

关联“热像”特性的缺陷带通成像检测技术

李 平, 韩 伟, 王 伟, 贾怀庭, 黄晚晴, 王 芳, 周丽丹, 冯 斌, 朱启华, 郑万国

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 “热像”是造成高功率固体激光装置光学元件损伤的重要物理机制。理论分析了相位缺陷经过非线性传输引起的“热像”特性,提出了带通成像提取引起“热像”的相位缺陷关键频谱方法,构建具有典型特征的 16 个相位缺陷,利用 3 种光路结构,量化分析了“热像”特性与带通成像特性间的关系,并获得了缺陷带通成像的相对亮度与“热像”强度的线性关系,相关程度与光学构型和带通滤波参数有关。研究结果对“热像”预判有重要意义,为高功率激光装置相位缺陷的检测奠定了技术基础。

关键词 激光器; 热像; 带通成像; 高功率激光; 非线性介质

中图分类号 O43 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0914004

Defect Inspection by Band-Pass Imaging Related to Hot Image Property

Li Ping, Han Wei, Wang Wei, Jia Huaiting, Huang Wanqing, Wang Fang,
Zhou Lidan, Feng Bin, Zhu Qihua, Zheng Wanguo

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

Abstract In high power solid laser facility, the hot images are an important physical mechanism in damaging the optical components. The hot image property induced by defects in nonlinear propagation is analyzed theoretically. The phase defect key spectrum method of hot image extracted by band-pass imaging technology is proposed. The typical 16 phase defects are constructed to analyze the quantitative relationship between hot image property and band-pass imaging property with three optical types, and the linear relationship between hot image intensity and relative brightness of band-pass image are proposed. It shows that the correlation coefficient is connected with the optical type and band-pass filter parameters. The results have great significance for hot images and lay a technique foundation for phase defects detection in high power laser systems.

Key words lasers; hot image; band-pass imaging; high power laser; nonlinear medium

OCIS codes 140.3580; 190.4400; 120.5060

1 引 言

在高功率激光系统中,光学元件缺陷引起的衍射光与背景光在后续非线性光学元件中发生交叠,由于非线性介质的折射率依赖于光强,经过非线性介质后的部分背景光被折射,在下游会形成与缺陷对应的“互补像”,称为“热像”^[1-4]。“热像”的产生包含 3 个过程:1)光学元件缺陷在光束中引入局部调制;2)调制的衍射光与背景光构成的干涉条纹在非线性介质中的传输;3)出射光的自由传输^[5]。以规避高功率激光光学系统中因“热像”效应造成光学元件损伤为目的,本文对“热像”的含义进行了扩展:1)非线性介质为光学系统,不仅仅是单块元件;2)传输中关注激光“强”点而不是成像面的“像”。

“热像”是造成高功率固体激光装置光学元件损伤的一个重要物理机制。2006 年,美国国家点火装置(NIF)在其精密诊断系统上进行了终端光学组件的验证,发现光学元件相位缺陷引起的“热像”是透镜损伤

收稿日期: 2017-04-06; **收到修改稿日期:** 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(11404306)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2014B0401065)

作者简介: 李 平(1984—),男,硕士,副研究员,主要从事高功率固体激光装置光束控制方面的研究。

E-mail: liping1984@caep.cn

的重要原因^[6]。相位缺陷的主要参数包含缺陷点形状、尺寸、深度、边缘特性等,这些参数对“热像”强度非常敏感^[7-12],因此,获得高分辨率、高精度的相位缺陷分布是开展“热像”性能计算的重要条件。理论和模拟结果表明,在光学元件较为密布的高功率激光系统中,亚毫米级别的相位型缺陷最易造成下游光学元件损伤^[6],从而产生一个极具挑战性的难题,即在米量级的光学元件上进行微米量级的缺陷检测。目前已经开发出了一些技术,例如在线光学元件损伤检测系统,可实时获得光学元件的损伤点,但其精度不足以支撑精密的光束传输计算^[13];相移衍射干涉仪,虽然有足够的测试精度^[14],但对大口径元件的检测效率过低;线扫描成像技术虽然兼顾了效率和精度,但对“热像”强度和测量参数间的关系尚缺乏深入的理论解释^[15]。

