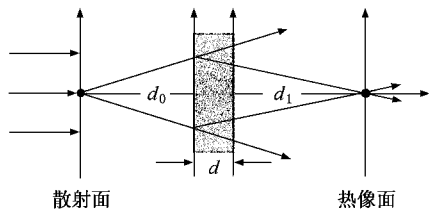


图1 “热像”的形成机理

2.2.“热像”效应的数值模拟

“热像”效应的衍射理论模型可以采用数值模拟的方式加以分析，其中非线性近轴波动方程用分步傅里叶算法求解。MATLAB 语言程序所用的参数选取如下：采样区间为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ，采样点数为 1024×1024 ，非线性介质长度为 30 cm ，折射率为 1.6 ，非线性折射率系数为 $2 \times 10^{-16}\text{ cm}^2/\text{W}$ ；入射光为高斯光束，其束腰半径为 0.3 cm ，波长为 $1.053\text{ }\mu\text{m}$ ；散射点为半透明圆斑，其半径为 0.02 cm ，振幅调制系数为 0.8 ，相位调制系数为 0.6π ，距离非线性介质前表面

100 cm ，初始入射光强为 $6\text{ GW}/\text{cm}^2$ 。

图2为从非线性介质后表面出射后，光束的峰值强度随传输距离的变化。从图中可以看到两个强度极大值点。后一极大值点的强度较大，该点即为通常所说的初级“热像”中心点；前一极大值点的强度较小，这应该就是文献[7]中提到的二级“热像”中心点。二级“热像”的强度通常比初级“热像”强度低一些，但模拟得到的二级“热像”中心点的强度是初始光强的5倍以上，故仍有可能对位于该处的元件造成光损伤。图3(a)–(c)分别为初级“热像”平面处光强分布的正面投影、三维分布和横向分布曲线图；4(a)–(c)分别为二级“热像”平面处光强分布的正面投影、三维分布和横向分布曲线。

