
动态4D菲涅尔透镜驱动功能光学革新

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33367.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！

动态4D菲涅尔透镜驱动功能光学革新。 导读

菲涅尔透镜，这一最初为灯塔设计的经典光学元件，正通过现代增材制造技术在功能光学领域迎来突破性发展。近期，阿联酋哈利法大学的Haider Butt研究团队在Light: Advanced Manufacturing发表研究成果，题为Development of 4D printed smart fresnel lenses: dynamic photochromic and UV-blocking capabilities via vat photopolymerization。本研究采用槽式光聚合(VPP)技术，结合数字光处理(DLP)工艺，制造具有光致变色特性的自适应4D打印智能菲涅尔透镜。

这种创新透镜融合了精确的光学性能和自适应的颜色调节能力，代表了功能光学从静态元件向动态响应系统的重要演进。通过将光致变色粉末集成到透镜结构中，研究团队实现了"变色龙"般的环境适应能力——在紫外线照射下，透镜会自动变暗，有效过滤紫外线和部分可见光，同时保持几何精度和光学清晰度。测试表明，这种透镜在多次紫外线循环照射后性能稳定，展现出优异的耐久性和功能性。

相比传统光学元件的功能单一性和制造局限性，这项功能光学研究不仅突破了传统制造瓶颈，还为智能穿戴、航空航天、医疗健康等领域提供了从动态光调制到高级紫外线过滤的多样化应用可能。这一成果充分展示了增材制造技术在创造定制化多功能光学器件方面的强大潜力，预示着功能光学向自主响应方向发展的广阔前景。

研究背景

传统光学透镜大多为静态设计，无法根据环境光变化而主动调控其透光性能；现有制造技术在生产复杂结构和多功能器件方面也存在局限。随着增材制造（3D打印）技术的发展，尤其是4D打印技术的提出，为开发具有动态光学调控能力的智能设备提供了新思路。

小百科1：4D打印技术

4D打印是3D打印技术的延伸，其中的第四维指的是时间或变化的维度。这种技术制造出的结构能够对外部刺激（如光、热、湿度或pH值变化等）做出响应，从而改变其形状、功能或性能。在光学领域，4D打印技术通过将响应性材料（如本研究中的光致变色物质）整合到3D打印结构中，使光学元件能够根据环境条件动态调整其光学特性。这种自适应性使得光学器件不再是静态的，而是能够智能响应周围环境变化，为光学系统设计带来全新的可能性。

小百科2：功能光学

功能光学(Functional Optics)是一个新兴的跨学科研究领域，它超越了传统光学元件的基础功能，致力于开发具有特殊响应能力或多功能特性的光学系统和器件。

与传统光学元件主要关注光的传输、折射和聚焦等静态功能不同，功能光学强调光学器件能够对外部刺激（如光、热、电、力学变形等）做出动态响应，或整合多种功能于一体。这类光学元件能够实现自适应调节、智能响应和多功能集成，为光电子、通信、医疗、航空航天等领域带来革命性的应用可能。

功能光学研究挑战主要来自于结构复杂性和多材料分布，这些特性往往超出了传统制造工艺的能力范围。然而，随着增材制造（3D打印）技术的发展，特别是4D打印技术（能够制造出对环境刺激有响应能力的结构）的出现，功能光学器件的设计和制造正经历着前所未有的革新。

研究简介

研究团队利用DLP打印技术，通过将含有特定浓度的光致变色粉末混合进树脂中，实现了精准控制透镜几何形状和光学性能。该树脂配方包含甲基丙烯酸2-羟乙酯（HEMA）、聚乙二醇二丙烯酸酯（PEGDA）和三甲基苯甲酰基二苯基氧化膦（TPO）分别作为单体、交联剂和光引发剂，再添加以光致变色粉末。当光致变色粉末受到紫外线辐射时，其经历可逆的异构化过程，使得光学性能发生改变。最终发现光致变色粉末浓度为0.1% wt和0.2% wt的配方能够在420 nm ~700 nm波段实现70 ~ 85%的透光率，而在紫外线照射下，所有透镜组在5 ~10秒内转变为有色状态，对400 nm附近波段的透光率从40%降到20%，真正实现了4D打印菲涅尔透镜的动态光学性能。

