

# 熔石英亚表面三维 Hertz 锥形划痕附近 光强分布的数值模拟\*

花金荣<sup>1)</sup> 祖小涛<sup>1)†</sup> 李 莉<sup>1)</sup> 向 霞<sup>1)2)</sup> 陈 猛<sup>1)2)</sup> 蒋晓东<sup>2)</sup>  
袁晓东<sup>2)</sup> 郑万国<sup>2)</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)

(2009 年 5 月 15 日收到; 2009 年 7 月 23 日收到修改稿)

熔石英亚表面划痕对入射激光的调制是导致光学材料损伤的主要因素. 本文建立了熔石英后表面上三维 Hertz 锥形划痕模型, 采用三维时域有限差分方法对划痕周围的电场强度进行了计算模拟, 并分别讨论了划痕的深度、半径以及倾斜角度对入射光场调制作用的影响. 结果表明: Hertz 锥形划痕中心区域的电场增强效果最明显, 最容易被辐照损伤; 划痕的深度从  $\lambda$  变化到  $9.5\lambda$  的过程中, 熔石英内的最大电场强度逐渐增大; 半径小于  $1.5\lambda$  的 Hertz 锥形划痕较容易引起熔石英的损伤, 当半径大于  $1.75\lambda$  时, 熔石英内的最大电场强度都维持在  $2.5 \text{ V/m}$ , 不再受半径大小影响; 当入射激光在划痕的内侧界面和熔石英后表面之间发生内全反射时, 光场增强效果愈加明显.

**关键词:** 三维时域有限差分, Hertz 锥形划痕, 电场分布, 数值模拟

**PACC:** 4260F, 4260K, 4270E, 4710

## 1. 引 言

大型光学系统中光学材料的损伤包括本征损伤和缺陷损伤<sup>[1,2]</sup>, 并且缺陷损伤阈值总是低于本征损伤阈值<sup>[3]</sup>, 熔石英亚表面划痕是导致这一结果的主要因素之一<sup>[4-7]</sup>, 它是在研磨、抛光等加工过程中形成, 形态各异<sup>[8,9]</sup>. 田东斌<sup>[10]</sup>根据划痕形貌特征将其分为 Boussinesq-point-force crack (简记为 BPFC), Hertzian-conical scratch (简记为 HCS) 和 plastic indent (简记为 PI) 三类. 其中关于 HCS 对入射激光的调制作用, 国内外科学工作者作了一定的研究. 田东斌<sup>[11]</sup>将 HCS 简化成两条对称划痕进行了二维数值模拟, 当两条划痕的深度为  $1 \mu\text{m}$ , 宽度为  $200 \text{ nm}$  时, 熔石英中最大光强增强因子为  $14.2$ , 是单条划痕时的  $2$  倍. Génin<sup>[12]</sup>模拟了石英玻璃亚表面、三维 HCS 周围电场强度的分布, 在 HCS 的倾斜角为  $30^\circ$ , 划痕宽度为  $50 \text{ nm}$ , 深度为  $1 \mu\text{m}$  时, 石英玻璃中最大光强增强因子可高达  $102$ , 远远高于

单条划痕以及双划痕的情形. 但是 Génin 只是对特定结构的 HCS 周围电场强度进行了模拟, 没有详细分析和讨论 HCS 的结构参数对入射光场调制作用的影响. 本文建立三维 HCS 模型, 利用三维时域有限差分方法, 计算并模拟 HCS 周围的电场分布, 给出三维 HCS 的深度、半径以及倾斜角与熔石英内最大电场强度的关系, 从而为实验上提高熔石英亚表面损伤阈值提供一定的参考依据.

## 2. 物理模型和计算方法

本文中计算模拟所采用的缺陷模型如图 1 所示, 其中图 1(a) 为 HCS 三维结构示意图, 图 1(b) 为 HCS 的  $yOz$  平面结构示意图, 体材料为均匀熔石英, 其相对介电常数  $\epsilon_r$  为  $2.25$ , 其他三个电磁参数, 即相对磁导系数  $\mu_r$ , 电导率  $\sigma$  和导磁率  $\sigma_m$  分别为  $1.0, 0$  和  $0$ . 三维 HCS 位于熔石英的后表面上, 其宽度为  $w$ , 深度为  $d$ , 划痕与出射面法向的夹角为划痕倾斜角, 用  $\theta$  表示. 激光从熔石英的前表面垂直入

