

污染物尺寸对光学元件激光损伤的影响

李旭, 陈垦

西南科技大学数理学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月6日; 发布日期: 2026年4月14日

摘要

基于时域有限差分法(FDTD), 构建355 nm、1064 nm和355 nm & 1064 nm复合波长激光辐照下污染物诱导激光损伤的数值模型。研究三种波长结构下, 熔石英光学元件表面微纳污染物(Fe、Cu、Al₂O₃、CeO₂)对光场调制及损伤特性的影响, 分析激光波长、污染物种类、颗粒尺寸及分布对光场调制峰值、峰值位置及元件损伤演化规律的作用机制。单颗粒体系研究表明, 相同条件下复合波长的光场调制效应显著强于单波长, 调制最强点集中于光学元件表面。多颗粒体系模拟结果表明, 调制效应强弱与污染物材料、分布有关, 金属的光场调制强度与温升效应均强于金属氧化物, 在特定尺寸和粒子分布情况下Fe表现出最高的热量沉积效率。本研究揭示了污染物介电特性、空间分布与激光参数的耦合作用机制, 为高功率激光装置中熔石英光学元件的污染控制策略优化及抗损伤结构设计提供了理论依据与技术支持。

关键词

高功率激光, 熔石英, 激光诱导损伤, 污染物, 光场调制, 时域有限差分法, 多物理场耦合

The Influence of Pollutant Size on Laser Damage of Optical Components

Xu Li, Ken Chen

School of Mathematics and Physics, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

Received: March 10, 2026; accepted: April 6, 2026; published: April 14, 2026

Abstract

Based on the finite-difference time-domain method (FDTD), a numerical model of pollutant-induced laser damage under the irradiation of 355 nm, 1064 nm, and 355 nm & 1064 nm composite wavelength lasers was established. The effects of micro-nano pollutants (Fe, Cu, Al₂O₃, CeO₂) on the surface of fused quartz optical components on light field modulation and damage characteristics under the three wavelength configurations were studied. The mechanisms of laser wavelength,

pollutant type, particle size, and distribution on the peak value of light field modulation, peak position, and the damage evolution law of components were analyzed. Studies on the single-particle system show that under the same conditions, the light field modulation effect of the composite wavelength is significantly stronger than that of the single wavelength, and the strongest modulation point is concentrated on the surface of the optical component. The simulation results of the multi-particle system indicate that the intensity of the modulation effect is related to the pollutant material and distribution. The light field modulation intensity and temperature rise effect of metals are stronger than those of metal oxides, and Fe exhibits the highest heat deposition efficiency under specific sizes and particle distribution conditions. This study reveals the coupling mechanism between the dielectric properties of pollutants, spatial distribution, and laser parameters, and provides a theoretical basis and technical support for the optimization of pollution control strategies and the design of anti-damage structures for fused quartz optical components in high-power laser devices.

Keywords

High-Power Laser, Fused Silica, Laser-Induced Damage, Contaminant, Light Field Modulation, Finite-Difference Time-Domain Method, Multi-Physics Coupling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

熔石英光学元件因高透过率、低膨胀系数及优异的抗激光辐照性能, 被广泛应用于高功率激光装置[1]-[3], 然而激光辐照条件下, 元件表面污染物是降低其激光损伤阈值的重要因素[4][5]。自大型激光装置中发现污染导致的三倍频损伤问题以来[6][7], 污染物的危害已受到广泛关注。常见的污染物主要源于抛光过程, 涵盖金属颗粒(如 Fe、Cu)和磨料残留(如 Al_2O_3 、 CeO_2) [8][9], 这些污染物会引发热效应[10]、散射效应[11]、场效应[12], 不仅会降低光学元件透过率[13]、增强散射光[14]、增加能量损耗, 还会缩短光学元件寿命[15]、劣化光束质量[16]并降低损伤阈值[17]。污染物诱导形成的初始损伤点会进一步调制光场[18][19], 引发波阵面畸变[20], 影响焦斑质量[21], 造成下游元件的二次损伤。因此, 探究微纳污染物在激光辐照下的光场调制机制与损伤演化规律, 对提升熔石英元件抗损伤性能具有关键理论价值与工程应用意义。

近年来, 研究者们围绕污染物对光学元件激光损伤的影响机制开展了多角度探索。在单波长激光作用机制方面, 实验研究层面, You, C.Y.和 Xia, Y.等人借助显微技术与元素分析手段, 分别揭示了材料带隙[22]和损伤形貌[23]与光场调制行为之间的关联; Liu F 等人进一步探讨了表面与亚表面污染物对 1064 nm 波段减反射亚波长结构激光诱导损伤阈值的影响[24]; Chen, X.、Honig, J.和 Palmier, S.等学者分别从污染物来源[25]、表面损伤形成[26]以及损伤形态演化[27]等方面开展了系统研究, 奠定了单波长场景的理论与实验基础。理论模拟与方法开发层面, Zhang, Z.L.开发了三维损伤重构方法[28], 为损伤结构的可视化与量化分析提供了新途径; Kafka, K.R.P.建立了热分析模型[29], 解析了污染物所引起的局部光场调制及其热效应; Demos, S.G.聚焦金属污染物在短脉冲激光下的响应, 探讨了等离子体形成过程及相互作用区域的几何特征对光场分布的影响[30]; Zhang, S.等则为超快激光材料损伤模拟这一传统问题提供了新的研究视角[31]。在多波长激光作用方面, Bulgakov, A.V.通过研究激光与硅材料相互作用的非线性效应

