

光学元件表面缺陷相对位置分布对近场光束质量的影响

尤科伟^{1,2} 张艳丽¹ 张雪洁¹ 张军勇¹ 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对高功率激光装置, 光学元件表面不同分布形态的多个缺陷引起的子光束, 在传输过程中会相互干涉叠加, 引起光束质量发生复杂变化, 因此有必要对缺陷的相对位置关系加以规范。基于光的衍射传输理论, 研究了光学元件表面存在不同空间分布的划痕时光场调制的变化, 以及划痕深度对调制光束近场分布的影响。结果表明, 元件前后表面存在平行或垂直划痕时均会比单一划痕产生更加严重的光束调制, 最大调制度可增至 1.5 倍, 且划痕具有更严格的深度要求。研究结果为光学元件图形制备标准的补充及高功率激光装置大口径光学元件表面缺陷指标的确定提供了重要参考。

关键词 物理光学; 相位调制; 近场光束质量; 表面缺陷; 相对位置分布

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0308004

Influence of Relative Position of Optical Component Surface Defects on Near Field Beam Quality

You Kewei^{1,2} Zhang Yanli¹ Zhang Xuejie¹ Zhang Junyong¹ Zhu Jianqiang¹

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For high-power laser facility, sub-beams caused by multiple defects of optical component surface with different distributions interfere with each other in the transmission process, bringing about complex changes in beam quality. So it is necessary to make a clear limitation on relative position of defects. On the basis of the diffraction transmission theory, when there are scratches with different spatial distributions on the optical element surfaces, the changes of beam modulation are studied. The influence of scratch depths on the distribution of near field beam modulation is also taken into account. Results show that when two parallel or vertical scratches are on the same or different surfaces of an element. Both of them produce more serious modulation than single scratch, and the maximum modulation degree can be increased to 1.5 times. Meanwhile more strict requirements for scratch depth are put forward. The results can provide reference for the revision of optical element standard and the determination of defects specifications for large-diameter elements in high-power laser systems.

Key words physical optics; phase modulation; near field beam quality; surface defect; relative position

OCIS codes 260.1960; 060.5060; 030.1670

收稿日期: 2014-09-26; 收到修改稿日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(11104296)

作者简介: 尤科伟(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光传输演变与质量控制等方面的研究。

E-mail: you.ke.wei@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光器件设计、光学精密机械设计与制造工艺等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

高功率激光装置是在高通量条件下运行的复杂激光工程,装置包含成千上万的大口径光学元件,元件质量的好坏直接影响着装置的输出性能和使用寿命。光学元件由于加工工艺限制,表面会不可避免地存在不同形态的缺陷,包括划痕、麻点、气泡、杂质等,这些缺陷施加到光束上会使传输光束的能量和质量产生变化^[1-6]。当激光通量提高到一定程度时,还将面临表面缺陷引发表面激光损伤的问题^[7-9],因此有必要对这些缺陷的指标提出明确的限定。

光学元件图形制备国际标准 ISO10110 从材料缺陷、表面结构和表面缺陷等方面对光学元件提出了技术和检测要求。其中针对表面缺陷提出了“5/M×A, LM×A”的规范,“5/”表示局部缺陷符号,其后的 M 为最大允许尺寸的局部缺陷数目, A 为一个级数,相当于最大允许的缺陷表面面积的平方根,“L”表示长划痕,其后的 M 为最大允许长划痕的数量, A 为最大允许长划痕的宽度。光学元件使用时,需要根据标准及实际应用需求对缺陷提出相应的指标要求。美国国家点火装置(NIF)即采用 ISO10110 国际标准从散射和能量损耗的角度对大口径光学元件单个表面提出了 5/100×0.125, L1×0.03(单条长划痕长度 L=50 mm)的指标^[10]。从 ISO10110 国际标准及 NIF 指标可以看出它们针对表面缺陷从尺寸和数量进行了严格限制。对 NIF 指标和损耗要求进行分析,上述要求一方面限制了能量的损耗,大量随机分布的缺陷对光束损耗的影响近似等效为完全挡光面积与光束面积之比,随着局部缺陷尺寸及长划痕宽度的增大,缺陷的挡光面积就会增加,从而引起的能量损耗就会增大;另一方面从衍射的角度限制了缺陷对光束的扰动,缺陷的尺寸越大,对光束的扰动也会越强^[11]。针对高功率激光装置,这样的规范不够全面,缺少了对缺陷分布形态的规范,由于激光的强相干性,当一定数量且形态不同的多个缺陷分布于光学元件同一表面或不同表面时,多个缺陷引起的扰动子光束在光束的传输过程中会相互作用、相互影响,产生比单一缺陷更加复杂的情况,使光束质量急剧变差,有可能对光学元件本身及下游元件造成损伤,以至于影响装置的总体负载能力。周丽丹等^[12-13]对大量随机分布缺陷与光束质量的关系做了研究。但鲜有文献对缺陷的具体分布对光束质量的影响做详细的分析。因此在分析不同分布形态的多个缺陷对光场衍射传输影响的基础上,提出高功率激光元件表面缺陷的分布要求是非常重要的,以期能够从更广泛的角度补充光学元件标准。

