
OEA | 飞秒激光 + 难熔金属：视觉_红外分段调控、高安全性信息加密超表面开发

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41036.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！

OEA | 飞秒激光 + 难熔金属：视觉_红外分段调控、高安全性信息加密超表面开发。

Opto-Electronic Advances论文推荐上海交通大学材料科学与工程学院飞秒激光微纳加工团队利用飞秒激光无掩模直写技术在纯锆难熔金属基板上一体化写入了可见光/红外双波段信息，实现了可见光信息和红外信息的无串扰分级调控并赋予加密信息高温密钥。

Femtosecond laser maskless direct writing of dual-band crosstalk-free information for all-in-one high-security encryption metasurface

Hanmian Jiang¹, Zhuguo Li^{1,2*} and Dongshi Zhang^{1*}

Abstract: Metasurface fabrication still faces critical processing challenges in balancing the structural order and disorder, achieving high-speed patterning, and extending material compatibility to refractory metals for operation under extreme conditions. This study demonstrates that femtosecond laser maskless direct writing (fs-LMDW) offers a versatile platform for engineering multispectral information, all-in-one metasurfaces on pure zirconium (Zr) substrates. Through sequential fs-LMDW in air and ethylene glycol (EG), deceptive grey-colored visible information is superimposedly encoded with the infrared (IR)-encrypted information (invisible among black-color structured background), which leverages the crosstalk-free structural modulation of singular-band IR and visible light. The metasurface exhibits robust thermal stability and high-security encryption capability across a wide temperature range, with IR-concealed information (such as QR code) remaining securely encrypted until thermally activated at 300 °C for smartphone-readable information decryption. Furthermore, the visible information is both erasable through 300 °C oxidation heating in air and rewritable via fs-LMDW in EG without compromising IR encryption security. Particularly, the one-time complete erasability makes it possible to identify whether the encrypted IR-information has been decrypted, underscoring the robustness and high security of the platform. The presented hierarchical micro/nanostructuring methodology is deemed to be applicable to a large material matrix to gain high-security, and multifunctional metasurfaces that are more difficult and complex for current metasurface fabrication techniques.

Keywords: all-in-one metasurface; femtosecond laser maskless direct writing; high-security encryption; temperature-controlled decryption; erasability and rewritability

DOI: [10.29026/oea.2026.250303](https://doi.org/10.29026/oea.2026.250303) | CSTR: [32247.14.oea.2026.250303](https://cstr.cn/32247.14.oea.2026.250303)

Citation: Jiang HM, Li ZG, Zhang DS. Femtosecond laser maskless direct writing of dual-band crosstalk-free information for all-in-one high-security encryption metasurface. *Opto-Electron Adv* 9, 250303 (2026).

¹Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ²State Key Lab of Metal Matrix Composites, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China.

*Correspondence: ZG Li, E-mail: lizg@sjtu.edu.cn; DS Zhang, E-mail: zhangdongshi@sjtu.edu.cn

文章 Jiang HM, Li ZG, Zhang DS. Femtosecond laser maskless direct writing of dual-band crosstalk-free information for all-in-one high-security encryption metasurface. *Opto-Electron Adv* 9, 250303 (2026).

第一作者：蒋涵冕

通信作者：张东石、李铸国

研究背景

在数字时代，信息安全已成为守护个人隐私、企业机密和国家信息的生命线，比如手机支付数字签名、安全认证、防伪技术到敏感数据加密保护，都离不开可靠的加密手段。

网络环境的复杂性和不安全性必将反向促进物理加密手段的普及和应用，光学加密凭借其高效和高速的优势，已成为信息安全领域的研究热点。超表面技术的出现已经引领我们跨入了多通道高安全性加密的新纪元，通过与光、热、电场等外部激励以及相变材料(PCMs)体系的结合，还可实现灵活的加密升级。然而，该技术实际应用仍受限于两大制约因素：对复杂光学解密系统以及高精度纳米加工技术（尤其是电子束光刻）的显著依赖。"准有序"与"无序"超表面概念的出现，为拓展光学加密的技术边界提供了新的可行性，并进一步催化了高效制造技术的创新，以降低对传统光刻技术的依赖性。

