

文章编号 1004-924X(2026)08-1245-10

MAPbBr₃量子点微薄膜喷印工艺调控特性研究

姜佳昕¹, 董佳波¹, 程翔², 陈华坛¹, 郑高峰^{2*}, 李文望^{1*}

(1. 厦门理工学院机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361102)

摘要: 钙钛矿量子点薄膜在先进显示与照明技术等领域展现出巨大应用潜力。然而, 由于电液耦合喷印过程易受环境因素干扰, 产生喷印稳定性差、液滴直径不均等问题, 限制了量子点微薄膜的规模化阵列制备。本文建立了环境相对湿度对喷印 MAPbBr₃ 量子点微薄膜直径和喷射稳定性的调控方法, 考察了环境相对湿度和施加电压对喷印薄膜直径以及射流流变过程的作用规律。实验结果表明, 在环境相对湿度 50%~75%、施加电压 2.0 kV 条件下, 可实现 MAPbBr₃ 量子点微薄膜的稳定喷印。随着环境相对湿度从 55% 增加到 70% 时, 喷印的 MAPbBr₃ 量子点微薄膜平均直径从 198 μm 减小至 134 μm, 且 CV 值低于 0.1。当环境相对湿度提升至 75%, 在施加电压 2.3 kV 条件下, 喷印的 MAPbBr₃ 量子点微薄膜平均直径可进一步减小至 69 μm。MAPbBr₃ 量子点微薄膜喷印质量的调控规律研究有助于提高钙钛矿量子点薄膜阵列的规模制造水平。

关键词: 电液耦合喷印; 钙钛矿量子点; 环境湿度; 液滴喷射; 薄膜沉积

中图分类号: TB43; O361.4 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20263408. 1245

CSTR: 32169. 14. OPE. 20263408. 1245

Study on regulation characteristics of printing MAPbBr₃ quantum dot micro-films

JIANG Jiaxin¹, DONG Jiabo¹, CHENG Xiang², CHEN Huatan¹, ZHENG Gaofeng^{2*}, LI Wenwang^{1*}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

* Corresponding author, E-mail: zheng_gf@xmu.edu.cn; xmlww@xmut.edu.cn

Abstract: Perovskite quantum dot films demonstrate significant application potential in advanced display and lighting technologies. However, the electrohydrodynamic printing process was susceptible to environmental interference, resulting in poor printing stability and non-uniform droplet diameters, which limited the scalable array fabrication of quantum dot micro-films. In this study, a regulation method of ambient relative humidity on the diameter and ejection stability of printed MAPbBr₃ quantum dot micro-films was con-

收稿日期: 2026-02-09; 修订日期: 2026-03-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52405632, No. 52275575); 厦门市自然科学基金 (No. 3502Z202372051, No. 3502Z202373025); 厦门市科技计划项目 (NO. 3502Z20254001); 泉州市“揭榜挂帅”科技重大专项项目 (No. 2025QZGZ07)

structed, and the effects of ambient relative humidity and applied voltage on the printed film diameter as well as the jet rheological process were investigated. Experimental results indicated that stable printing of MAPbBr₃ quantum dot micro-films could be achieved under conditions of ambient relative humidity of 50%–75% and applied voltage of 2.0 kV. As the ambient relative humidity increased from 55% to 70%, the average diameter of the printed MAPbBr₃ quantum dot micro-films was reduced from 198 μm to 134 μm, with CV values below 0.1. When the ambient relative humidity was increased to 75% under an applied voltage of 2.3 kV, the average diameter of the printed MAPbBr₃ quantum dot micro-films could be further reduced to 69 μm. The regulation mechanism on the printing quality of MAPbBr₃ quantum dot micro-films is beneficial for enhancing the large-scale fabrication level of perovskite quantum dot film arrays.

Key words: electrohydrodynamic printing; perovskite quantum dots; ambient humidity; droplet ejection; thin film deposition

1 引言

量子点薄膜以其窄发射线宽、高量子产率以及优异的色彩纯度成为高分辨率全彩微发光二极管(Micro-LED)显示器的核心材料^[1-2]。此外,其在灵活性、可弯曲性、环境稳定性、低毒性绿色合成途径以及与微纳米制造工艺兼容性等方面具有显著优势,为广色域、高亮度显示系统开发提供了坚实的材料与技术基础^[3-4]。大面积量子点薄膜常用制备工艺包括旋涂^[5]、激光直写^[6]、电泳沉积^[7]、光刻^[8]和喷墨打印^[9]等,但是这些方法通常存在薄膜厚度精确控制困难、图案分辨率受限、对环境因素敏感^[10]、薄膜均匀性和重复性差,以及无法实现纳米级精度与多材料同步加工等问题,从而限制了其在高精度柔性电子器件制造中的应用^[11-12]。

电液耦合喷印作为一种高效量子点薄膜精确成型制造技术^[13-14],可满足高分辨率全彩显示需求,避免传统工艺的污染问题。Zhu 等人^[15]通过优化卤素钙钛矿墨水组分以及喷印参数,实现了 5 μm 高分辨率全彩图案化薄膜制备。Cohen 等人^[16]首次在亚微米尺度上实现了钙钛矿纳米晶体在纳米光子腔上的精确定位,喷印后晶体结构完好且成功与光子腔模($Q \approx 1\ 000$)耦合。Chen 等人^[17]通过实时监测微电流信号分析了核壳液滴的形成行为,为高精度微液滴制备提供了有效调控手段。目前,调控微液滴成型结构大多是通过溶液体系优化实现的。Heindl 等人^[18]通过引入配体辅助结晶 MAPbBr₃量子点成核过程,可使光致发光量子产率提高 7 倍至 7.3%。李恭