本文从光束质量分析出发,以单一光学元件上具有不同相对位置关系的两条划痕为例,对光束受光学元件表面缺陷调制后的近场调制程度进行了研究。详细分析了同一表面和不同表面存在平行及垂直划痕的情况,同时分析了划痕深度对调制光束近场区域调制的影响,模拟和分析的结果为光学元件表面缺陷指标的修正提供了参考。

2 缺陷相位调制的模型建立

光学元件表面划痕相互之间存在多种分布形态,为使分析更具代表性,建立如图 1(a)所示的物理模型。光束从光学厚度 D 为 50 mm 的元件前表面传输到后表面,然后在空气中传输一段距离,当研究对象仅为一条划痕时,如图 1(b)所示,当以两条划痕为研究对象时,图 1(c)、(d)所示为两条划痕均位于光学元件前表面的情况,

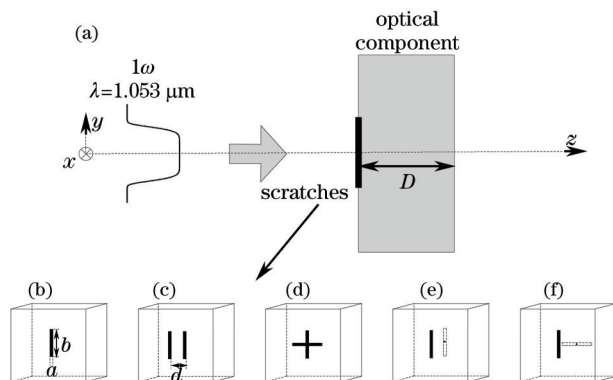


图 1 (a) 物理模型; (b)~(f) 不同划痕情况

Fig.1 (a) Physical model; (b)~(f) different scratch situations

图 1(e)、(f)表示两条划痕分别位于元件前后表面的情况。本文侧重于分析光束在光学元件内部和经过光学元件之后光束质量的变化。为了表征光束受到调制后的畸变程度,用调制度 $P=I_{\max}/I_0$ 来描述光束质量变化,其中 I_0 为入射光强, I_{\max} 为光束传播至 z 处横向光强分布的最大值。同时定义 P_{\max} 为光束传输过程中的最大调制度。

大量文献研究表明,相位扰动对光束质量和光学元件的破坏比振幅扰动要严重得多^[14-16]。光学元件的划痕等缺陷主要引起光束的相位产生局域调制。在一般情况下,其相位调制的透射率函数可表示为

$$t(x,y,z) = \exp[i\phi(x,y,z)], \quad (1)$$

式中 $\phi(x,y,z)$ 表示局域相位畸变的分布。设在光束入射面 $z=0$ 上有一划痕,如图 1(b)所示,则划痕施加到光束上的透射率函数可表示为^[17]

$$t(x,y) = \exp\left\{i\Delta \left[\text{rect}\left(\frac{x-x_0}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_0}{b}\right) \right]\right\}, \quad (2)$$

式中 rect 为矩形函数, Δ 为相位调制幅度, $\Delta = -\frac{(n-1)2\pi e}{\lambda}$, n 为光学元件折射率, e 为缺陷深度, λ 为波长,且 $0 \leq \Delta \leq 2\pi$, a 、 b 为调制宽度, (x_0, y_0) 为相位调制横向中心坐标,其他划痕情况产生的相位调制均可参考(2)式得出。高功率激光装置中运行的是平顶光束,可以用如下超高斯光束模拟输入光场^[18]:

$$E(x,y) = E_0 \exp\left[-\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\omega_0}\right)^N\right], \quad (3)$$

式中 E_0 是超高斯光束的平均振幅, ω_0 是束腰, N 是超高斯光束的阶数。

3 数值模拟与分析

本文基于角谱传输理论^[19-21]对光束经过光学元件之后的近场分布进行了模拟计算。考虑到光束采样间距和采样点需要满足采样定理,在数值模拟过程中选取采样尺寸为 $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$, 采样点为 1024×1024 。设入射光束为 10 阶超高斯光束,波长 λ 为 1053 nm , 束腰 ω_0 为 2 mm 。划痕初始尺寸设为宽度 0.05 mm , 长度 1 mm , 调制深度 Δ 初始值设为 π 。光学元件厚度为 50 mm , 折射率为 1.45 。空气中传输距离为 50 mm 。

