
宽带红外成像：基于导模共振的硅基超表面

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/30972.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！

宽带红外成像：基于导模共振的硅基超表面。 行业背景

非线性光学是研究光与物质相互作用时产生的非线性效应的一门学科，其中包括将光从一个频率转换为另一个频率的基本过程。这种非线性基本过程已广泛应用于各种技术和应用，包括非线性成像、量子计算和光学传感。最近，由亚波长谐振原子组成的超表面已被认为是纳米尺度上实现非线性产生的新型超紧凑平台，该平台通过激发等离子体共振或多极共振来获得极强的光与物质相互作用，可以在非线性超表面内显著增强非线性光产生。此外，非线性超表面的转换效率主要由共振引起的场增强决定，而非线性晶体、光纤和波导等其他非线性平台的转换效率高度依赖于传播损耗和相位匹配项，因此，自由空间中的光可以直接耦合到非线性超表面并产生非线性信号，这为超表面在非线性成像等领域的应用提供了显著优势。

非线性成像技术利用非线性生成来创建和转换图像，在传感、夜视和光谱学等广泛领域具有巨大的应用潜力。非线性超表面能够操纵亚波长像素中非线性辐射的幅度、相位和方向性。由于这种独特的特性，许多研究报告了对超表面每个亚波长像素的幅度和相位分布进行编码，以实现非线性全息术、成像编码、非线性超透镜。然而，相位变化和振幅操纵的影响主要源于共振，严重限制了非线性超表面的工作波长范围。此外，对于非线性全息术和成像编码等应用，通常只能在单个超表面内编码一个或几个预先设计的图像。尽管人们已经致力于将可调超表面应用于非线性成像技术，但实现超表面中每个单元的可调性和完全控制仍然面临巨大的挑战。

为了实现任意物体的非线性成像，可利用非线性超表面进行直接图像转换，这种方法无需构建振幅和相位分布。相反，用于图像转换的超表面旨在获得高转换效率，从而减少对高功率输入的依赖，例如连续体中的束缚态和非局部共振，通过构建高Q共振和强场增强提高转换效率。然而，这些策略导致非线性超表面的工作带宽较窄，这极大地限制了非线性成像技术的应用潜力。

近日，诺丁汉特伦特大学，包括Ze Zheng, Lei Xu, Mohsen Rahmani, Cuifeng Ying 在内的团队展示了使用超表面对任意物体进行宽带非线性成像，该平台利用泵浦光束通过四波混频 (FWM) 增强信号转换，从而使超表面在泵浦波长处而不是信号或非线性发射处发生共振，这使得能够将宽红外图像直接转换为可见光。重要的是，通过利用泵浦光束强度和信号转换效率之间的二次关系，采用 FWM 大大降低了非线性成像对高功率信号输入或信号光束谐振特征的依赖。因此，该研究结果释放了超表面宽带红外成像能力的潜力，为下一代具有芯片级光子器件的全光红外成像技术带来了有希望的进步。

该成果发表在《Light: Science Applications》，题为Broadband Infrared Imaging Governed by Guided-Mode Resonance in Dielectric Metasurfaces。

研究亮点

1. 硅超表面设计与响应

该硅超表面由硅膜和在膜顶部周期性排列的硅纳米盘组成，通过计算离散平移对称性下的无限硅膜和硅超表面的能带结构，可以得到导模的色散关系，因此，可以预测四种导模 M1、M2、M3 和 M4，并在硅超表面中获得用红色和橙色圆圈标记的耦合区域。

