

## 熔石英后表面坑点型划痕对光场调制的近场模拟\*

章春来<sup>1)</sup> 王治国<sup>1)†</sup> 向霞<sup>1)</sup> 刘春明<sup>1)2)‡</sup> 李莉<sup>1)</sup>  
袁晓东<sup>2)</sup> 贺少勃<sup>1)2)</sup> 祖小涛<sup>1)</sup>

1) (电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011年8月4日收到; 2011年9月2日收到修改稿)

建立了坑点型划痕的旋转抛物面模型, 用三维时域有限差分方法研究了熔石英后表面坑点型划痕随深度、宽度、间距以及酸蚀量变化对波长  $\lambda = 355 \text{ nm}$  入射激光的调制. 研究表明, 这类划痕调制最强区位于相邻两坑点的连接区, 且越靠近表面调制越强. 当其宽深比为 2.0—3.5、坑点间距约为坑点宽度的 1/2 时, 可获得最大光场调制, 最大光强增强因子 (LIEF) 为 11.53; 当坑点间距大于坑点宽度时, 其调制大为减弱, 相当于单坑的场调制. 对宽为  $60\delta$  ( $\delta = \lambda/12$ ), 深和间距均为  $30\delta$  的坑点型划痕进行刻蚀模拟, 刻蚀过程中最大 LIEF 为 11.0, 当间距小于 300 nm 时, 相邻坑点由于衍射形成场贯通.

**关键词:** 熔石英, 坑点型划痕, 激光辐照, 时域有限差分

**PACS:** 42.60.Jf, 42.62.-b, 42.70.Ce, 52.57.-z

## 1 引言

在大型高功率固体激光器的建设过程中, 熔石英是应用最为普遍的光学材料, 这一点可从美国国家点火装置 (National Ignition Facility) 和法国兆焦耳激光 (Laser MégaJoule) 装置获悉<sup>[1-4]</sup>. 在强紫外激光作用下, 熔石英元件极易损伤, 更为严重的是, 损伤具有自加速效应: 初始损伤一旦发生, 会极大弱化材料的力学、光学、热学等性能, 使其更易损伤<sup>[5]</sup>. 激光导致的损伤大大降低了熔石英元件的负载能力, 已成为限制系统输出能力的一个主要因素<sup>[6]</sup>. 光学元件的激光诱导损伤包括表面损伤和体损伤, 随着材料加工工艺的不断改进, 熔石英块体内基本上可以做到不含有杂质和缺陷, 故发生体损伤的概率很小<sup>[7,8]</sup>. 目前, 光学元件的损伤以表面损伤为主, 表面损伤与元件加工质量和表面吸附的杂质、水蒸汽等污染物有关. 在一定激光参数条件下,

熔石英表面和亚表面缺陷是诱导激光表面损伤的主要原因<sup>[9,10]</sup>.

石英元件在研磨、抛光等加工过程中, 抛光粉与表面接触容易诱导划痕缺陷<sup>[9]</sup>, 其中线状连续划痕和坑点状断点划痕是最为常见的两类. 坑点型划痕是抛光粉棱角与石英表面接触时, 受力不均, 类似于在表面“跳动”抛光所致. 根据不同的情况, 坑点的间距略有差异, 甚至坑点间偶有贯通现象, 形成连续的起伏排列. 亚表面划痕对光场的调制可采用时域有限差分 (FDTD) 方法进行模拟<sup>[11]</sup>, 王凤蕊等<sup>[12]</sup>将坑点型划痕等效为二维的余弦函数模型, 用二维 FDTD 方法研究了其对 355 nm 入射激光的调制, 指出在宽深比值 ( $R$ ) 为 2.5—12 的范围内获得的最大的光强增强因子 (LIEF) 约为 7.4, 且 LIEF 随着  $R$  的增大呈减小趋势. 鉴于坑点型划痕具有较好的中心对称性, 而非单一的轴对称, 将其简化为二维模型显然会使最终结论小于实际结果. 另外文献<sup>[12]</sup>未给出这类划痕在其他  $R$  区间可能出现

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 10904008)、国家自然科学基金委员会 - 中国工程物理研究院联合基金 (批准号: 11076008) 和中央高等学校基本科研基金 (批准号: ZYGX2009X007, ZYGX2010J045, ZYGX2011J043) 资助的课题.

† E-mail: zgwang@uestc.edu.cn

‡ E-mail: cmliu@uestc.edu.cn

的最大 LIEF, 未给出最可能引起损伤的  $R$  范围及坑点间距, 同时也未研究酸刻蚀过程对光场调制带来的影响. 本文将单坑简化为三维旋转抛物面模型, 用三维 FDTD 方法系统研究了这类划痕的光场调制随其深度、宽度、坑点间距以及酸蚀量的变化, 以期能为熔石英亚表面多划痕诱导场致损伤的量化提供参考.