3.1 光学元件前表面存在两条平行划痕

考虑光学元件前表面存在两条平行划痕时对光束在元件内部的传输影响,划痕间距为 0.35 mm 。图 2 为入射光束分别在两条平行划痕和单条划痕调制下,调制度随传输距离的变化关系。可以看出 $z < 3.1 \text{ mm}$ 时,两种情况对光束的调制程度基本相同,都在 $z=1.3 \text{ mm}$ 处取得极大值 4.5 [横向相对光强分布见图 3(a),图中 I 为 z 处的光强],这主要是因为当两条划痕存在一定间距时,在一定的传输距离内,两条划痕对光束的调制是两个相互独立的过程,互不干涉。随着传输距离的增加,单条划痕对光束的调制范围逐渐扩大,光束进入单条划痕的远场区域,当 $z > 3.1 \text{ mm}$ 时,两条划痕对光束的调制不再独立,衍射光之间相互干涉叠加,使调制度随距离呈现明显的振荡增加,并于 $z=33.3 \text{ mm}$ 处取得两平行划痕调制的最大值 5.0 [横向相对光强分布见图 3

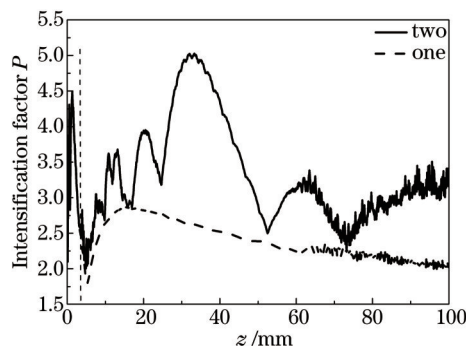


图 2 调制度随传输距离的变化关系(前表面平行划痕间距为 0.35 mm)

Fig.2 Intensification factor versus propagation distance (spacing of the two parallel scratches on the front surface is 0.35 mm)

(b)], 随后调制度逐渐降低, 并趋向于单条划痕的情况。相比单条划痕, 两条平行划痕使 P_{\max} 从 4.49 增加到 5.0, 提高了光学元件内部损伤的风险, 光束受两条平行划痕调制的程度比单条划痕严重, 光束质量变差。

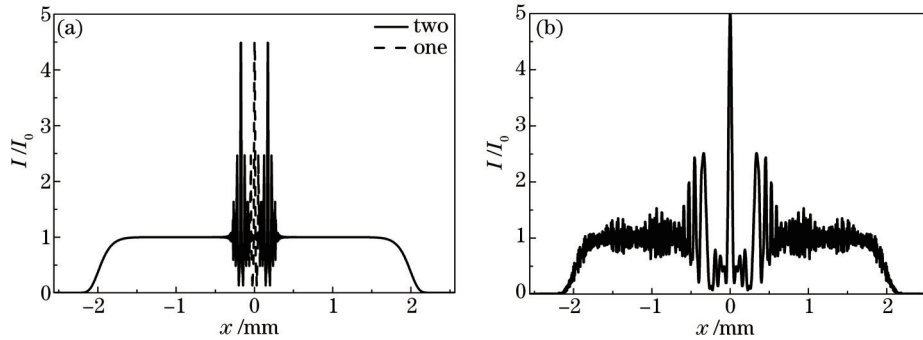


图3 不同传输距离处的横向相对光强分布(前表面平行划痕间距为 0.35 mm)。 (a) $z=1.3$ mm; (b) $z=33.3$ mm
Fig.3 Cross-section relative light intensity distributions at different transmitting ranges (spacing of the two parallel scratches on the front surface is 0.35 mm). (a) $z=1.3$ mm; (b) $z=33.3$ mm

图4所示为划痕尺寸及相位调制幅度不变情况下, 平行划痕间距 d 对光束最大调制度 P_{\max} 的影响。由图4可知, 划痕间距 d 在 0.05~0.42 mm 区域变化时, 最大调制度 P_{\max} 大于单条划痕的最大调制度 4.49, 意味着此时受平行划痕调制的衍射光叠加后对元件的破坏力加强, $d=0.07$ mm 时达到最大为 6.2。当划痕间距 $d > 0.42$ mm 时, 最大调制度保持 4.49 不变, 这说明虽然光束受平行划痕调制质量变差, 但其衍射光叠加对光束的调制程度并没有比单条划痕严重。图5(a)、(b)分别为 $d=0.07$ mm 和 $d=0.5$ mm 时调制度随传输距离的变化关系。当以神光II装置终端光学组件中连续相位片(CPP)和平板窗口的分布为例进行计算时, 为防止 CPP 前表面平行划痕调制光束, 从而对下游平板窗口造成损伤, 必须控制平行划痕之间的间距, 若调制程度控制在单条划痕的 1.2 倍以内且同时降低 CPP 自身受到损伤的风险, 则划痕间距应大于 0.42 mm(见图6)。

