
用于全彩单像素阵列的亚伏级可重构Gires-Tournois谐振器

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41314.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！

用于全彩单像素阵列的亚伏级可重构Gires-Tournois谐振器。 导读

在微米级像素上实现全彩、低功耗的色彩调控是现代显示技术面临的一项核心挑战。近期，来自韩国光州科学技术院等机构的研究团队提出了一种亚伏级驱动的可重构Gires-Tournois谐振器单像素阵列，成功在单个微米尺度像素中实现了覆盖全可见光谱的高饱和度色彩调制，并通过将导电高分子材料聚苯胺（PANI）与该光学谐振结构深度耦合，成功在极低电压和功耗条件下实现了超过互补色范围的色相调控，并展示了可寻址的单像素阵列与像素内存储功能。

该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为Sub-1-volt, reconfigurable Gires-Tournois resonators for fullcoloured monapixel array。韩国光州科学技术院的Joo Hwan Ko和Hyo Eun Jeong为论文共同第一作者，Hyeon-Ho Jeong 和Young Min Song为共同通讯作者。

研究背景

随着虚拟现实、增强现实以及可穿戴显示设备的快速发展，显示器对像素尺寸、色彩表现力与能效提出了前所未有的要求。尤其是在近眼显示场景中，为满足人眼分辨极限，像素密度往往需要达到上万PPI（Pixels Per Inch），这对显示技术提出了极高的要求。目前主流的发光型显示（如LED、OLED）在像素尺寸缩小至微米尺度时，容易出现外量子效率下降、发热严重以及制造良率降低等问题；反射式显示技术（如硅基液晶显示）虽然在高分辨率方面表现优异，但其通常工作电压偏高、光损耗明显，限制了进一步的小型化与能效提升。

近年来，单像素显示理念逐渐受到关注，即在单一像素内直接实现全彩调制，从而避免传统RGB三色子像素分割带来的复杂性。相变材料、电光材料以及导电高分子等活性材料均被用于探索这一方向，但仍存在明显不足：相变材料依赖热过程、响应不均一；电光材料通常需要较高驱动电压；而导电高分子虽然具有显著的折射率调制能力，却因光-物质相互作用不足，难以在可见光范围内实现高饱和度、宽色域的颜色变化。

因此，如何在保持超低工作电压与功耗的同时，显著增强光-物质耦合强度，实现微米尺度单像素的全彩调制，已成为当前反射式显示与可重构光子学领域亟待解决的关键科学与工程问题。

创新研究

针对上述挑战，研究团队创新性地提出并实现了一种可重构

Gires – Tournois谐振器单像素结构。该结构采用ITO / PANI / Pr-Ge / Au的多层谐振体系，其中Pr-Ge层意为多孔Ge层，作为损耗层用于精确调控界面阻抗匹配，从而在极薄器件厚度下形成强光学共振。

在该体系中，聚苯胺材料在电化学掺杂与去掺杂过程中呈现出显著的复折射率变化。研究团队利用Gires – Tournois谐振器对光学参数变化的高灵敏性，使PANI的微小光学调制即可引发共振波长的显著漂移，从而实现覆盖全可见光谱的颜色变化。实验结果表明，该单像素器件在 -0.2 V至 0.8 V的亚伏级电压范围内即可实现高达 $\Delta \text{Hue} \approx 220^\circ$ 的色相调制，远超互补色范围，而单位面积功耗仅约 $90 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ （见图1）。

在器件稳定性方面，研究团队通过原位形成的自钝化层（self-passivation layer）有效抑制了电化学反应过程中Pr-Ge层的结构退化，使器件在数百次循环中保持稳定、可逆的颜色切换行为。进一步地，PANI所具有的亚稳态特性使像素在断电后仍可维持其光学状态，从而实现了像素内存储（memory-in-pixel）功能，大幅降低了静态显示功耗（见图2）。

在系统层面，研究人员还成功构建并演示了 5×5 可独立寻址单像素阵列，并验证了该方案在从厘米级图像显示到 $1.5 \mu\text{m}$ 像素间距（约16,900 PPI）的超高分辨率结构中的可扩展性，充分展示了这一单像素系统在未来微显示技术中的应用潜力（见图3）。

