液晶光谱单透镜：光学成像与光谱探测功能“合二为一”

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/30955.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！

液晶光谱单透镜：光学成像与光谱探测功能“合二为一”。 导读

近日，武汉大学郑国兴、李子乐团队联合南京大学陆延青、陈鹏团队提出了基于光谱单透镜的新型高光谱成像技术。该技术利用液晶的多维度光波操控能力，将光学成像与光谱探测功能合二为一，打破了传统高光谱相机中透镜+光谱仪级联的限制，为解决微型化光谱成像系统中的空间—光谱性能相互制约难题提供了新思路。这一成果将进一步促进高光谱成像技术在便携式传感设备中的应用。

该研究成果以Electrically tunable planar liquid-crystal singlets for simultaneous spectrometry and imaging为题在线发表在Light: Science Applications。李子乐研究员、陈鹏副教授和郑国兴教授为本文通讯作者。研究生周舟、张逸恒、谢颖欣为本文共同第一作者，鹏城实验室余少华院士、南京大学陆延青教授、香港大学张霜教授给予了重要的指导和建议。该工作得到了国家重点研发计划、国家自然科学基金等项目支持

研究背景与挑战

信息获取的维度直接影响着人类对世界的理解和认知。将光波作为载体，以感知世界的信息一直是光学中的重要研究方向。

早在17世纪，牛顿就提出了透镜成像公式，并进行了著名的棱镜色散实验，从而开启了透镜和光谱仪获取空间和光谱信息的研究。通过级联这两种器件，可以同时获取空间和光谱数据，从而得到丰富的信息。

然而，这种级联方式会引入系统体积、光谱探测性能以及成像质量之间的制约，阻碍高光谱成像系统迈向便携性和小型化。这一问题的本质在于光波调控器件的能力受限：光学成像和光谱探测功能依赖于不同的光波调控机制（相位调控和光谱调控），二者难以通过单片光学元件实现。因此，为了破除微型化高光谱成像系统中的性能制约，需要探索新的多维度光波调控机理。

基于光谱单透镜的微型化光谱成像

传统透镜仅能获取物体的强度分布信息，研究团队设想：是否可以设计一种多功能透镜以获取物体光谱分布？

为此，他们提出了光谱单透镜的概念。为了在保持原有成像功能的同时，探测物体的光谱信息，光谱单透镜需要具备两个特征：

(1) 在宽光谱范围内具备精确的相位控制，以保证高质量成像；

(2) 在不同波长下的聚焦特性（如聚焦效率等）差异尽可能大，从而更好地提取光谱信息。

研究团队发现，平面液晶光学这一平台可以完美契合光谱单透镜所需的光波调控。在液晶材料中，分子通常呈现一定程度的有序排列，其平均取向方向可以由指向矢描述。

如图1所示，液晶的指向矢由两个几何上完全独立的角度——方位角 θ 和极角 α ——描述。通过深入研究液晶材料对光波的调控机制，研究团队发现这两种角度对应两种不同的光波操控能力。其中极角影响液晶的等效双折射率，从而导致其光谱响应的变化。而通过控制方位角，则可以引入几何相位（又称：PB相位），操控入射光波的波前。由于这两种光波操控取决于液晶的不同几何参数，它们是完全解耦，互不影响的。因此，可以通过光控取向技术控制液晶的方位角分布，进行平面化取向，使其具有透镜聚焦功能。与此同时，在器件上施加电压改变液晶的极角，控制透镜的透射光谱，从而得到同时具有宽带聚焦和光谱可调特性的平面透镜。