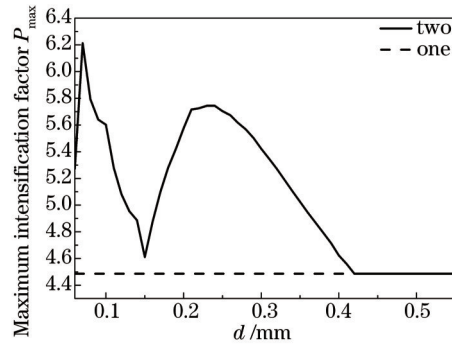


图4 最大调制度随平行划痕间距变化关系(前表面平行划痕尺寸及相位调制幅度)
Fig.4 Maximum intensification factor versus spacing (sizes and modulation depths of the two parallel scratches on the front surface are assured)

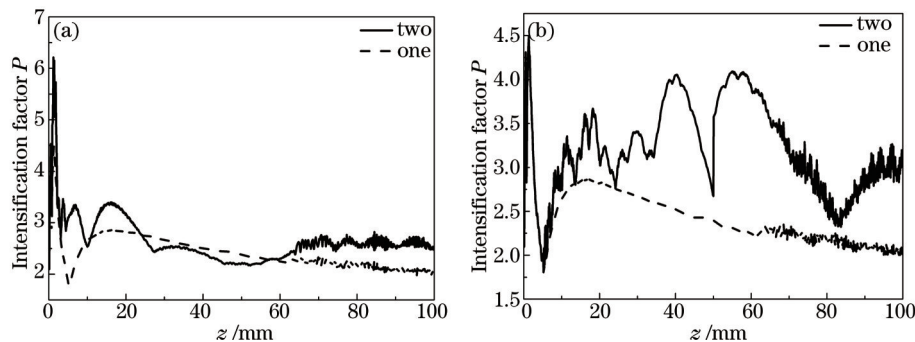


图5 不同划痕间距时调制度随传输距离的变化关系(平行划痕位于前表面)。 (a) $d=0.07$ mm; (b) $d=0.5$ mm
Fig.5 Intensification factor versus propagation distance in different spacings (parallel scratches are on the front surface). (a) $d=0.07$ mm; (b) $d=0.5$ mm

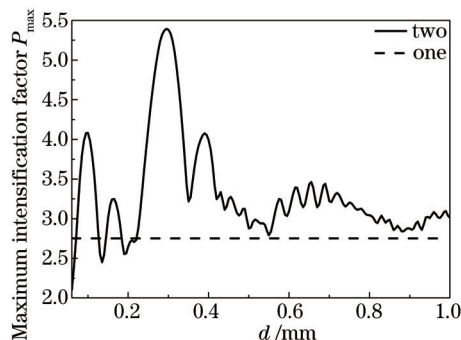


图6 最大调制度随平行划痕间距变化关系(平行划痕位于CPP前表面)

Fig.6 Maximum intensification factor versus spacing (parallel scratches are on the front surface of CPP)

划痕间距 d 为 0.07 mm 和 0.35 mm 时,最大调制度随相位调制幅度的变化情况如图 7 所示,可以看出最大调制度曲线均关于 $\Delta=\pi$ 呈基本对称分布。为了降低光学元件损伤的风险,需将调制度控制在一定阈值以下,若以 2.0 为例,比较图中虚实曲线得出元件表面存在两条平行划痕时允许的相位调制幅度 Δ 的取值范围变小。依据调制幅度 Δ 的表达式,调制幅度在 $[0,\pi]$ 内时,通过计算,对于单条划痕其深度不能超过 0.35λ 。对于两条平行划痕情况(以划痕间距 $d=0.35$ mm 为例),其单条划痕深度不能超过 0.25λ 。因此当光学元件表面存在多个缺陷时,对缺陷深度的限制提出了更高的要求。

