

熔石英损伤修复坑下游光场调制的数值模拟与实验研究

白阳 张丽娟 廖威 周海 张传超 陈静 叶亚云 蒋一岚 王海军 栾晓雨 袁晓东 郑万国

Study of downstream light intensity modulation induced by mitigated damage pits of fused silica using numerical simulation and experimental measurements

Bai Yang Zhang Li-Juan Liao Wei Zhou Hai Zhang Chuan-Chao Chen Jing Ye Ya-Yun Jiang Yi-Lan Wang Hai-Jun Luan Xiao-Yu Yuan Xiao-Dong Zheng Wan-Guo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024205 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广义双曲正弦-高斯光束经 *gyrator* 变换性质和暗空心光束产生

Gyrator transform of generalized sinh-Gaussian beam and generation of dark hollow light beam with vortex

物理学报.2014, 63(10): 104210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104210>

光束通量空间分布随机变化的统计分析

Statistical analysis of shot-to-shot variation of laser fluence spatial distribution

物理学报.2014, 63(7): 074204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074204>

多子光束相干发射小目标探测研究

Coherent emitting of multiple sub-beams for small target detection

物理学报.2014, 63(3): 034203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034203>

赫兹型微裂纹光场调制增强作用的系统研究

Systematic studies on the field enhancement effect of Hertzian microcracks

物理学报.2013, 62(23): 234203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234203>

形状与位置对断点划痕场分布的影响研究

The effects of shape and position on field distribution of discontinuous crack

物理学报.2012, 61(16): 164207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164207>

熔石英损伤修复坑下游光场调制的数值模拟与实验研究*

白阳¹⁾²⁾ 张丽娟¹⁾ 廖威¹⁾ 周海^{1)†} 张传超^{1)‡} 陈静¹⁾ 叶亚云¹⁾
蒋一岚¹⁾ 王海军¹⁾ 栾晓雨¹⁾ 袁晓东¹⁾ 郑万国¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088)

(2015年8月24日收到; 2015年9月16日收到修改稿)

系统研究了熔石英激光损伤修复后的形貌特征, 根据测量数据建立了典型的损伤修复坑三维模型, 利用标量衍射理论并结合快速傅里叶变换算法研究了修复坑在 351 nm 激光辐照下游光场调制的分布规律. 研究表明, 修复坑引起的光场调制会使得下游不同距离位置处出现环形光场增强区和轴上位置光场增强点; 环形光场增强区位置距离修复元件较近, 其环形调制极大值主要受修复坑深度的影响, 且随修复坑深度的增大而逐渐增加; 轴上位置光场增强点位置距离修复元件较远, 其轴上调制极大值主要受修复坑边缘凸起高度的影响, 且随凸起高度的增大而快速增加; 环形调制极大值或轴上调制极大值增大的同时, 其分布位置与修复元件之间的距离均会逐渐减小. 实验验证表明, 利用三维修复坑模型得到的下游光场调制数值模拟结果与实验测量结果具有较好的一致性. 本研究结果对控制熔石英元件损伤修复形貌特征以抑制调制增强效应给出了具体的控制方向, 对修复工艺的改进与完善提供了非常有意义的参考.

关键词: 熔石英, CO₂ 激光损伤修复, 光场调制, 标量衍射理论

PACS: 42.60.Jf, 42.70.Ce, 61.80.-x, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.65.024205

1 引言

三倍频激光 (351 nm) 诱发熔石英元件表面损伤是限制高功率固体激光驱动装置 (如美国 NIF 装置^[1]、法国 LMJ 装置^[2]、中国 SG 装置^[3]) 负载能力提升的重要因素之一^[4-6]. 目前, 国内外报道的熔石英光学元件损伤修复或抑制损伤增长的方法主要有 HF 酸刻蚀、等离子体刻蚀、微火焰加工和 CO₂ 激光修复, 其中以 CO₂ 激光修复技术最为成熟且有效^[7,8]. 然而, CO₂ 激光修复以熔融或蒸发的方式去除损伤材料, 最终形成一个具有一定形貌特征的光滑凹坑, 凹坑会使入射激光产生强烈的光场调制, 可能造成下游元件的级联损伤^[9-12]. Bass

和 Feit 等^[13,14]的研究结果表明, 光场调制增强与元件修复点的形貌特征密切相关, 因此, 需要控制修复坑形貌以避免造成不可接受的光场调制增强效应.

通常损伤修复点形貌为高斯形, 但由于在 CO₂ 激光辐照熔融过程中存在温度场梯度分布, 在“Marangoni”效应^[15]作用下, 最终在修复坑周围会形成一定高度的边缘凸起. 研究发现, 激光通过这种边缘有突起的高斯形修复区域会导致下游不同距离位置处出现环形光场增强区和轴上位置光场增强点^[16,17]. 对于损伤修复点调制现象国内外已经进行了大量的研究, Adams 等^[9]通过改变 CO₂ 激光参数, 控制修复坑形貌以降低下游光场调

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11404301) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: a697097@163.com

‡ 通信作者. E-mail: zhchch@caep.cn

制引起的元件潜在的损伤威胁; Matthews 等^[16]利用聚焦小光斑多次重复作用修复坑边缘凸起结构,从实验上证实消除边缘凸起形貌可以有效避免下游远距离处的轴上光场调制增强效应; Bass 等^[13]利用蒸发式修复控制边缘凸起形貌在 150 nm 左右,使得下游轴上位置光强调制度最大值 < 2.5 ; Cormont 等^[18]利用大光斑 CO₂ 激光二次辐照损伤修复点使得修复坑边缘凸起从 1300 nm 降低到 650 nm,在一定程度上减弱了下游最大光强调制度; Bourgeade 等^[19]通过仿真计算与实验证明需要控制修复坑形貌来调节下游光场调制影响,但并未给出具体的控制方向;国内研究人员也进行了相关的研究工作,蒋勇等^[17,20,21]从实验上研究了 CO₂ 激光非蒸发式修复,设计了功率逐渐升高的三段式修复方案,有效修复了损伤点,并一定程度上控制了修复点边缘凸起,抑制了下游光场调制增强现象;李莉等^[22-24]基于三维时域有限元差分方法,针对微米量级修复坑、划痕以及污染物颗粒等的对局部区域的电场分布的影响进行了大量研究工作;同时,张彦磊等^[25]基于标量衍射理论针对标准高斯型修复坑 40 cm 范围内的调制光场分布进行了仿真计算. 然而,目前针对真实尺寸修复坑形貌的深度、宽度和边缘凸起高度等具体参数对光场调制影响的一般规律还缺乏系统的研究. 本文根据实际的修复坑形貌建立三维修复坑模型,利用标量衍射理论并结合快速傅里叶变换算法,对修复点下游空间光场分布进行 MATLAB 数值模拟计算并结合实验验证,研究修复坑几何形貌对下游光场调制分布规律的影响. 以期从理论上指导损伤修复形貌设计,避免调制增强效应所造成的元件级联损伤,并为 CO₂ 激光参数(如光斑尺寸、激光频率、功率、作用时间等)的设计提供参考^[17,26,27],进一步指导修复工艺的改进与完善.