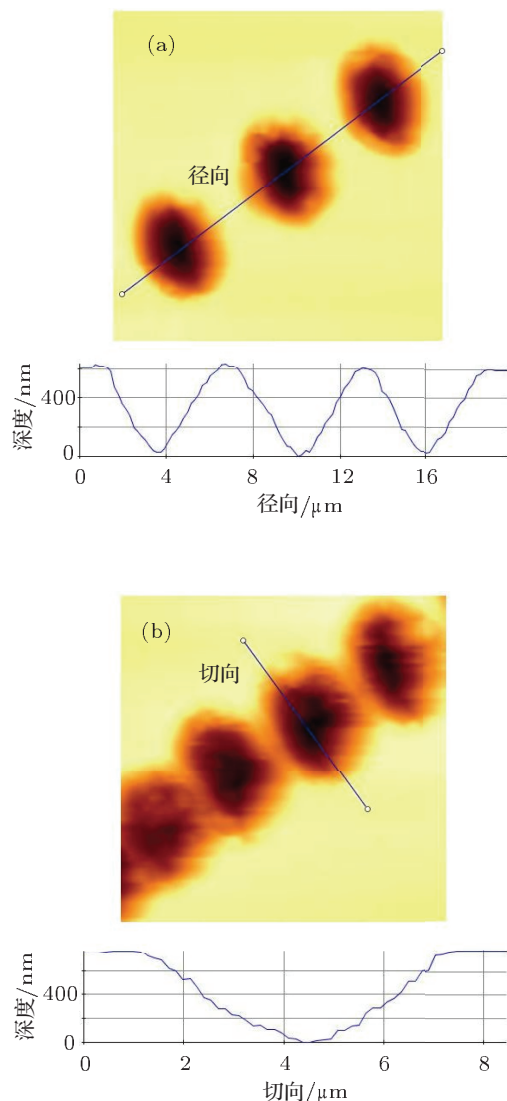


图 1 同一坑点型划痕刻蚀前后的原子力显微镜图 (a) 刻蚀前; (b) 刻蚀后

## 2 模型建立与计算方法

选取 Corning 7980 型熔石英样品, 放入  $\text{pH} \approx 5$  的 HF 酸缓冲溶液中进行酸刻蚀, 酸蚀完成后立即取出, 迅速用去离子水冲洗, 然后用无水乙醇进行脱水. 对酸蚀前后熔石英亚表面同一条坑点型划痕的同一段区域用 XEI-100 型原子力显微镜进行测试. 如图 1 所示, 酸蚀前该测试段坑点大小较均

匀、横截面光滑、呈直线排列且坑点间相互独立. 经 10 min 酸蚀后, 坑点间距缩小, 相邻坑点逐渐贯通. 酸蚀后单坑宽度增加了近 150 nm, 深度增加了近 200 nm.

基于此, 建立如下计算模型: 坑点型划痕的单坑呈完美对称的旋转抛物面, 所有坑点全等、呈直线分布且间距相等, 如图 2(a) 所示. 设坑点宽为  $a$ , 深为  $b$ , 坑点间距为  $c$ . 为了后文描述方便, 将几个对称截面定义如下: 垂直于  $x$  轴且沿着间距  $c$  的截面称为  $\alpha$  面; 垂直于  $y$  轴且垂直平分间距  $c$  的截面称为  $\beta$  面; 垂直于  $z$  轴的截面称为  $\gamma$  面 ( $\gamma$  面有多个, 若  $z = n$  则称为  $\gamma_n$  面).  $\alpha$  面如图 2(b) 所示, 单坑截面呈抛物线型. 酸蚀过程中, 假设坑点界面恒为旋转抛物面, 并且外侧水平表面不发生变化 (不足以引起光场的极大调制, 所有全等的坑点进行同一种酸蚀变化: 抛物面上每一个点具有相同的垂直向下的刻蚀速率, 即相当于把抛物面整体往  $-z$  方向平移. 设经  $\Delta t$  刻蚀时间后, 刻蚀量为  $\Delta x$  (如图 2(b) 所示). 此时, 坑点深度为  $b + \Delta x$ , 宽度为  $a\sqrt{(b + \Delta x)/b}$ , 间距为  $c + a - a\sqrt{(b + \Delta x)/b}$ . 且当  $\Delta x \geq bc(c + 2a)/a^2$  时, 间距消失, 相邻两坑点将逐渐贯通.

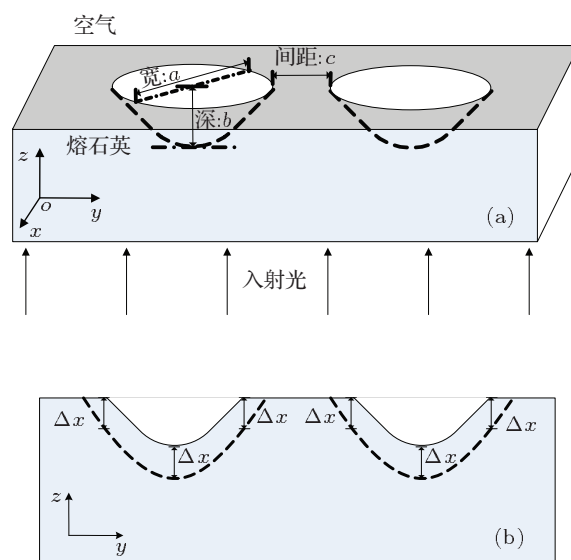


图 2 坑点型划痕旋转抛物面模型 (a) 三维结构示意图; (b)  $\alpha$  面酸蚀过程示意图, 实线代表刻蚀前的界面, 虚线代表刻蚀后的界面

计算时, 坑点划痕位于熔石英的后表面 (如图 2(a) 所示), 即激光沿  $z$  轴正方向入射, 激光波长  $\lambda = 355 \text{ nm}$ . 入射波为沿  $x$  轴线极化的均匀平面波, 其电场幅值  $|E| = 1.0 \text{ V/m}$ . 熔石英的相对介电常数  $\epsilon_r = 2.25$  [9,10,12], 差分网格尺寸  $\delta$  在三维方向

上均为  $\lambda/12$ , 时间步长  $\Delta t = \delta/2v$  ( $v$  为真空光速), 采用 Berenger 的完全匹配层 (PML) 吸收性边界条件, PML 层厚度为  $9\delta$  [11]. 模拟时, 认为缺陷区域被纯空气填充.

