时间可编程着色加密

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41322.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！

时间可编程着色加密。 导读

光学信息加密技术凭借高维加密特性与抗量子计算破解等优势，在军事、通信及商业机密保护领域展现出独特应用价值。然而当前光学加密技术仍存在离散态切换机制导致的信息容量受限与安全防护瓶颈，以及潜在的信息残留泄露风险。针对上述问题，胡志勇/刘学青/蔡定平团队提出基于三维超结构的时序可编程色彩调制信息加密技术，通过控制环境折射率实现了广色域的光谱连续调谐，同时创新性地通过毛细力诱导的纳米柱不可逆坍塌，赋予加密载体物理自毁特性。实验验证表明，该技术可实现可见光波段内的光谱连续调控，并展示了在单一器件内完成四层独立信息的分级加密及读取后的信息自毁。该技术为信息加密的动态响应与信息安全销毁提供了创新解决方案，在军事机密传输、高端商业防伪等高保密需求场景中展现出重要应用潜力。相关研究成果以Time-Programmable Coloration via 3D Metastructures for Optical Encryption，为题发表于《Light: Science Applications》。

研究背景

随着信息时代发展，加密技术已成为军事通信、医疗隐私与商业机密等高保密场景的关键支撑。传统电子加密虽成熟，但依赖数学算法，面临量子计算威胁，且密钥管理易引入脆弱性。光学加密基于物理机制，可从原理上降低量子破译风险，并利用波长、偏振、相位等多自由度实现高维编码，提升安全性。微纳结构因可精确调控光场、无需染料且稳定环保，被视为理想光学加密载体，并具备多物理场响应潜力。然而现有动态光学加密多依赖单参数触发的二元颜色切换，信息容量受限且难抵御多参数暴力分析；同时读取后若载体不销毁，仍存在二次泄露风险。现有销毁方案常依赖化学反应或外部能量，受衬底与环境限制，并可能带来污染与毒性问题。因此，发展兼具连续色域调控、多维动态编码与自毁能力的新型加密技术，成为突破二元态瓶颈、构建高安全信息载体的核心挑战。

研究亮点

本研究提出一种几何参数精确编程的超结构结构色调控思路：通过对超原子关键几何参数进行精确设计，实现结构色在可见光范围内的可预测调谐，从而实现覆盖可见光范围的宽色域结构色输出（图1a）。实验结果表明，在同一材料与工艺体系下可实现高分辨率单色（图1b）与多色（图1c）器件打印，体现出良好的颜色一致性与可重复性，为后续信息编码提供基础。