2 模型建立与计算方法

选用 Corning7980 型熔石英样品,尺寸为 50 mm × 50 mm × 5 mm,通过前期氢氟酸(HF)溶液刻蚀处理后,首先利用 Nd:YAG 激光器(波长 355 nm,脉宽 6.5 ns)制造不同尺寸大小的损伤点,并利用 Nikon ECLIPSE E600 光学显微镜对损伤形貌进行测量,如图 1(a)所示;然后,采用非蒸发式 CO₂ 激光修复技术对损伤点进行修复,通过

WYKO 白光干涉仪测量修复坑形貌如图 1(b)所示,可以看出,修复坑形貌呈现近高斯型结构;利用 XP-200 接触式轮廓仪精确测量不同尺寸修复坑形貌,如图 1(c)所示. 从图 1(c)可以看出,深度在数微米的光滑修复凹坑边缘还存在一个高度在 200—300 nm 的凸起结构,这种典型的带有边缘凸起的修复坑形貌与文献报道相一致^[13,15-21].

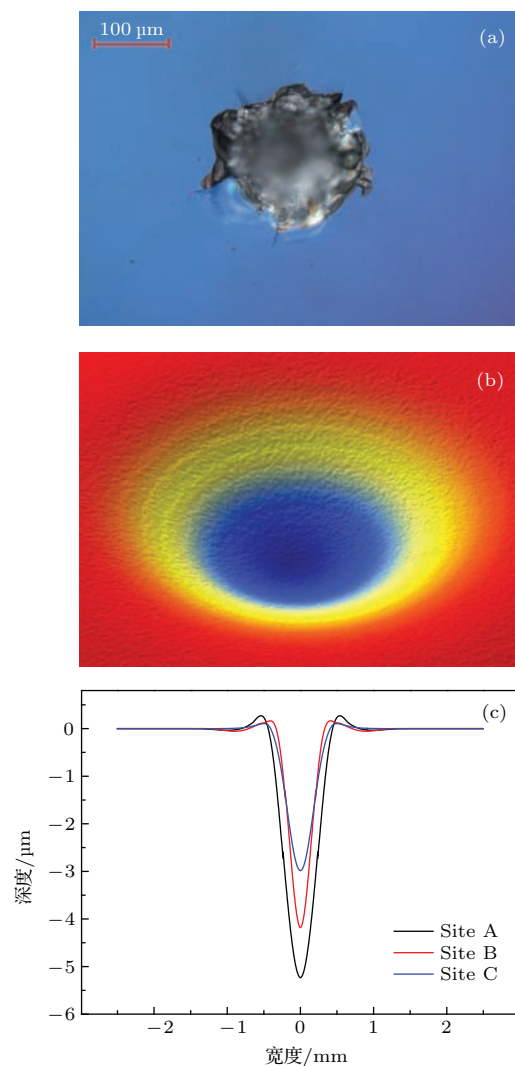


图1 (网刊彩色) 对比样品损伤点修复前后的形貌变化 (a) 修复前损伤点形貌; (b) 修复坑三维形貌; (c) 真实修复坑形貌轮廓

Fig. 1. (color online) Morphology of damage site: (a) Before and (b) after mitigation; (c) morphology profile across the center of the mitigation pit measured by Stylus profilometry.

基于实验中得到的真实修复坑形貌(如图 1(b), (c)所示),结合文献^[17,26,27]报道,表征修复坑形貌主要有四个特征参数:修复坑深度 H 、半高宽度 R_0 、边缘凸起高度 h 以及其相对修复坑中心的位置 r .

通过对修复坑形貌拟合分析, 损伤修复点的三维形貌轮廓可以表示为

$$L = \begin{cases} L_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R_0^2}\right) + c, & x^2 + y^2 \leq r_0^2, \\ a(\sqrt{x^2 + y^2} - r_0) \exp(b(\sqrt{x^2 + y^2} - r_0)), & x^2 + y^2 > r_0^2, \end{cases} \quad (1)$$

其中 L 表示不同位置修复坑深度, $x^2 + y^2 \leq r_0^2$ 区域表示熔融凹坑区域形貌特征, $x^2 + y^2 > r_0^2$ 区域表示边缘凸起形貌特征, 如图 2 所示.

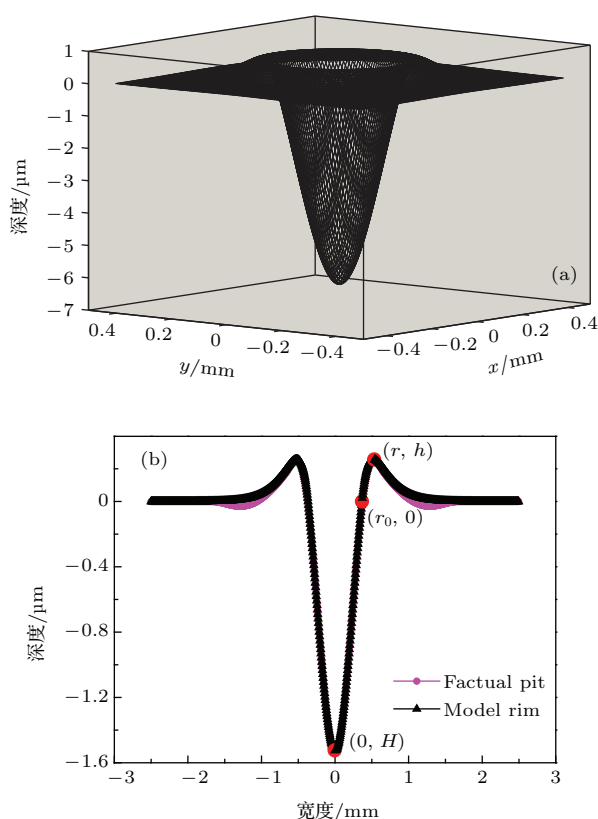


图 2 (网刊彩色) (a) 修复坑三维形貌模型; (b) 模型轮廓与真实修复坑二维轮廓对比

Fig. 2. (color online) (a) 3D morphology model of mitigated site; (b) modeled morphology profile compared with factual mitigated site.