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 坑点深度对光场调制的影响

设定三维总场为  $250\delta \times 250\delta \times 115\delta$ , 时间步数为  $n = 1800$ , 水平分界面为  $z = 100\delta$ . 研究了  $a = 80\delta$ ,  $c = 40\delta$ ,  $b$  从  $6\delta$  开始逐渐增大时划痕的近场调制. 图 3(a) 为最大电场幅值 ( $|E|_{\max}$ ) 和  $b$  的关系, 可见当  $b = 36\delta$  时,  $\alpha$  和  $\beta$  面都取得最大值, 最大值分别是  $2.69160$  和  $2.58512$  V/m, 对应的 LIEF 分别是  $7.24$  和  $6.68$ . 图 3(b) 是电场幅值  $|E| \geq 2.0$  V/m 的网格点 (强电场点, 简称强点) 统计, 从拟合的结果来看,  $\alpha$  和  $\beta$  两截面表现出了很大的同一性, 即  $b$  为  $36\delta$ — $39\delta$  时, 强点数目最多,  $\alpha$  和  $\beta$  面的最大值分别为  $39$  和  $56$  个. 综上,  $R$  为  $2.1$ — $2.2$  时, 对光场的调制最明显.

$b$  为  $36\delta$  和  $39\delta$  时,  $\gamma$  面的电场分布, 如图 4(a) 所示. 总体来说, 在亚表面缺陷区, 两者的  $|E|_{\max}$  都

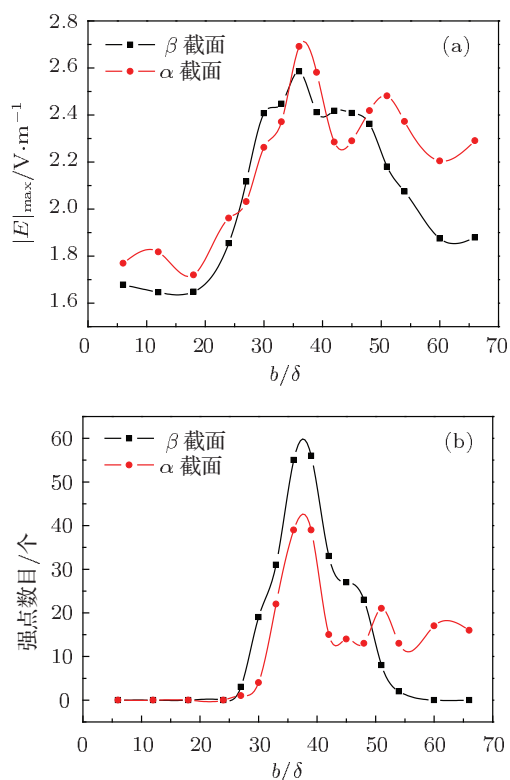


图 3 坑点型划痕光场调制的深度效应 (a)  $|E|_{\max}$  分布; (b) 强点数目分布

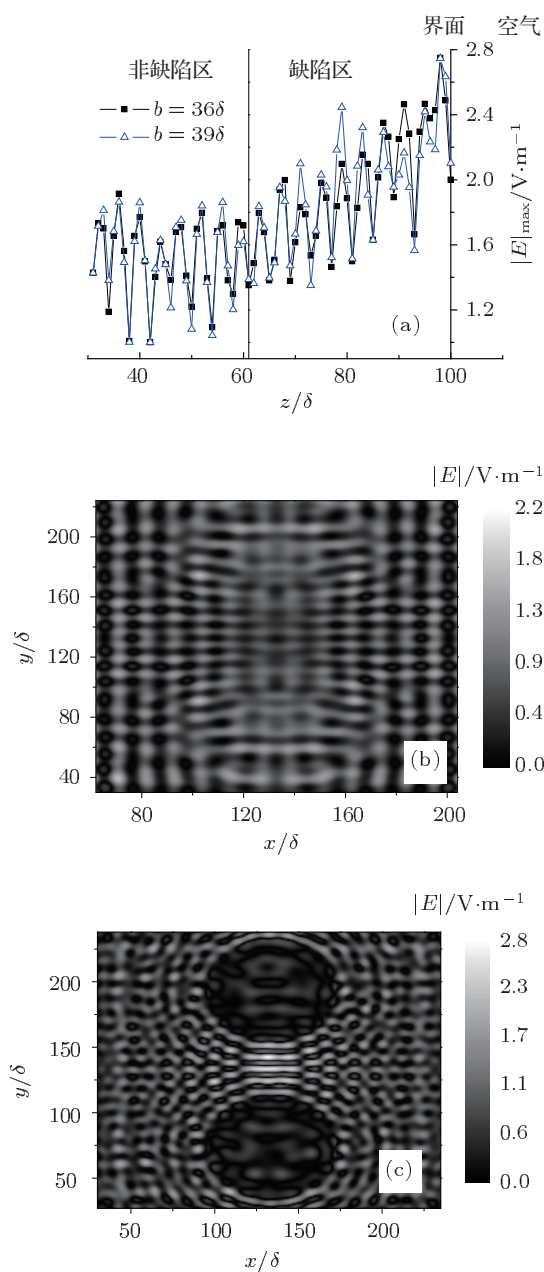


图 4  $\gamma$  面电场分布 (a)  $|E|_{\max}$  与  $z_z$  的关系; (b)  $b = 6\delta$  时  $\gamma_{90}$  面之  $|E|$  分布; (c)  $b = 39\delta$  时  $\gamma_{98}$  面的  $|E|$  分布

随  $z$  的增大而增大, 且都在  $\gamma_{98}$  面取最大值, 其值分别为  $2.74846$  和  $2.74707$  V/m, 非常接近, 在亚表面非缺陷区,  $|E|_{\max}$  平稳摆动, 幅值范围为  $1.0$ — $1.9$  V/m, 表明该缺陷底部的电场较弱且比较稳定, 其  $\gamma$  面未发现被显著调制的痕迹. 但当  $b$  较小时, 情况有所不同, 如图 4(b) 所示, 当  $b = 6\delta$  时, 其  $\gamma_{90}$  面距缺陷底部为  $\lambda/3$ , 可见坑点正下方的电场明显存在被扰动的轮廓. 研究表明,  $b < 2\lambda$  时, 非缺陷区电场分布被扰动的迹象较明显, 但不足以引起极大调制. 图 4(c) 为  $b = 39\delta$  的  $\gamma_{98}$  面的  $|E|$  分布, 可见

最大电场分布在两坑点之间的位置,这是入射波和两坑点侧面及水平界面的反射波相互叠加的效果.