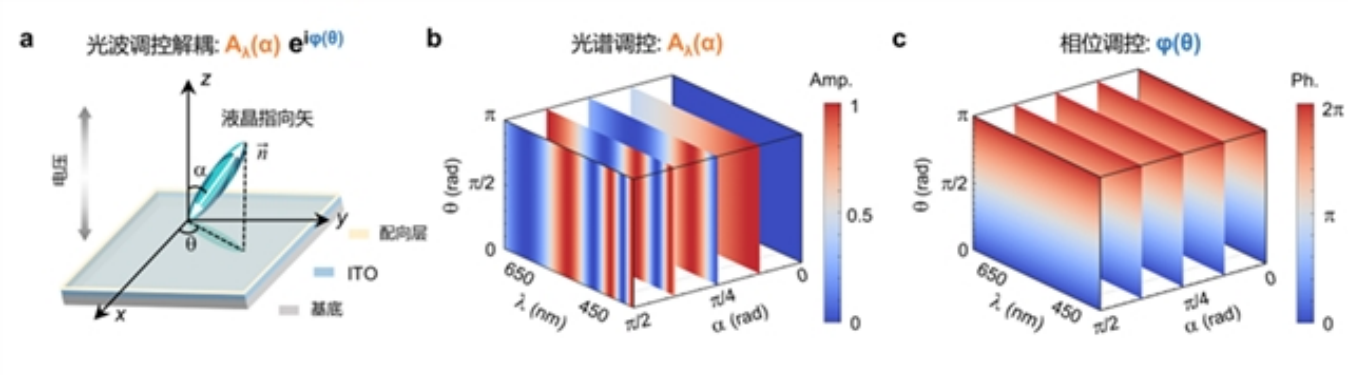


图1：液晶器件对光波光谱和相位的结构操控。a. 液晶指向矢示意图。b. 光谱调控（只与极角 α 有关）。c. 相位调控（只与方位角 θ 有关）。

基于以上光波调控特性，团队建立了液晶光谱透镜(LC-SLENS)的成像模型，并提出了图2所示的光谱数据立方体重构方法。通过对LC-SLENS施加不同电压，获取多帧不同光谱响应调制下的强度图像，随后通过凸优化算法逐点恢复不同像素的光谱曲线，并通过解卷积实现图像去模糊，从而得到待测目标的光谱数据立方体。

