

基于光束干涉的高功率激光鬼像分析

张 燕^{1,2} 张艳丽¹ 朱健强¹ 孙平平^{1,2} 刘 芳^{1,2} 刘德安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 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 在原有鬼像焦斑空间分布研究的基础上, 进一步考虑入射激光脉冲与透镜的鬼像之间发生的干涉叠加现象。参考神光 II 系统, 分别推导并计算了 3~10 ns 的入射脉冲引起最小像差型双凸透镜产生鬼像干涉的最大焦距范围, 然后以单位矩形脉冲平面波作为入射光, 讨论存在干涉的几种情况。结果表明, 由于干涉叠加效应, 鬼像焦平面存在较大的调制, 焦平面附近的区域也有很明显的干涉调制。干涉后鬼像的功率密度大大地超出了原有鬼像光强的估算值, 特别是对于高阶鬼像, 问题更加严重。

关键词 高功率激光脉冲; 鬼焦斑; 多光束干涉; 峰值功率; 透镜

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1008002

Further Analysis of High-Power Lasers Ghost Images Based on Beam Interference

Zhang Yan^{1,2} Zhang Yanli¹ Zhu Jianqiang¹ Sun Pingping^{1,2} Liu Fang^{1,2} Liu Dean¹

(¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on the previous analysis of spatial distribution of the ghost images in high-power laser system, interference among the ghost image beams reflected by front edge and the trailing edge of the pulse which overlapped together were further considered. According to the Shenguang (SG) II facility, the maximal focal length of minimal aberration lens which induced ghost images interference were calculated corresponding to the different laser pulse width range from 3 to 10 ns. Several situations of the interferences existing with the ghost images were simply simulated with incident plane wave. The results indicate that high density modulations existed on the focal plane of ghost images which greatly enhanced the peak power of the ghost images. Near the ghost focal plane, there were also dramatically spatial interference modulations which increased ghost beam power greatly especially for the higher order ghost images, which should be emphasized greatly in practice.

Key words high-power laser pulse; focal spots of ghost image; multi-beam interference; peak power; single lens

OCIS codes 080.3630; 260.3160; 350.4600; 350.5500

1 引 言

在高通量高功率激光装置中, 残余反射光汇聚形成的鬼像也具有很高的峰值功率, 具有极大的破坏性, 成为高功率光学设计中不得不考虑的重要问题^[1~3]。国内外都做了很多针对鬼像的研究工作,

这些工作主要侧重于用几何光学的方法, 分析确定系统中鬼像的具体位置并考虑如何使光学元件避开这些危险区域^[4,5]。但是, 鬼像的破坏阈值不仅与鬼像所在的空间位置有关, 也与鬼光束聚焦处的峰值功率密度(即光强)有关, 而峰值功率密度是由鬼

收稿日期: 2011-03-24; 收到修改稿日期: 2011-05-13

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究(2010DFB70490)资助课题。

作者简介: 张 燕(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事高功率激光装置杂散光分析及检测等方面的研究。

E-mail: zhangyan@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学精密机械设计制造工艺、高功率激光传输和光学仪器等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

像焦斑的空间分布决定的。另外,光传输中普遍存在的干涉、衍射等效应也会对鬼像产生调制,进而影响鬼像焦斑的空间分布。特别是高功率激光脉冲具有一定的时间延迟,在相应的脉冲时间内,入射的脉冲激光极易与自身残余反射光相遇,产生干涉现象(汇聚形成鬼像),从而产生调制以致增强鬼像的峰值功率密度。一旦鬼像由于实际加工安装误差而偏离预先设定的位置^[6],增强的峰值功率密度将由于超过光学元件的损伤阈值而产生新的破坏。

本文在深入分析衍射效应对鬼焦斑的影响的基础上^[7],进一步考虑由于入射脉冲前后沿的时间延迟,可能与鬼像产生干涉的范围,并在原有利用Collins公式分析鬼像焦斑的空间分布的基础上,考虑干涉存在的情况下,通过理论分析和数值模拟,进一步确定了鬼像焦平面及附近区域的空间强度分布,为工程设计和后续的实际测量提供理论依据。

2 主激光与鬼像产生干涉的范围

单个透镜各阶鬼像的分布如图1所示^[7],从图中可以看出,在整个光束传输过程中,不仅入射脉冲光的后沿会与反射光的前沿叠加,不同反射次数的反射光之间也会叠加。由于入射光具有很高的单色性,因此在光束叠加区域极易发生干涉。

