薄膜元件基底断点划痕的激光辐照效应

章春来^{1*}, 姚春梅²

1. 西南民族大学电气信息工程学院, 成都 610041;

2. 西南民族大学药学院, 成都 610041

* E-mail: chunlai.zhang@163.com

收稿日期: 2017-05-07; 接受日期: 2017-06-07; 网络出版日期: 2017-08-10

西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 2017NZYQN25)资助项目

摘要 建立了断点划痕的正棱锥模型, 在355 nm激光辐照下, 用三维时域有限差分法研究了熔石英后表面具有不同棱角的断点划痕对场分布的调制作用. 结果表明, 电场强区分布在棱边一侧, 深度在亚表面层 2λ 内. 相同情况下, 边边相对, 比角角相对和边角相对具有更大的调制强度. 随着棱角数目的增多, 需要更大的坑点间距才能获得调制最大值. 研究表明这类划痕诱导的最大电场幅值为入射波的3.70倍, 可采用酸蚀或者 CO_2 激光辐照钝化棱角的方法来减小调制.

关键词 高功率激光, 划痕, 激光辐照, 时域有限差分

1 引言

在高功率激光技术中, 熔石英元件被广泛采用^[1]. 元件光学面在抛光过程中, 由于摩擦作用, 产生亚表面损伤并形成划痕^[2-4]. 当缺陷区域镀上光学薄膜时, 由于高峰值功率激光的辐照, 可出现强场区或热分布集中区, 从而诱导光学元件产生激光辐照损伤, 进而大幅度地限制激光装置的负载能力^[5,6].

电磁波时域有限差分(FDTD)方法能够体现激光传输的规律性, 它是将含时的Maxwell方程离散化为差分迭代式, 电场与磁场分量交替环绕, 可沿时间轴逐步迭代求解空间各点的电场分量, 从而获得激光光强的分布^[7]. 用FDTD方法研究强激光和材料的相互作用, 已有多篇报道^[8-10]. 作者也曾对连续划痕^[11]、断点划痕^[4,12]、损伤修复斑^[6]以及缺陷膜层^[13]进行了相关

研究. 本文我们探讨坑点的棱角对入射激光的调制影响, 目的在于提出多棱角断点划痕的控制策略.

2 物理模型与计算方法

采用正棱锥模型模拟多棱角坑点. 为比较尺寸相近但棱角不同的坑点, 设定正棱锥的高都相等, 底面为等圆内接多边形. 研究时, 相邻坑点的棱边数目保持一致, 且分边边相对、边角相对和角角相对3种情况讨论. 图1(a)为正六棱锥面坑点边角相对的三维示意图, 定义等圆的圆心距为坑点间距 c (图1(b)). 为了找出普遍规律, 底面多边形将由三边、四边、五边……逐步增大, 直至坑点变为圆锥面. 设正 n 棱锥底面多边形外接圆的半径为 r , 则相应的底面多边形边长 a_n 为

引用格式: 章春来, 姚春梅. 薄膜元件基底断点划痕的激光辐照效应. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 972-976
Zhang C L, Yao C M. Laser irradiation effects of non-continuous scratch on substrate of thin film optical device (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 972-976, doi: [10.1360/N092017-00136](https://doi.org/10.1360/N092017-00136)

$$a_n = 2r \sin \frac{\pi}{n}, (n \geq 3). \quad (1)$$

当外接圆尺寸不变时,随着 n 的增大, a_n 逐渐变短.这是一个棱角数变多、但坑点尺寸相近的过程.

正棱锥坑点由多个全等的三角侧面包围而成,设外接圆的圆心坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,则各侧面所在的平面方程可表述为

$$\frac{x-x_0}{u} + \frac{y-y_0}{v} + \frac{z-z_0}{w} = 1, \quad (2)$$

式中, u, v, w 指的是将底面中心平移至坐标原点,该侧面与 x, y, z 轴的截距,显然 w 恰好描述了坑点的深(图1(a)).

设坑点位于熔石英的后表面,即激光沿 z 方向入射(图1(a)).入射激光为沿 x 轴线极化的均匀平面波,激光波长 $\lambda=355$ nm,电场幅值 $|E|$ 为1.0 V/m.熔石英的相对介电常数取2.25^[3-5,9],差分网格尺寸 $\delta=\lambda/12$,时间步长 $\Delta t=\delta/2C$ (C 为真空光速),可满足Courant稳定性条件^[7].采用Berenger的完全匹配层(PML)吸收性边界条件,PML层厚度为 9δ ^[7].模拟时,设定三维总场 $256\delta \times 256\delta \times 90\delta$,时间步数 $n=1800$,分界面 $z=75\delta$.