和能量耦合机制, 探究了双波长序列对硅材料的单次曝光损伤和烧蚀行为[32]。Yang, Z.H.采用“多波长差分吸收”(DOAS)技术, 研究了激光对于不同的污染气体的敏感程度以及不同波长对气体的吸收效率[33]。当前研究尚未充分阐明多波长激光协同辐照下, 微纳尺度污染物对光场调制的调控机制; 特别是针对兼具强吸收特性、特定化学组成及复杂空间分布特征的污染物体系, 亟需构建更为精准的理论预测框架。

为此, 本研究基于 FDTD 数值模拟, 该方法可直接求解时域麦克斯韦方程组, 能有效模拟电磁场时空演化及与物质的相互作用, 为污染物对光学元件的光场调制研究提供高精度数值支撑, 以 Fe、Cu、Al₂O₃、CeO₂ 为典型污染物, 系统探讨污染物种类、尺寸与空间分布在单波长和多波长激光作用下的光场调制机制与损伤特性。揭示多波长协同、污染物特性与空间分布之间的耦合规律, 为高功率光学元件的设计与污染控制提供理论依据和实验支持。

2. 仿真模型与参数

元件表面的污染物形态多样, 其中类似椭圆形的微粒是最常见形貌之一。光学元件前表面的颗粒因凸面折射, 使光束沿传播方向会聚形成调制强区, 其光场增强效应显著强于后表面颗粒[34], 因此本文首先锁定前表面颗粒为研究重点。同时研究表明, 颗粒污染物的激光调制强度与椭球的圆扁程度密切相关, 当椭圆颗粒趋近球形时, 光场调制效应达到最大值[35]。为精准探究最强光场调制的颗粒参数, 明确污染物诱导损伤的核心风险点, 本文最终将研究对象聚焦于光学元件前表面的球形污染物。

入射激光波长为 $\lambda = 355 \text{ nm}$ 和 1064 nm , 作为横电磁波平行于 z 轴传播, 其强度设为 $E = 1 \text{ V/m}$, 脉冲持续时间为 10 fs , 光斑半径为波长的 1.5 倍。在开展数值计算工作时, 引入了 Berenger 所提出的完美匹配层吸收边界条件, 其作用在于有效吸收边界位置的入射电磁波, 以提升计算的准确性与可靠性。空气的折射率约定为 1.0 , 其他材料折射率(实部 n)和消光系数(虚部 k)参数如表 1 所示[36]。总的入射功率密度与单波长辐照时相当。该功率在两个波长之间平均分配: 例如, 在单波长为 $1 \times 10^{15} \text{ W/m}^2$ 时, 355 nm 获得 $0.5 \times 10^{15} \text{ W/m}^2$, 1064 nm 获得 $0.5 \times 10^{15} \text{ W/m}^2$ 。这种配置确保了单波长和双波长效应之间的公平比较, 同时模拟了实际双波长激光系统的运行状态。

Table 1. Refractive index (n) and extinction coefficient (k) parameters for various materials at different wavelengths

表 1. 不同波长下各材料的折射率(n)和消光系数(k)参数

材料	波长	355 nm		1064 nm	
		n	k	n	k
Fe		1.55	1.94	3.52	8.45
Cu		1.27	1.92	0.18	6.10
CeO ₂		2	0.2	2.08	0
Al ₂ O ₃		1.80	0	1.76	0
SiO ₂		1.48	0	1.45	0

本研究的温度场计算基于热传导方程和光热转换定律建立。将通过 FDTD 仿真获得的光场能量吸收密度作为热源项, 并结合材料的热物理参数(比热容、热导率、密度), 运用有限元分析技术, 对瞬态温度场的分布情况进行求解。其求解过程所依据的具体数学表达式如下:

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} - \nabla [k \nabla T(x, y, z, t)] = Q(x, y, z, t)$$

其中, k, ρ, c 分别为材料的热导率、密度与比热容, x, y, z 为直角坐标系的空间分量, t 是时间变量, Q 为吸收热源。

热分析边界条件设置为: 光学元件表面为对流换热边界, 对流换热系数 $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 环境温度 $T_0 = 298 \text{ K}$; 元件内部为绝热边界, 无额外热损耗。金属材料(Fe、Cu)的比热容和热导率随温度升高呈线性下降, 金属氧化物及熔石英的热物性参数在 $298 \sim 1500 \text{ K}$ 范围内呈弱温度依赖性。