明等人^[19]采用 2-己基癸酸(DA)配体替代传统油酸(OA)配体,通过配体辅助再沉积技术成功制备了高性能 MAPbBr₃量子点。不仅将光致发光量子产率从 72.3% 提升至 87.8%,更显著增强了材料的环境稳定性。Singh 等人^[20]采用低温反溶剂策略,在 16 °C 开放环境中可控合成 3 nm 蓝色 CsPbBr₃量子点,光致发光量子产率由 67% 提升至 87%,且 44 天内性能稳定。鲁思宇等人^[21]将碳量子点(CQDs)引入聚合物分散液晶(PDLC)体系,系统研究了掺杂对复合材料形貌、介电特性及电光性能的影响,通过曝光强度优化散射性能以增强荧光发射,荧光强度峰值提升约 130%。Shen 等人^[22]通过研究采用反溶剂蒸汽辅助结晶法(AVC)生长 MAPbBr₃单晶,通过调节溶液浓度和稀释反溶剂优化工艺,获得 9×9×3 mm³的立方结构单晶。陈逸群等人^[23]通过引入苯乙基溴化铵(PEABr)界面修饰层,优化喷墨打印钙钛矿量子点发光二极管(PeLED)性能。PEABr 层有效平衡载流子传输、抑制咖啡环效应、钝化量子点缺陷,显著提升薄膜质量,器件稳定性提升超 6 倍。

作为一种多物理场耦合的增材制造技术,可通过改变控制参数与环境条件实现电液耦合喷印微结构的调控。You 等人^[24]通过改变电压参数抑制了射流不稳定鞭动现象并提高了沉积精度。系统研究了电压和电极平移速度对有效控制近场直写射流轨迹的空间范围及纤维形态的影响,实现了复杂二维图案的可控制备。Luo 等人^[25]通过调节施加电压,在低温下制备出大面积有机-无机杂交钙钛矿铁电薄膜,晶体度可达

80.35%,压电系数提升5.8倍。基于该薄膜的柔性纳米发生器在20万次弯曲循环后仍能保持稳定输出。康国毅等人^[26]制备了银氨络合无颗粒直写溶液,通过将温度控制在50℃进行低温烧结制备出致密银纤维,电阻低至365Ω/mm,且可通过自堆叠调控阻值。环境相对湿度对于喷印微纳结构形貌具有显著影响。Park等人^[27]研究了相对湿度对再生纤维蛋白甲酸溶液电离心性能的影响,发现随着相对湿度(20%~60%)的增加,纤维的可纺性下降,具体表现为最大纺丝速率降低、珠串增加以及纤维直径减小。Szewczyk等人^[28]研究发现,相对湿度的改变会调节溶剂挥发、电荷耗散和相分离过程,从而显著影响纤维直径、表面形态、机械性能和结晶行为。高湿度通常促进多孔或粗糙结构形成。但过高的湿度会导致射流喷射不稳定以及串珠缺陷产生。然而,对于电液耦合喷印微薄膜成型过程中相对湿度调控机制仍不明确,限制了高一一致性、高产率钙钛矿量子点薄膜的规模化制备。

本文建立了环境相对湿度对喷印MAPbBr₃量子点微薄膜直径和喷射稳定性的调控方法,讨论了环境相对湿度和施加电压对微薄膜直径和喷印稳定性的影响,实现了MAPbBr₃量子点微薄膜阵列可控成型,为优化钙钛矿量子点薄膜喷印工艺提供了技术基础。

2 实验

2.1 实验材料

实验采用0.1 mol/L MAPbBr₃溶液制备量子点微薄膜阵列。利用高精度电子天平(Practum 124-1CN, Sartorius, 德国)来称量溶质重量。按摩尔比1:1称取367 mg 溴化铅(PbBr₂)和112 mg 溴化甲铵(MABr),将二者混合于10 mL N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中。将混合溶液置于磁力搅拌器(MS7-H550-Pro, 大龙兴创实验仪器(北京)股份公司, 中国)上,在室温条件下搅拌14小时,直至溶质完全溶解,得到澄清的MAPbBr₃溶液。

2.2 实验系统

电液耦合喷印系统示意图如图1所示。注射泵(Pump 11 Elite, Harvard Apparatus, 美国)将MAPbBr₃溶液输送至针头(内径0.06 mm, 外径

0.18 mm)。针头与高压电源(DW-P503-4ACD2, 东文高压电源有限公司, 中国)相连以提供喷印所需电场,针尖正下方放置硅片作为收集板,收集板接地以克服电荷积累效应。收集板固定于X-Y移动平台(XMS-100-S, Newport, 美国)上,可通过上位机控制运动轨迹与运动速度。实验过程中,收集板移动速度为10 mm/s,注射泵供液速度为10 μL/h,喷头与基板间的相对高度为2 mm。逐步升高电压直到喷印过程达到稳定状态。通过加湿器(BE-J008, 中山市樱满电器有限公司, 中国)和除湿机(DY-6138EB, 宁波德业家用电器科技有限公司, 中国)控制环境相对湿度。所有实验均在室温24~26℃环境下进行。

