物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

划痕缺陷对熔融石英光诱导损伤特性的影响分析

刘娅丽　戚磊　郑梦珂　张蓉竹

Effect of scratch defects on photoinduced damage characteristics of fused quartz

Liu Ya-li　Qi Lei　Zheng Meng-Ke　Zhang Rong-Zhu

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 134203 (2021)　DOI: 10.7498/aps.70.20202174

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20202174

当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光诱导熔石英表面损伤修复中的气泡形成和控制研究

Formation and control of bubbles during the mitigation of laser-induced damage on fused silica surface

物理学报. 2018, 67(1): 016103　https://doi.org/10.7498/aps.67.20171839

低磁场下驻波对螺旋波等离子体均匀性的影响

Effect of standing wave on the uniformity of a low magnetic field helicon plasma

物理学报. 2017, 66(4): 045201　https://doi.org/10.7498/aps.66.045201

Si3N4钝化层对横向PNP双极晶体管电离辐射损伤的影响机理

Impact of nitride passivation layer on ionizing irradiation damage on LPNP bipolar transistors

物理学报. 2018, 67(16): 168501　https://doi.org/10.7498/aps.67.20172215

驻波声场中单分散细颗粒的相互作用特性

Interaction between monodisperse fine particles in a standing wave acoustic field

物理学报. 2020, 69(6): 064704　https://doi.org/10.7498/aps.69.20191681

气体压强对纳秒激光诱导空气等离子体特性的影响

Effect of ambient gas pressure on characteristics of air plasma induced by nanosecond laser

物理学报. 2020, 69(5): 057401　https://doi.org/10.7498/aps.69.20191540

量子统计权重对原子场电离效率的影响

Influence of quantum statistical weight on efficiency of electric field ionization of atom

物理学报. 2017, 66(7): 073201　https://doi.org/10.7498/aps.66.073201

划痕缺陷对熔融石英光诱导损伤特性的影响分析

刘娅丽 戚磊 郑梦珂 张蓉竹†

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

(2020 年 12 月 21 日收到; 2021 年 2 月 13 日收到修改稿)

激光辐照光学材料时, 经后表面反射的部分光束与入射光束干涉, 在材料内部形成驻波场. 若材料表面存在缺陷, 缺陷会对入射光进行调制, 导致材料内驻波场分布不再均匀, 局部区域光强增大. 为分析光学材料的场损伤特性, 建立了一个划痕缺陷影响下的光学材料损伤分析模型. 从电子增值理论出发, 分析了划痕数量及其所在位置对材料驻波场和损伤特性的影响, 并针对熔融石英材料进行了具体计算. 结果表明, 在入射光场不变的前提下, 随着划痕数量增加, 对光场的调制作用增强, 材料内部驻波场的最大场强增大, 熔融石英损伤阈值降低. 相对亚表面和后表面划痕缺陷而言, 材料上表面的缺陷对光场具有最大的调制作用, 因此更容易导致材料损伤.

关键词: 表面划痕, 驻波场, 电离速率, 损伤阈值

PACS: 42.55.–f, 42.70.Ce, 61.80.–x **DOI:** 10.7498/aps.70.20202174

1 引 言

要想进一步提高激光输出能量, 材料的抗损伤能力成为主要的瓶颈. 深入了解光诱导材料损伤的物理机理, 探索提高材料抗损伤能力的方法, 对高功率激光系统的研究和发展具有重要意义. 在材料损伤特性的研究过程中, Rubenchik 等[1] 发现熔融石英后表面的损伤几率远大于前表面. Ye 等[2] 分析了划痕形状和尺寸对材料损伤特性的影响, 结果表明, 后表面划痕周围的光场强度随着划痕尺寸的增大而增大, 三角形划痕的光调制效应通常不如锯齿形和抛物面划痕明显. 程建和陈明君[3] 测试了 KDP 的表面缺陷对材料的光场和抗损伤能力的影响, 研究发现缺陷材料后表面的光场强于前表面. 另外, Génin 等[4] 分析了存在裂纹影响下的光场分布, 发现由于裂纹的调制作用使材料内部出现了局部光场增强区域. 这些研究都得到一个结论, 即损伤并没有出现在直接接收光辐射的材料上表面. 出现这一现象的原因除了表面缺陷引起的光调制外, 就是材料内部形成的驻波场.

