基于离轴明暗场OCT的SiC亚表面损伤检测技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41458.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于离轴明暗场OCT的SiC亚表面损伤检测技术。 导读

近期，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王孝坤、王玉坤、张学军研究团队联合新加坡国立大学陈南光和广州实验室刘琳波在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Off-axis bright- and dark-field OCT for non-destructive subsurface defect detection in silicon carbide的研究论文。

该研究建立了一种基于离轴明暗场的微光学相干层析术（Micro-Optical Coherence Tomography, Micro-OCT）成像技术，用于多角度收集碳化硅（Silicon Carbide, SiC）亚表面缺陷信号。基于该技术，研究团队设计并搭建了基于离轴明暗场同步成像的近红外波段Micro-OCT系统，并制作了适用于该系统的高精度显微物镜，开展了反应烧结碳化硅（Reaction-sintered SiC, RB-SiC）亚表面损伤检测实验，实现了~200微米范围内微米级亚表面缺陷无损检测，证明了多角度照明/收集的优越性能。这项工作对于大口径高精度光学元件无损亚表面损伤检测具有重要意义，有望在航天航空等领域的光学元件检测带来进一步发展。

SiC凭借其卓越的机械性能和热稳定性，已成为先进光学系统中的关键结构功能材料，广泛应用于大口径空间反射镜、高功率激光光学元件及极端环境光学仪器等领域。相较于传统光学材料如微晶玻璃和单晶硅，SiC具有高刚度重量比、优异的热稳定性、低热膨胀系数、高硬度以及出色的耐磨耐腐蚀性等突出优势。

然而，SiC极高的硬度和低断裂韧性使其在精密加工过程中不可避免地产生亚表面缺陷（Subsurface Defects, SSDs），包括微裂纹、中位裂纹和侧向裂纹等。这些缺陷分布于数十至数百微米深度范围内，若未被充分检测和消除，将严重降低光学性能、削弱机械强度并影响组件长期可靠性。因此，亚表面缺陷的精确表征与控制对于提升制造良率和确保光学元件质量至关重要。

现有的亚表面缺陷检测方法可分为破坏性和非破坏性两类。破坏性方法如化学蚀刻、截面显微分析和角度抛光等虽然直观可靠，但会损毁样品，仅适用于对比实验，在产线质检中成本极高。

OCT作为一种高分辨率、非破坏性的光学成像技术，在生物医学和工业检测领域应用广泛。但传统OCT在工业应用中面临环境适应性差、分辨率与检测效率难以平衡、强表面反射噪声干扰深层结构成像等挑战。离轴OCT构型通过增强多重散射光子收集和抑制镜面反射，为解决上述问题提供了新思路。

研究团队提出了离轴明暗场OCT（BADF-OCT）同步成像架构，通过同时采集两个角度通道的散射信号，捕获单通道OCT无法获取的互补缺陷信息，显著提升了检测鲁棒性。系统采用宽带近

红外光源（1100 – 1500 nm）使系统分辨率达到Micro-OCT水平，结合定制的双相机光纤阵列光谱仪，兼顾高轴向分辨率与SiC大穿透深度，实现了明暗场同步检测与三维体成像。