3. 污染物参数影响分析

为深入探究污染物参数对光场调制的影响机制, 本节采用 FDTD 方法, 研究污染物对激光的光场调制效应, 重点探究颗粒尺寸对光场分布的影响规律。模拟计算了在光学元件表面, 不同半径球形颗粒在 355 nm 、 1064 nm 单波长及复合波长激光辐照下的光场分布, 进而量化分析了光学元件内部光场峰值强度随颗粒尺寸的变化特性。在此基础上, 模型将进一步扩展至多颗粒污染物场景, 综合考察复杂表面下的光场分布特征及其诱导的温度场演化规律。

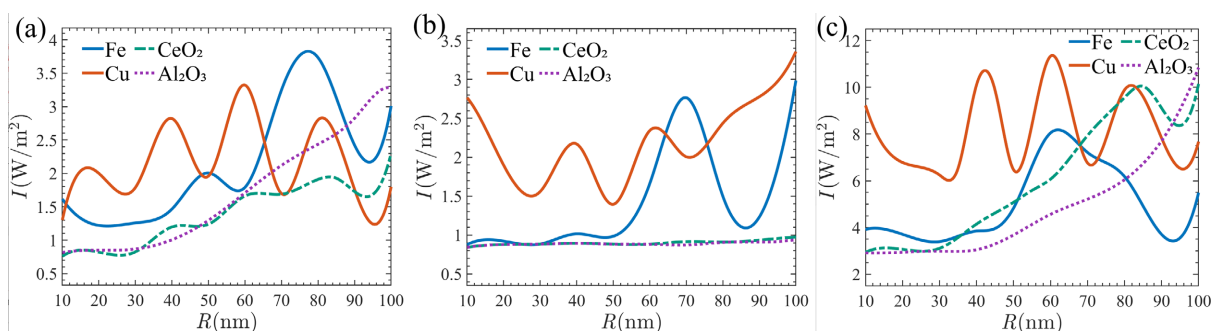


Figure 1. Relationship between optical field peak intensity and single-particle contaminant size on optical component surfaces under different wavelength structures: (a) 355 nm wavelength; (b) 1064 nm wavelength; (c) 355 nm & 1064 nm wavelengths
图 1. 不同波长结构下光场峰值与光学元件表面单颗粒污染物尺寸关系。(a) 355 nm 波长; (b) 1064 nm 波长; (c) 355 nm & 1064 nm 波长

图 1 为不同波长激光、污染物材料和尺寸下光学元件内部光场峰值, 图中 I 表示元件内部光场峰值, R 表示污染物颗粒粒径大小。由图 1 可见, 355 nm 、 1064 nm 和复合波长激光辐照下, 金属污染物光场调制强度随粒径增大呈现波动变化。由图 1(a)和图 1(c)可知, 氧化物污染物在 355 nm 和复合波长激光作用下的光场调制效应随粒径增大显著增强, 表现出与尺寸正相关特性, 如图 1(b)所示, 1064 nm 下氧化物随尺寸增大光场调制强度变化并不明显。研究表明, 相同条件下复合波长下污染物的光场强度最大值可达单波长作用最大值的 $2 \sim 4$ 倍, 这一结果凸显多波长激光协同作用对污染物调制效应的显著放大作用。这些发现为污染物尺寸效应、波长协同机制及高功率光学元件的污染防控提供了关键理论依据。

图 2 为不同波长激光、污染物材料和尺寸下光学元件内部光场峰值位置, 图中 Z 表示光场调制峰值距离光学元件表面的距离。如图 2(a)和图 2(c)所示, 355 nm 和复合波长激光辐照下, 除复合波长下粒径在 $10 \sim 40 \text{ nm}$ 的 Al_2O_3 污染物光场峰值位置在距元件表面 $0.2 \mu\text{m}$ 处, 其他污染物的光场峰值位置均靠近表面; 图 2(b)中激光波长为 1064 nm 时, Fe 和氧化物污染物的光场峰值位置位于亚表面 $3 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 处, 随着污染物粒径的增大, Fe 和氧化物污染物的光场峰值位置呈现向表面迁移的趋势。综上, $10 \sim 100 \text{ nm}$ 粒径范围内, 光场峰值位置主要集中在光学元件表面及亚表面, 且随着粒径的增大最终将收敛于表面, 这一光场分布特征与高功率激光装置工程实践中熔石英光学元件表面激光损伤占主导现象高度吻合。因此, 在实际加工中需重点强化元件表面的针对性保护, 保障元件表面完整性与激光装置的稳定运行。