本文从光学元件相位缺陷的宏观特性出发开展研究:1)从“热像”形成的机理出发,提取与“热像”特性相关联的特征参数,获得光束空间分布对形成“热像”的强度贡献;2)从缺陷的检测成像特点出发,提取与“热像”相关联的特性,研究以单色平面波倾斜照明匹配成像透镜数值孔径的方式对相位缺陷进行成像。

2 理论分析

2.1 相位缺陷引起的“热像”特性分析

如图 1 所示,设光波沿 z 轴传播,光学元件上的缺陷引起的衍射光波(散射光波,设为 U_s)与未经衍射的光波(背景光,设为 U_b)传播到非线性介质处。两光波的复振幅分布分别为

$$U_s = A_s \exp(i\phi_s), \quad (1)$$

$$U_b = A_b \exp(i\phi_b). \quad (2)$$

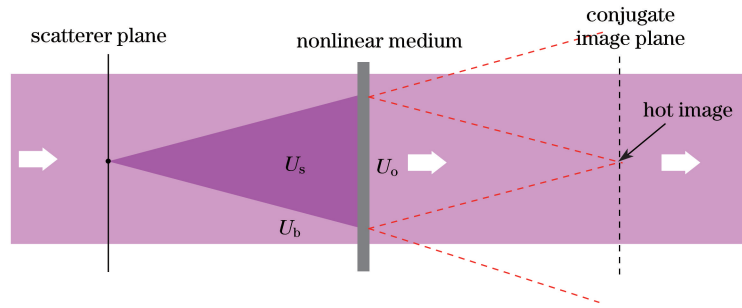


图 1 热像形成的原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of hot image formation

在非线性介质处的入射光 U_i 可认为是散射波 U_s 与背景波 U_b 的叠加,与基于非线性介质的薄片近似,介质出射的光场分布可表示为

$$U_o = (U_s + U_b) \exp\left(ik_0 \frac{\gamma |U_s + U_b|^2}{2} d\right), \quad (3)$$

式中 k_0 为激光真空中波数, γ 为介质的非线性常数, d 为非线性介质的厚度。将(3)式的平方项展开,考虑散射光波的能量远小于背景光波,再将方程中的指数用泰勒多项式展开,忽略高阶小项^[2],可得输出光场为

$$U_o \approx \exp(iB) \left(U_b + iB \frac{U_b}{U_b^*} U_s^* + iB U_s + U_s \right), \quad (4)$$

式中 B 为光束在介质中的积分, $B = \frac{k_0 \gamma d |U_b|^2}{2}$ 。(4)式右边括号中共有 4 项;第 1 项为背景波的直透分量;第 2 项为衍射物的共轭像,为会聚光波,将在衍射物的共轭面上成一实像,即“热像”;第 3 项为具有相移和增益的散射光形式,为发散光波;第 4 项为散射光的直透分量,也为发射光波。其中第 1~3 项均从背景光中提取能量,在高功率固体激光系统中,重点关注第 2 项。

由(4)式可知,在非线性介质中的覆盖区域产生“热像”(第 2 项)的光束均对形成“热像”的强度有贡献,具有空间“面点”对应关系,其他几项则具有空间“点点”对应关系。由于出现“热像”的光场来自一定面积的近场分布区域,对非线性介质处的局部遮挡不会造成“热像”位置变化,也不会对其强度产生过大影响,影响的只是与该局部区域对应的背景光,这种特性将是后续相位缺陷成像系统研制的关键点。直接用非线性薛

定谔方程对该现象进行数值模拟和验证^[6]。图 2 为模拟中用到的相位缺陷点,对应图 1 中光学元件的散射点,在 $1 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光照射下,非线性介质后会形成“热像”。图 3(a)为相位缺陷点中心位置在 z 轴上的光强演化,虚线为相位缺陷点逆传输的演化,光束的强度演化与非线性介质为镜像关系,这与(4)式的理论表达一致。按照峰值强度定义的“热像”位于 $z = 2500 \text{ mm}$ 处,其光束空间分布如图 3(b)所示,如果局部遮挡非线性介质中心,遮挡口径 $D = 3 \text{ mm}$,大于图 2 中相位缺陷的大小,则此时“热像”平面的光束空间分布如图 3(c)所示。由图 3(c)可知,“热像”依然存在,只是强度略微降低。因此,非线性介质的局部遮挡对“热像”的形成和基本性能没有影响。