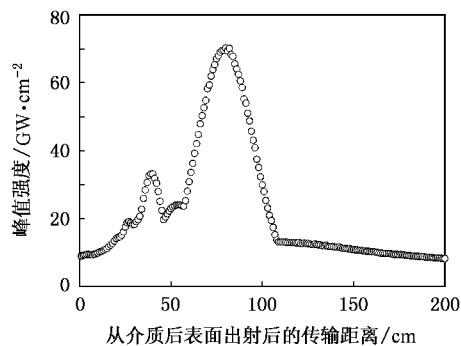


图2 从非线性介质出射后光束峰值强度的变化

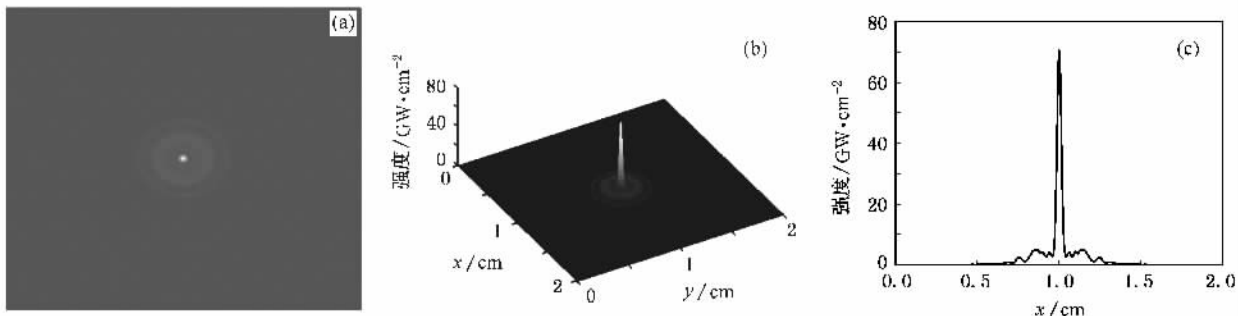


图3 初级“热像”平面处的光强分布

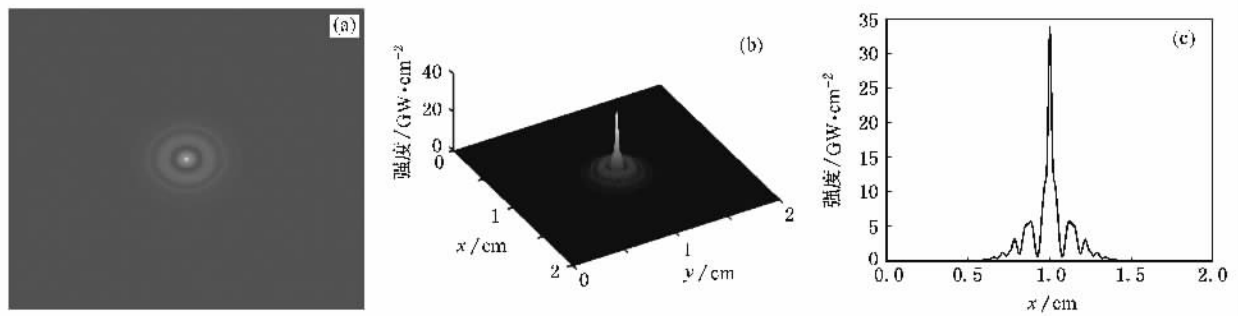


图4 二级“热像”平面处的光强分布

根据文献 4—6 的解析理论,薄片近似下,初级“热像”点与非线性介质后表面的距离等于散射点与非线性介质前表面的距离,即上述参数下,初级“热像”点应距离非线性介质后表面 100 cm. 模拟结果却为 80 cm,且模拟得出的初级“热像”强度小于解析计算结果. 按照文献 7 的分析,薄片近似下,二级“热像”点与非线性介质后表面的距离等于散射点与非线性介质前表面的一半,即上述参数下,二级“热像”点应距离非线性介质后表面 50 cm. 模拟结果则为 37 cm. 经分析,“热像”位置的数值模拟结果与解析理论结果产生差异的原因是,在薄片近似条件下,解析理论忽略了光束在非线性介质中传播时因介质折射率而引起的附加光程延迟. 而在上述参数下,该附加光程延迟约为 18 cm,不可忽略. 因此“热像”点应该从解析理论预言的位置向非线性介质后表面移动 18 cm. 模拟结果所得的初级“热像”点从解析理论值预言的位置向非线性介质后表面移动了 20 cm,二级“热像”点从文献 7 预言的位置向非线性介质后表面移动了 13 cm,这与上面的分析基本一致. 模拟得出的初级“热像”强度小于解析计算结果的原因是,文献 4—6 采取薄片近似处理非线性近轴波动方程时忽略了衍射效应,而衍射效应将导致光束强度的降低,光束强度的降低又将导致在非线性介质中传输时自聚焦效应的减弱,最终致使初级“热像”强度低于解析结果.

3. 散射点的相关参数对“热像”强度和位置的影响

3.1. 振幅与相位调制的影响

图 5 为不同振幅调制系数对“热像”强度和位置的影响(除相位调制系数为零和振幅调制系数与 2.2 节不同外,其他参数与 2.2 节相同). 可以看出,振幅调制系数增大时,初级“热像”中心点处光强变小,但“热像”位置几乎不变,同时二级“热像”强度也呈下降趋势. 图 6 为不同相位调制系数对“热像”强度和位置的影响(除振幅调制系数为 1 和相位调制系数与 2.2 节不同外,其他参数与 2.2 节相同). 可以看出,相位调制系数增大时,初级“热像”中心点处光强增大,但“热像”位置几乎不变,同时二级“热像”强度也呈上升趋势. 对比图 5 中 $t = \alpha$ (即纯振幅调制)对应曲线和图 6 中 $\theta = 0.8\pi$ 对应曲线可以看出,在某些相位调制下,二级“热像”中心点的强度甚至

可能超过相同条件下的纯振幅调制产生的初级“热像”中心点的强度. 这说明相位调制可能比振幅调制带来更严重的光损伤威胁.

