
单片集成Sn-Pb钙钛矿近红外成像芯片

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40879.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！

单片集成Sn-Pb钙钛矿近红外成像芯片。导读

近红外（NIR，波长700-1000 nm）光电探测与成像技术在安全监控、机器视觉、自动驾驶、物质识别、生物医学成像等领域拥有不可替代的战略地位。然而，当前主流的InGaAs近红外探测器成本极其高昂（单颗芯片动辄数千美元），且与硅基读出电路（ROIC）异质集成工艺复杂、分辨率受限，严重阻碍了近红外成像在消费电子和分散式检测场景中的普及。

溶液法加工的锡铅（Sn-Pb）钙钛矿材料，因其带隙可连续调谐（可扩展至1000 nm）、吸收系数高、载流子迁移率高、成本低廉且兼容柔性工艺，被公认为下一代近红外探测的种子选手。全球众多顶尖团队竞相投入研发，试图用钙钛矿替代昂贵的InGaAs。然而，一个长期存在的死穴让这一梦想迟迟无法落地——Sn²⁺极易氧化，导致器件暗电流高、探测率低，始终无法满足实用化成像要求。迄今为止，国际上尚无任何团队成功制造出Sn-Pb钙钛矿近红外成像芯片。

华中科技大学武汉光电国家研究中心唐江教授、高亮教授与陈超副教授团队摒弃了传统的体相掺杂思路，首创Sn(SCN)₂无机分子表面钝化策略。通过将Sn(SCN)₂分子精准覆盖在Sn-Pb钙钛矿薄膜的上表面，填充锡空位、抑制表面氧化，一举将表面缺陷密度降低两个数量级。在此基础上，他们首次实现了Sn-Pb钙钛矿光电探测器与商用CMOS读出电路的单片集成，成功制造出全球首款640×512像素的近红外成像芯片。相关研究成果以A near-infrared Sn-Pb perovskite imager with monolithic integration为题发表于《Light: Science Applications》。

研究内容

Sn²⁺氧化的先天缺陷：Sn²⁺的5s²孤对电子极易被氧化为Sn⁴⁺，产生大量锡空位，导致严重的p型自掺杂。这使得Sn-Pb钙钛矿光电探测器的暗电流密度居高不下（通常>50 nA/cm²），比探测率（D*）远低于商用InGaAs（通常<10¹² Jones），信噪比差，根本无法用于高灵敏度成像。

表面缺陷密度三个数量级高于体相：即使通过体相掺杂（如SnF₂、Sn粉）部分抑制了体相氧化，Sn-Pb钙钛矿薄膜的上表面在器件制备和运行过程中依然极易氧化，表面缺陷态密度比体相高出三个数量级，成为非辐射复合和暗电流的主要来源。

体相掺杂困境：若将抗氧化剂（如Sn(SCN)₂）直接掺入钙钛矿前驱体，虽然能一定程度抑制暗电流，但Sn(SCN)₂导电性差，会阻碍载流子传输，导致外量子效率（EQE）和响应度大幅下降——降低暗电流与保持高响应度难以两全。

单片集成的工程鸿沟：将溶液法加工的钙钛矿薄膜无损地、均匀地制备在CMOS读出电路（含 640×512 个像素电极）上，并保证各像素一致性、低串扰、长期稳定性，是一项极具挑战性的系统工程，此前尚无成功先例。

图1. 从痛点到亮点：Sn-Pb钙钛矿成像芯片的核心突破。(a)传统Sn-Pb钙钛矿中 Sn^{2+} 氧化导致暗电流高的示意图。(b) $\text{Sn}(\text{SCN})_2$ 分子精准修补锡空位、抑制氧化的机制——本研究的关键创新。

表面缺陷靶向修复技术

理论预测与分子设计：团队通过密度泛函理论（DFT）计算和分子静电势（ESP）图谱分析，精准识别出 $\text{Sn}(\text{SCN})_2$ 分子中的 Sn^{2+} 可与钙钛矿表面的锡空位发生配位吸附，吸附能高达 -1.25 eV。这一理论预测为实验设计提供了精确制导。

表面 Sn^{4+} 含量断崖式下降：X射线光电子能谱（XPS）证实，经 $\text{Sn}(\text{SCN})_2$ 处理后，Sn-Pb钙钛矿薄膜表面的 Sn^{4+} 含量从34.71%骤降至13.01%，氧化被强力抑制。紫外光电子能谱（UPS）显示费米能级上移，近表面电子浓度从 $1.1 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 提升至 $7.6 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，证明锡空位被有效填充。