Xu 等[5] 通过实验分析了熔融二氧化硅的损伤机理, 发现材料的缺陷使其损伤特性降低. Li 等[6] 用实验测定存在划痕缺陷的石英玻璃的损伤点, 发现划痕会使材料损伤点的密度增大. 韩伟等[7] 用实验研究了熔融石英材料在 5 ns 的紫外平顶脉冲激光辐照下的损伤增长情况, 研究发现熔融石英后表面损伤点主要呈指数增长规律, 且损伤增长速率随激光通量的增加而上升. 鲁江涛等[8] 推导了单层膜的驻波场分布公式, 并利用电场分布分析了材料表层的损伤特性. Deng 和 Dong[9] 利用电磁波方程求解了三层不同折射率增透涂料的驻波场分布. 于慧波和冯国英[10] 研究了光学元件内部的应力分布及损伤机理, 发现冲击波使激光辐照中心发生断裂, 冲击波的反射叠加使光学元件局部拉应力增大, 从而导致后表面附近被损伤. 贺全龙[11] 研究了微结构缺陷材料的激光诱导损伤机理, 研究表明材料损伤阈值的决定因素主要是光学带隙和材料的 POHC

† 通信作者. E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn

© 2021 中国物理学会 Chinese Physical Society

结构缺陷. Li 等[12]分析了划痕尺寸对光场调制的影响, 发现材料表面调制场主要受划痕宽度和深度的影响, 其中深度是影响材料损伤特性的最重要参数, 当划痕深宽比一定时, 划痕长度对光场的影响不明显. 我们在前期的工作中[13]研究了划痕尺寸对光场和材料热损伤特性的影响, 研究发现划痕长度对光场的影响极小, 光场主要受划痕宽度和深度的影响, 宽度或深度越大, 对光场调制作用越强, 但深度是影响材料损伤特性最重要的参数.

光学材料的损伤机理研究一直是高功率激光系统研究中关注的重点问题, 光学材料客观存在各种缺陷, 在激光诱导缺陷材料损伤领域中, 现有研究更多的是分析缺陷对光场的调制作用, 研究材料的应力损伤和热熔融损伤, 少有进一步研究缺陷材料的场损伤特性. 另外, 有部分文献关注到了光学元件内部的驻波场问题, 但是没有针对非理想元件内部的驻波场对损伤特性的影响进行具体研究. 在实际的应用条件下表面缺陷对光场的调制会影响到材料内部驻波场的分布, 进而影响材料的损伤特性. 这一物理过程需要通过建立合理的理论分析模型来进行分析. 目前关于材料损伤问题的研究主要是实验测定, 对不同辐照条件下形成的各种损伤特性进行数据整合. 这种后验式的研究方式随机性强, 难以满足实际激光技术发展的需要. 本工作的意义在于: 建立一个理论研究模型, 对实际光学材料的损伤特性进行先验性的研究. 先通过简单的缺陷特性对损伤规律进行分析, 然后在此基础上对随机的复杂缺陷影响进行研究. 通过剖析材料损伤的基本物理实质, 为实际的光学系统研究提供理论参考.

本文以常用的熔融石英材料为研究对象, 基于时域有限差分原理模拟缺陷对光场的调制作用, 针对存在划痕缺陷的熔融石英进行研究, 分析不同划痕缺陷熔融石英的驻波场分布, 并讨论划痕数量和位置对熔融石英场损伤特性的影响.

2 材料内部驻波场分布

激光辐照光学材料时, 在材料中传输光束的部分能量会被下表面反射, 反射光与入射光干涉, 在材料内部形成稳定的驻波场. 对于理想的光学材料, 在材料内任意 z 位置处, 入射光束的电场强度可写为

$$E_z^+ = E\cdot t\cdot \exp\left[\mathrm{i}(-kr_1)\right], \tag{1}$$

反射光束的电场强度可写为

$$E_z^- = E\cdot t\cdot r\cdot \exp\left[\mathrm{i}(kr_2)\right]. \tag{2}$$

在材料内, 入射光和反射光叠加形成驻波场, 该驻波场的电场强度可表示为[8]

$$E_{Z0} = E_z^+ + E_z^- = E\cdot t\cdot\left[\exp\left(-\mathrm{i}kr_1\right) + r\cdot\exp\left(\mathrm{i}kr_2\right)\right], \tag{3}$$

其中, r_1和r_2分别为入射光和反射光的光程, 可表示为 $r_1 = n\cdot z$, $r_2 = n\cdot(2h_0 - z)$, h_0 为材料的厚度, t 和 r 分别为正入射条件下材料上表面的透射率和下表面的振幅反射率, 表达式分别为 $t = \left(\dfrac{2n}{n+n_0}\right)$和 $r = \left(\dfrac{n-n_0}{n+n_0}\right)$, n_0和 n 分别为空气和材料的折射率, E 为入射光的电场强度.

如果材料并非理想, 而是表面存在加工过程残留的划痕, 入射光在材料表面被划痕调制. 光场复振幅中将附加调制相位项 $\Delta\phi_N$, 且与划痕的调制作用直接相关, 因此首先需要分析划痕产生的调制场分布情况. 图 1(a)—图 1(c) 是三种划痕熔融石英的三维简易缺陷模型. 模型中所有划痕的尺寸完全相同, 划痕长 l, 宽 w, 深 h, 划痕数量为 N, 材料的折射率为 n.