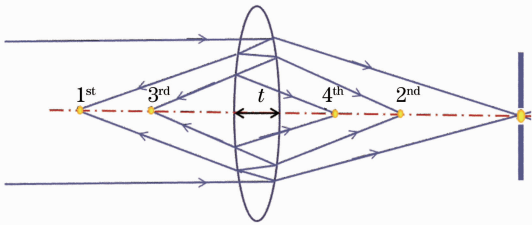


图1 单透镜鬼像的分布示意图

Fig. 1 Schematic of ghost images distribution in single lens

依据单个双凸透镜1~4阶鬼像的分布规律^[5~7],如图1所示,不难推断:1)如果反向传输的一阶鬼像与主激光存在干涉,那么其他高阶鬼像也与主激光存在干涉;2)如果反向传输的三阶鬼像与主激光发生干涉,相反地,一阶鬼像不一定会与主激光相遇发生干涉;3)对于正向传输的鬼像,由于透镜的厚度远远小于透镜的焦距,因此偶数阶鬼像(如图中的2,4阶鬼像)必然会与主激光产生干涉。

鬼像的位置与透镜前后表面的曲率半径密切相关^[2],单个薄透镜在光轴上的鬼像的位置 f_i (i 表示反射次数)与透镜两个曲面的曲率半径 R_1, R_2 近似满足如下关系^[6]:

$$\frac{1}{f_i} = \frac{n(i+1)}{R_2} - \frac{n(i+1)-2}{R_1} \quad (i \text{ is odd}) \quad (1)$$

以最常用的最小球差型双凸透镜为例,在满足平行光入射(物距为无限远)的情况下,其透镜曲率半径 R_1, R_2 与焦距 f 满足以下关系:^[8]

$$\begin{cases} R_1 = \frac{2(n+2)(n-1)}{n(2n+1)}f \\ R_2 = \frac{n(2n+1)}{2n^2-n-4} \end{cases} \quad (2)$$

参考神光II装置中透镜^[9]的参数,折射率 $n=1.5$,将(2)式代入(1)式,得到透镜一阶和三阶鬼像位置 f_i 与透镜焦距 f 之间的关系为

$$\begin{cases} f_1 = \frac{-(n+2)(n-1)}{3n}f \\ f_3 = \frac{-(n+2)(n-1)}{(2n+7)n}f \end{cases} \quad (3)$$

令入射主激光的脉冲宽度为 L (mm),当透镜的中心厚度 $t=50$ mm时,利用(3)式推导得到最小像差型双凸透镜的1~4阶^[1]鬼像满足上述干涉条件时,透镜最大焦距 f_{\max} 与主激光脉冲宽度 L 的关系为

$$\left| \frac{-(n+2)(n-1)}{3n}f_{\max} \right| + t/n \leq \frac{L}{2} \quad (4)$$

$$\left| \frac{-(n+2)(n-1)}{(2n+7)n}f_{\max} \right| + 2t/n \leq \frac{L}{2} \quad (5)$$

(4)式是满足上述第1种情况的临界条件,即一阶鬼像与主激光产生干涉,则其他阶鬼像都与主激光产生干涉;(5)式是满足第2种情况的临界条件,即三阶鬼像与主激光产生干涉而一阶鬼像不产生干涉。

当主激光的脉冲宽度(常常用时间来表示,与距离的关系是 $L=hc, c$ 表示光速) h 在3~10 ns范围时,代入(4)式,得到鬼像与入射主激光发生干涉的透镜最大焦距如表1所示。其他透镜类型也可根据(1)式以及 R_1, R_2 的相互关系进行估算。

表1 最小像差型双凸透镜在不同脉冲宽度时鬼像存在干涉的最大焦距

Table 1 Maximal focal length for which interference between the ghost images and main laser occurs on the convex lens with minimal aberration at different pulse width

Time /ns	L /mm	f_{\max} /mm	
		Case as formula (4)	Case as formula (5)
3	900	1071.43	3285.77
5	1500	1842.86	5857.2
7	2100	2614.29	8428.63
10	3000	3771.44	12285.77