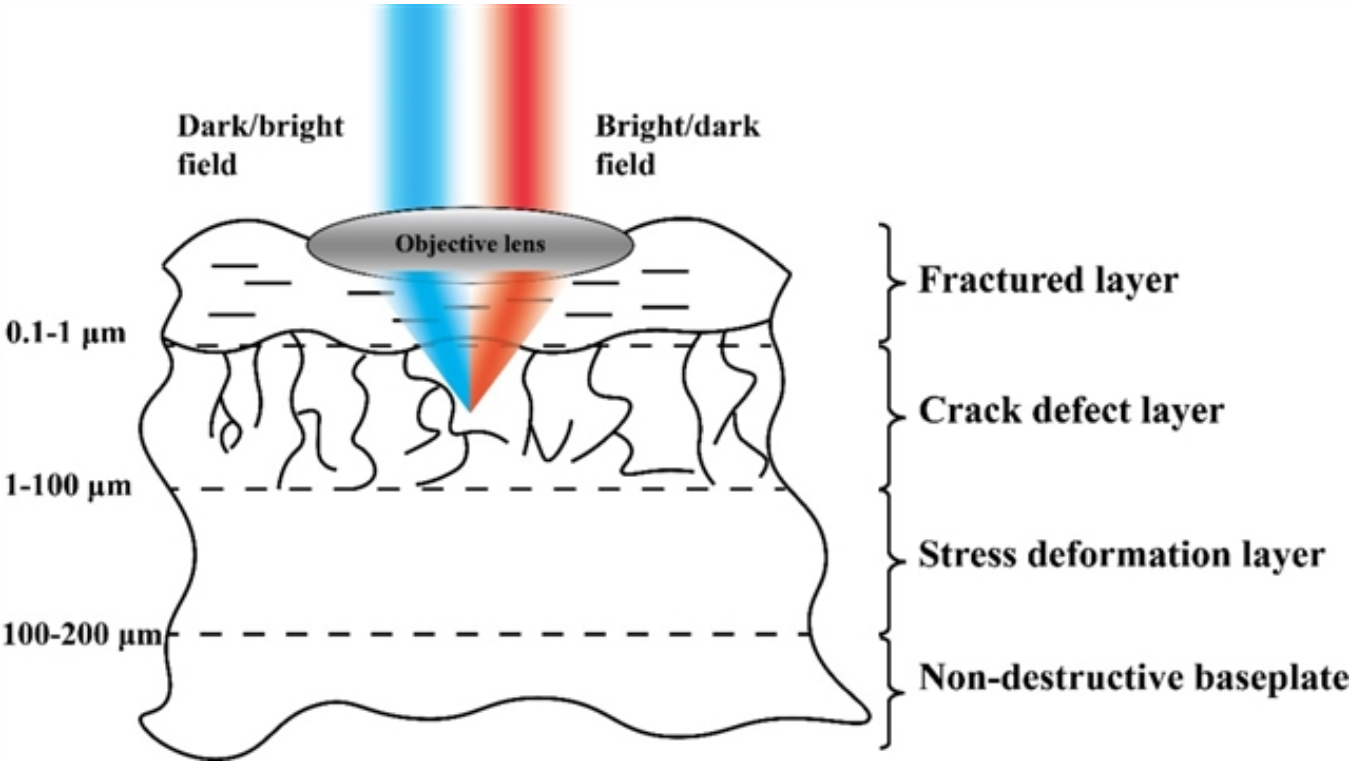


图1：离轴BADF-OCT检测亚表面损伤原理图

团队专门设计了适用于该系统的九片式球面高分辨率物镜，在SiC样品分析中，系统可在约30 μm深度范围内实现优于1.5 μm的轴向分辨率和优于5 μm的横向分辨率。离轴照明有效抑制了样品表面强镜面反射干扰，宽带光源确保在高杂散光环境下仍保持高相干对比度，光纤阵列光谱仪通过光纤端面出射实现有效的空间滤波。

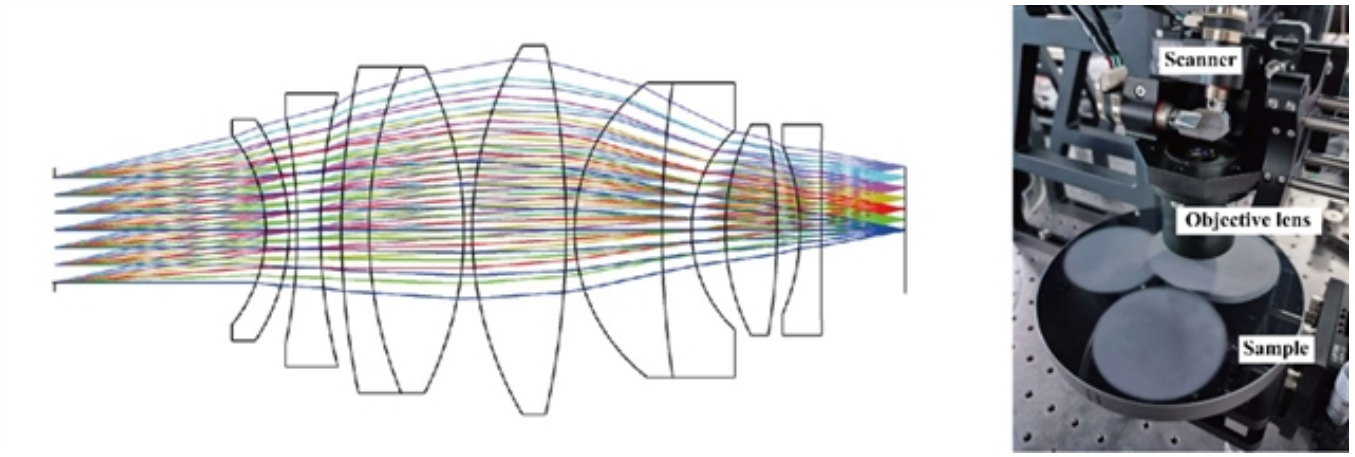


图2：显微物镜设计布局图和实际扫描成像光路

团队在反应烧结SiC样品上进行了系统验证。通过设置不同研磨压力（2 psi、1 psi、0.5 psi）获得不同表面粗糙度区域。实验结果表明，暗场图像在深层具有更好的强度均匀性。经明暗场图像融

