

---

# 基于四分之一波片透镜三重波前调制的多深度切换

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37470.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！*

基于四分之一波片透镜三重波前调制的多深度切换。 导读

在扩展现实光学领域，调节-辐辏冲突是影响用户视觉舒适度和沉浸感的核心挑战，传统基于半波片的几何相位透镜因仅能实现二进制波前调制，难以满足多深度、高精度的焦平面切换需求。近日，韩国庆北国立大学的Hak-Rin Kim团队提出了一种基于四分之一波片的几何相位透镜新方案，通过偏振驱动的三重波前调制（聚焦、散焦、无穷远非调制），实现了高效的多深度切换，为解决调节-辐辏冲突问题提供了全新途径。该研究成果发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为Multi-Depth Switching by Triple Wavefront Modulation of Quarter-Waveplate Geometric Phase Lenses for Vergence-Accommodation-Matching Extended Reality，韩国庆北国立大学的Jung-Yeop Shin和Jae-Won Lee为论文共同第一作者，Hak-Rin Kim为通讯作者。

## 研究背景

调节-辐辏冲突作为扩展现实光学系统的核心瓶颈，因虚拟焦平面与真实场景深度不匹配，常导致用户视觉疲劳、沉浸感下降，严重限制了扩展现实设备的实用化进程。传统解决思路中，基于半波片的几何相位透镜通过偏振控制实现波前调制，但仅支持二进制焦深切换，焦深数量按 $2n$ 规律扩展，难以满足精细深度控制需求。而四分之一波片几何相位光学作为新兴方案，凭借三重波前调制能力，为突破传统局限、实现高密度焦深切换提供了新可能，在紧凑型扩展现实系统中展现出显著潜力。

然而，现有扩展现实光学技术仍存在诸多未解决的关键问题。一方面，传统半波片几何相位透镜架构焦深扩展能力有限，若需实现覆盖25 cm至无穷远的感知深度范围，需堆叠多层透镜，导致系统厚度增加、像差累积，且切换响应速度难以匹配实时扩展现实交互需求。另一方面，多数V arifocal方案的焦平面间距超过人眼0.3屈光度舒适阈值，或仅能实现稀疏焦深分布，无法在近场交互等敏感区域消除调节-辐辏冲突，难以兼顾深度连续性与系统紧凑性。这些问题严重制约了扩展现实设备的视觉体验提升与产业化推进。

## 创新研究

研究团队创新性地提出基于四分之一波片的几何相位透镜，实现了偏振驱动的三重波前调制（如图1）。通过解析四分之一波片条件下各向异性介质的光轴分布与偏振态演化，利用1:1强度比的调制/非调制波前分解，实现聚焦、散焦及无穷远非调制三种状态的选择性输出。这一设计突破了传统半波片GPL仅能实现二进制焦深切换的局限，使单透镜单元的焦深调控维度从2扩展至3，