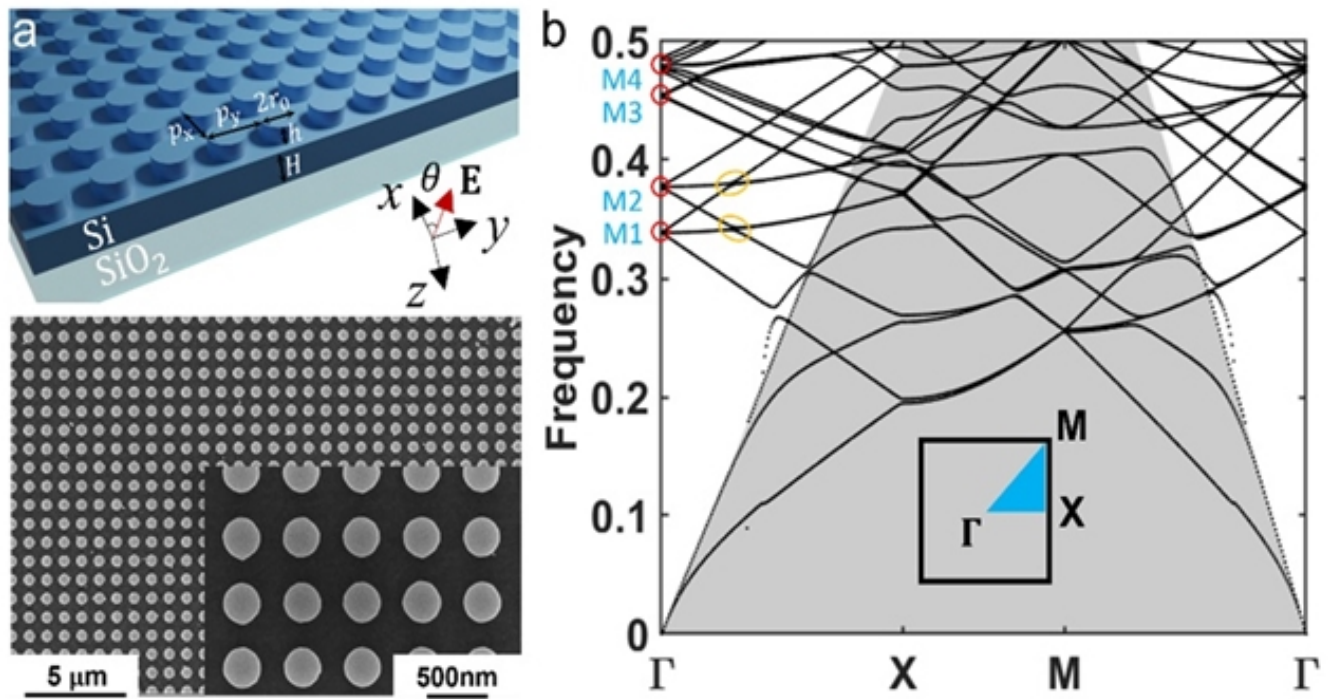


图1. 硅超表面设计。

通过在硅薄膜顶部引入周期性硅纳米盘阵列，构建硅超表面，将连续平移对称性转化为离散平移对称性。在外部线性偏振光入射激励下，四种导模 M1-4 成功转变为导模谐振，如测量和模拟的透射光谱所示。此外，每个导模谐振的量子数 l , m , n 分别表示计算得到的 x , y , z 维度上各个场分布的节点数，从场分布中可以看出，电磁型导模共振是相互正交的，该性质导致电、磁两种类型在共振分裂现象中的不同行为。