表 1 表明,对于不同宽度的入射脉冲,当透镜焦距满足 $f \leq f_{\max}$ 时,对应的鬼像与入射脉冲之间就存在干涉;随着脉冲宽度的增加,存在干涉所要求的透镜焦距范围也增大,即存在干涉的范围也增大。而在诸如神光II的高功率激光装置中,无论在放大器还是空间滤波器中,透镜的焦距基本都在表 1 所列范围内(主激光 3 ns 时的最大焦距为 3285.77 mm),因此,在高功率光学系统中鬼光束的干涉普遍存在,具有很高的研究价值。

3 鬼像与主激光产生干涉的数值分析

为了简化分析模型,假定整个光学系统不存在色散,像差等情况,入射的平面脉冲光采用矩形脉冲分布近似,矩形脉冲光经过厚透镜后变换为一汇聚的球面波,其中厚透镜表面的反射率为 1%^[1,9]。

由图 1 可知,根据鬼像与主激光的相对空间位置,干涉可分为两种情况:

1) 单个鬼像在焦平面及其附近区域与主激光的干涉叠加;

2) 多个鬼光束与主激光重叠干涉。

鉴于主激光和鬼光束不同的传输距离,光束的发散程度不同,以上两种情况的具体形式也不同。仅以一阶鬼像的数值计算为例,详细说明以上两种情况。其他阶鬼像的干涉与一阶鬼像的分析方法一致,将具体波形代入计算即可。

数值分析中假定输入平面波为脉宽 3 ns,波长为 1.053 μm ,单位光强(即 $E^2 = 1$)的矩形脉冲光,平行入射到口径为 390 mm,焦距为 1900 mm 的双凸透镜上,透镜参数为曲率半径 $R_1 = 2466$ mm, $R_2 = -1534.9$ mm,中心厚度 $t = 50$ mm。

3.1 一阶鬼像与主激光的干涉

理想情况下,平面波垂直入射,假设波的传播方向为 z 方向,光束波面为 xy 平面。忽略激光脉冲前后沿的大小差别,单位矩形脉冲平面波表示为

$$E_1 = a \exp(-ikz), \quad (6)$$

式中 a 表示光场的振幅,在这里设为 1。

根据 Collins 公式^[10~12],经过一次反射后在透镜左侧汇聚形成一阶鬼像点,其焦平面上的强度分布是艾里斑的形式(由于透镜左侧表面的反射光为发散光,这里不作考虑),表示为^[7]

$$E_2 = -\frac{ikd^2 Ra}{8B} \exp[-ik(L_1 + 2t/n)] \exp \frac{ikDr_2^2}{2B} \cdot \left\{ \frac{2J_1[kdr_2/(2B)]}{kdr_2/(2B)} \right\}, \quad (7)$$

式中 L_1 为一阶鬼像聚焦的位置, $r_2 = \sqrt{x^2 + y^2}$ 表示焦平面上的径向位置, d 为透镜口径, t 为透镜的厚度, B, D 为一阶鬼光束传输到焦平面处传输矩阵的矩阵元素; R 为反射率。

一阶鬼像在其焦平面上与主激光发生干涉的干涉场表示为^[12]

$$E = a \exp(-ikL_1) - \frac{ikd^2 Ra}{8B} \exp[-ik(L_1 + 2t/n)] \exp \frac{ikDr_2^2}{2B} \cdot \left\{ \frac{2J_1[kdr_2/(2B)]}{kdr_2/(2B)} \right\}, \quad (8)$$

干涉场的光强为

$$I = EE^* = a^2 + \left\{ \frac{ikd^2 Ra}{8B} \cdot \frac{2J_1[kdr_2/(2B)]}{kdr_2/(2B)} \right\}^2 + \frac{2Ra^2 kd^2}{8B} \cdot \frac{2J_1[kdr_2/(2B)]}{kdr_2/(2B)} \cos k \left(2t/n + \frac{Dr_2^2}{2B} + \phi - \frac{\pi}{2} \right), \quad (9)$$

设 $J = \frac{2J_1(kdr_2/B)}{kdr_2/B}$, $\varphi = 2t/n + \phi$, $\delta = \frac{Dr_2^2}{2B}$, 则

$$I = a^2 + \frac{k^2 d^4 R^2 a^2}{64B^2} J^2 + \frac{2a^2 kd^2 JR}{8B} \sin k(\varphi + \delta) = I_1 + I_2 + I_{12}, \quad (10)$$

