

熔石英亚表面球形杂质对入射光场的调制作用

田润妮 邱荣 蒋勇 周强

西南科技大学-中国工程物理研究院激光聚变中心极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010

摘要 建立激光辐照下熔石英体内球形杂质引起元件损伤的模型。基于 Mie 理论计算杂质的散射系数, 研究杂质颗粒附近的调制光场分布, 分析光强增强因子(LIEF)与杂质折射率及半径的关系。结果显示, 杂质颗粒半径小于 40 nm 时, 所有类型杂质对光场的调制作用可以忽略; 颗粒半径大于 40 nm 时, 对于折射率小于熔石英的非耗散杂质, LIEF 随颗粒半径的增大和折射率的减小而增大, 且后向散射远强于前向散射; 对于折射率大于熔石英的非耗散杂质, 随着折射率和半径的增大, LIEF 整体趋势增大, 局部达到 10^3 量级。对于耗散杂质, 前向散射强度随颗粒半径的增大先增大后减小, 当颗粒半径大于 170 nm 时, 后向散射强于前向散射。

关键词 激光光学; 光强增强因子; Mie 理论; 熔石英

中图分类号 O434.14 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0414003

Light Field Modulation Induced by Spherical Inclusion in Fused Silica Subsurface

Tian Runni Qiu Rong Jiang Yong Zhou Qiang

Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract A model of optics component damage induced by a spherical inclusion in fused silica illuminated by a laser beam is developed. Based on Mie scattering theory, scattering coefficients of several common kinds of inclusions are calculated, the light field distributions in the vicinity of inclusions are simulated. Light intensity enhancement factor (LIEF) as functions of refractive index and radius are analyzed. The results show that modulation effect of all kinds of inclusions can be ignored when the radius is smaller than 40 nm; when the radius of the particle is larger than 40 nm, for a non-dissipative particle with refractive index less than that of fused silica, LIEF increases with increasing radius and decreases with increasing refractive index, and the backscattering is much stronger than the forward scattering; when the refractive index is greater than that of fused silica, LIEF increase with the increasing radius and refractive index, and LIEF can reach to the order of 10^3 in some situations. For a dissipative particle, with the increase of radius, forward scattering intensity increases at first and then decreases. When the radius is larger than 170 nm, backscattering intensity is greater than forward scattering intensity.

Key words laser optics; light intensity enhancement factor; Mie theory; fused silica

OCIS codes 140.3330; 140.3440; 290.4020; 290.5850

1 引言

大型高功率固体激光系统, 如法国兆焦耳激光装置(LMJ)和美国国家点火装置(NIF)等都含有大量的熔石英光学元件^[1-2]。在强紫外激光的作用下, 熔石英元件极易损伤, 所以如何提升熔石英光学元件在紫外激光作用下的使用寿命一直是广泛研究的课题。光学元件从损伤形式上分为表面损伤和体损伤。随着加工

收稿日期: 2014-08-19; 收到修改稿日期: 2014-12-05

基金项目: 国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金(10976025)

作者简介: 田润妮(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: tianrunni@163.com

导师简介: 邱荣(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: qiurong@swust.edu.cn (通信联系人)

技术的不断提高,熔石英体内的缺陷基本消除,所以体损伤发生几率很小;而表面和亚表面由于加工等原因会产生大量的缺陷,如划痕、气泡、杂质等,这些缺陷严重影响了元件的损伤阈值。Bloembergen^[3]指出,光学材料的体损伤阈值是其表面损伤阈值的2~100倍。因此,一定条件下,熔石英表面和亚表面缺陷是诱导激光损伤的重要原因之一^[4-5]。