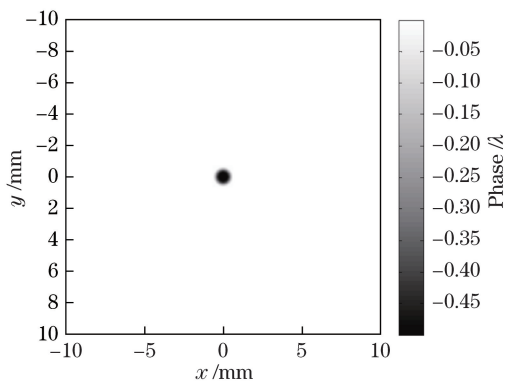


图 2 相位缺陷的分布图

Fig. 2 Distribution of phase defect

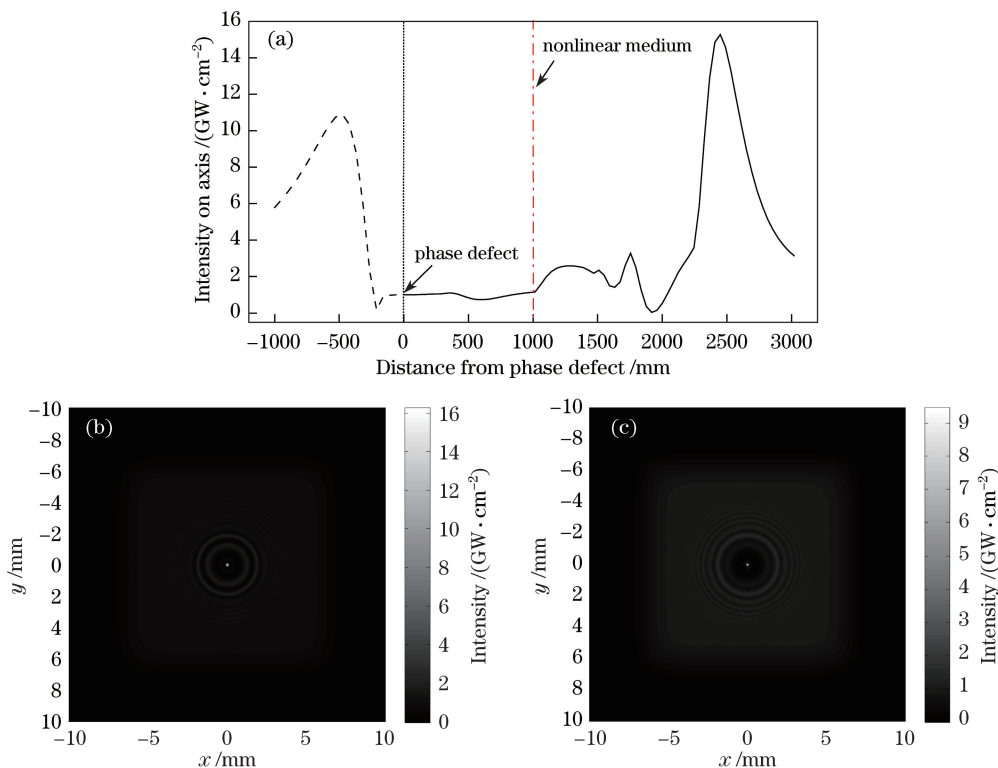


图 3 含缺陷点光束的空间分布。(a)光束在光轴上的强度演化;(b)热像面上的强度分布;
(c)存在遮挡条件下热像面上的强度分布

Fig. 3 Spatial distribution of beam with defect point. (a) Intensity on beam propagation axis;

(b) intensity on hot image screen; (c) intensity on hot image screen with a shadow in nonlinear medium