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA804233) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xtzu@uestc.edu.cn

射,即沿  $z$  轴正方向. 设入射波电场强度幅值为  $1.0 \text{ V/m}$ , 本文中以 TM 入射激光为例, 激光波长为  $351 \text{ nm}$ . 忽略熔石英中其他位置的杂质缺陷, 并认为缺陷区域是真空的. 本文采用三维时域有限差分方法<sup>[13]</sup>, 差分网格尺寸取为  $\delta = \lambda/12 = 29.25 \text{ nm}$ , 并采用近年来开始使用的完全匹配层 (perfectly matched layer, 简记为 PML)<sup>[13]</sup> 为吸收边界条件, 计算时间步数为 400, 模拟三维 HCS 对入射激光的调制作用.

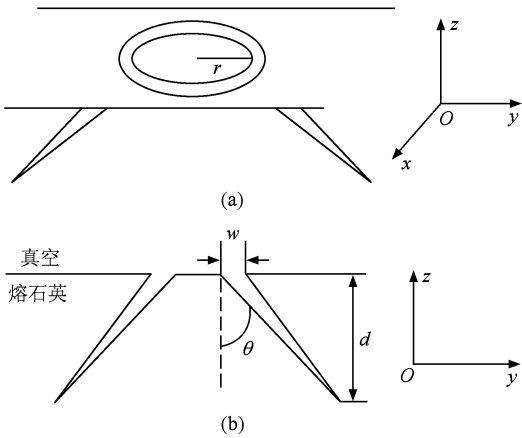


图 1 HCS 模型 (a) 三维结构示意图, (b) 平面结构示意图

3. 计算结果和分析

3.1. 三维模拟结果

设 HCS 的宽度  $w$  为  $\lambda$ , 深度  $d$  为  $4\lambda$ , 半径  $r$  为  $3\lambda/4$ , 计算模拟的结果如图 2 所示. 其中图 2(a) 为  $x = 69\delta$  的  $yOz$  平面电场强度 (所有对电场的计算结果都是取  $x$  方向的分量, 即  $E_x$ ) 分布, 可以看到, 在 HCS 的内侧界面附近是一系列电场增强点, 另外更需要关注的是, 在 HCS 的中垂线上具有更强的一系列电场增强点, 这是由于入射激光被 HCS 的内侧界面反射后的反射光之间, 以及与入射激光相干叠加在此形成的驻波场. 根据计算的数据, 该平面上最大电场强度位于  $y = 138\delta, z = 129\delta$  的位置, 大小为  $2.14108 \text{ V/m}$ . 图 2(b) 为  $z = 135\delta$  的  $xOy$  平面 (后表面) 上电场强度分布, 该平面上最大电场强度为  $2.15586 \text{ V/m}$ , 位置为  $x = 73\delta, y = 147\delta$ , 即在 HCS 的中心区域. 从图中也可以看到, 熔石英后表面上较大的电场强度主要集中在 HCS 的中轴线上以及 HCS 的内侧, 并呈环形分布, 在 HCS 的外侧也有几

处电场强度增强点, 那是 HCS 的外侧界面对入射光场调制作用导致的, 但是相对于 HCS 中心的电场强度, 范围和强度都要小很多. 因此, 对于 HCS, 划痕中心区域的电场强度最大, 该区域在激光辐照损伤过程中较容易被损伤.