研究亮点

亮点1：精密制造革新

研究团队通过DLP技术以微米级别精度实现光致变色菲涅尔透镜的制造。所使用的材料是以1：1的比例将单体与交联剂混合，并将2.5%的光引发剂添加到所得树脂溶液中，再按照实验设计的梯度浓度添加光致变色粉末。常规的DLP打印技术由于支撑结构和层纹效应，会对曲面透镜带来制造缺陷，例如表面粗糙度过大引起透过率下降、焦距不准确等问题。为了优化打印质量，研究人员通过使用PVC薄膜，避免切片软件设计的支撑结构对模型光滑度带来影响。同时，通过差异化调控打印平台的运动速度与曝光时间，对模型的不同区域设置不同参数，确保打印过程中每层结构的最佳平衡，最终实现了35 μ m的打印精度，得到光滑的透镜表面。团队设计直径为25 mm，厚度为2 mm的菲涅尔透镜，经过测试，所制备的菲涅尔透镜的焦距范围为40 mm至60 mm。

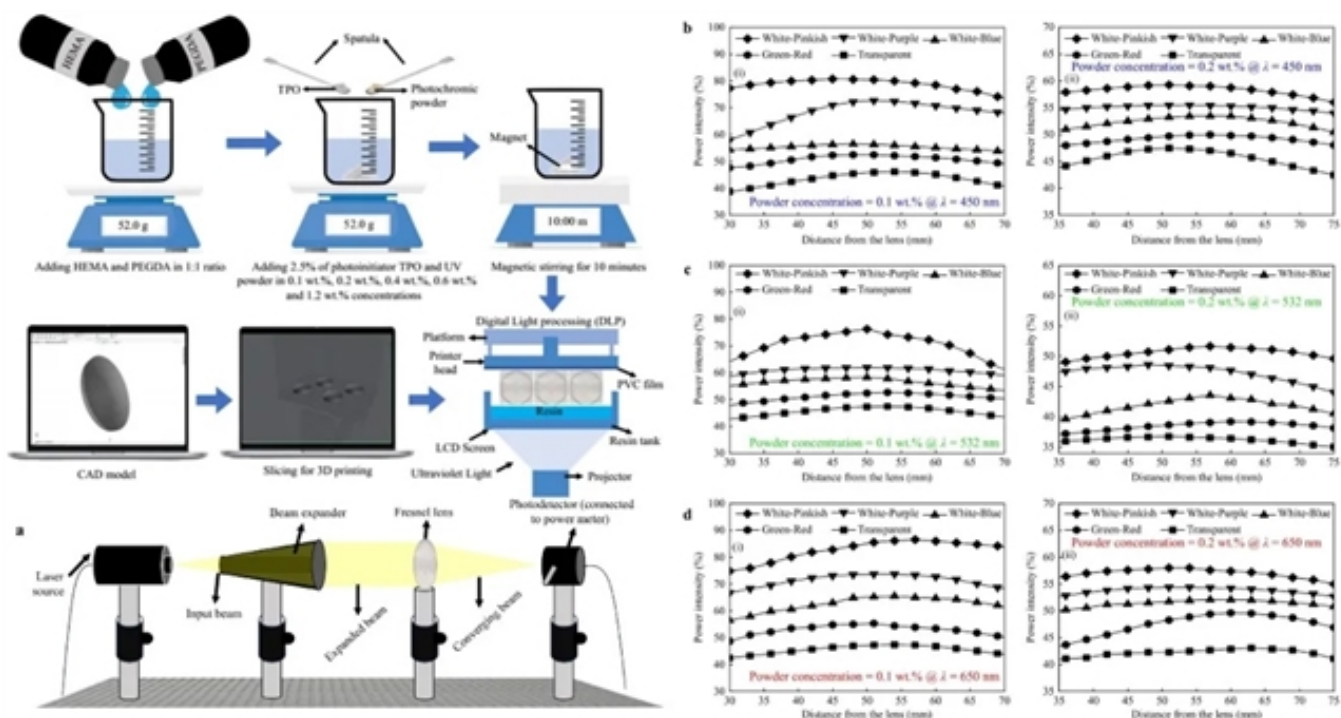


图1：智能透镜制备过程与焦距测试

亮点2：动态光学调控

光致变色粉末通常含有中心物质，如螺吡喃（spiropyran），包裹在三聚氰胺甲醛（melamine formaldehyde）树脂中以获得稳定性。螺吡喃分子在无紫外光照射时，处于闭环的非共轭结构，呈现无色或浅色；当受到紫外光照射时，螺吡喃分子经历开环异构化，转变为具有共轭结构的甲亚胺(merocyanine)形式，这一变化使得分子对可见光的吸收特性发生改变，通常表现为颜色加深；在去除紫外光照射后，Merocyanine形式会逐渐回转为原始的螺吡喃形式，颜色恢复到无色或浅色状态。在实验中，研究人员将不同浓度的光致变色粉末添加到树脂中，通过精确控制粉末的种类和浓度，调节透镜在紫外光照射下的颜色变化程度和透光率。团队制备的菲涅尔透镜在紫外光（375 nm，1600流明）激活下，能够迅速改变颜色和透光性能，表现出优异的动态光学调控能力。测试结果显示，这些透镜在紫外激活后，颜色变化明显，例如从白色变为蓝色、紫色等，同时能够有效阻挡紫外线和蓝光。