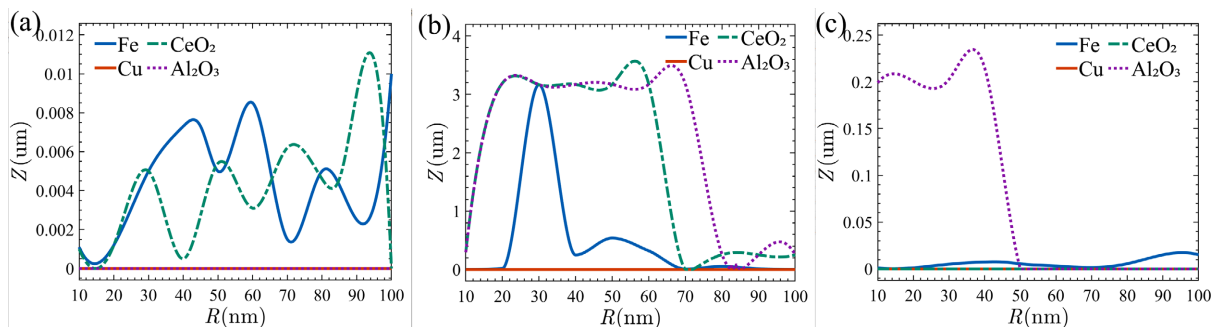


Figure 2. Relationship between peak position of light field and size of single-particle contaminants on optical element surfaces under different wavelength structures. (a) 355 nm wavelength; (b) 1064 nm wavelength; (c) 355 nm & 1064 nm wavelengths
图 2. 不同波长结构下光场峰值位置与光学元件表面单颗粒污染物尺寸关系。(a) 355 nm 波长; (b) 1064 nm 波长; (c) 355 nm & 1064 nm 波长

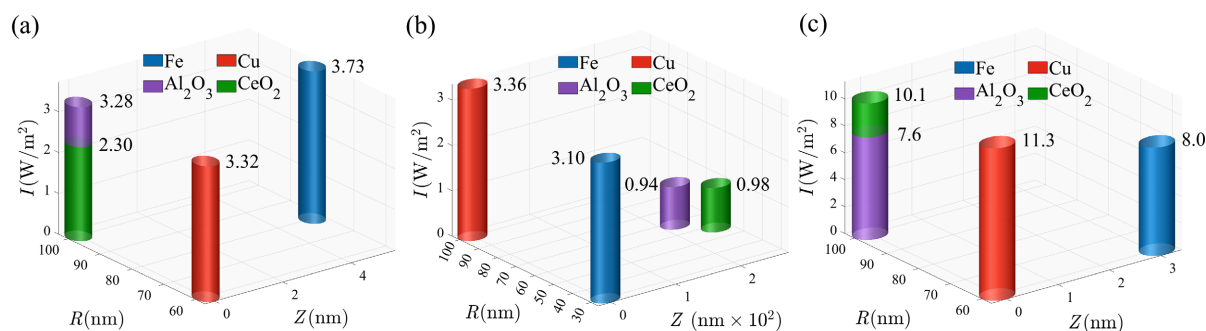


Figure 3. Relationship between optical field peak intensity and peak position at different wavelengths and the size of single-particle contaminants on optical component surfaces. (a) 355 nm wavelength; (b) 1064 nm wavelength; (c) 355 nm & 1064 nm wavelengths

图 3. 不同波长结构下光场峰值和峰值位置与光学元件表面单颗粒污染物尺寸关系。(a) 355 nm 波长; (b) 1064 nm 波长; (c) 355 nm & 1064 nm 波长

图 3 给出了不同波长激光条件下污染物粒径、光场峰值强度与峰值空间位置关系。由图 3(a)和图 3(b)可知, 355 nm 和复合波长激光辐照下, Cu 和氧化物污染物的光场峰值强度在分别在粒径 $R = 60$ nm 和粒径 $R = 100$ nm 时于光学元件表面达到最大值, Fe 污染物光场峰值在粒径 $R = 77$ nm 于亚表面区域达到最大值。图 3(c)中 1064 nm 单波长激光辐照时, 污染物的光场峰值调制尺寸均收敛至 $R = 100$ nm, 但金属污染物的峰值位置位于表面, 而氧化物污染物的峰值位置则深入亚表面。综上所述, 污染物诱导的光场调制特性是激光参数与材料属性共同作用的结果。激光波长的变化作为关键变量使污染物颗粒的光学响应在不同波长情况下表现出各自特有的共振行为与近场能量分布。

上述研究揭示了单颗粒模型下光场调制的基本规律。然而, 实际光学元件表面的污染物多以多颗粒形式存在, 其空间分布与近场耦合效应使得光场调制行为远比单颗粒模型复杂。因此, 为精准预测实际污染场景下的激光损伤特性, 需开展多颗粒体系的光场调制研究。

图 4 为污染物颗粒处于最强调制粒径时, 光场峰值随多颗粒间距的变化。结果表明, 多颗粒体系下金属污染物的光场调制能力强于氧化物污染物。随着间距增大, 金属污染物的光场调制强度逐渐降低并最终趋于稳定, 而氧化物污染物的光场调制强度则呈现先增大后减小再趋于稳定的变化趋势, 二者调制强度变化的临界间距均出现在约 350 nm 处。可以得出, 对于金属污染物颗粒, 间距增大导致光场调制效应随之减弱, 并在间距足够大时响应趋于平缓; 对于氧化物污染物颗粒, 在一定范围内增大间距有助于增强调制, 但当间距超过某临界值后调制强度下降。该临界间距与入射波长及颗粒尺寸密切相关, 反映

