

超透镜望远系统：轻量化空间目标观测的新系统

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/31908.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！

超透镜望远系统：轻量化空间目标观测的新系统。 导读

近日，中国科学院长春光机所的王建立研究团队在基于超透镜的空间目标观测方面取得进展。该研究中以像方远心光学设计为基础，优化初始光机结构及超透镜调制相位，同时使用二阶同心环结构作为超透镜的基本构型，并对其截面内的二维超原子进行了TE，TM模式兼容的拓扑优化设计。相对常规的三维超原子阵列结构，该优化设计方法大幅压缩了仿真计算资源消耗和加工时长。由此研制以5厘米口径超透镜为主镜的光阑-超透镜组合望远系统，实现了全 20° 视场内高分辨率的远景目标观测，是已有报道中超透镜口径最大的全视场高分辨成像系统。该成果进一步推进了大口径超透镜在空间目标观测领域的深度应用，以Portable Astronomical Observation System Based on Large-Aperture Concentric-Ring Metalens为题发表于国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》。中国科学院长春光机所的王建立研究员为论文第一作者，中国科学院长春光机所的王建立研究员、邓永停研究员和德国卡尔斯鲁厄学院（KIT）的Jan G. Korvink教授、邓永波教授为论文通讯作者

摘要

中国科学院长春光机所的王建立研究团队在基于超透镜的空间目标观测方面取得进展。该研究中以更易于加工的二阶同心环结构作为超透镜的基本构型，并对其二维超原子进行了横电波、横磁波模式兼容的结构拓扑优化设计。由此研制了以5厘米口径超透镜为主镜的便携式望远系统，实现了全 20° 视场内的高分辨成像，进一步推进了超透镜在空间目标观测领域的深度应用。

研究背景

超透镜通过亚波长尺寸的微纳结构调控光场，这些微纳结构也被称为超原子。超透镜具有轻量化、易集成、调控自由度高等诸多优点。目前超透镜的应用更多集中于微型机器人、内窥镜、便携式显微镜等微小型化光学成像系统中，而在可见光望远、热红外探测、光学遥感这些需要通光口径达到厘米甚至分米量级的领域，超透镜的应用仍在一定程度上受限于设计和加工成本。

由超原子阵列构成的超透镜元件具有卓越的多功能调控能力，在大视场高分辨成像、连续谱消色差、偏振复用、偏振成像等应用中具有不可替代的作用。然而随着超透镜口径增加至万波长、甚至十万波长量级，其中包含的纳米结构数量可能达到数百亿个，超大结构信息量渐渐衍生出加工周期长、加工成本高等实际问题。与之相对应地，同心环超透镜能够在非偏振调控场景下继承超原子阵列型超透镜的已有优势，并凭借少得多的微纳结构数量大幅降低计算、加工成本，提升微纳结构的力学稳定性，有望成为更具应用价值的新选择。

基于以上问题，中国科学院长春光机所研制了以5厘米口径同心环超透镜为主镜的便携式望远系统。实现了 20° 视场内的高分辨成像($\text{MTF} > 0.4 @ 46 \text{lp/mm}$)，并深入剖析其弱偏振依赖特性及窄带适应性，为超表面技术向空间目标观测领域进军奠定了有力基础。

创新研究

光机结构设计：

常见的双曲相位超透镜能够对正入射平行光实现近衍射极限聚焦，但此类设计的像差对离轴角度十分敏感，难以实现大视场高分辨成像。为此该研究以像方远心系统作为设计基础，引入前置光阑限制边缘光线像差，约束主光线角度，进而降低点扩散函数和相对照度对视场角的敏感性。同时使用偶次多项式表达超透镜目标相位，各偶次项系数与基本光机尺寸一同作为联合优化参数。所得结果的成像分辨率在全 20° 视场内匹配相机截止频率($\text{MTF} > 0.4 @ 46 \text{lp/mm}$)，同时实现光阑口径极大化。