光学元件在研磨、抛光等加工制作过程中,不可避免地会引入CeO₂、Zr、Fe、Cu、Al等杂质颗粒^[6]。这些颗粒一方面会对光场能量产生吸收作用,另一方面会对光场产生散射,改变杂质周围的光强分布,称之为杂质对光场的调制作用。目前,大多数相关研究都是针对杂质颗粒进行热吸收机制分析^[7-10],对吸收性缺陷的危害已经有较深的认识,如缺陷吸收能量,加热、汽化、膨胀,热和机械压力导致元件破坏。对光场调制作用的研究主要集中于裂纹和划痕,Feit等^[4,11]考虑散射光与入射光的干涉模型,通过数值求解麦克斯韦方程计算了表面划痕对光场的调制,结果表明,改变划痕尺寸以及电场的入射方向,划痕周围的光强增强因子(LIEF)可达到10²数量级,并且划痕的宽度、深度以及划痕与表面夹角等是划痕诱导光强增强的重要原因。Bloembergen^[3]研究指出当气孔、划痕以及微裂纹的尺寸远小于入射波长时,在355 nm激光入射时,分别能使LIEF达到1.5、4.7、1.9。章春来等^[12-13]利用三维时域有限差分法(FDTD)研究了裂纹、气泡、划痕对光场的调制,讨论了光场调制与划痕宽深比的关系,研究了裂纹、气泡的尺寸、嵌深和侧移与修复坑近场调制的关系。田爱玲等^[14]采用FDTD模拟研究了会聚入射光被光学元件亚表面缺陷如微裂纹、气泡等调制后的光场分布以及光沿纵深方向扫描时亚表面损伤引起的散射光强的变化。花金荣等^[15]研究了三维情况下径向划痕、赫兹锥形划痕、杂质对光场的调制作用,结果表明杂质引起的光强增强效果最明显,锥型划痕次之,横向划痕最弱,其产生的LIEF最大值分别为103、77.8、10.3。

上述对亚表面各类划痕、缺陷的计算要么用简化的二维模型处理,要么用数值方法进行模拟计算,这与实际有一定差别。李莉等^[16]指出在相同入射条件下,对同一缺陷进行二维与三维模拟,结果显示,三维模型对光场的调制作用比二维模型强,FDTD在处理复杂边界问题很有优势,但计算过程中会存在迭代误差,而且对于小的球形粒子,模型边界处理会产生大的误差。Mie理论对大小粒子都适用,且Matlab编程计算速度快,缺点是只适用于球形粒子。本文基于Mie理论,建立三维球形杂质颗粒模型,计算了耗散杂质(折射率存在虚部)和非耗散杂质(折射率不存在虚部)的散射系数和杂质附近的光场分布,研究讨论不同类型、不同尺寸的杂质对光场调制作用的影响,为减少由杂质引起的熔石英损伤、提高材料的损伤阈值提供一定的理论参考。

2 理论分析

2.1 物理模型

图1为杂质颗粒的物理模型。假设杂质为球形颗粒,颗粒全部埋于熔石英材料内,杂质半径为 a ,折射率为 n 。熔石英元件折射率为 $n' = 1.48$ 。杂质对熔石英的相对折射率为 $m = n/n'$ 。入射激光为单位幅度的平面波, $\mathbf{E}_{inc} = \exp(ikz) \cdot \mathbf{e}_x$ 波长为 $\lambda = 355 \text{ nm}$,垂直表面沿 z 轴正方向入射,电矢量沿 x 方向极化。

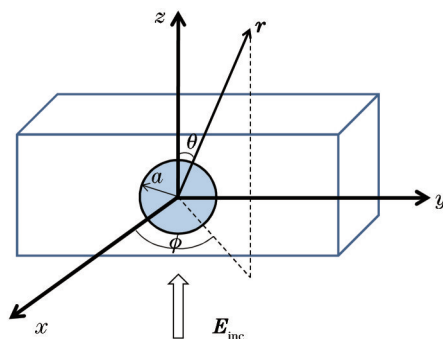


图1 三维杂质粒子模型

Fig.1 Model of three-dimensional impurity

根据Mie理论,平面波入射场可以用矢量球谐函数展开为

$$E_i = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \left(M_{o1n}^{(1)} - iN_{e1n}^{(1)} \right). \quad (1)$$

在杂质颗粒外部, 散射场也可以用矢量球谐函数展开为

$$E_s = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left(i a_n N_{e1n}^{(3)} - b_n M_{o1n}^{(3)} \right). \quad (2)$$