根据修复点位于元件的实际位置, 数值模拟计算过程中只考虑修复坑位于元件出光面的情形(如图 3 所示, 即位于修复元件后表面), 假设以 351 nm 的单位振幅平行光垂直入射, 由于在光束没有到达修复坑底部之前, 整个入射光束产生相同的相位延迟, 故在光强调制计算过程中忽略这部分的相位延迟, 最终获得元件出光面的光波复振幅分布 $U(x_0, y_0) = \exp(i\varphi)$, 其中 φ 表示光束通过修复区

域后引入附加相位, 其与修复坑的形貌密切相关, 表达式为

$$\varphi(x_0, y_0) = k(n(H + L(x_0, y_0)) - L(x_0, y_0) + h), \quad (2)$$

其中波数 $k = 2\pi/\lambda$, n 为熔石英折射率, H 表示修复坑深度, h 表示边缘凸起高度.

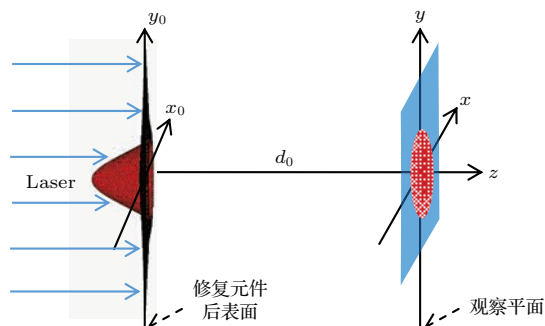


图 3 (网刊彩色) 修复坑形貌的光传输模型示意图

Fig. 3. (color online) Schematic of light propagation model for mitigated pit.

光波从修复元件后表面经距离 d_0 传播到达下游观察平面, 根据菲涅耳衍射积分公式^[28], 可以得到该平面上的光波复振幅分布为

$$U(x, y) = \frac{\exp(ikd_0)}{i\lambda d_0} \iint U(x_0, y_0) \exp\left\{\frac{ik}{2d_0}[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0. \quad (3)$$

其调制光强分布为

$$I = UU^*. \quad (4)$$

并结合文献中对调制度的定义^[12], 观察平面上对应的光场调制度

$$M = \frac{I_{\max} - B}{I_0 - B}, \quad (5)$$

其中, $I_{\max}$ 表示调制后在观察平面上的光强最大值, I_0 表示无调制影响的光强分布, B 表示背景噪声. 在仿真模拟中不考虑背景光等的噪声影响, 取 I_0 为 1.

3 数值模拟结果与实验结果分析

3.1 数值模拟结果分析

数值模拟得到修复点对入射光的调制特性如图 4(a) 所示, 通过在 xz 平面的调制光强分布可以

看出随着传播距离的增加光场调制分布表现出两种截然不同的特征: 在距离修复点较远处表现离轴的调制增强环, 在修复点下游较远的距离处表现出显著的轴上调制增强点. 调制度随光束传播距离的变化趋势如图 4(b) 所示, 可以明显观察到调制度曲线具有两个极大值峰, 第一个调制度极大

值 (first peak, FP) 位置处, 在垂直于光传播方向的平面上光强分布呈环形, 如图 4(c) 所示, 称为环形调制极大值; 在第二个调制度极大值 (second peak, SP) 位置处, 在垂直于光传播方向的平面上光强分布呈轴上增强点, 如图 4(d) 所示, 称为轴上调制极大值, 两种光强分布均与文献报道一致 [16,17].

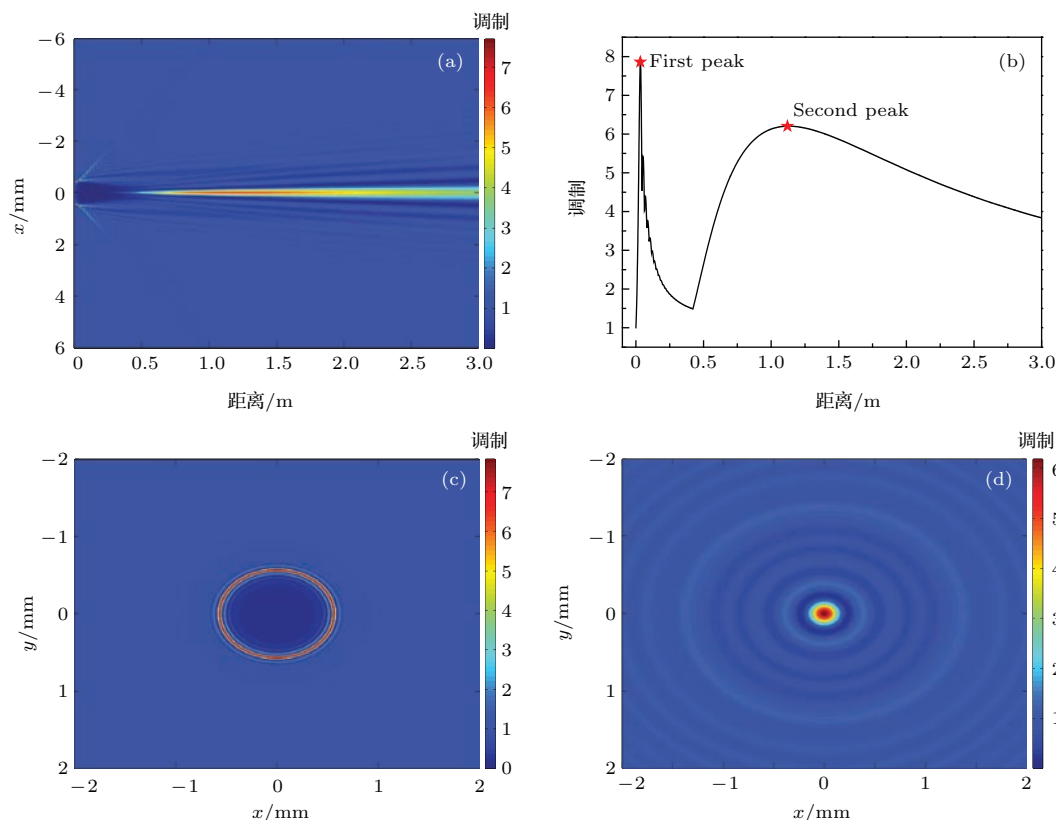


图 4 (网刊彩色) (a) xz 平面光强分布; (b) 调制度随传播距离变化; (c) 环形调制极大值 FP 位置处光强分布; (d) 轴上调制极大值 SP 位置处光强分布

Fig. 4. (color online) (a) Light intensity distribution in xz plane; (b) modulation as a function of distance; (c) intensity distribution of maximum ring caustic intensification FP; (d) intensity distribution of maximum on-axis hot-spot intensification SP.