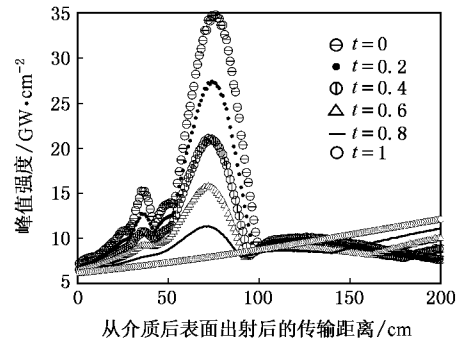


图 5 不同振幅调制系数对“热像”的影响

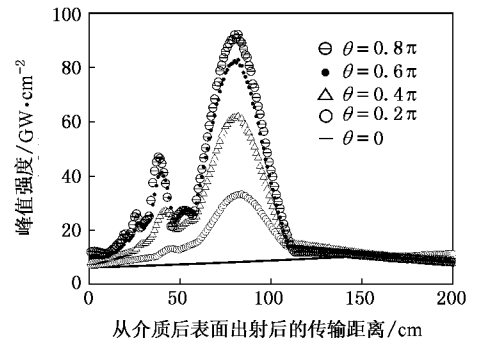


图 6 不同相位调制系数对“热像”的影响

3.2. 散射点与非线性介质前表面之间距离的影响

图 7 为散射点与非线性介质前表面之间的距离对“热像”强度和位置的影响(除散射点与非线性介质前表面之间的距离外,其他参数与 2.2 节相同). 可以看出,随着散射点与非线性介质前表面之间距离的增大,“热像”中心点的强度呈下降趋势. 实际上,由于散射光波为发散光,散射点离非线性介质前表面越远时,进入非线性介质中的散射光能量越少,因此,散射光波对“热像”中心点强度的贡献越小,散射光与背景光在非线性介质中的相互作用也越小,小尺度自聚焦效应越弱,最终结果是散射点与非线性介质前表面之间的距离越大,“热像”中心点的总强度越低. 图 8 为初级“热像”位置的解析理论值与数值模拟值的比较结果. 可以看出,散射点与非线性介质前表面之间的距离较远时,解析理论结果与数值模拟结果将产生较大偏差.

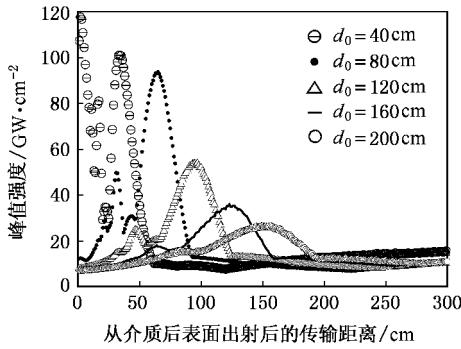


图 7 散射点与非线性介质前表面距离不同对“热像”的影响

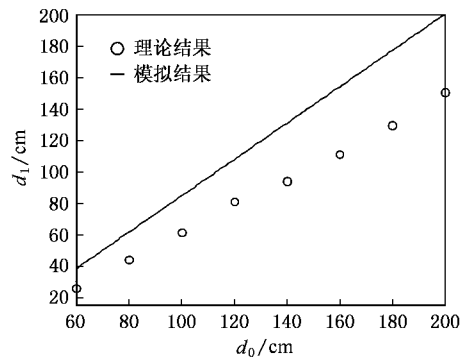


图 8 初级“热像”位置的解析理论与模拟结果比较

3.3. 散射点大小的影响

图 9 为散射点大小对“热像”强度和位置的影响 (除散射点大小外,其他参数与 2.2 节相同).可以看出,在一定范围内,“热像”中心点的强度随散射点尺寸的增大而增大,且位置几乎不变(图 9(a));但超过某个范围后,“热像”中心点的强度反而随散射点尺寸的增大而减小,且“热像”点向非线性介质后表

面靠近(图 9(b)).此外,散射点尺寸较大时,可能出现非线性介质后表面处光束的强度最强的情况(如图 9(b)中散射点尺寸为 0.045 cm 时对应的曲线).由小尺度自聚焦理论,散射点越大,对光束的调制就越大,“热像”效应将更为显著,这显然与上述情况的后一种情况相反.出现这种现象的可能原因是,尺寸大的散射点对光束的调制度增大,导致光束中的小尺度自聚焦更剧烈,致使光束出射后发生剧烈散射,

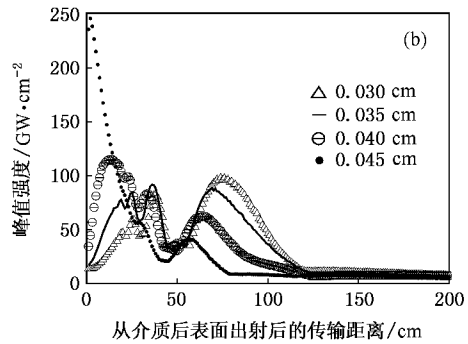
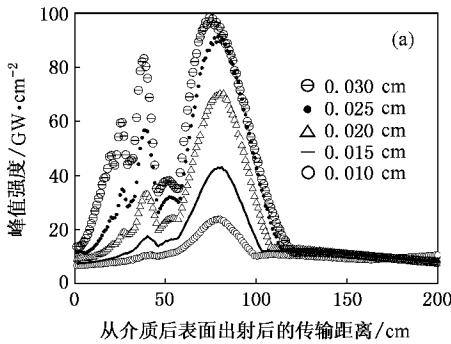


图 9 不同散射点尺寸对“热像”的影响

从而会聚到“热像”中心点上的强度减小.

