

石英光学元件激光损伤修复形貌的优化

周丽^{1,2} 姜有恩^{1*} 韦辉¹ 范薇¹ 李学春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联合实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对三倍频光学元件后表面的损伤修复形貌, 分别采用时域有限差分法(FDTD)和瑞利-索末菲(R-S)衍射积分法, 来模拟不同形貌下元件修复区域内以及其后续的光场分布。结果表明, 当修复坑截面轮廓线端点切线与光束传播方向夹角大于 70° 时, 元件内部光强极大值小于 1.66, 修复效果优于其他角度。夹角为 70° 、宽 $200\ \mu\text{m}$ 的抛物面型、圆锥型和圆台型凹坑的后续光强极大值小于 1.46。但是当修复坑宽度较大如达到 $1\ \text{mm}$ 时, 圆台型凹坑的后续光强极大值高达 9.31, 且作用区间长。因此, 考虑实际激光修复工艺的难度, 夹角大于 70° 的圆锥型凹坑是石英元件后表面损伤修复的首选形貌。

关键词 激光技术; 激光损伤修复; 时域有限差分法; 瑞利-索末菲衍射积分

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0602009

Optimization of Morphology of Laser Induced Damage Mitigation Pit on Silica Optical Component

Zhou Li^{1,2} Jiang Youen¹ Wei Hui¹ Fan Wei¹ Li Xuechun¹

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

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

Abstract Aiming at morphology of laser induced damage mitigation pit on the rear surface of 3ω silica optical component, the mitigated area and its downstream intensity distributions with different morphologies are simulated by finite-difference time-domain method (FDTD) and Rayleigh-Sommerfeld (R-S) diffraction integral method, respectively. The results show that when the angle between the tangent line of endpoints on the section contour of the pit and incident light is over 70° , the maximum intensity inside the mitigated optics is less than 1.66, and mitigation effect is better than that of other angles. The maximum downstream intensities of a pit in shape of parabolic surface, cone and truncated cone are all less than 1.46 with an angle of 70° and a width of $200\ \mu\text{m}$. But when the width of pit increases to $1\ \text{mm}$, for instance, the maximum downstream intensity is as high as 9.31 and area with high intensity covers a long range. Thus, taking the difficulty of laser machining technology into account, a conical pit with an angle larger than 70° is the first choice for the damage mitigation on the rear surface of silica optical component.

Key words laser technique; laser induced damage mitigation; finite-difference time-domain method; Rayleigh-Sommerfeld diffraction integral

OCIS codes 140.3330; 140.3390; 350.2660; 350.3390

收稿日期: 2015-12-01; 收到修改稿日期: 2016-02-01

基金项目: 中国科学院青年创新促进会

作者简介: 周丽(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学元件损伤修复技术等方面的研究。E-mail: zhoul@siom.ac.cn

导师简介: 李学春(1972-), 男, 博士, 研究员, 主要从事高功率激光驱动器前端种子源等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: joyen@siom.ac.cn

1 引 言

在高功率激光驱动器中,光学元件的激光损伤阈值是限制装置最高运行通量的关键因素,其中三倍频(3ω , 351 nm)光学元件的负载受限问题尤为突出。由于石英元件在加工过程中不可避免地会引入裂纹、杂质等缺陷,在高通量密度的紫外激光辐照下这些缺陷容易产生恶性损伤,并且损伤点尺寸随激光辐照次数的增加而呈指数性增长^[1-2]。以美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)的国家点火装置(NIF)为例,其 3ω 激光的总输出能力大于 1.8 MJ, 3ω 光学元件承受的通量密度约为 8 J/cm^2 ^[3]。即使在经过先进抑制工艺(AMP)处理后, 3ω 元件阈值通量密度也仅为 5 J/cm^2 ^[3],这意味着 3ω 元件需要在超负载状态下工作。由于制约元件损伤阈值的缺陷分布密度并不高,通过采用预屏蔽后修复的策略,可以确保其在高通量下的高效运行^[3-4]。

石英光学元件的主要修复途径是利用激光烧蚀法或熔融法等激光微加工^[5-7]的手段来清除表面缺陷而代之以特定形貌的凹坑。在 3ω 激光辐照下,优化的损伤修复形貌需要同时满足:1) 所引起的元件内部局部光强分布增强幅度小;2) 所引起的后续光场调制的作用区间短,且光强的增强幅度小。目前,石英元件激光损伤修复的研究主要关注于修复方法,如采用 CO_2 激光^[4-5,8-12]或飞秒激光^[6-7,13-15]加工出某一特定形貌的凹坑,并没有对石英光学元件的修复形貌进行优化研究。

本文以石英光学元件后表面的损伤修复为研究对象,建立相应的光束传输模型,研究获得了适合于该类损伤的优化修复形貌;针对不同的修复形貌结构,分别采用时域有限差分(FDTD)法和瑞利-索末菲(R-S)衍射积分法,系统地模拟计算了元件内部的光场分布以及后续光场传输的分布情况,从而对修复坑形貌结构进行优化选型。模拟结果表明,轮廓线(或其端点切线)与入射光夹角大于 70° 的圆锥型和抛物面型凹坑对元件内部及其后续光场所产生的影响最小,为最优的修复形貌条件。