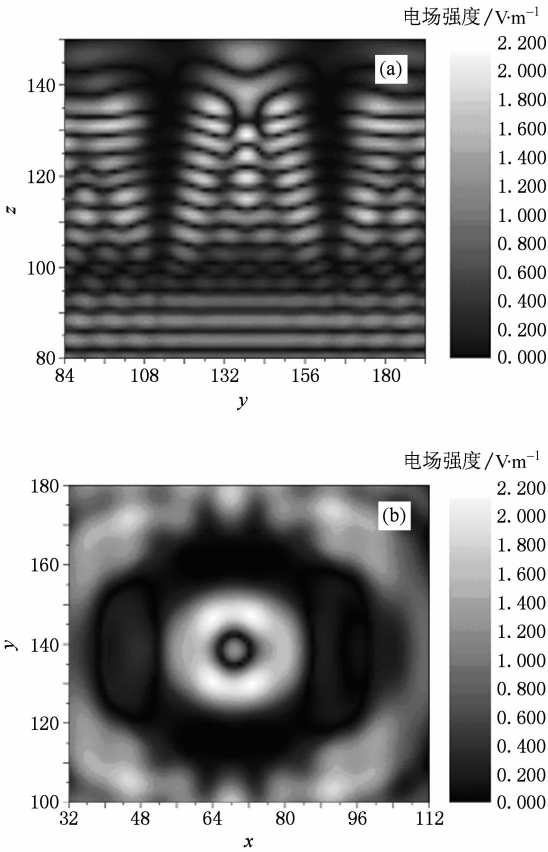


图 2  $w = \lambda, d = 4\lambda, r = 3\lambda/4$  的 HCS 附近电场强度分布 (a)  $x = 69\delta$  的  $yOz$  平面上的电场强度分布, (b)  $z = 135\delta$  的  $xOy$  平面上的电场强度分布

3.2. HCS 的尺寸对调制作用的影响

深度是影响划痕对入射光场调制作用的一个重要因素, 因此有必要取不同的划痕参数, 来考查划痕深度对调制作用的影响. 设划痕的半径  $r$  分别为  $\lambda/4, \lambda/2$  及  $\lambda$ , 划痕的宽度都为  $\lambda$ , 划痕倾斜角度都为  $26.57^\circ$ , 划痕的深度  $d$  都从  $\lambda$  变化到  $19\lambda/2$ , 计算熔石英内的电场强度, 并得到熔石英内的最大电场强度与划痕深度的关系, 即图 3(a). 同样地, 取划痕的倾斜角度分别为  $26.57^\circ, 33.69^\circ$  及  $39.81^\circ$ , 半径都为  $\lambda/2$ , 宽度都为  $\lambda$ , 计算并得到最大电场强度与划痕深度的关系, 即图 3(b). 从图 3 中两图可以看到, 随着划痕深度的增大, 熔石英内  $E_{\max}$  快速增

大,并逐渐趋于不同的稳定值,这是与实际情况相符合的. 因此,越深的 HCS,对入射光场的调制作用越明显,当深度达到一定程度后,其调制作用不再受深度的增加而增强. 图 3(a)中,对于  $r = \lambda/4$  的情况,当 HCS 的深度  $d = 19\lambda/2$  时,熔石英内的  $E_{\max}$  可以达到  $8.44785 \text{ V/m}$ . 对于  $r = \lambda/2$  和  $r = \lambda$  的情况,相应的  $E_{\max}$  分别可以达到  $8.81785$  和  $7.77298 \text{ V/m}$ . 图 3(b)中,对于  $\theta = 26.57^\circ$  的情况,当 HCS 深度  $d = 19\lambda/2$  时,熔石英内的  $E_{\max}$  达到  $8.81785 \text{ V/m}$ . 对于  $\theta = 33.69^\circ$  及  $\theta = 39.81^\circ$  的情况,相应的  $E_{\max}$  分别  $7.46014$  为  $6.18219 \text{ V/m}$ . 根据  $yOz$  平面上的电场强度分布显示,取各参数时计算得到的最大电场强度均位于 HCS 的中心区域,如图 4 所示为半径为  $\lambda/4$ ,宽度为  $\lambda$ ,深度为  $11\lambda/2$  的 HCS 附近的  $yOz$  平面电场强度分布,从图中可以看到,HCS 中心区域的电场强度远远大于熔石英内其他位置的电场强度.