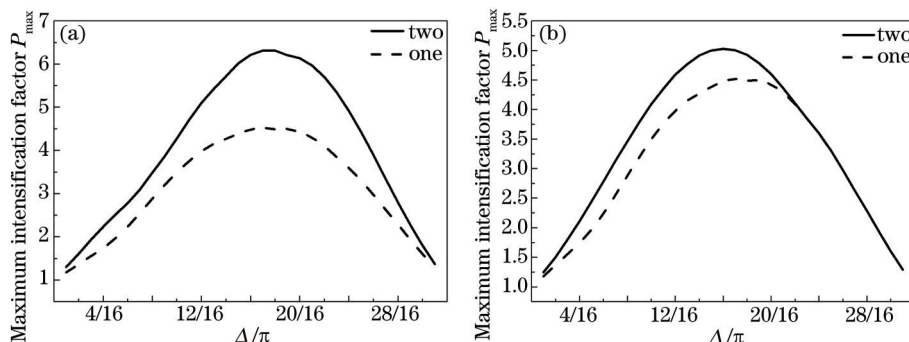


图7 不同划痕间距时最大调制度随调制幅度的变化关系(平行划痕位于前表面)。(a) $d=0.07$ mm; (b) $d=0.35$ mm

Fig.7 Maximum intensification factor versus modulation depth in different spacings (parallel scratches are on the front surface).

(a) $d=0.07$ mm; (b) $d=0.35$ mm

3.2 光学元件前表面存在两条垂直划痕

当划痕在光学元件前表面存在交叉状况、相位调制幅度为 π 时,调制度随传输距离的变化关系如图 8 所示。距离 $z>2.1$ mm 时,划痕交叉对光束的调制程度大于单条划痕情况,结合图 9(a)所示的 $z=16.0$ mm 处的光斑分布,可以发现划痕交叉处对光束的调制程度最大。对比图 9(b)即 $z=1.0$ mm 处的光斑分布,发现此时划痕两端对光束的调制程度最大,这说明了图 8 中 $z<2.1$ mm 时划痕交叉与单条划痕调制度相同的原因。相位调制幅度为 π 时,划痕交叉达到的最大调制度 P_{max} 为 5.8,与单条划痕相比,交叉的划痕同样会引起光束质量的

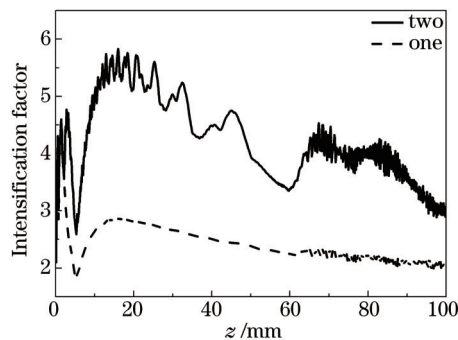


图8 调制度随传输距离的变化关系(垂直划痕位于前表面)

Fig.8 Intensification factor versus propagation distance (vertical scratches are on the front surface)

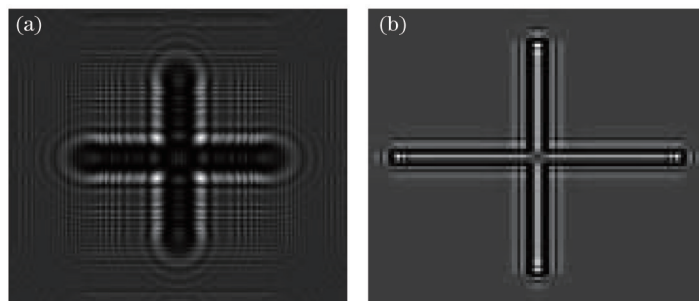


图9 不同传输距离处的输出光斑(垂直划痕位于前表面)。(a) $z=16.0$ mm; (b) $z=1.0$ mm

Fig.9 Light intensity distributions at different transmitting ranges (vertical scratches are on the front surface).
(a) $z=16.0$ mm; (b) $z=1.0$ mm

严重变化。与图4相比,平行划痕只有在间距为0.07~0.08 mm时其对光束的调制程度和引起损伤的风险会大于划痕交叉的状况。

图10所示为前表面划痕交叉时,最大调制度随相位调制幅度的变化,曲线同样关于 $\Delta=\pi$ 对称分布。在 $[0,\pi]$ 范围内,相位调制幅度越大,产生的最大调制度就越大。同样以2.0作为调制度阈值,对于划痕交叉情况,其单条划痕深度不能超过 0.19λ 。因此在光学元件加工、检测过程中,要避免划痕交叉的情况。

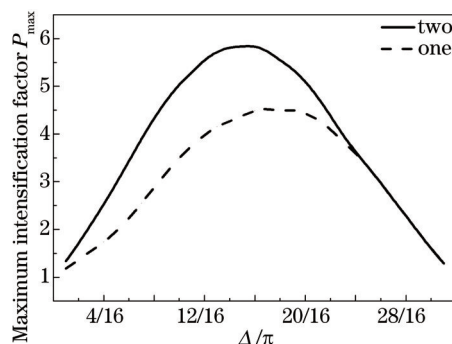


图10 最大调制度随调制幅度的变化关系(垂直划痕位于前表面)