2 修复区域光场模拟

2.1 FDTD 模型

修复形貌的模型适用于截面轮廓线横向拉伸形成的柱体或绕中心轴旋转形成的对称体,如图 1 所示。由于修复坑的存在,一方面石英与空气界面的反射光会与入射光发生干涉造成修复区域的光强增强,另一方面凹坑边缘的尖角也会使入射光发生衍射造成修复区域的光强增强。如果修复坑的轮廓线是由一次曲线组成的,如圆锥和圆台,那么界面上发生的是类镜面反射,反射光仍为平面波;如果修复坑的轮廓线是由二次及以上的曲线组成的,如抛物面和球面,那么界面上发生的是凸面反射,反射光是发散的。显然,在最小入射角相同的条件下,与平面波之间的干涉叠加相比,发散光与平面波的干涉叠加引起的内部光强增强倍率更小。对于同一阶次曲线的凹坑,修复坑轮廓线上每一点的反射光复振幅对应于该点切线与光束传播方向的夹角,且石英元件内部光强极大值取决于端点切线与光束传播方向的夹角 α ,如图 1(a)所示。因此,对于高阶曲线型凹坑的元件,其内部光强极大值与角度的关系可以简化为具有相同 α 角的一次曲线型凹坑进行分析讨论。再者,考虑实际激光微加工的精度水平,只计算到二次曲线型的修复坑。

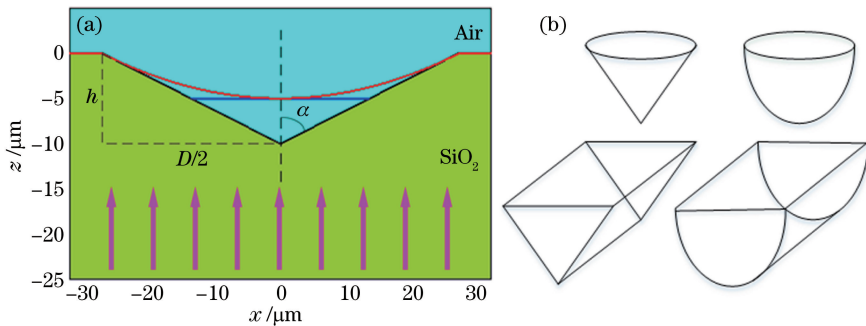


图 1 (a) FDTD 模型示意图; (b) 不同修复坑形貌图

Fig. 1 (a) Schematic of FDTD model; (b) morphologies of different mitigation pits

利用 FDTD 模拟石英后表面附近的光场分布,光束传输模型如图 1(a) 所示。其中,计算网格为 $0.02 \mu\text{m} \times 0.02 \mu\text{m}$,水平方向采用周期性边界条件(PBC),光束传输方向采用完全匹配层(PML)吸收边界,并且在石英与空气的界面添加膜层使透射率 $T=99.98\%$ 。光源为 351 nm 垂直石英元件前表面入射的平行光,复振幅 E_0 为 1。修复坑的高度为 h ,宽度为 D 。石英的折射率为 1.475,全反射临界角为 42.68° 。保持修复坑的高度不变,分析不同角度下修复区域的光场分布。

2.2 模拟结果

图 2 为修复区域光强分布的典型模拟结果,示出 $h=5 \mu\text{m}$ 且 $\alpha=65^\circ$ 时石英元件内部修复区域的光强分布,图中红圈为距离表面最近的光强极大值点,极大值为 2.01,远离元件后表面。图 3 所示是 $h=5 \mu\text{m}$ 且 $\alpha=0^\circ \sim 85^\circ$ 情况下,修复区域光强极大值与 α 角的关系图。从图 3(a) 可以看出,随着角度的增大,内部光强极大值 I_{max} 整体呈现先增后减的变化趋势;当 $30^\circ < \alpha < 42^\circ$ 时, $I_{\text{max}} > 10$; 当 $\alpha > 70^\circ$ 时, $I_{\text{max}} < 1.7$ 。理论上,修复区域的光强增强主要是修复坑的 3 个尖角对入射光产生的衍射以及修复坑表面上的反射光与入射光的干涉造成的。

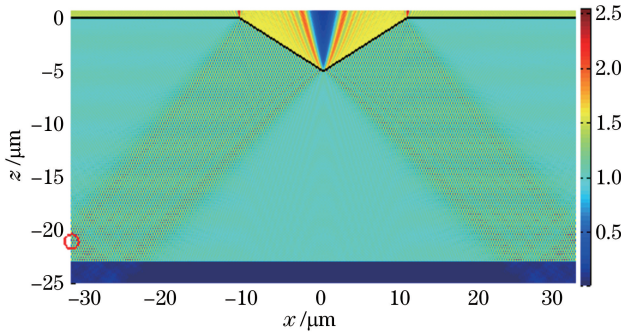


图 2 $\alpha=65^\circ$ 时石英光学元件修复区域光强分布

Fig. 2 Intensity distribution in mitigation area of silica optical component under $\alpha=65^\circ$