为了深入研究修复坑形貌参数对光场调制的影响规律, 在数值模拟过程中, 通过逐一改变修复坑形貌参数的取值 (参数范围, H , $0.6\text{--}6\text{ }\mu\text{m}$; R_0 , $0.2\text{--}0.32\text{ mm}$; h , $100\text{--}400\text{ nm}$; r , $0.4\text{--}0.52\text{ mm}$), 在满足奈奎斯特抽样定理的同时结合 FFT 算法计算得到修复元件下游任意位置的光场分布, 研究调制度变化规律, 并与实验测量结果进行比较分析.

3.1.1 修复坑深度和半高宽度对下游光场调制的影响

以环形调制极大值 FP 和轴上调制极大值 SP 来评判修复坑深度和半高宽度对下游调制的影响.

取凸起高度 $h = 200\text{ nm}$ 和凸起位置 $r = 0.5\text{ mm}$, 修复坑深度 H 变化范围 $0.6\text{--}6\text{ }\mu\text{m}$, 半高宽度 R_0 变化范围 $0.2\text{--}0.32\text{ mm}$ 时, FP 值的变化如图 5(a) 所示. 可以明显看出修复坑深度对 FP 值的影响较大, 当固定 R_0 不变, H 从 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $6\text{ }\mu\text{m}$ 时, FP 值增大为原来的 3 倍左右; 半高宽度对 FP 值的影响随着修复坑深度的降低而逐渐减小, 当 $H < 2\text{ }\mu\text{m}$ 时, 随着 R_0 的增大 FP 值基本保持不变. 同时, FP 分布位置变化如图 5(b) 所示, 可以看出 FP 分布位置主要受修复坑深度的影响, 而半高宽度对其影响并不明显, 并且当 R_0 固定不变时, FP 分布位置随着 H 的增大而靠近修复元件的出光面.

修复坑深度 H 和半高宽度 R_0 变化对轴上调制极大值 SP 的影响如图 5(c) 所示, H 和 R_0 变化范围内调制度仅改变 0.4, 即说明 H 和 R_0 的变化对 SP 值的影响很小. 然而, H 与 R_0 对 SP 分布位置影响很大, 如图 5(d) 所示, 随着 H 或 R_0 的增加 SP 分布位置从 5—1 m 逐渐靠近修复元件. 通过以上数值模拟分析可以得出, 修复坑深度和半高宽度主要影响

环形调制极大值 FP 及其分布, 其中修复坑深度对 FP 大小的影响最大, 并且当修复坑深度 $H < 2 \mu\text{m}$ 时, 调制度极大值 (FP 和 SP) 的分布位置均对 H 的变化极为敏感. 因此, 选择合适尺寸的 CO_2 激光光斑来修复损伤点, 通过优化修复参数来尽量减小修复坑深度, 以降低光强调制增强效应, 减小对下游元件的损伤威胁.

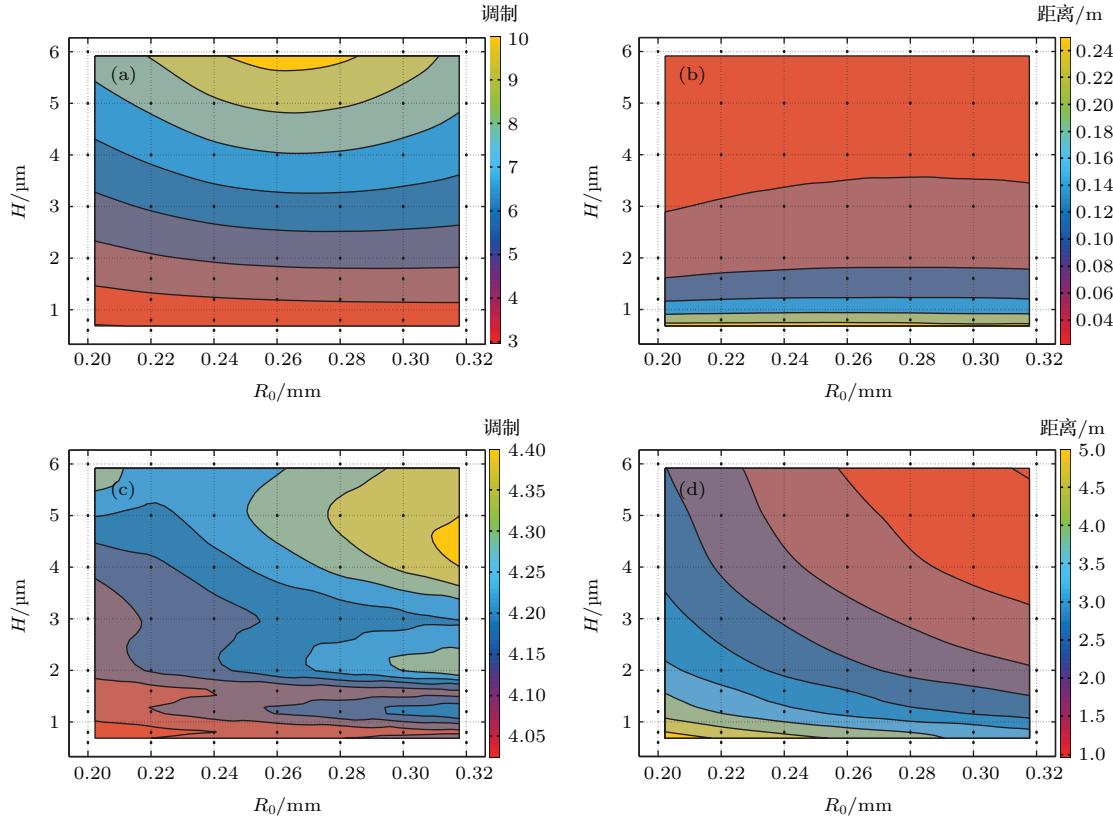


图5 (网刊彩色) (a) 环形调制极大值 FP 随修复坑深度 H 和半高宽度 R_0 变化分布图; (b) 环形调制极大值 FP 分布位置随修复坑深度 H 和半高宽度 R_0 的变化; (c) 轴上调制极大值 SP 随 H 及 R_0 变化分布图; (d) 轴上调制极大值 SP 分布位置随 H 和 R_0 的变化

Fig. 5. (color online) (a) Maximum ring caustic intensification FP as a function of depth H and FWHM R_0 ; (b) distribution of the maximum ring caustic intensification FP as a function of H and R_0 ; (c) maximum on-axis hot-spot intensification SP as a function of H and R_0 ; (d) distribution of the maximum on-axis hot-spot intensification SP as a function of H and R_0 .

