
高光谱通道密度片上行射散斑光谱仪

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/34940.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！

高光谱通道密度片上行射散斑光谱仪。 导读

在光谱传感器迈向便携化与智能化的今天，传统台式光谱仪受限于体积与性能的权衡，难以满足医疗、农业、消费电子等领域对高分辨率、大带宽、小型化设备的迫切需求。相比之下，芯片式微型光谱仪在尺寸、重量和功耗方面优势显著，为现场快速检测与嵌入式光谱传感提供了可行性方案。近日，哈尔滨工业大学（深圳）徐科教授和宋清海教授团队提出一种基于级联无序超构表面的硅基片上散斑光谱仪。基于高透过率的亚波长相位调控单元产生富含光谱指纹信息的散斑，最终在亚平方毫米的芯片尺寸内同时实现高分辨率和宽带宽的光谱重构。

该成果以Scalable on-chip diffractive speckle spectrometer with high spectral channel density为题发表于《Light: Science Applications》。第一作者为哈尔滨工业大学（深圳）博士生张子萌，哈尔滨工业大学（深圳）的徐科教授和宋清海教授为通讯作者。

研究背景

传统台式光谱仪依赖复杂的光学分立元件与精密的机械结构，难以实现小型化和轻量化集成。芯片级微型光谱仪则具备小体积、轻重量与低功耗等优势，更契合可移动、便携式光谱检测技术的发展趋势。其中，硅基光子集成技术因其高可靠性和与微电子工艺兼容的特点，成为实现高性能片上光谱仪的理想载体。然而，如何利用微小的芯片尺寸同时实现高光谱分辨率和宽光谱范围的光谱重构，是当前芯片级光谱仪面临的关键挑战。现有的片上光谱仪技术方案（如色散元件、滤波器阵列或傅里叶变换结构）在兼顾高分辨率和大带宽时往往受限于光程差和器件数量，从而导致芯片物理尺寸大、数据采集效率低、功耗增加等问题。

