
基于晶体硅超表面的全彩成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36491.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！

基于晶体硅超表面的全彩成像。 导读

在光学成像领域，新型光学材料及技术的发展对提升成像质量与功能至关重要。近日，美国华盛顿大学的研究团队利用晶体硅超表面实现了全彩可见光成像及偏振控制。研究团队采用逆向设计方法，优化超表面光学的宽带调制传递函数，实现了单孔径的全彩成像与偏振复用功能。该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为Full Color Visible Imaging with Crystalline Silicon Meta-Optics，Johannes E. Frösch为论文的第一作者，同时Johannes E. Frösch和Arka Majumdar为论文的共同通讯作者。

这项研究成果不仅在理论上拓展了晶体硅在可见光波段的光学应用原理，揭示了其在全彩成像和偏振控制方面的机制，而且在实际应用中展现出巨大潜力。其有望应用于多种成像设备、光谱仪以及各类需要光场调控的领域，推动相关产业的技术革新，助力实现更高效、更优质的光学成像功能。

研究背景

随着光学成像技术在多领域的广泛应用，对高质量、多功能成像的需求与日俱增。传统光学成像元件在实现全彩成像、控制色差以及集成多种功能等方面存在显著不足。晶体硅因其低成本、高折射率以及成熟的制造工艺，在近红外光子学领域已得到广泛应用。而超表面光学作为新兴技术，通过亚波长结构对光场进行纳米级精确调控，为光学成像带来新的可能。其中，基于晶体硅的超表面光学在可见光谱范围内展现出潜在应用价值，尤其在全彩成像和偏振控制方面备受关注。

然而，目前基于晶体硅超表面的研究仍存在不少亟待解决的问题。一方面，尽管晶体硅在近红外区域表现出色，但在可见光谱范围，其较大的吸收系数一直是应用的阻碍，如何在可见光波段有效降低其吸收损耗，同时保持高折射率优势，尚未得到妥善解决。另一方面，超表面普遍存在严重的色差问题，虽然已有一些方法尝试解决，但大多局限于小数值孔径或小光圈范围，难以满足实际应用中在大孔径、高数值孔径光学元件的需求。这些问题严重制约了基于晶体硅超表面光学的实际应用和发展。

创新研究

研究团队创新性地运用逆向设计方法优化晶体硅超表面光学元件（如图1相关设计示意）。通过最大化超表面光学元件宽带调制传递函数（MTF）下的体积，充分考虑材料在可见光谱范围内光学常数的强烈变化特性，设计出可在460nm-700nm波长范围实现全彩成像的晶体硅超表面光学元

件。这一设计突破了传统观念中晶体硅不适用于可见光成像的局限，有效解决了超表面光学中普遍存在的色差问题，使单孔径超表面光学元件能够同时捕获多个波长的光，实现全彩成像，提升了成像的质量和效率。

在材料选择与处理方面，研究人员选用商业可得的高质量蓝宝石衬底上的晶体硅（SOS）材料（如图1）。通过精确控制材料厚度为230nm，在保证可见光范围内提供足够相位覆盖的同时，最大程度降低了短波长处的损耗。并且，利用标准纳米制造工艺，实现了对结构完整性纳米级别的高度控制，确保了制造过程的高精度和稳定性，为大规模生产高质量晶体硅超表面光学元件提供了可行方案。

图1. 蓝宝石衬底上的硅（SOS）可见光光学。

研究团队还引入偏振复用功能到晶体硅超表面光学元件中（如图2）。通过打破单个方形散射体的对称性，引入可变边长 Y ，实现了在绿色波长范围内对正交方向相位响应的独立调控。以编码两个具有焦点偏移的双曲金属透镜轮廓为例，展示了单个孔径超表面光学元件可实现偏振复用聚焦控制。这种功能极大地拓展了晶体硅超表面光学元件的应用范围，使其在偏振相关的成像和光场调控领域具有更高的实用价值。

总结与展望

研究团队利用晶体硅超表面光学实现了全彩可见光成像和偏振控制。通过采用逆向设计方法，优化超表面光学的宽带调制传递函数，成功制造出可在整个可见光谱范围内工作的单孔径超表面光学器件，实现了全彩成像。同时，利用晶体硅的高折射率，制造出在绿色波长范围内具有偏振复用功能的金属透镜。实验结果表明，该晶体硅超表面光学器件成像效果良好，能清晰捕捉多种颜色和细节，且偏振复用功能有效。

未来，在技术优化上，一方面可进一步改进逆向设计算法，更精准地考虑材料光学常数在可见光谱的变化，优化超表面光学器件的设计，减少旁瓣影响，提高分辨率；另一方面，探索更先进的制造工艺，进一步提高晶体硅超表面结构的精度和均匀性，降低制造误差对光学性能的影响。在应用拓展方面，该技术有望在消费电子领域实现更轻薄、高性能的相机镜头；在增强现实（AR）和虚拟现实（VR）设备中，提升视觉体验和光学显示效果。从行业发展来看，此研究成果为光学成像产业提供了新的技术思路，推动相关产业朝着更高效、更轻薄、多功能的方向发展，促进光学成像技术的创新与变革。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01888-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事宜，请与我们联系。

作者：Johannes E. Fr^och 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