3.1.2 边缘凸起结构对下游光场调制的影响

为了研究边缘凸起结构对下游调制的影响, 取修复坑深度 $H = 1.8 \mu\text{m}$ 和半高宽度 $R_0 = 0.27 \text{ mm}$, 改变凸起高度变化范围 100—400 nm 和凸起位置 r 范围 0.4—0.52 mm, 环形调制极大值 FP 的变化如图 6(a) 所示, 可以看出边缘凸起形貌对 FP 值的影响非常有限, 当凸起位置 r 不变, h 从 100 nm 增加到 400 nm 时, FP 值从 4.6 逐渐增大到 5.3, 增幅仅 0.7; 当凸起高度 h 不变, 随着 r 的增大 FP 值基本保持不变. 凸起形貌变化对 FP 分布位置的影响如图 6(b) 所示, 可以看出, 当固定 r 增加

h 或者固定 h 减小 r 都会使得 FP 分布位置逐渐靠近修复元件出光面, 但在 h 与 r 的变化范围内, FP 分布位置的变化范围仅 0.05 m. 边缘凸起高度 h 和位置 r 对轴上调制极大值 SP 的影响如图 6(c) 所示, 可以明显看出 SP 值受凸起高度 h 的影响非常显著, 基本不受凸起位置 r 变化的影响, 当 h 从 100 nm 增加到 400 nm 时, SP 值从 2.0 逐渐增大到 10, 增加了 4 倍. 然而, 由图 6(d) 中可以看出, 凸起形貌对 SP 分布位置主要受凸起位置 r 的影响, 而凸起高度对其影响较小, 当固定 h , r 从 0.4 mm 增加到 0.52 mm 时, SP 分布位置从 1—3 m 逐渐远离修复元件. 以上

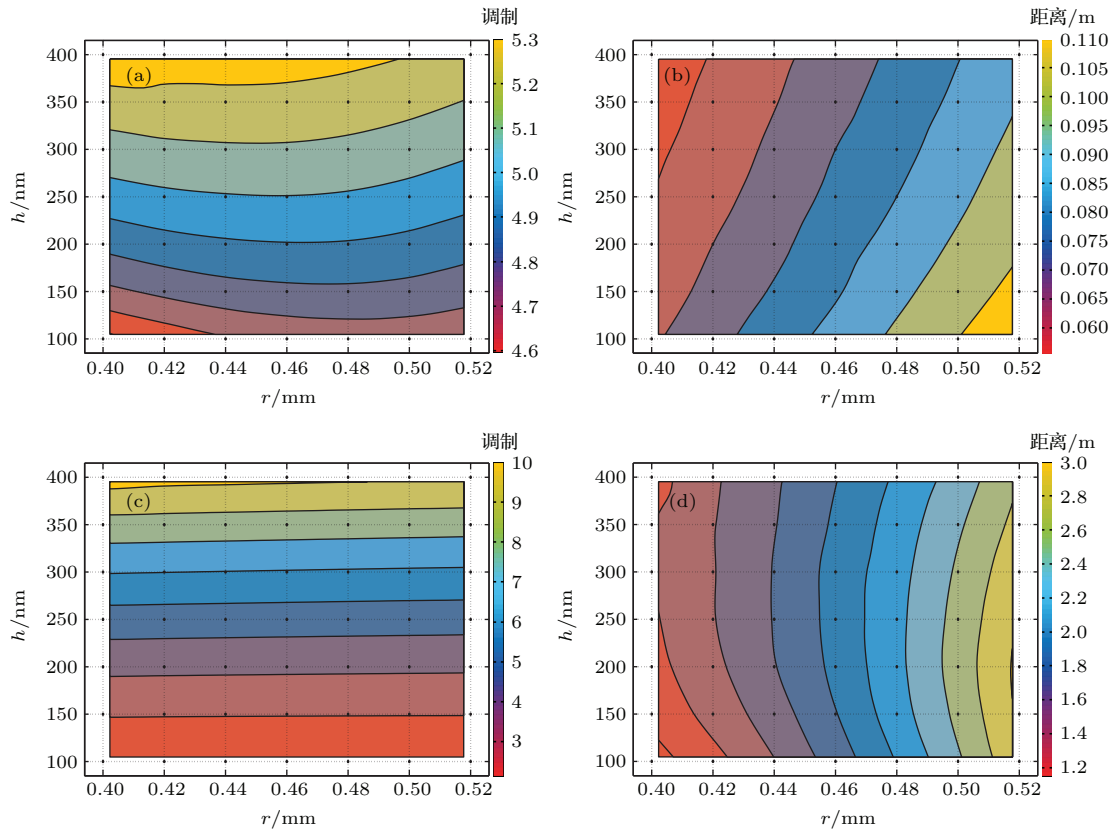


图6 (网刊彩色) (a) 环形调制极大值FP随边缘凸起高度 h 和位置 r 变化分布图; (b) 环形调制极大值FP分布位置随凸起高度 h 和位置 r 的变化; (c) 轴上调制极大值SP随 h 及 r 变化分布图; (d) 轴上调制极大值SP分布位置随 h 和 r 的变化

Fig. 6. (color online) (a) Maximum ring caustic intensification FP as a function of rim height h and location r ; (b) distribution of the maximum ring caustic intensification FP as a function of h and r ; (c) maximum on-axis hot-spot intensification SP as a function of h and r ; (d) distribution of the maximum on-axis hot-spot intensification SP as a function of h and r .

分析表明凸起形貌变化主要影响调制峰值SP的大小及其分布位置. 因此, 若要控制轴上调制极大值SP, 必须控制凸起高度; 而控制SP分布位置结合图5(d)讨论, 需要注意修复坑深度, 半高宽度以及凸起位置的综合影响.