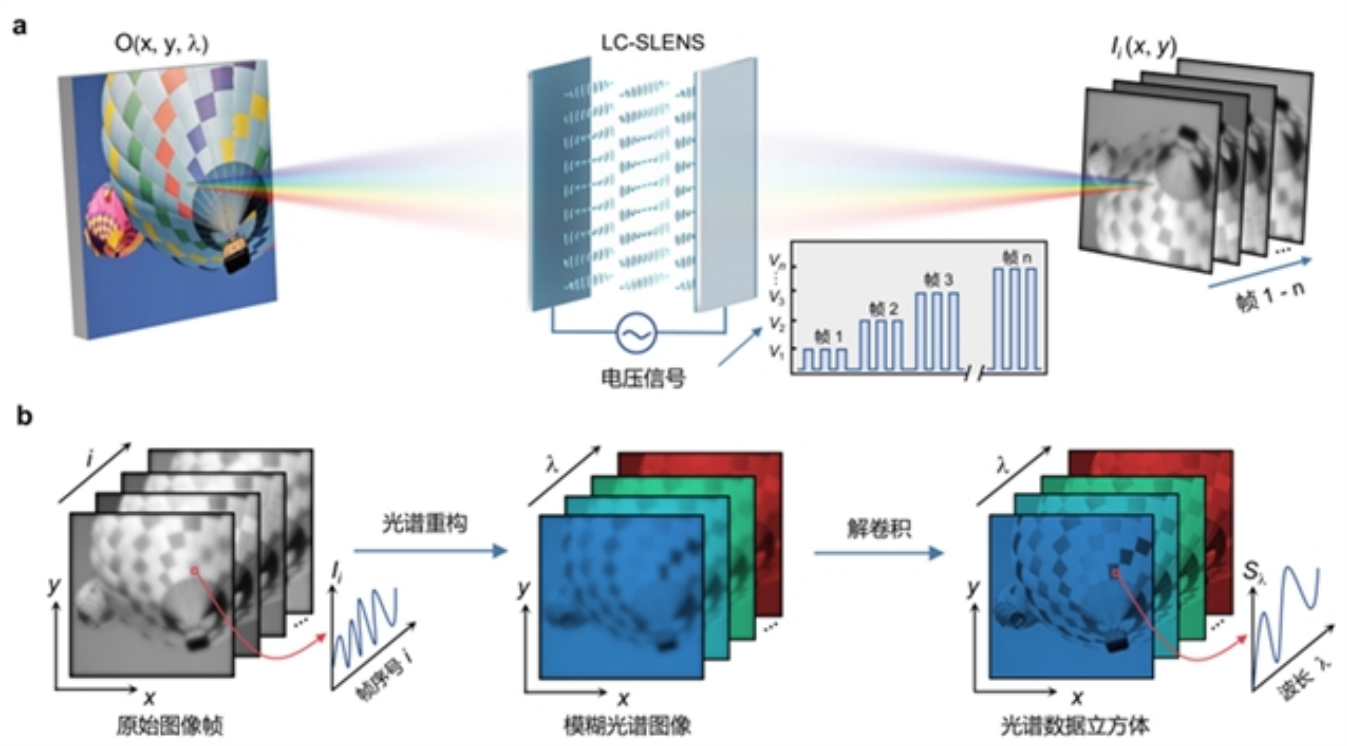


图2：基于液晶光谱透镜的光谱数据立方体获取。a 初始数据采集。b 光谱图像重构。

研究团队加工了液晶透镜，并对其进行了性能表征（图3）。实验结果表明，该透镜的光谱响应可以通过外加电压灵活调节，且不影响透镜的聚焦功能。得益于几何相位的宽带特性和特殊相位设计，透镜在整个工作波段范围（550 nm – 700 nm）内都具有较好的聚焦能力。

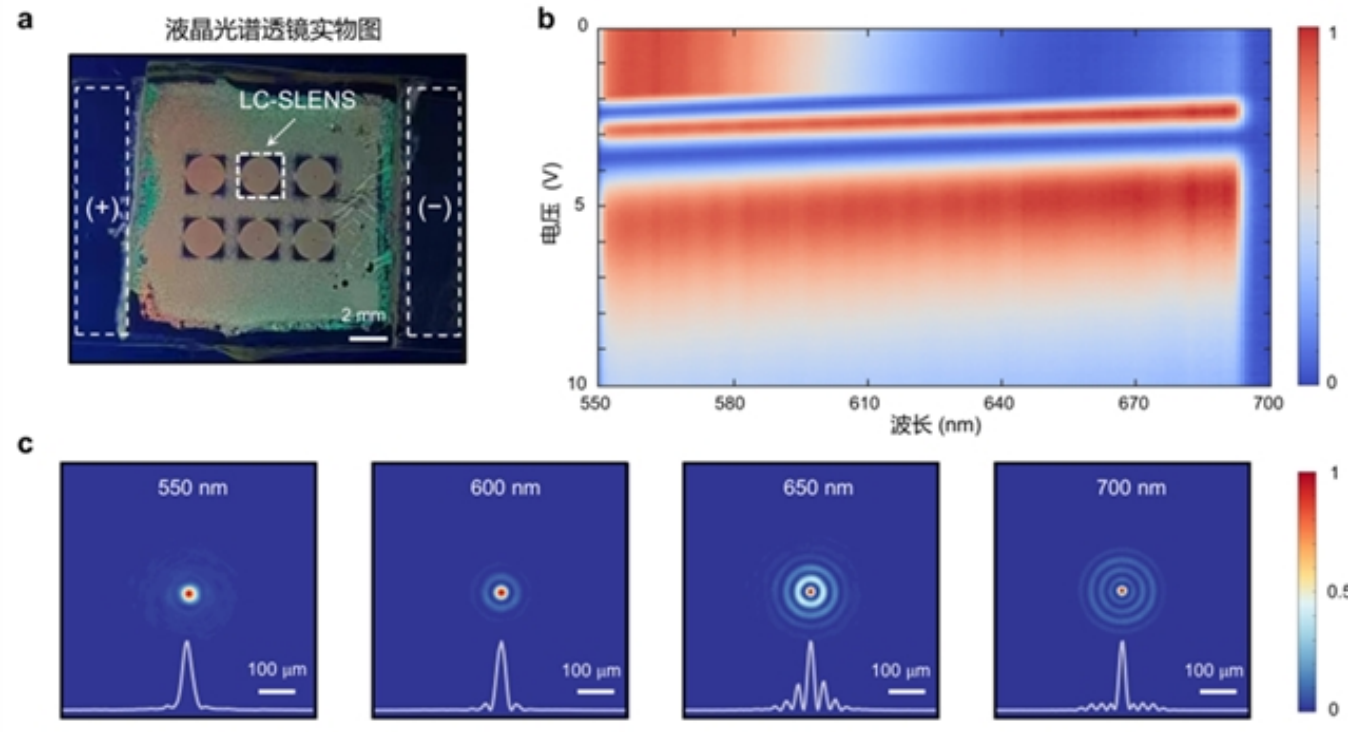


图3：液晶光谱透镜性能表征。a. 器件实物图。b. 不同电压下透镜的光谱响应。c.