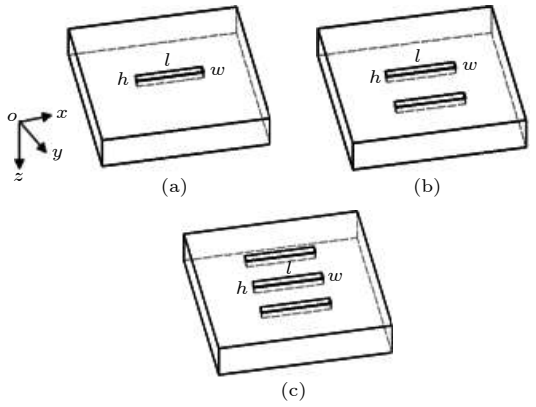

图 1 熔融石英表面划痕缺陷三维图 (a)$N = 1$; (b) $N = 2$; (c) $N = 3$

Fig. 1. Three-dimensional diagram of scratch defects on fused quartz surface: (a) $N = 1$; (b) $N = 2$; (c) $N = 3$.

当光学材料表面存在深度为 h 的相位型凹陷时, 其引入的相位 $\Delta\varphi$ 可写为[13]

$$\Delta\varphi = 2\pi(\mathrm{n}-1)\frac{h}{\lambda}; \tag{4}$$

材料表面的矩形单划痕引入的相位为 $\Delta\phi_1$, 其表达式为[13–15]

$$\Delta\phi_1(x,y,z)=\Delta\varphi\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{x-x_0}{l}\right)\mathrm{rect}\left(\frac{y-y_0}{w}\right); \tag{5}$$

若材料表面存在双划痕, 对光束的相位调制 $\Delta\phi_2$ 为两划痕引入相位的叠加, 其表达式为[13−15]

$$\Delta\phi_2(x,y,z)=\Delta\varphi\cdot\left[\mathrm{rect}\left(\frac{x-x_1}{l}\right)\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{y-y_1}{w}\right)+\mathrm{rect}\left(\frac{x-x_2}{l}\right)\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{y-y_2}{w}\right)\right]; \tag{6}$$

若材料表面存在多条划痕, 则 $\Delta\phi_N$ 可表示为[14,15]

$$\Delta\phi_N=\sum_{n=1}^{N}\Delta\phi_n(x,y). \tag{7}$$

因此, 入射光被光学材料表面的划痕调制后, (3) 式所表示的材料内部的驻波场可改写为

$$E_z=E\cdot t\cdot[\exp(-\mathrm{i}kr_1)+r\cdot\exp(\mathrm{i}kr_2)]\cdot\exp(\mathrm{i}\Delta\phi_N). \tag{8}$$

由 (4) 式—(8) 式可知, 表面划痕会对光场产生相位调制, 划痕的数量、相对位置等参数将影响到最后光场的分布情况.

3 划痕缺陷对熔融石英驻波场的影响

当激光辐照划痕缺陷材料时, 由于光场被划痕调制, 从而改变内部的光场分布情况. 下面分别分析划痕数量及其相对位置对驻波场分布的影响, 选择的入射激光脉宽为 10 ps, 场强为 100 MV/cm, 波长为 355 nm.

3.1 划痕数量对熔融石英驻波场的影响

由 (8) 式可知, 不同数量的划痕会引入不同的相位, 使驻波场分布发生变化. 利用有限差分算法分别对单划痕、双划痕和三条划痕以及理想表面熔融石英材料的驻波场进行了计算, 结果如图 2 所示. 图中的矩形方框表示划痕所在位置.

图 2(a)—图 2(d) 分别为理想表面、单划痕、双划痕和三条划痕熔融石英材料的驻波场分布. 从图 2(a) 可以看出, 激光辐照理想材料时, 单纯由于驻波的影响, 材料内部光场分布出现了周期性的增强现象. 在某一厚度 (即 xoy 面) 上的光场分布是均匀的. 从图 2(b)—图 2(d) 可知, 当表面划痕对入射光场进行调制后, 材料内部驻波场的横向均匀性被破坏, 形成离散的局部增强和减弱. 由此可见, 光能量的重新分配是导致材料损伤以点状形式出现的主要原因. 材料表面存在多条划痕时, 由于每条划痕都会对光场产生相位调制, 因而随着划痕数量增加, 材料内被调制后的场强增大. 同时划痕位置分布会影响驻波场出现增强和减弱的位置. 相比于理想熔融石英, 存在缺陷调制的场强更大. 对于缺陷熔融石英而言, 划痕数量从 1 增加到 3 时, 其场强的峰值分别为 106.4, 110.9 和 113.4 MV/cm.