其中矢量球谐函数为

$$M_{o1n} = \cos \varphi \pi_n(\cos \theta) Z_n(\rho) e_\theta - \sin \varphi \tau_n(\cos \theta) Z_n(\rho) e_\varphi, \quad (3)$$

$$M_{e1n} = -\sin \varphi \pi_n(\cos \theta) Z_n(\rho) e_\theta - \cos \varphi \tau_n(\cos \theta) Z_n(\rho) e_\varphi, \quad (4)$$

$$N_{o1n} = \sin \varphi n(n+1) \sin \theta \pi_n(\cos \theta) \frac{Z_n(\rho)}{\rho} e_r + \sin \varphi \tau_n(\cos \theta) \frac{[\rho Z_n(\rho)]'}{\rho} e_\theta + \cos \varphi \pi_n(\cos \theta) \frac{[\rho Z_n(\rho)]'}{\rho} e_\varphi, \quad (5)$$

$$N_{e1n} = \cos \varphi n(n+1) \sin \theta \pi_n(\cos \theta) \frac{Z_n(\rho)}{\rho} e_r + \cos \varphi \tau_n(\cos \theta) \frac{[\rho Z_n(\rho)]'}{\rho} e_\theta - \sin \varphi \pi_n(\cos \theta) \frac{[\rho Z_n(\rho)]'}{\rho} e_\varphi, \quad (6)$$

其中 ρ 为场点到球心的相对距离, 在球外 $\rho = kr$, 在球内 $\rho = kmr$, m 为球的相对折射率, θ 为散射角, ϕ 为方位角。在第一类、第二类和第三类矢量球谐函数中 $Z_n(\rho)$ 分别为球贝赛尔函数 $j_n(\rho)$ 、球偌依曼函数 $y_n(\rho)$ 和第一类球汉克尔函数 $h_n^{(1)}$ 。 π_n 和 τ_n 为角度系数角度系数:

$$\pi_n = \frac{P_n^1}{\sin \theta}, \quad \tau_n = \frac{dP_n^1}{d\theta}, \quad (7)$$

P_n^1 为缔合勒让德函数。利用边界条件可得到散射场展开系数为

$$a_n = \frac{\mu m^2 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu_1 j_n(x) [m x j_n(mx)]'}{\mu m^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [m x j_n(mx)]'}, \quad (8)$$

$$b_n = \frac{\mu_1 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu j_n(x) [m x j_n(mx)]'}{\mu_1 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu h_n^{(1)}(x) [m x j_n(mx)]'}. \quad (9)$$

散射系数为

$$Q_{sca} = \frac{2}{x} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2). \quad (10)$$

2.2 颗粒的散射系数

利用后向递推算法计算系数 a_n 、 b_n , 再根据散射系数计算公式, 计算了 5 种杂质颗粒的散射系数。为了保证后续计算结果的正确性, 首先对散射系数进行验证, 根据 (10) 式, 计算部分颗粒的散射系数, 且与 Dave^[17] 和 Wiscombe^[18] 的计算结果进行对比, 如表 1 所示。可以看出, 对任意折射率和尺寸参数的球形颗粒, 本文的计算结果与已发表论文的结果基本吻合, 从而验证了算法的正确性和适用性。

表 1 散射系数对比表

Table 1 Comparison of scattering coefficient

No.	$m (n/n')$	$x (2\pi r/\lambda)$	Scattering coefficient (D/W)	Scattering coefficient (this paper)
1	1.5	0.0001	2.3068×10^{-17}	$2.30680507659948 \times 10^{-17}$
2	1.55	5.2182	3.10542	3.092631385724787
3	1.5	100	2.0944	2.094387696085128
4	1.55-0.1i	5.2182	—	1.660466240702591
5	1.5-0.1i	100	—	1.132133971124749
6	0.75	0.101	8.03354×10^{-6}	$8.033538148557164 \times 10^{-6}$
7	0.75	10	2.23226	2.232264842502018
8	0.75	1000	1.99791	1.997908184245330
9	$1.33 \times 10^{-5}i$	100	2.09659	2.096576113678710
10	1.5-i	0.056	1.21631×10^{-5}	$1.216310942266813 \times 10^{-5}$
11	1.5-i	100	1.28370	1.283697049373328
12	10-10i	1	2.04941	2.049405006925479