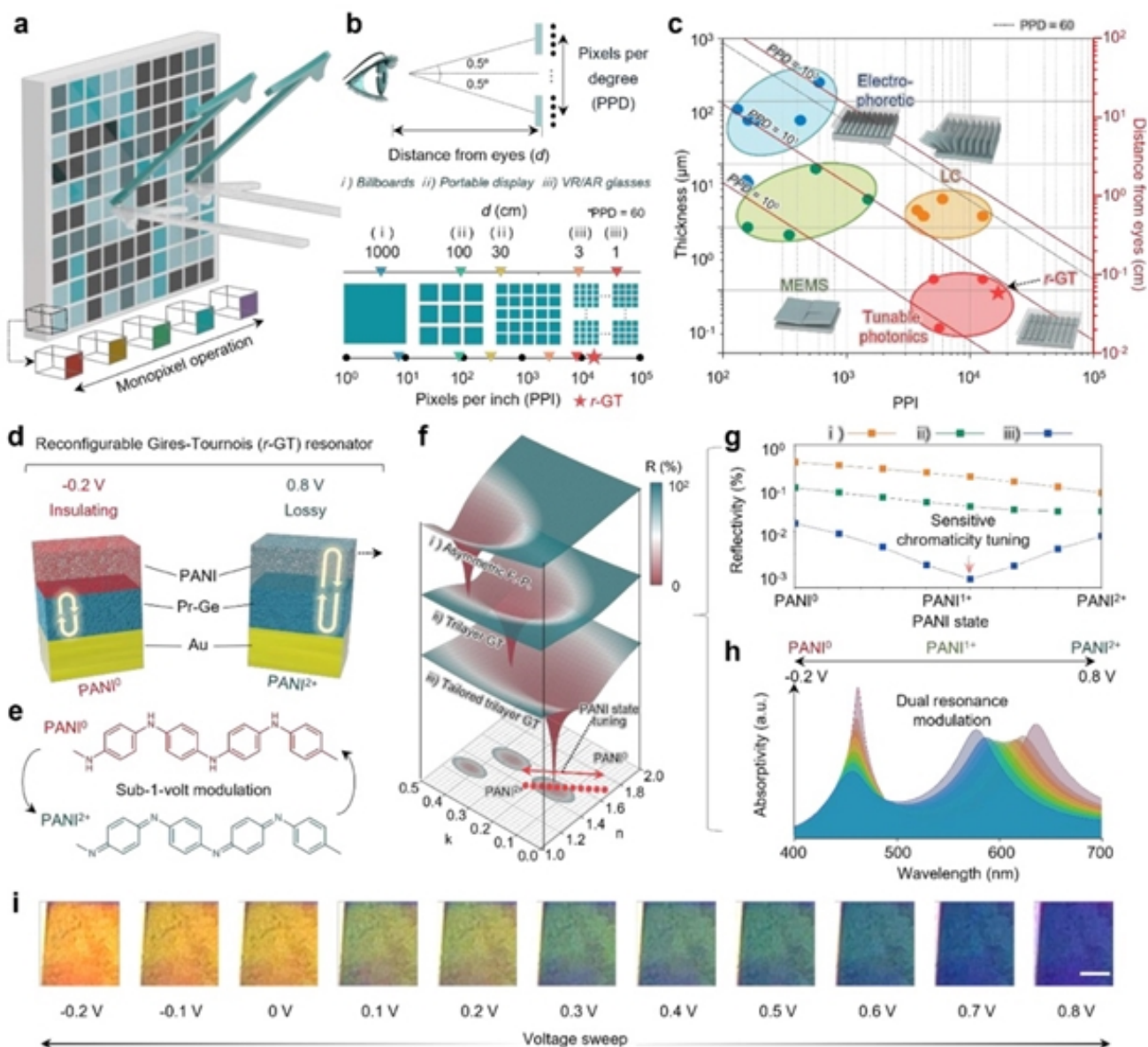


图1：可重构 Gires – Tournois 单像素阵列。a可重构 Gires – Tournois (r-GT) 单像素阵列及其反射光实现全彩色度显示的示意图。b 像素每度 (pixels per degree, PPD) 与人眼观看距离d之间的关系，该关系决定了像素的最小间距。例如，从电子广告牌到VR/AR眼镜等不同应用场景所需的像素密度范围分别约为 87 像素每英寸 (PPI) 至 10,000 PPI。c 可电寻址像素阵列的像素厚度与其像素密度 (PPI) 的对比关系。右侧纵轴表示与人眼的观看距离，红色实线表示在不同PPI条件下对应的PPD，范围从100到102。d r-GT单元的分层结构示意图，由三层谐振器 (Au/Pr-Ge/PANI) 构成，其中PANI的光学状态决定 r-GT 的谐振模式。e PANI 的分子构型及其可进行电激发切换的光学状态示意图，可在绝缘态 (PANIO)、中间态 (PANI1+) 和金属态 (PANI2+) 之间转换。f 不同谐振器结构的模拟反射光谱，包括非对称 Fabry – P é rot腔、三层 GT 谐振器以及优化设计的三层 GT 谐振器。散点表示 PANI 在不同氧化还原状态下的复折射率 (n) 与消光系数 (k)。g 不同结构配置下 r-GT 的反射率特性：i) 非对称 Fabry – P é rot谐振器，其中 PANI 直接沉积在 Au 基底上；ii) 三层 GT 谐振器，在 Au 与 PANI 之间引入致密的非晶 Ge 层；iii) 优化设计的三层 GT 谐振器，在 Au 与 PANI 之间引入 Pr-Ge

层。在共振波长处，随着 PANI 在 PANI⁰⁺ 至 PANI²⁺ 的不同氧化还原状态之间循环，其反射率发生显著变化。h-r-GT 的吸收率随 PANI 氧化还原状态变化的响应特性，其中红色曲线对应 PANI 处于完全还原态时的吸收光谱，蓝色曲线对应完全氧化态。i-r-GT 器件颜色变化的实物照片。比例尺为 1.5 cm。

