# Light
# 相变材料与水凝胶集成实现可逆光学数据存储与加密

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42874.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！*

**Light 相变材料与水凝胶集成实现可逆光学数据存储与加密。** 导读

传统超表面图像复用技术严苛依赖特定照明条件、制备成本高、加工通量低，难以满足大规模安全存储与防伪需求。近日，美国加州大学圣地亚哥分校团队提出一种相变材料与湿度响应水凝胶协同集成的新型混合光学平台，将激光直写三硫化二锑（Sb?S?）与叠氮基改性羧甲基纤维素（CMC-N?）水凝胶结合，首次实现湿度响应的全彩图像复用、可逆读写与多层信息加密。

该体系中，Sb?S?通过激光诱导非晶/晶态相变实现非易失性可重写数据存储，水凝胶则通过紫外可编程腔厚调制与湿度响应膨胀实现动态色彩切换。器件可在低湿（~40% RH）显示Sb?S?层编码信息，高湿（~85% RH）显示水凝胶层加密信息，切换完全可逆且无需辅助光学元件。该方案突破传统超表面的制备与应用限制，为安全数据存储、动态防伪显示与环境感知提供了低成本、可规模化的全新解决方案。

该研究成果发表于国际顶级期刊《Light: Science Applications》，美国加州大学Asad Nauman 与 Guli Gulinihali 为共同第一作者，Abdoulaye Ndao 为通讯作者。

研究背景

信息时代的爆发式增长对超高容量、高安全、长寿命存储技术提出迫切需求。光学存储凭借高密度、低成本优势，成为替代传统电子存储的重要方向，但受光学衍射极限限制，传统系统难以进一步提升存储密度。

近年来，超表面、结构色等纳米光子技术为高密度复用存储开辟新路，但现有方案仍存在明显短板：大多依赖窄带、偏振控制或角度特定激发，实际使用受限；普遍采用电子束光刻、聚焦离子束等高精度制备手段，成本高、通量低，难以规模化生产；同时多数器件缺乏动态全彩调制与可逆重写能力，使用寿命有限。

相变材料（如 Sb?S?）与水凝胶是可见光存储领域的理想候选材料：Sb?S?在可见光区具有高折射率对比度（$\Delta n \approx 1$）、环境稳定性好、光学损耗低；水凝胶可随湿度发生体积与折射率变化，实现动态光学响应。将二者优势结合，构建双独立可编程、全彩复用、环境响应的可逆光存储与加

密器件，成为解决现有技术瓶颈的关键方向。

创新研究

研究团队首先设计并制备了由25nmAg纳米岛、160nmCMC-N?水凝胶、20nmSb?S?相变薄膜组成的多层等离子体谐振腔结构，系统阐明了湿度驱动与相变调控协同的图像复用机制。Sb?S?作为光可重构相变介质，可通过527nm纳秒脉冲激光实现晶态到非晶态的信息写入，并利用连续波激光或热退火实现非晶态到晶态的信息擦除，依靠非晶相与晶相间显著的折射率对比度（Δn≈1）实现高反差光学信息刻印。CMC-N?水凝胶层通过紫外掩模光刻实现位置选择性交联，进而调控不同区域的溶胀率；顶部沉积的Ag纳米岛既保持不连续多孔结构，不阻碍水分子渗透与下层水凝胶溶胀，又支持宽波段局域表面等离子体共振（LSPR），增强电场局域与结构色饱和度。低湿条件下（RH~40%），水凝胶保持非溶胀态，谐振腔厚度均匀，Sb?S?层编码信息被清晰读取；高湿条件下（RH~85%），水凝胶因交联密度差异发生局域选择性溶胀，改变谐振腔光程，使CMC-N?层加密信息被解密显现，且这一湿度触发的光学信息存储与切换过程完全可逆。