了散射体间干涉效应与能量局域能力的平衡。

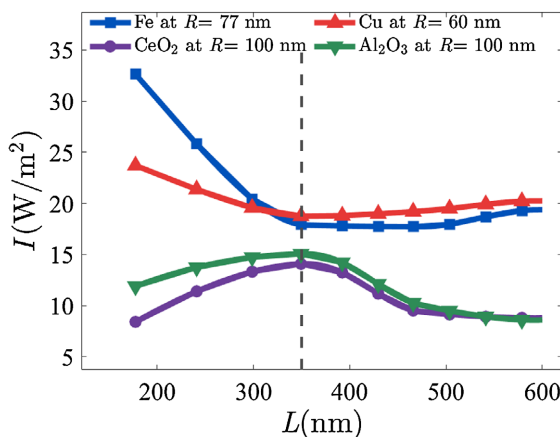


Figure 4. The effect of spacing between multiple particles on the surface of optical elements on light field modulation
图 4. 光学元件表面多颗粒污染物间距对光场调制的影响

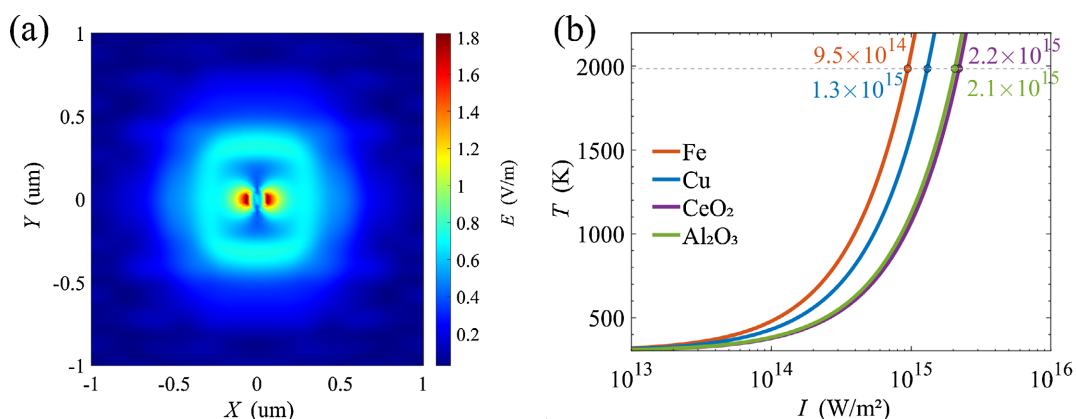


Figure 5. Contaminant-induced optical field enhancement and temperature rise characteristics. (a) Electric field distribution on the surface of the optical component; (b) Relationship between laser output power and the maximum temperature rise inside the optical component

图 5. 污染物诱导的光场增强及温升特性。(a) 光学元件表面电场分布；(b) 激光输出功率与光学元件内部最高温升关系

图 5 为熔石英表面污染物诱导产生的光场增强与最强点温度随入射光强变化曲线。由图 5(a)可知，激光辐照下，污染物颗粒两侧形成高度局域化的光场增强区域，同时颗粒-基底界面的介电限域效应与镜像偶极叠加作用，进一步导致颗粒-基底接触区出现对称双峰增强分布，这也是最容易受到热损伤的区域。图 5(b)中金属污染物因对光能强烈吸收而迅速升温，Cu 颗粒的部分入射光能量通过带间跃迁与散射形式损失，因此需要更高的入射光强才能产生与 Fe 相当的热量沉积；氧化物是宽禁带电介质材料，在可见及近红外波段几乎无本征吸收，其温升曲线较为平缓且彼此接近，它们对光场的调制主要源于折射率失配所引起的线性散射与干涉，光热转换效率较低，所以损伤阈值光强相较金属污染物更高。

4. 结论

为验证本研究数值模型的有效性，将模拟结果与已发表的相关实验研究进行定性及半定量对比。在复合波长激光的光场增强效应方面，本研究发现复合波长光场峰值达单波长的 2~4 倍，与 Yang 等在 355

nm & 1064 nm 复合激光辐照熔石英的实验中得到的“复合波长损伤阈值较单波长降低 60%~70%”的结论一致, 间接验证了复合波长的强调制效应; 在金属污染物的损伤敏感性方面, 本研究发现 Fe 的热量沉积效率高于 Cu, 与 Honig 等在 351 nm 激光下的实验结果“Fe 颗粒诱导的熔石英损伤点尺寸较 Cu 颗粒大 30%~40%”相吻合; 在污染物尺寸效应方面, 本研究得到 Cu 在 60 nm 粒径时光场调制达峰值, 与 Demos 等在短脉冲激光下的实验观测“金属颗粒在 50~70 nm 粒径范围内损伤效应最显著”基本一致。上述对比表明, 本研究的数值模拟结果与实验研究具有良好的一致性, 模型能够准确反映污染物诱导激光损伤的核心规律。