3.4. 光强的影响

图 10 为不同光强对“热像”强度和位置的影响 (除光强外,其他参数与 2.2 节相同).可以看出,随着入射光强的增大,“热像”中心点的强度随之显著增强,但位置几乎不变.光强的增大相当于增大了光束的 B 积分,而 B 积分是衡量光束自聚焦程度的一个重要的参数, B 积分越大,自聚焦效应越强,因此,热像效应将越显著,这与解析理论基本符合.

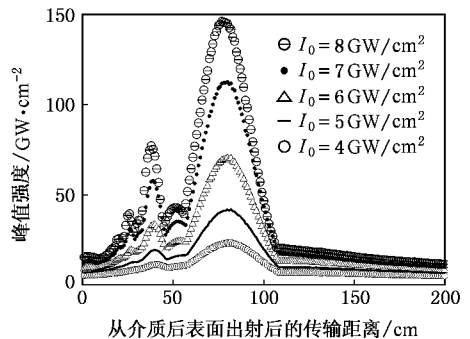


图 10 不同光强对“热像”的影响

4. 散射点在介质前表面时形成的“热像”

解析理论中,除薄片近似外,还有远场近似假设.当散射点位于非线性介质前表面时,远场近似条件也不满足,解析理论对此将无能为力. Francois^[8]等针对这种情况进行了实验研究,发现介质后表面也可能形成“热像”,本文的模拟结果也证实了这一点.图 11 为散射点位于非线性介质前表面时形成“热像”的模拟结果(振幅调制系数为 0.6,相位调制

系数为 0.8π ,介质长 20 cm,初始入射光强为 4 GW/cm^2 散射点非线性介质前表面,其余参数与 2.2 节相同).其中,图 11(a)为光在非线性介质中传输时,不同距离处峰值强度的变化.可以看出,光强随传输距离的增大而增大;图 11(b)为从非线性介质出射后,光束的峰值强度随传输距离的变化.显然,非线性介质后表面处光束的峰值强度最大,该处即为“热像”点所在的平面.图 11(c)~(e)分别为非线性介质后表面处光强分布的正面投影,三维分布和横向分布曲线.从以上分析可以看出,非线性介质后表面处确实出现了“热像”.