采用黏度计(NDJ-1-5S-8S, 上海力辰邦西仪器科技有限公司, 中国)测量喷印溶液黏度,在25℃下0.1 mol/L MAPbBr₃溶液黏度为0.89 mPa·s。采用荧光显微镜(SW703-FL, 厦门阳一科技有限公司, 中国)观测喷印量子点薄膜形貌。利用高速摄像机(Phantom Miro M110, Phantom, 美国)记录液滴喷射过程。温湿度计(JB913A, 广东美德时仪器有限公司, 中国)用于监测和记录实验环境温湿度参数。

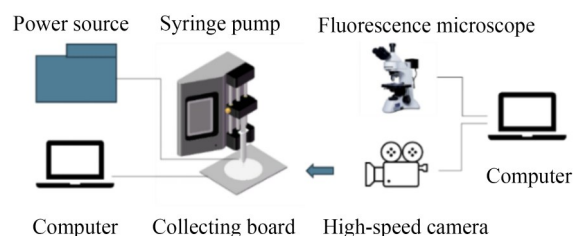


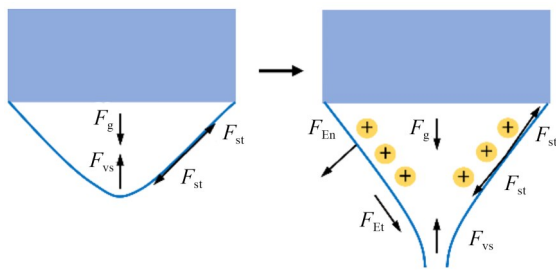
图1 电液耦合喷印系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrohydrodynamic printing

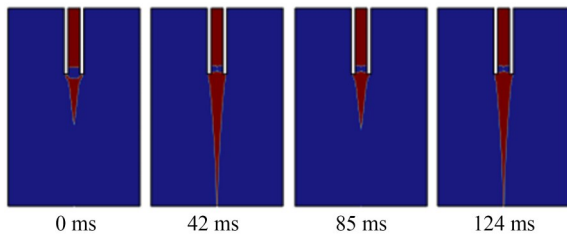
3 结果与讨论

3.1 液滴喷射过程

建立如图2所示电液耦合喷印模型,探究了微液滴喷射动力学行为。当在喷嘴与收集板间施加电压时,喷嘴处液滴在电场力 F_E 作用下发生形变,如图2(a)所示,液滴从初始半球形悬垂弯月面逐渐演变为圆锥形结构,即泰勒锥,其特征半角为49.3°,其中 F_E 为电场力, F_g 为重力, F_{vs} 为黏滞力, F_{st} 为表面张力。液滴喷射过程可分为储能阶段与喷射阶段。在储能阶段,电场力与表面



(a) 泰勒锥形成受力分析
(a) Force analysis of Taylor cone formation



(b) 周期性射流喷射过程
(b) Cycling jet ejection process

图 2 电液耦合喷印模型

Fig. 2 Electrohydrodynamic printing model

张力保持动态平衡,泰勒锥前端振荡并积累电荷。该过程受电压强度、液体黏度及表面张力共同影响。当电荷斥力突破临界值,泰勒锥尖端发生断裂形成射流,部分电荷被射流带走后,系统恢复至储能阶段,形成周期性射流喷射过程,如图 2(b)所示。

研究了环境相对湿度和施加电压对液滴喷射过程的影响。施加电压 2.0 kV 时不同环境相对湿度下的液滴喷射过程如图 3 所示。随着环境相对湿度从 75% 逐渐降至 60%,液滴的平均喷射时间呈递减趋势并达到最小值。环境湿度降低使液滴表面溶剂挥发加快,导致液滴体积快速减小,由于液滴所带总电荷量基本不变,但体积减小使其空间电荷密度增大,导致液滴此时所受电场力最大,因此喷射速度最快。当环境相对湿度继续降低,溶剂挥发过强会导致液滴黏滞力上升,此时需增大液滴体积以提升重力来维持平衡,因此在环境相对湿度低于 60% 时,液滴下落时间反而随环境相对湿度增加而上升。环境相