本研究基于 FDTD 方法, 揭示了 355 nm、1064 nm 单波长及 355 nm & 1064 nm 复合波长激光辐照下熔石英表面微纳污染物诱导损伤的多维度耦合机制。复合波长通过“共振叠加-介电匹配放大”双机制, 使光场峰值达单波长的 2~4 倍, 其中金属污染物的调制增强效应较氧化物额外提升 15%~30%, 这源于金属的自由电子共振特性与高消光系数, 使其在双波长协同作用下实现吸收-散射耦合增强, 而氧化物作为宽禁带材料, 本征吸收微弱, 仅依赖折射率失配引发的线性散射, 难以充分响应复合波长的共振叠加效应, 从而从物理本质上阐明了多波长“1+1>2”的非线性损伤风险。污染物粒径与光场调制的关联在 10~100 nm 研究范围内呈现显著的材料-波长依赖性规律: Fe 在复合波长激光下于 77 nm 粒径处出现光场调制峰值, Cu 则在 60 nm 粒径时达到区间内的调制峰值, 且同一条件下 Fe 的热量沉积效率更高; 氧化物污染物中, 该区间内 355 nm 及复合波长下的调制强度整体随粒径增大而增强, 1064 nm 下无明显粒径依赖。值得注意的是, 所有污染物的高场强区域均随粒径增大呈现向元件表面收敛的共性趋势, 这一规律为高功率激光装置中“表面损伤占主导”的工程现象提供了直接的微观机制支撑。多颗粒体系的光场调制并非单颗粒叠加, 存在约 350 nm 临界间距(与波长比值对应近场干涉临界条件), 且调控规律因材料而异: 金属颗粒以近场偶极耦合为主, 间距 < 350 nm 时耦合增强, 随间距增大调制强度单调递减; 氧化物颗粒以散射干涉为主, 间距 < 350 nm 时相消干涉导致调制受抑, 350 nm 左右达相长干涉峰值, > 350 nm 后逐渐衰减。这一发现明确了集群损伤风险是“材料属性-空间间距”协同作用的结果, 为靶向防控提供创新依据。材料属性主导损伤机制差异, 金属污染物凭借强介电响应与高效光热转换, 形成双峰增强区(场强因子高 1.5~2 倍), Fe 在临界间距内热量沉积效率最高; 氧化物本征吸收微弱, 温升平缓, 损伤阈值显著更高。本研究量化了复杂条件下的光场调制规律, 提出“粒径管控-间距管控-波长选择”三维污染控制策略, 为多波长激光装置的运行维护提供依据。后续将开展混合污染实验验证, 拓展非球形、动态污染模型, 开发机器学习损伤风险评估工具, 推动从被动清洁到主动预测设计的跨越, 支撑超高功率激光装置长效安全运行。实际情况中, 污染物与基底接触区会发生多光子电离和雪崩电离, 形成等离子体。等离子体的介电常数为负, 会对入射光产生强烈的反射和散射, 同时等离子体的热传导和冲击波会改变能量沉积方式, 使损伤区域扩大。此外, 等离子体形成后会产生电荷分离, 形成的电场会进一步加剧材料的电离和损伤, 造成恶性循环。本模型的适用范围为: 激光功率密度低于 10^{12} W/m²、脉冲宽度大于 10 ns 的纳秒级激光辐照场景, 此条件下等离子体形成效应微弱, 光场调制和热损伤为主要损伤机制。模型的局限性主要体现在: 未考虑等离子体动力学过程, 无法模拟高功率密度激光下的等离子体诱导损伤; 未考虑材料的熔融、汽化及冲蚀效应, 无法描述激光损伤的后期材料去除过程; 假设污染物与基底无间隙接触, 未考虑界面空气层对光场和热传导的影响。后续将针对上述局限性进行模型改进, 提升对复杂激光损伤过程的模拟精度。

参考文献

- [1] Liu, Y., Liu, L., Tang, W., Shao, J., Li, X., Sun, J., *et al.* (2020) Experimental Study on the Damage of Optical Materials by Out of Band Composite Laser. *Applied Sciences*, 10, Article 3578. <https://doi.org/10.3390/app10103578>