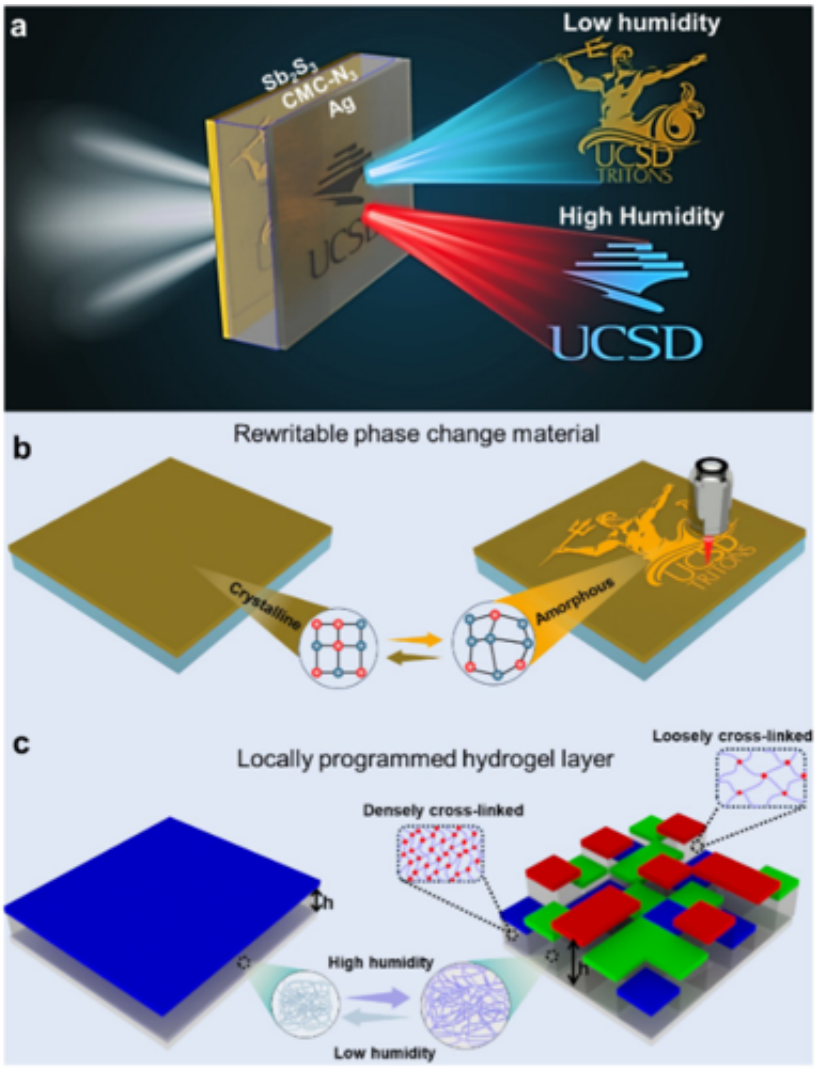



图1：复用光学信息存储器件结构与工作原理。

在此基础上，研究团队通过仿真与实验系统表征了该等离子体谐振腔的动态湿度响应光学特性。

在固定水凝胶厚度下，分别测试Sb?S?处于非晶与晶态时，相对湿度由40%升至80%的透射光谱与结构色变化，实验结果与仿真高度吻合。水凝胶吸湿后折射率降低引发谐振峰蓝移，而厚度膨胀引发谐振峰红移，其中厚度变化主导整体光程调制，最终净光谱随湿度升高呈红移趋势。该器件具备快速且可逆的光学调谐性能，吸湿响应时间为344 ms，脱湿恢复时间为283ms；经过30次湿度循环测试，器件仍保持稳定工作性能，无明显衰减，共价键形成的交联点在反复溶胀－退溶胀过程中展现出优异稳定性。同时，Sb?S?在非晶/晶态间的相变带来显著折射率差异，在相同水凝胶厚度下即可产生明显光谱偏移，为双模态信息编码提供支撑。

