水分与BHT协同策略实现钙钛矿超低ASE阈值

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42326.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！

水分与BHT协同策略实现钙钛矿超低ASE阈值。 导读

片上集成光子学的飞速发展，对微纳激光的小型化、低功耗与高稳定性提出了严苛要求。钙钛矿材料凭借优异的光电性能、可调带隙及高光学增益系数，成为微纳激光领域极具潜力的增益介质，但环境稳定性差（尤其易受水分降解）的痛点长期制约其产业化进程。令人意外的是，水分对钙钛矿并非 全然有害——适量水分可促进结晶，却因作用窗口极窄难以控制。近日，重庆师范大学张丁可教授与东北师范大学付申成教授联合攻关，提出水分与二丁基羟基甲苯（BHT）协同调控策略，成功制备出低缺陷密度的甲脒铅碘（MAPbI3）钙钛矿薄膜。该薄膜在纳秒脉冲激光激发下实现8.987 μJ cm-2
的超低放大自发辐射（ASE）阈值，同时在室温环境下存储30天后，ASE
强度仍保持100%，实现效率与稳定性的双重突破。相关研究成果以Break-through Amplified Spontaneous Emission with Ultra-low Threshold in Perovskite via Synergetic Moisture and BHT Dual Strategies，为题发表于《Light: Science Applications》,重庆师范大学为第一单位，重庆师范大学张丁可教授为第一作者及通讯作者，东北师范大学付申成教授为共同通讯作者。

研究背景

微纳激光作为片上集成光子系统的核心组件，凭借微米级尺寸、高光束质量、窄发射线宽及低功耗等优势，在光通信、量子计算、自动驾驶等新兴领域不可或缺。寻找兼具高光学增益与稳定性能的增益介质，是微纳激光技术突破的关键。钙钛矿材料的出现为这一难题提供了新解法，这类材料不仅具有平衡的双极性电荷传输特性、宽范围可调带隙，其光学增益系数更是远超传统半导体材料，被认为是实现电泵浦激光的理想候选者。然而，钙钛矿薄膜的环境稳定性问题始终是致命短板——水分极易沿晶界侵入，导致其分解为碘化铅（PbI2），造成器件性能急剧衰减。添加剂工程是优化钙钛矿性能的常用手段，BHT 作为一种具有低酚氢键解离能的抗氧化剂，已被证实可调控前驱体化学性质、抑制降解中间路径。但单一添加剂策略无法充分发挥水分对结晶的促进作用，难以实现钙钛矿激光性能的极限突破。如何精准调控水分作用、协同添加剂优势，同时解决缺陷抑制与稳定性提升的双重难题，成为钙钛矿微纳激光领域亟待攻克的核心课题。

研究亮点

1. BHT 优化：奠定高质量薄膜基础

研究团队首先系统探究了不同浓度 BHT 对 MAPbI3薄膜质量与 ASE
性能的影响。结果表明，添加4 wt% BHT 样品呈现出高度致密的晶粒结构，平均晶粒尺寸达到更

大，晶界密度，降低缺陷浓度，为光生载流子的传输与积累提供有利条件。同时4 wt% BHT样品的表面粗糙度仅为7.27 nm，远低于原始薄膜的15.2 nm，表明优化浓度的 BHT能有效提升薄膜平整度。ASE 性能测试中，4 wt% BHT 样品表现更为优异：ASE阈值从原始薄膜的 56.88 μJ cm-2 降至 37.34 μJ cm-2，同时净增益提升至更高水平，损耗因子显著降低。更重要的是，BHT的抗氧化性与疏水性赋予薄膜出色的环境稳定性，30天室温存储后，原始薄膜 ASE 强度仅剩5.8% 且明显降解，而 4 wt% BHT 样品 ASE 强度保持 100%。

