研究摘要

纳米 LED 的制造与 CMOS 集成

钙钛矿局域接触与量子点转移印刷的实验比较

研究团队已经把钙钛矿 LED 的电流注入窗口缩到约 100 nm，也已把量子点发光器件接入高密度 CMOS 背板。这两类实验分别回答了发光区能做多小，以及驱动电路能控制多少像素。

90 nm
钙钛矿窗口的等面积特征长度

7.8%
该尺寸近红外器件的平均峰值 EQE

4.5 µm
量子点主动矩阵演示的像素尺寸

两个实验各自解决了哪一步

钙钛矿	Lian 等先在玻璃 / ITO 上制成绝缘开口，再沉积发光层。近红外器件的平均峰值外量子效率（EQE）在 3.5 µm 为 20.3%，缩到 90 nm 时为 7.8%。同一研究用 70 × 95 µm 的商用薄膜晶体管（TFT）像素演示了视频。[2, 3]
量子点	Lin 等用硬硅模板和倒置转移印刷形成红、绿、蓝图案，并调节绝缘阻漏层的介电常数。12,700 PPI 红光器件的峰值 EQE 达 26.1%。主动矩阵演示使用约 5,600 PPI 的 CMOS 电路。[4, 5]
团队评审	将每项结果写回它的器件和测试条件。发光区面积、阵列节距、EQE 的统计方式以及可独立寻址的像素数，分别回答几何、电光性能和系统控制三个问题。EQE 是从器件射出的光子数与注入电子数的比值。

资料范围为 Yang 等的纳米 LED 综述及上述两项原始研究。文献定位与公开数据见第 6 页。线上专栏

研究框架

划定发光区域的四种方法

综述将电驱动发光区域或像素节距进入亚微米的器件纳入讨论。量子点颗粒直径描述单颗粒，光刻、沉积、压印和转移则决定哪些区域能形成电致发光像素。[1]

先区分开口大小与排布密度

局域接触实例 100 nm 直径圆孔的面积为 $\pi \times (0.05\ \mu m)^2 \approx 0.00785\ \mu m^2$。研究采用面积的平方根作为特征长度，得 88.6 nm，报告取约 90 nm。

127,000 PPI 表示每英寸的阵列周期数。按一英寸 25.4 mm 换算，节距为 25.4 mm ÷ 127,000 = 200 nm。对这组器件，圆孔直径约为节距的一半。[2, 3]

材料暴露在哪一步，决定工艺风险

图案化路线	图案怎样形成	要检查的制造结果
光刻	通过光敏材料、显影与图案转移定义位置，可结合已有对准设备。	发光层经溶剂、曝光或刻蚀后的亮度与漏电变化。
电泳沉积	利用电场将带电颗粒引到指定区域，直接组装发光材料。	颗粒装填均匀性，以及连续像素间的沉积分布。
纳米压印	用带微纳结构的模具并行复制周期图案。	模具尺寸误差、脱模残留与重复使用后的缺陷。
转移印刷	在供体侧制备发光结构，再将其对准并转到接收面。	转移完整性、套刻偏差、处理节拍与接收基底兼容性。

工艺比较据 Yang 等，图 3、表 1 与 Box 1 整理。最后一列是工程验证建议。

面积缩小会放大边缘影响

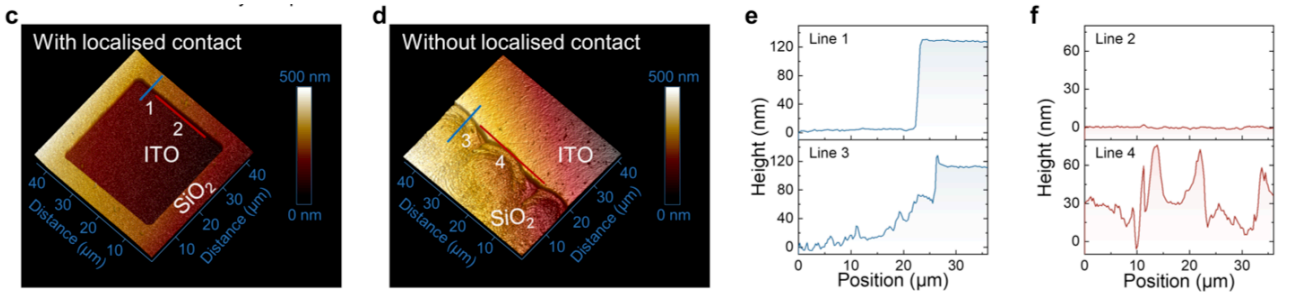
方形开口边长为 L 时，周长与面积之比为 4/L。局部缺陷、电场集中或载流子横向扩散影响到的区域占比可随尺寸缩小而提高。应把显微几何、器件漏电、电致发光空间分布与 EQE 放在同组样品上对照，才能判断哪一种机制主导损失。