为高密度多深度成像奠定了核心基础。

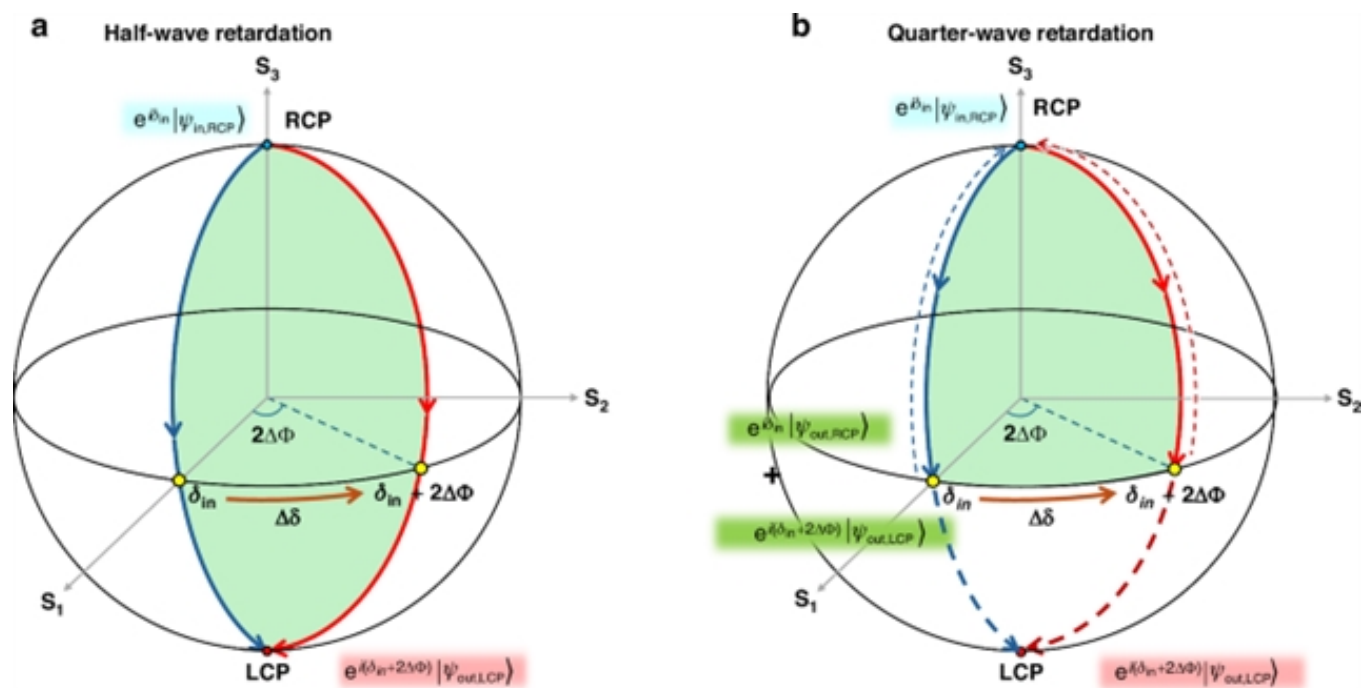


图1：各向异性介质在（a）半波片和（b）四分之一波片条件下形成的庞加莱球轮廓轨迹。

在模块集成方面，研究人员构建了双堆叠四分之一波片的几何相位透镜架构（如图2堆叠特性展示）。通过优化偏振控制层与滤波单元的组合方式，实现 $32=9$ 种离散焦深状态，焦深间隔严格控制在0.3屈光度，覆盖24.27 cm至无穷远的连续范围。相较于同等堆叠层数下传统半波片架构仅能实现的4种焦深，该方案在减少光学厚度的同时，显著提升了深度分辨率，且切换响应速度 $<1.0$  ms，满足实时扩展现实交互需求。