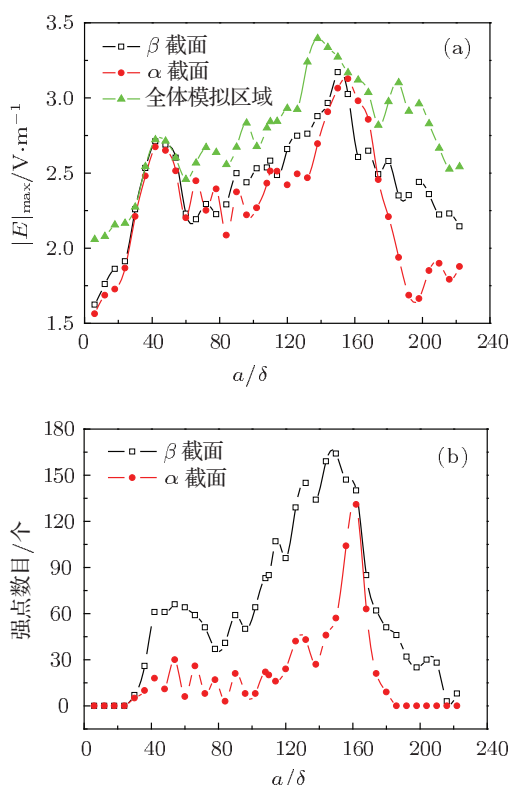


图5 坑点型划痕光场调制的宽度效应 (a)  $|E|_{\max}$  分布; (b) 强点数目分布

### 3.2 坑点宽度对光场调制的影响

设定三维总场为  $250\delta \times 250\delta \times 100\delta$ , 时间步数  $n = 1600$ , 水平分界面是  $z = 85\delta$ . 研究  $b = 50\delta$ ,  $c = 12\delta$ ,  $a$  从  $6\delta$  逐渐增大到  $222\delta$  时划痕的近场调制. 由图 5(a) 所示,  $\alpha$  和  $\beta$  面分别在  $a = 156\delta$  和  $150\delta$  时取得最大值, 其最大值分别为  $3.12662$  和  $3.17132$  V/m. 为了获取更准确的信息, 统计了全体模拟区域的  $|E|_{\max}$  分布. 图 5(a) 显示在  $a = 138\delta$  时, 全体模拟域的  $|E|_{\max} = 3.39569$  V/m, 对应 LIEF 为 11.53, 均大于  $\alpha, \beta$  面的对应值, 说明最优调制并非出现在对称面. 同时该值比王凤蕊等<sup>[12]</sup> 用二维 FDTD 算得的对应  $R$  的值 (LIEF 为 6.0) 大近一倍, 这说明将具有无线条对称轴的三维坑点简化为二维模型时, 计算所带来的误差将是准倍数级的. 因为对于同一个模拟点, 三维模型获得的场值是立体空间场的叠加, 而二维模型的该值只是平面场的叠加, 这种误差是不言而喻的. 由图 5(b) 可知,  $\beta$  面的强点数目总是

略大于  $\alpha$  面, 当  $a = 150\delta$  时,  $\beta$  面最大值为 164 个. 综上, 当  $a$  连续增大时,  $R$  取区间为 2.8—3.1 时, 可获最大调制.

### 3.3 坑点间距对光场调制的影响

设定三维总场为  $250\delta \times 250\delta \times 100\delta$ , 时间步数为  $n = 1600$ , 水平分界面为  $z = 85\delta$ ,  $a = 102\delta$ ,  $b = 50\delta$ , 间距  $c$  从  $0\delta$  开始逐步增加. 由图 6(a) 可知,  $\alpha$  面和全体模拟域内的  $|E|_{\max}$  的变化趋势相一致, 即随  $c$  的增大,  $|E|_{\max}$  先振荡增大然后振荡减小, 当  $c = 60\delta$  时达到最佳调制点, 其最大值分别为  $2.69542$  和  $3.06641$  V/m. 由  $\alpha$  和  $\beta$  面可见,  $c > 100\delta$  时, 电场的调制基本趋于稳定,  $|E|_{\max}$  稳定值区间为 2.0—2.4 V/m. 图 6(b) 中,  $\alpha$  面的强点数目表现出了与  $|E|_{\max}$  类似的规律, 即先增大后减小, 且当  $c = 60\delta$  时取得最大值 60 个. 图 6(a) 和 (b) 中,  $\beta$  平面都是随着  $c$  的增大逐渐减小, 这是因为  $c$  越大, 坑点距  $\beta$  面越远, 近邻两坑点在该面的调制均减弱, 故叠加获得的  $|E|_{\max}$  和强点数目均减小. 由图 6(b) 可知,  $\alpha$  和  $\beta$  面均在  $c > 100\delta$  时趋于稳定, 稳定值区间为 0—30 个.