不同波长下的点扩展函数。

研究团队进一步将液晶光谱透镜与图像传感器结合，以一种极简的方式构建了高光谱相机。只需将标准相机中的透镜替换为液晶光谱透镜，并对系统的特性进行一次标定，即可获取待测目标的光谱信息。他们采用颜色板与USAF 1951分辨率板进行了高光谱相机性能测试（图4）。其中，重构的光谱保真度大于95%，系统空间分辨率达到1.7倍衍射极限，验证了基于光谱单透镜实现高光谱成像的有效性。

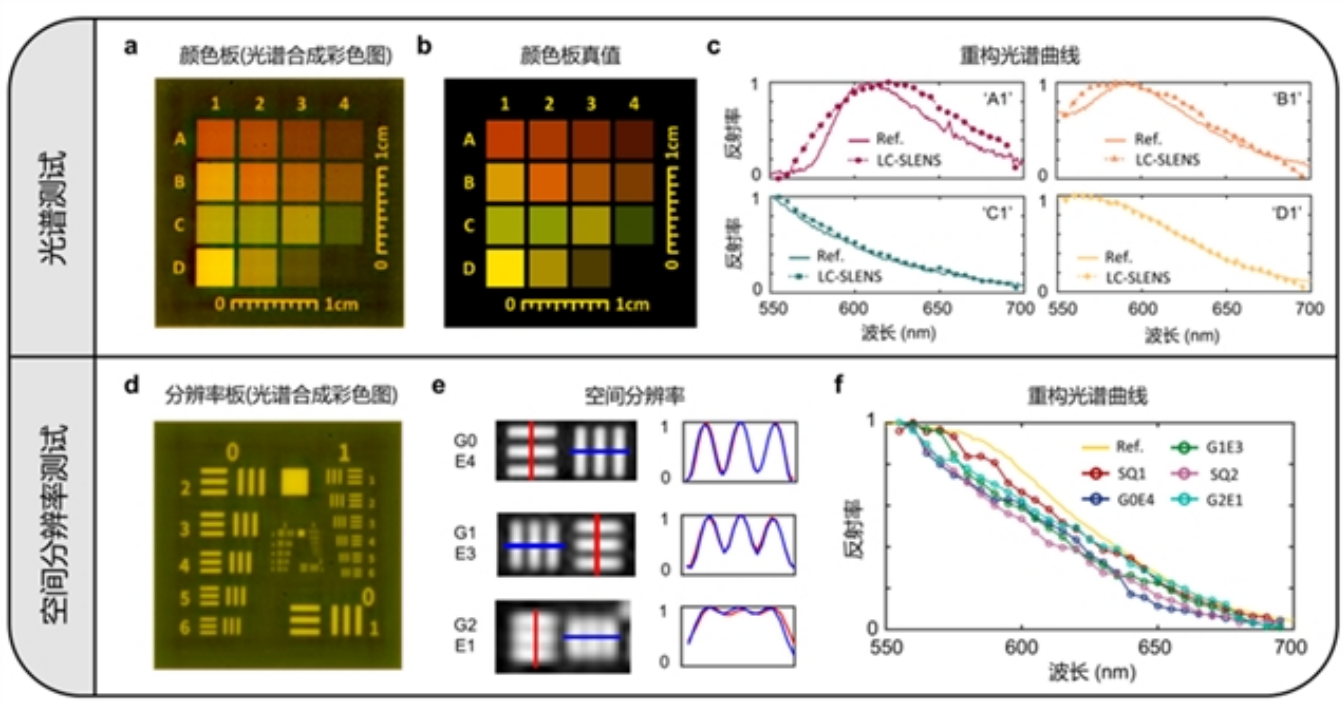


图4. 光谱成像测试结果。a-c. 颜色板光谱成像结果。d-f. 分辨率板光谱成像结果。

前景与展望

研究团队所提出的液晶光谱透镜，其功能区厚度仅数微米，具备小型化、轻量化优势；另外，其驱动电压低于10V，可与众多电子仪器设备兼容（无需额外增加配套的驱动硬件），形成光谱透镜+的商业应用模式；与基于复杂昂贵半导体工艺（电子束或光刻机光刻、刻蚀、材料生长等）的超表面、二维材料等微型化光谱技术相比，液晶器件的批量制备技术相对成熟，其成本甚至低至数十元，因此具备较高的潜在商业应用价值。

总而言之，这项工作提出的光学成像+光谱探测功能二合一的液晶光谱单透镜，使得高光谱相机在小型化、低成本化的同时具备高性能。该工作为微型化光谱成像提供了新思路，为便携式智能传感在家庭诊断、消费电子等领域中的广泛应用开辟新的道路。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-024-01608-w

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等事宜，请与我们接洽。

作者：郑国兴等 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转发