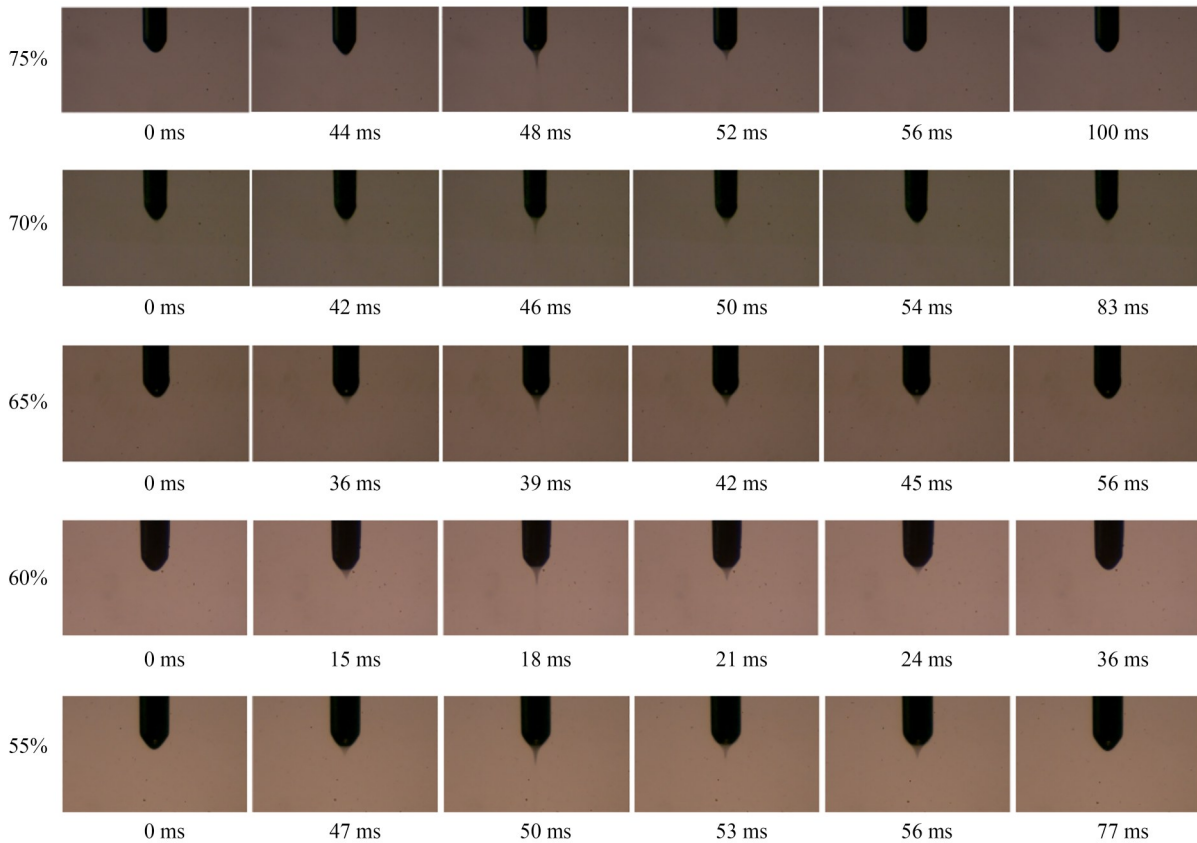


图 3 施加电压 2.0 kV 时不同环境相对湿度下的液滴喷射过程

Fig. 3 Droplet ejection process at different relative humidities under an applied voltage of 2.0 kV

对湿度 70% 时不同施加电压下的液滴喷射过程如图 4 所示。施加电压升高使得液滴所受电场力增大,而液滴表面张力与黏滞力保持恒定,使得在相同时间内,液滴需要加速下落来进行补偿维持力学平衡,因此施加电压 2.3 kV 时,液滴喷射速度最快,喷射时间缩短至 18 ms。如图 5(a)所示,图中误差条表示三次独立重复实验的标准差(SD),数据以平均值±标准差(Mean±SD)形式呈现。当环境相对湿度 60% 时,液滴平均喷射时间降至 40 ms。然而,由于此时液滴喷射速度最快,但供液速度不变会导致供液不足问题,使得

液滴喷印稳定性变差,且有时会产生卫星液滴。相比之下,在环境相对湿度 70% 时,液滴喷印过程表现出更好的稳定性。如图 5(b)所示,当环境相对湿度达到 70% 时,液滴喷射时间随着施加电压的升高逐渐缩短,并在 2.2~2.3 kV 之间的逐渐趋于稳定在 20 ms。然而,随着施加电压的增加,液滴喷印稳定性会逐渐下降,表现为易形成卫星液滴以及存在明显的连续射流形成趋势。上述实验结果表明,液滴的喷射时间与喷印稳定性很大程度上受到环境相对湿度和施加电压的影响。

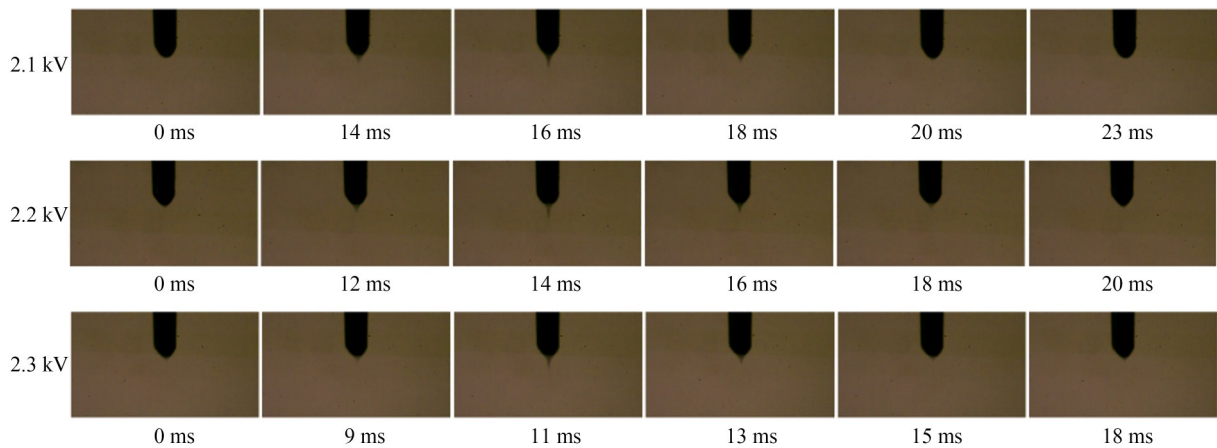
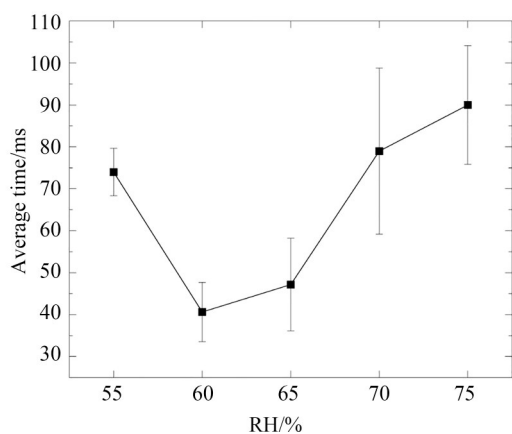