加工、抛光、清洗等过程都不可避免地会在熔石英表面及亚表面形成杂质微粒,其杂质微粒的含量和参数如表2所示^[19-20]。其中气泡属于缺陷,本文将其看为 $n=1$ 的非耗散杂质, ZrO_2 也为非耗散杂质, Al 、 Fe 、 CeO_2 为耗散杂质。(表中横线表示未查阅到相关数据)

表2 熔石英亚表面主要杂质粒子含量及其光学参量

Table 2 Contents and optical parameters of main impurities on the subsurface of fused silica

Impurity	Content /($\mu\text{g/g}$)	Refraction index at 355 nm
Al	4.8	0.385-4.3i
Fe	1.2	1.5-2.7i
CeO_2	0.369	2.0-0.2i
ZrO_2	—	2
Bubble	—	1

图2为355 nm激光下5种杂质颗粒散射系数随其半径变化的曲线。可以看出,杂质的散射系数随颗粒半径的增大先迅速增大,当其半径超过一定值(约波长)后,散射系数整体趋势又略有下降并最终保持不变。非耗散杂质的散射系数随着半径的增大会出现波动现象,整体值较耗散杂质散射系数要大。例外的是Al粒子的散射系数整体值也较大,这是因为Al的导电性能更好,金属性更强,对光场的反射作用也更强。对耗散杂质,由于其吸收作用,散射系数随杂质半径增大,波动减弱,曲线变得平滑。

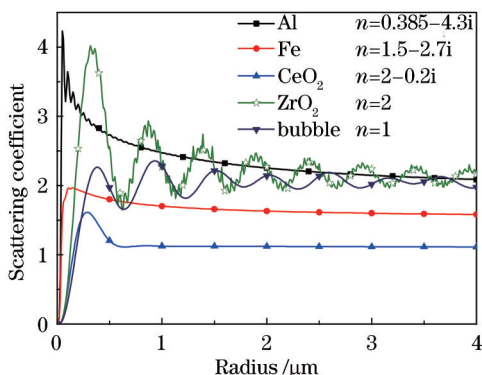


图2 355 nm激光下杂质粒子的散射系数随粒子半径的变化

Fig.2 Scattering coefficients versus radius of different impurities under 355 nm laser

3 计算结果及讨论

粒子对光波散射的本质是光波电磁场与介质分子相互作用的结果。耗散型粒子的折射率带有虚部,即耗散型粒子具有一定的导电性,置于光波中时,其中的自由电子受电场影响而发生振动,同时对光能量产生吸收和散射。而非耗散型粒子不吸收能量,只改变了照射在其上的光波的方向,使光场能量重新分布。

3.1 杂质颗粒的调制光场

图3为4种杂质颗粒附近的调制光场分布图。图3(a)为气泡类杂质附近的光场分布,可以看出大部分区域较暗,只有颗粒后向($z<0$)极小区域特别亮。极亮区域就是经杂质颗粒散射后所形成的光场增强区域,最亮处的LIEF约为23。由于折射率小于熔石英的非耗散杂质颗粒,在熔石英材料内的作用相当于一个负透镜,入射激光经过负透镜的反射在后向形成聚焦效应,所以在后向形成损伤的概率较大。图3(b)为 ZrO_2 杂质附近的光场分布,从图中可以看出,粒子后向区域较暗,前向($z>0$)部分区域极亮,散射最大处的LIEF约为18,与图3(a)机理相似,但是其在熔石英材料内的作用相当于一个正透镜,汇聚入射激光,从而形成聚焦效应,对元件造成较大危害。图3(c)和(d)分别为Al和 CeO_2 杂质附近的光场分布。从这两幅图可以看出,耗散杂质周围的前向后向散射强度差别没有非耗散杂质的大,而且散射场强较强处都在粒子后向,由于粒子折射率存在虚部,杂质粒子就存在吸收特性,所以会导致LIEF比折射率无虚部时有所下降。