3 计算结果与分析

3.1 棱角对场分布的影响

设置 $r=50\delta, w=40\delta, c=124\delta$.图2(a)为正五棱锥3种位置的电场分布,可见靠近表面时,电场较大,最大电场出现在亚表面层 2λ 内.三种情况之中,边边相对时场调制最强,峰值为3.58 V/m,边角相对和角角相对情况较为接近.对不同的棱锥面进行了模拟,由图2(b)可知,对于同一类棱锥面,边边相对时调制始终最大,边角相对和角角相对调制相接近.随着棱边数的增多,电场幅值先增大后减小,光滑的圆锥面调制相对较小,当棱角数 $n=5$ 时,调制幅值最大.

正三棱锥棱边较长但是场分布却较小,经计算,边边相对时,表面坑点的实际距离是 74δ ,而正四、五棱锥的该距离分别约为 53δ 和 43δ ,因此有必要确定是否较大的坑点间距导致了三棱锥坑点的场分布较弱.

设间距 c 从最近邻开始连续增大,保持其他条件不变.电场峰值如图3所示,边边相对时,正三、四、五棱锥当 c 分别为 $76\delta, 108\delta$ 和 124δ 时获得最大值,其峰值分别为3.70, 3.59和3.58 V/m.因此,随着棱角数目的增

图1 (网络版彩图)边角相对的正六棱锥坑点示意图. (a) 三维; (b) 二维

图2 (网络版彩图)多棱角坑点的电场峰值. (a) 正五棱锥沿深度截面; (b) 各棱锥峰值分布

图3 (网络版彩图)边边相对时电场幅值与 c 的函数关系

多,需要更大的间距才能获得最大值,表现在曲线上是棱角越多,曲线整体的增减趋势越平缓.在上例中,当 $c=124\delta$ 时,对于正三棱锥坑点,此时已经处于较小的稳定值,而对于正四和正五棱锥,尚在峰值附近,因此前者在图2中才会表现出较弱的幅值分布.综合图2(b)和3,对于多棱角坑点,边边相对且棱边长较大时调制较强,棱角越多电场幅值的调制趋于平缓.

3.2 电场幅值的分布

图4是 $c=100\delta$ 时,正四棱锥面的电场幅值分布,其中, xy 截面均为 $z=70\delta$,图4(d)是图4(c)的对称截面 $y=137\delta$.由于坑点界面的反射叠加, xy 截面强场区主要分布在坑点侧面附近,并呈放射状衰减分布,如图4(b)和(c).当边边相对时,电磁场被邻近坑点的界面多次反射,容易在公共域形成驻波,干涉充分,强区较明显,如图4(a).当边角相对(图4(b))或角角相对(图4(c))时,叠加不充分,调制相对较弱.角角相对时,最强区出现在角角连线的左右两侧(图4(c)),该区域的场分布可用 xz 剖面描述,由图4(d)可知,电场是对称分布的,强区集中在近表面 2λ 内.

图5是其他多棱角坑点截面的电场幅值分布,由图5(a)可知,越靠近边界坑点间增强线越明显.如果坑点的间距从最近邻开始逐渐增大,那么增强线变化的普遍规律:由单束的宽面积逐渐变细变窄,如果距离足够大,增强线的中间将会率先断开,表明此时两坑在该面上的相互作用可忽略.图5(b)和(c)是正五棱

图4 (网络版彩图)正四棱锥坑点的电场分布. (a) 边边相对; (b) 边角相对; (c) 角角相对; (d) 角角相对 xz 截面

图5 边边相对 xy 截面电场分布. (a) 三棱锥; (b) 五棱锥; (c) 六棱锥; (d) 圆锥

锥、正六棱锥坑点边边相对的情形. 可见, 当边边相对时, 强点出现在坑点之间, 与圆锥面类似(图5(d)). 相比之下, 光滑圆锥面的调制较小.

因此, 对于坑点状断点划痕, 为了减弱光调制的影响, 一个行之有效的办法是将多棱锥坑点转化成光滑的曲面, 该方案可采用 $\text{pH}\approx 5$ 的 HF 缓冲溶液酸蚀来实现. 经过 HF 酸的钝化^[4,12], 坑点内部的抛光杂质祛除殆尽, 并且坑点也转化为光滑面. 对于间距较小, 且边边相对的坑点群, 调制较强, 极易诱导损伤, 如果酸蚀达不到预期效果, 建议采用 CO_2 激光烧蚀来钝化^[14].