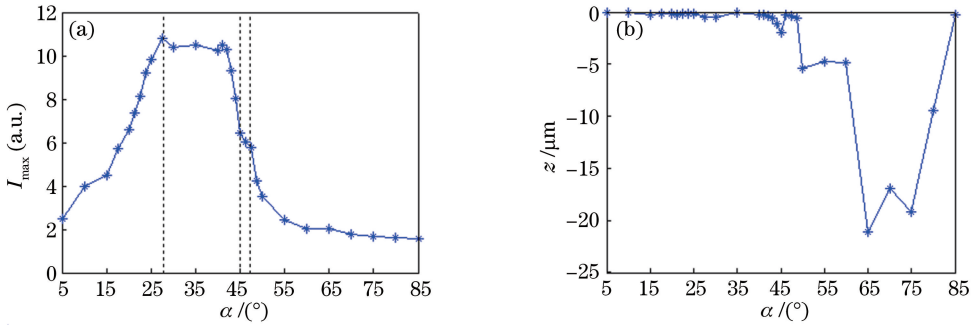


图 3 不同角度下石英光学元件修复区域的(a)光强极大值和(b)离表面最近的光强极大值点所在深度

Fig. 3 (a) Maximum intensities and (b) depths of the nearest maximum intensity point under different angles in mitigation area of silica optical component

根据折射定律和全反射原理可以划分为 4 种入射情况,如图 4 所示:1) $\alpha < 27.72^\circ$,发生两次反射,其中修复坑边缘为全反射;2) $27.72^\circ < \alpha < 45^\circ$,发生两次全反射;3) $45^\circ < \alpha < 47.32^\circ$,发生一次全反射;4) $\alpha > 47.32^\circ$,发生一次反射。假设石英和空气界面的反射系数为 r_s ,修复坑界面即石英元件内修复坑表面上的反射光与原入射光的相位差为 φ_1 ,水平界面即石英元件内没有缺陷或者损伤而不需要进行修复的后表面上的反射光与原入射光的相位差为 φ_2 。当 $\alpha < 27.72^\circ$ 时,石英内部入射光、修复坑界面上的全反射光、水平界面上的部分反射光发生相干叠加的区域内光强最大,为:

$$I_{\text{max}} = (E_0 + E_0 \cos \varphi_1 + |r_s| E_0 \cos \varphi_2)^2, \quad (1)$$

当 $27.72^\circ < \alpha < 45^\circ$ 时,在修复坑界面上和水平界面上都将发生全反射,此时两束反射光与入射光相干叠加的区域内光强最大,为:

$$I_{\text{max}} = (E_0 + E_0 \cos \varphi_1 + E_0 \cos \varphi_2)^2, \quad (2)$$

当 $45^\circ < \alpha < 47.32^\circ$ 时,经修复坑界面的全反射光不再到达水平界面,此时该反射光与原入射光相干叠加的区域内光强最大,为:

$$I_{\max} = (E_0 + E_0 \cos \varphi_1)^2, \quad (3)$$

当 $\alpha > 47.32^\circ$ 时,在修复坑界面上只发生部分反射,此时该反射光与原入射光相干叠加的区域内光强最大,为:

$$I_{\max} = (E_0 + |r_s| E_0 \cos \varphi_1)^2. \quad (4)$$

对比(1)~(4)式可以发现,相对于其他角度范围, $27.72^\circ < \alpha < 45^\circ$ 范围内石英元件内部光强极大值 I_{\max} 最大, $\alpha > 47.32^\circ$ 范围内石英元件内部光强极大值 I_{\max} 最小。因此,在选择合适的修复坑形貌时要避免会在修复坑界面上发生全反射的角度范围,优先考虑 $\alpha > 47.32^\circ$ 的角度范围。从光束干涉的角度看,4种入射情况下的光强增强与 FDTD 模型的计算结果基本吻合,说明不同角度下修复坑对石英内部光强增强的差异主要来源于不同修复坑表面对原入射光的反射情况不同。从图 3(b)中可以发现,当 $\alpha \leq 45^\circ$ 时,极大值所处的位置几乎贴于后表面;当 $\alpha = 65^\circ \sim 75^\circ$ 时, I_{\max} 所在处离后表面至少有 $16.9 \mu\text{m}$ 。因此,轮廓线上各点切线与光束传播方向夹角 $\alpha \geq 70^\circ$ 的修复坑,可以更有效地抑制元件损伤的增长。