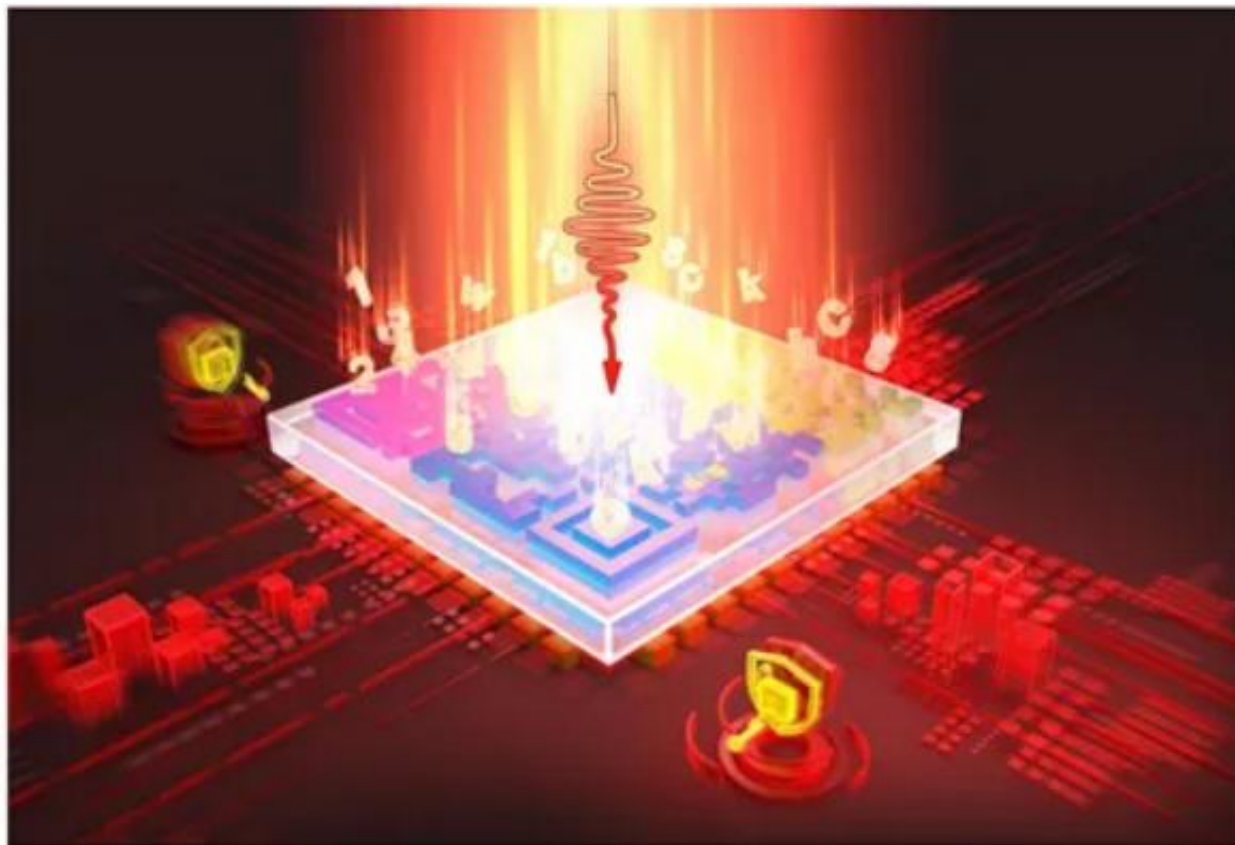


图1激光信息一体化写入、多维度信息矩阵显示加密概念图

飞秒激光无掩模直写技术（fs-LMDW）已逐渐成为超构表面工程领域关注的新方法，其核心优势体现在：操作简单快捷，无环境依赖，跨尺度加工能力强，可以实现从微米到纳米尺度定制图形化加工，拥有卓越的结构可重构性能力和材料普适性，尤其对难加工材料比如难熔金属微纳加工优势明显，还可与其他工艺广泛兼容。此外，其独特的化学-物理协同改性能力表现尤为突出，有望实现效率、精度与可制造性的多维度平衡，为光学超表面的开发提供强劲助力。但该技术对非透明材料的信息写入能力通常限制在可见光或红外单波段，如何将可见光波段信息和红外信息无串扰编码写入单一实体并将多波段信息分矩阵调控（图1），同时发挥难熔金属高温耐受性优势，实现高安全性和高选择性的信息解密调控，成为亟待解决的一大挑战。