式中 $I_1 = a^2$ 是入射光的光强; $I_2 = \frac{k^2 d^4 R^2 a^2}{64B^2} J^2$ 是入射光经透镜后表面反射汇聚的一阶鬼像的光强;

$I_{12} = \frac{2a^2 kd^2 JR}{8B} \sin k(\varphi + \delta)$ 则表示干涉项。其中 ϕ 表示入射光的初始相位,在一阶鬼像的焦平面上 $\varphi = 2t/n + \phi$ 为常数; δ 正比与鬼像焦平面的径向位置 r_2^2 ,由于聚焦的光斑很小,可以近似认为 δ 线性变

化且较小,因此 $\sin k(\varphi + \delta)$ 的值近似线性变化。所以干涉后鬼像焦面上的光强[如(9)式所示]是一阶鬼光束聚焦的强度 I_2 叠加了主激光的光强 I_1 及其干涉项 I_{12} ,由于 $I_1 = 1 \ll I_{12}$,干涉场的光强 I 主要由 I_2 和 I_{12} 决定,且远远大于一阶鬼像聚焦的光强 I_2 ,数值计算结果如图 2 所示。

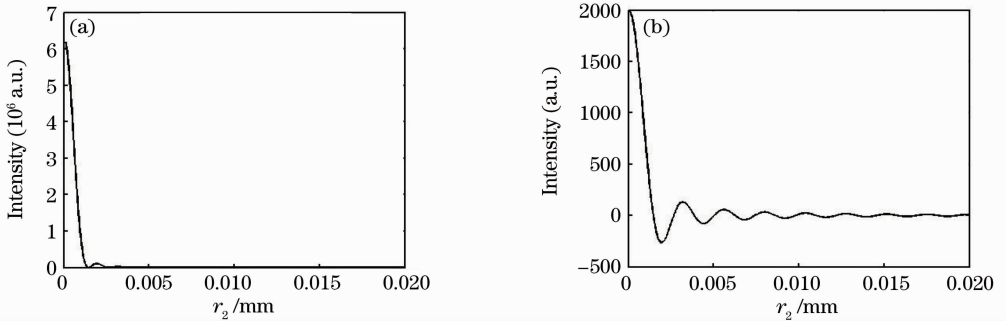


图 2 一阶鬼像在其焦平面上与主激光发生的干涉。(a)干涉场光强 I ; (b)干涉调制项光强 I_{12}

Fig. 2 Interference of the first order ghost image with incident laser beam on the focal plane. (a) Total light intensity of interference I ; (b) intensity of the interference term I_{12}

由图 2 可知,单位强度的入射光与大口径透镜的一阶鬼像点在其焦平面发生干涉,合成的光强达到 10^6 [如图 2(a) 所示],其中干涉项 I_{12} 的大小也超过 10^3 [如图 2(b) 所示],也就是说相对于传统意义上考虑的鬼像的强度 I_2 ,焦平面上的干涉场增加了一个 10^3 的干涉调制项 I_{12} ,这个增加量是不容忽视的。

由透镜的聚焦特性可知,焦点附近区域存在着一个以几何焦平面为对称轴的强度分布场^[12],因此,在鬼像焦平面附近与主激光重叠的区域内也存在干涉调制。按照主激光与鬼光束的传输形式(汇聚或者是发散,球面波或者平面波),干涉的类型各不相同。依然以图 2 分析的一阶鬼光束为例,在其焦前一点 $\sigma(\sigma > 0)$ 处,鬼光束为汇聚的球面波,主激光为近似平面波。在 $L_1 + \sigma$ 处的干涉场光强表示为

$$I = \left| \frac{kRa}{B_1} J_1 \right|^2 + a^2 + 2 \frac{kRa^2 |J_1|}{B_1} \sin(\varphi - \delta), \quad (11)$$

$$\text{式中 } J_1 = \int_0^{d/2} \exp\left(\frac{ikA_1 r_1^2}{2B_1}\right) J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{B_1}\right) r_1 dr_1, \quad \delta = \frac{ikD_1 r_2^2}{2B_1},$$