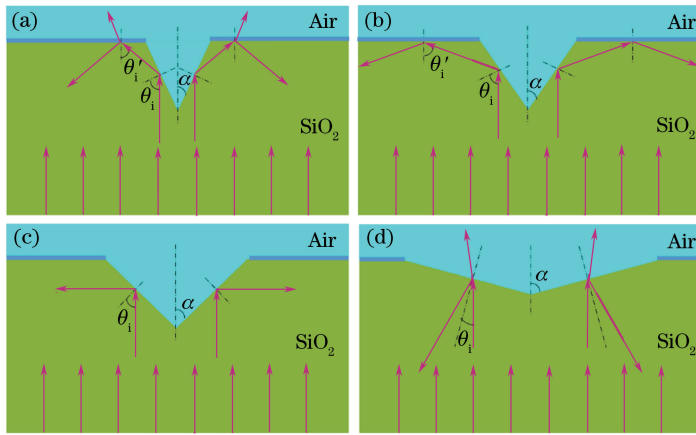


图 4 不同角度下石英光学元件修复区域的人射情况。(a) $\alpha < 27.72^\circ$; (b) $27.72^\circ < \alpha < 45^\circ$; (c) $45^\circ < \alpha < 47.32^\circ$; (d) $\alpha > 47.32^\circ$

Fig. 4 Incident conditions under different angles in mitigation area of silica optical component.

(a) $\alpha < 27.72^\circ$; (b) $27.72^\circ < \alpha < 45^\circ$; (c) $45^\circ < \alpha < 47.32^\circ$; (d) $\alpha > 47.32^\circ$

修复坑轮廓线为二次曲线时修复区域的光强分布如图 5 所示,端点切线与光束传播方向夹角 α 分别为 20° 、 35° 、 46.5° 、 70° ,相应的光强极大值分别为 6.91、8.15、4.43、1.61,分别位于图中红圈内。可以看到,图 5 (a)和(b)中极大值所在位置更贴近表面,而图 5(c)和(d)中极大值点更靠近凹坑表面。这说明 20° 和 35° 时极大值点处入射光同时与凹坑界面和水平界面反射光发生相干叠加,而 46.5° 和 70° 时极大值点处入射光只与凹坑界面上的反射光发生相干叠加。这种规律与一次曲线的计算结果相符,说明将二次或更高阶的曲线简化为一次曲线进行计算是可靠的。

虽然在有效修复范围内 α 角相同情况下,抛物面等二次曲线型结构的凹坑修复效果优于圆锥等直线型结构的凹坑,但是利用激光加工二次曲线型凹坑的难度比直线型凹坑大得多。为此,将二次曲线型结构的凹坑进行改进,演变为圆锥和圆台等易于激光加工的一次曲线型结构的凹坑,如图 6 所示。两种改进型凹坑的光强极大值均为 1.66,仅比二次曲线型高 3.1%。

另外,其他条件相同而入射光为 p 偏振光下光强分布图样与 s 偏振光下相同,但因 p 光反射系数模值更小而修复区域光强相对更弱,两者的透射系数相差很小而出射光场几乎一样。并且,当凹坑高度 $h > 5 \mu\text{m}$ 且宽高比 $D/h > 4.29$ 时,将 FDTD 计算模型保持纵横比不变情况下等比例增大,光强分布图样也按等比例增大,而极大值几乎不变。

综上所述,结合实际激光修复工艺,就石英光学元件内部修复区域光强增强而言,端点切线与光束传播方向夹角 $\alpha \geq 70^\circ$ 的圆台型和圆锥型凹坑更为合适。但是,在激光微加工工艺允许的条件下,端点切线与光束传播方向夹角 $\alpha \geq 70^\circ$ 的抛物面型凹坑更好。

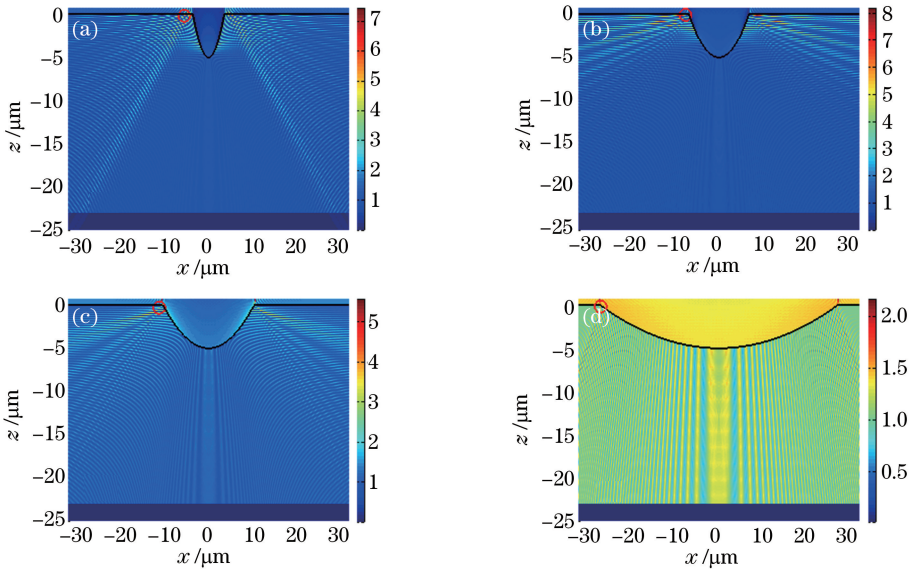


图 5 存在不同二次曲线型凹坑的石英光学元件修复区域光强分布。(a) $\alpha=20^\circ$; (b) $\alpha=35^\circ$; (c) $\alpha=46.5^\circ$; (d) $\alpha=70^\circ$

Fig. 5 Intensity distributions in mitigation area of silica optical component with different shapes of quadratic curve.