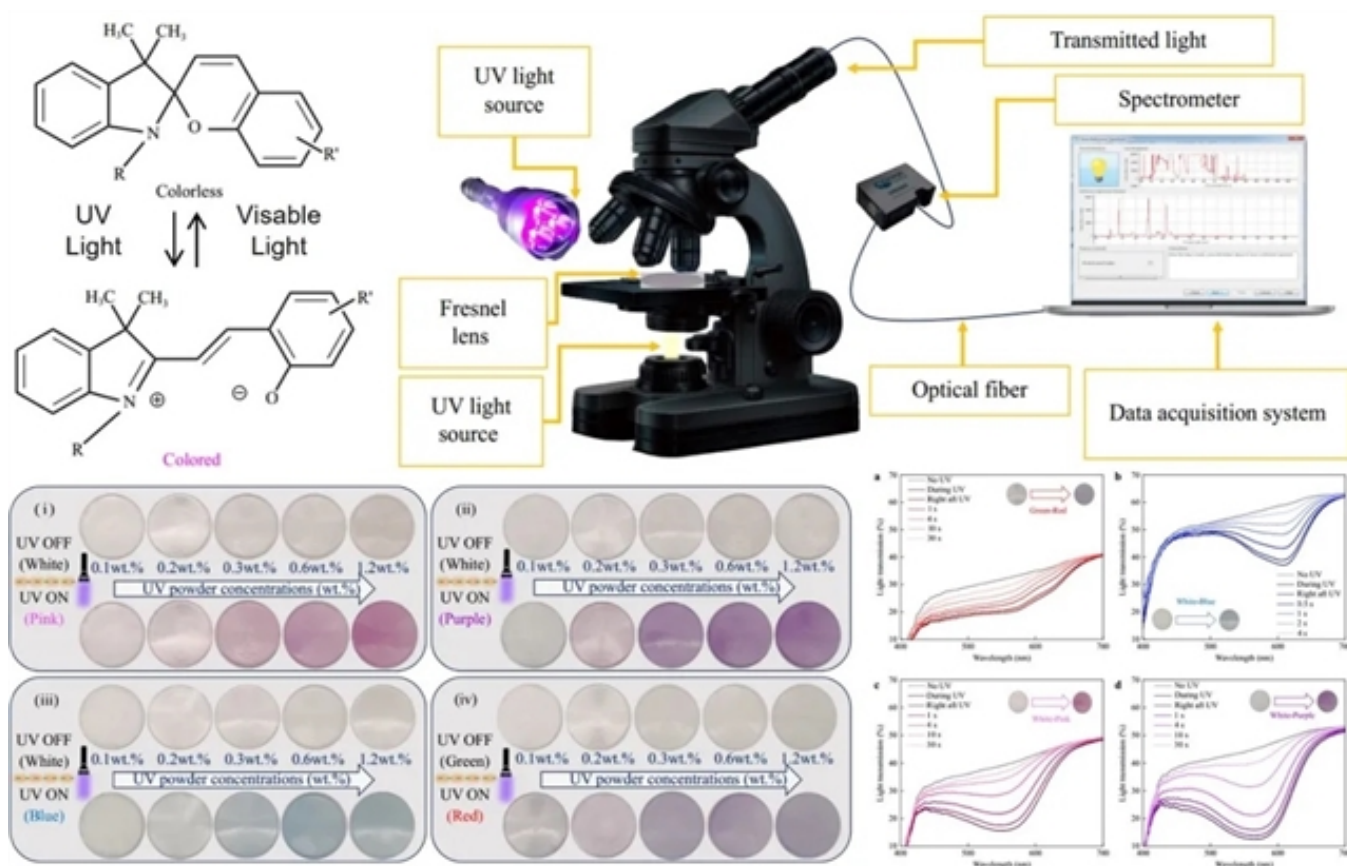


图2：智能菲涅尔透镜的动态光学响应特性

亮点3：光谱自由定制

研究人员通过在透镜中采用不同类型和浓度的螺吡喃染料，实现了对透镜光谱特性的自由定制。实验中，研究人员将5SP（吡啶螺吡喃）和6SP（具有6-硝基取代的吡啶螺吡喃）光致变色粉末与树脂混合，调节其浓度。所使用的粉红色和红色粉末可以分别被识别为5SP和6SP染料。与6SP染料相比，5SP染料表现出明显更快的反向光致变色速率，导致后者的更显著的光致变色强度。对于高极性溶剂，5SP染料在约560-610 nm处表现出最大吸收，而6SP染料在530-560 nm处具有最大峰值吸收。FTIR与XDR结果显示，利用此材料配方制备的透镜能够成功聚合并且具有无定形性质。同时，不同粉末组合和浓度的透镜具有不同的特征峰位，观察透镜在紫外光照射下的颜色变化和透光率，不同透镜对不同波段的光线具有一定的吸收特性，能够满足特定的滤光需求。