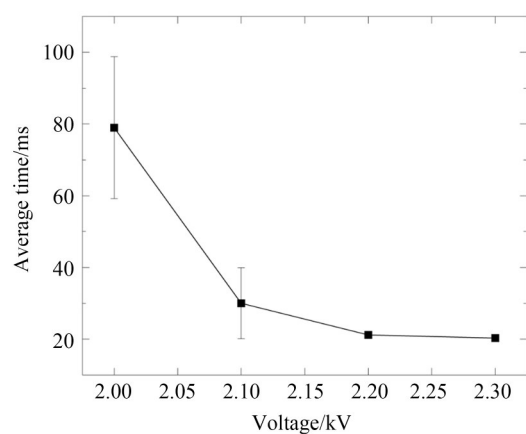
图 4 环境相对湿度 70% 时不同施加电压下的液滴喷射过程

Fig. 4 Droplet ejection process under different applied voltages at an ambient relative humidity of 70%



(a) 施加电压 2.0 kV 时环境相对湿度的影响

(a) Effect of ambient relative humidity under an applied voltage of 2.0 kV



(b) 环境相对湿度 70% 时施加电压的影响

(b) Effect of applied voltage at an ambient relative humidity of 70%

图 5 液滴喷射时间

Fig. 5 Droplet ejection time

3.2 不同环境相对湿度下的喷印薄膜特性

研究了施加电压 2.0 kV 时环境相对湿度对电液耦合喷印 MAPbBr₃ 量子点微薄膜的影响,如图 6 和图 7 所示。在环境相对湿度 50%~75% 时可实现 MAPbBr₃ 量子点微薄膜的稳定喷印。当环境相对湿度由 55% 增加到 70% 时,MAPbBr₃ 量子点微薄膜直径会逐渐减小。这是由于环境相对湿度上升会提高空气中的电导率,促进液滴表面电荷逸散到空气中,有助于改善电荷过度积累导致的喷射不稳定问题,使喷印过程中泰勒锥

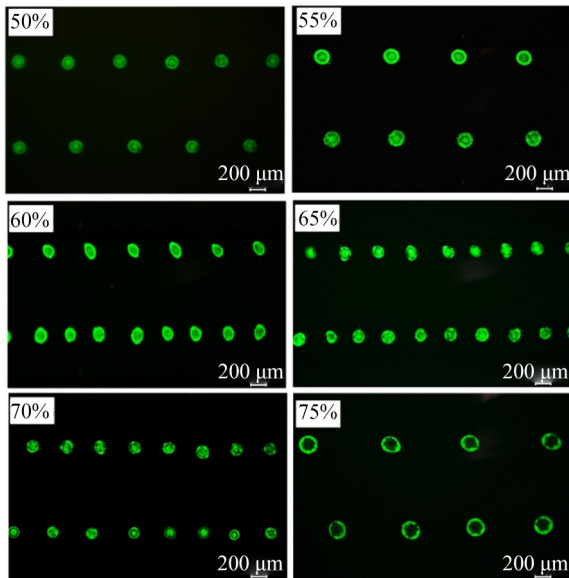


图 6 不同环境相对湿度下的 MAPbBr₃ 量子点微薄膜
Fig. 6 MAPbBr₃ quantum dot micro-thin films under different ambient relative humidity conditions

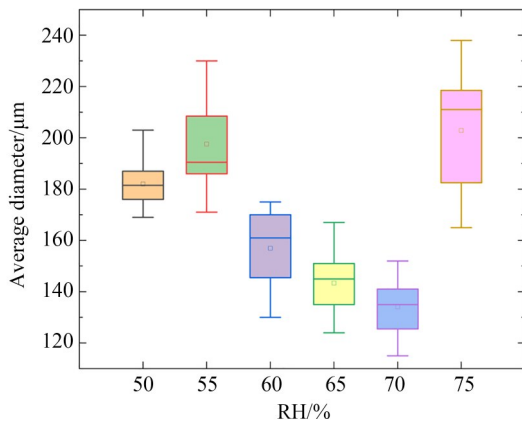


图 7 环境相对湿度对 MAPbBr₃ 量子点微薄膜直径影响
Fig. 7 MAPbBr₃ quantum dot micro-thin film diameter under different relative humidity