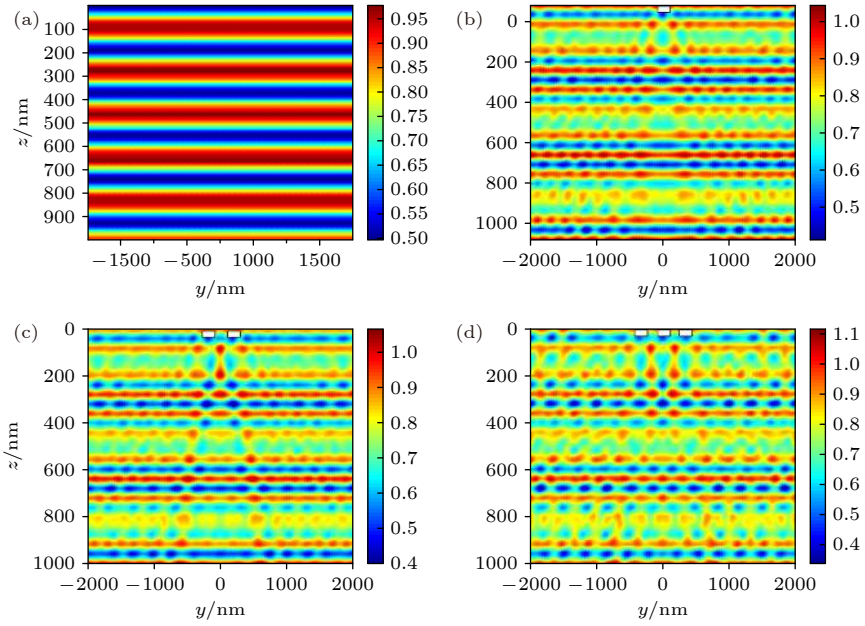

图 2 表面存在不同数量划痕时熔融石英内部的驻波场分布 (a) $N=0$; (b) $N=1$; (c) $N=2$; (d) $N=3$

Fig. 2. Standing wave field distribution inside fused quartz with different number of scratches on the surface: (a) $N=0$; (b) $N=1$; (c) $N=2$; (d) $N=3$.

3.2 划痕位置对熔融石英驻波场的影响

材料内的驻波场分布会受划痕所在位置的影响. 下面分别计算划痕位于材料上表面、亚表面和后表面时, 缺陷熔融石英驻波场的分布情况, 如图 3 所示, 图中的矩形方框表示划痕所在位置.

由图 3 可知, 划痕存在于材料不同位置时, 驻波场分布发生变化. 划痕位于材料上表面时, 两两相邻的划痕间出现光场增强区域. 如果划痕位于亚表面, 光场传输到亚表面才被调制, 而经后表面反射的光场在向上传输过程中再次被划痕调制. 由于往返调制光场反向, 最终的叠加导致划痕间的强光场区域消失. 如果划痕位于后表面, 光场传输到后表面时被划痕调制, 同时调制后的反射光束与刚到达后表面的入射光束叠加, 因而驻波场分布发生变化. 但材料内最大场强位置始终出现在材料下表面, 与现有实验研究结果一致[1−3]. 当划痕位于材料上表面时, 场强最大值为 113.4 MV/cm. 相比而言, 存在于亚表面的划痕对光场的调制作用最弱, 其最大场强为 100.1 MV/cm.

4 驻波场对材料损伤特性的影响

在表面缺陷和驻波场的共同作用下, 材料内部光场分布不再均匀. 在光场强度出现极大值的位置, 能量的瞬间积累让材料内部电子迅速电离为自由电子, 自由电子密度积累方程如下[16−18]:

$$\frac{\mathrm{d}N(t)}{\mathrm{d}t} = R_{\mathrm{ai}} \times N(t) + R_{\mathrm{pi}} - g \times N(t) - \mu \times N(t)^2, \quad (9)$$

其中 $N(t)$ 为自由电子密度, g 和 μ 分别为自由电子扩散与复合速率, R_{ai} 是雪崩电离速率, 根据 Thornber 雪崩电离模型, 其表达式为[16,19,20]

$$R_{\mathrm{ai}}(E) = \frac{v_{\mathrm{s}} eE}{E_{\mathrm{g}}} \exp\left[-\frac{E_{\mathrm{I}}}{E(1+E/E_{\mathrm{p}})+E_{kT}}\right], \quad (10)$$

式中 v_{s} 为饱和漂移速率, e 为电子电荷, E_{g} 为材料的禁带宽度, E_{I}, E_{p}, E_{kT} 分别为电子克服电离散射、声子散射和热散射效应所需的电场强度.