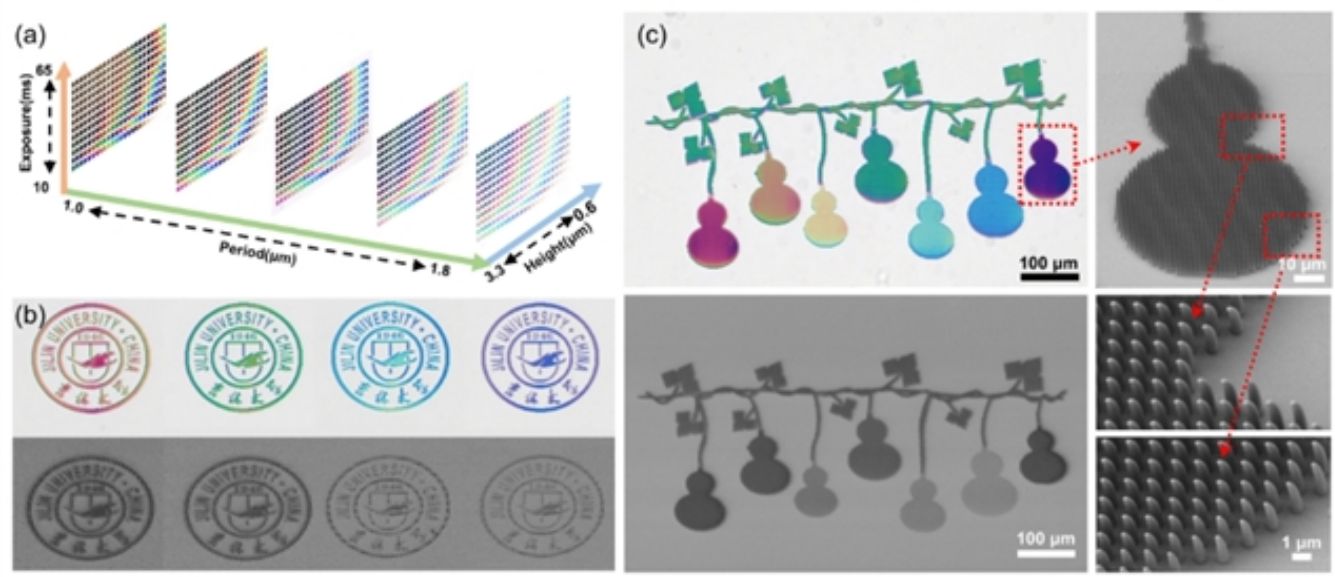


图1：(a) 不同周期，高度与曝光时间下的结构色3D调色板；(b) 单色结构色器件的光学显微镜及扫描电子显微镜(SEM)照片；(c) 多色结构色器件的光学显微镜及SEM照片。

在此基础上，研究团队提出一种面向结构色防伪标签的深度学习识别方案。如图2所示，将卷积神经网络用于自动提取结构色图案的颜色分布与空间纹理特征，可实现不同标签类别的快速判别。相比依赖人工阈值或单一特征的传统方法，该方案在复杂成像条件下具有更强的泛化能力。结果表明，在背景变化散焦旋转以及局部污染等干扰下仍能保持较高识别准确率，从而提升结构色标签在实际防伪场景中的可用性与可靠性。