2.2 基于带通成像的缺陷检测分析

为提取相位缺陷特征参数的空间频率分布特征,设计了带通成像系统,其核心原理是利用单色平面波倾斜照明与成像透镜数值孔径的匹配程度来调节成像所用的频谱带。如图 4 所示,所设计的带通成像典型光

路包含光源平面、物平面、成像透镜平面和像平面等。

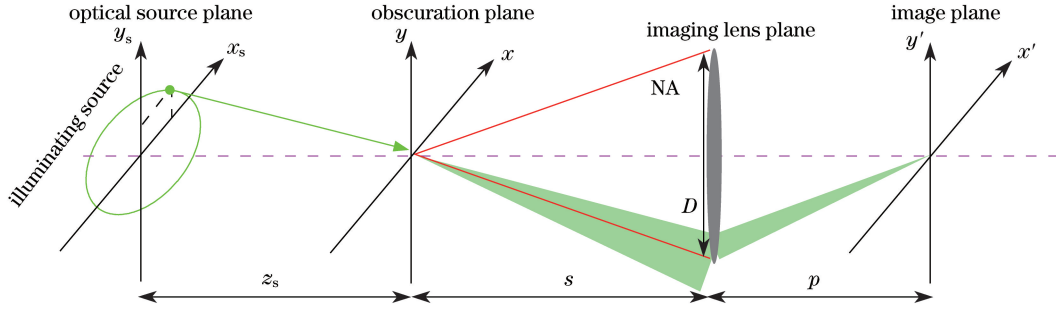


图 4 带通成像的光学示意图

Fig. 4 Optical schematic of band-pass imaging

设光源平面上的光源坐标为 (x_s, y_s) , 其辐照在物平面上的光场空间频率为

$$\boldsymbol{\rho}_s = \left[\xi_s = \frac{x_s}{z_s \lambda} \quad \eta_s = \frac{y_s}{z_s \lambda} \right], \quad (5)$$

式中 λ 为照明光的波长, 其他参数如图 4 所示。设物的复透过率函数为 $\exp[i2\pi h(\mathbf{r})]$, 式中 \mathbf{r} 为物面的矢量坐标, $h(\mathbf{r})$ 为 \mathbf{r} 位置光程差与照明波长的比值, 光源经过物后的光场为

$$u_2(\mathbf{r}) = A \exp\{2\pi i[h(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\rho}_s \cdot \mathbf{r}]\}, \quad (6)$$

式中 A 为振幅, \mathbf{r} 为物平面的位置矢量。物成像到像平面上时, 由于透镜数值孔径的限制, 成像过程存在频谱损失现象, 此时成像透镜相当于滤波系统。经过光束传输的相关计算可获得像面上的光束分布为

$$U_3(\boldsymbol{\rho}) = H(\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_s) F\{\exp[2\pi i h(\mathbf{r})]\}, \quad (7)$$

式中 $H(\boldsymbol{\rho})$ 为透镜数值孔径所决定的函数, 表达式为

$$H(\boldsymbol{\rho}) = \text{circ}\left(\frac{\boldsymbol{\rho}}{\rho_0}\right), \quad (8)$$

式中 ρ_0 为透镜对应的通光半径。(7)式可理解为物体的傅里叶变换, 取其中的部分频率用于成像, 这部分频率的表达式为 $H(\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_s)$, 对应图 4 中成像透镜后传输的部分光束。其物理含义为: 光源离轴量决定了窗口的中心频率, 透镜数值孔径决定了频带宽度。由于物像之间为成像关系, 只需要将光学元件进行一次扫描, 便可获得元件各空间位置具有带通滤波的像, 该像因此也必然同时含有光学元件的位置信息。

综上理论分析可知, 非线性介质的局部遮挡对“热像”的形成和基本性能没有影响, 而带通滤波窗口可认为对非线性介质进行了局部遮挡, 因此可建立“热像”特性与带通成像间的关联, 实现光学元件缺陷的初步检测。