3.2 LIEF与折射率关系

图4为LIEF随折射率变化的曲线图,虚线为颗粒前向($z>0$)的LIEF,实线为整个计算区域内的LIEF。如

果实线与虚线重合,说明光强最大值出现在杂质颗粒前向,如果二者不重合,说明光强最大值出现在杂质颗粒后向。

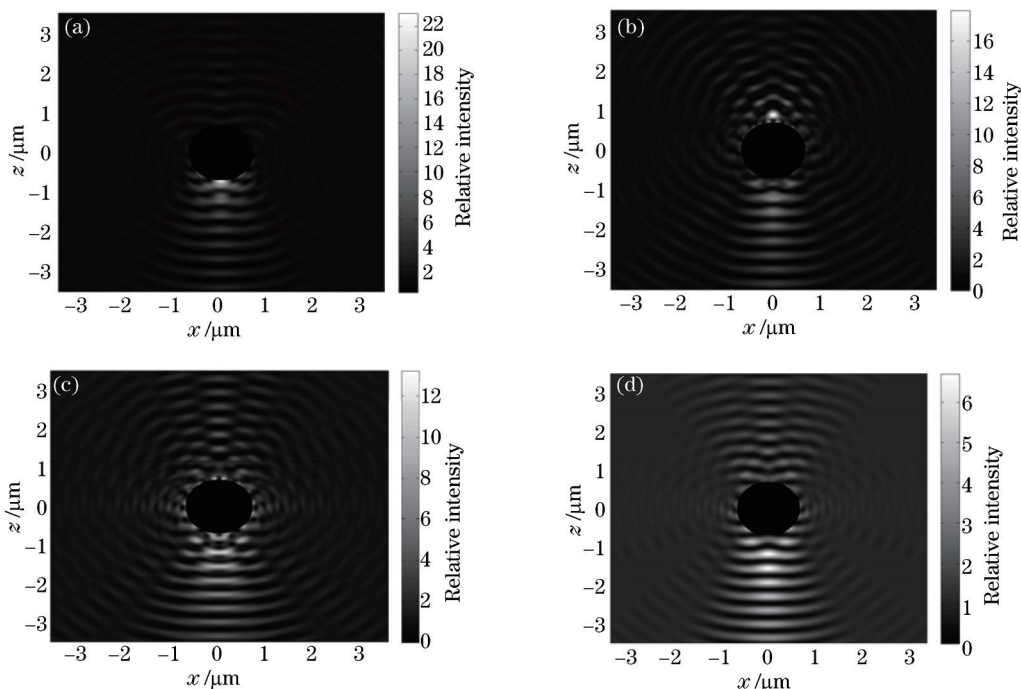


图3 杂质粒子附近调制光场强度分布。(a) 气泡, $n=1$; (b) ZrO_2 , $n=2$; (c) Al , $n=0.385-4.3i$; (d) CeO_2 , $n=2.0-0.2i$

Fig.3 Near-field intensity distribution of impurity. (a) Bubble, $n=1$; (b) ZrO_2 , $n=2$; (c) Al , $n=0.385-4.3i$; (d) CeO_2 , $n=2.0-0.2i$

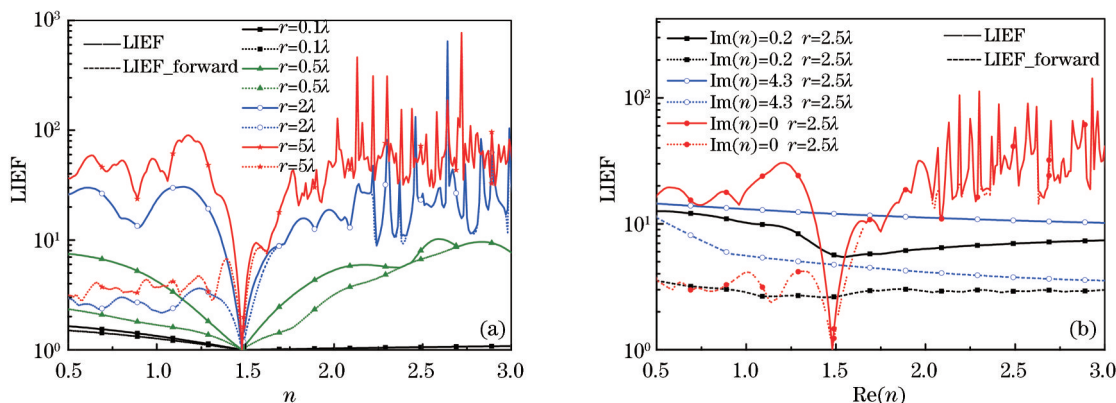


图4 LIEF与杂质粒子折射率的关系。(a) 非耗散型杂质;(b) 耗散型杂质

Fig.4 Relationship between LIEF and refractive index of impurity particles. (a) Non-dissipative impurities; (b) dissipative impurities