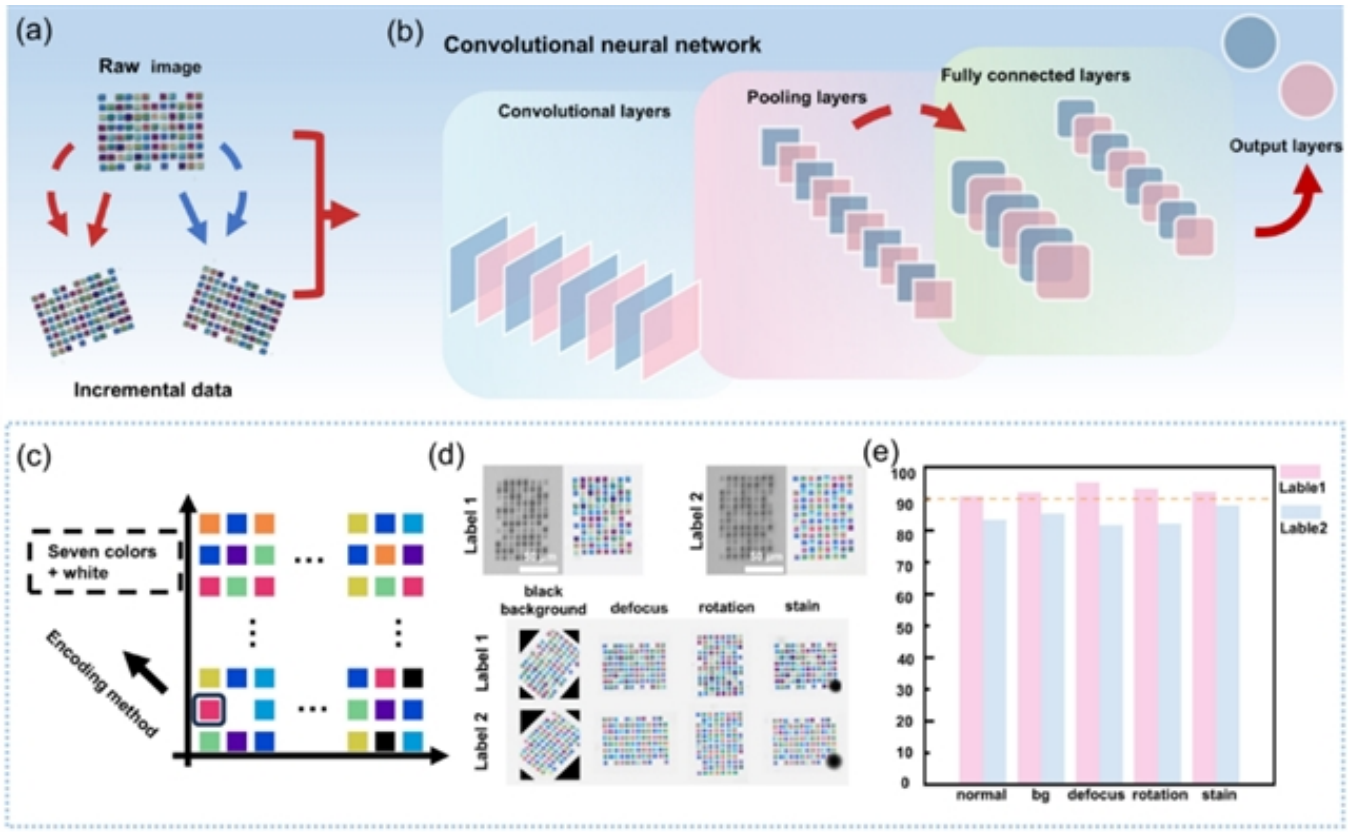


图2：(a) 基于结构色的防伪标签；(b)卷积神经网络的架构示意图 (c) 标签编码示意图 (d) 正常场景下标签的显微镜图和SEM图（上），在不同场景下标签的显微镜照片（下），包括黑色背景、虚焦、旋转和染色 (e) 未知标签的识别结果。

此外，通过调控环境液体折射率可实现超结构光谱响应连续变化，使结构色随时间按照预设过程演化，实现时序可编程的动态着色（图3）。进一步利用液体蒸发过程产生的毛细力诱导纳米结构发生不可逆塌陷，使载体在完成显示或读取后被永久改变，从而实现信息的不可逆擦除。该方法无需额外能量输入或复杂化学反应即可同时实现动态调控与擦除，降低读取后的残留泄露风险。

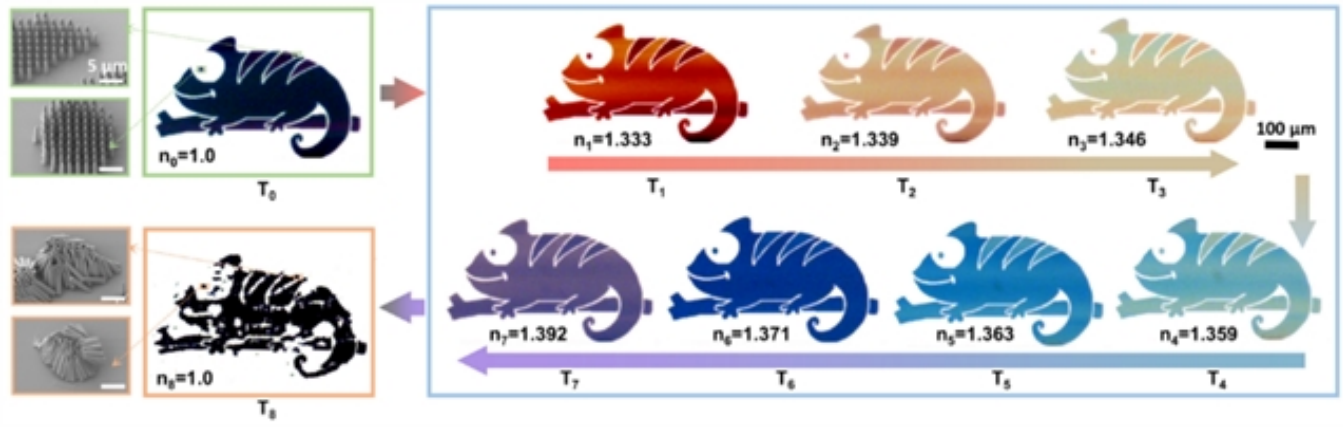


图3：变色龙图案在不同时间点（T0－T8）下的动态调色与自毁过程的光学显微图像。T0为空气中初始状态，T1－T7为颜色从红至紫的变化过程，T8为结构塌陷后的最终状态。左侧插图为T0

和T8时刻对应的SEM图像。

基于上述连续色域调控、时序编程与自毁特性，本文构建了一种多层信息加密与分步解码策略：如图4所示，不同时间窗口对应不同的解码结果，使同一载体可按步骤输出多组信息，从而显著扩展密钥空间与信息容量，并提高对暴力破解与多参数分析攻击的抵抗能力。与此同时，自毁擦除机制使载体在读取后不可逆失效，赋予加密系统阅后即焚的物理安全属性。该概念验证为高容量、高安全、可擦除的光学加密与防伪器件提供了新的设计范式。