合后，既避免了明场的强光干扰，又保留了暗场大深度和高对比度的优势。

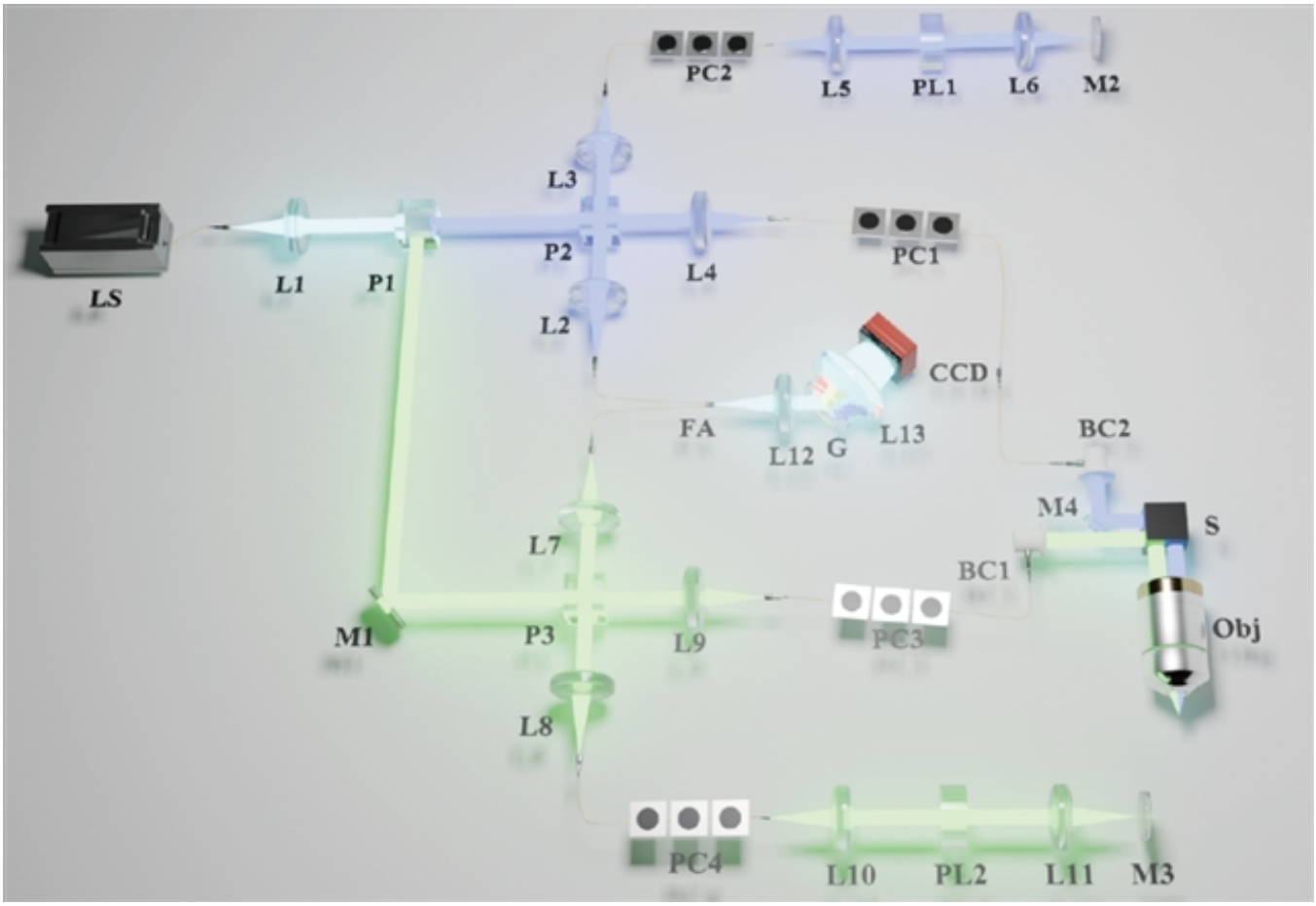


图3：离轴BADF-OCT光路示意图

通过三维体数据提取不同深度横向截面，结合伪彩色处理，可直观揭示亚表面缺陷的横向分布。双路径协同机制使两路光同时承担明场照明和暗场收集功能，生成两个角度的同步成像，提供了更全面的缺陷信息。同步明暗场成像与融合分析有效缓解了单模OCT成像中的检测不确定性，实现了精确缺陷定位，显著提升了缺陷检出率和分类准确性。

总结与展望

该研究从光学系统设计和检测方法创新出发，成功解决了碳化硅光学元件加工中亚表面缺陷无损高分辨率检测的关键难题。离轴BADF-OCT系统集宽带光源、双向及光纤阵列光谱仪和离轴照明/探测构型于一体，实现了高分辨率、大景深、强抗干扰能力和高信噪比的综合优势，为碳化硅光学元件的质量控制提供了切实可行的技术路径。

未来，研究团队将基于该离轴BADF-OCT系统开发高精度、高速亚表面缺陷识别算法，进一步推动OCT技术在工业无损检测领域的智能化应用，为大口径复杂曲面光学元件的超精密制造提供更强有力的技术支撑。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.060

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“ 来源 ”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：王孝坤等 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发