3 数值模拟与分析

3.1 数值模拟条件的建立

为进一步明确“热像”特性与带通成像特性间的量化关系, 构建了 16 个相位缺陷, 如表 1 所示。序号 1 为无缺陷, 作为对照, 其他相位缺陷点的选择考虑了以下方面: 1) 空间分布特征涵盖面广, 尽量涵盖缺陷的各种空间特征, 包括形态(圆或任意形态)、尺寸(0.2~3 mm)、深度(0.3 λ ~5 λ)、边缘特性(1~10 阶超高斯)等; 2) 传输特性有明显差异, 在特定光路中形成的“热像”强度尽可能是一种均布的形式; 3) 所选的缺陷分布尽可能找得到实际的原型, 大部分以超高斯的空间分布形式出现, 与实际使用情况相似。为对相位缺陷的检测数据进行量化, 首先分析了相位缺陷的空间频谱图(图 5), 16 个相位缺陷的空间频谱有明显差异, 选择合适的带通滤波窗口可凸显这种差异; 然后设置了带通滤波函数(频域单位为 mm^{-1} , 例如 2 mm^{-1} 表示 0.5 mm 的空间周期)对相位缺陷进行带通成像, 选择像的相对亮度(定义为相对无缺陷时亮度的倍数)作为相位缺陷的特征参数, 可综合体现频谱上的差异, 表 1 列出了在某选定的滤波窗口(1~10 mm^{-1})下像的相对亮度, 用于表征其与“热像”强度的关联。

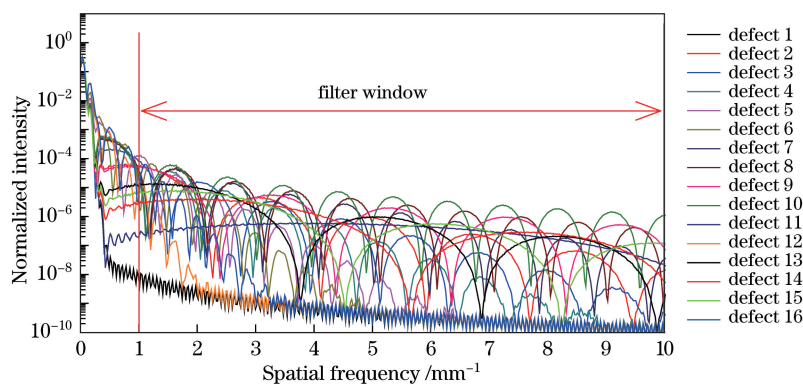


图 5 16 个相位缺陷点的空间频谱

Fig. 5 Spatial frequency spectra of 16 phase defects

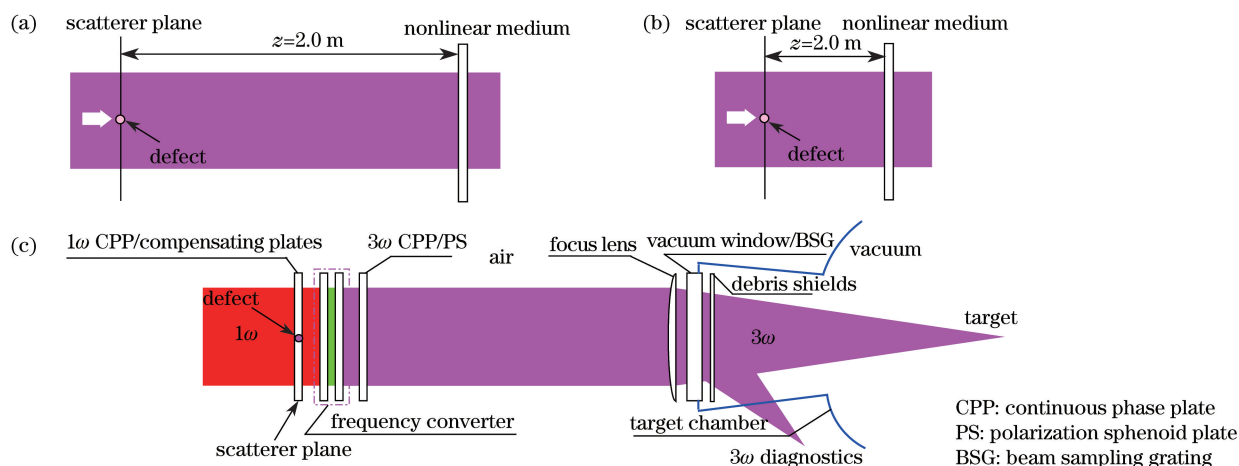


图 6 用于热像强度计算的 3 种构型。(a)光学构型 1;(b)光学构型 2;(c)光学构型 3

Fig. 6 Three optical types applied to calculate the hot image intensity.