R_{pi} 是多光子电离速率, 根据 Keldysh 光电离模型, 其表达式为[21,22]

$$R_{\mathrm{pi}} = \frac{2\omega}{9\pi}\left(\frac{\omega m}{\hbar\sqrt{\gamma_1}}\right)^{3/2} Q(\gamma, x) \times \exp\left\{-\pi < x+1 > \frac{K(\gamma_1)-E(\gamma_1)}{E(\gamma_2)}\right\}, \quad (11)$$

式中 ω 为辐照激光频率, m 为电子有效质量,

$$Q(\gamma, x) = \sqrt{\frac{\pi}{2K(\gamma_2)}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left\{-n\pi \frac{K(\gamma_2)-E(\gamma_2)}{E(\gamma_1)}\right\} \times \Phi\left\{\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{2 < x+1 > -2x+n}{K(\gamma_2)E(\gamma_2)}}\right\},$$

$\Phi(z) = \int_0^z \exp(y^2 - z^2)\mathrm{d}y$, γ 为材料的 Keldysh 参数, 其值 $\gamma = \dfrac{\omega\sqrt{mE_{\mathrm{g}}}}{eE_{z0}}$, $\gamma_1 = \dfrac{\gamma^2}{1+\gamma^2}$, $\gamma_2 = \dfrac{1}{1+\gamma^2}$, $K(\gamma)$ 为第一类椭圆积分, $E(\gamma)$ 为第二类椭圆积分, 参数 $x = \dfrac{2}{\pi}\dfrac{E_{\mathrm{g}}}{\hbar\omega}\dfrac{E(\gamma_2)}{\sqrt{\gamma_1}}$, $\langle x+1\rangle$ 表示对 $x+1$ 取整.

当自由电子积累到临界值时, 材料折射率发生不可逆转的改变, 从而判定为损伤, 此时激光的能量密度, 即损伤阈值[16,23] 表达式为

$$D_{\mathrm{th}} = \frac{1}{2}c\varepsilon n\int_0^{\tau} E^2 \mathrm{d}t', \quad (12)$$

其中, c 为光速, ε 为介电常数, n 为材料折射率, E 为入射光场强, τ 为激光脉宽.

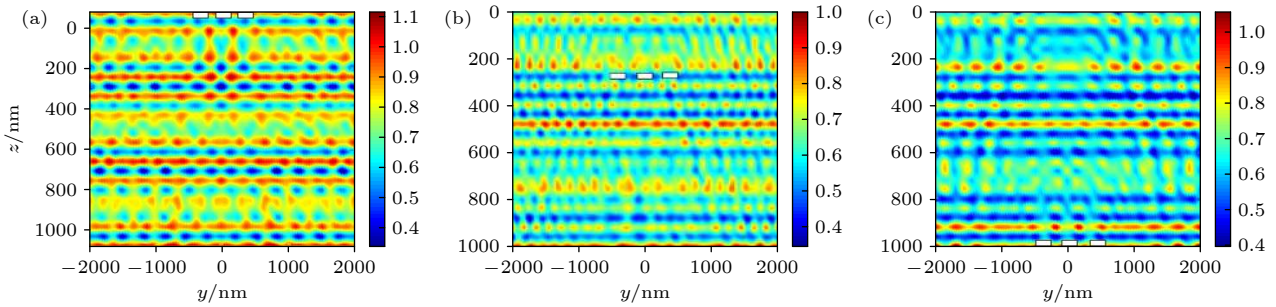

图 3 不同位置缺陷熔融石英的驻波场分布 (a) 上表面缺陷; (b) 亚表面缺陷; (c) 后表面缺陷

Fig. 3. Standing wave field distribution of fused quartz with defects at different locations: (a) Surface defects; (b) subsurface defects; (c) rear surface defects.

5 划痕缺陷对熔融石英损伤特性的影响

场强在自由电子的积累过程中起到了关键性作用, 因而驻波场分布决定了材料的损伤阈值, 即在驻波场中场强更大的位置最先发生损伤. 下面分别分析划痕数量和划痕位置对缺陷熔融石英损伤特性的影响.

5.1 不同数量划痕缺陷熔融石英的损伤特性

由 (10) 式和 (11) 式可知, 材料的电离速率与光场有关. 下面对缺陷熔融石英内电子的电离速率进行计算. 图 4 为理想熔融石英和表面存在单划痕、双划痕、三条划痕时, 材料后表面沿划痕宽度方向的雪崩电离速率和光生电子速率分布.

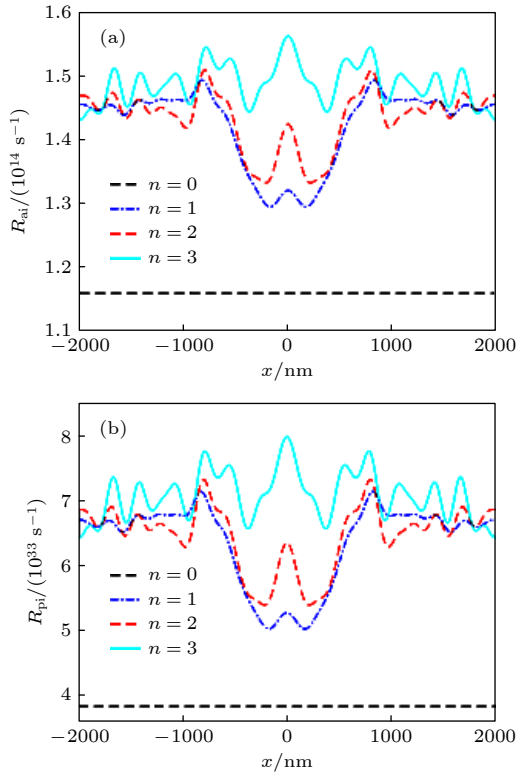

图 4 熔融石英后表面的电离速率随划痕数量的变化 (a) 雪崩电离速率分布; (b) 光生电子速率分布

Fig. 4. Changes of the ionization rate of fused quartz with the number of scratches: (a) Avalanche ionization rate distribution; (b) photoelectron ionization rate distribution.