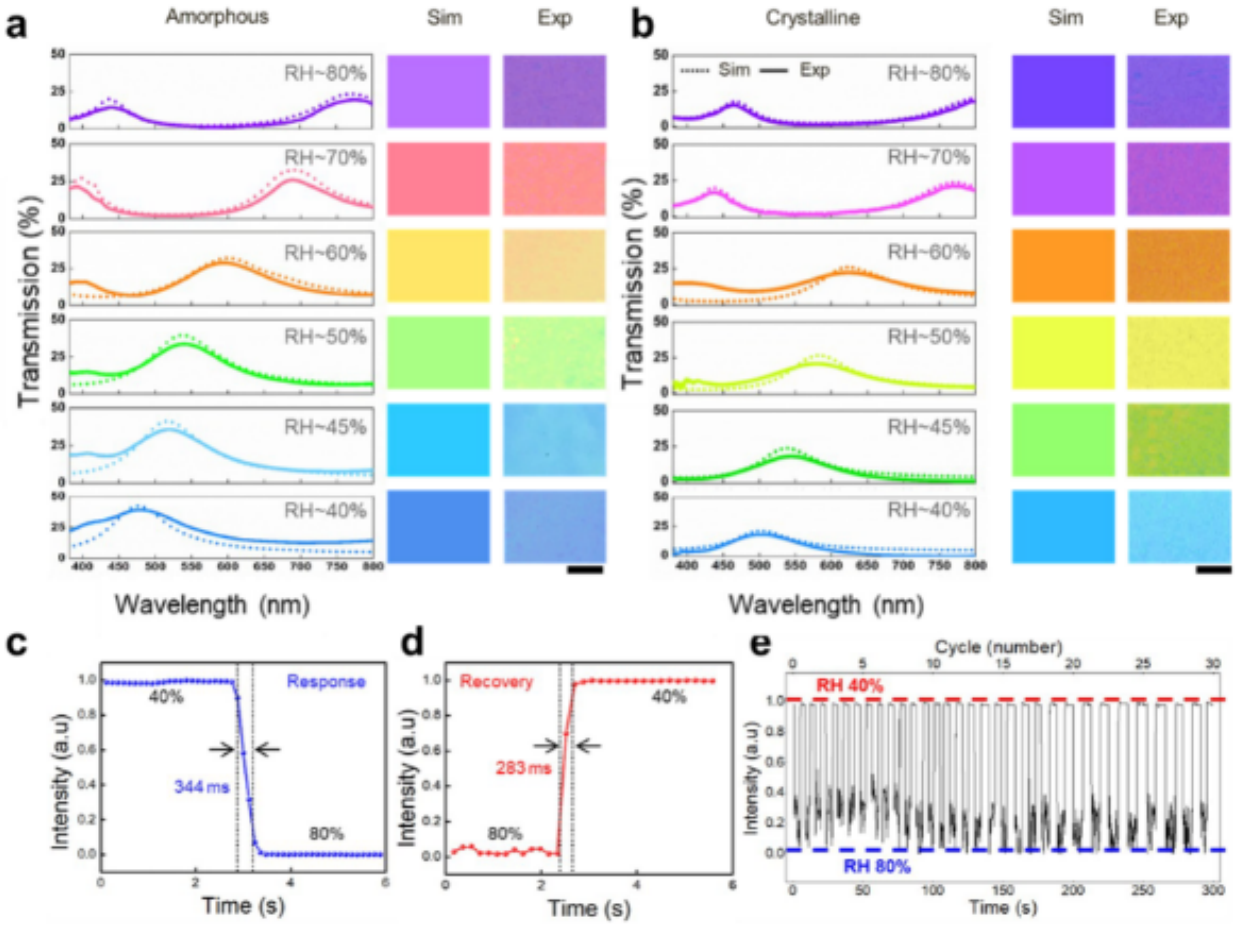



图2：等离子体谐振腔的光学响应特性。

进一步，研究实现了基于Sb?S?激光直写的动态全彩可重写显示功能。通过聚焦纳秒脉冲激光在Sb?S?层实现空间分辨的折射率调制，将UCSDOPTICS等光学信息独立编码，每个编码区域均可视为独立等离子体谐振腔，其光学共振由Sb?S?相态与水凝胶溶胀厚度共同调控。随着湿度变化，谐振条件随之改变，编码图案呈现由蓝到红的动态色彩连续转变。激光写入与擦除的焦斑精准聚焦于Sb?S?层，上层水凝胶因离焦受到的光热影响极低，在相变层多次写入－擦除操作后，水凝胶的紫外图案化结构未出现可见变化，实现了相变光存储与水凝胶动态调控的良好兼容。

