
基于折叠路径超构表面的自旋解耦色散调控

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36295.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！

基于折叠路径超构表面的自旋解耦色散调控。 导读

近日，中国科学院光电技术研究所——光场调控科学技术全国重点实验室研究人员提出了折叠路径超构表面概念，首次实现自旋解耦色散调控，同时该原理可拓展至任意正交偏振色散独立调控。与传统改变结构几何形状控制等效折射率的方法不同，该原理通过调控虚拟反射面产生的等效路径长度实现色散调控。这一进展拓宽了基于超构表面的自旋光子学的潜力，将其应用从空间域扩展到时空域。

该工作以Dispersion-engineered spin photonics based on folded-path metasurfaces为题，发表在国际光学顶尖期刊《Light: Science Applications》。

研究背景

自旋光子学是一个快速发展的前沿领域，通过利用光子的自旋与偏振特性实现复杂信息处理与传输，其中自旋解耦超构表面在光场精密调控中占据核心地位。但现有技术存在明显局限——此类超构表面主要限于单波长或窄带应用，其根本挑战源于缺乏宽带调控所需的色散控制。当前色散调控方法大多具有自旋无关性或仅适用单一自旋态，而亚波长尺度下相反自旋态的独立色散调控长期未能突破，阻碍了该领域向宽带解耦与高集成方向的跨越。

为解决上述问题，中国科学院光电技术研究所——光场调控科学技术全国重点实验室研究人员提出折叠路径超构表面概念（如图1所示），通过亚波长尺度的局域干涉效应折叠光路，修改其等效路径长度调控亚波长结构的色散特性，与过往依赖改变结构几何形状进行等效折射率调控的传统方法相比具有独特的优势。