以上分析结果表明, 环形调制极大值FP主要受修复坑深度 H 变化的影响, 修复坑越深, 极大值FP越大; 而轴上调制极大值SP主要受边缘凸起高度变化的影响, 凸起越高, 极大值SP越大; 调制极大值(FP或SP)的分布位置受到修复坑形貌各个参数(H, R_0, h, r)的综合影响, 并且随着修复坑深度的增加与边缘凸起高度的增大, 而靠近修复元件. 值得注意的是修复坑深度变化对调制度随传播距离变化曲线的影响如图7所示, 可以看出调制度曲线的第一个波峰半高宽度随着修复坑深度的增加而减小, 这一现象有利于将极大值FP控制在修复元件与下游第一个元件之间, 从而使得下游元件上的光场调制尽可能小. 同时, 根据文献报道当

调制度低于3时认为就可以接受^[11](safe modulation), 因此, 当元件处于FP与SP中间位置时, 在调制度低于3的区域即为安全区域(safe field). 从图7可以明显看出, 随着修复坑深度的增加, 安全区域的范围将逐渐减小.

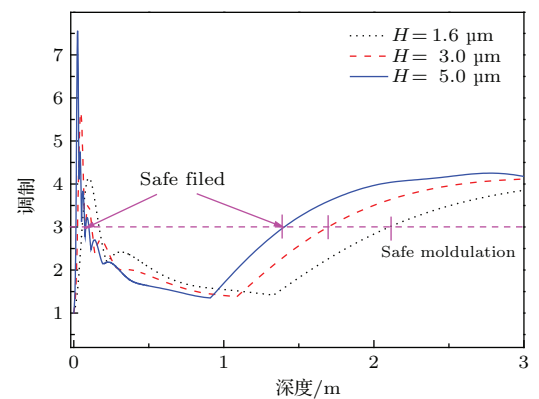


图7 修复坑深度 H 变化对调制度随传播距离变化曲线的影响

Fig. 7. Downstream modulation change with the distance increase, when the depth H is different.

3.2 数值模拟与实验测量结果对比分析

为了验证数值模拟结果的有效性, 我们进行了相应的实验研究. 测量调制光场分布的光路设计如图8所示, 采用Photonics公司生产的DC100-351激光器, 通过直径为30 μm 的小孔滤波获取均匀度较好的点光源, 然后利用焦距 f 为300 mm的凸透镜对光束进行准直, 以获得均匀的平行光束垂直入射到样品修复坑区域, 并利用光斑品质分析仪测量记录修复元件下游0—3 m范围内的光场分布, 通过(5)式计算调制度大小. 在实验中得到环形调制极大值FP和轴上调制极大值SP位置处光强分布分别如图9(a)与(b)所示, 与图4(c)和(d)中的数值模拟结果的光场分布具有很好的一致性.

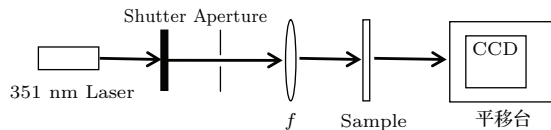


图8 调制光场测量示意图

Fig. 8. Schematic of modulation measurement system.

为了进一步验证数值模拟结果是否与实验结果一致, 对不同尺寸的A, B, C损伤修复点的形貌参数进行了系统的测量, 具体参数如表1所示. 对

不同点的光场调制分别进行了测试与计算, 其对比结果如图10与表2所示.

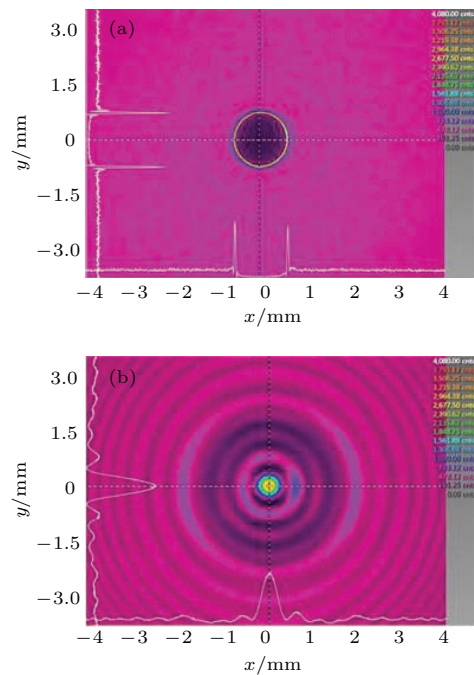


图9 (网刊彩色) 调制度极大值位置光场分布测量结果 (a) 离轴位置FP 环形光强分布; (b) 轴上位置SP 光束聚焦现象

Fig. 9. (color online) Measurement of the maximum intensity modulation: (a) Off-axis “ring caustic” intensification; (b) on-axis “hot-spot” intensification.

表1 不同损伤点对应修复形貌参数

Table 1. Parameters of mitigation morphology for different damage sites.

编号	损伤点尺寸/ μm	修复点尺寸			
		$H/\mu\text{m}$	R_0/mm	h/nm	r/mm
A	230	5.2353	0.35800	263.85	0.53110
B	244	5.1652	0.21665	213.35	0.40383
C	160	2.5992	0.18078	200.01	0.36584

表2 不同修复点光强调制测量结果与计算结果比较

Table 2. The comparing between measurement result and calculation result.

编号	FP 值	FP 分布位置/m	SP 值	SP 分布位置/m
	(测量/模拟计算)	(测量/模拟计算)	(测量/模拟计算)	(测量/模拟计算)
A	7.3/7.8	0.031/0.033	7.3/6.2	1.83/1.13
B	$\geq 8.3/9.4$	$\leq 0.015/0.022$	6.9/4.6	1.79/0.99
C	6.5/6.0	0.023/0.036	5.8/4.2	1.64/1.32