研究内容

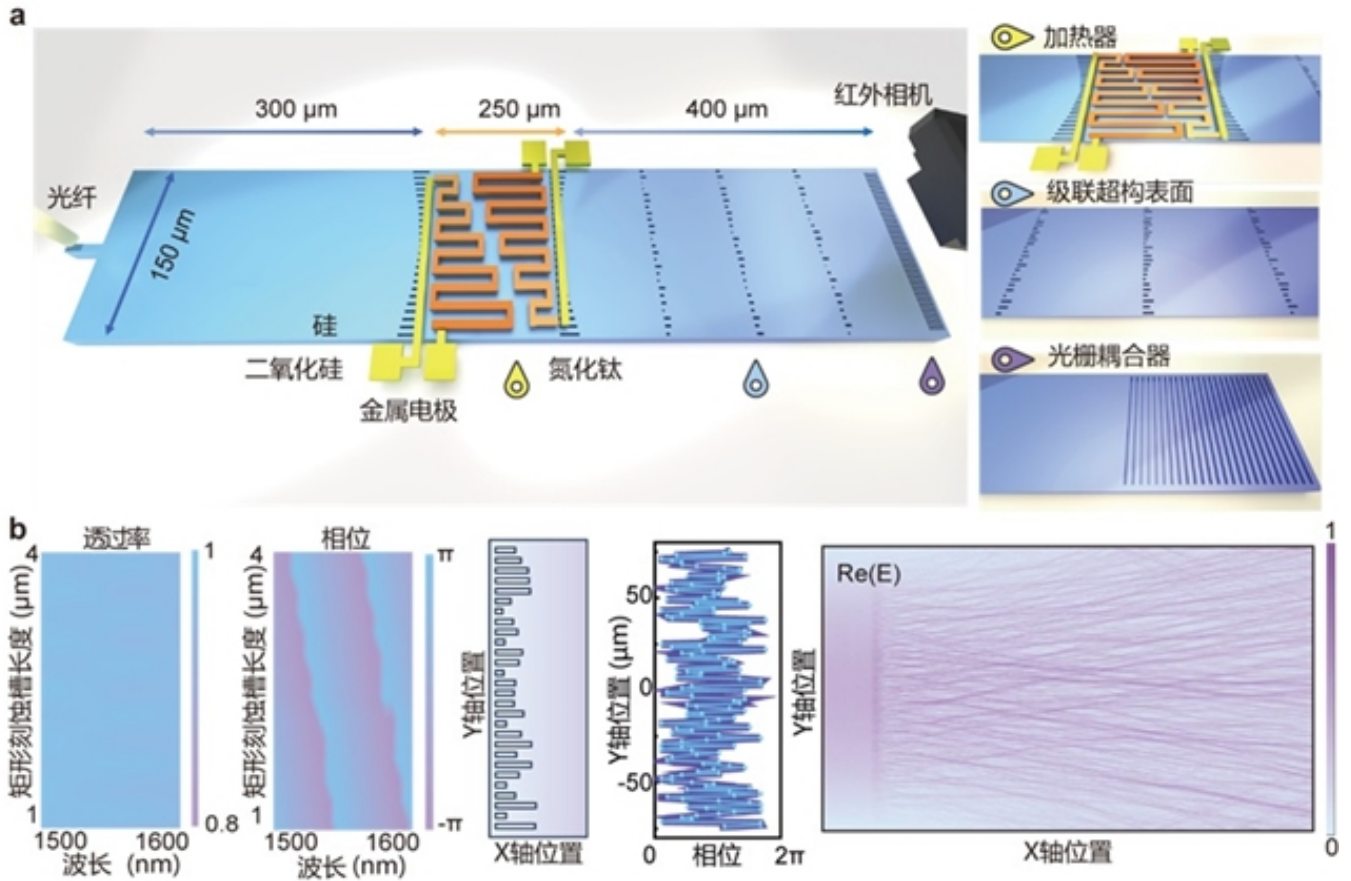


图1. 基于分层无序超构表面的片上散斑光谱仪三维示意图及无序超构表面的设计原理

本研究提出的光谱仪基于绝缘体上硅（SOI）平台设计，核心架构包括输入单模波导、波前准直超构透镜、级联多层无序超构表面及多模输出衍射光栅（图1a）。单模波导输出模场经超构透镜进行波前整形后，形成准直光束入射至级联超构表面。超构表面由全刻蚀矩形槽的亚波长单元组成。通过精准控制槽的长度，能够在引入 0 至 2π 的相移同时保持高透射率（图1b）。依据惠更斯-菲涅耳原理，随机排布刻槽阵列产生的无序波前经由干涉与衍射效应，可转化为波导截面的强度分布，进而将光谱信息编码于散斑图案中。最终光谱散斑由光栅衍射输出。