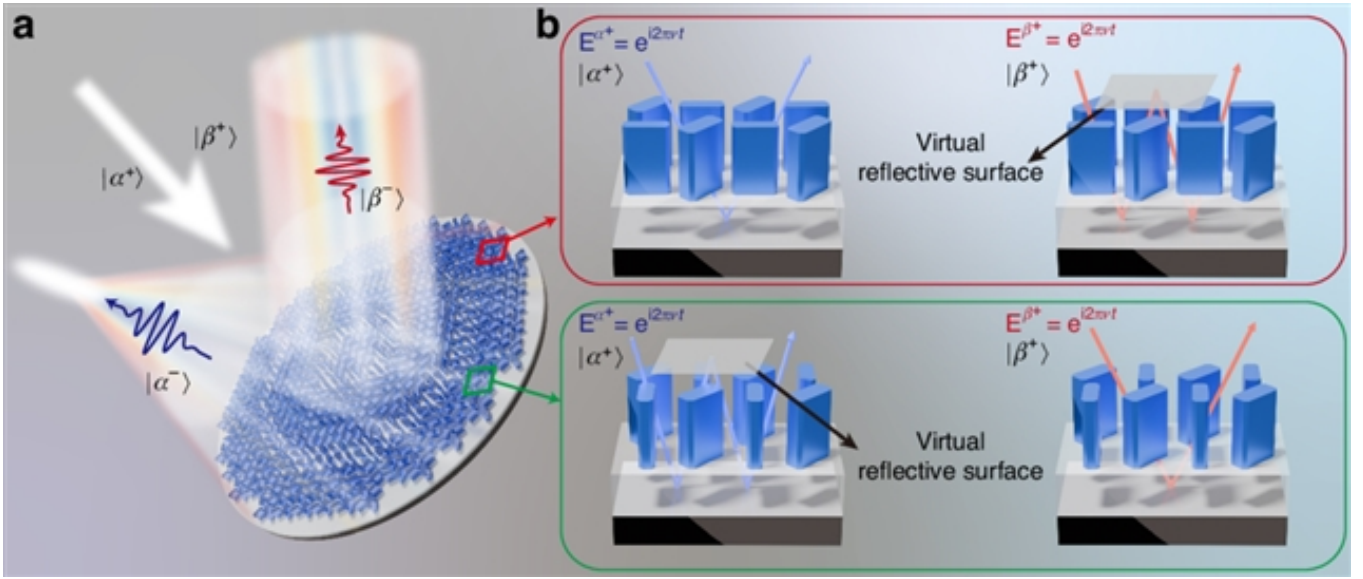


图1. 基于折叠路径超构表面的色散控制原理

创新突破

该创新的关键在于在保持结构高度恒定的前提下，通过偏振解耦的局域干涉调控正交偏振态入射下的等效路径长度，进而实现了偏振解耦的色散调控。为实现此类偏振解耦的局域干涉效应，研究团队采用超级单元结构，如图2(a)所示。该超级单元由一对交错排列的孪生纳米柱（A和B）构成，形成局域干涉系统，在亚波长结构上方产生虚拟反射面。虚拟反射面的反射率取决于相邻纳米柱之间的相位差，通过调控该相位差产生相长和相消干涉现象，虚拟反射率可在0%至100%变化。此物理机制下，部分反射光穿透虚拟反射面进入自由空间，其余能量则被反射回由超级单元阵列和金属层构建的谐振腔结构中。因此，等效路径长度可以被调控，从而调控其色散特性，如图2(b)所示。图2(c-e)验证了三对正交偏振态的独立色散调控，分别对应正交线偏振、正交圆偏振和正交椭圆偏振。以正交圆偏振态为例，可以看到对于第一种超级单元（实线框内的结构），当左旋偏振态入射时，纳米柱A和B之间的相位差为0。而对于右旋偏振态，相位差为 π ，从而产生虚拟反射面。等效路径长度增加使其具有更大的群延迟，如图2(e)中的红色实线所示。相反，对于第二种超级单元（虚线框内的结构），无论入射的偏振态是左旋圆偏振态还是右旋偏振态，纳米柱之间的相位差保持为0，导致几乎相同的群延迟，如蓝色和红色虚线所示。