由图 4 可知, 缺陷熔融石英的雪崩电离速率和光生电子速率有相同的变化规律, 是由于两种电离速率都与场强成正相关的关系. 划痕调制使材料内的场强增大, 从而使缺陷材料的两种电离速率都大于理想情况, 且最大速率出现在光场最大值位置. 随着表面划痕的数量增加, 调制光场之间的相互干涉作用也随之增强, 从而使得两种电离速率的最大值均随划痕数量的增多而增大. 当表面存在三条划痕时, 两种电离速率都出现了数值接近的三个峰, 恰好与驻波场中的最大场强位置一致.

结合 (9) 式, 计算了划痕数量不同时, 缺陷熔融石英内自由电子随时间的增值规律, 如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 随着划痕数量的增加, 缺陷熔融石英材料内自由电子积累越快. 因为划痕增加时, 调制后的光场越强, 雪崩电离速率和多光子电离速率都增大, 因而材料更快积累自由电子, 也更易发生损伤.

利用 (12) 式计算不同划痕数量缺陷熔融石英的损伤阈值, 如图 6 所示. 存在表面划痕缺陷时的损伤阈值明显低于理想表面的熔融石英. 划痕数量

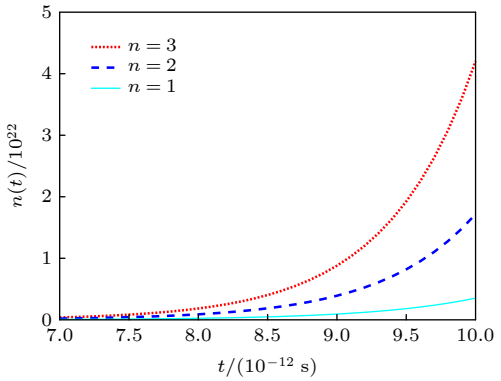

图 5 划痕数量不同的熔融石英内自由电子积累过程

Fig. 5. Free electron accumulation in fused quartz with different number of scratches.

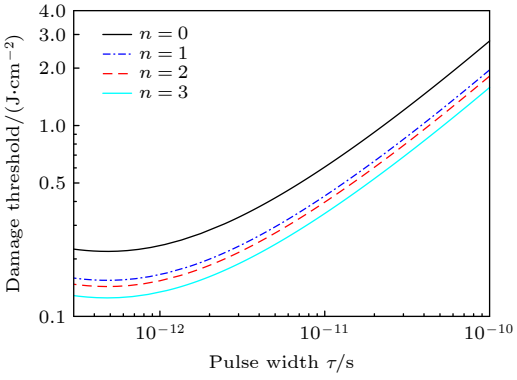

图 6 不同划痕数量熔融石英的损伤阈值

Fig. 6. Damage thresholds of fused quartz with different number of scratches.

从 0 增加到 3 时, 由于调制后的场强随划痕数量的增多而增大, 因而损伤阈值随划痕数量的增加而降低. 当脉宽为 10 ps 时, 理想熔融石英的损伤阈值为 0.53 J/cm^2, 有三条划痕材料的阈值为 0.35 J/cm^2, 降低到理想阈值的 66.1%.

5.2 不同位置划痕缺陷熔融石英的损伤特性

由于划痕缺陷位于材料不同位置时, 其驻波场分布不同, 从而使电离速率分布和材料的损伤特性不同. 下面分别计算缺陷位于上表面、亚表面和后表面时, 熔融石英后表面沿划痕宽度方向的雪崩电离速率和光生电子速率分布.

由图 7 可知, 当划痕位于不同表面时, 其最大电离速率出现的位置不同. 若划痕位于材料亚表面或后表面, 最大电离速率出现在边缘两划痕位置附近, 且两种电离速率的最大值都低于划痕存在于上表面的情况, 这是因为划痕产生的附加相位项发生变化, 缺陷材料的最大场强大于理想情况. 划痕位于材料上表面时, 自由电子积累速度最快, 雪崩电离速率和光生电子速率的最大值分别为 1.57 × 10^{14} 和 7.99 × 10^{33} /s.