$\varphi = 2t/n + \phi$, $\tan \alpha = \text{Im } J_1 / \text{Re } J_1$, ϕ 为入射光的初始位相, L_1 是一阶鬼像焦点的位置, $L'_1 = L_1 + \sigma$ 为一阶

鬼光束的离焦面, A_1, B_1, D_1 表示一阶鬼光束传输到 L'_1 处传输矩阵的矩阵元素, r_1 表示入射光的口径, r_2 表示干涉场的径向位置。令 $I_1 = a^2$ 为入射主光束的强度, $I_2 = \left| \frac{kRa}{B_1} J_1 \right|^2$ 为一阶鬼光束在距离其鬼焦平面 σ 处的强度, $I_{12} = 2 \frac{kRa^2 |J_1|}{B_1} \sin(\varphi - \delta)$ 为干涉项,则(11)式又写作

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}, \quad (12)$$

由(12)式可知,一阶鬼光束离焦后与主激光的干涉光强的也是由鬼光束的光强及其与主光束的干涉项决定的,且 $E^2 \propto \frac{kRa^2 |J_1|}{B_1} \sin(\varphi - \delta)$, 相位差 $\varphi - \delta$ 的大小决定了相干调制的周期,而透镜本身的折射率和厚度以及干涉场所在平面的位置决定了 I_2 的大小(这些因素都隐含在 L'_1 处的传输矩阵的矩阵元素 A_1, B_1, C_1, D_1 中^[7])。

考虑焦深的范围 $[\lambda/n\sin^2(\arctan d/2L_1) = 3\lambda]$ ^[13],取 $\sigma = 6.2\lambda$ 时的干涉场强度 I ,得到一阶鬼像与主光束的干涉结果如图 3 所示,其中横坐标表示干涉平面的径向位置。由图 3 可知,一阶鬼像离焦后的干涉场光强在数值上有所降低,但是在数量级上依然

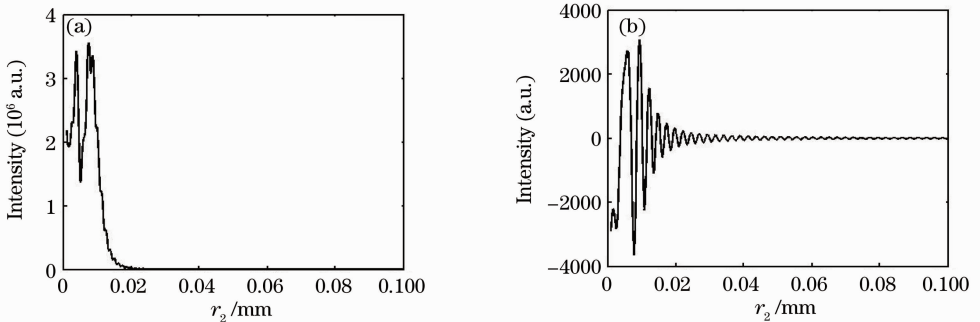


图 3 一阶鬼像在焦前 6.2λ 处与主光束的干涉结果。(a)干涉后的总光强 I ; (b)相干项光强 I_{12}

Fig. 3 Interference on the plane of $L_1 + 6.2\lambda$ between the first order ghost image and incident beam. (a) Total light intensity I after the interference; (b) light intensity of the interference term I_{12}

为 10^6 , 并且干涉光斑明显增大, 具有明显的调制条纹, 调制度约为 45%。

3.2 多个鬼光束与主激光重叠干涉

表 1 粗略的估计表明, 在靠近透镜表面处的鬼像(通常是高阶鬼像)与主激光及其他鬼光束(通常是低阶鬼光束)重叠发生干涉, 所需的透镜焦距范围更广, 更有普遍性。这里将这种情况笼统地称作多光束干涉, 从图 1 可以看到, 在凸透镜左侧靠近透镜表面的位置, 近似平面波的主激光与一阶鬼光束及三阶鬼像重叠; 在透镜右侧, 汇聚的主激光与二阶鬼光束及四阶鬼像重叠。

以图 1 所示的三阶鬼像焦平面为例, 在此焦平面上重叠了一阶鬼光束及主激光, 利用上节分析得到的光场, 很容易写出在三阶鬼像焦平面处的干涉场为

$$E = E_1 + E_2 + E_3, \quad (13)$$

式中

$$E_1 = a \exp(-ikL_3), \quad (14)$$

为入射光光场;

$$E_2 = \frac{-ikRa}{B_1} \exp[-ik(L_3 + 2t/n)] \times \exp\left(\frac{ikD_1 r_2^2}{2B_1}\right) \int_0^{d/2} \exp\left(\frac{ikA_1 r_1^2}{2B_1}\right) J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{B_1}\right) r_1 dr_1, \quad (15)$$