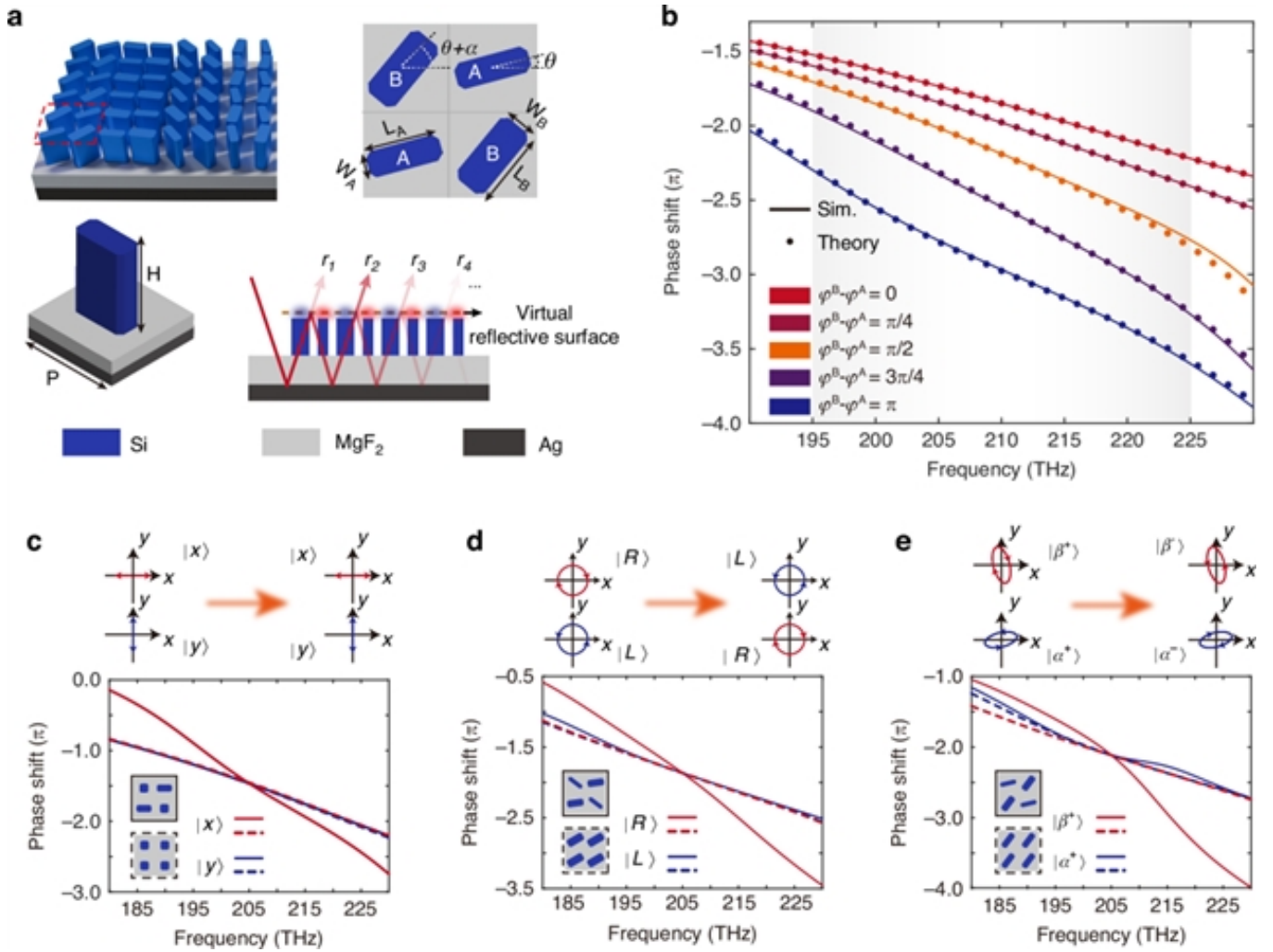


图2. 超构表面结构与原理验证

基于该原理设计的超构表面能实现新颖的功能，例如仅通过调控结构旋向实现宽带消色差聚焦和消色差自旋霍尔效应，以及单个超构表面生成时空矢量光场。如图3所示为仅通过调控结构旋向实现宽带消色差聚焦，该超构透镜与以往依赖改变纳米柱尺寸的消色差超构透镜不同，每个晶格的唯一设计参数是纳米柱的旋向角。如图3(a)所示，纳米柱的旋向角 θ 主要被用来以几何相位原理实现聚焦相位，而旋向角的差值 α 用来调控色散，使各频率的波前符合理想聚焦相位。图3(b)和(c)展示了旋向角 θ 和 α 的空间分布。图3(d)对比了数值仿真与实验测量的xoz截面光强分布，展现出该超构透镜具有连续宽带消色差聚焦能力。

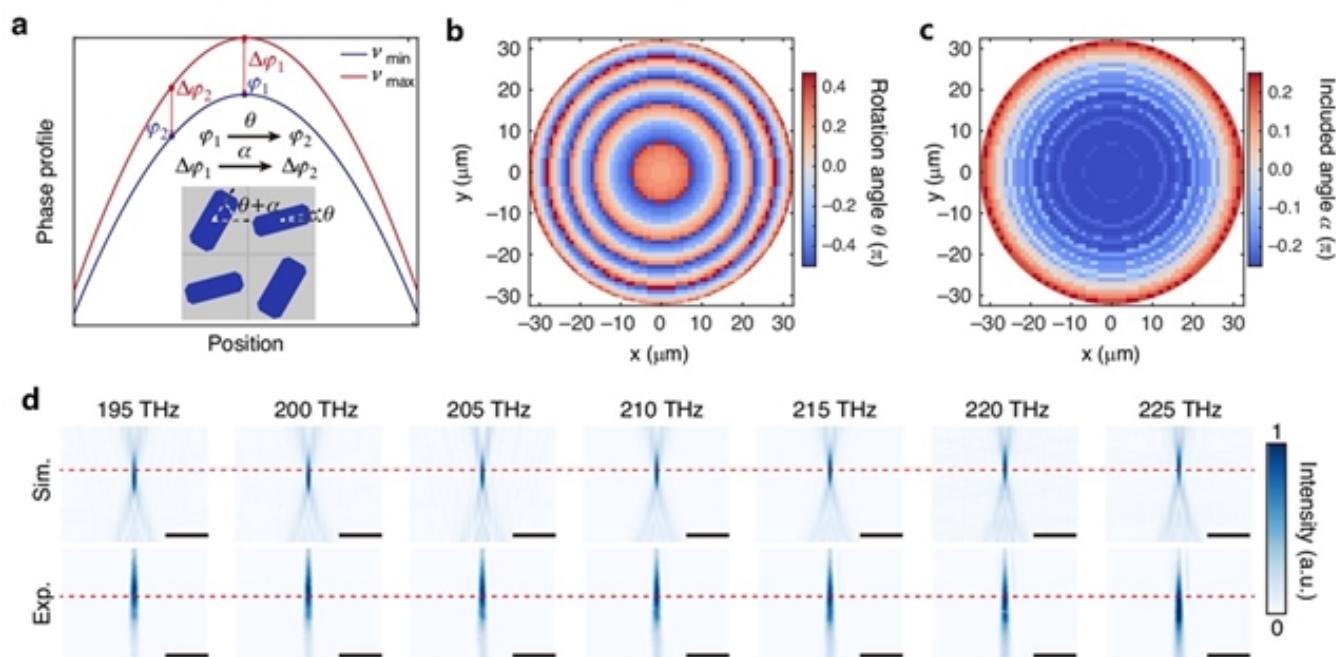


图3. 仅靠旋转自由度实现的消色差聚焦

展望

研究团队提出的折叠路径超构表面可独立地调控任意正交偏振态的色散特性与相位分布，这一突破性能力源自对超构表面色散调控原理的创新。该超构表面平台有望为集成化自旋复用器件开拓新可能，在宽带偏振光学器件、高维信息编码系统以及时空光场调控等应用有重要意义。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01850-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：罗先刚等 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