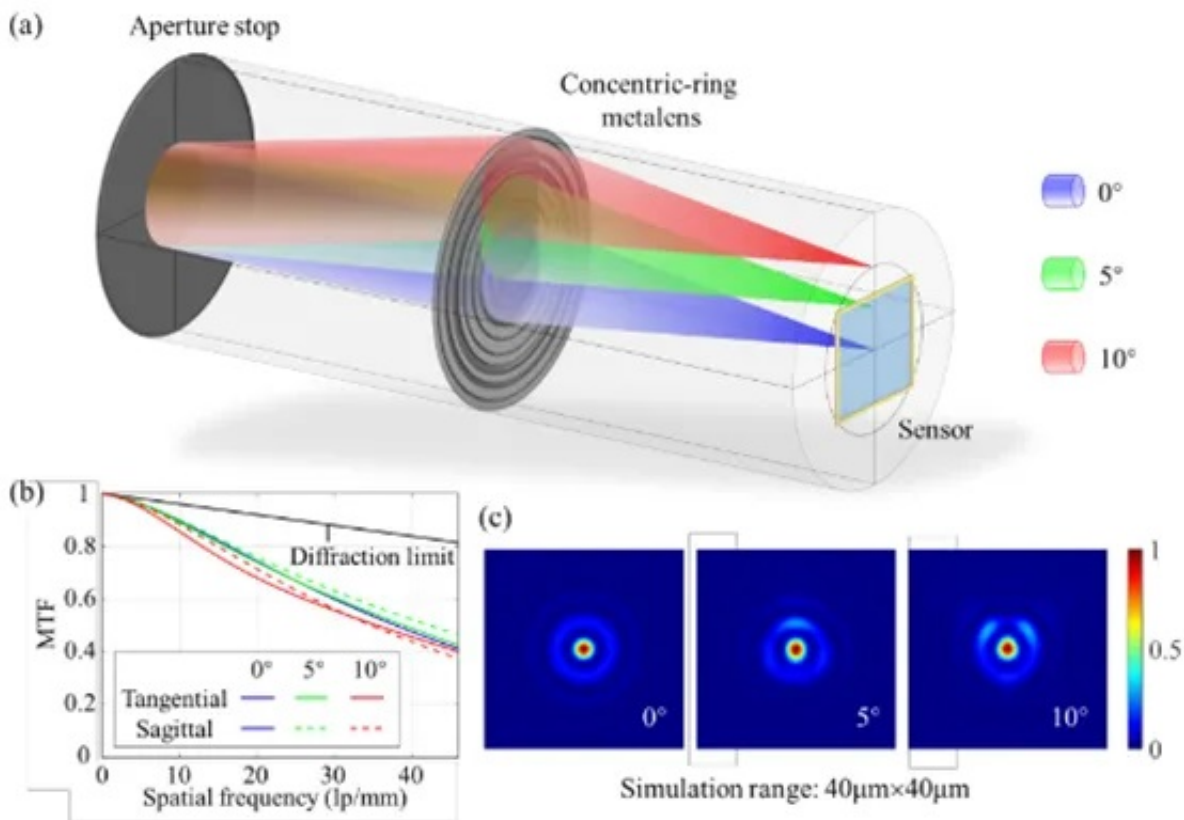


图1. 光机结构示意图及其点扩散函数和调制传递函数。

超透镜微纳结构优化设计：

该研究中的微纳结构设计重点着眼于同心环超透镜的截面内部。将亚波长宽度的二维超原子按不同的拓扑结构类型加以划分，并分别记录其TE，TM的双模态复透过率。然而根据二维截断波导的数学模型，可判断出其对于TE，TM模态的散射效果并不具备一致性，如何实现双模态兼容度最优是结构设计的关键。为此，该研究将光机设计所得的调制相位优化结果作为理想值，以特定