(a) $\alpha=20^\circ$; (b) $\alpha=35^\circ$; (c) $\alpha=46.5^\circ$; (d) $\alpha=70^\circ$

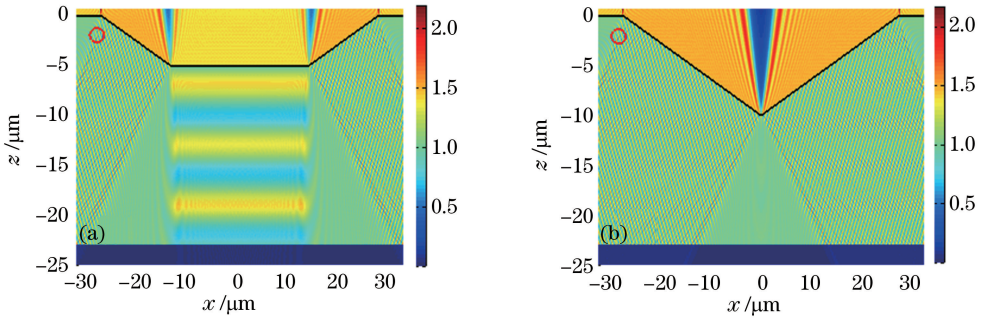


图 6 $\alpha=70^\circ$ 时存在不同结构凹坑的石英光学元件修复区域的光强分布。(a) 圆台; (b) 圆锥

Fig. 6 Intensity distributions in mitigation area of silica optical component with different structures pits under $\alpha=70^\circ$.

(a) Truncated cone; (b) cone

3 后续光场调制模拟

3.1 衍射传输模型

石英元件后表面存在的修复坑还会对后续传输光场产生调制,可能会导致后续光学元件的破坏。一方面,由于 FDTD 模型受稳定性条件的限制对计算网格的精度要求很高,如果利用该模型模拟后续光场传输的分布情况,对计算时间和处理器的要求太严苛。另一方面,由于考虑距离范围内衍射传输模型的非涅耳数很大,虽然满足标量衍射理论的适用条件但无法满足非涅耳衍射条件。因此,对后场衍射传输的模拟要利用比非涅耳衍射积分更精确的 R-S 衍射积分模型,即^[17]:

$$U_1(r_1, \theta_1, z) = -\frac{i}{\lambda} \iint \frac{1}{2} U_0(r, \theta) \left(1 + \frac{z}{R}\right) \frac{\exp(ikR)}{R} r dr d\theta, \quad (5)$$

式中 $U_0(r, \theta)$ 是输入面复振幅, z 是观察面到输入面的距离, λ 是入射光波长, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $R =$

$$\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + z^2}, x_0 = r \cos \theta, y_0 = r \sin \theta, x_1 = r_1 \cos \theta, y_1 = r_1 \sin \theta.$$

在极坐标系下,离散化衍射公式为:

$$U_1(r_1, \theta_1, z) = -\frac{i}{2\lambda} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N U_0(r_m, \theta_n) \left(1 + \frac{z}{R_{mn}}\right) \frac{\exp(ikR_{mn})}{R_{mn}} r_m \Delta r \Delta \theta. \quad (6)$$

另外,计算后场时将石英与空气界面处的初始复振幅 $U_0(r)$ 加载到超高斯函数中,即:

$$A_0(r) = U_0(r), \quad r \leq r_0, \quad (7)$$

$$A_0(r) = \exp\left[-\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^{2N_{sg}}\right], \quad r > r_0, \quad (8)$$

式中超高斯光束束腰半径 $\omega_0 = \frac{a}{1.6}$, 其中 a 是计算窗口半径, N_{sg} 是超高斯阶数, r_0 为初始光场非零区域的半径。

当超高斯光束 $A_0(r)$ 在自由空间传输距离 z 后观察面上的光场为^[18]:

$$A_1(r_1, z) = \exp(-ikz) \exp\left[-\left(\frac{r_1}{\omega_0}\right)^{2N_{sg}}\right]. \quad (9)$$

显然窗口函数,即超高斯光束在自由空间传输时除增加了一个相位因子外,形状、振幅等保持不变。那么,选择超高斯型窗口就可以准确计算出修复区域的后场光强分布,而不会引入由窗口截断等附加的光场调制。但是,实际计算中超高斯窗口不可能是无限延伸的,经过数值计算验证,当 $N_{sg} = 5$ 、 $a = 5$ mm 时,超高斯光束向后传输 2 m 范围内保持不变。另外,根据计算精度和速度的要求,针对不同传输距离采取大小可变的网格以优化计算。