图4(a)为非耗散杂质的LIEF与折射率的关系图,从图中可以看出,在颗粒半径为 0.1λ 时,LIEF整体值很小(小于2),且随折射率的变化也很小,说明较小的杂质对入射激光几乎没有调制作用。在颗粒半径大于 0.5λ 时可以发现,当杂质颗粒折射率小于1.48(熔石英的折射率)时,所有尺寸颗粒的LIEF都随折射率的增大而减小,但是前向散射的LIEF随折射率的变化不大,基本保持在2左右,后向散射的LIEF变化比较大,而且当颗粒半径较大时,LIEF会发生明显的波动;当杂质颗粒折射率等于1.48时,相当于杂质不存在,此时的LIEF为1;当颗粒折射率大于1.48时,LIEF随折射率的增大而增大,且折射率越大,LIEF曲线波动越剧烈。图4(b)为耗散杂质的折射率与LIEF的关系图,可以看出,折射率存在虚部时,LIEF的波动明显减弱,随折射率虚部的增加,曲线越平滑,同时可以看出,耗散杂质的后向散射比前向散射强。

对非耗散杂质,当杂质颗粒的折射率小于1.48时,它的作用就相当于一个负透镜,入射激光受其作用在前向发散,在后向汇聚。从图4(a)中可以看到此时后向散射的LIEF远大于前向散射,与图3(a)相符;当杂质颗粒的折射率大于1.48时,杂质颗粒就相当于一个正透镜,入射激光经过它将会在前向汇聚,局部光强将会

显著增强,折射率越大,杂质半径越大,透镜的汇聚作用越强。以上结果与花金荣等对熔石英亚表面杂质颗粒附近光场进行三维模拟的结果^[21]是一致的,且LIEF与折射率的关系也基本一致,折射率小于熔石英时,LIEF值很小(小于3),变化不大,当折射率大于熔石英时,LIEF随折射率及半径的增大而增大,局部达到 10^2 量级。图4中的曲线出现强烈的波动现象,这是因为散射与入射光互相干涉,其光强增强的位置与增强倍数都存在一定的随机性。杨颖^[22]也指出散射系数随粒子半径的增大而振荡明显,而且折射率实部越大,振荡越明显。对耗散杂质,杂质颗粒的散射性能主要受其导电性能影响,另外,由于杂质的吸收作用,随着折射率实部的变化,LIEF曲线不但光滑且变化趋势平缓,当粒子折射率虚部较大时,折射率实部对LIEF影响很小。

3.3 LIEF与粒子半径关系

图5是5种杂质颗粒的LIEF随颗粒半径的变化规律,其中图5(a)是整个区域内光场的LIEF,图5(b)是粒子前向($z>0$)光场的LIEF。从图5(a)可以看出,当 $a < 40$ nm时,LIEF的值较小(小于3),且增长速度较慢,可以近似认为此时杂质对光场调制不起作用;当 $a > 40$ nm时,耗散杂质的LIEF迅速增大,而非耗散杂质的LIEF增大速度较慢;当 $a > 90$ nm时,耗散杂质的LIEF开始发生波动,并在波动中缓慢上升,而非耗散杂质的LIEF则迅速增加,并在 $a > 250$ nm时,也开始进入波动上升区。从图5(b)可以看出,在前向方向,随半径的增大,两种类型杂质的LIEF波动明显,且耗散杂质的LIEF先增大再减小,非耗散杂质的LIEF整体上升。