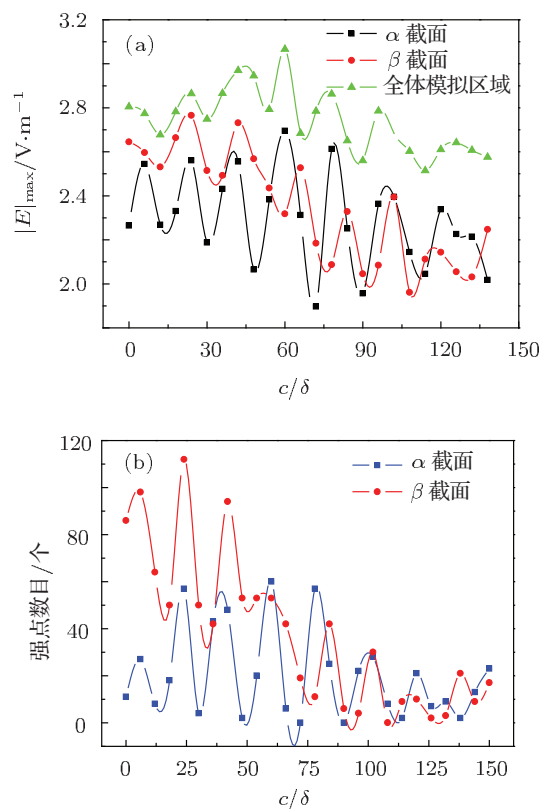


图6 坑点型划痕光场调制的间距效应 (a)  $|E|_{\max}$  分布; (b) 强点数目分布

由图 6(a) 和 (b), 对  $\alpha$  面和  $\beta$  面进行比较. 当  $c < 60\delta$  时,  $\beta$  面的调制优于  $\alpha$  面, 这说明此时整个模拟区域内的最大调制点主要由相邻两坑的调制和来贡献; 当  $c \geq 100\delta$  时, 两平面调制相近, 说明该最大调制点可由单坑附近的强场点贡献. 综上, 对于  $R \approx 2$  的坑点型划痕,  $c \approx a/2$  时, 其危害最大, 应该予以避免; 当  $c > a$  时, 多坑的调制和不占优, 其最大调制近似于单坑.

为形象化上述结论, 现讨论  $\alpha$  面的电场分布. 由图 7(a) 和 (b) 可知, 当  $c$  较小时, 最大场点分布在间距  $c$  的正中央 ( $\beta$  面) 附近. 图 6 中,  $c = 60\delta$  时  $\beta$  面调制最强, 在图 7(b) 中,  $c = 60\delta$  时  $\alpha$  面正中央

位置刚好对应了最大电场. 当  $c = 102\delta$ , 即  $c = a$  时, 如图 7(c) 所示, 最大的调制点分布在一个较宽的范围, 此时  $\beta$  面调制不占优, 或者说正好占优. 当  $c > 102\delta$  时, 如图 7(d) 所示, 正中间调制完全不占优, 而坑点附近的近距离位置电场较大, 即调制占优. 这些结论刚好契合上述推论.

图 8 为  $\beta$  面的电场分布, 展示了一个有趣的对称破缺过程. 当  $c$  较小时, 如图 8(a) 所示,  $\beta$  面的  $|E|$  分布有明显的类似抛物线的对称性, 这是由两侧坑点的对称性引起的. 随着  $c$  的增大, 这种印记越来越不清晰, 当  $c = 48\delta$  时, 如图 8(b) 所示, 这种对称性被完全打破.

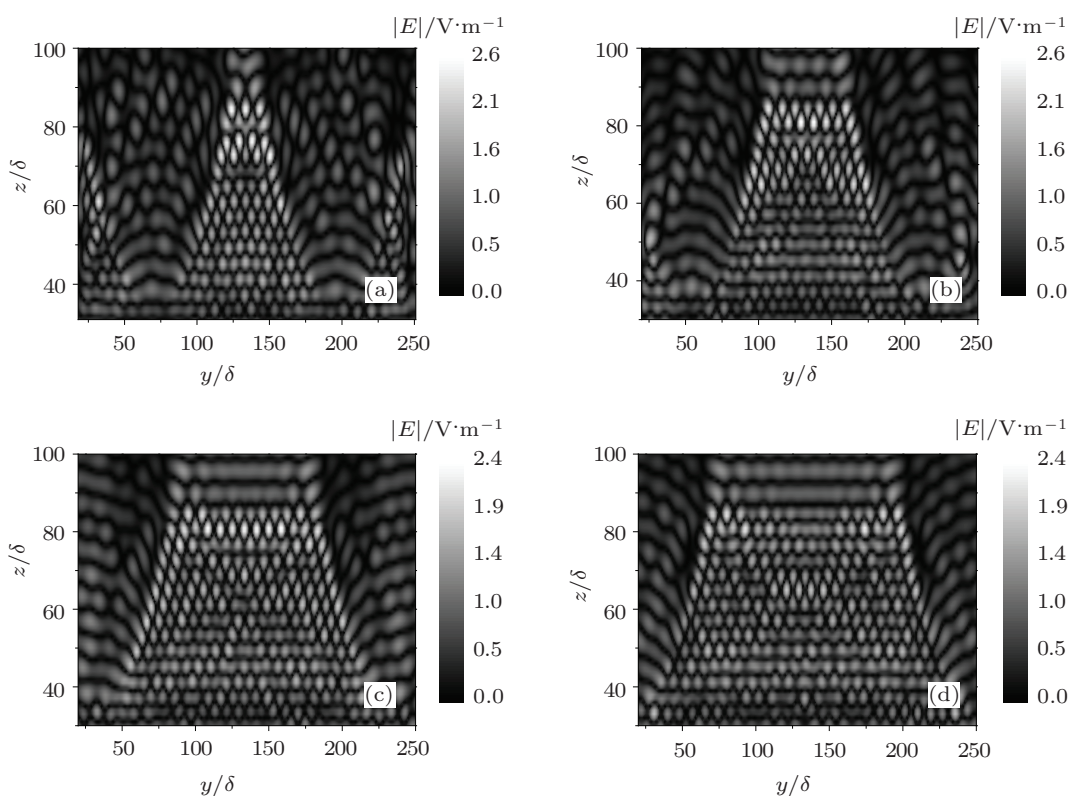


图 7  $\alpha$  面的电场分布 (a)  $c = 24\delta$ ; (b)  $c = 60\delta$ ; (c)  $c = 102\delta$ ; (d)  $c = 132\delta$