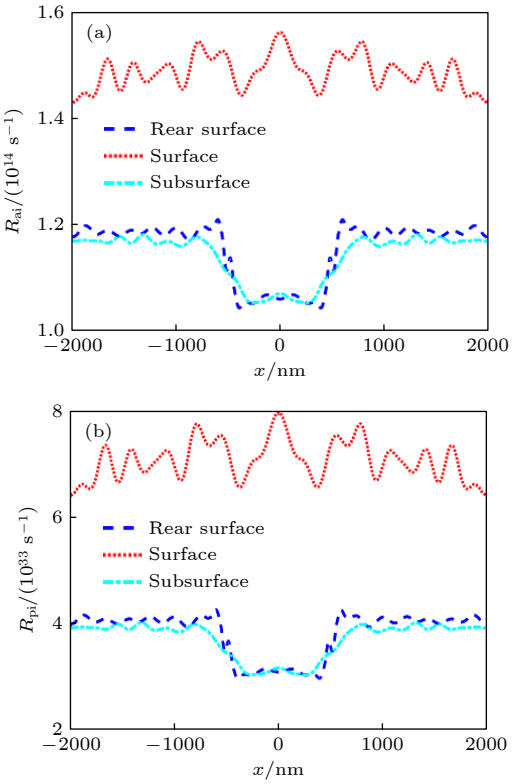

图 7 不同位置缺陷熔融石英的电离速率分布 (a) 雪崩电离速率分布; (b) 光生电子速率分布

Fig. 7. Ionization rate distribution of defective fused quartz at different locations: (a) Avalanche ionization rate distribution; (b) photoelectron ionization rate distribution.

下面计算划痕位置不同时, 缺陷熔融石英内自由电子随时间的增值规律, 如图 8 所示.

从图 8 可以看出, 划痕位置会影响缺陷熔融石英材料内自由电子积累速度. 由于划痕缺陷位于材料上表面时, 熔融石英内的调制光场更强, 雪崩电离速率和多光子电离速率更大, 因而材料自由电子增值越快. 相比而言, 划痕位于材料亚表面时, 自由电子增值最慢.

分别计算不同位置缺陷熔融石英的损伤阈值, 如图 9 所示. 缺陷材料的损伤阈值均低于理想材料. 对于缺陷熔融石英而言, 上表面存在缺陷时, 其损伤阈值低于亚表面和后表面缺陷情况. 当脉宽为 10 ps 时, 亚表面缺陷的熔融石英的损伤阈值为 0.46 J/cm^2, 为上表面缺陷熔融石英阈值的 131.4%.

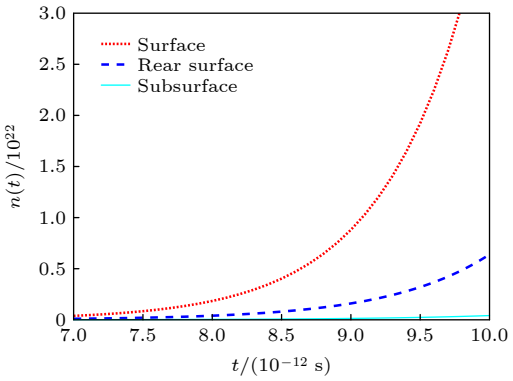

图 8 划痕位置不同的熔融石英内自由电子积累

Fig. 8. Free electron accumulation in fused quartz with different scratch positions.

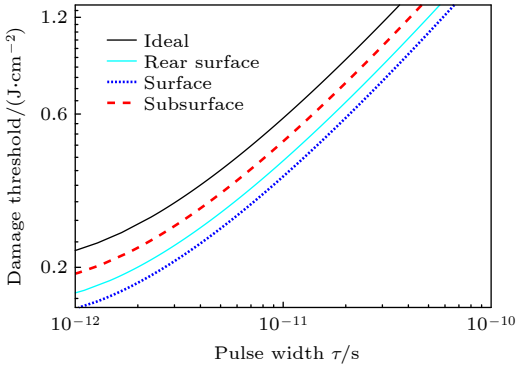

图 9 不同位置缺陷熔融石英的损伤阈值

Fig. 9. Damage thresholds of defective fused quartz at different locations.

6 总 结

本文研究了划痕缺陷对熔融石英材料场损伤特性的影响. 具体分析了不同条件下, 划痕数量及位置对材料内部驻波场分布的影响, 在分析了熔融石英材料内部光场作用下的电子增值情况后, 得到了材料的光诱导损伤特性. 研究表明, 激光辐照划痕缺陷熔融石英时, 划痕的相位调制作用会破坏驻波场分别的均匀性. 驻波场的存在总是会使材料在靠近后表面处出现最大场强, 解释了材料损伤点大概率出现在材料后表面的现象. 当材料存在的划痕数量不惟一时, 多条划痕共同作用于光场, 其最大场强随划痕条数的增加而增大. 以熔融石英材料为例, 当 10 ps 脉冲入射时, 如果三条划痕位于材料上表面, 对光场调制作用最强, 材料损伤阈值下降最为明显, 比理想材料下降了 66.1%. 另外, 划痕间隔对材料的驻波场及场损伤特性也有一定影响, 分析间隔的具体影响时, 可直接利用前面的计算模型和分析过程, 只需改变划痕的间隔参数进行研究.