- [2] Pan, Q., Wang, K., Han, J. and Ma, B. (2025) Damage Dynamics and Relaxation Process of Double Pulses with Nanosecond Laser. *Photonics Research*, **13**, Article 2246. <https://doi.org/10.1364/prj.539648>
- [3] Miao, J., Zhu, C., Hasi, W., Niu, J., Kang, S., Dan, Z., *et al.* (2025) Study of Convexity on Nanosecond Laser-Induced Damage Growth in Fused Silica. *Optics & Laser Technology*, **192**, Article 113478. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113478>
- [4] Béziat, L., Roquin, N. and Lamaignère, L. (2024) Multishot Laser Damage of Multilayer Dielectric Mirrors in the Near-Infrared Subpicosecond Regime. *Applied Optics*, **63**, 5403-5410. <https://doi.org/10.1364/ao.528931>
- [5] Li, X., Dou, X., Zhu, H., Hu, Y. and Wang, X. (2020) Nanosecond Laser-Induced Surface Damage and Its Mechanism of CaF₂ Optical Window at 248 Nm KrF Excimer Laser. *Scientific Reports*, **10**, Article 5550. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62469-y>
- [6] Wang, L., Ma, W., Ji, L. and Zhao, D. (2012) Influence of Metal Particles on Damage Threshold of Fused Silica at 3 ω . *Chinese Journal of Lasers*, **39**, Article 0502004. <https://doi.org/10.3788/cjl201239.0502004>
- [7] Jiang, Y., Liu, H., Zhang, F., Zhang, B., Liao, W., Zhang, L., *et al.* (2021) Influence of Ejected SiO₂ Particles on the Laser Damage Thresholds of Fused Silica. *Fusion Engineering and Design*, **173**, Article 112956. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112956>
- [8] Li, Y., Li, L., Wei, H., Li, X., Wang, Y., Pan, S., *et al.* (2025) Cerium Contamination on Silicon Carbide Optics during CMP: TOF-SIMS, XPS Characterization, and Reaxff MD Simulation. *Applied Surface Science*, **703**, Article 163390. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163390>
- [9] Bennett, J.M. (2020) Contamination on Optical Surfaces—Concerns, Prevention, Detection, and Removal. In: Mittal, K.L., Ed., *Particles on Surfaces*, CRC Press, 101-110. <https://doi.org/10.1201/9781003067429-6>
- [10] Han, K., Yan, B.Z., Xu, X.J. and Liu, Z.J. (2016) Thermal Damage Mechanism of the Optical Element Used in Mid-Infrared High Power Laser System. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **35**, 741-746.
- [11] Ding, K.Y., He, C.T., Liu, Z.G., Xiao, J., Feng, G.Y., Zhou, K.N., *et al.* (2023) Research on Particulate Contamination Induced Laser Damage of Optical Material Based on Integrated Spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, **43**, 1234-1241.
- [12] Ding, W., Zhao, L., Chen, M., Cheng, J., Yin, Z., Liu, Q., *et al.* (2024) Concentration Characterization of Underlying Intrinsic Defects Accompany with Surface Structural Defects and Their Effect on Laser Damage Resistance. *Applied Surface Science*, **643**, Article 158678. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158678>
- [13] Shao, Z.C., Ling, X.L., Chen, X.B. and Chen, X. (2024) Research on Suppression Technology for Coupling Damage of Organic Pollution and Defect. *High Power Laser and Particle Beams*, **36**, Article 121004.
- [14] Murray, M., Naydenova, I. and Martin, S. (2023) Review of Recent Advances in Photosensitive Polymer Materials and Requirements for Transmission Diffractive Optical Elements for LED Light Sources. *Optical Materials Express*, **13**, 3481-3501. <https://doi.org/10.1364/ome.502234>
- [15] Ma, B., Guan, S., Yan, D., Pan, Q., Hou, Z., Wang, K., *et al.* (2024) The Influence of Space Environmental Factors on the Laser-Induced Damage Thresholds in Optical Components. *High Power Laser Science and Engineering*, **12**, e47. <https://doi.org/10.1017/hpl.2024.28>
- [16] Tong, Y.J., Liu, F., Fan, J.D., Jin, L.M., Dong, X.H., Yu, X.J., *et al.* (2022) Effect of Optics Contamination on X-Ray Free-Electron Laser Beam Quality. *Acta Optica Sinica*, **42**, Article 1134006. <https://doi.org/10.3788/aos202242.1134006>
- [17] Lin, P., Mah, M., Randi, J., DeFrances, S., Bernot, D. and Talghader, J.J. (2021) High Power and Contamination Properties of All-Silica High Reflectivity Multilayers. *IEEE Photonics Journal*, **13**, Article 2200407. <https://doi.org/10.1109/jphot.2021.3100803>
- [18] Han, Y., Peng, X., Wan, S., Cao, z., Chen, H., Li, H., *et al.* (2024) Numerical Simulation and Experimental Validation of Light Modulation by Laser-Ablated Ripples on Fused Silica Surfaces. *Optics Express*, **33**, 169-188. <https://doi.org/10.1364/oe.544433>
- [19] Shi, Z., Sun, L., Shao, T., Liu, H., Huang, J., Ye, X., *et al.* (2022) Statistically Correlating Laser-Induced Damage Performance with Photothermal Absorption for Fused Silica Optics in a High-Power Laser System. *Photonics*, **9**, Article 137. <https://doi.org/10.3390/photonics9030137>
- [20] Hou, L., Yin, F., Wang, S., Sun, J. and Yin, H. (2024) A Review of Thermal Effects and Substrate Damage Control in Laser Cleaning. *Optics & Laser Technology*, **174**, Article 110613. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110613>
- [21] Dover, N.P., Nishiuchi, M., Sakaki, H., Kondo, K., Alkhimova, M.A., Faenov, A.Y., *et al.* (2020) Effect of Small Focus on Electron Heating and Proton Acceleration in Ultrarelativistic Laser-Solid Interactions. *Physical Review Letters*, **124**, Article 084802. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.124.084802>
- [22] You, C., Dai, S., Zhang, P., Xu, Y., Wang, Y., Xu, D., *et al.* (2017) Mid-Infrared Femtosecond Laser-Induced Damages in As₂S₃ and As₂Se₃ Chalcogenide Glasses. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 6497.