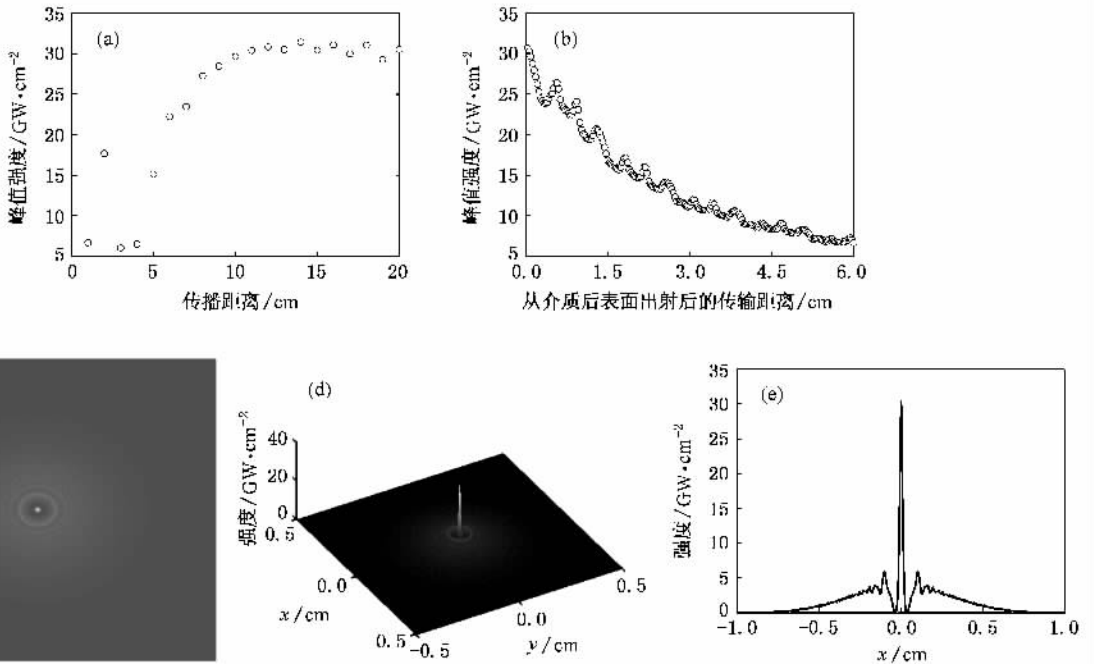


图 11 散射点位于非线性介质前表面时形成的“热像”(a)光束在非线性介质中的传播(b)从非线性介质出射后光束峰值强度的变化(c)介质后表面处光强的正面投影(d)介质后表面处光强的三维分布(e)介质后表面处光强的横向分布

5. 结 论

以数值模拟的方式研究了厚介质情况下高功率激光系统中“热像”的演化规律.重点分析了散射点调制系数(振幅调制和相位调制)、散射点与非线性介质前表面之间的距离、散射点大小、入射光强等参数的变化对“热像”中心点强度以及位置的影响,并与解析理论进行了对比.得出如下规律:①振幅调制和相位调制对“热像”的位置影响不大,但“热像”强度随振幅调制系数的增大而减小,随相位调制系数的增大而增大,且相位调制对“热像”强度的影响更为显著,这种趋势与解析理论结果基本一致,只是

“热像”的强度值与解析理论结果有一定的偏差;②在初级“热像”点与非线性介质后表面之间还可能出现第二个光强峰值,其位置与二级“热像”的理论预言基本一致,在某些调制下,也可能对位于该处的光学元件造成光损伤;③散射点与非线性介质前表面之间的距离对“热像”的强度有一定的影响,即随着该距离的增大,“热像”的强度有减小的趋势;④在一定范围内,“热像”的强度随散射点尺寸的增大而增大,但超过某个范围时,“热像”强度反而有减小的趋势,这不同于解析理论;⑤入射光束强度的增大对“热像”的位置没有影响,但对强度的影响非常显著.此外,当散射点位于非线性介质前表面时,在介质的后表面及其附近也可能形成“热像”.

- [1] Hunt J T , Manes K R , Renard P A 1993 *Appl. Opt.* **32** 5973
- [2] Williams W H , Renard P A , Manes K R , Milam D , Hunt J T , Eimerl D 1996 *UCRL-LR-105821-96-1* 1
- [3] Widmayer C C , Milam D , deSzoek S P 1997 *Appl. Opt.* **36** 9342
- [4] 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、栗敬钦、景峰、王文义、彭翰生 2004 *物理学报* **53** 2175]
- [5] 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、栗敬钦、景峰、赵建林、王文义、王道、彭志涛 2004 *强激光与粒子束* **16** 547]
- [6] Xie L P , Jing F , Zhao J L , Su J Q , Wang W Y , Peng H S 2004 *Opt. Comm.* **236** 343
- [7] Xie L P , Jing F , Zhao J L 2005 *Appl. Opt.* **44** 2553
- [8] Francois Y G , Feit M D , Kozlowski M R , Alexander M R , Salleo A , Yoshiyama J 2000 *Appl. Opt.* **39** 3654

Analysis of the evolvement of hot-image in case of thick nonlinear medium^{*}

Peng Tao¹⁾ Zhao Jian-Lin^{1)†} Xie Liang-Ping¹⁾ Ye Zhi-Jun¹⁾ Li Qiang²⁾ Su Jing-Qin²⁾

¹⁾ *Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Xi'an 710072, China*

²⁾ *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

(Received 30 August 2006 ; revised manuscript received 27 September 2006)

Abstract

Based on the split-step-Fourier-transform and the diffraction theory of hot-image model we made the simulation of the evolvement of hot-image in case of thick nonlinear medium. The changes of some parameters influencing the intensity and location of hot-image, such as the modulation coefficient (including amplitude modulation and phase modulation), the distance between scatterer and the front surface of nonlinear medium, the size of the scatterer, the intensity of incident beams and so on, were detailedly analysed respectively. Numerical results were found to be in agreement with analytical theory for the changes in modulation coefficient and the intensity of incident beams, but not in agreement with analytical theory for the changes in the size of the scatterer. Moreover, when the distance between scatterer and the front surface of nonlinear medium is zero, hot-image will also be found on the back surface of nonlinear medium.

Keywords : hot-image, small-scale self-focusing, split-step-Fourier-transform, scatterer

PACC : 4265J

^{*} 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: jljzhao@nwpu.edu.cn