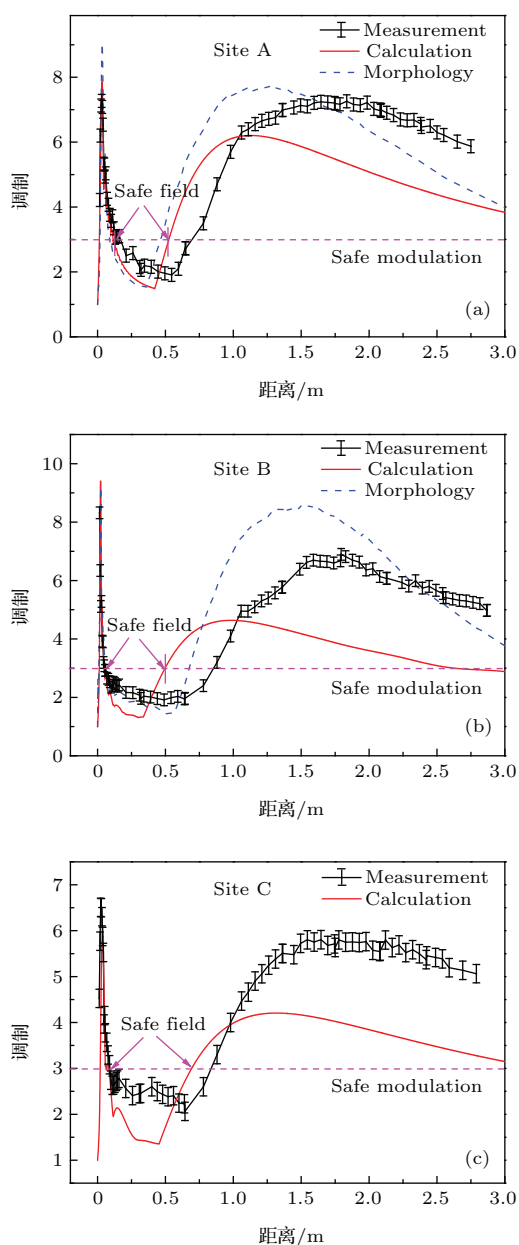


图10 (网刊彩色) 光场调制随传输距离的变化测试曲线 (a) site A; (b) site B; (c) site C

Fig. 10. (color online) Measurement of downstream modulation for different mitigation sites: (a) Site A, (b) site B, (c) site C.

对比图10(a), (b), (c)测量结果(图中黑色曲线)与模型计算结果(图中红色曲线),可以看出,在误差允许范围内三维修复坑数值模型可以准确的反应光场调制在距离修复元件较近位置处环形调制随传播距离的变化;然而,随着传播距离的增大,三维修复坑数值模型计算得到的轴上调制与测量结果误差增大.分析数值模拟与实验测量结果之间的误差原因,首先,三维修复坑模型是一个只关注了修复坑特征形貌参数(H, R_0, h, r)的简化模型,而实际修复坑边缘凸起形貌外沿还存在一圈环形

凹槽(如图2(b)所示),凹槽会使得修复区域对光束的发散作用增大,导致轴上光场调制增强的同时使得极大值位置向后偏移.图10(a)与(b)中的蓝色虚线即表示利用台阶仪测量得到的修复坑形貌计算得到的调制度随传播距离变化结果,可以明显看出,对比三维修复坑模型计算结果,包含环形凹槽结构的真实修复坑形貌计算结果与实验测量结果误差相对减小.其次,数值模拟中忽略了修复所引起的激光辐照区域的残余应力对材料光学性质的影响^[29],也会引起实验与计算结果之间的误差.

总体上实验结果与数值模拟结果能有较好的一致性,数值模拟能够真实地反映修复坑形貌参数对光场调制的影响规律.相比较真实的修复坑形貌,三维修复坑数值模型是一个忽略了多重细节因素的简化模型,其在第一个调制度峰值区域准确度较高;尽管在第二个调制度峰值区域偏离实际测量结果,但仍能够反映修复坑形貌对调制度变化的影响趋势;并且从图10中模拟计算结果与测量结果安全区域范围对比可以看出,模型计算范围总小于实际测量范围,即表明利用三维修复坑模型计算得到安全区域范围比较保守,元件分布在这一范围内必然能够有效避免调制增强效应所引起的元件级联损伤;更为重要的是,根据SGII终端光学元件排布^[27]可以看出,在终端元件排布范围(< 50 cm)内数值计算结果与实际测量结果误差很小,因此,数值计算得到的结果对于指导修复工艺的改进具有很大的指导意义.

为了避免修复引入的调制增强效应对下游任意位置元件的损伤威胁,控制修复坑深度越浅越好,凸起高度越低越好,结合文献中激光参数对修复坑形貌的影响^[17,26,27],即需要在保证损伤点能够完全修复的同时,提高激光频率,降低激光功率,缩短作用时间.当调制度低于3时认为就可以接受^[11],在合理的修复坑半高宽度和凸起曲率情况下,需要控制修复坑深度小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,边缘凸起高度小于 150 nm (与文献^[13]中报道对凸起形貌的控制的高度相一致).

4 结 论

熔石英元件损伤修复形貌会引起入射激光产生强烈的光场调制,并可能造成下游元件的级联损伤.带有边缘凸起结构的修复坑形貌导致元件下游

光场调制出现两次极大值,即环形调制极大值FP与轴上调制极大值SP.模拟计算结果与实验结果一致表明调制度大小及其分布位置与修复坑形貌参数(修复坑深度、半高宽度、边缘凸起高度以及其相对修复坑中心的位置)密切相关:

- 1) 调制度极大值FP的大小主要受修复坑深度影响,并随着修复坑深度的增加而逐渐增大;
- 2) 调制度极大值SP的大小主要受边缘凸起高度影响,并随着凸起高度的增加快速增大;
- 3) 调制度极大值(FP或SP)的分布位置受到修复坑形貌各个参数的综合影响,并且随着修复坑深度的增加与边缘凸起高度的增大,而靠近修复元件;
- 4) 调制度极大值(FP和SP)增大的同时,其分布位置与修复元件出光面之间的距离将会逐渐减小,并且随着修复坑深度的增加,安全区域的范围也将逐渐减小.