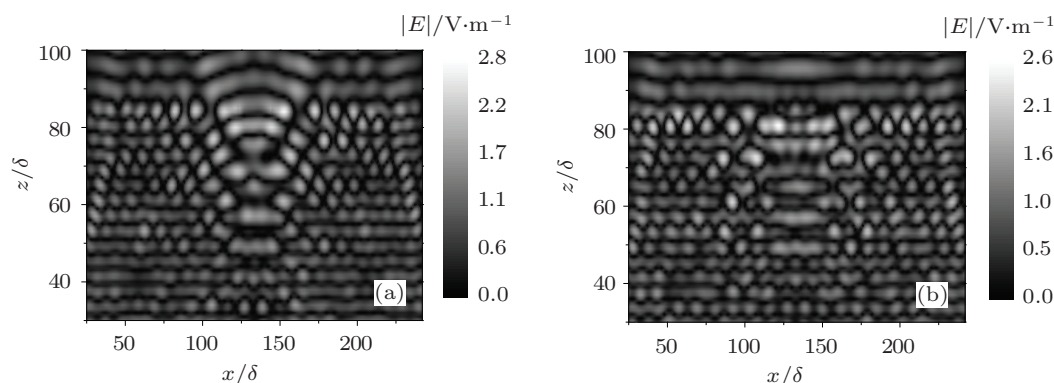


图 8  $\beta$  面的电场分布 (a)  $c = 0\delta$ ; (b)  $c = 48\delta$

### 3.4 酸蚀对光场调制的影响

据报道,酸刻蚀可有效去除抛光层中的杂质,钝化缺陷,起到提高熔石英激光损伤阈值的目的<sup>[1,12,13]</sup>.酸蚀过程中,坑点型划痕的宽和深都在增加,同时间距在减小,这是个多变量变化过程,情况较为复杂,不容易总结出一般的规律,但因其与工程应用密切相关,因此很有必要对这一过程的光场调制进行研究.

设定三维总场为  $250\delta \times 250\delta \times 115\delta$ , 时间步数为  $n = 1600$ , 水平分界面  $z = 100\delta$ ,  $a = 60\delta$ ,  $b = c = 30\delta$ , 酸蚀量  $\Delta x$  从  $0\delta$  开始逐步增大. 经计算,酸蚀过程中坑点型划痕的  $R = a[b(b+\Delta x)]^{-1/2}$ , 对于本例,  $\Delta x$  从 0 增加到  $39\delta$  时,  $R$  从 2.0 单调减小到 1.32.  $|E|_{\max}$  的分布如图 9(a) 所示. 可见对于  $\alpha$  面,  $|E|_{\max}$  呈振荡摆动, 约在  $\Delta x = 24\delta$  时, 取得最大值 2.80291 V/m; 对于  $\beta$  面,  $|E|_{\max}$  同样呈振荡摆动, 当  $24\delta \leq \Delta x \leq 33\delta$  时, 调制最佳, 当  $\Delta x = 27\delta$  时, 取得最大值 3.20830 V/m; 对于全体模拟域, 其增减趋势与  $\beta$  面类同, 最大值出现在  $\Delta x = 27\delta$ , 其值为 3.31670 V/m, 对应的 LIEF 约为 11.0. 从强点数目来看, 如图 9(b) 所示,  $\alpha$  面呈摆动增加, 当  $\Delta x = 24\delta$  时, 取最大值 65 个, 当  $\Delta x = 33\delta$  时, 基本稳定在 33 个左右. 对于  $\beta$  面,  $\Delta x = 24\delta$  时, 其值超过 100, 之后随着  $\Delta x$  的增加, 其值很平稳, 在 100—115 之间波动. 因此作者认为,  $\Delta x = 24\delta$  是一个关节点, 这个点使得各个截面的  $|E|_{\max}$  逐步获取最大值, 同时各截面的强点数目也逐步趋于稳定. 经计算, 此时  $a = 80.5\delta$ ,  $b = 54\delta$ ,  $c = 9.5\delta$ ,  $R$  为 1.5, 因此这个关节点出现在相邻两坑点即将贯通的前夕.

$\gamma$  截面的电场分布大多如图 4(c) 所示, 最强场对称分布在两坑点连接区, 看不到更为精细的结构. 但是如果坑点的尺寸和间距合适, 会导致某些  $\gamma$  截面的干涉很强烈, 致使同一平面上不同点的电场幅值涨落很大, 就会出现很精美的稳定干涉图样, 在刻蚀过程中的  $\gamma_{98}$  面就是这样一种平面. 图 10 为  $\gamma_{98}$  面电场排布图像, 该面距水平表面约为 60 nm, 坑点间的最强场区有的是在  $c$  线的左右两侧 (如图 10(a) 所示), 有的落在了  $c$  线上 (如图 10(b) 和 (c) 所示). 相邻两坑点以多条增强线相联, 增强线关于  $c$  线对称, 且最内层的强度最大, 往外依次减弱. 随尺寸和间距的变化, 图 10(a) 和 (b) 的情况, 会缓慢循环转化, 因此最强场不一定在对称的  $\alpha$  或  $\beta$

面上. 当  $\Delta x = 24\delta$  时,  $\gamma_{98}$  面的强区被压缩成了三条短亮线 (如图 10(c) 所示), 而最表面层的  $\gamma_{100}$  面的强区则被缩成了一条亮线. 当  $\Delta x > 24\delta$  时, 相邻两坑点的电场逐渐衍射贯通, 如图 10(d) 所示. 这一结论与对图 9 的阐述推理一致, 即当间距  $c < 10\delta$  (约为 300 nm) 时, 相邻坑点虽然在几何上相互独立, 但在场分布的物理上已衍射贯通.