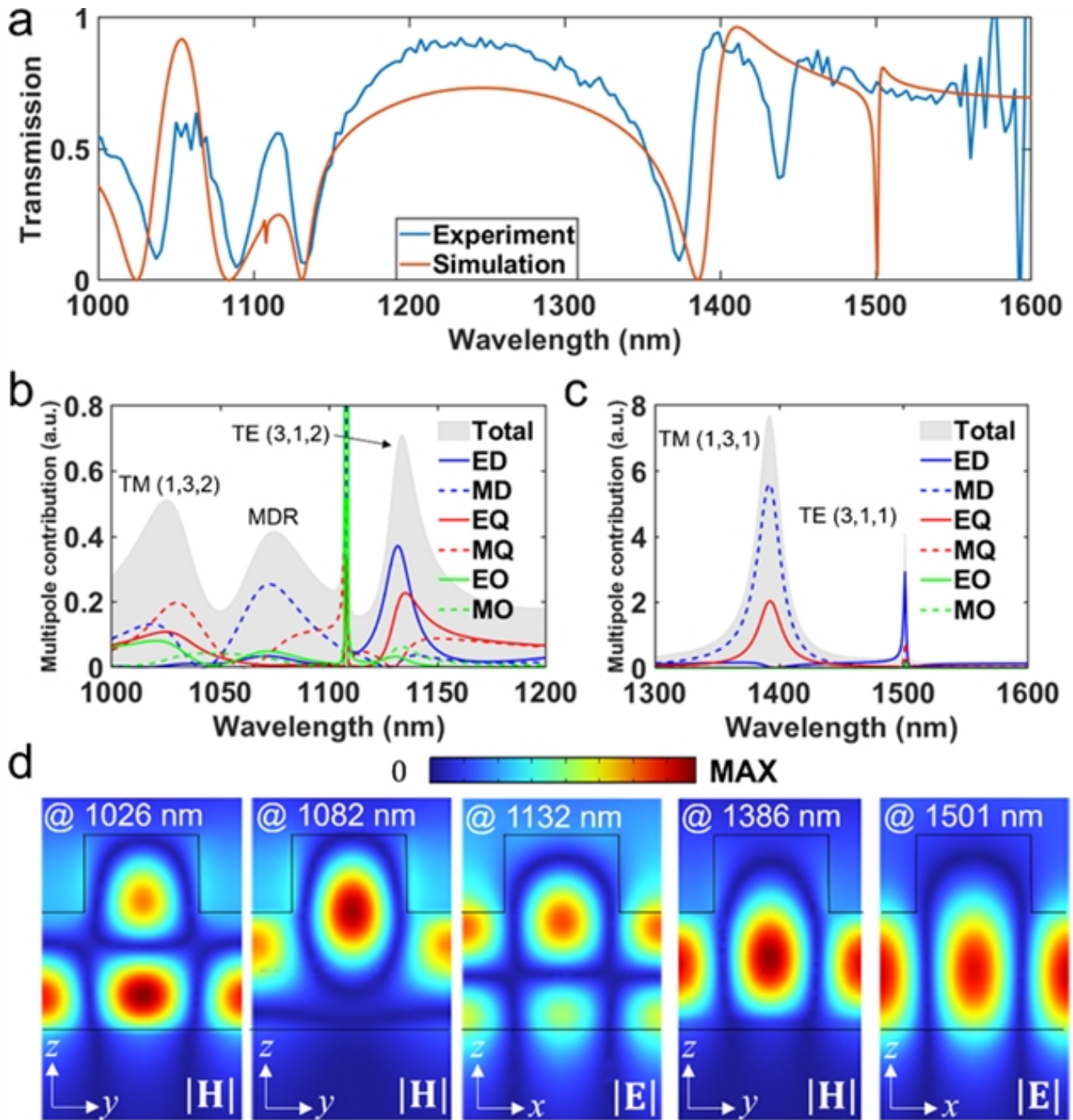


图2. 连续三维锥形螺旋轨迹上产生多焦点的超透镜示意图与仿真和实验结果。

2. 三次谐波产生和四波混频发射光谱

作者展示了测量的信号光束和泵浦光束引起的第三谐波产生 (THG) 和四波混频(FWM)的非线性发射光谱，测量了具有不同中心波长的信号光束和泵浦光束在法向入射下的非线性发射。由于超表面的相位匹配条件较为宽松，可以直接从硅超表面内增强的信号光束中观察到三个 FWM 过程和一个 THG 过程，其非线性发射分量相对于泵浦和信号频率可以表示为 $\omega_{\text{FWMp}} = 2\omega_{\text{pump}} + \omega_{\text{signal}}$, $\omega_{\text{FWMs}} = \omega_{\text{pump}} + 2\omega_{\text{signal}}$, $\omega_{\text{FWMp}} = 2\omega_{\text{pump}} - \omega_{\text{signal}}$, 和 $\omega_{\text{THG}} = 3\omega_{\text{signal}}$ 。这里，定义三个 FWM 过程为 λ_{FWMp} , λ_{FWMs} , 和 λ_{FWMp} , 其中 λ_{FWMp} 和 λ_{FW}