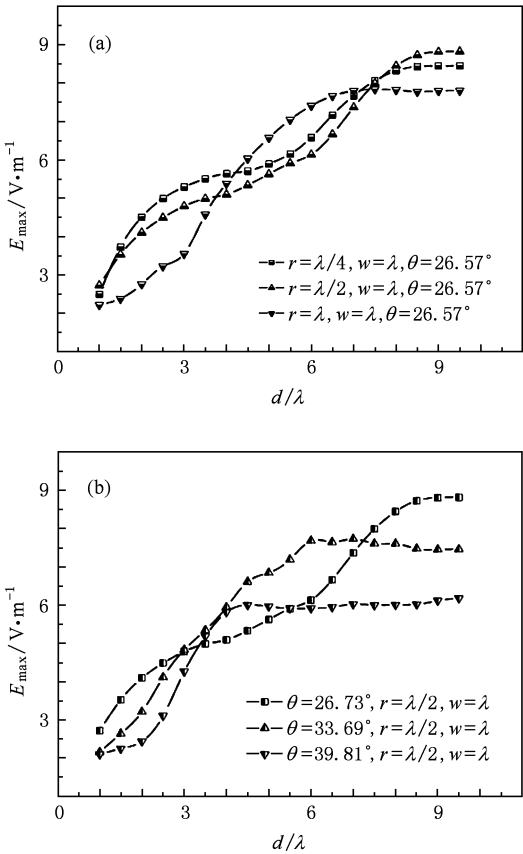


图3 熔石英内  $E_{\max}$  与 HCS 深度的关系 (a) 不同半径的情况, (b) 不同倾斜角度的情况

HCS 的半径  $r$  直接决定了划痕之间的间距,因此半径  $r$  的大小也是影响调制作用的重要因素之

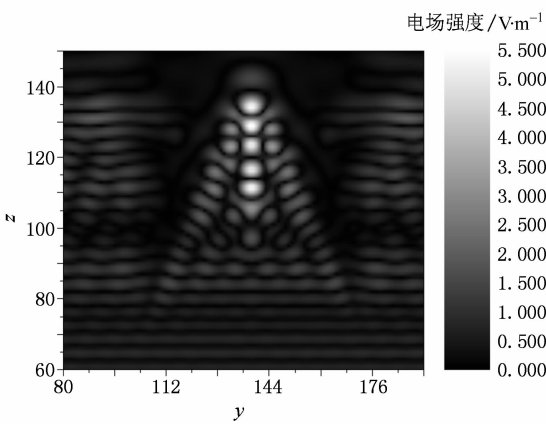


图4  $w = \lambda, d = 11\lambda/2, r = \lambda/4$  的 HCS 附近电场强度分布

一. 考查深度分别为  $5\lambda, 4\lambda$  及  $3\lambda$ , 宽度都为  $\lambda$ , 倾斜角都为  $26.57^\circ$  的 HCS, 其半径  $r$  与熔石英内最大电场强度的关系, 计算结果如图 5(a) 所示. 考查倾斜角度分别为  $32.00^\circ, 26.57^\circ$  及  $20.56^\circ$ , 宽度都为  $\lambda$ , 深度都为  $4\lambda$  的 HCS, 计算得到其半径与熔石英内最大电场强度关系, 如图 5(b) 所示. 从图 5 中可以看到, 当 HCS 的半径  $r < 1.5\lambda$  时, 熔石英内的  $E_{\max}$  比较大, 尤其当  $r < \lambda$  时, 最大值基本都出现在这个范围内. 例如对于  $d = 5\lambda, w = \lambda, \theta = 26.57^\circ$  的情况, 在  $r = 0.75\lambda$  附近的  $E_{\max}$  高达  $7.58168 \text{ V/m}$ . 随着 HCS 半径的增大, 熔石英内  $E_{\max}$  迅速衰减并趋于稳定. 当 HCS 的半径  $r > 1.75\lambda$  时, 熔石英内  $E_{\max}$  都稳定在  $2.5 \text{ V/m}$  左右, 不再受半径大小的影响. 由此可见, 当划痕之间的距离比较近时, 划痕对入射光场调制作用的叠加效果就很明显, 而当划痕之间的距离较远时, 这种叠加效果就逐渐减弱并消失. 图 6 为半径为  $3\lambda/4$ , 深度为  $5\lambda$ , 宽度为  $\lambda$  的 HCS 附近的  $yOz$  平面电场强度分布, 从图 6 中可以看到, 该尺寸下 HCS 中垂线上的增强点基本上集中到了一点, 即  $x = 69 \delta, y = 138 \delta, z = 124 \delta$ . 因此, 半径在  $1.5\lambda$  之内的 HCS 对入射激光有很强的调制作用, 而半径大于  $1.75\lambda$  的 HCS, 其调制作用比较弱.