(a) Optical type 1; (b) optical type 2; (c) optical type 3

表 1 带通滤波器参数与 16 个热像相位缺陷强度的关系

Table 1 Relationship between the band-pass filter parameters and hot image intensity of 16 phase defects

No.	Relative brightness of band-pass image (1~10 mm ⁻¹)	Relative intensity of hot image		
		Optical type 1	Optical type 2	Optical type 3
1	1	1.0	1.0	1.0
2	2708	8.2	6.3	1.8
3	1924	7.1	6.5	1.9
4	3051	7.0	4.5	2.2
5	1654	7.5	2.4	1.8
6	1251	6.5	2.0	2.0
7	4921	11.3	15.0	4.5
8	5841	11.6	21.0	6.4
9	3651	8.9	14.0	5.0
10	7001	10.0	27.1	6.8
11	476	1.5	3.0	1.2
12	25	1.2	1.4	1.5
13	2457	6.0	7.0	1.6
14	1438	3.2	6.6	1.5
15	1994	4.5	6.5	1.5
16	483	4.8	1.6	1.6

为证明相位缺陷“热像”特性的一般性,构建了3种光路,如图6所示。前两种为简单的“热像”光路,差异体现在缺陷与非线性介质的间距,分别为2 m和0.2 m;另一种为实际光学系统——神光-III原型装置(TIL)的终端光学系统(FOA),缺陷位于倍频前的窗口上。采用相对“热像”强度(相对背景光的放大倍数)表征缺陷对光学系统的影响,前两种构型的“热像”定义为非线性介质后一阶“热像”,第3种构型的“热像”定义为该系统的区间内的最强热斑。模拟采用 $2 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的输入光场,直接用非线性薛定谔方程进行数值模拟^[6],分别计算3种构型下“热像”强度相对背景光的放大倍数,结果如表1所示。

3.2 分析与讨论

1) 带通成像的相对亮度与相对热像强度呈线性关系

以构型1为例,采用 $1\sim 10 \text{ mm}^{-1}$ 的带通窗口对缺陷进行带通成像,其相对亮度和相对热像强度的模拟结果如图7所示,两者有较明显的线性关系,进一步支持前述的理论分析,线性关系将作为后续分析的基础。

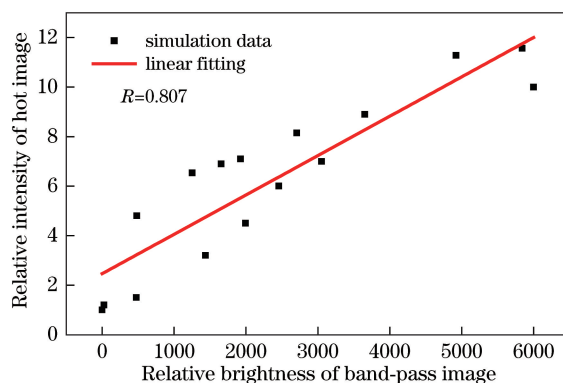


图7 构型1的缺陷点在带通窗口函数滤波下的相对亮度和热像相对强度的线性拟合

Fig. 7 Linear fitting of hot image relative intensity and relative brightness of defect filtered by band-pass window function in type 1