原始研究 Lian 等 · Nature 2025

把高精度开孔移到发光层沉积之前

器件从玻璃上的透明氧化铟锡（ITO）电极开始。约 130 nm 的 SiO_2 覆盖电极，仅在预定位置开窗。开窗位置远离粗糙的电极边界，随后连续沉积载流子传输层、钙钛矿与顶电极，窗口限定局部注入区域。[2]

表面形貌实测 | 局域接触与对照电极



Y. Lian 等，*Downscaling micro- and nano-perovskite LEDs*，作者接受稿第 4 页 Fig. 1c–f。原子力显微镜和线扫显示两种电极边界的形貌。裁切、等比缩放，CC BY 4.0。

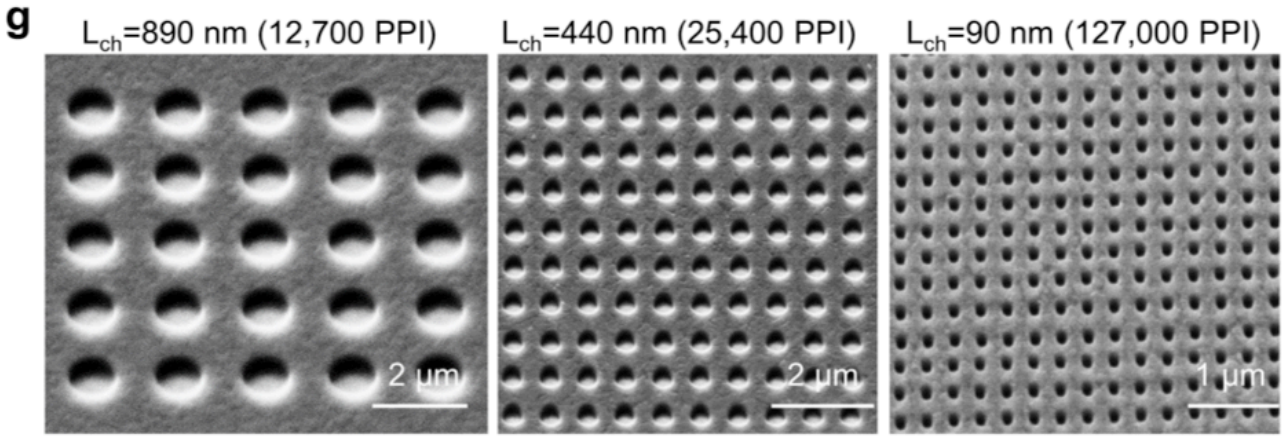
工序与设备	论文披露的可核对条件
制备电极和绝缘层	溅射 135 nm ITO，用 1064 nm 激光加工条纹。等离子体增强化学气相沉积（PECVD）形成约 130 nm SiO_2。
微米分支 光刻、反应离子刻蚀	正胶预烘 100°C、10 min。365 nm 曝光 4–6 s，显影 30 s，再刻蚀绝缘层，清除残胶。
纳米分支 聚焦离子束（FIB）	100、200 nm 直径孔用 30 kV、5 pA。500、1,000 nm 孔用 30 kV、10 pA。研究未给出单片写入时间。
钝化与沉积	溅射约 5 nm SiO_2 钝化。近红外样品中，ZnO 在 150°C 退火 10 min，PEIE 在 100°C 退火 10 min，钙钛矿在 96°C 退火 10 min。
顶电极与封装	沉积上层传输材料，经掩模蒸镀 MoO_x、100 nm Au，使用紫外固化环氧与盖玻璃封装。

工艺条件来自作者接受稿 Methods，第 12–13 页。96°C 对应近红外发光层的一次退火。评估后段兼容性还需计入各层最高温度、处理时间、溶剂暴露与污染控制。

硅在这两条路线中的作用不同。该实验用 SiO_2 绝缘层定义开口。GaN-on-Si 则在硅生长晶圆上处理外延晶格与热失配。迁移到硅驱动背板时，还须验证金属互连和既有钝化层对后续处理的耐受性。

原始数据　Lian 等 · 补充表 2、3

90 nm 近红外器件的平均峰值 EQE 为 7.8%



Y. Lian 等，*Downscaling micro– and nano–perovskite LEDs*，作者接受稿第 6 页 Fig. 2g。扫描电镜摄于钙钛矿沉积前，左至右为 890、440、90 nm 特征长度。保留标尺，裁切、等比缩放，CC BY 4.0。

特征长度 μm	阵列密度 PPI	近红外 平均峰值 EQE	近红外 最高峰值 EQE	绿光 平均峰值 EQE
3.50	3,628	20.3%	20.8%	16.5%
0.89	12,700	14.5%	15.5%	10.8%
0.44	25,400	12.3%	14.1%	9.9%
0.18	63,500	10.7%	12.7%	9.2%
0.09	**127,000**	**7.8%**	**8.9%**	**9.0%**

按 Supplementary Tables 2–3 所列数值重组。平均峰值是各被测器件峰值 EQE 的均值。180 nm 绿光按补充表 3 列为 9.2%。正文 Fig. 3e 中该组散点约为 5% 与 9%，图读中心约 7%，与补充表有出入。90 nm 绿光一行的平均与最高值均为 9%，表中未列样本数。