更稳定,形成更细的射流,从而微薄膜直径减小。当环境相对湿度升至 70% 时,MAPbBr₃ 量子点微薄膜平均直径可减小至 134 μm,此时的溶剂挥发速率仍相对较快,液滴到达基底后迅速固化,缩短了薄膜在基底上的铺展时间,促使 MAPbBr₃ 量子点微薄膜直径减小,如图 8 所示。然而,环境相对湿度升高会进一步抑制 DMF 本就较慢的挥发速率,导致内部马兰戈尼(Marangoni)对流减弱,使得 MAPbBr₃ 量子点微薄膜在基底上保持液态的时间延长,为 MAPbBr₃ 量子点微薄膜有提供了更充足的毛细铺展和表面流动时间,导致最终固化后的微薄膜直径增大。当环境相对湿度升高至 75% 时,MAPbBr₃ 量子点微薄膜直径明显增加。统计分析了三次独立重复实验样本数据,通过标准差除以平均值得出变异系数(CV),CV 在所有湿度条件下均低于或接近 0.1,表现出良好的重复性。因此,相较于在其他环境相对湿度下制备的 MAPbBr₃ 量子点微薄膜,在环境相对湿度 70% 时得到的薄膜平均直径与 CV 达到最优水平。

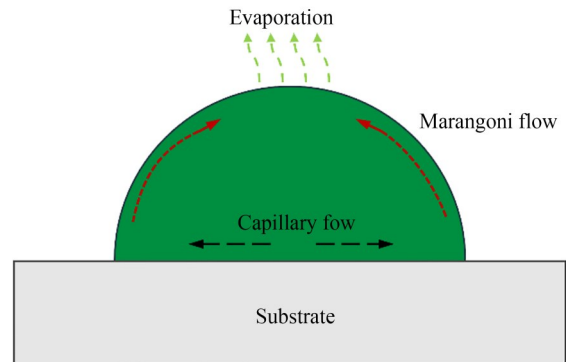


图 8 MAPbBr₃ 量子点微薄膜固化过程示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the drying process of MAPbBr₃ quantum dot micro-films

3.3 不同施加电压下的喷印薄膜特性

研究了不同环境相对湿度下施加电压对电液耦合喷印 MAPbBr₃ 量子点微薄膜的影响,如图 9 所示。当环境相对湿度 70% 时,随着施加电压升高,MAPbBr₃ 量子点微薄膜直径逐渐减小。当施加电压增大到 2.3 kV 时,MAPbBr₃ 量子点微薄膜直径可减小至 52 μm。这是由于液滴所受电

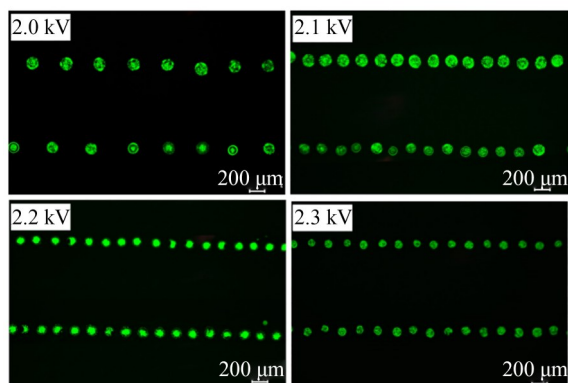


图9 环境相对湿度70%时不同施加电压下的MAPbBr₃量子点微薄膜荧光图

Fig. 9 MAPbBr₃ quantum dot micro-film fluorescence images under various applied voltages with an ambient relative humidity of 70%

场力与自身重力克服表面张力和黏滞力,使弯月面被拉伸成泰勒锥,并在锥尖形成稳定射流。施加电压大小决定了液滴喷射时的体积大小,因此提高电压会加快射流喷射进而减小MAPbBr₃量子点微薄膜直径。如图10所示,当施加电压从2.0 kV增大到2.3 kV时,MAPbBr₃量子点微薄膜直径在不同环境相对湿度下出现不同程度的减小。当环境相对湿度为75%时,MAPbBr₃量子点微薄膜平均直径从203 μm减小到69 μm。对施加电压在2.0~2.3 kV,不同环境相对湿度

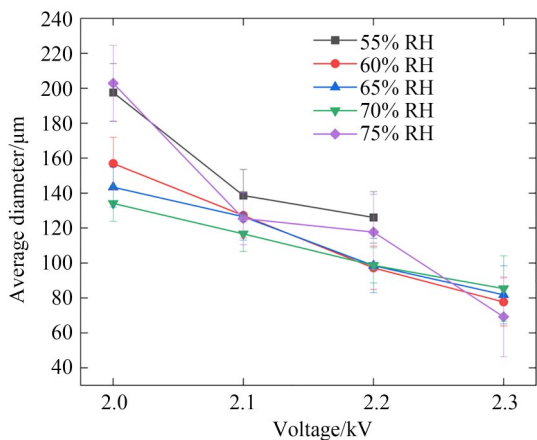


图10 不同施加电压和环境相对湿度下的MAPbBr₃量子点微薄膜直径

Fig. 10 MAPbBr₃ quantum dot micro-film diameter under different applied voltage with various relative humidity