3.2 模拟结果

在石英光学元件内部光场模拟结果的基础上, $\alpha = 70^\circ$ 的抛物面型、圆锥型和圆台型等 3 种形貌的后续光场分布的模拟计算结果如图 7 所示,其中蓝圈内为光强极大值点。当 $D = 200 \mu\text{m}$ 时,圆锥型凹坑与抛物面型凹坑在传输距离 $z > 0.1$ m 范围内光强分布几乎一样,极大值均为 1.30,这说明传输距离大于 0.1 m 后输入面上两者精细结构上的差异几乎可以忽略;相对而言,圆台型凹坑的极大光强为 1.46,对光场产生的增强程度稍大,这可能是由存在更多的硬边衍射所造成的。

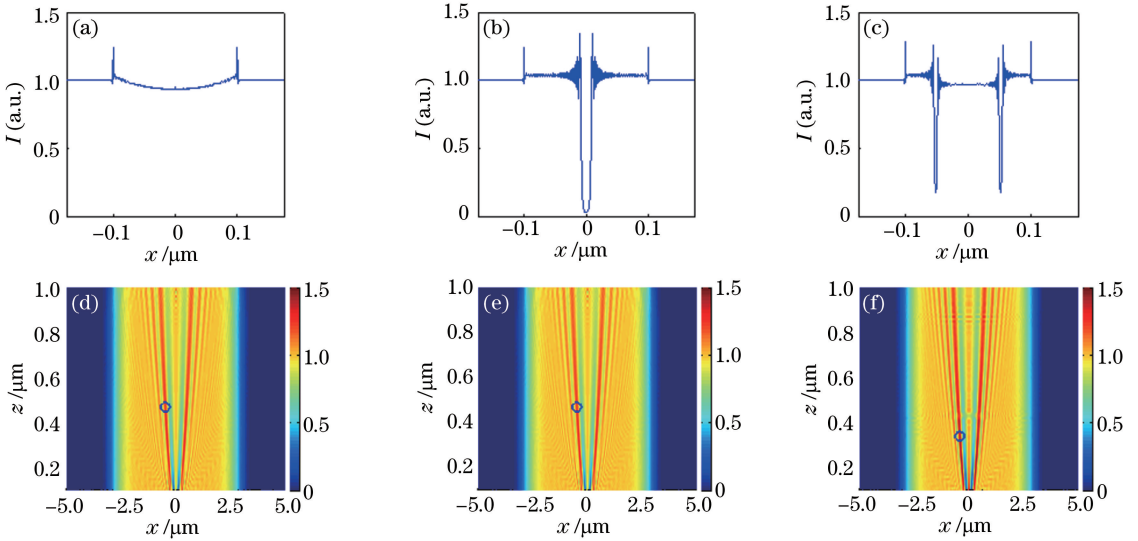


图 7 $D = 200 \mu\text{m}$ 的不同结构凹坑的修复元件的光强分布。(a)抛物面、(b)圆锥、(c)圆台型结构凹坑的初始光强; (d)抛物面、(e)圆锥、(f)圆台型结构凹坑的后续光强分布

Fig. 7 Intensity distributions of mitigated component with different structures pits under $D = 200 \mu\text{m}$. Initial intensity of structure of (a) parabolic surface, (b) cone, (c) truncated cone; downstream intensity distributions of pits of (d) parabolic surface, (e) cone, (f) truncated cone

但是,当圆台型凹坑宽度增加至 1 mm 时,其后续光场在 0.1~2 m 范围内随着传输距离的增加光强重复出现强弱变化,与圆孔衍射的光强分布类似。其中局部区域光强分布如图 8(a)所示,可以发现大部分区域的光强都超过 2,无法满足有效修复的条件。从图 8(b)中也可以看到,凹坑中轴线上光强极大值点出现的位置与相同孔径(直径 1 mm)的圆孔衍射相同。但与圆孔衍射不同的是,在 $z = 0.43$ m 处出现了光强为 9.31 的强聚焦点,这可能是圆台形凹坑底部的硬边衍射对光场所产生的特殊相位调制造成的。

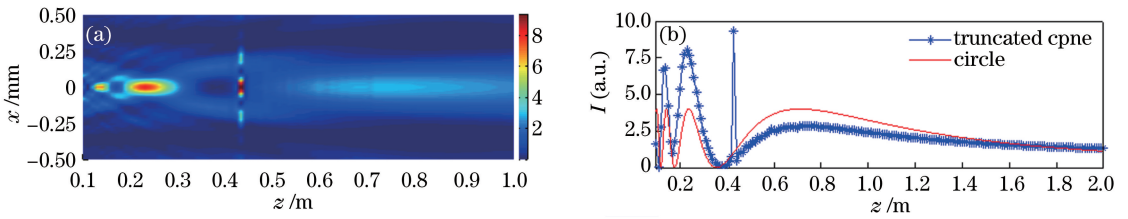


图 8 $D=1\text{ mm}$ 的圆台型凹坑的修复元件的后续光场分布。(a) 局部区域;(b) 中轴线

Fig. 8 Downstream intensity distributions of mitigated component with truncated cone pit under $D=1\text{ mm}$.