为一阶鬼光束在三阶鬼像焦平面 L_3 处的光场;

$$E_3 = \frac{-ikd^2 R^3 a}{8B_2} \exp[-ik(L_3 + 4t/n)] \times \exp\left(\frac{ikD_2 r_2^2}{2B_2}\right) \left\{ \frac{2J_1[kdr_2/(2B_2)]}{kdr_2/(2B_2)} \right\}, \quad (16)$$

为三阶鬼像在其焦平面上的光场。 A_j, B_j, D_j ($j = 1, 2$) 表示相应光束在 L_3 处的矩阵元素。可以推断, 干涉场的光强是这 3 个光束相互作用的结果。其中的干涉项是由两两光束在 L_3 处的相位差决定, 也与透镜本身的折射率和厚度有关。

从具体数值上分析, 入射光经过 3 次残余反射后形成的三阶鬼像其峰值功率密度(光强)急剧减小(在本文里, 数量上与入射光的强度相近); 但是一阶鬼光束只经过一次残余反射的衰减, 且为汇聚光束, 因此其功率密度依然较大, 三束光发生干涉后, 相当于在三阶鬼像焦平面上叠加了一个较强的背景噪声, 干涉场的峰值光强由一阶鬼光束的强度决定。

图 4 为三阶鬼像、一阶鬼光束及主激光在 3 阶鬼像焦平面上的干涉强度分布, 从图中可以看出, 在三个光场的共同作用下, 三阶焦平面上的光强波动较大, 峰值强度保持 10^6 的数量级[如图 4(a)所示]。

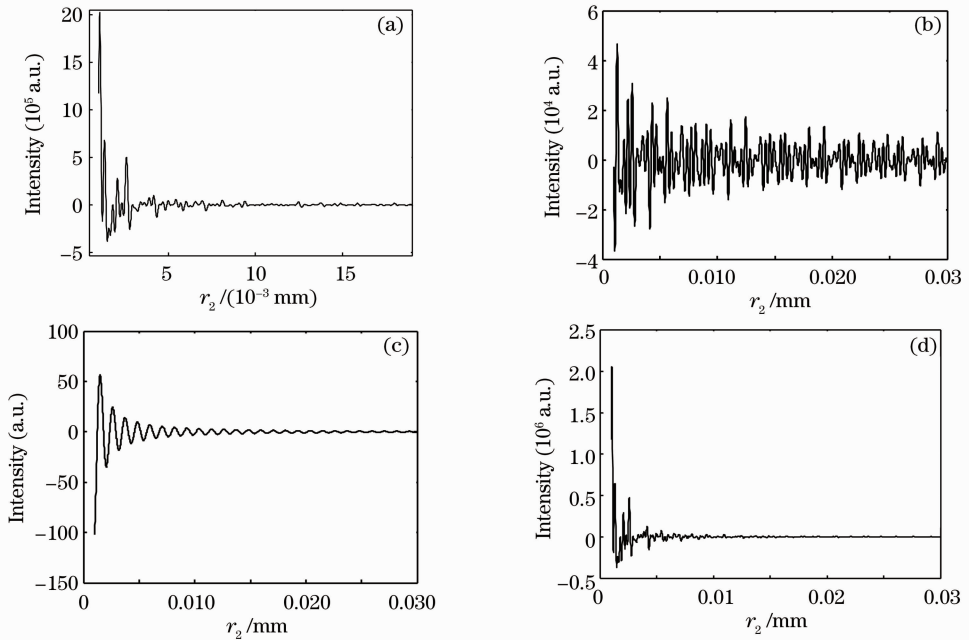


图 4 三阶鬼像与一阶鬼光束和主激光的干涉。(a)干涉场的总光强;(b)主激光和一阶鬼光束的干涉项强度;(c)主激光与三阶鬼像的干涉项强度;(d)一阶鬼光束与三阶鬼像的干涉项强度