3.3. HCS 倾斜角度对调制作用的影响

HCS 与熔石英表面的法向夹角  $\theta$  称为 HCS 的倾斜角. 当入射激光入射到熔石英内, 如果  $\theta$  大小合适, 反射波会在熔石英后表面发生全反射, 该反射波和入射波就会叠加形成驻波场, 即在 HCS 内侧界面和熔石英后表面之间发生内全反射<sup>[14]</sup>, 从而导致熔石英内  $E_{\max}$  明显增大. 理论计算得到熔石英发生

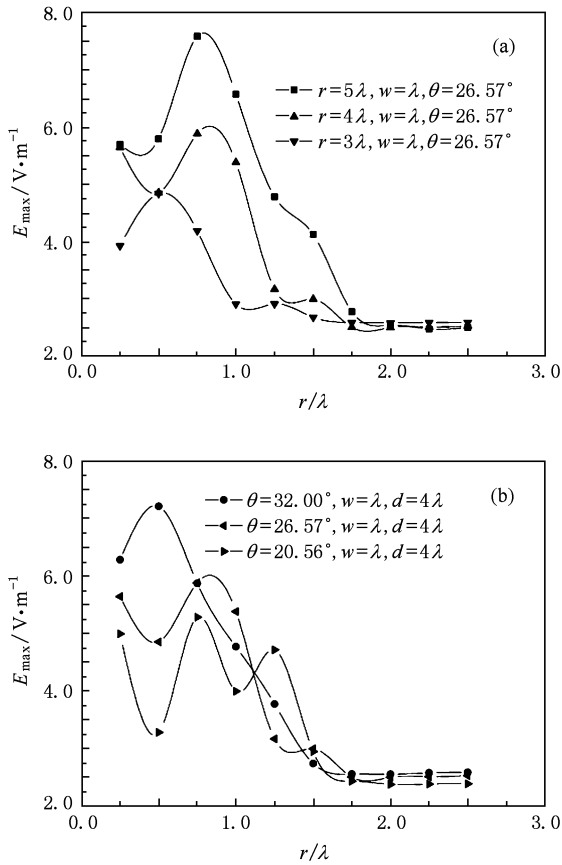


图5 熔石英内  $E_{\max}$  与 HCS 半径的关系 (a) 不同深度的情况, (b) 不同倾斜角度的情况

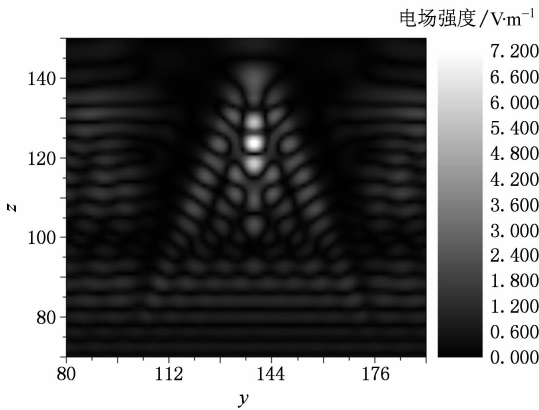


图6  $w = \lambda, d = 5\lambda, r = 3\lambda/4$  的 HCS 附近电场强度分布

内全反射的倾斜角度范围为  $21.4^\circ < \theta < 45^\circ$  [12]. 考查半径  $r$  分别为  $\lambda/4, \lambda/2$  及  $\lambda$ , 深度都为  $7\lambda/2$ , 宽度都为  $\lambda$  的 HCS, 其倾斜角  $\theta$  对入射光场调制作用的影响, 如图 7 (a) 所示. 考查深度  $d$  分别为  $5\lambda/2, 6\lambda/2$  及  $7\lambda/2$ , 半径都为  $\lambda/2$ , 宽度都为  $\lambda$  的 HCS, 其倾斜角  $\theta$  与入射光场调制作用的关系, 如图 7 (b)