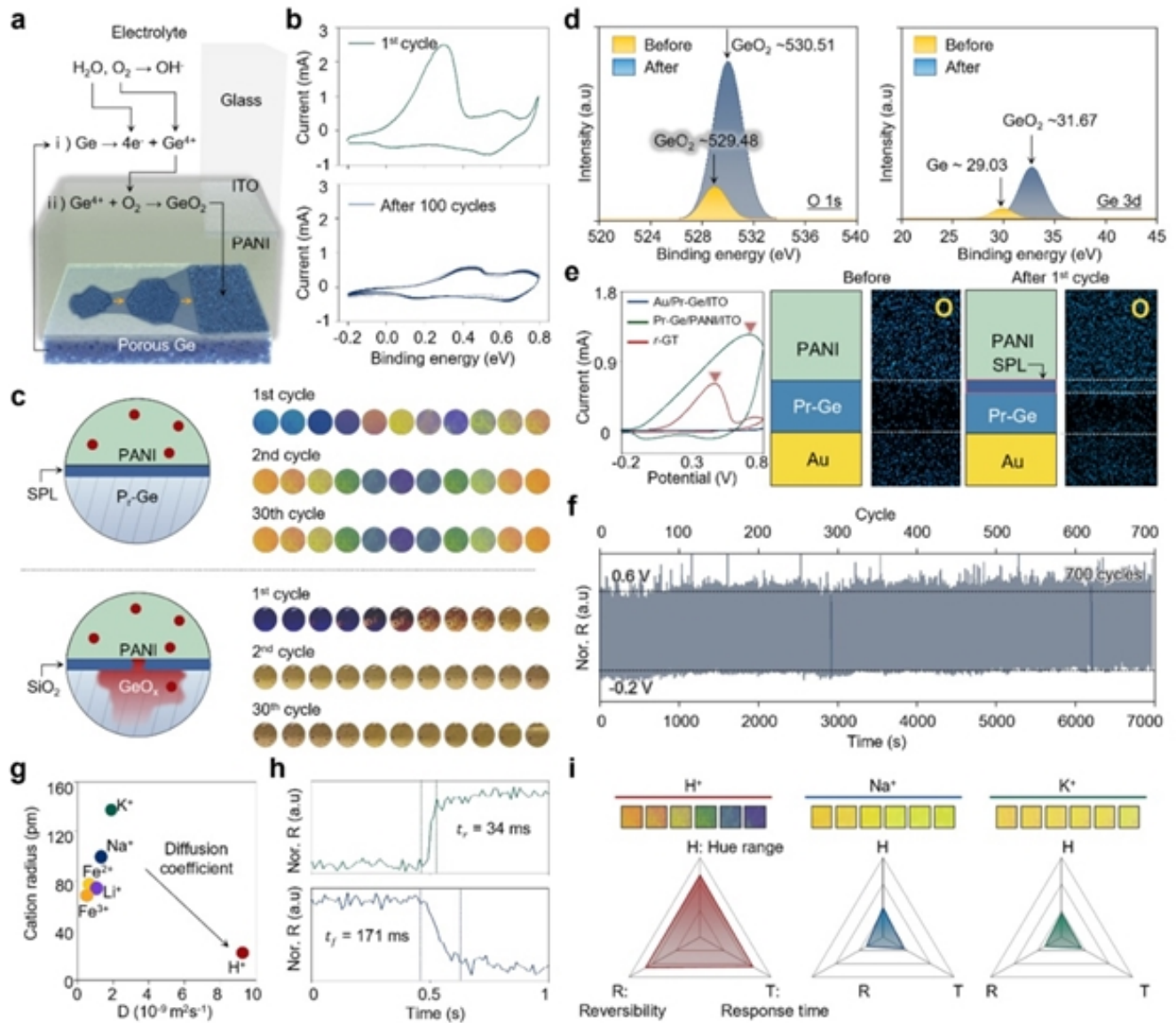


图2：r-GT 中自钝化层（self-passivation layer，SPL）的表征。a 自钝化层形成过程的示意图。Pr-Ge 层在电子与氧的共同作用下发生氧化反应，从而形成 SPL。b r-GT 器件在首个循环（红线）以及经历 30 个循环之后（蓝线）的循环伏安（cyclic voltammetry，CV）曲线，所采用的电极为 Ag/AgCl。结果显示 r-GT 器件在初始氧化阶段出现明显的强氧化峰，随后在后续循环中表现出稳定的电化学响应。c 光子在 SPL 与 SiO_2 层中的透射特性示意图及其对应的反射颜色实物照片。d PANI 与 Pr-Ge 层界面处的 O 1s 与 Ge 3d 的 X 射线光电子能谱。蓝色曲线表示 r-GT 在发生氧化还原反应之前的状态，红色曲线表示反应之后的状态。e 在扫描速率为 5 mV s⁻¹ 条件下，Au/Pr-Ge/ITO（蓝线）、Pr-Ge/PANI/ITO（绿线）以及 r-GT 谐振器（红线）的循环伏安曲线。同时给出了 r-GT 横截面的能量色散 X 射线谱分析结果。X 射线

谱显示，在氧化还原反应后，自钝化层区域内氧元素（蓝色）的原子百分比明显增加。f
在电压于 -0.2 V 至 0.6 V 之间循环变化（时间间隔为 10 s ）的条件下，器件经历 700
次循环后的反射光谱稳定性。g
基于阳离子半径与扩散系数，对不同阳离子与质子进行对比分析。h
器件电响应反射特性的开关速度，其中上升时间约为 34 ms ，下降时间约为 171 ms 。i 采用不同阳
离子电解质时，在色相调制范围（H）、响应时间（T）以及可逆性（R）方面的性能对比。