4 结论

建立了坑点型划痕的正棱锥面模型, 在 355 nm 激光的入射下, 对熔石英后表面的多棱角断点划痕进行

了模拟研究, 得出以下结论.

(1) 最强区位于亚表面层2个波长内, 近表面区最容易发生初始损伤. 电场强区呈对称分布, 越靠近棱边强度越大. 因此, 对于同一类棱锥面坑点, 边边相对时比角角相对和边角相对具有更大的调制强度. 随着棱角数目的增多, 光滑圆锥面可有更小的调制强度.

(2) 相同的坑点尺寸, 正三、四、五棱锥面各需要 76δ , 108δ 和 124δ 的间距才能获得调制峰值, 最大电场分别是入射波的3.70, 3.59和3.58倍, 说明边长越长调制越强, 棱角越多则需要更大的间距才能获得场分布的最大值与稳定值.

(3) 对于多棱角坑点, 可以采用酸蚀或者 CO_2 激光辐照将其钝化为光滑曲面来减小调制强度.

参考文献

- 1 黄晚晴. 大口径熔石英元件表面激光损伤特性研究. 硕士学位论文. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009
- 2 Wong L, Suratwala T, Feit M D, et al. The effect of $\text{HF}/\text{NH}_4\text{F}$ etching on the morphology of surface fractures on fused silica. *J Non-Cryst Solids*, 2009, 355: 797–810

- 3 Zhang C L, Xu M, Wang C D. Light intensification effect of trailing indent crack in fused silica subsurface. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2015, 58: 1–6
- 4 章春来, 王治国, 向霞, 等. 熔石英后表面坑点型划痕对光场调制的近场模拟. *物理学报*, 2012, 61: 114210
- 5 章春来, 姚春梅, 向霞. 颗粒污染诱导薄膜元件产生激光损伤. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46: 970–974
- 6 Zhang C L, Yao C M, Wang C D. Modulations of nonideal repaired damage sites irradiated by CO₂ laser at different parameters. *Optik-Int J Light Electron Opt*, 2016, 127: 3750–3754
- 7 葛德彪, 阎玉波. 电磁波时域有限差分方法. 第2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006
- 8 Qiu S R, Wolfe J E, Monterrosa A M, et al. Searching for optimal mitigation geometries for laser-resistant multilayer high-reflector coatings. *Appl Opt*, 2011, 50: C373–C381
- 9 花金荣. 熔石英亚表面缺陷诱导激光损伤的FDTD研究. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2010
- 10 Salleo A. High-Power Laser Damage in Fused Silica. Dissertation of Doctoral Degree. Berkeley: University of California, 2001
- 11 章春来, 王治国, 刘春明, 等. 横向划痕对光场调制的近场模拟. *物理学报*, 2012, 61: 084207
- 12 章春来, 刘春明, 向霞, 等. 形状与位置对断点划痕场分布的影响研究. *物理学报*, 2012, 61: 164207
- 13 Li L, Zhang C L, Yang C F, et al. The electric field modulation by lateral crack coated with HfO₂/SiO₂ high reflector. *Optik-Int J Light Electron Opt*, 2014, 125: 4398–4401
- 14 Cormont P, Combis P, Gallais L, et al. Removal of scratches on fused silica optics by using a CO₂ laser. *Opt Express*, 2013, 21: 28272–28289

Laser irradiation effects of non-continuous scratch on substrate of thin film optical device

ZHANG ChunLai¹ & YAO ChunMei²

¹ College of Electrical & Information Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China;

² College of Pharmacy, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

The pyramid model of non-continuous scratch was established. Under the irradiation of 355 nm laser, 3D finite-difference time-domain method was used to simulate the light intensity enhancement of such scratches on the output subsurface of fused silica. Results show that the strongest electricfield is distributed on the edge side and its depth is inside 2λ sub-surface. In the same case, the edge and edge relative has the greatest modulation of all. As the corner number increases, it requires a larger gap to achieve the peak modulation. Results show that the maximum electric field amplitude of these scratches is 3.70 times of that of the incident laser. We can use passivation methods to reduce the modulation, such as HF etching or CO₂ laser irradiation.

high-power laser, scratch, laser irradiation, finite-difference time-domain

doi: 10.1360/N092017-00136