Fig.10 Maximum intensification factor versus modulation depth (vertical scratches are on the front surface)

3.3 光学元件前后表面存在两条平行划痕

划痕分布如图1(e)所示时,即两条划痕分别位于光学元件的前、后表面,且前表面划痕的投影与后表面划痕平行。设初始划痕间距为0,相位调制幅度为 π ,此时经前后表面划痕调制后,调制度随传输距离的变化如图11所示,可以发现与后表面无划痕时相比光束质量严重变差。

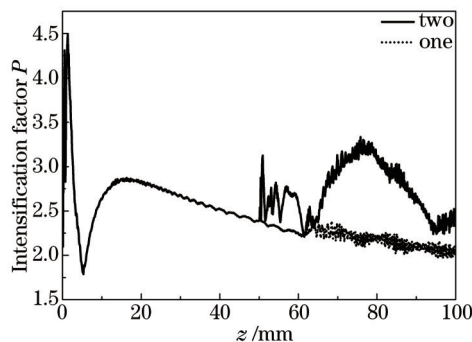


图11 调制度随传输距离的变化关系(前后表面平行划痕间距为0)

Fig.11 Intensification factor versus propagation distance (spacing of the two parallel scratches on the front and rear surfaces are 0)

图12(a)为前后表面划痕调制后,光束在空气中的最大调制度随划痕间距的变化关系。随着间距的增加最大调制度呈振荡性起伏变化,对比光束经前表面划痕调制后在后表面处的横向相对光强分布[如图12(a)虚线所示],可以发现两者的变化趋势完全一致,这意味着当后表面划痕恰巧位于相对光强横向分布的极大值处时,由于相干叠加,最大调制度 P_{max} 也会出现极大值。在前后表面划痕间距为0.21 mm时调制度出现最

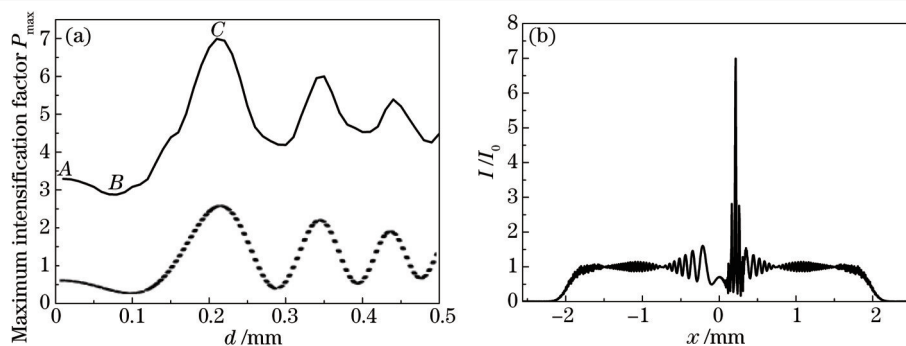


图 12 (a) 最大调制度随划痕间距变化关系; (b) $d=0.21$ mm, $z=50.9$ mm 时横向相对光强分布(平行划痕位于前后表面)
 Fig.12 (a) Maximum intensification factor versus spacing; (b) cross-section relative light intensity distribution, $d=0.21$ mm, $z=50.9$ mm
 (parallel scratches are on the front and rear surfaces)

大值 7.0, 此时的横向相对光强分布如图 12(b) 所示。

前后表面划痕间距不同时, 光束在空气中的最大调制度随相位调制幅度的变化关系如图 13 所示, 三条实线分别对应图 12(a) 中 A、B、C 三点的划痕间距。从图中可以看出, 划痕间距不同时最大调制度的变化状况不同。与光学元件内部最大调制度的变化曲线(图 13 中虚线) 进行比较, 当后表面划痕位于横向光强分布的极大值处即 C 间距时, 光束在空气中的调制程度大于光学元件内部, 此时必须提高对后表面划痕深度的要求。反之, 当后表面划痕位于横向光强分布的极小值处即 B 间距时, 光束在空气中的调制程度基本小于元件内情况, 因此对后表面划痕深度的要求可以降低。