参考文献

- [1] Miller G H, Moses E I, Wuest C R 2004 *Opt. Eng.* **43** 2841
- [2] Andre M L 1997 *Proc. SPIE* **3047** 38
- [3] Peng H S, Zhang X M, Wei X F, Zheng W G, Jing F, Sui Z, Fan D Y, Lin Z Q 1999 *Proc. SPIE* **3492** 25
- [4] Bercegol H, Bouchut P, Lamaignere L, Le G B, Raze G 2003 *Proc. SPIE* **5273** 312
- [5] Bass I L, Draggo V G, Guss G M, Hackel R P, Norton M A 2006 *Proc. SPIE* **6261** A2612
- [6] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, Menapace J A, Borden M R, Whitman P K, Yu J, Runkel M, Riley M O, Feit M D, Hackel R P 2004 *Proc. SPIE* **5341** 84
- [7] Hrubesh L W, Norton M A, Molander W A, Donohue E E, Maricle S M, Penetrante B M, Brusasco R M, Grundler W, Butler J A, Carr J W, Hill R M, Summers L J, Feit M D, Rubenchik A, Key M H, Wegner P J, Burnham A K, Hackel L A, Kozlowski M R 2002 *Proc. SPIE* **4679** 23
- [8] Liu C M, Yang L, Yan Z H, Jiang Y, Wang H J, Liao W, Xiang X, He S B, Lü H B, Yuan X D, Zheng W G, Zu X T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094701 (in Chinese) [刘春明, 杨亮, 晏中华, 蒋勇, 王海军, 廖威, 向霞, 贺少勃, 吕海兵, 袁晓东, 郑万国, 祖小涛 2013 物理学报 **62** 094701]
- [9] Adams J J, Bolourchi M, Bude J D, Guss G M, Matthews M J, Nostrand M C 2010 *Proc. SPIE* **7842** 784223
- [10] Brusasco R M, Penetrante B M, Butler J A, Hrubesh L W 2002 *Proc. SPIE* **4679** 40
- [11] Guss G, Bassa I, Draggo V, Hackel R, Payne S, Lancaster M, Mark P 2007 *Proc. SPIE* **6403** M4030
- [12] Runkel M, Hawley-Fedder R, Widmayer C, Williams W, Weinzapfel C, Roberts D 2005 *Proc. SPIE* **5991** H9912
- [13] Bass I L, Guss G M, Nostrand M J, Wegner P J 2010 *Proc. SPIE* **7842** 784220
- [14] Feit M D, Rubenchik A M 1997 *Proc. SPIE* **3047** 971
- [15] Anthony T R, Cline H E 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 3888
- [16] Matthews M J, Bass I L, Guss G M, Widmayer C C, Ravizza F L 2007 *Proc. SPIE* **6720** A7200
- [17] Jiang Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [蒋勇 2012 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [18] Cormont P, Gallais L, Lamaignere L, Rullier J L, Combis P, Hebert D 2010 *Opt. Express* **18** 2526068
- [19] Bourgeade A, Donval T, Gallais L, Lamaignere L, Rullier J L 2015 *J. Opt. Soc. Am. B: Optical Physics* **32** 655
- [20] Jiang Y, Liu C M, Luo C S, Yuan X D, Xiang X, Wang H J, He S B, Lü H B, Ren W, Zheng W G, Zu X T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054216
- [21] Jiang Y, Xiang X, Liu C M, Luo C S, Wang H J, Yuan X D, He S B, Ren W, Lü H B, Zheng W G, Zu X T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 064219
- [22] Zhang C L, Liu C M, Xiang X, Dai W, Wang Z G, Li L, Yuan X D, He S B, Zu X T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 164207 (in Chinese) [章春来, 刘春明, 向霞, 戴威, 王治国, 李莉, 袁晓东, 贺少勃, 祖小涛 2012 物理学报 **61** 164207]
- [23] Zhang C L, Wang Z G, Xiang X, Liu C M, Li L, Yuan X D, He S B, Zu X T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114210 (in Chinese) [章春来, 王治国, 向霞, 刘春明, 李莉, 袁晓东, 贺少勃, 祖小涛 2012 物理学报 **61** 114210]
- [24] Li L, Xiang X, Zu X T, Yuan X D, He S B, Jiang X D, Zheng W G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 044212
- [25] Zhang Y L, Xiao J, Yuan X D, He S B, Jiang Y, Liu C M 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **8** 1806 (in Chinese) [张彦磊, 肖峻, 袁晓东, 贺少勃, 蒋勇, 刘春明 2012 强激光与粒子束 **8** 1806]
- [26] Dai W, Xiang X, Jiang Y, Wang H J, Li X B, Yuan X D, Zheng W G, Lv H B, Zu X T 2011 *Opt. Lasers Eng.* **49** 273
- [27] Palmier S, Gallais L, Commandre M, Cormont P, Courchinoux R, Lamaignere L, Rullier J L, Legros P 2009 *Appl. Surf. Sci.* **255** 5532
- [28] Lü N G 2006 *Fourier Optics 2* (Beijing: China Machine Press) pp87–93 (in Chinese) [吕乃光 2006 傅里叶光学 2 (北京: 机械工业出版社) 第 87—93 页]
- [29] Zhang C C, Zhang L J, Liao W, Yan Z H, Chen J, Jiang Y L, Wang H J, Luan X Y, Ye Y Y, Zheng W G, Yuan X D 2015 *Chin. Phys. B* **24** 024220

Study of downstream light intensity modulation induced by mitigated damage pits of fused silica using numerical simulation and experimental measurements*

Bai Yang¹⁾²⁾ Zhang Li-Juan¹⁾ Liao Wei¹⁾ Zhou Hai^{1)†} Zhang Chuan-Chao^{1)‡}
 Chen Jing¹⁾ Ye Ya-Yun¹⁾ Jiang Yi-Lan¹⁾ Wang Hai-Jun¹⁾ Luan Xiao-Yu¹⁾
 Yuan Xiao-Dong¹⁾ Zheng Wan-Guo¹⁾

1) (Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

(Received 24 August 2015; revised manuscript received 16 September 2015)

Abstract

For high-power UV laser facilities, one of the key problems limiting the maximum light influence and safe routine operation is that the UV laser induces damage to fused silica optics. The most effective mitigation protocol of the damaged optics is the CO₂ laser processing that leads to make locally melt or evaporate the damage. While the mitigated damage sites possess particular morphology, which may modulate the passing laser beam and induce the downstream intensification that will ruin the neighbor optics. In this work, the morphology features of the mitigated damage pits of fused silica optics are systematically investigated. According to the measured morphology features, a 3D grid model of mitigated pit is built, and the downstream light intensity distribution of the mitigated pit model under incident 351 nm laser is studied by scalar diffraction theory and fast fourier transform (FFT) methods. Results indicate that there are two kinds of downstream intensification: off-axis and on-axis intensifications. In the former intensification, the maximum intensity is located near the output surface of the optics and comes mainly from the depth of the mitigated pit; it increases with the depth. In the alter intensification, the maximum intensity is located far from the output surface of the optics and is mainly dependent on the height of the rim structure at the fringe of the mitigated damage pit; so it increase with increasing height. In addition, it is found that the location of the maximum off-axis or on-axis intensity can approach the output surface of the optics with increasing maximum intensity. For comparison, experimental measurements of downstream intensification induced by the mitigated pits are carried out, and the experimental results are almost consistent with the numerical simulation, implying the validity of the numerical simulation of the mitigated pit model. Results of this research indicate that the downstream intensification of mitigated pits can be suppressed by controlling the morphology features of mitigated pits. this is significant for the development and improvement of the mitigated techniques of damage optics.

Keywords: fused silica, CO₂ laser mitigation, modulation, scalar diffraction theory

PACS: 42.60.Jf, 42.70.Ce, 61.80.-x, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.65.024205

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11404301).

† Corresponding author. E-mail: a697097@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: zhchch@caep.cn