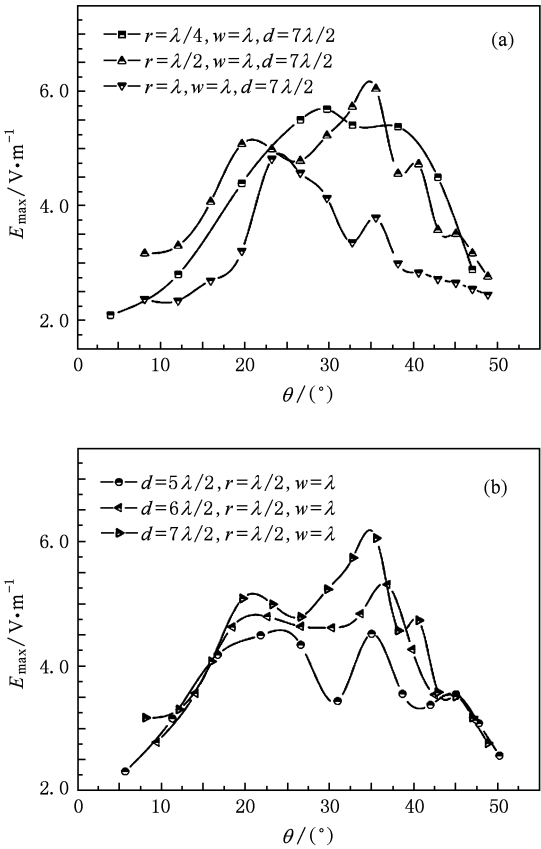


图7 熔石英内  $E_{\max}$  与 HCS 倾斜角的关系 (a) 不同半径的情况, (b) 不同深度的情况

所示. 从图 7 中可以看到, 随着 HCS 倾斜角度的增加, 熔石英内  $E_{\max}$  先快速增大, 在  $20^\circ < \theta < 45^\circ$  的范围内,  $E_{\max}$  均比较大, 且有一定的波动,  $45^\circ$  后  $E_{\max}$  迅速减小. 因此, 倾斜角在全反射角范围内的 HCS 对入射激光场的调制作用非常明显. 计算得到  $d = 7\lambda/2, r = \lambda/2, w = \lambda$  的 HCS, 其倾斜角度为  $35.54^\circ$  时熔

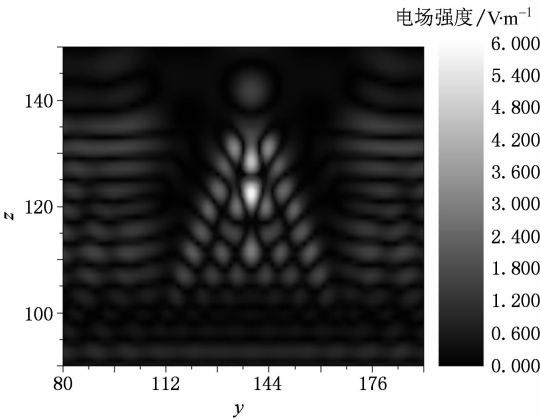


图8  $w = \lambda, d = 7\lambda/2, r = \lambda/2, \theta = 35.54^\circ$  的 HCS 附近电场强度分布

石英的  $E_{\max}$  最大,为 6. 04485 V/m,该尺寸和角度下  $yOz$  平面电场强度分布如图 8 所示.

4. 结 论

HCS 对入射光场的调制作用的决定因素包括其深度、半径、倾斜角等. 本文针对 HCS 的尺寸和倾斜角对调制作用的影响进行了深入的计算模拟和分析,结果表明:HCS 的中心区域是激光辐照损伤

的薄弱区域,该区域聚集着很高的能量;随着 HCS 深度从  $\lambda$  增加到  $19\lambda/2$  的过程中,划痕对光场的调制作用也越来越明显;半径在  $1.5\lambda$  之内的 HCS 更容易引起熔石英的损伤,半径超过  $1.75\lambda$  的 HCS 受半径大小的影响基本消失;HCS 的倾斜角满足全反射条件时,划痕附近的光强增强更加明显. 因此,对熔石英的实际加工过程中,应尽量避免较深的,半径在  $1.5\lambda$  之内的,以及倾斜角度在  $21.4^\circ < \theta < 45^\circ$  范围内的 HCS,才能大大提高熔石英抗激光损伤的能力.

[ 1 ]    Chen F, Meng S X 1998 *Phys. Prog.* **18** 187 ( in Chinese ) [ 陈 飞、孟绍贤 1998 物理学进展 **18** 187 ]

[ 2 ]    Wang Y 2005 *M. S. Dissertation* ( Mianyang: China Academy of Engineering Physics ) ( in Chinese ) [ 王 毅 2005 硕士学位论文 ( 绵阳: 中国工程物理研究院 ) ]