Fig. 4 Interference among third order ghost image, first order ghost beam and incident laser beam. (a) total light intensity of the interference; (b) intensity of the interference term between incident beam and first order ghost beam; (c) intensity of the interference term between incident beam and third order ghost image; (d) intensity of the interference term between first order ghost beam and third order ghost image

由于一阶鬼像的光强较强,在干涉总光强中起主要作用,一阶鬼光束与其他两束光的干涉项的峰值强度也达到了 10^6 [如图 4(d)所示],相比于三阶鬼像本身的强度,这个增量不可低估。

图 5 为三束光在三阶鬼像焦平面的离焦面 $L_3 + \sigma$ 处干涉场的强度分布,从图 5(a)中可以看到离焦处的光强仍保持在 10^5 的量级,依然有明显的调制条纹;图 5(b)是图 4(b)表示的相干项在离焦平

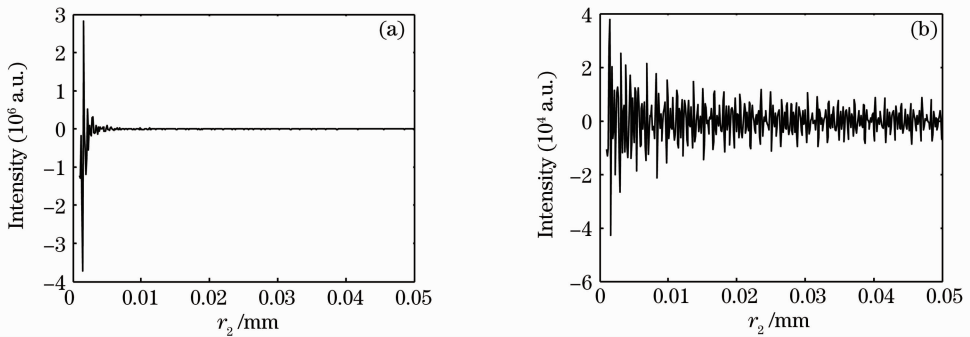


图 5 三阶鬼像离焦 3λ 处与一阶鬼像和入射激光的干涉结构。(a)干涉场的总光强;(b)入射激光和一阶鬼像的相干项的强度

Fig. 5 Interference among third order, first order ghost beams and incident beam on the plane away 3λ from the third order ghost focal plane. (a) Total light intensity of the interference; (b) intensity of the interference term between incident beam and first order ghost beam

此外,对于偶数阶鬼像来说,由于与主激光同向,因此,只要与主激光重叠的区域都会发生干涉调制,分析方法同前两节类似。但是对于二阶、四阶鬼光束而言,经过多次残余反射后光束携带的能量已经很低,所以即使在传输中与主激光发生干涉,对整个光学系统的运行没有影响。对此类干涉较敏感的还是鬼像焦平面及其附近的区域,由于汇聚作用,主光束和鬼光束的功率密度都在增强,干涉场的光强要远远超过原有鬼像聚焦的光强,甚至比一阶鬼像焦平面处的干涉光强还要大,更具危险性。具体情况需要根据实际数值进行计算比较。

4 结 论

分析可知,由于高功率激光脉冲前后沿的时间延迟特性,前沿的残余反射光极易与其后沿重叠产生干涉效应,在鬼像焦平面附近产生不同程度的干涉调制,从而大大增强了鬼像光斑的峰值光强。干涉调制后的鬼像峰值光强在一定范围内均比不考虑干涉时的峰值光强^[7]高出至少 10^2 的增量,这在工程中是一个绝对不容忽视的增量。因此,对于鬼像的分析应当提高分析的反射次数并提高鬼像的损伤阈值。

面 $L_3 + \sigma$ 处的强度分布,可以看到两个分布形式上基本一致,只是强度有所降低。

图 4 和图 5 均说明了在三阶鬼像焦平面附近的合成光强已经远远超过原有三阶鬼像的峰值光强,由于三阶鬼像更靠近透镜表面,这类产生多光束干涉的鬼像点具有更大的危害性,且不易被考虑到。因此,实际中应当特别注意此类鬼像的多光束干涉。

但是,实际中为了避开鬼像,常采取倾斜光学元件的做法,而光学表面的倾斜会导致鬼光束间的重叠面积增加,也增加干涉光束的相位差,导致相干项的调制更加剧烈,也就是说会加剧鬼像干涉的调制度,增强鬼像的峰值功率密度。相关的工作还有待于进一步地深入研究。