权重下双模态复振幅对理想值的投影极大化为原则，拼装超透镜的整体截面结构。最终将该截面结构绕光轴旋转一周，即获得同心环超透镜的整体三维结构。

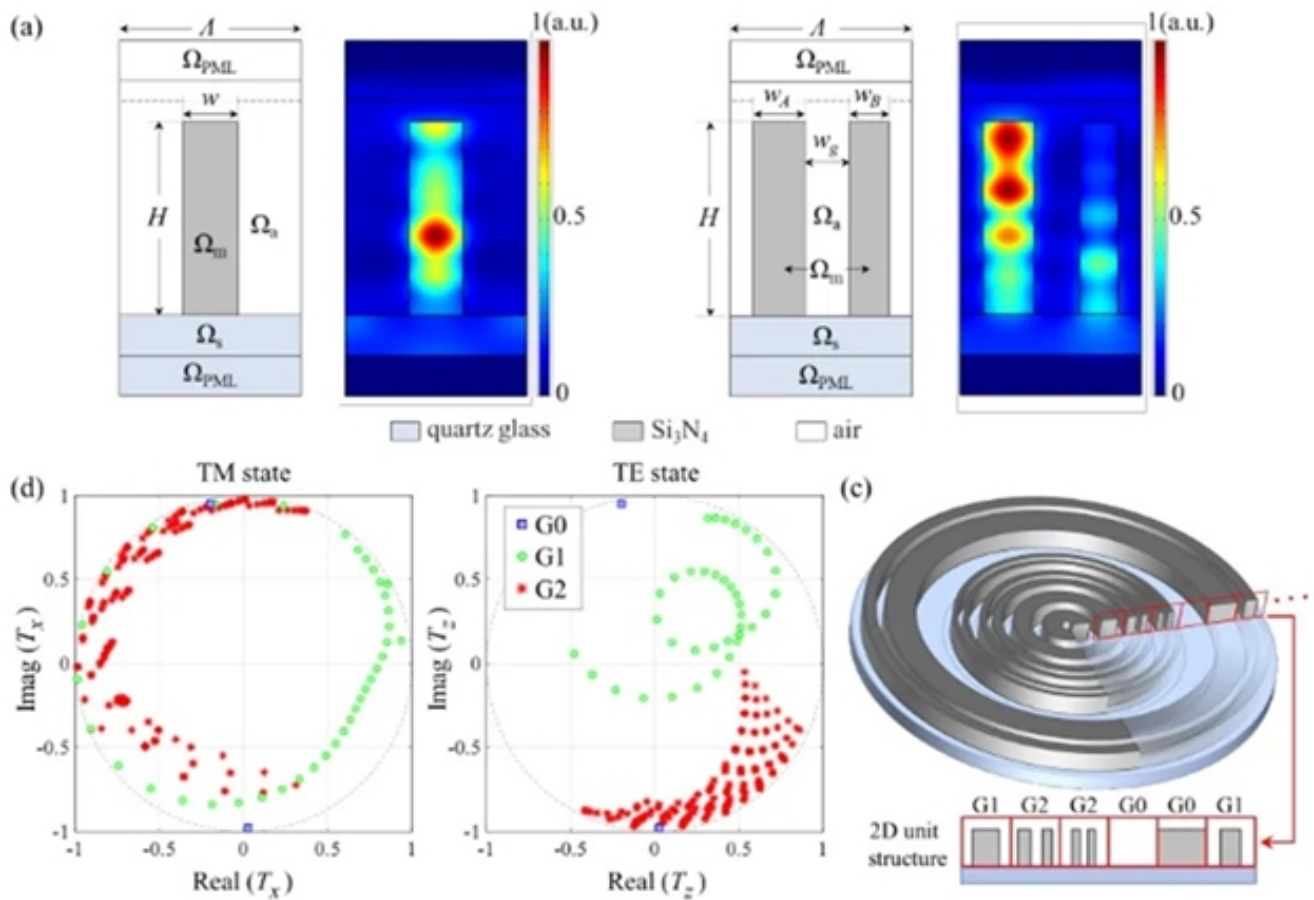


图2. 不同拓扑结构超原子的仿真示意图、复透过率及拼装示意图。

成像效果：

最终，将超透镜光学镜筒、5nm窄带滤波片和探测器组装成超透镜相机，并进行真实场景成像测试。在此过程中，使用图像边缘增强方法小幅提升图像对比度，使被观测目标的明暗细节更加丰富明显。图3显示了距超透镜相机约300米远的建筑目标成像结果。在图像的放大部分，超透镜相机可以有效分辨宽度约为5mm的垂直窗框间隙，对应的分辨角度约为 $13 \mu rad$ ，显示出对单线目标的良好分辨率能力。