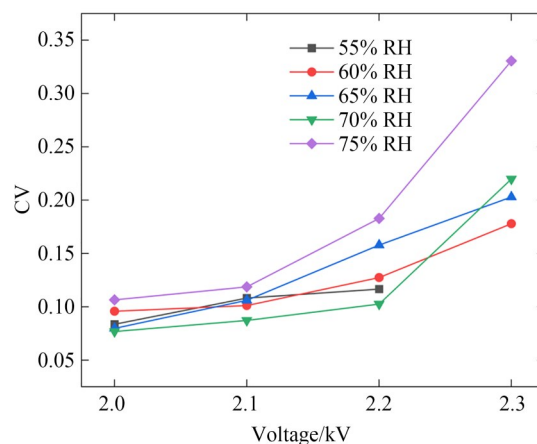


图11 在不同施加电压和环境相对湿度下的MAPbBr₃量子点微薄膜直径CV图

Fig. 11 CV of the printed MAPbBr₃ quantum dot micro-film diameter under different applied voltage with various relative humidity

条件下的三个样本CV进行分析,结果如图11所示。随着施加电压的升高,CV呈上升趋势,当施加电压升高至2.3 kV时,CV急剧上升,这是由于电场力过强会导致液滴开始产生溅射的现象,并伴随着形成卫星液滴。上述实验结果表明,电场力与环境相对湿度的增加,对于MAPbBr₃量子点微薄膜直径减小有着显著提升,但要考虑射流喷射稳定性。

4 结 论

本文采用电液耦合喷印技术制备MAPbBr₃量子点微薄膜,建立了环境相对湿度对喷印直径和喷射稳定性的调控方法。实验结果表明,环境相对湿度对喷印MAPbBr₃量子点微薄膜直径和喷印过程稳定性具有显著影响。当施加电压2.0 kV时,随着环境相对湿度从55%提高到70%,MAPbBr₃量子点微薄膜直径减小,稳定性也随之提升。随着施加电压从2.0 kV升高到2.3 kV,MAPbBr₃量子点微薄膜直径和液滴喷射时间进一步减小。通过环境相对湿度和施加电压调控,喷印的MAPbBr₃量子点微薄膜平均直径可减小至69 μm,CV值低于0.1,表现出良好的喷射稳定性和重复性,实现了MAPbBr₃量子点微

薄膜阵列可控成型,有助于提高钙钛矿量子点薄膜阵列的规模制造水平。

作者贡献声明:

姜佳昕:实验方法提出,论文构思和撰写,获取资助;

董佳波:实验设计及数据整理和分析,初稿

写作;

程翔:实验数据分析,获取资助;

陈华坛:实验数据分析;

郑高峰:设计研究方法,论文指导,获取资助;

李文望:项目管理,论文审核与编辑写作,获取资助。

参考文献:

- [1] YUAN L F, CHEN D J, HE K, *et al.* Advancing microarray fabrication: One-pot synthesis and high-resolution patterning of UV-crosslinkable perovskite quantum dots [J]. *Nano Research*, 2024, 17(9): 8600-8609.
- [2] 谢佳凌, 严凯, 谭佳, 等. 电控量子点分子的时域量子关联退相干[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(5): 1206-1215.
XIE J L, YAN K, TAN J, *et al.* Decoherence of temporal quantum correlation in electrically controllable quantum-dots molecules [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1206-1215. (in Chinese)
- [3] CHO Y, BEAK J W, SAGONG M, *et al.* Electrospinning and nanofiber technology: fundamentals, innovations, and applications (adv. mater. 28/2025) [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(28): 2570190.
- [4] WU H F, LIN X, SHUAI Q, *et al.* Ultra-high brightness Micro-LEDs with wafer-scale uniform GaN-on-silicon epilayers [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 284.
- [5] QU Z H, ZHAO Y, MA F, *et al.* Enhanced charge carrier transport and defects mitigation of passivation layer for efficient perovskite solar cells [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 8620.
- [6] HU J M, GUO R H, ZHU S T, *et al.* Full-color and high-resolution femtosecond laser patterning of perovskite quantum dots in polyacrylonitrile matrix [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(51): 2407116.
- [7] LUO C Z, DING Y H, REN Z W, *et al.* Ultra-high-resolution, high-fidelity quantum dot pixels patterned by dielectric electrophoretic deposition [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 273.
- [8] LI W T, WU M C, CHEN H N, *et al.* Photoinduced dehalogenation-based direct *in situ* photolithography of CsPbBr₃ quantum dots micropatterns for encryption and anti-counterfeiting with high capacity [J]. *Small Structures*, 2024, 5(9): 2400078.
- [9] AHN J H, YOON C R, LEE C Y. Heating simulation of film heaters fabricated by EHD inkjet printing for satellite applications [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2025, 12(14): 2400933.
- [10] 严梓峻, 刘众, 杨晓, 等. 钙钛矿量子点色转换 Micro-LEDs: 稳定性与图案化研究进展 [J]. *光电工程*, 2024, 51(7): 240088.
YAN Z J, LIU Z, YANG X, *et al.* Perovskite quantum dot color conversion Micro-LEDs: progress in stability and patterning [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(7): 240088. (in Chinese)
- [11] SIDDIQUI H, SINGH N, NAIDU P, *et al.* Emerging electrochemical additive manufacturing technology for advanced materials: Structures and applications [J]. *Materials Today*, 2023, 70: 161-192.
- [12] 赵扬, 姜佳昕, 张恺, 等. 基于电纺直写的图案化微纳结构喷印技术 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2224-2231.
ZHAO Y, JIANG J X, ZHANG K, *et al.* Precision deposition of micro/nano pattern printed by electrohydrodynamic direct-write [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2224-2231. (in Chinese)
- [13] SHABANI A, AL G A, BERRI N, *et al.* Elec-