[ 3 ]    Glebov F B 2002 *Proc. SPIE* **4679** 321

[ 4 ]    Sun C W, Lu Q S, Fan Z X 2002 *Laser Irradiation Effect* ( Beijing: National Defense Industry Press ) p265 ( in Chinese ) [ 孙承伟、陆启生、范正修 2002 激光辐照效应 ( 北京: 国防工业出版社 ) 第 265 页 ]

[ 5 ]    Wang Y, Xu Q, Chai L Q 2005 *High Power Laser Part. Beams* **17** 67 ( in Chinese ) [ 王 毅、许 乔、柴立群 2005 强激光与粒子束 **17** 67 ]

[ 6 ]    Feit M D, Rubenchik A M 2004 *Proc. SPIE* **5273** 264

[ 7 ]    Chen X Q, Zu X T, Zheng W G, Jiang X D, Lü H B, Ren H, Zhang Y Z, Liu C M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1201 ( in Chinese ) [ 陈习权、祖小涛、郑万国、蒋晓东、吕海兵、任 寰、张艳珍、刘春明 2006 物理学报 **55** 1201 ]

[ 8 ]    Bonneau F, Combis P, Pujols A 2003 *Proc. SPIE* **4932** 250

[ 9 ]    Zhang D M, Hou S P, Guan L, Zhong Z C, Li Z H, Yang F X, Zheng K Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2237 ( in Chinese ) [ 张端明、侯思普、关 丽、钟志成、李智华、杨凤霞、郑金玉 2004 物理学报 **53** 2237 ]

[ 10 ]    Tian D B, Zu X T, Yuan X D 2007 *High Power Laser Part. Beams* **19** 1547 ( in Chinese ) [ 田东斌、祖小涛、袁晓东 2007 强激光与粒子束 **19** 1547 ]

[ 11 ]    Tian D B, Yuan X D, Zu X T 2008 *High Power Laser Part. Beams* **20** 319 ( in Chinese ) [ 田东斌、袁晓东、祖小涛 2008 强激光与粒子束 **20** 319 ]

[ 12 ]    Génin F Y, Salleo A, Pistor T V 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 2607

[ 13 ]    Ge D B, Yan Y B 2002 *Electro-magnetic Wave and Finite-Difference Fince-Dorucion* ( Xi' an: Xidian University Press ) p14 ( in Chinese ) [ 葛德彪、闫玉波 2002 电磁波时域有限差分方法 ( 西安: 西安电子科技大学出版社 ) 第 14 页 ]

[ 14 ]    Battersby C L 1999 *Proc. SPIE* **3578** 446

# Numerical simulation of light intensity distribution in the vicinity of three-dimensional Hertzian conical scratch on fused silica subsurface<sup>\*</sup>

Hua Jin-Rong<sup>1)</sup> Zu Xiao-Tao<sup>1) †</sup> Li Li<sup>1)</sup> Xiang Xia<sup>1)2)</sup> Chen Meng<sup>1)2)</sup> Jiang Xiao-Dong<sup>2)</sup>  
Yuan Xiao-Dong<sup>2)</sup> Zheng Wan-Guo<sup>2)</sup>

1) (*Institute of Physics and Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

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

(Received 15 May 2009; revised manuscript received 23 July 2009)

## Abstract

The main factor of laser induced damage is the modulation caused by the scratch in the subsurface of the fused silica. The three-dimensional Hertzian conical scratch (HCS) model on the exit surface is established in this article. Three-dimensional finite-difference time-domain method is used to calculate and simulate the electric field intensity distribution in the vicinity of HCS. The effects of depth, radius and gradient angle of the HCS on incident light field modulation are analyzed, respectively. The results show that the electric field enhancement in the center of HCS is the largest. This area is apt to be damaged. The maximal electric field intensity in the fused silica will be enhanced as the depth of the HCS changes from  $\lambda$  to  $19\lambda/2$ . The fused silica is liable to be damaged while the radius of HCS is below  $1.5\lambda$ . When the radius is larger than  $1.75\lambda$ , the maximal electric fields in the fused silica tend to be  $2.5 \text{ V/m}$ . And the maximal electric fields are independent on the radius. The effect of light intensity enhancement is more obviously when total internal reflection occurs between internal interface of HCS and the rear surface of fused silica.

**Keywords:** three-dimensional finite-difference time-domain, Hertzian conical scratch, electric field distribution, numerical simulation

**PACC:** 4260F, 4260K, 4270E, 4710

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA804233).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xtzu@uestc.edu.cn