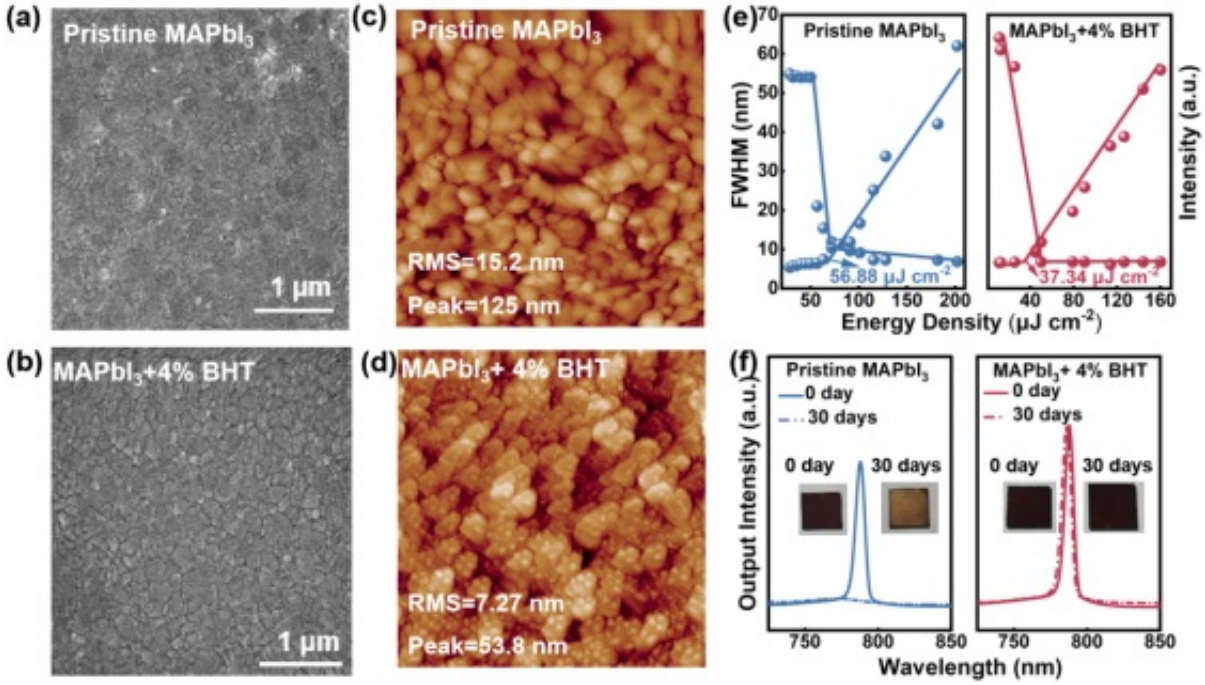


图1: MAPbI?+4% BHT 薄膜与原始MAPbI?薄膜形貌（a-d）及ASE性能（e-f）对比

2. 水分与BHT调控双策略协同：超低 ASE 阈值

研究团队进一步探索了湿度处理对薄膜性能的协同提升效应。实验发现，95% RH相对湿度环境中，无 BHT 的原始薄膜因水分过量降解导致 ASE 强度急剧下降，而MAPbI?+4% BHT 薄膜的 ASE 强度不仅未衰减，反而随处理时间延长持续提升 ——95% RH处理30分钟后，ASE 强度达到初始值的1.7倍。这一现象背后，是 BHT的疏水性延长了水分与钙钛矿的作用时间，使水分从 降解剂 转变为 结晶调控剂。经 95% RH处理30分钟的 冠军薄膜，ASE 性能实现全面跃升：阈值进一步降至 8.987 μJ cm-2，为当前纳秒脉冲激光激发下的最低报道值。即便在飞秒脉冲激发下，该薄膜的 ASE阈值也低至 7.11 μJ cm-2，达到同类研究先进水平。