2) 带通滤波的优化参数与其应用构型紧密相关

由“热像”特性和带通成像的理论分析可见,存在最佳的带通窗口与构型相对应。以线性关系的相关系数作为判别标准,表2通过数值模拟优化选择了各构型下的带通窗口,滤波窗口1大小为 $1\sim 4 \text{ mm}^{-1}$,滤波窗口2大小为 $2\sim 10 \text{ mm}^{-1}$,滤波窗口3大小为 $1.3\sim 10 \text{ mm}^{-1}$ 。结果表明,采用带通成像方法对光学元件相位缺陷进行检测,需通过数值模拟的方法来分析该元件的应用光路和条件、优化设计带通滤波函数,进而选择带通成像的关键参数。

表2 带通滤波后的相对强度与不同构型下热像强度的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of hot image relative intensity with the band-pass image relative brightness

Optical type	Filter window 1	Filter window 2	Filter window 3
Type 1	0.955	0.693	0.844
Type 2	0.803	0.978	0.960
Type 3	0.826	0.881	0.922

3) 关联“热像”特性的缺陷带通成像检测技术的可信度与光路复杂性紧密相关

以相关系数作为检测可信度的判别标准,相关系数按照优劣排列为构型2、构型1、构型3,在各自最佳带通函数下的拟合关系如图8所示。可见,构型的复杂度与相关系数呈反比关系,其原因可能是因为,在复杂构型中,光束传输特性更为复杂,任何带通区域的选择都不能准确衡量其对“热像”强度的影响。这也表明,在复杂的光学系统中,为更准确地评估元件缺陷对装置的损伤风险,对相对亮度较大的缺陷点,需要用更高精度的相位检测设备来测量,这为大口径光学元件全口径相位缺陷检测提供了先粗测、再局部精测的总体思路。

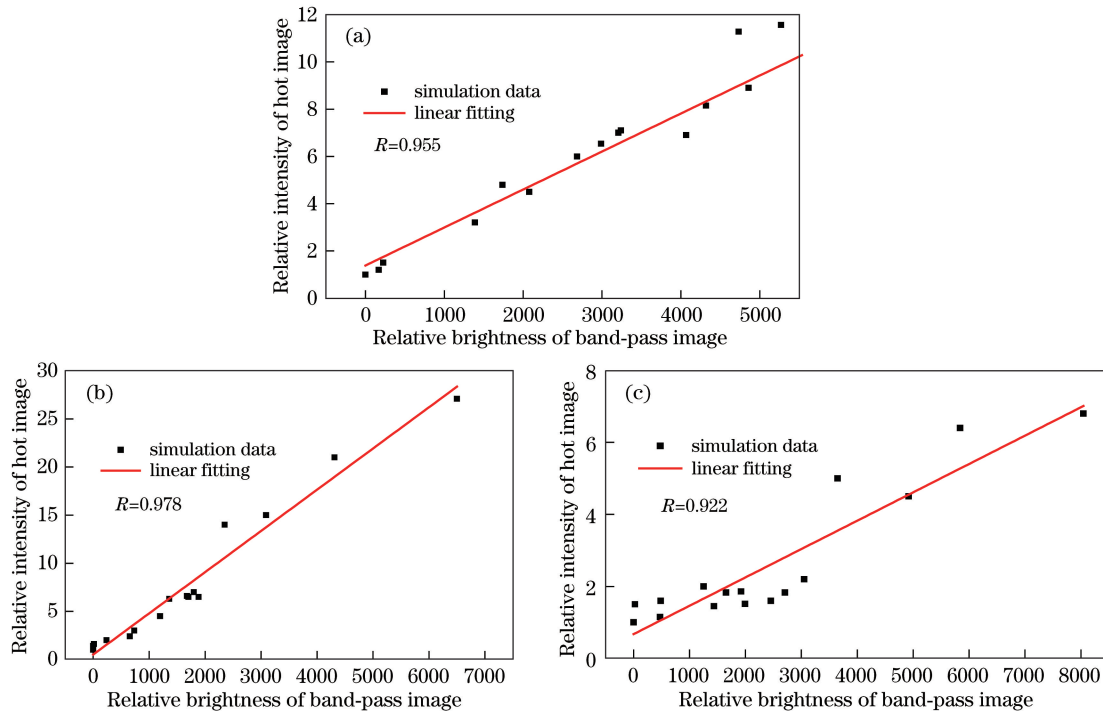


图 8 不同构型在最优带通窗口滤波下的相对亮度和热像相对强度的线性拟合。

(a) 光学构型 1; (b) 光学构型 2; (c) 光学构型 3

Fig. 8 Linear fitting of hot image relative intensity and relative brightness with the optimal band-pass window for the different optical types. (a) Optical type 1; (b) optical type 2; (c) optical type 3