(a) Local area; (b) central axis

综上所述,当修复坑宽度较小时,抛物面型、圆锥型和圆台型 3 种形貌结构对后续光场增强较小,对后续光学元件产生破坏的概率很小;当修复坑尺寸较大时,在一定传输距离(0.1~2 m)范围内圆台型凹坑的后续光场增强远大于 2,极易对后续光学元件产生破坏。

3.3 模型验证

为了验证计算模型的置信度,首先采用该模型计算出圆孔的后续光场分布,与衍射光强分布的解析值^[17]是完全一致的。同时,通过加工凹坑并测量其后续的光场分布,进一步考核计算模型的可靠性。实验中,采用波长 $10.6\ \mu\text{m}$ 的二氧化碳激光,在康宁 7980 型的石英样品上加工出凹坑,坑形貌的测试结果如图 9 (a)所示,其宽度为 $107\ \mu\text{m}$,高度为 $79\ \mu\text{m}$ 。测量样品的后续光场分布,采用的光源是经扩束准直的氦氖激光(波长 $632.8\ \text{nm}$),主要是该光源有更均匀的近场分布。通过 FDTD 模拟得到该凹坑附近的光强分布,并将石英空气界面处的光场作为后续衍射传输的入射光场加载到超高斯窗口中,计算结果如图 9(b)所示。利用衍射传输模型计算得到凹坑后表面传输 $z=40、80、160\ \text{mm}$ 处的光强分布,如图 9(c)蓝色虚线所示,而图中的红色实线为实验测得的光场分布。

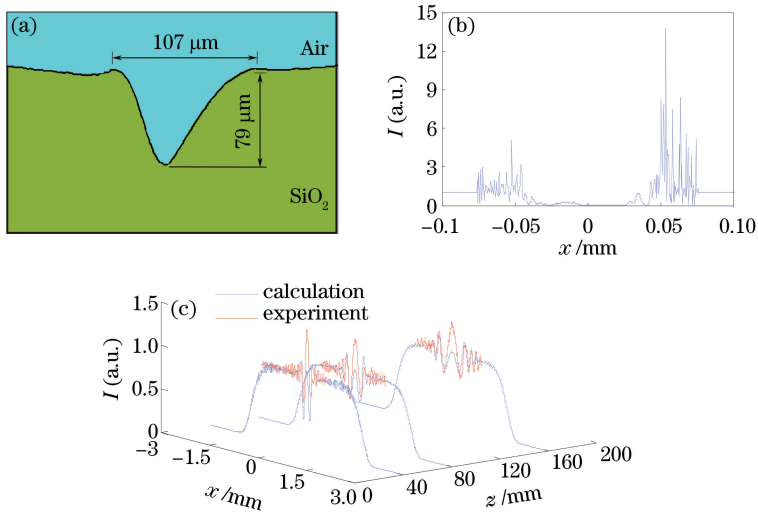


图 9 (a) 激光烧蚀凹坑的形貌;(b) 石英空气界面处光强分布;(c) 后续光强分布

Fig. 9 (a) Morphology of pit ablated by laser; (b) intensity distribution at interface between silica and air;

(c)downstream intensity distribution

图 9(c)中,理论计算值的调制周期和幅度与实验测量结果基本吻合,这表明所采用的 FDTD 模型和衍射传输模型具有较好的置信度。主要的差异体现在峰值分布上,实验结果的峰值在 1 级衍射上,而理论计算结果的峰值则在 2 级衍射处。差异主要来源于两方面:一方面实际加工凹坑的边缘存在凸起,而且该凸起的测量上存在误差,导致 FDTD 计算模型有偏差;另一方面是由于实际加工形貌并不是完全对称的,而利用二维简化模型进行 FDTD 计算时当成对称的,这也导致衍射传输模型的初始光场存在偏差。

4 结 论

FDTD 的模拟结果表明,修复坑截面轮廓线端点切线与光束传播方向夹角是石英光学元件修复区域的光强极大值的决定性因素。当夹角 $\alpha \geq 70^\circ$ 时才能保证光强极大值小于 2,所进行的修复才能有效抑制元件损伤的增长。其中 70° 抛物面型凹坑结构,石英光学元件内部光强极大值为 1.61,而 70° 圆锥型或圆台型凹坑结构下极大值为 1.66,因此抛物面型凹坑对损伤的抑制效果稍优于圆锥型或圆台型凹坑。但是,考虑到实际激光修复工艺中抛物面型凹坑结构的加工难度,夹角 $\alpha \geq 70^\circ$ 的圆台型或圆锥型凹坑更为合适。