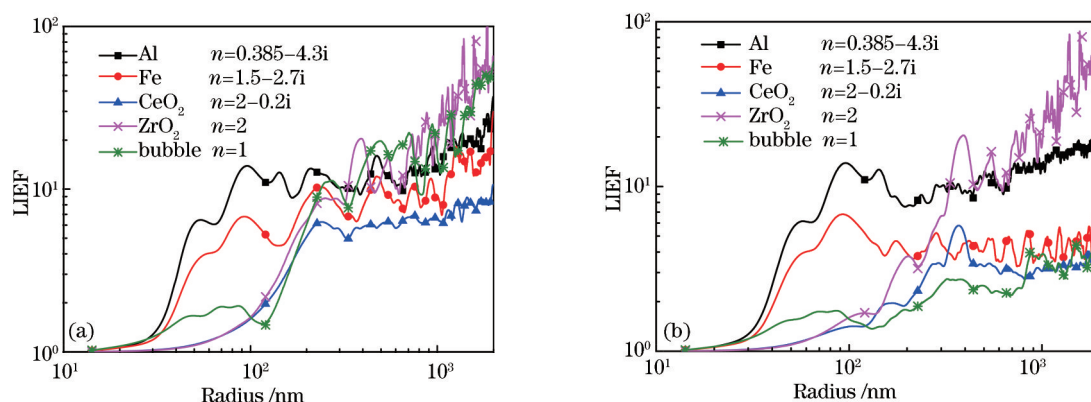


图5 LIEF与杂质粒子半径的关系。(a)整体;(b)前向

Fig.5 Relationship between LIEF and radii of impurity particles. (a) Total; (b) forward

对比图5(a)和(b)可以看出,在 $a < 40$ nm时,整个区域内的LIEF和前向LIEF是基本一致的,这说明较小杂质周围的光强最大值基本发生在杂质颗粒前向处。随着颗粒半径的增大,整体LIEF和前向LIEF发生了分离,其中气泡和Fe颗粒的前向LIEF增长速度远小于整体LIEF的增长速度,甚至开始呈现出下降趋势,这说明对于较大($a > 150$ nm)的Fe、CeO₂和气泡颗粒,光强的最大值会出现在后向位置上。对于较大($a > 170$ nm)的Al颗粒,前向的LIEF略小于后向,但是在一个较大的半径范围内,前向位置上的LIEF和后向位置的LIEF差别不大,这说明Al颗粒的前、后向位置上的光强都有较大的可能引起损伤。对于较大半径的ZrO₂杂质颗粒,在 100 nm $< a < 350$ nm范围内,前向LIEF仍然略小于后向LIEF,当颗粒半径进一步增大时,最大光强仍然出现在前向位置,这说明对于折射率大于熔石英的颗粒,只有当颗粒半径大到一定程度时才会出现聚焦现象。

4 结 论

基于Mie理论,针对熔石英光学元件亚表面杂质颗粒建立了三维模型,分别对不同参数的球形缺陷,如Fe、CeO₂、气泡等进行深入讨论和分析。结果表明,当杂质颗粒很小($a < 40$ nm)时,所有类型的杂质对光场的调制作用都很小。当粒子较大时,对于耗散杂质以及折射率小于熔石英的非耗散杂质,后向散射作用更强。对于折射率大于熔石英的耗散杂质,当颗粒较大时,前向散射作用更强。总之,熔石英内部存在多种缺陷,杂质对入射光场的调制作用是非常明显的,而且不能忽略后向散射。这对于实际应用中熔石英的处理有一定的指导意义,光学元件制备过程中减少杂质粒子,特别是大尺寸粒子,可以提高光学元件的抗激光损伤能力。