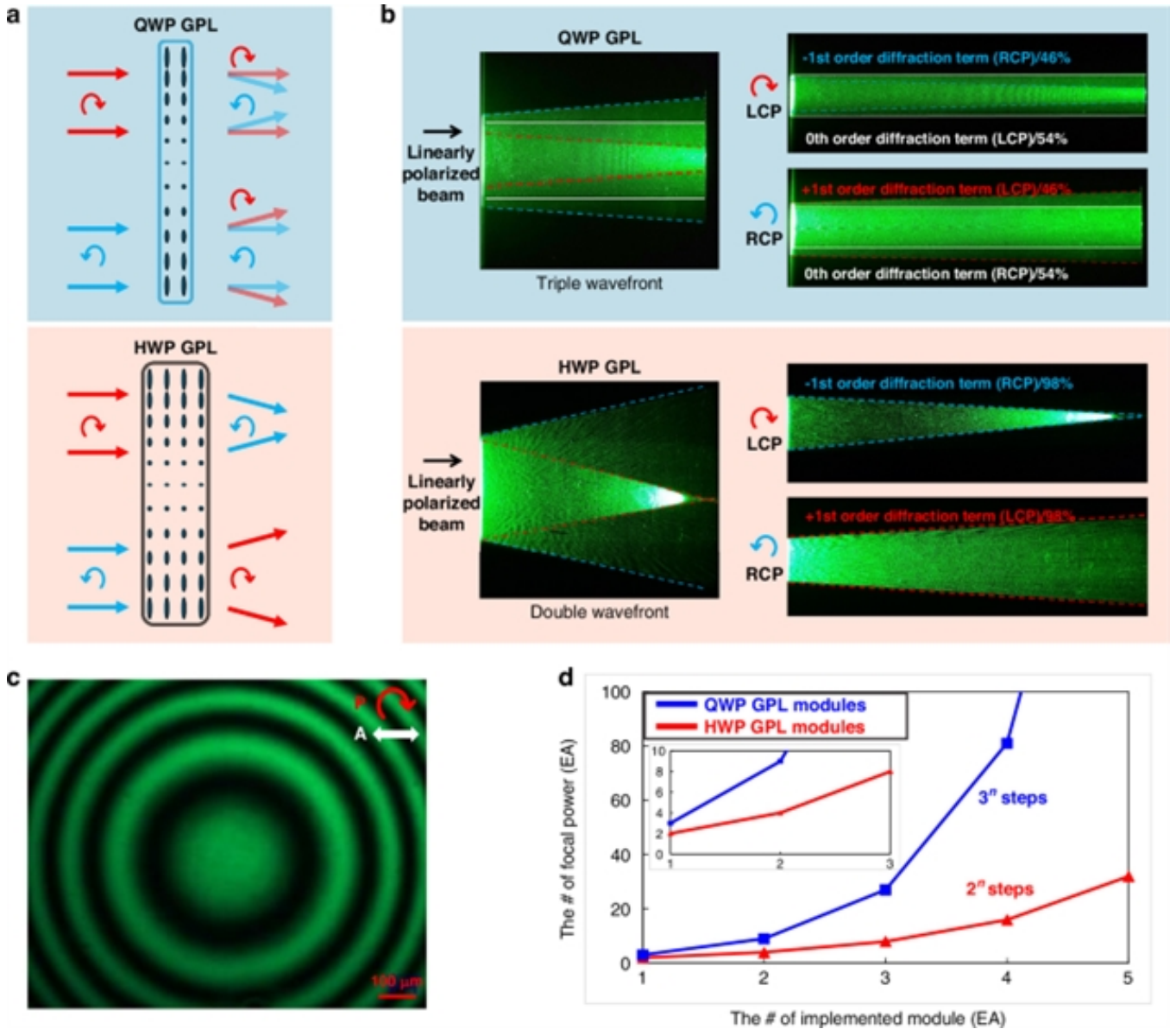


图2：(a) 半波片和四分之一波片几何相位透镜在不同入射偏振态下的波前调制效应示意图；(b) 实验光束传播结果；(c) 四分之一波片几何相位透镜的偏振光学显微镜图像（输入采用圆偏振片，输出采用线偏振片）；(d) 堆叠半波片和四分之一波片几何相位透镜模块配置下可实现的变焦距步数与模块数量的关系。

研究团队还将该模块集成于扩展现实成像系统（如图3系统架构示意），通过CODE V光线追迹优化光学参数，使虚拟像面与真实场景深度的匹配误差均低于0.3屈光度。实验中，利用9个真实物体验证了系统在各焦深下的清晰成像能力，且视场角达 $10.03^\circ - 12.91^\circ$ ，有效解决了调节-辐辏冲突问题。这种紧凑型设计兼容波导与自由曲面扩展现实平台，为下一代轻量化近眼显示提供了可行方案。