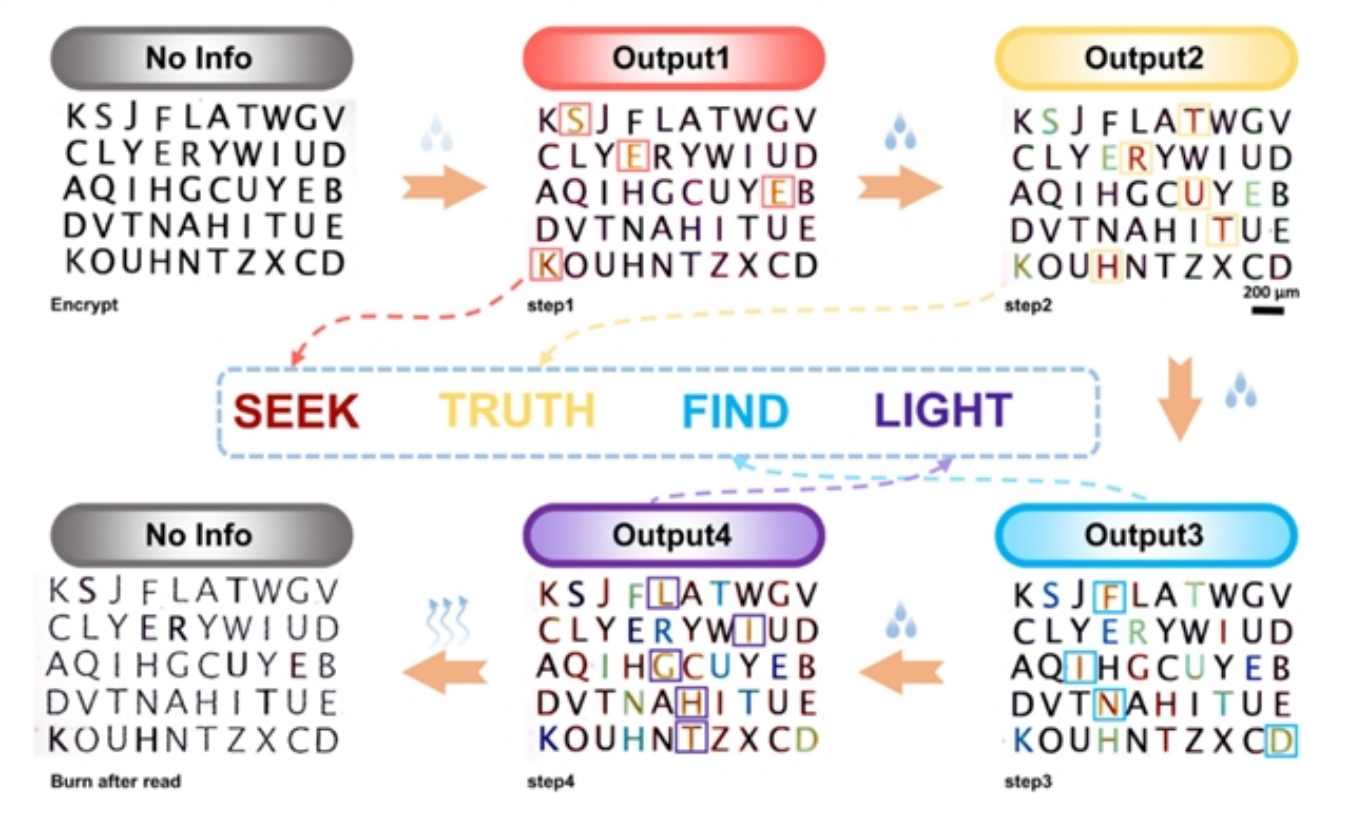


图4：多层结构色加密信息在不同解密步骤下的显微镜图像。包括初始状态、第一至第四层解密结果（Output1 – 4）以及结构自毁后的状态。

总结与展望

综上所述，本研究提出了一种基于三维超结构的高安全性光学信息加密策略，具备可动态调控与自毁功能。通过飞秒激光双光子聚合技术，实现了对亚波长尺度光子结构的高精度可控构建，所得结构色具备较广的色域覆盖率、高空间分辨率以及优异的长期稳定性和光稳定性。在环境折射率调控下，结构色可在可见光范围内实现连续光谱调谐，从而实现多个信息层在单一物理结构中的逐级解密。此外，研究引入了基于毛细力驱动的不可逆结构塌陷机制，实现了信息在读取后的物理性销毁，构建了阅后即焚的安全加密路径。通过概念验证展示了四层加密信息在折射率梯度作用下依次显现，并在溶液蒸发后不可逆销毁的全过程。本研究不仅扩展了光学加密系统的设计自由度，也为智能化、可编程、环境响应型光学安全技术的未来发展提供了新思路。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02202-y

作者：胡志勇等 来源：《光：科学与应用》

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