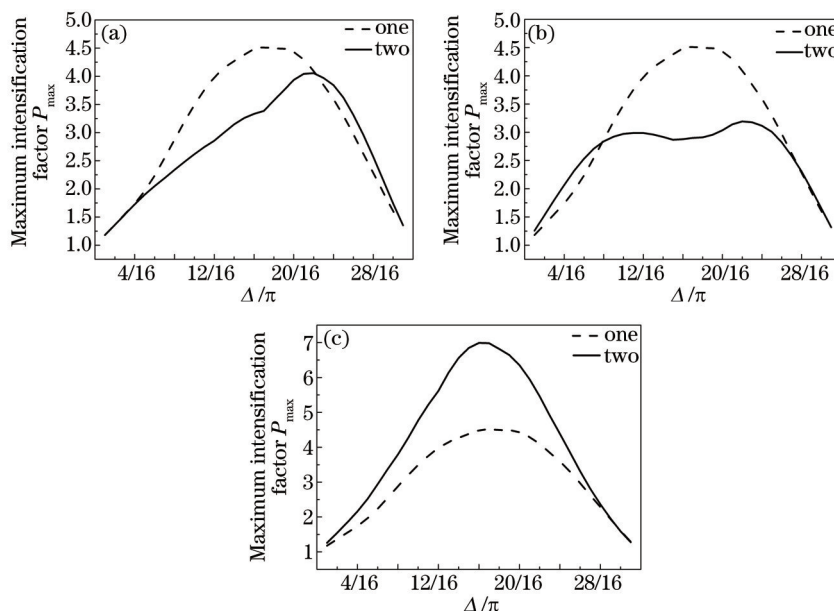


图 13 不同划痕间距下最大调制度随调制幅度变化情况(平行划痕位于前后表面)。 (a) $d=0$; (b) $d=0.08$ mm; (c) $d=0.21$ mm
 Fig.13 Maximum intensification factor versus modulation depth in different spacings between scratches (parallel scratches are on the front and rear surfaces). (a) $d=0$; (b) $d=0.08$ mm; (c) $d=0.21$ mm

3.4 光学元件前后表面存在两条垂直划痕

当划痕分布如图 1(f) 所示时, 图 14(a)、(b) 分别为调制度随传输距离的变化和光束在空气中的最大调制度随相位调制幅度的变化。由图 14(b) 可知, 受前后表面垂直划痕调制的光束, 其最大调制度始终出现在空气中(虚线为光学元件内部最大调制度的变化曲线)。对比图 10 与图 14(b), 可以看出不管垂直划痕分布于同一表面还是不同表面, 最大调制度随相位调制幅度的变化规律基本相同, 都在 $\Delta=\pi$ 时取得最大值 5.8。

4 结 论

基于对光学元件技术要求标准的深入理解, 从衍射传输角度出发, 以划痕为特例, 研究了缺陷相对位置

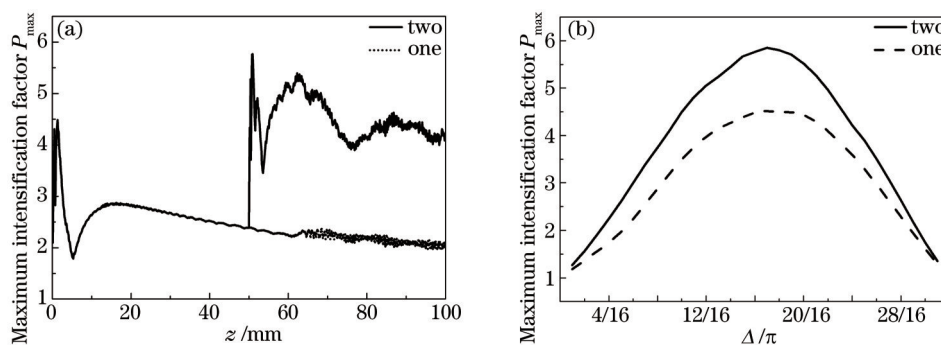


图 14 (a) 调制度随传输距离的变化情况; (b) 最大调制度随调制幅度变化关系(垂直划痕位于前后表面)

Fig.14 (a) Intensification factor versus propagation distance; (b) maximum intensification factor versus modulation depth (vertical scratches are on the front and rear surfaces)

分布对光束质量的影响。结果表明:元件前后表面存在平行或垂直划痕时,光场调制程度均会比单一划痕时严重;平行划痕位于不同表面时,后表面光场分布极大值处应避免存在划痕,倘若划痕位于极小值处,深度要求可适当降低;划痕以不同形式分布于元件表面时,需根据实际状况对划痕深度进行限制,如划痕宽度为 0.05 mm 时,对垂直划痕的深度限制较单条划痕需从 0.35λ 提高至 0.19λ 。因此缺陷在光学元件表面的相对分布及其深度,在加工检测过程中应予以特别重视。研究结果可以为高功率激光装置大口径光学元件设计指标的补充提供一定的参考,但更为确切的要求应结合实际应用而提出。