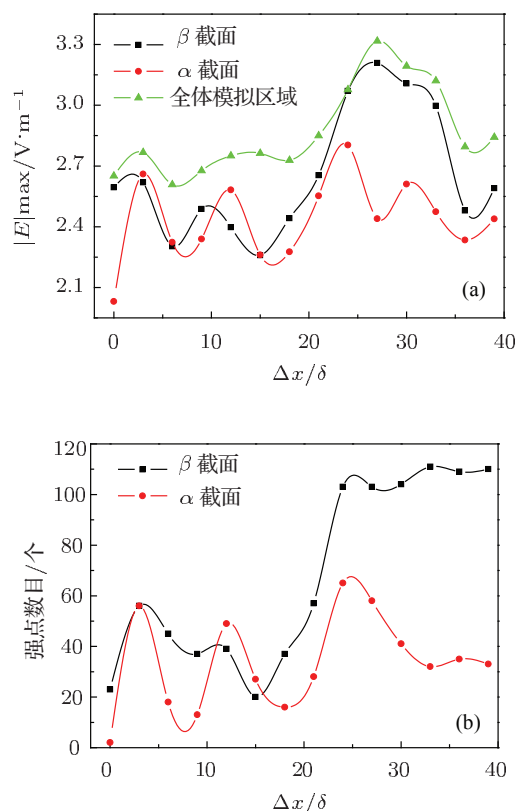


图9 酸蚀量对坑点型划痕光场调制的影响 (a)  $|E|_{\max}$  分布; (b) 强点数目分布

## 4 结论

建立了坑点型划痕的旋转抛物面模型, 该模型坑点全等, 呈直线排布, 且间距相等. 用三维 FDTD 方法研究了熔石英后表面坑点型划痕随深度、宽度、间距以及酸蚀量变化对 355 nm 入射激光的调制. 研究表明, 这类划痕调制最强区位于相邻两坑点连接处, 且越靠近表面调制越强. 在坑点底侧的非缺陷区, 电场受到的扰动较小, 不足以引起较大的场调制. 具体结论如下: 1) 当  $a = 80\delta$ ,  $c = 40\delta$ ,  $R$  为 2.1—2.2 时可取得最大场调制, 最大 LIEF 为 7.27; 2) 当  $b = 50\delta$ ,  $c = 12\delta$ ,  $R$  为 2.8—3.1 时可取最大场调制, 最大 LIEF 为 11.53; 3) 当  $a = 102\delta$ ,  $b = 50\delta$ ,  $c \approx a/2$  时取最大场调制,

最大 LIEF 为 9.4; 当  $c > a$  时, 其调制能力大为减弱, 相当于单坑的场调制, 此时对称截面  $\beta$  不再具有调制优势; 同时随  $c$  的增大,  $\beta$  面的电场的抛物对称性也遭到破坏; 4) 对  $a = 60\delta, b = c = 30\delta$  的划痕进行了酸蚀模拟, 结果表明, 酸蚀中的最大 LIEF

为 11.0. 在干涉较强面能获得精细的电场分布图像, 相邻坑点以多条增强线连接, 增强线关于  $\alpha$  和  $\beta$  面都对称. 当  $c < \lambda$  时, 特别当  $c < 300 \text{ nm}$  时, 相邻两坑在物理上呈衍射贯通状态.