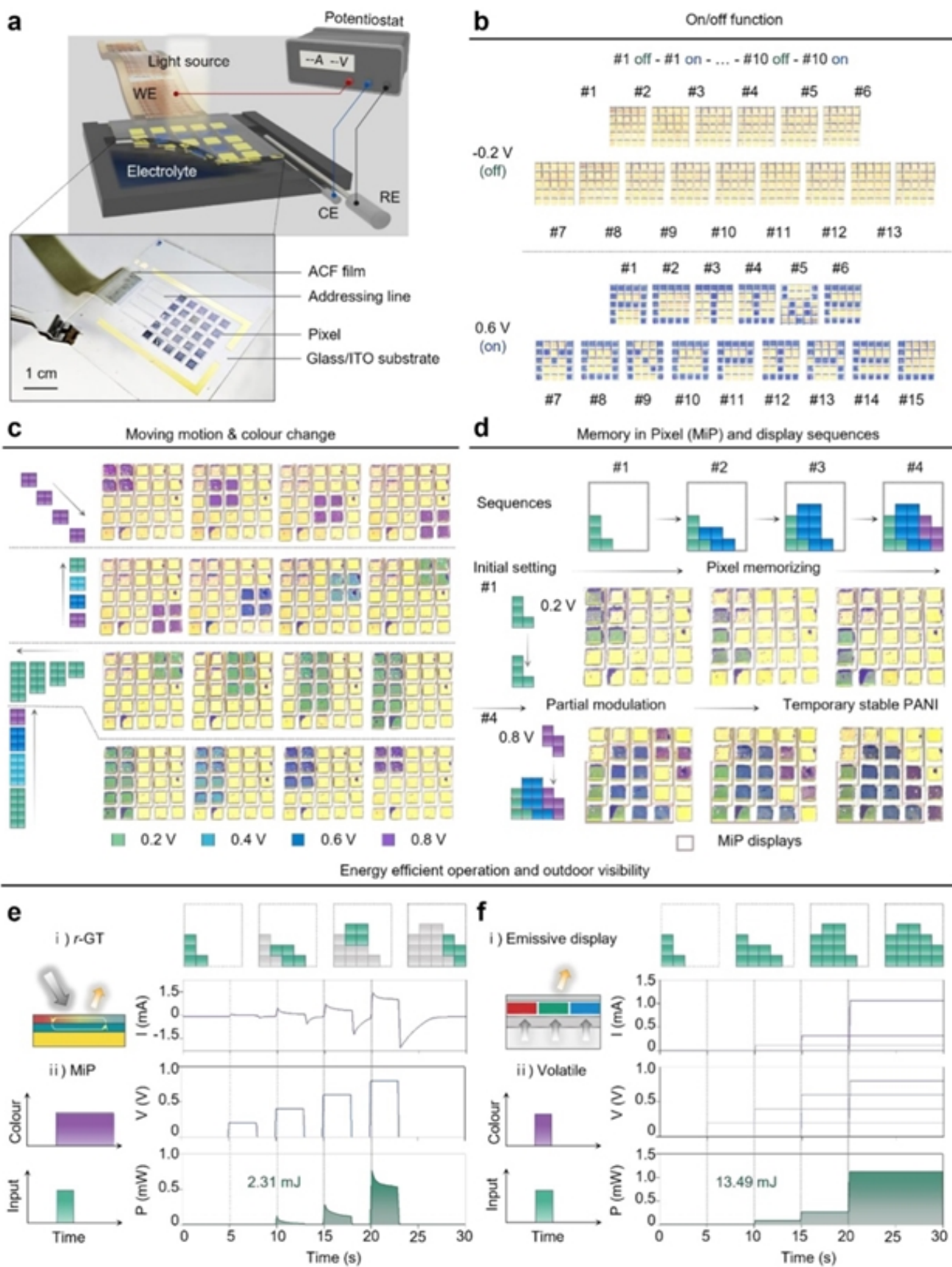


图3：r-GT 单像素阵列的电化学表征与显色性能。a r-GT谐振器的光学测量系统示意图以及 5×5

r-GT谐振器阵列的实物照片。b

具有独立控制开/关功能的像素阵列实物照片，显示由像素点构成的ACTIVE MONOPIXEL字样。c

具有电可寻址特性的像素阵列在预编程场景下的实物图像，包括动态图案与颜色变化过程。d r-GT单像素的光学存储特性示意图，用于随时间连续呈现经典游戏Tetris的任务过程。e – fr-GT谐振器（e）与商用发光二极管（f）在序列处理过程中功耗的对比分析。

总结与展望

综上所述，该研究通过将导电高分子材料与精密设计的 Gires – Tournois 光学谐振结构深度融合，首次在微米尺度单像素中实现了亚伏级驱动、低功耗、宽色域且可寻址的全彩反射式显示方案。该工作不仅在显示性能指标上显著优于现有反射式与电致变色技术，也在器件可扩展性与系统集成层面展现出明显优势。

该 r-GT 单像素体系在近眼显示、户外低功耗显示以及混合发光-反射显示系统中均具有广阔的应用空间，为低功耗可重构光子器件与下一代显示技术提供了重要的物理机制与工程实现范式，也为单像素显示技术的进一步发展奠定了坚实基础。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02228-2>

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：Hyeon-Ho Jeong 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