此外,文中为了简化分析采取了很多近似,并且没有考虑到像差特别是球差对鬼像的影响,计算结果不免有些理想化。联系到实际系统中,由于众多元件产生的残余反射数量惊人^[1],加上主激光的变换和放大,以及系统中多个波长共同存在^[9]的情况,鬼像及其干涉变得更加复杂多样,这也大大增加了其危害性。特别是对于靠近光学表面的,传统分析中忽略的高阶鬼像,其危害性更大。

参 考 文 献

- 1 J. L. Hendrix, J. Schweyen, J. Rowe *et al.*. Ghost analysis visualization techniques for complex systems examples from the NIF final optics assembly[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 306~320
- 2 Liu Hongjie, Liu lanqin, Su jingqin *et al.*. Lens design based on ghost imame and aberration analysis in high-power laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **8**(5): 976~980
刘红婕, 刘兰琴, 粟敬钦. 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计[J]. *光学学报*, 2008, **8**(5): 976~980
- 3 Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, Deng Shitao. A quick algorithm for locating ghost coordinates in high-power laser systems[J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3289~3294
- 岑兆丰, 李晓彤, 邓诗涛. 高功率激光系统鬼点空间坐标的快速定位算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3289~3294
- 4 Li Liangyu, Wang Shifan, Li Yinzhu *et al.*. Ghost analysis of the spatial filter in "SHENGUANG" facility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(9): 826~828
- 李良钰, 王仕璠, 李银柱 等. "神光"装置中空间滤波器的鬼点分析 [J]. *中国激光*, 2001, **28**(9): 826~828
- 5 Li Yinzhu, Li Liangyu, Dai Yaping *et al.*. Ghost reflection analysis for the high-power laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(8): 677~680
- 李银柱, 李良钰, 戴亚平 等. 高功率激光装置中的鬼点反射分析 [J]. *中国激光*, 2001, **28**(8): 677~680
- 6 Zhang Yan, Zhang Yanli, Li Xiaoyan *et al.*. Study on sensitivities of ghost images to lens fabrication errors in high-power laser facilities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3568~3573
- 张 燕, 张艳丽, 李小燕 等. 高功率激光装置透镜误差对鬼像点位置的敏感性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3568~3573
- 7 Yan Zhang, Yi Ma, Yanli Zhang *et al.*. Study on the ghost images spatial distribution in high-power laser facilities [C]. *SPIE*, 2010, **7794**: 77940X
- 8 Wang Fang, Zhu Qihua, Zhang Qingquan *et al.*. The relations between the first-order ghost image and the focal length in the high-power laser facility[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 334~336
- 王 方, 朱启华, 张清泉 等. 高功率激光装置中透镜一阶鬼点形成规律分析[J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 334~336
- 9 Qiao Zhanfeng, Lu Xingqiang, Zhao Dongfeng *et al.*. Arrangement design of the final optics assembly for the SG-II upgrading laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1328~1331
- 乔战峰, 卢兴强, 赵东峰 等. 神光升级装置终端光学组件的排布设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1328~1331
- 10 Lü Baida. *Laser Optics Laser Beam Propagation and Beam Quality Control*[M]. 2nd Edition. Sichuan: Sichuan University Press, 1992. 53~71
- 吕百达. *激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制*(第二版)[M]. 四川:四川大学出版社, 1992. 53~71
- 11 Richard Dittion. *Modern Geometrical Optics* [M]. Hunan: Hunan University Press, 2004. 112~117
- 理查德·迪特恩. *现代几何光学*[M]. 詹涵菁 译. 湖南:湖南大学出版社, 2004. 112~117
- 12 Born Wolf. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (Seventh Edition)[D]. Yang Xiasun *et al.* Transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 239~310
- 波恩·沃耳夫. *光学原理:光的传播、干涉和衍射的电磁理论*(第七版)[M]. 杨葭荪 等译. 北京:电子工业出版社, 2005. 239~406
- 13 R. Jimthelanky. *Lens Design Fundamental*[M]. Liang Weisheng Transl. Beijing: China Machine Press, 1985. 64~70
- 金斯莱克. *透镜设计基础*[M]. 梁伟声 译. 北京:机械工业出版社, 1985. 64~70