4 结 论

“热像”是造成高功率固体激光装置光学元件损伤的重要物理机制。通过理论分析和数值模拟,研究了高功率激光“热像”效应在传输过程中空间分布特点和检测方法。为提取光学元件的相位缺陷信息,深入研究了单色平面波倾斜照明匹配成像透镜数值孔径的方式对相位缺陷进行带通成像的检测方法,并由此建立了缺陷参数与“热像”特性间的关联。作为理论结果的对比验证,构造了具有典型特征的 16 个相位型缺陷,并在 3 种光学构型下,模拟了缺陷的检测参数和“热像”特性的关系。结果表明,缺陷带通成像的相对亮度与“热像”强度呈线性关系,其相关系数与带通滤波参数密切相关,该参数由光学系统构型所决定;光学系统越复杂,最优化的相关系数越小。该结果可为高功率固体激光装置相位缺陷的检测提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Baranova N B, Bykovskii N E, Zeldovich B I, *et al.* Diffraction and self-focusing during amplification of high-power light pulses[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1975, 4: 2435-2458.
- [2] Hunt J T, Manes K R, Renard P A. Hot images from obscurations[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 5973-5982.
- [3] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, *et al.* Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 146-249.
- [4] Wang Y W, Deng J Q, Chen L Z, *et al.* Formation of hot images in laser beams through a self-defocusing Kerr medium slab[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(2): 024205.
- [5] Widmayer C C, Milam D, deSzoeko S P. Nonlinear formation of holographic images of obscurations in laser beams[J]. Applied Optics, 1997, 36(36): 9342-9347.
- [6] Parham T G, Azevedo S, Chang J, *et al.* Large aperture optics performance[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 2009.
- [7] Wang Y W, Wen S C, Zhang L F, *et al.* Obscuration size dependence of hot image in laser beam through a Kerr medium slab with gain and loss[J]. Applied Optics, 2008, 47(8): 1152-1163.
- [8] Peng T, Zhao J L, Xie L P, *et al.* Simulation analysis of the restraining effect of a spatial filter on a hot image[J].

- Applied Optics, 2007, 46(16): 3205-3209.
- [9] Xie Liangping, Zhao Jianlin, Su Jingqin, *et al.* Theoretical analysis of hot image effect from phase scatterer[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(7): 2175-2179.
谢良平, 赵建林, 栗敬钦, 等. 位相调制产生“热像”效应理论研究[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2175-2179.
- [10] Cai Zhaobin, Zhao Jianlin, Peng Tao, *et al.* Hot-images induced by the random distribution defects in high power laser systems[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11): 114209.
蔡朝斌, 赵建林, 彭 涛, 等. 高功率激光系统中随机分布缺陷产生的“热像”[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 114209.
- [11] Zhang Guowen, Lu Xingqiang, Cao Huabao, *et al.* Diffraction effect of high-power laser beams through contamination particles[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(2): 024201.
张国文, 卢兴强, 曹华保, 等. 高功率激光光束经颗粒污染后的近场衍射效应[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 024201.
- [12] Nostrand M C, Cerjan C J, Johnson M A, *et al.* Correlation of laser-induced damage to phase objects in bulk fused silica[C]. SPIE, 2004, 5647: 233-246.
- [13] Conder A D, Chang J J, Kegelmeyer L M, *et al.* Final optics damage inspection (FODI) for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 2010, 7797: 77970P.
- [14] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, *et al.* Modern approaches in phase measuring metrology[C]. SPIE, 2005, 5856: 13-22.
- [15] Ravizza F L, Nostrand M C, Kegelmeyer L M, *et al.* Process for rapid detection of fratricidal defects on optics using linescan phase differential imaging[C]. SPIE, 2009, 7504: 75041B.