- 1 P M Pegon, C V Germain, Y R Rorato, *et al.*. Large area sol-gel optical coatings for the megajoule laser prototype [C]. SPIE, 2004, 5250: 170.
- 2 J H Campbell, R A Hawley-Fedder, C J Stolz, *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview [C]. SPIE, 2004, 5341: 84-101.
- 3 N Bloembergen. Role of cracks, pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at surfaces of transparent dielectrics [J]. Appl Opt, 1973, 12(4): 661-664.
- 4 M D Feit, A M Rubenchik. Influence of subsurface cracks on laser-induced surface damage [C]. SPIE, 2003, 5273: 264-272.
- 5 A M Rubenchik, M D Feit. Initiation, growth, and mitigation of UV-laser-induced damage in fused silica [C]. SPIE, 2002, 4679: 79-95.
- 6 J Neauport, L Lamaignere, H Bercegol, *et al.*. Polishing-induced contamination of fused silica optics and laser induced damage density at 351 nm [J]. Opt Express, 2005, 13(25): 10163-10171.
- 7 Ma Ji, Wu Xiangyao, Liu Xiaojing, *et al.*. Research on the absorption property of defect layer in photon crystals [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0306002.
马 季, 吴向尧, 刘晓静, 等. 光子晶体缺陷层吸收特性的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0306002.
- 8 Gao Xiang, Feng Guoying, Han Jinghua, *et al.*. Investigation of laser-induced damage by nanoabsorbers at the surface of fused silica [J]. Appl Opt, 2012, 51(13): 2463-2468.
- 9 Wang Libin, Ma Weixin, Ji Lailin, *et al.*. Influence of metal particles on damage threshold of fused silica at 3ω [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502004.
王立斌, 马伟新, 季来林, 等. 三倍频激光下金属颗粒对熔石英元件损伤阈值的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502004.
- 10 Yu Zhenkun, Qi Hongji, Zhao Yuan'an, *et al.*. A model of region defects under nanosecond pulsed laser [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 1214001.
于振坤, 齐红基, 赵元安, 等. 纳秒脉冲激光诱导的区域缺陷破坏模型[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 1214001.
- 11 F Y Genin, A Salleo, T V Pistor, *et al.*. Role of light intensification by cracks in optical breakdown on surfaces [J]. J Opt Soc Am A, 2001, 18(10): 2607-2616.
- 12 Zhang Chunlai, Liu Chunming, Xiang Xia, *et al.*. Near-field modulated simulation of repaired site contained crack or bubble in fused silica subsurface [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 124214.
章春来, 刘春明, 向 霞, 等. 裂纹或气泡对熔石英损伤修复坑场调制的近场模拟[J]. 物理学报, 2012, 61(12): 124214.
- 13 Zhang Chunlai, Wang Zhiguo, Liu Chunming, *et al.*. Near-field modulation of lateral cracks [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 084207.
章春来, 王治国, 刘春明, 等. 横向划痕对光场调制的近场模拟[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 084207.
- 14 Tian Ailing, Wang Hui, Wang Chunhui. Simulation research on the light-scattering properties of the subsurface damage of optical components [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908006.
田爱玲, 王 辉, 王春慧. 光学元件亚表面损伤的激光散射仿真研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908006.
- 15 Hua Jinrong. FDTD Research of Laser Induced Damage by Subsurface Defects of Fused Silica [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 47-48.
花金荣. 熔石英亚表面缺陷诱导激光损伤的 FDTD 研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 47-48.
- 16 Li Li, Lei Yu, Xiao Shaoqiu, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of light intensity distribution in vicinity of subsurface defect [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(6): 936-938.
李 莉, 雷 雨, 肖邵球, 等. 光学材料亚表面缺陷处强激光电磁场分布的 3 维模拟[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(6): 936-938.
- 17 J V Dave. Scattering of visible light by large water spheres [J]. Appl Opt, 1969, 8(1): 155-164.
- 18 W J Wiscombe. Improved Mie scattering algorithms [J]. Appl Opt, 1980, 19(9): 1505-1509.
- 19 Gao Xiang, Feng Guoying, Han Jinghua, *et al.*. Investigation of laser-induced damage by various initiators on the surface of fused silica [J]. Opt Express, 2012, 20(20): 22095-22101.
- 20 Wang Fengrui, Liu Hongjie, Huang Jin, *et al.*. Simulation of light intensification induced by defects of polished fused silica [J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(1): 014206.
- 21 Hua Jinrong, Li Li, Xiang Xia, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of light field modulation in the vicinity of inclusion in silica subsurface [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 044206.
花金荣, 李 莉, 向 霞, 等. 熔石英亚表面杂质颗粒附近光场调制的三维模拟[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 044206.
- 22 Yang Ying, Huang Zhuqing, Cao Xiaoling. Research on the features of particle's Mie scattering based on polarization state [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(12): 1376-1380.
杨 颖, 黄竹青, 曹小玲. 偏振状态下微粒的 Mie 散射特性研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(12): 1376-1380.