表面缺陷密度降低两个数量级：驱动级电容profiling（DLCP）测试显示， $\text{Sn}(\text{SCN})_2$ 处理仅作用于薄膜上表面，却使上界面缺陷密度骤降两个数量级（体相和底界面缺陷几乎不变），同时载流子寿命从125 ns延长至461 ns，光致发光强度显著增强——非辐射复合被强力抑制。

双功能钝化机制

攻克低暗电流 vs 高响应度的矛盾：传统体相掺杂 $\text{Sn}(\text{SCN})_2$ 虽能降低暗电流（ 21 nA/cm^2 ），但因其导电性差，EQE大幅下降。该团队巧妙地将 $\text{Sn}(\text{SCN})_2$ 仅用于表面钝化，既阻断了表面漏电通道，又不影响体相载流子传输，实现了暗电流密度 10 nA/cm^2 （ -0.1 V ）与EQE 76%（940 nm）的兼得——这是该领域迄今最优的综合指标。

比探测率追平商用InGaAs：在零偏压（自供电）下，经 $\text{Sn}(\text{SCN})_2$ 处理的探测器噪声电流和比探测率是未处理器件的13倍，与商用InGaAs光电二极管（ $\sim 4 \times 10^{12} \text{ Jones}$ ）相比遥遥领先，在所有已报道的Sn-Pb钙钛矿光电二极管中同时实现了最高的 D^* 和最低的暗电流密度。

稳定性质的飞跃：未封装器件在空气中存储20天后，暗电流密度仅微小变化；而未处理器件暗电流暴涨近两个数量级。65 °C高温存储下，钝化器件暗电流仅增加约一倍，而对照器件增加约15倍。连续工作24小时后，钝化器件暗电流稳定如初，对照器件则飙升5倍。

全球首款Sn-Pb钙钛矿近红外成像芯片

单片集成与高均匀性：团队成功将Sn(SCN)₂处理的Sn-Pb钙钛矿光电探测器逐层制备在商用CMOS ROIC上，实现了640×512像素阵列、15 μm像素间距的单片集成成像芯片。整芯片的光响应非均匀性（PRNU）低至3%，坏点比例仅0.01%、热点比例仅0.24%，像素响应呈高斯分布，成像质量堪比商用硅基和InGaAs芯片。

成像性能全面领先：在940 nm LED照明下，该芯片的EQE达到76%，空间分辨率（MTF50）高达206.5线对/毫米（LW/PH），动态范围（LDR）为58.2 dB，噪声等效功率低至16.4 fW/Hz^{1/2}。这些指标全面超越所有已报道的溶液法近红外探测器，部分指标可与高端商用芯片同台竞技。

物质识别：该芯片在近红外波段展现出独特的物质指纹识别能力。对于可见光下同为无色透明的水（H₂O）、四氯乙烯（C₂Cl₄）和乙醇（C₂H₅OH），芯片在940 nm成像下因三者吸收差异而呈现出截然不同的灰度（水最暗、乙醇次之、四氯乙烯最亮），实现了肉眼无法完成的精准区分。这一能力在化学传感、药品检测、假冒伪劣鉴别等领域具有广阔应用前景。