- <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06592-3>
- [23] Yu, X., Xu, J. and Zhang, B. (2018) Thermal Melting Damage of Thin Film Components Induced by Surface Impurities and Nodule Defects. *Infrared and Laser Engineering*, **47**, Article 1243003. <https://doi.org/10.3788/irla201847.1243003>
- [24] Liu, F., Jiao, H., Ma, B., Paschel, S., Balasa, I., Ristau, D., *et al.* (2020) Influence of the Surface and Subsurface Contaminants on Laser-Induced Damage Threshold of Anti-Reflection Sub-Wavelength Structures Working at 1064 Nm. *Optics & Laser Technology*, **127**, Article 106144. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106144>
- [25] Chen, X., Ali, S., Yuan, L., Guo, F., Huang, G., Shi, W., *et al.* (2022) Characterization and Source Analysis of Heavy Metals Contamination in Microplastics by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Chemosphere*, **287**, Article 132172. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132172>
- [26] Honig, J., Norton, M.A., Hollingsworth, W.G., Donohue, E.E. and Johnson, M.A. (2004) Experimental Study of 351-Nm and 527-Nm Laser-Initiated Surface Damage on Fused Silica Surfaces Due to Typical Contaminants. *SPIE Proceedings*, Boulder, 20-22 September 2004, 129-136. <https://doi.org/10.1117/12.597314>
- [27] Palmier, S., Garcia, S., Lamaignère, L., Loiseau, M., Donval, T., Rullier, J.L., *et al.* (2006) Surface Particulate Contamination of the LIL Optical Components and Their Evolution under Laser Irradiation. *SPIE Proceedings*, Boulder, 25-27 September 2006. <https://doi.org/10.1117/12.695442>
- [28] Zhang, Z.L. and Su, J.H. (2021) Simulation and Reconstruction of 3D Microscopic Morphology of Damaged Optical Film Surface. *Acta Optica Sinica*, **41**, Article 0212002. <https://doi.org/10.3788/aos202141.0212002>
- [29] Kafka, K.R.P. and Demos, S.G. (2019) Interaction of Short Laser Pulses with Model Contamination Microparticles on a High Reflector. *Optics Letters*, **44**, 1844-1847. <https://doi.org/10.1364/ol.44.001844>
- [30] Demos, S.G., Lambropoulos, J.C., Negres, R.A., Matthews, M.J. and Qiu, S.R. (2019) Dynamics of Secondary Contamination from the Interaction of High-Power Laser Pulses with Metal Particles Attached on the Input Surface of Optical Components. *Optics Express*, **27**, 23515-23525. <https://doi.org/10.1364/oe.27.023515>
- [31] Zhang, S., Menoni, C., Gruzdev, V. and Chowdhury, E. (2022) Ultrafast Laser Material Damage Simulation—A New Look at an Old Problem. *Nanomaterials*, **12**, Article 1259. <https://doi.org/10.3390/nano12081259>
- [32] Bulgakov, A.V., Sládek, J., Hrabovský, J., Mirza, I., Marine, W. and Bulgakova, N.M. (2024) Dual-Wavelength Femto-second Laser-Induced Single-Shot Damage and Ablation of Silicon. *Applied Surface Science*, **643**, Article 158626. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158626>
- [33] Yang, Z., Zhang, Y., Chen, Y., Li, X., Jiang, Y., Feng, Z., *et al.* (2022) Simultaneous Detection of Multiple Gaseous Pollutants Using Multi-Wavelength Differential Absorption Lidar. *Optics Communications*, **518**, Article 128359. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128359>
- [34] Yang, Z., Chen, J., Wang, L., Yang, L., Li, Y., Wu, Z., *et al.* (2024) Composite Scattering Characteristics Analysis of Micro-Ellipsoidal Periodic Structure Optical Surface and Microdefects. *Heliyon*, **10**, e36039. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36039>
- [35] Wang, P.C., Zhang, S., Shen, C.B., Zhan, J.T., Duan, J., Li, Y.C., *et al.* (2023) Multiple Scattering Transmission Characteristic of Polarized Light in Ellipsoidal Fine Particles. *Chinese Optics*, **16**, 348-357. <https://doi.org/10.37188/co.2022-0144>
- [36] Palik, E.D. (1985) Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press.