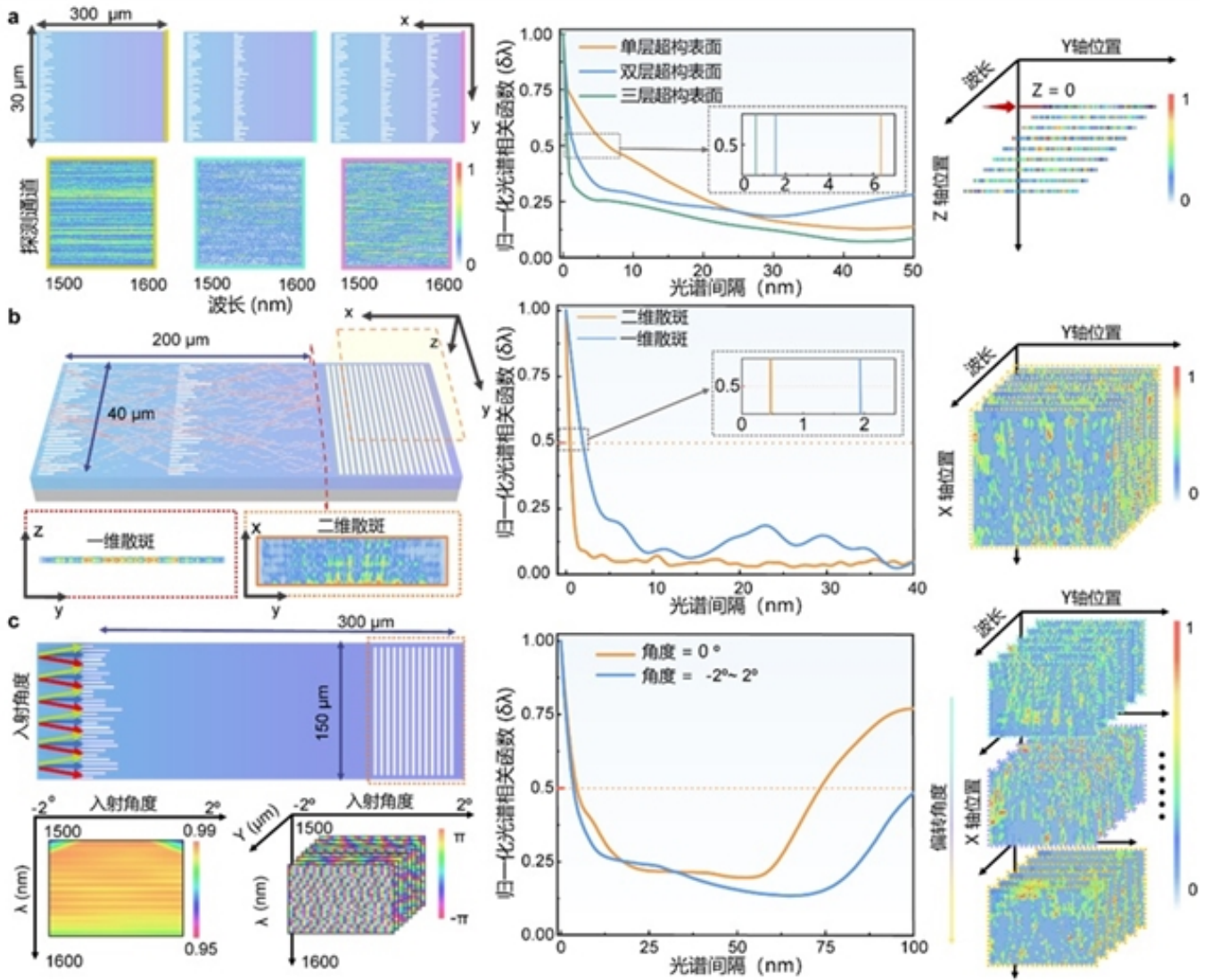


图2. 基于分层无序超构表面的片上散斑光谱仪可扩展性能评估

该器件通过三项关键技术实现了小尺寸内光谱通道数的提升。首先，通过分层级联的超构表面引入多级相位调制单元（图2a），使输出散斑场分布的光谱特征密度显著增加。其次，采用多模衍射光栅实现波导-自由空间的散斑采样（图2b），将一维强度分布映射为二维散斑。相较于传统波导阵列采样方法，该方案极大程度地保持散斑的空间差异信息。最后，通过集成片上热光调制器（图2c），利用热光效应动态调制实现了入射角调控，在角度维度上拓展了光谱通道容量。