参考文献

- 1 S Mainguy, B Le Garrec, M Josse. Downstream impact of flaws on the LIL/LMJ laser lines[C]. SPIE, 2005, 5991: 599105.
- 2 S Mainguy, I Tovená-Pecault, B Le Garrec. Propagation of LIL/LMJ beams under the interaction with contamination particles[C]. SPIE, 2005, 5991: 59910G.
- 3 Liu H, Ye X, Zhou X, *et al.*. Subsurface defects characterization and laser damage performance of fused silica optics during HF-etched process[J]. Optical Materials, 2014, 36(5): 855–860.
- 4 Zheng Y, Ma P, Li H, *et al.*. Studies on transmitted beam modulation effect from laser induced damage on fused silica optics[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 16605–16614.
- 5 Jiao Zhaoyang, Zhang Yanli, Zhang Junyong, *et al.*. Influence of phase distortion on near field beam quality in final target system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502004.
焦兆阳, 张艳丽, 张军勇, 等. 终端靶场中相位畸变对近场光束质量的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502004.
- 6 Gao X, Feng G, Zhai L, *et al.*. Effect of subsurface impurities of fused silica on laser-induced damage probability[J]. Optical Engineering, 2014, 53(2): 026101.
- 7 Wang Wei, Zhang Lei, Feng Suyu, *et al.*. Using fluorescent microscopy method to study subsurface defects in Nd-doped phosphate laser glasses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0906001.
王威, 张磊, 冯素雅, 等. 采用显微荧光法研究掺钕磷酸盐激光玻璃的亚表面缺陷[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0906001.
- 8 Guo Yajing, Tang Shunxing, Tang Qing, *et al.*. Study of laser-induced damage in fused silica irradiated by 351 nm laser near-filed [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502004.
郭亚晶, 唐顺兴, 唐清, 等. 基于激光近场辐照的 351 nm 激光诱导熔石英损伤研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502004.
- 9 Zhou Qiong, Zhang Zhixiang, Sun Mingying, *et al.*. Using amplified spontaneous emission source to test damage threshold of optical thin-film[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0814003.
周琼, 张志祥, 孙明营, 等. 采用放大的自发辐射光源测试光学薄膜的损伤阈值[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0814003.
- 10 Lawrence Livermore National Laboratory. Inertial confinement fusion[R]. A Livermore, 1997.
- 11 Su Qianqian, Zhang Guowen, Tao Hua, *et al.*. Effect of the amplitude modulation defects on the intensity distribution and the angular spectrum of a Gaussian beam[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s102004.
苏倩倩, 张国文, 陶华, 等. 振幅调制型“缺陷”对高斯光束的光强分布和角谱的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s102004.
- 12 Zhou Lidan, Su Jingqin, Li Ping, *et al.*. Power spectral density method of defects on optical elements of high-power laser facility and its equivalent algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6279–6284.

- 周丽丹, 粟敬钦, 李 平, 等. 高功率固体激光装置光学元件“缺陷”分布的功率谱密度方法及等效求法[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6279-6284.
- 13 Zhou Lidan, Su Jingqin, Li Ping, *et al.*. Quantitative relation between “defects” distribution on optics and near-field quality in high power solid-state laser system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(2): 253-259.
周丽丹, 粟敬钦, 李 平, 等. 高功率固体激光装置光学元件“缺陷”分布与光束近场质量的定量关系研究[J]. 物理学报, 2011, 60(2): 253-259.
- 14 Zhang Guowen, Lu Xingqiang, Cao Huabao, *et al.*. Diffraction effect of high-power laser beams fthrough 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.
- 15 J T Hunt, K R Manes, P ARenard. Hot images from obscurations[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 5973-5982.
- 16 Zhao Jianlin, Peng Tao, Ye Zhijun. Hot-image effects in high-power solid-state laser systems[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(10): 1315-1322.
赵建林, 彭 涛, 叶知隽. 高功率固体激光系统中的“热像”效应[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1315-1322.
- 17 Su Qianqian, Zhang Guowen, Tao Hua, *et al.*. Properties of the intensity distribution and the angular spectrum of a Gaussian beam with local phase modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1002005.
苏倩倩, 张国文, 陶 华, 等. 高斯光束经局域相位调制后的光强分布和角谱特性[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1002005.
- 18 Lü Baida. *Laser Optics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- 19 J W Goodman. *Introduction to Fourier Optics*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.
- 20 J A Ratcliffe. Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1956, 19(1): 188-267.
- 21 Li Junchang, Peng Zujie, Fu Yunchang. Diffraction transfer function and its calculation of classic diffraction formula[J]. *Optics Communications*, 2007, 280(2): 243-248.

栏目编辑: 史 敏