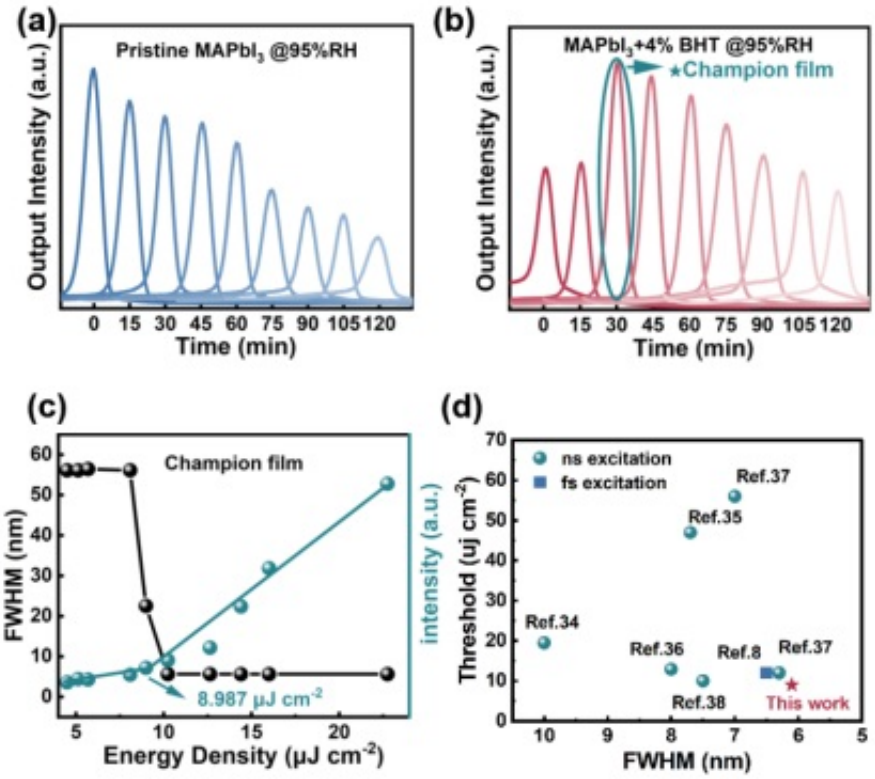


图2: （a-b）冠军薄膜与原始MAPbI3薄膜形貌在不同湿度处理时间下ASE性能对比，（c）冠军薄膜ASE阈值及（d）与其他报道ASE阈值对比

3. 微观机制揭秘：结构 - 性能的构效关系

瞬态吸收光谱显示，冠军薄膜
的平均载流子寿命延长11%，表明非辐射复合得到有效抑制。变温光致发光光谱表明，冠军薄膜的激子结合能显著提高，加速了载流子辐射复合过程，促进在低载流子浓度下实现粒子数反转，为超低阈值激光发射提供了关键支撑。且 冠军薄膜
呈现致密排列的大晶粒结构，横截面为单片垂直堆积的形貌，晶界数量显著减少
，有效降低载流子传输中的散射损耗与陷阱态复合损耗。另外冠军薄膜 中（110）晶面的垂直取向比例远高于原始薄膜，这种择优取向与光子传播方向一致，进一步优化了光传输效率。
X射线光电子能谱与核磁共振分析揭示了核心机制：BHT 的疏水性如同 交联网络，延缓水分侵入速率，延长水分与钙钛矿的作用时间；水分则通过氢键与甲基碘化铵（MAI）相互作用，促进有机阳离子（MA?）的垂直扩散，使钙钛矿结晶位点均匀分布于整个薄膜，最终形成大尺寸、高取向的优质晶体，从而提升材料ASE性能。