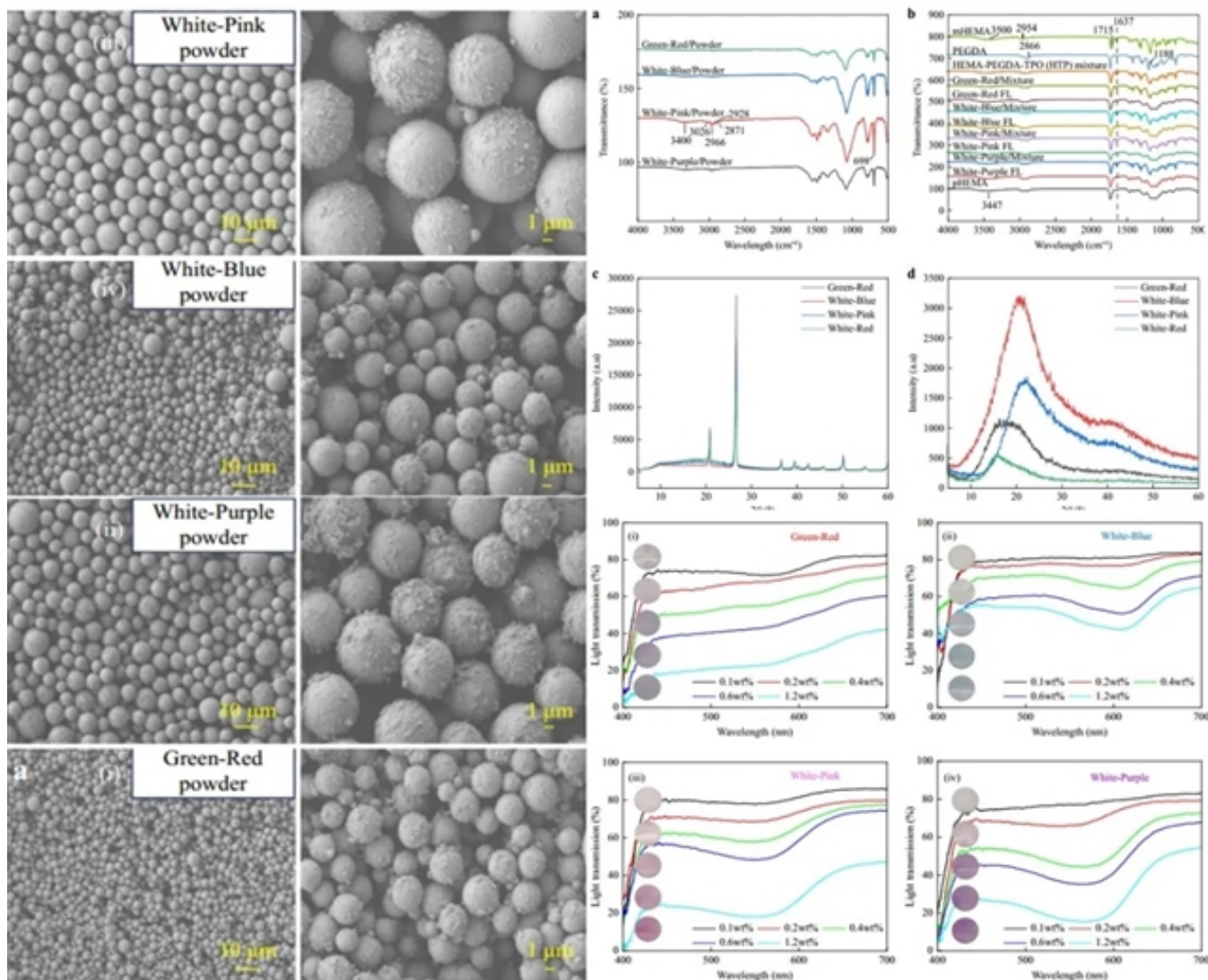


图3：不同UV响应材料及其光致变色效果

总结与展望

该研究成功验证了智能透镜在透光率、响应速度、循环寿命上的可行性，开辟动态光学新赛道。其技术路径不仅解决了传统菲涅尔透镜的功能单一性问题，更为未来动态光学器件的设计提供了范式。未来研究将进一步优化材料配比、提高打印精度，探索更多具有响应功能的光致变色材料，以实现更高性能、更广应用范围智能光学器件。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.011>

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：Haider Butt 来源：《光：先进制造》

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