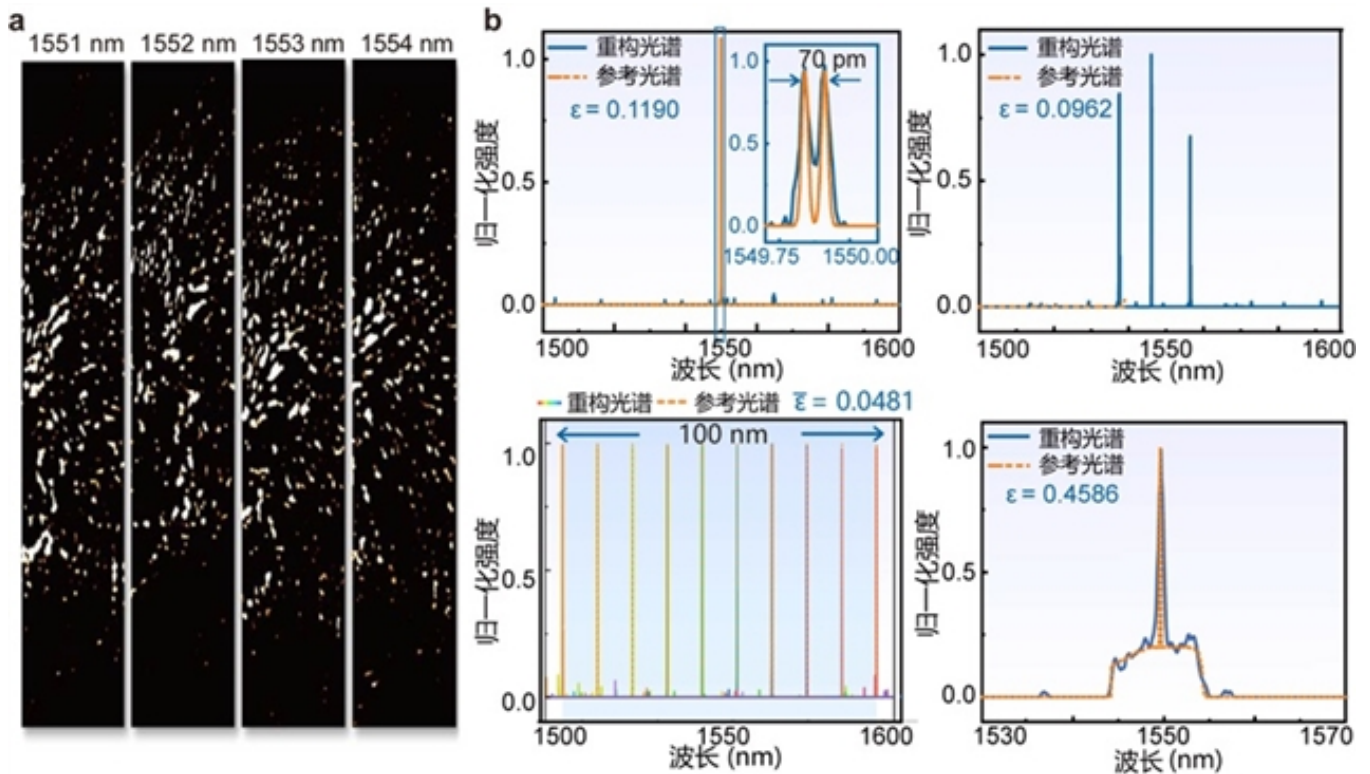


图3. 所制备的散斑光谱仪的实验表征及其一系列光谱重构结果

在光谱重建前，需要对器件进行预定标：扫描并记录工作光谱范围内的散斑图案（图3a），并构建基于压缩感知算法的光谱-空间数据映射模型。为评估光谱仪的普适性，实验选取单峰、多峰复合光谱及高斯背景叠加的单峰光谱作为测试样本集。并通过对比商用光谱分析仪的测量结果进行相对误差分析（图3b）。可以看出，无论是简单的单峰光谱还是复杂的混合光谱，所制备的光谱仪都能实现高精度重建，证明了该器件通用的光谱测量能力和高准确性。

前景展望

在高性能微型光谱的需求牵引下，芯片式光谱仪研究正朝着高集成度、高分辨率、大带宽的方向持续突破。本工作提出一种基于级联无序超构表面的硅基片上光谱仪，通过多种片上波前调控机制产生的高光谱散斑，以紧凑的芯片尺寸实现了光谱通道数的扩展，从而实现了极高的片上光谱通道密度，为实现高分辨率、大带宽光谱检测提供了有效的手段。器件采用标准硅光子工艺制备，兼具工艺鲁棒性与规模化量产潜力。此外，该结构还具备跨材料体系的波段拓展潜力，有望在不同应用场景得到应用。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01797-y>

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：徐科等 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](http://www.iikx.com)转发