- trospinning technology, machine learning, and control approaches: a review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2025, 27(7): 2401353.
- [14] 李文望, 郑高峰, 王翔, 等. 电纺直写纳米纤维在图案化基底的定位沉积[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2231-2238.
- LI W W, ZHENG G F, WANG X, *et al.* Position deposition of electrospinning direct-writing nanofiber on pattern substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2231-2238. (in Chinese)
- [15] ZHU M H, DUAN Y Q, LIU N, *et al.* Electrohydrodynamically printed high-resolution full-color hybrid perovskites[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(35): 1903294.
- [16] COHEN T A, SHARP D, KLUHERZ K T, *et al.* Direct patterning of perovskite nanocrystals on nanophotonic cavities with electrohydrodynamic inkjet printing [J]. *Nano Letters*, 2022, 22(14): 5681-5688.
- [17] CHEN H T, CHEN J Y, CHEN Y M, *et al.* Microcurrent behavior of core-shell droplet deposition in coaxial electrohydrodynamic printing[J]. *Materials Research Express*, 2023, 10(3): 035006.
- [18] HEINDL M W, LICHTENEGGER M F, KODALLE T, *et al.* Ligand-induced crystallization control in MAPbBr₃ hybrid perovskites for high quality nanostructured films[J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(6): 2402441.
- [19] 李恭明, 蔡俊虎, 赖文宗, 等. 双短链配体调控提升 MAPbBr₃ 量子点性能及广色域 LED 显示应用 [J]. *发光学报*, 2025, 46(1): 1-11.
- LI G M, CAI J H, LAI W Z, *et al.* Performance enhancement of MAPbBr₃ perovskite quantum dot for wide color gamut LED *via* double short-chain ligand modification[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(1): 1-11. (in Chinese)
- [20] SINGH S, TANG X B, YANG F Q. Low-temperature synthesis of highly stable blue-emitting perovskite CsPbBr₃ quantum dots[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2025, 129(7): 3942-3950.
- [21] 鲁思宇, 刘悠嵘, 蔡佳, 等. 含碳量子点的聚合物分散液晶薄膜的电光及荧光特性[J]. *液晶与显示*, 2026, 41(2): 177-187.
- LU S Y, LIU Y R, CAI J, *et al.* Electro-optical and fluorescent properties of polymer-dispersed liquid crystal films containing carbon quantum dots [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2026, 41(2): 177-187. (in Chinese)
- [22] SHEN H X, NAN R H, JIAN Z Y, *et al.* Defect step controlled growth of perovskite MAPbBr₃ single crystal [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(17): 11596-11603.
- [23] 陈逸群, 林立华, 胡海龙, 等. 基于多功能苯乙基溴化铵修饰层的喷墨打印钙钛矿量子点发光二极管[J]. *发光学报*, 2024, 45(8): 1343-1353.
- CHEN Y Q, LIN L H, HU H L, *et al.* Inkjet printed perovskite quantum dot light-emitting diodes based on multifunctional phenethylammonium bromide modification layer[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2024, 45(8): 1343-1353. (in Chinese)
- [24] YOU X Y, YE C C, GUO P. Electric field manipulation for deposition control in near-field electrospinning [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 431-438.
- [25] LUO J J, REN Z Q, QI X, *et al.* Facile fabrication of large-area and high-quality organic-inorganic hybrid perovskite ferroelectric films through electrohydrodynamic printing [J]. *Advanced Science*, 2025, 12(21): 2414122.
- [26] 康国毅, 钟易晟, 姜佳昕, 等. 柔性湿度传感器低温直写制备[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(22): 3279-3288.
- KANG G Y, ZHONG Y S, JIANG J X, *et al.* Low-temperature direct writing fabrication of flexible humidity sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(22): 3279-3288. (in Chinese)
- [27] PARK B K, UM I C. Effect of relative humidity on the electrospinning performance of regenerated silk solution[J]. *Polymers*, 2021, 13(15): 2479.
- [28] SZEWCZYK P K, STACHEWICZ U. The im-

pact of relative humidity on electrospun polymer fibers: From structural changes to fiber morphology

[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 286: 102315.

作者简介:



姜佳昕(1992—),女,河北秦皇岛人,博士,副教授,2014年、2017年、2022年于厦门大学分别获得学士、硕士、博士学位。主要从事微纳系统集成、功能薄膜及装备开发等方面的研究。E-mail: jjx@xmut.edu.cn

通讯简介:



李文望(1966—),男,福建泉州人,博士,教授,博士生导师,1987年于福州大学获得学士学位,2002年、2014年于厦门大学分别获得硕士、博士学位。主要从事快速原型与逆向工程、微纳智能制造等方面的研究。E-mail:xmlww@xmut.edu.cn

通讯简介:



郑高峰(1984—),男,福建泉州人,博士,教授,博士生导师,2006年于华中科技大学获得学士学位,2011年于厦门大学获得博士学位。主要从事静电纺丝和有机微纳米系统制造方面的研究。E-mail:zheng_gf@xmu.edu.cn