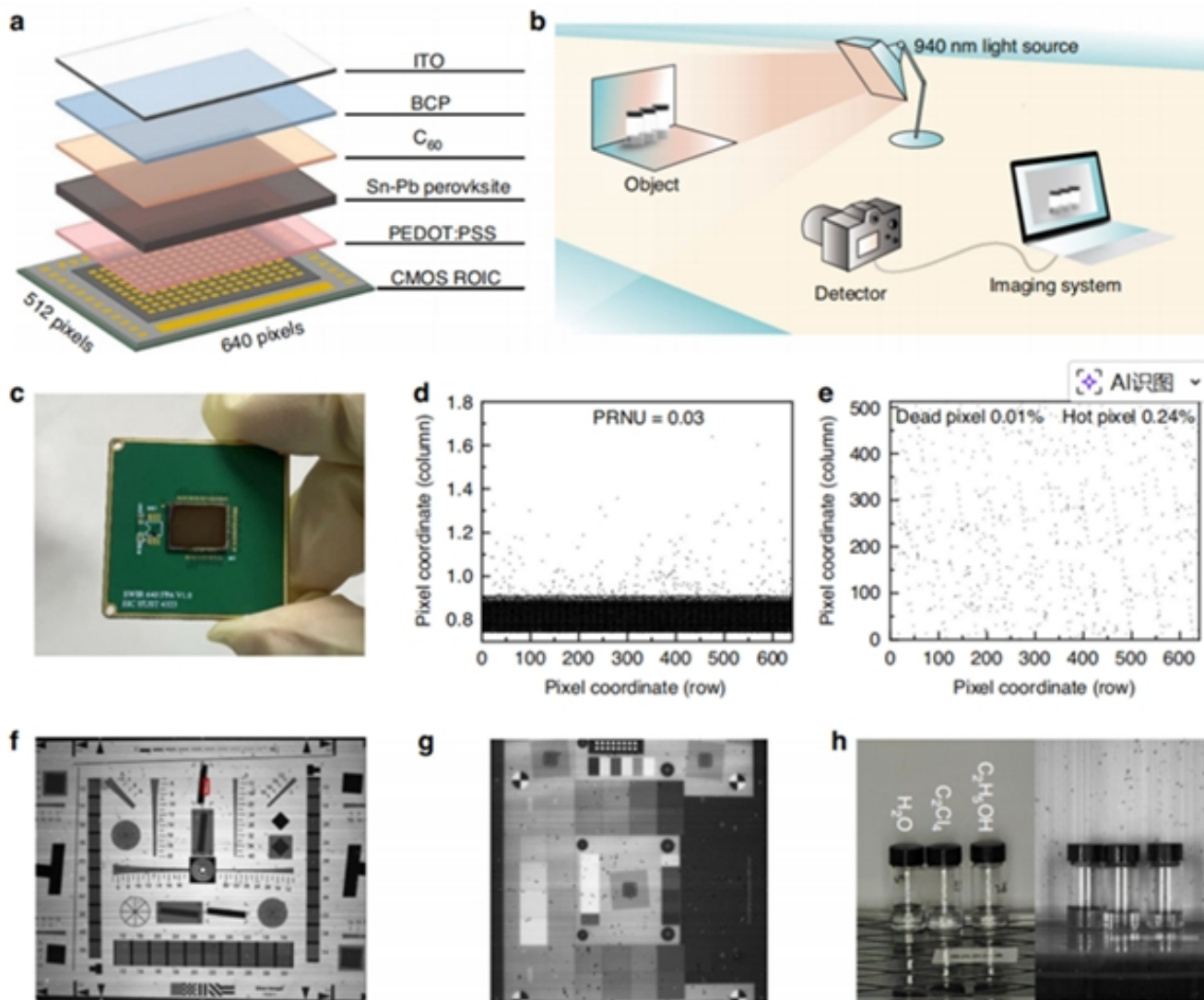


图2.首款Sn-Pb钙钛矿近红外成像芯片性能大赏。(a)芯片结构示意图。(b)

成像系统实物与光路。(c) 芯片实物照片。(d) 像素灰度均匀性分布。(e) 坏点与热点统计——极低比例证明卓越的制造质量。(f) 分辨率测试卡成像 (940 nm)。(g) 36级动态范围测试卡成像，灰度层次分明。(h) 三种无色透明液体在可见光（左）与近红外（右）下的成像对比，实现精准识别。

总结与展望

这项成果是钙钛矿近红外成像领域从0到1的原点式突破，但绝非终点。研究团队对未来发展已绘就清晰蓝图：

首先，向短波红外（SWIR，1000-1700 nm）进军。当前芯片响应截止约1000 nm，团队计划通过进一步优化Sn/Pb比例，将响应波段拓展至1100 nm甚至1400 nm以上。届时，该芯片将能够探测更多物质的分子指纹特征吸收峰，在药品成分分析、塑料分拣、湿度检测等领域释放更大潜能。其次，向更高集成度与更高性能冲刺。团队目标是在三年内实现更大面阵（如1280×1024像素）和更小像素尺寸（如5 μm）的单片集成，同时将帧率提升至120 fps以上，以满足高速动态成像和消费电子领域对分辨率与速度的极致追求。此外，结合先进封装技术（如原子层沉积），有望将器件在高温高湿环境下的寿命再提升一个数量级。最终，从实验室走向产业化，让近红外眼普及千家万户。研究团队已积极与国内领先的CMOS晶圆厂和模组企业对接，推动该技术在智能手机摄像头、工业检测探头、便携式医疗诊断设备、车载夜视系统等场景的落地。凭借钙钛矿材料的溶液法低成本优势（预估仅为InGaAs芯片的1/10），这种高性能近红外成像芯片有望彻底颠覆传统近红外探测的市场格局，让曾经昂贵的近红外成像技术从奢侈品变为日用品。

可以预见，在不久的将来，每个人的手机都能拥有一双近红外之眼——不仅能看清黑夜，更能看透物质本质。这项由中国团队首创的Sn-Pb钙钛矿成像技术，正在为全球近红外成像领域开辟一条低成本、高性能、可量产的全新技术路线，引领一场人人都有近红外眼的感知革命。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02127-y>

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：唐江等 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](https://www.iikx.com)转发