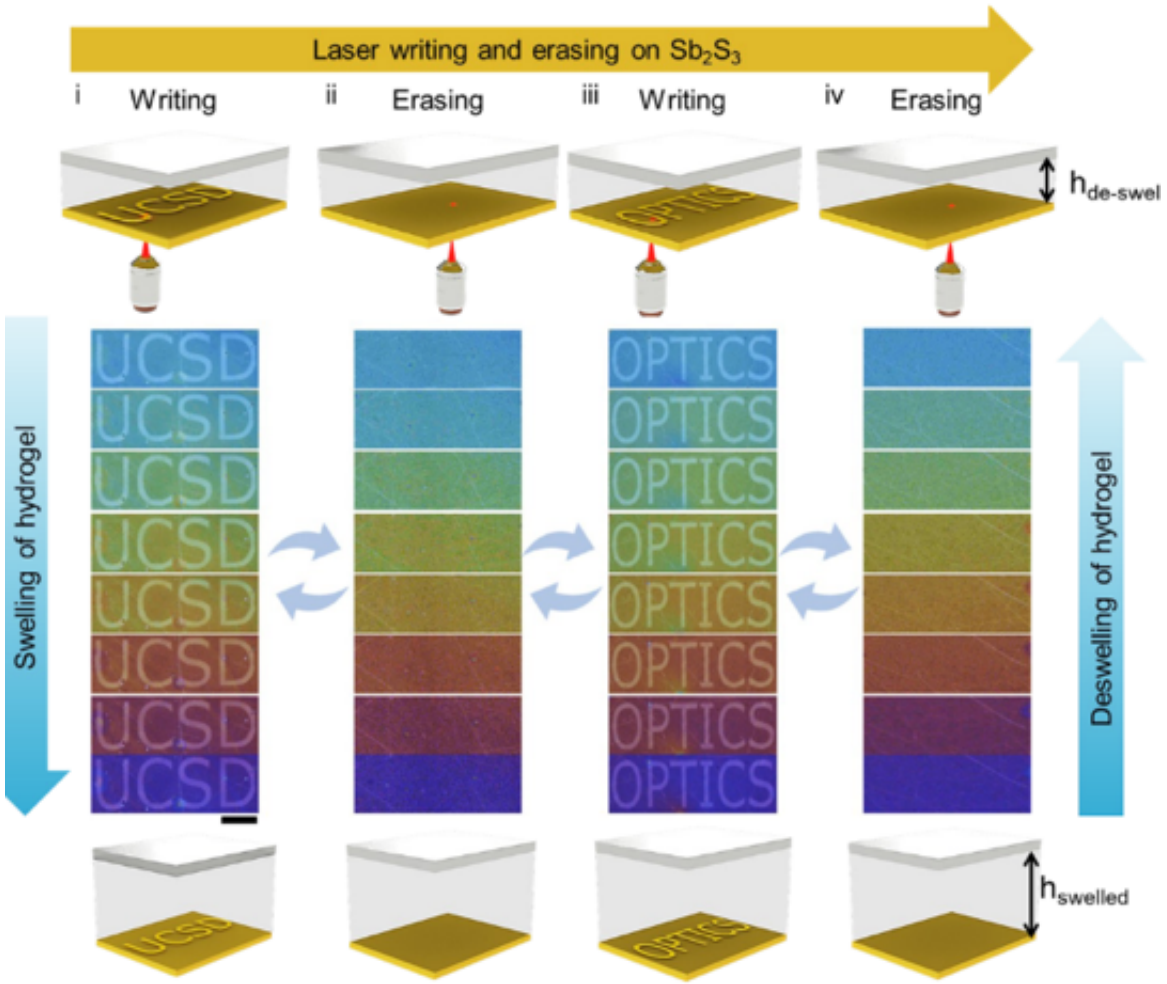



图3：湿度响应动态全彩可重写显示。

最后，团队利用Sb?S?与CMC-N?的独立可编程特性，实现了面向防伪显示与光存储的动态多层信息加密。在Sb?S?层通过激光扫描刻印UCSDTriton标识与二维码信息，在CMC-N?层通过紫外掩模刻印UCSD图书馆标识与另一组二维码信息。湿度40%时，仅Sb?S?层信息可清晰读取；湿度升至60%，两组信息开始重叠显现；湿度85%时，CMC-N?层加密信息完全解密；湿度接近饱和（95%）时，水凝胶过度溶胀导致信息失真。该器件实现了3μm的高像素分辨率（8467PPI），可兼容紫外纳米压印等先进加工技术，在未封装的环境条件下放置四个月，图案仍保持稳定，仅因Ag纳米岛氧化出现轻微色彩衰减。