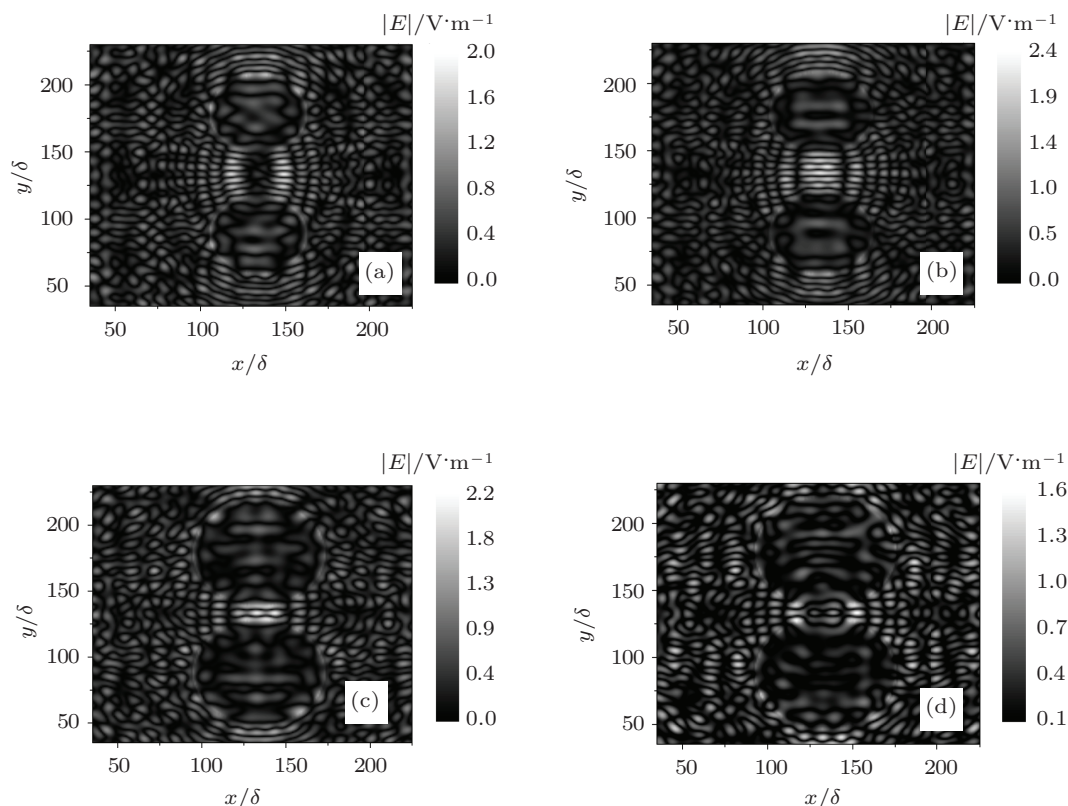


图 10  $\gamma_{98}$  面的  $|E|$  分布 (a)  $\Delta x = 0\delta$ ; (b)  $\Delta x = 3\delta$ ; (c)  $\Delta x = 24\delta$ ; (d)  $\Delta x = 30\delta$

- [1] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, Menapace J A, Borden M R, Whitman P K, Yu J, Runkel M J, Riley M O, Feit M D, Hackel R P 2004 *Proc. SPIE* **5341** 84
- [2] Huang W Q 2009 *MS Thesis* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [黄晚晴 2009 硕士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [3] Belleville P, Prené P, Bonnin C, Beaurain L, Montouillout Y, Lavastre É 2004 *Proc. SPIE* **5250** 196
- [4] Pégon P M, Germain C V, Rorato Y R, Belleville P F, Lavastre E 2004 *Proc. SPIE* **5250** 170
- [5] Bercegol H, Bouchut P R, Lamaignere L, Le Garrec B, Raze G 2004 *Proc. SPIE* **5273** 312
- [6] Papernov S, Schmid A W 2008 *Proc. SPIE* **7132** 71321J-1
- [7] Liu F M, Zhang L D, Li G H 2005 *Chin. Phys.* **14** 2145
- [8] Bloembergen N 1973 *Appl. Opt.* **12** 661
- [9] Hua J R, Zu X T, Li L, Xiang X, Chen M, Jiang X D, Yuan X D, Zheng W G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2519 (in Chinese) [花金荣, 祖小涛, 李莉, 向霞, 陈猛, 蒋晓东, 袁晓东, 郑万国 2010 物理学报 **59** 2519]
- [10] Hua J R, Li L, Xiang X, Zu X T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 044206 (in Chinese) [花金荣, 李莉, 向霞, 祖小涛 2011 物理学报 **60** 044206]
- [11] Ge D B, Yan Y B 2005 *FDTD Method for Electromagnetic Waves* (Xi'an: Xidian University Press) (in Chinese) [葛德彪, 闫玉波 2005 电磁波时域有限差分方法 (西安: 西安电子科技大学出版社)]
- [12] Wang F R, Huang J, Liu H J, Zhou X D, Jiang X D, Wu W D, Zheng W G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5122 (in Chinese) [王凤蕊, 黄进, 刘红婕, 周信达, 蒋晓东, 吴卫东, 郑万国 2010 物理学报 **59** 5122]
- [13] Miller G H, Moses E I, Wuest C R 2004 *Opt. Eng.* **43** 2841

# Simulation of field intensification induced by pit-shaped crack on fused silica rear-surface\*

Zhang Chun-Lai<sup>1)</sup> Wang Zhi-Guo<sup>1)†</sup> Xiang Xia<sup>1)</sup> Liu Chun-Ming<sup>1)2)‡</sup> Li Li<sup>1)</sup>  
Yuan Xiao-Dong<sup>2)</sup> He Shao-Bo<sup>1)2)</sup> Zu Xiao-Tao<sup>1)</sup>

1) (*School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

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

(Received 4 August 2011; revised manuscript received 2 September 2011)

## Abstract

Rotating paraboloid model is established, and three-dimensional finite-difference time-domain method is used to simulate pit-shaped cracks on fused silica rear-surface. The light intensification with its depth, width, gap distance and etch value are investigated under 355 nm laser incident. Results show that the strongest modulation is located at the connection area between pit and pit, and the modulation become strong with approaching to the surface. The maximum light intensity enhancement factor (LIEF) is 11.53 when the breadth depth ratio ranges from 2.0 to 3.5 and gap distance close to 1/2 width. As gap distance greater than the width, the modulation reduces greatly, which is equal to a single pit. For  $60\delta$ -width,  $30\delta$ -depth and  $30\delta$ -gap distance cracks, the maximum LIEF is 11.0 during the acid etching. As the gap distance is less than 300 nm, the diffraction of the light field makes the neighbor pits connective.

**Keywords:** fused silica, pit-shaped crack, laser irradiation, finite-difference time-domain

**PACS:** 42.60.Jf, 42.62.-b, 42.70.Ce, 52.57.-z

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10904008), the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and the China Academy of Engineering Physics (Grant No. 11076008), and the Scientific Research Foundation for the Central Universities of China (Grant Nos. ZYGX2009X007, ZYGX2010J045, ZYGX2011J043).

† E-mail: zgwang@uestc.edu.cn

‡ E-mail: cmliu@uestc.edu.cn