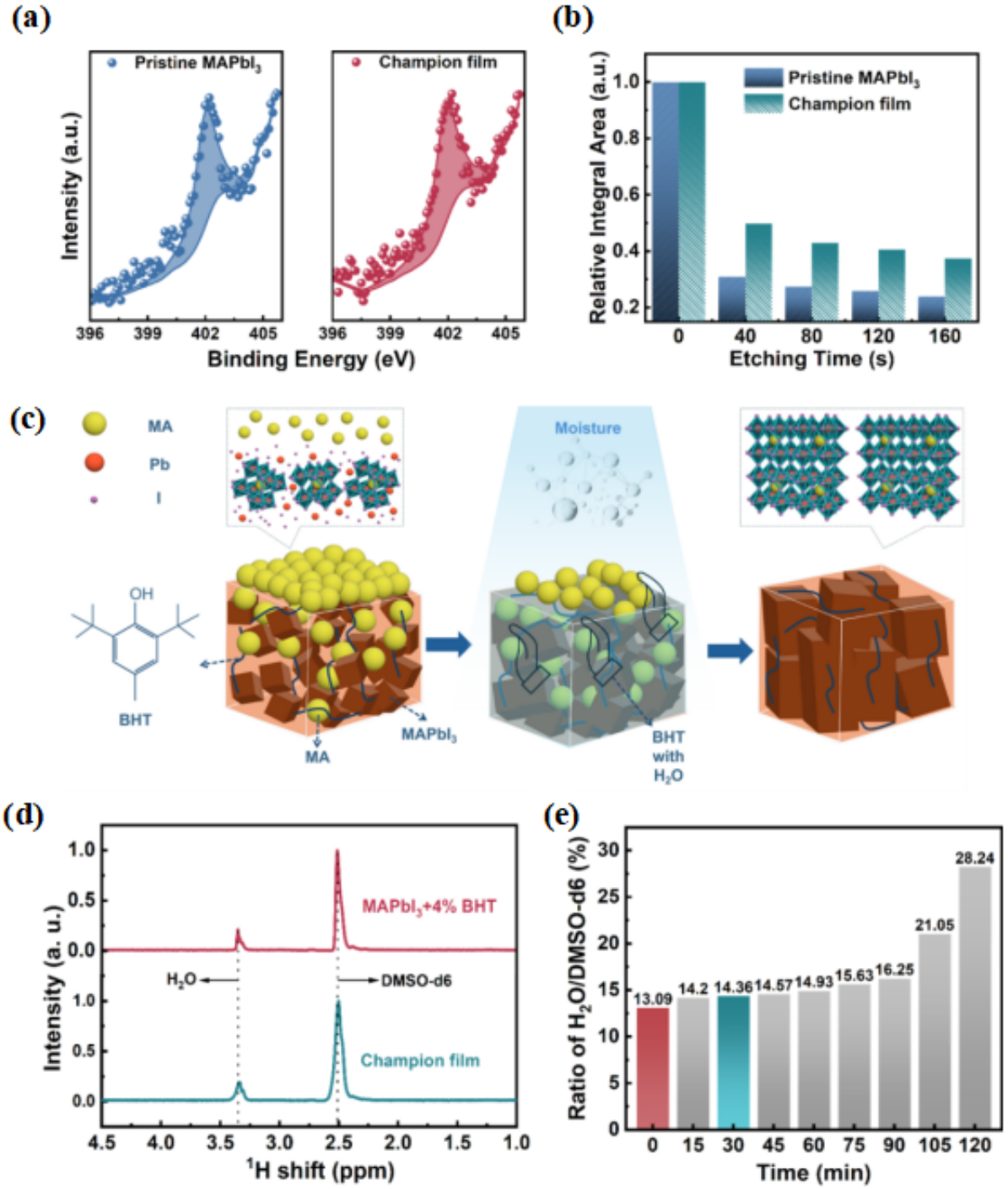


图3: （a-b）冠军薄膜与原始薄膜X射线光电子能谱对比图，（c）BHT 交联网络，延缓水分侵入速率，提升结晶质量示意图，（d-e）冠军薄膜与原始薄膜核磁共振谱对比图

总结与展望

本研究的核心创新在于打破了 水分是钙钛矿天敌 的传统认知，通过水分与 BHT 的协同调控策略，将水分从性能破坏者转变为结晶促进剂，同时解决了钙钛矿激光 低阈值 与 高稳定性 难以兼得的核心矛盾。4 wt% BHT 与 95% RH 的优化组合，不仅实现了8.987 μJ cm-2的超低 ASE 阈值，更达成了30天室温存储 ASE 强度100%保留的稳定性能，为钙钛矿激光的

实用化提供了全新范式。该策略的普适性与可扩展性同样值得关注：BHT 的疏水与抗氧化特性可推广至其他钙钛矿体系。未来，随着电泵浦技术的进一步突破，该类优质钙钛矿薄膜有望应用于片上集成激光器件、微型激光传感器、高清激光显示等领域，推动光子学技术向小型化、低功耗、高稳定性方向迈进。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-02171-8

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：张丁可等 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