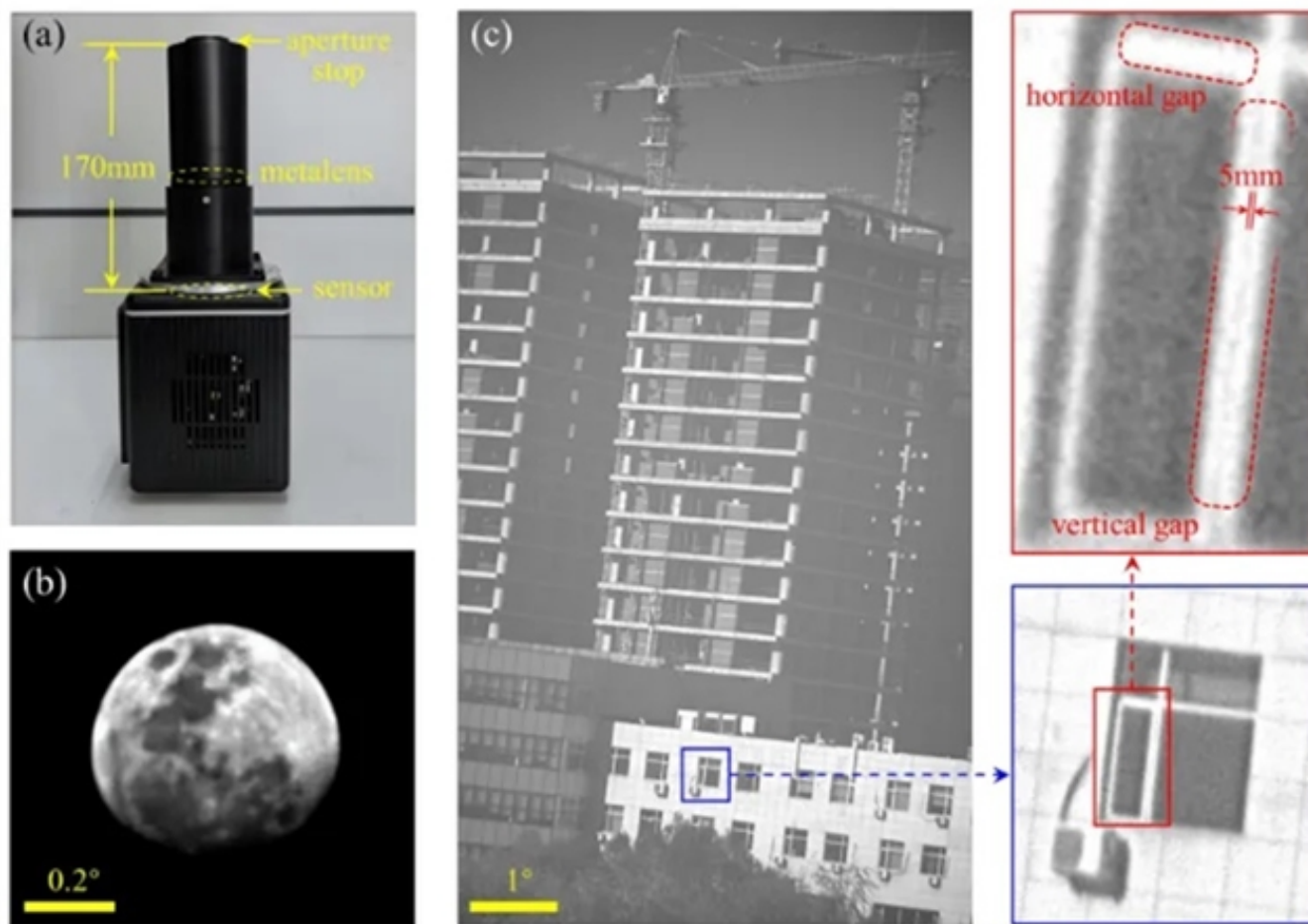


图3. 超透镜相机实物及月球、建筑目标的成像示意图。

总结与展望

研究团队设计了一种在全 20° 视场内实现高分辨的便携式超透镜望远系统，超透镜直径达到5厘米。该工作采用更易于大幅面微纳结构制备的二阶同心环构型，并提出了相应的二维超原子拼装结构拓扑优化设计方法，结合像方远心光机结构设计，最终完成超透镜成像原理样机研制并进行实景成像检验。后续研究将继续围绕大口径超透镜的研制工作展开，进一步优化大幅面微纳结构制备工艺，增大成像系统的有效口径，同时在结构紧凑化程度、高分辨视场、宽谱特性的方面做出改善，最终在空间目标观测领域实现更广泛的应用。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01656-2>

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：王建立等 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