参考文献

[1] Rubenchik A M, Feit M D, Perry M D, Larsenb J T 1998 *Appl. Surf. Sci.* **127** 193

[2] Ye H, Li Y G, Xu Q 2019 *Sci. Rep.* **9** 10741

[3] Cheng J, Chen M J 2018 *J. Mech. Eng.* **054** 170 (in Chinese) [程健, 陈明君 2018 机械工程学报 **054** 170]

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

[5] Xu S Z, Zu X T, Jiang X D 2008 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **266** 2936

[6] Li Y G, Yuan Z G, Wang J, Xu Q 2017 *Opt Laser Technol.* **91** 149

[7] Han W, Feng B, Zheng K X, Zhu Q H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 246102 (in Chinese) [韩伟, 冯斌, 郑奎兴, 朱启华 2016 物理学报 **65** 246102]

[8] Lu J T, Cheng X B, Shen Z X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 047802 (in Chinese) [鲁江涛, 程鑫彬, 沈正祥 2011 物理学报 **60** 047802]

[9] Deng H X, Dong X Y 2018 *Appl. Sci.* **8** 65

[10] Yu H B, Feng G Y 2019 *Acta Photon. Sin.* **48** 10 (in Chinese) [于慧波, 冯国英 2019 光子学报 **48** 10]

[11] He Q L 2019 *Ph.D. Dissertation* (Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [贺全龙 2019 博士学位论文 (西安: 中国科学院大学)]

[12] Li L, Xiang X, Zu X T 2011 *Optik* **122** 1423

[13] Xie Y X, Qi L, Liu Y L, Zhang R Z 2019 *Optik* **184** 220

[14] You K W, Zhang Y L, Zhang X J 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 255 (in Chinese) [尤科伟, 张艳丽, 张雪洁 2015 中国激光 **42** 255]

[15] Su Q Q, Zhang G W, Tao H 2011 *Chin. J. Lasers* **10** 22 (in Chinese) [苏倩倩, 张国文, 陶华 2011 中国激光 **10** 22]

[16] Shang X C, Zhang R Z 2010 *Opt. Laser Technol.* **42** 243

[17] Lenzner M, Kruger J, Sartania S, Cheng Z 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4076

[18] Du D T, Liu X L, Georg Korn, Jeff A S 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 3071

[19] Thornber 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 279

[20] Paul K K 1995 *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 2241

[21] Stuart B C, Feit M D, Rubenchik A M, Shore B W 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 2248

[22] Thomas W W, Arthur H G 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 2053

[23] Ma F J,Tian Y W, Lu P X 2005 *Laser Technology* **05** 507 (in Chinese) [马法君,田友伟, 陆培祥 2005 激光技术 **05** 507]

Effect of scratch defects on photoinduced damage characteristics of fused quartz

Liu Ya-li Qi Lei Zheng Meng-Ke Zhang Rong-Zhu †

(*College of Electronics and Information Engineering, SiChuan University, Chengdu* 610065, *China*)

(Received 21 December 2020; revised manuscript received 13 February 2021)

Abstract

When a laser beam irradiates an optical material, a light standing wave field should be observed inside the optical material due to the interference between the beam reflected from the rear surface and the incident beam. If there are scratches on the surface, the incident light can be modulated and the distribution of the standing wave field inside the material is not uniform any more. Therefore, the appearance of the local enhancement of light will change the damage characteristics of optical material. To analyze the field damage characteristics of optical material with scratches, a theoretical analysis model is established. It can be used to study the damage characteristics and build a priori model of actual optical material. Fused quartz is employed as the study object, and the modulation effect of defect on light field is simulated by finite difference time domain (FDTD). Based on the electron multiplication theory, the effect of the number and the positions of scratches on the damage characteristics of fused quartz are calculated in detail. The results show that the phase modulation of the scratch will destroy the uniformity of the standing wave field when the scratch defect material is irradiated by laser. Due to the influence of the standing wave field, the maximum field intensity appears near the rear surface of the material, which explains the phenomenon that the rear surface of the material is more prone to damage points. When there are multiple scratches on the material surface, the distribution of light field is related to the number of the scratches. Specifically, the maximum field intensity increases with the number of scratches increasing. Taking fused quartz material for example, when a 10-ps pulse is incident on it, if three scratches are located on its surface, then the modulation effect on the light field is strongest, and the damage threshold is 66.1% lower than that of the ideal material. In addition, the scratch spacing also has an effect on the standing wave field and field damage characteristics of the material, and the specific effect of the interval can be analyzed directly by using the calculation model proposed in this paper.

Keywords: surface scratches, standing wave field, ionization rate, damage threshold

PACS: 42.55.–f, 42.70.Ce, 61.80.–x **DOI:** 10.7498/aps.70.20202174

† Corresponding author. E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn