
光热调制让缺陷“显形”

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41456.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！

光热调制让缺陷“显形”。导读

近期，华中科技大学刘世元教授、朱金龙教授团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Spatiotemporal Photothermal Modulation Microscopy (SPM2) for High-sensitivity Deep-subwavelength Defect Inspection的研究论文。

该研究提出了一种主动可调的光热调制方案（SPM²），利用材料显著的热光效应，通过局域光热激发诱导纳米结构产生共振红移，从而在时域上对缺陷信号进行主动调制。这种机制不仅显著增强了缺陷引起的场扰动，更有效抑制了静态背景噪声，实现了深亚波长尺度缺陷的高灵敏检测。该研究不仅在物理机制上突破了静态散射成像的局限，更提供了微秒量级的超快响应能力，为工业级在线检测提供了极具潜力的技术方案。这项工作对于高灵敏度图形缺陷检测开辟了新路径，有望在晶圆缺陷检测、光子器件调控等领域带来新的应用。

一、挑战：传统检测技术遭遇瓶颈

在先进半导体制造中，晶圆缺陷检测如同大海捞针。传统的明场光学检测（BFI）虽具有非接触和高通量的优势，但受限于光学衍射极限，且密集纳米图案产生的强烈背景散射会完全淹没缺陷信号，使得深亚波长缺陷在常规成像中几乎不可见。虽然电子束显微镜等手段分辨率极高，但通量低、成本高且易损伤样品，难以满足大规模检测的需求。如何在不牺牲通量的前提下，通过引入新的物理维度来推进系统的检测极限，是当前半导体量测领域的国际前沿难题。

二、核心技术：光热调制实现信号增强与背景抑制

针对上述难题，联合研究团队提出的时空光热调制显微技术（SPM2），其本质是通过外部能量场主动改变样品的物理属性，进而操纵散射光的远场分布。

局域加热：利用高功率泵浦光激发光热效应，对纳米结构进行局域加热，引起材料折射率和消光系数的改变。

共振红移：由于硅材料具有极高的热光系数，局部温升直接驱动了光学常数的改变，从而诱导硅纳米结构的光学共振发生红移，最终导致缺陷和背景散射特征发生强烈的非线性变化。

信号放大：当工作波长恰好处于红移共振峰的陡峭边缘，极小的折射率波动（即缺陷存在）会被转化为极大的散射强度扰动，起到了物理层面的信号放大器作用，从而显著提升深亚波长尺度缺

陷的检测灵敏度与对比度。

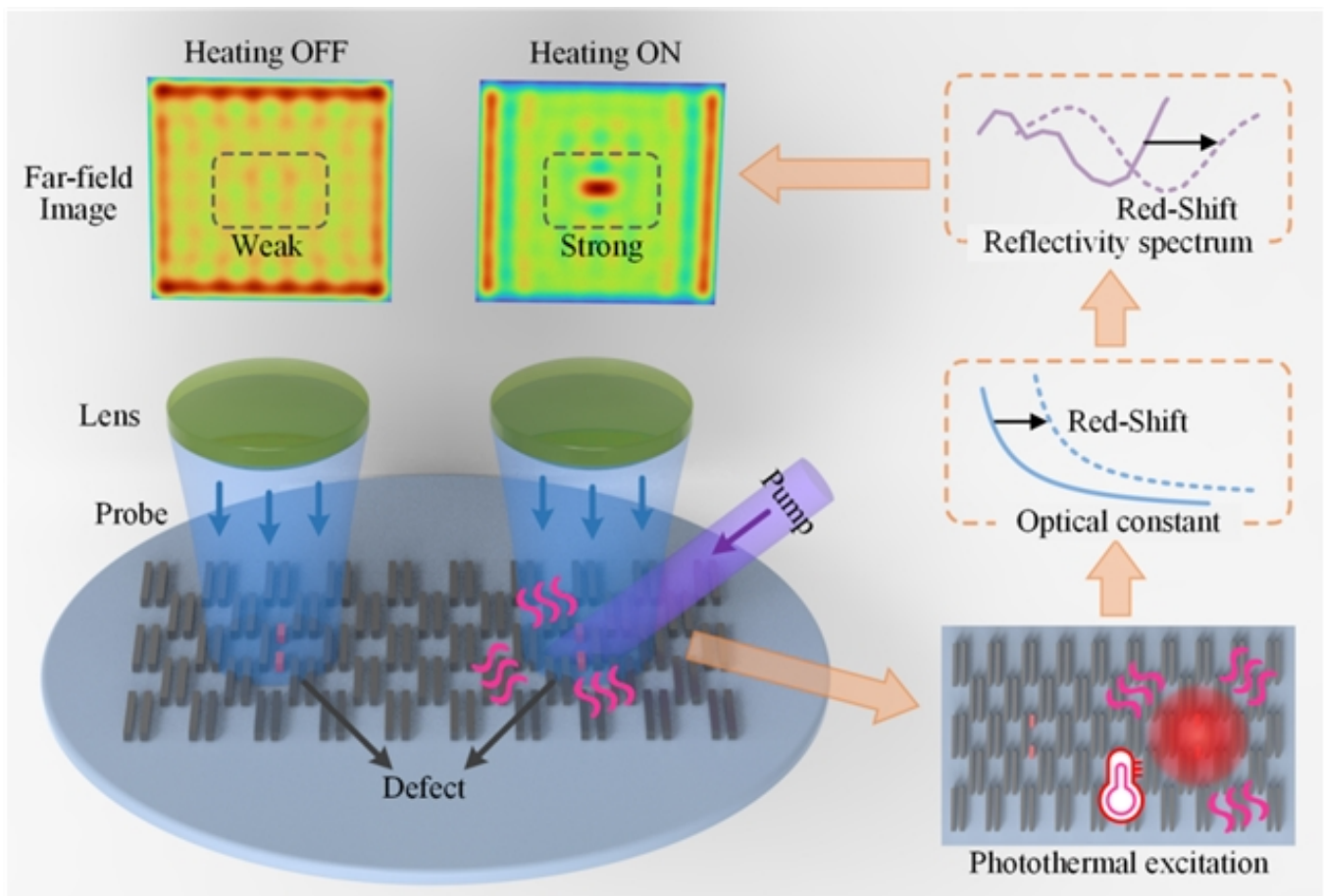


图1：光热增强缺陷检测的基本物理机制

三、理论与实验验证：瞬态、无损、高灵敏

研究人员通过光-热耦合模型定量捕捉了温升过程与瞬态热演化。

极速响应：理论分析表明，光热激发与耗散过程在微秒量级内（加热约4.6 μs ，冷却约7 μs ）即可接近热平衡状态。这种微秒级热弛豫时间意味着该技术可以无缝集成到现有的高速扫描检测系统中，不会成为检测通量的瓶颈。

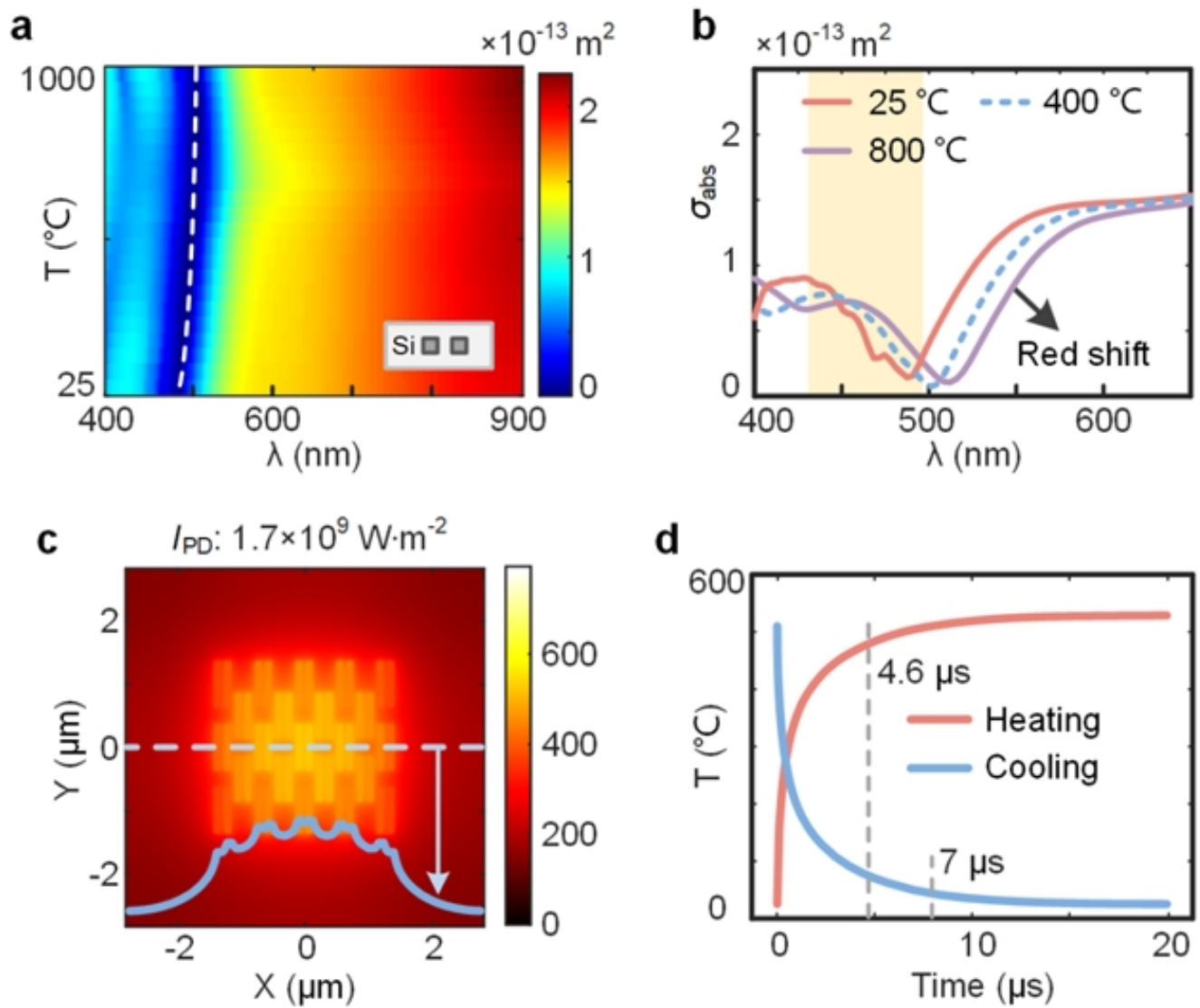


图2：光热效应调制纳米结构散射行为的理论分析。a b 纳米结构的在不同温度下的散射截面；c 纳米结构在功率密度 $1.7 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 泵浦照明下的激发温度场；d 升温与降温过程瞬态分析结果。

信噪比提升：在针对深亚波长断裂缺陷的仿真检测中，传统BFI成像的对比度几乎为0.12。但在SP M2模式下，缺陷扰动信号呈现出明显的增强，对比度提升为1.02（图3）。实验结果显示，缺陷信号的信噪比提升了约5倍，使原本淹没在背景中的隐身缺陷变得清晰可见（图4）。仿真与实验检测的纳米结构特征尺寸约为探测波长的1/6，约为系统衍射极限的1/10。

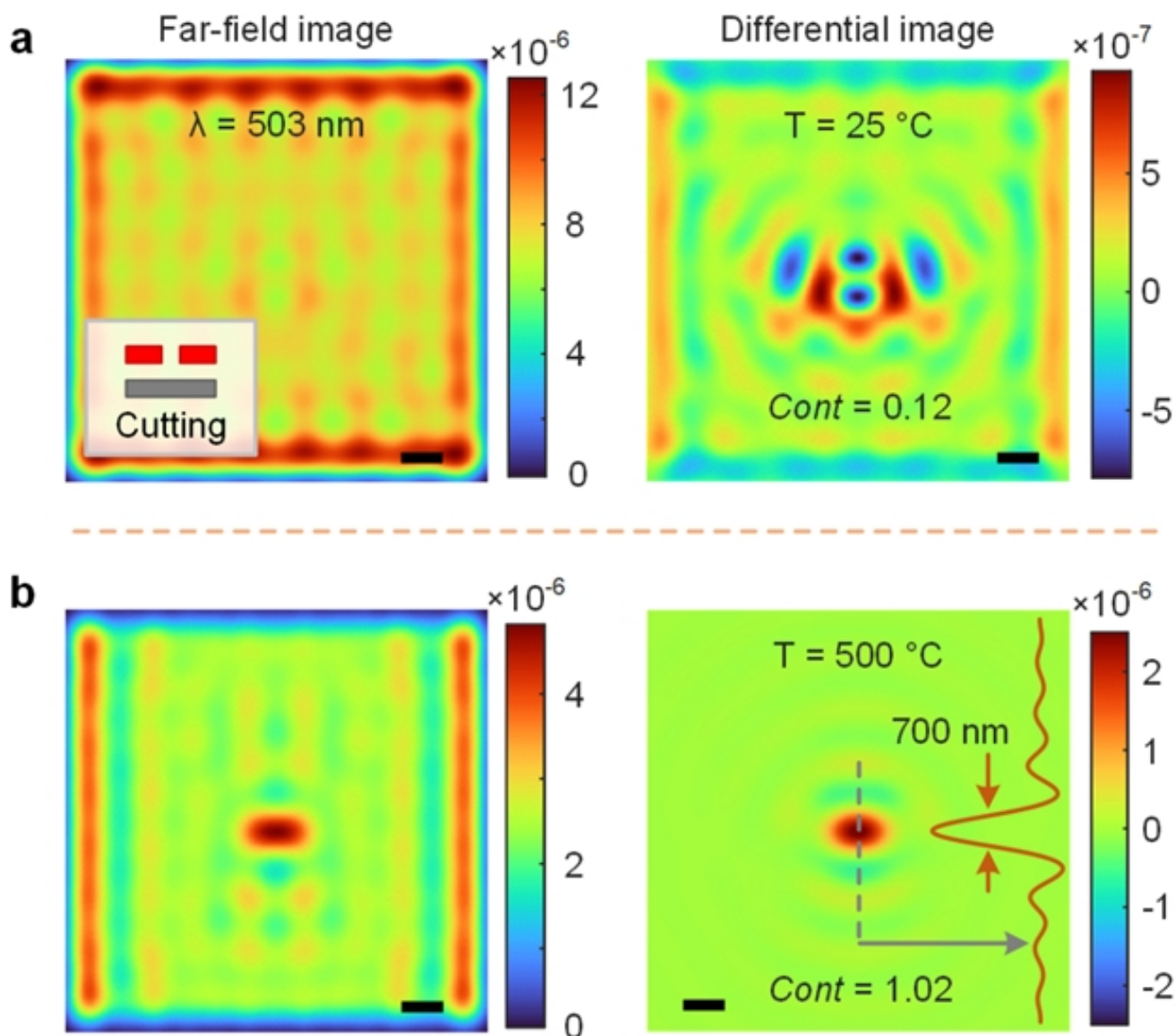


图3：光热效应增强缺陷检测理论验证。a 含断裂缺陷的纳米结构在25 °C下远场图像及其参考差分图像；b 同一纳米结构在500 °C下远场图像及其参考差分图像。

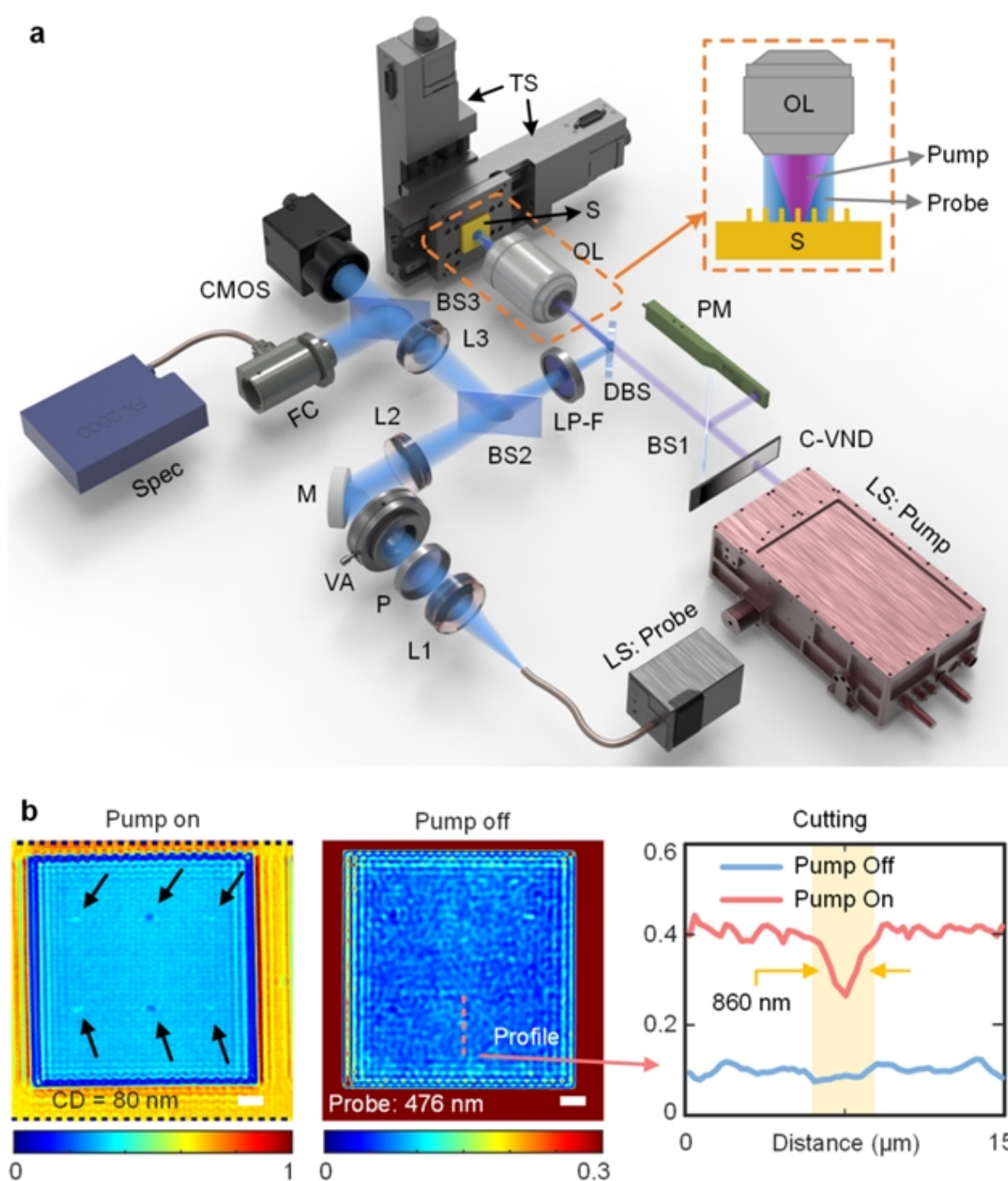


图4：光热效应增强缺陷检测实验验证。a采用Pump-Probe架构的光热检测系统示意图；b自制含缺陷纳米结构在泵浦光激发开启与关闭状态下的远场图像。

安全无损：重复性实验验证了该过程的光学响应完全可逆，结合热激发前后的电镜图像，可进一步确认纳米线的形貌未出现可观察的变化。此外，热模型预测的泵浦激发峰值温度远低于硅的熔点，确保了待检结构的完整性。

四、亮点：技术优势总结

高灵敏度（核心突破）：通过动态调控背景散射，使深亚波长缺陷的信号突破强背景噪声的限制，对比度与信噪比增强效果显著。

主动可控（动态调控）：不同于传统的静态被动成像，SPM2允许通过调节泵浦光功率密度，实时优化不同图样的检测灵敏度，提供了超快的检测配置优化调整路径。

易集成（工程价值）：该方案兼容现有检测系统的光学架构，仅需增加泵浦模块即可实现模块化升级；改造难度低，为现有设备性能跨越提供了便捷路径。

普适性强（扩展应用）：该方案不局限于特定的纳米几何形状，只要具有光学共振特性的系统均可适用，可广泛应用于集成光子器件全光调制、纳米传感及高速光学开关等领域。

名词解释

光热效应(Photothermal Effect)：指物质吸收光能后，通过非辐射跃迁将光能转化为热能的过程。

热光效应(Thermo-optic Effect)：指物质的折射率（ n ）和消光系数（ k ）随着温度（ T ）的变化而改变的物理现象。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2026.052>

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：刘世元等 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](https://www.iikx.com)转发