Mp的FWM过程有基于泵浦入射能量的二次关系。信号光束的THG信号为 λ_{THG} 。最后，使用非线性最小二乘求解对测量数据进行曲线拟合，证明了FWM发射与输入功率之间的二次和线性关系。基于泵浦光束的二次关系，泵浦光束可以显著增强FWM发射，从而减少对高信号功率输入的依赖，扩大其在非线性成像领域的应用。

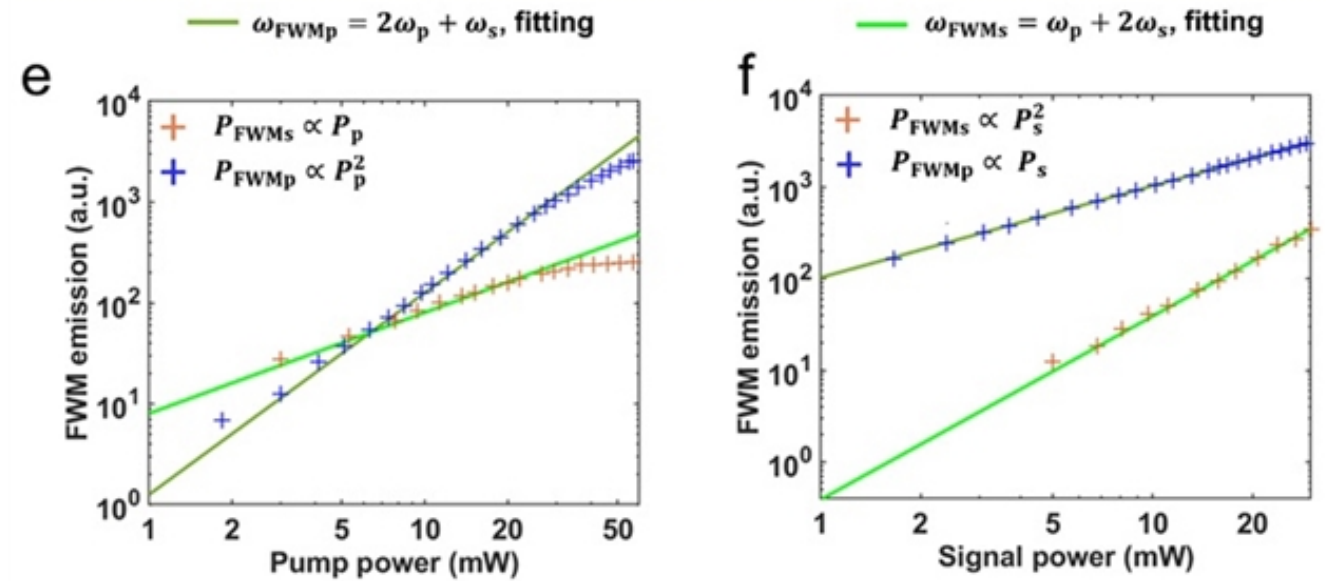
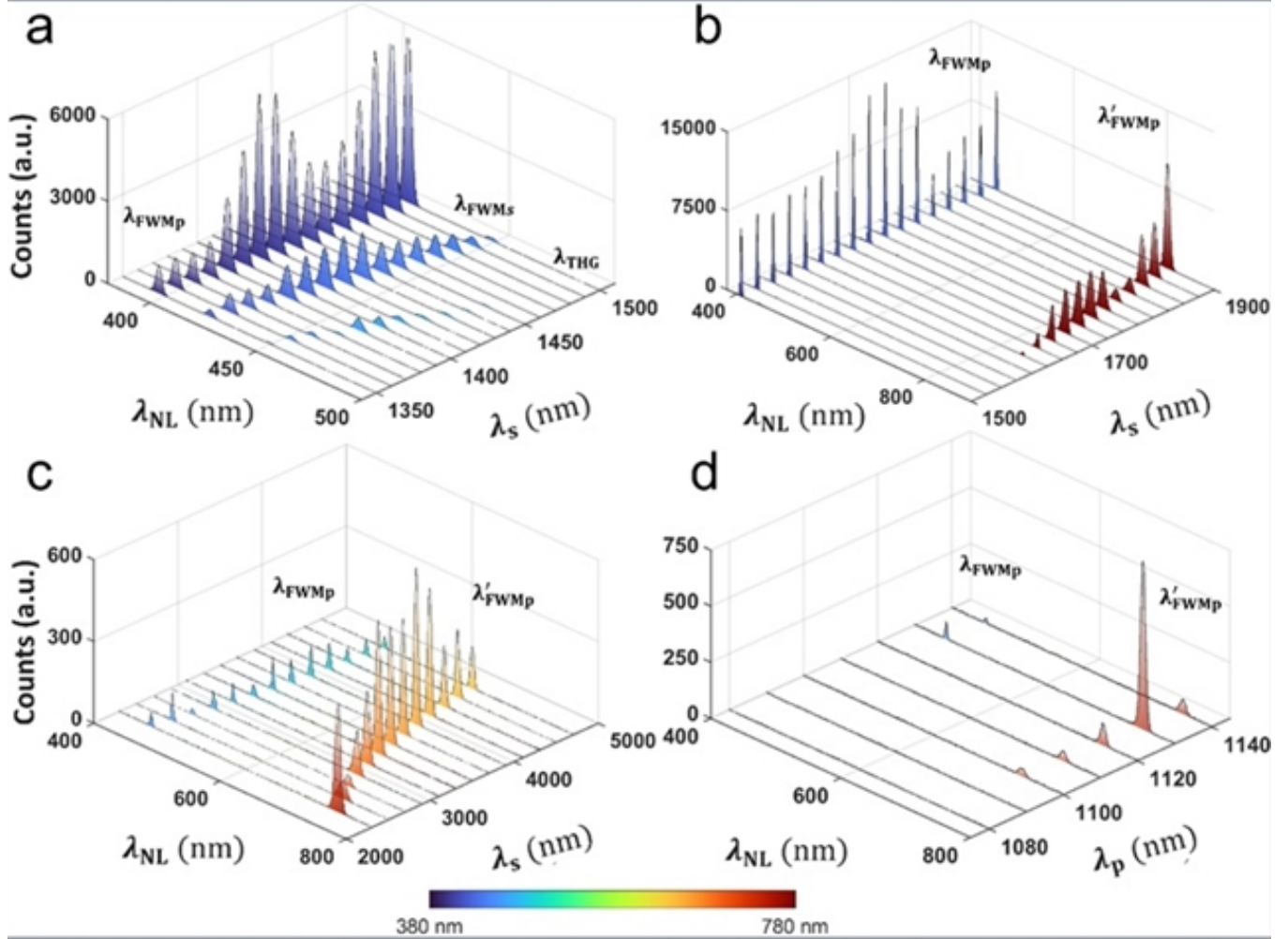