本文亮点

上海交通大学材料科学与工程学院飞秒激光微纳加工团队针对上述问题提出了潜在的解决方案，可通过飞秒激光无掩模直写技术在纯锆难熔金属基板上一体化写入可见光/红外双波段信息，实现了可见光信息和红外信息的无串扰分级调控并赋予加密信息高温密钥，如图2所示。该工作以Femtosecond Laser Maskless Direct Writing of Dual- Band Crosstalk-Free Information for All-In-One High-Security Encryption Metasurface为题发表在Opto-Electronic Advances 2026年第4期。



图2可见光-红外无串扰信息读取、可见光信息高温擦除和激光重写，以及二维码红外信息温度渐进显示可手机扫描读取的概念图

图3为超表面的制备流程和实际测试效果。首先在空气环境中，利用飞秒激光在锆基底上雕刻出具有梯度微纳结构的红外信息（如上海交大官网的二维码），这种结构因富含氧空位缺陷呈现均匀黑色，能有效隐藏红外信息；随后将此基板置于乙二醇环境中，通过飞秒激光写入灰色的可见光信息（如SJTU上海交通等图案），由于改性结构仅限于纳米尺度，不会破坏红外信息相关的微尺度结构，协同调控了空间结构和光谱，完成了双波段信息的无串扰写入。可见光信息具备高温擦除和激光可重写性，SJTU和上海图案在300℃下消失，利用激光写入交通图案也清晰可见，其在300℃下不能完全擦除，展示样品的一次完全擦除能力，可有效检验信息是否曾被恶意读取重写。随着温度增加，不同功率写入的红外波段二维码信息会分级显示，在300℃下二维码完全清晰显示，可通过手机扫描读取上海交大主页相关内容。温控密钥加密超表面的提出和验证完全发挥了难熔金属的特点，与相变材料相比，解密和相变温度大幅度提升，开拓了新的信息加密体系。

图3(a)飞秒激光空气/乙二醇可见光/红外信息一体化信息写入示意图。红外信息（二维码）、可见光信息（SJTU）；(b) 300 °C 高温处理前后信息显示示意图。(c) 红外二维码信息温度梯度显示和可见光擦除示意图；(d) 上海交通信息可擦除和可重写的验证流程图；(e) SJTU/二维码信息温度梯度显示和解密的实验验证；(f) 上海可完全擦除，交通信息激光重写及其高温不完全擦除显示

为了验证可见光信息写入和高温擦除的内在机制，研究人员对结构细节（图4）进行了多种对比表征，发现乙二醇液相环境下LIPSS金属结构化是导致其可见光波段差异性显色的主要原因，而其在高温环境下的黑色氧化是信息可擦除的内在机制。