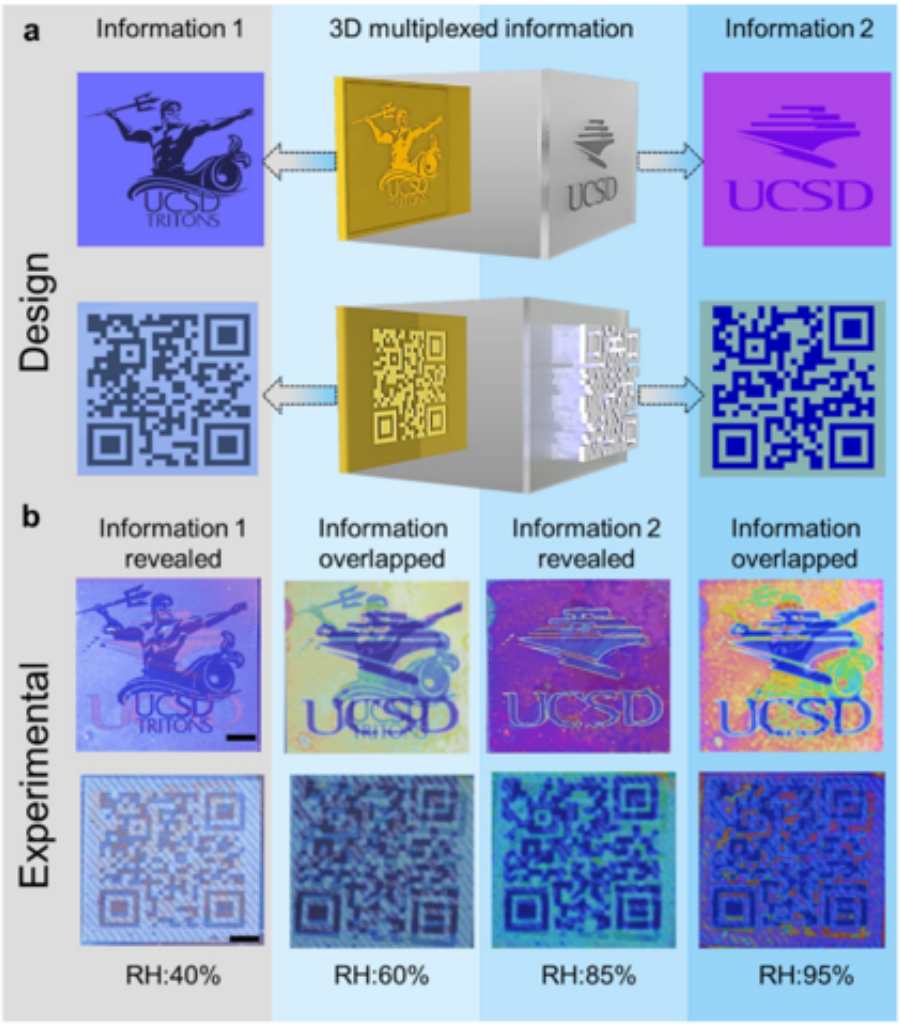



图4：面向防伪显示与光存储的动态图像转换。

总结与展望

本研究通过将相变材料Sb?S?与湿度响应型CMC-N?水凝胶高效集成，首次构建出可在室温、环境白光下工作的全彩复用、可逆切换、可重写透射式光学存储与加密器件，突破了传统超表面方案对窄带、偏振、角度选择性激发的严苛依赖，摆脱了电子束光刻等高成本制备工艺限制。与传统光学存储相比，该平台实现了双功能层独立可编程：Sb?S?层提供激光可擦写的非易失性光存储，水凝胶层提供紫外图案化与湿度驱动的动态显色与信息加密，二者协同实现了同一空间内的多级信息复用与可逆读取。

展望未来，这一集成策略可进一步向多层水凝胶堆叠、多响应模式协同、更高分辨率纳米结构方向拓展。通过引入动态超分子交联或光可切割交联剂，可实现水凝胶层的二次擦写与图案重构；结合湿度、温度、pH等多维度响应体系，能够构建更高级别的多物理场加密与防伪标签。借助紫外纳米压印、卷对卷等规模化工艺，该技术可直接应用于动态防伪标识、可重复光学纸、环境感知显示与多维安全数据存储等场景。随着结构设计与材料体系的持续优化，这种相变水凝胶协同集成平台有望成为下一代柔性、低功耗、高速响应光存储与光加密器件的主流技术方案，推动全光信息处理向更实用化、集成化方向迈进。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02330-5

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：Abdoulaye Ndao 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