衍射传输的模拟结果表明,在一定传输距离范围内圆锥型凹坑与抛物面型凹坑的后续光场分布几乎一样,并且在当凹坑宽度为 $200 \mu\text{m}$ 时后续光强极大值只有 1.30,通常不易对高功率激光驱动器中的后续光学元件产生破坏。对于圆台型凹坑,当凹坑宽度较小如 $200 \mu\text{m}$ 时,一定传输距离范围内的后续光强极大值为 1.46,通常也不易对后续光学元件产生破坏;但是当凹坑宽度较大(如 1 mm)时,该距离范围内光强分布与相同孔径的圆孔衍射光强分布类似,且极大值高达 9.31,极易对后续光学元件产生破坏。

综上,考虑石英光学元件内部及其后续光场两方面因素,再兼顾激光修复的工艺难度:当损伤区域较小时,采用夹角 $\alpha \geq 70^\circ$ 的圆台型或圆锥型凹坑来替代损伤区域实现损伤抑制均很合适;但是当损伤区域较大时,则优选 $\alpha \geq 70^\circ$ 的圆锥型凹坑。下一步的工作将对上述模拟结果进行实验验证,并探索抛物面型凹坑结构的激光加工工艺。

参 考 文 献

- 1 A M Rubenchik, M D Feit. Initiation, growth and mitigation of UV laser induced damage in fused silica[C]. SPIE, 2002, 4679: 79-95.
- 2 S Papernov, A W Schmid. Laser-induced surface damage of optical materials: absorption sources, initiation, growth, and mitigation[C]. SPIE, 2008, 7132: 71321J.
- 3 Lawrence Livermore National Laboratory. Improved performance for optical materials in high fluence applications[R]. California, 2012.
- 4 Isaac L Bass, Gabriel M Guss, Michael J Nostrand, *et al.*. An improved method of mitigating laser-induced surface damage growth in fused silica using a rastered pulsed CO_2 laser[C]. SPIE, 2010, 7842: 784220.
- 5 Xiao Lei, Zhao Jiantao, Yan Zhenfeng, *et al.*. Technologic investigation of laser micro-drilling on the thin ceramic plate[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s114012.
肖 磊, 赵建涛, 闫振峰, 等. 薄板陶瓷微孔的激光加工工艺研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s114012.
- 6 Liu Bin, Dai Yutang, Yin Guanglin, *et al.*. Exploration on ultrasonic vibration aided femtosecond laser machining process of fiber optic materials[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0303005.
刘 斌, 戴玉堂, 殷广林, 等. 超声波辅助飞秒激光加工光纤材料的工艺探索[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303005.
- 7 Xing Songling, Liu Lei, Zou Guisheng, *et al.*. Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403001.
邢松龄, 刘 磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403001.
- 8 E Mendez, K M Nowak, H J Baker, *et al.*. Localized CO_2 laser damage repair of fused silica optics[J]. Appl Opt, 2006, 45 (21): 5358-5367.
- 9 S Palmier, L Gallais, M Commandre, *et al.*. Optimization of a laser mitigation process in damaged fused silica[J]. Appl Surf Sci, 2009, 255(10): 5532-5536.
- 10 Manyalibo J Matthews, Steven T Yang, Nan Shen, *et al.*. Micro-shaping, polishing, and damage repair of fused silica surfaces using focused infrared laser beams[J]. Adv Eng Mater, 2014, 17(3): 247-252.
- 11 Isaac L Bass, Vaughn G Draggoo, Gabriel M Guss, *et al.*. Mitigation of laser damage growth in fused silica NIF optics with a galvanometer scanned CO_2 laser[C]. SPIE, 2006, 6261: 62612A.
- 12 Gabe Guss, Isaac Bass, Vaughn Draggoo, *et al.*. Mitigation of growth of laser initiated surface damage in fused silica using a $4.6 \mu\text{m}$ wavelength laser[C]. SPIE, 2007, 6403: 64030M.
- 13 Xiong Zhimin, Zhang Panzheng, Jiang Youen, *et al.*. Research for ultra-short pulse ablation of dielectric film mirror[C]. SPIE, 2012, 8206: 82060V.
- 14 Lin Yuanyuan, Jiang You'en, Wei Hui, *et al.*. Study on damage mitigation for dielectric mirrors by using femtosecond laser micromachining[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(15): 0154207.

- 林圆圆, 姜有恩, 韦 辉, 等. 基于飞秒激光微加工的介质膜损伤修复研究[J]. 物理学报, 2015, 64(15): 0154207.
- 15 Zhou Fang, Yuan'an Zhao, Shunli Chen, *et al.*. Method of mitigation laser-damage growth on fused silica surface[J]. Appl Opt, 2013, 52(29): 7186-7193.
- 16 Fang Zhou, Zhao Yuan'an, Chen Shunli, *et al.*. Mitigation of ultraviolet laser damage on fused silica surface with femtosecond laser system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403001.
- 方 周, 赵元安, 陈顺利, 等. 熔石英表面紫外损伤点的飞秒激光修复技术[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403001.
- 17 Born M, Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. Yang Jiasun Transl. . Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- 玻 恩, 沃尔夫. 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论[M]. 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- 18 Lü Baida. Laser optics: Beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- 吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.