如何读效率、寿命与背板结果

效率。作者用校准积分球和光谱仪在氮气中测量电致发光，以阵列总电流除以全部名义活性面积计算电流密度。逐像素均匀性还需空间分辨测量。

寿命。3.5 μm 绿光器件在 25 ± 5°C 氮气环境下恒流驱动，亮度降至初值一半的时间 T_{50} 在 10 与 50 mA/cm² 下约为 40 h 和 14 h。原研究 Fig. 4d–f 的视频采用 70 × 95 μm TFT 像素。[2]

原始研究 Lin 等 · Nature 2026

将量子点图案转印到 CMOS 驱动背板

研究用硬硅模板进行纳米压印，控制量子点材料在供体、模板和接收面之间的附着，再以整体倒置转印形成像素化发光结构。红绿蓝图案密度覆盖 9,072—25,400 PPI。模板提供几何图形，背板电路在接收端负责寻址。[4]

为什么调节阻漏层的介电常数

图案边缘的介电性质改变局部电场。作者在聚乙烯醇（PVA）阻漏层中加入 TiO_2 纳米颗粒，调节介电常数。300 K、1 kHz 时，纯 PVA 约为 3.3，50 wt% TiO_2 配方约为 6.7，接近红色 CdSe/ZnS 量子点的约 6.7。[5，表 2]

电场模拟比较边缘分布，器件实验则比较无阻漏层、PVA 阻漏层及介电匹配阻漏层的电流、亮度与 EQE。机制判断来自模拟与对照实验的共同支持。[4，图 3、4]

实验对象	报告结果	定位与含义
单色红光	**12,700 PPI** 峰值 EQE **26.1%**	Fig. 3h。图案化单色器件的电光表现。
RGB 像素化白光	合成白光峰值 EQE **10.1%**	Fig. 5f—i。共发光状态下的器件特性。
CMOS 主动矩阵	**1,920 × 1,080**，4.5 μm 像素，约 5,600 PPI，六晶体管驱动。	Fig. 5j—o 与补图 33。红、绿、蓝动态图像分别来自独立制作的单色器件。

寿命结果的时间基准

红光器件的 T_{95} = **65,190 h** 是作者将测得的衰减数据及填充率修正后的亮度外推到 1,000 cd/m² 的结果，阈值为亮度降至初值的 95%。长期连续实测时间与模型预测值应分别列示。比较钙钛矿 T_{50} 时，还要统一衰减阈值、初始亮度和工作条件。[4, 5，Note 3]

原研究 Fig. 5 可查 RGB 图案、白光电致发光曲线与三个单色主动矩阵样机的原图。

工程验证建议

从阵列样品到可评估的显示原型

若目标是高密度可寻址显示，实验设计应同时取得几何、电学、光学及寿命证据。以下问题可用于样品评审和测试计划。

评审问题	可执行的验证方法
窗口与图案 有效尺寸稳定吗?	用扫描电镜量测开口与节距，在基底中心、边缘和多个批次统计尺寸分布。以配准标记测背板电极与发光图案的套刻误差。
发光与驱动 性能分布如何?	在规定温度、波形和亮度下，记录电流—电压、光谱与 EQE。同步采集阵列电致发光图，报告暗点、亮度离散与相邻像素串扰。
全彩寻址 谁控制每个子像素?	在同一背板轮流显示单色、单点及棋盘格图样，核对电极连接、独立控制、漏光与帧率，并给出各通道电流和工作电压。
寿命与制作 怎样推向大面积?	写明样本数、封装、温度、初始亮度、衰减阈值和实际测试时长。另列加速模型及区间。记录单工序节拍、良率分母、返修后整屏良率。

原始来源与图像归属

[1] Yang W. et al. *Solution-processed nano-LEDs for next-generation optoelectronic technologies.* Nature Photonics 20, 1259—1272 (2026). 综述 Fig. 2—5、Box 1、Table 1。10.1038/s41566-026-02010-1

[2] Lian Y. et al. *Downscaling micro- and nano-perovskite LEDs.* Nature 640, 62—68 (2025). 结构、效率、寿命及主动矩阵见 Fig. 1—4、Methods。10.1038/s41586-025-08685-w · 剑桥大学作者接受稿（CC BY 4.0）

[3] Lian 等，Supplementary Information。近红外和绿光的逐尺寸统计分别见 Supplementary Tables 2—3，印刷页 19—20。

[4] Lin L. et al. *Nanoscale transfer-printed full-colour ultrahigh-resolution quantum dot LEDs.* Nature 652, 349—358 (2026). 单色器件 Fig. 3，背板与白光器件 Fig. 5。10.1038/s41586-026-10333-w

[5] Lin 等，Supplementary Information。寿命外推见 Note 3，介电常数见 Table 2，CMOS 电路见 Fig. 33。

本专题起自公众号文章《LED 缩小到纳米后，为什么不能只看像素密度？》。定量结果回溯到原研究和补充表。第 3、4 页的原图节选均标注作者、图号、裁切方式与许可。