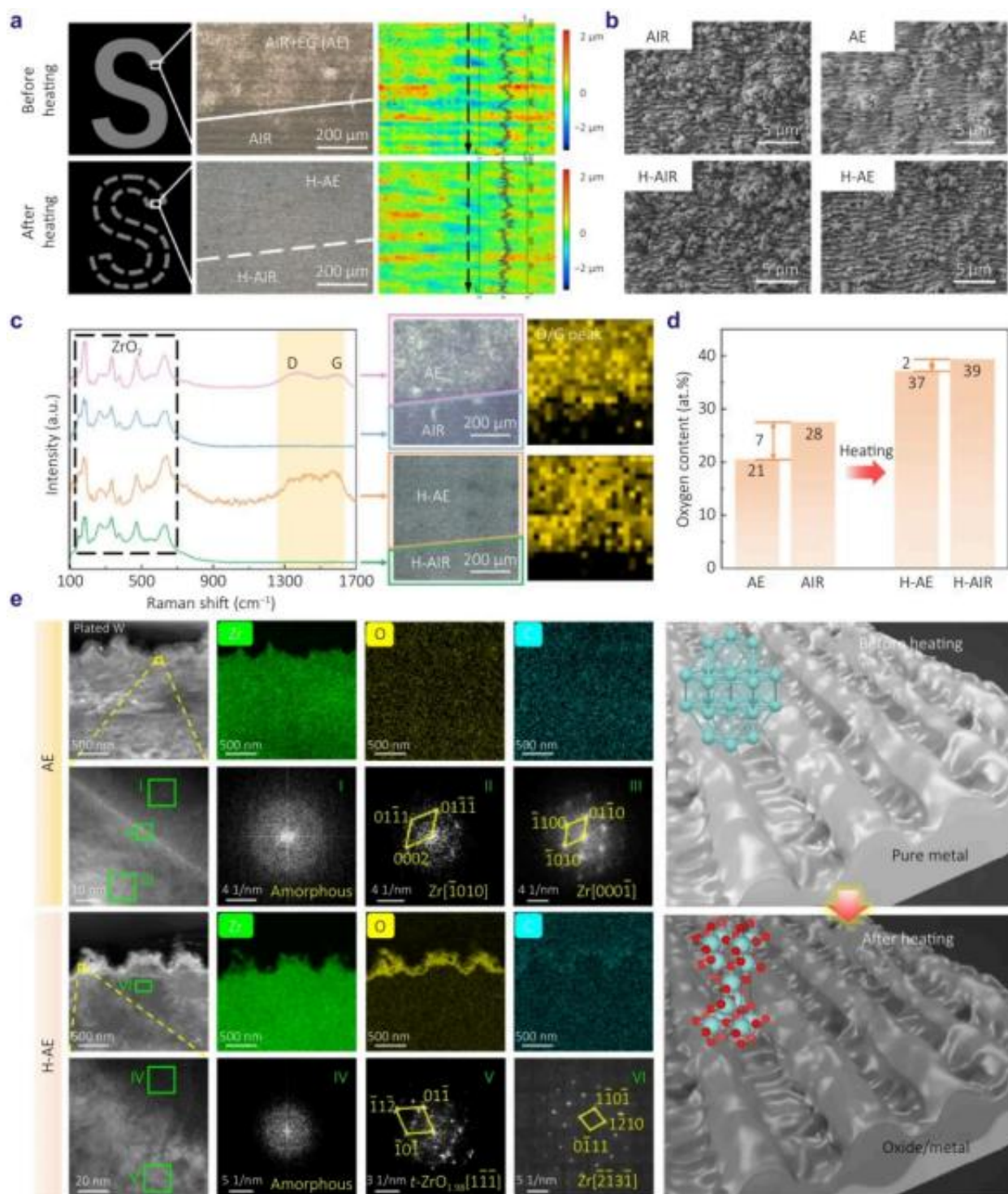


图4可见光波段信息可擦除特性的机理分析。(a)300 ° C加热前后被擦除信息区域/背景的光学及共聚焦轮廓图像 (AE : AIR + EG双环境复合加工区域 ; H-AIR : 加热后AIR区域 ; H-AE : 加热后AE区域) ; (b, c, d) AE/AIR区、 H-AE/ H-AIR区的扫描电镜图像、拉曼光谱、碳元素分布及EDS氧原子百分比 ; (e) AE区与H-AE区截面的透射电镜/能谱分析、高分辨透射电镜/选区电子衍射表征, 以及对应的结构示意与物相演变

研究团队简介

本研究依托上海交通大学材料学院激光加工与改性上海市重点实验室，由张东石副教授、李铸国教授共同指导完成，第一作者为蒋涵冕硕士研究生。团队长期致力于飞秒激光加工与材

料界面改性研究，重点关注激光直写多功能光学超表面开发，挖掘飞秒激光微纳加工在信息加密、红外伪装等领域的发展潜力，相关成果已在 Engineering, Opto-Electronic Advances、International Journal of Extreme Manufacturing 等期刊上发表。



长按识别此二维码，直达全文
来源：光电期刊

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