图3. 从 Si 超表面测量的 FWM 和 THG 发射光谱。

3. 基于四波混频过程的宽带非线性成像

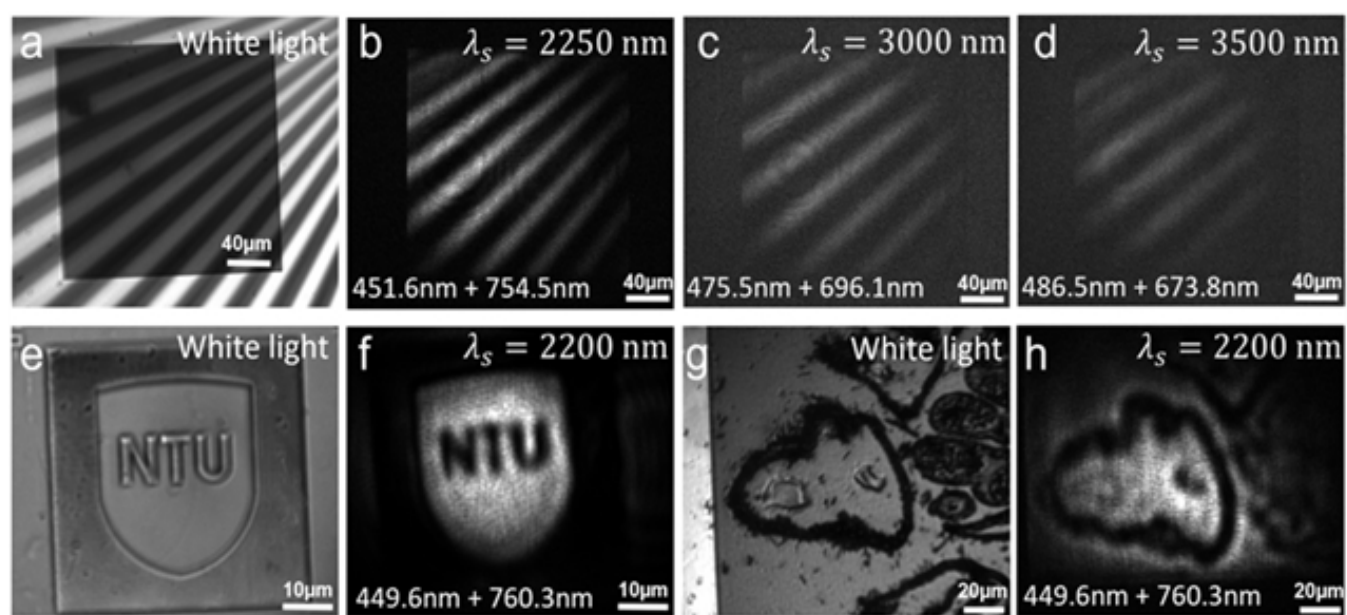


图4. 硅超表面的非线性成像能力。

最后，作者比较了白光照射下Si超表面与目标重叠的图像，和在泵浦光和信号光照射下CCD相机拍摄到的变换图像，其中图案经过FWM过程已变为可见且边缘清晰的图像。每张图的底部显示了相应的 FWM 发射波长，通过这种方式，成功地通过超表面实现了基于 FWM 的红外图案的清晰宽带成像。值得注意的是，所提出的非线性成像技术可以对任意物体进行成像，作者进一步列举两个例子进行说明，包括一个标有NTU标志的激光刻蚀样品和一个生物组织样本——榛子花粉。该红外成像技术的成像分辨率可达 $5\ \mu\text{m}$ 。并且值得注意的是，与局域模式不同，导模谐振容易受到有限照明区域边界效应的影响，可通过减小单元尺寸减轻这种影响。当前的成像分辨率 ($5\ \mu\text{m}$) 足以覆盖 10×10 单元阵列，其边界效应被认为对转换效率的影响很小。

总结展望

基于超表面的 FWM 非线性成像的研发为开发紧凑、超薄红外成像技术元建议开辟了新的可能性。这种方法引入了一种无需直接接触即可检查物体（包括绘画和艺术品）内表面的新方法。此外，选择可以穿透介质的信号光束波长也有利于通过不透明材料对目标进行非侵入式感测和成像。通过利用晶格尺寸更紧凑的超表面和色差较小的光学元件，可以进一步提高成像分辨率。并且通过提高探测器的信噪比、使用带宽更窄的激光器以及提高延迟线的分辨率，可以进一步改进该技术。此外，因该技术可通过调节泵浦光，实现对偏振选择性敏感或者不敏感，从而为非线性成像技术扩展了附加功能，包括提高对偏振敏感的材料检测能力以及增强表面检测的分辨率和灵敏度。通过泵浦光束的强烈增强，可以二次增加 FWM 发射，相信信号波长范围可以进一步扩展到更长的波长范围，实现覆盖近红外和中红外光谱的宽带非线性成像。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01535-w>

作者：Mohsen Rahmani 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