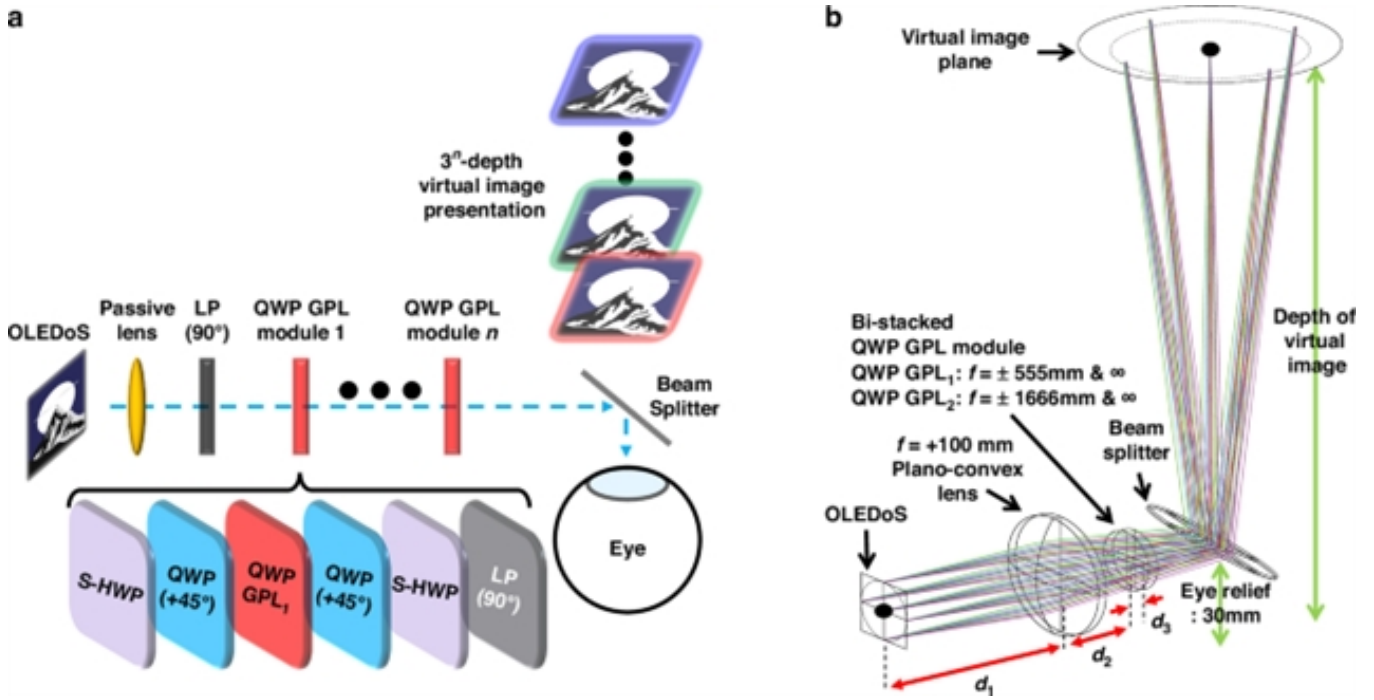


图3：（a）采用堆叠四分之一波片几何相位透镜模块实现的3n深度变焦距分光镜组合型扩展现实成像系统示意图；（b）用于设计扩展现实显示器中调节-辐辏冲突（VAC）消除型可切换深度平面的CODE V光线追迹仿真模型（基于双堆叠四分之一波片几何相位透镜的调焦切换透镜组件）。

## 总结与展望

该研究提出基于四分之一波片的几何相位透镜，通过三重波前调制实现多深度切换。双堆叠模块实现9种焦深状态，间隔0.3屈光度，覆盖24.27 cm至无穷远范围，有效解决调节-辐辏冲突，焦深数量按3n规律扩展，优于传统半波片的2n特性。未来需突破全彩成像中的色差问题，可通过手性工程优化材料实现消色差设计；进一步缩减模块厚度至1.2 mm以下，拓展至波导型扩展现实平台。该技术有望推动虚拟现实/增强现实设备在视觉舒适度与紧凑性上的突破。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02026-2>

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：Hak-Rin Kim 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](http://iikx.com)转发