

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 $\mu\text{J cm}^{-2}$ 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 $\mu\text{J cm}^{-2}$ 降至 37.34 $\mu\text{J cm}^{-2}$ ，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%。

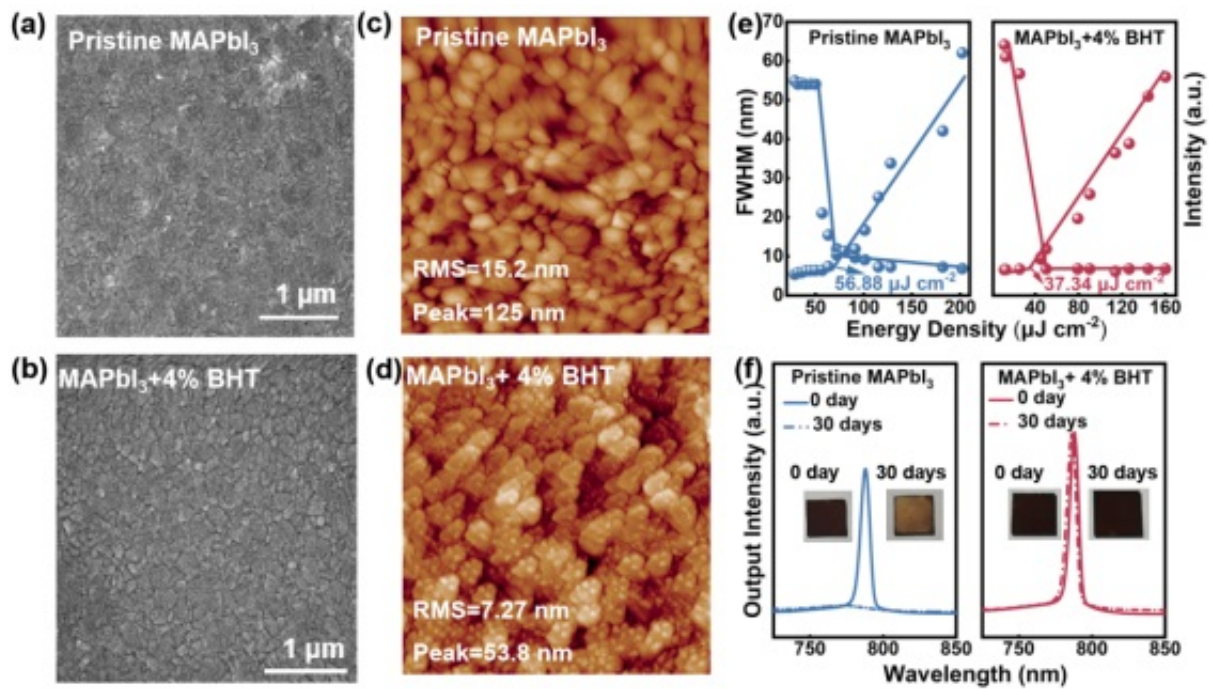


图1: MAPbI₃+4% BHT 薄膜与原始MAPbI₃薄膜形貌 (a-d) 及ASE性能 (e-f) 对比

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 MAPbI₃+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 $\mu\text{J cm}^{-2}$ ，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 $\mu\text{J cm}^{-2}$ ，达到同类研究先进水平。

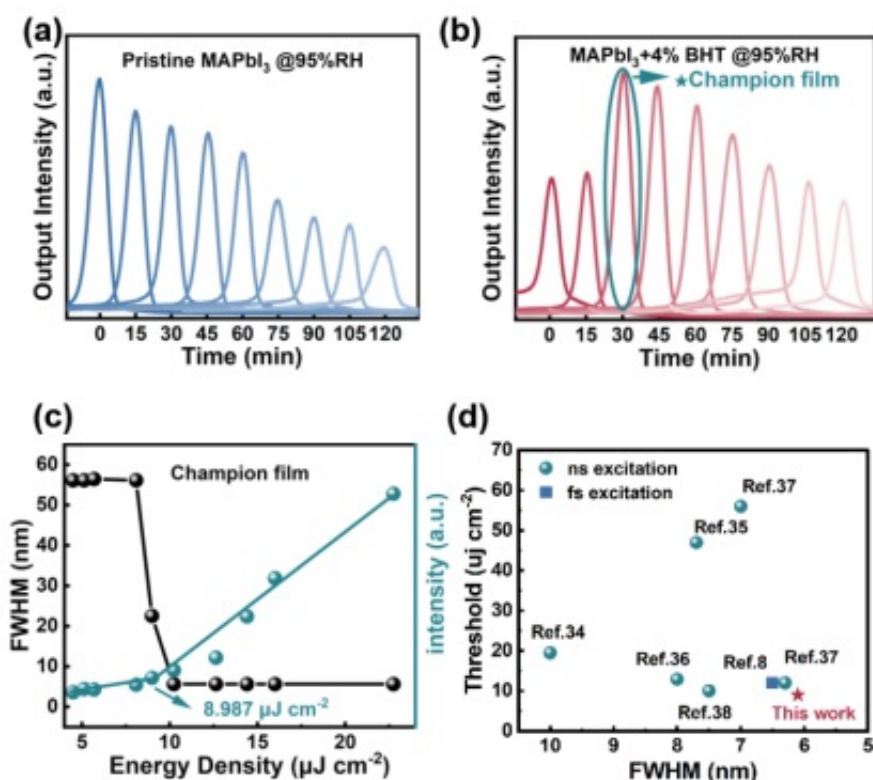


图2: (a-b) 冠军薄膜与原始MAPbI₃薄膜形貌在不同湿度处理时间下ASE性能对比, (c) 冠军薄膜ASE阈值及 (d) 与其他报道ASE阈值对比

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 $8.987 \mu\text{J cm}^{-2}$ 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事宜, 请与我们联系。

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/>

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发