
基于全介质非线性超表面的二次与三次谐波产生的增强与调控技术

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28294.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！

基于全介质非线性超表面的二次与三次谐波产生的增强与调控技术。非线性光学是研究光与介质相互作用时介质的光学响应与入射光强度之间的复杂非线性关系，目前非线性光学已被应用于许多领域，如激光调制、光信号处理、医学成像等。近些年来，出于对相位匹配条件和制造工艺等方面的考虑，超表面成为研究和实现新型非线性光学功能的重要平台。简而言之，超表面是一种具有周期排列的亚波长尺寸下的超薄人工表面，通过对其单元结构进行精密设计，能够实现对电磁波的强度、极化和相位的精准调控。在非线性光学中，由于对光与物质相互作用的强大控制能力，对非线性信号的相位和偏振的多功能调制，在几何形状和材料成分方面的高度设计灵活性，以及集成到紧凑光学器件中的潜力，超表面也发挥着重要的作用。

最近的研究表明，基于导模谐振的全介质超表面可以实现高品质因子（Q因子）的谐振效应，因而在传感和频率转换等应用中实现有效的光学元件。然而，与光子晶体波导的导模情况不同，导模谐振可以与连续谱耦合并辐射能量。此外，连续域束缚态（BIC）提供了一种实现光与超表面之间强耦合的新方法。理想情况下，连续域束缚态与连续光谱中的辐射模式完全解耦，因此拥有无限大的辐射Q因子。由于表面粗糙、材料损耗、固有的制造缺陷和其他扰动，在实际器件中，连续域束缚态表现为具有有限Q因子的高Q谐振。重要的是，连续域束缚态的Q因子所表现出的对超表面单元结构几何不对称性的高度依赖性，让具有高Q谐振的超表面的设计更加灵活，从而可以在宽光谱范围内有效地控制光与物质相互作用的强度。在此基础上，连续域束缚态不仅在线性光学应用中得到了深入研究，包括涡旋光束生成和光导光子器件，而且还涉及大量非线性光学效应，例如高强度的谐波生成。

超表面为非线性光学研究提供了一个有发展前景的平台，但是目前大多数的非线性超表面仅专注于单一的倍频转换，且缺乏高效调控非线性光学响应的手段。另一方面，实现局域场增强的物理机制也是获得有效频率转换的关键因素，近些年的研究表明，基于连续域束缚态的高Q谐振可以产生增强的谐波，但鲜有研究将导模谐振与连续域束缚态在同一光学器件中实现，并深度解析其物理机制的差别所引发的不同的线性与非线性光学响应。

针对上述问题，伦敦大学学院的Nicolae C. Panoiu教授团队、澳大利亚国立大学Yuri Kivshar教授团队及哈尔滨工业大学（深圳）宋青海教授团队联合报道了一种基于导模谐振和连续域束缚态的全介质非线性超表面，实现了二阶和三阶非线性光学响应的共振增强。在该项工作中，研究团队借助了导模谐振和连续域束缚态的丰富物理特性来实现高Q谐振。通过打破由中心对称非晶硅构成的超表面的单元结构对称性，连续域束缚态转变为准束缚态，从而使得连续域束缚态与连续光谱之间的耦合变得可能。在此条件下，基频谐振引发的光与物质的高强度相互作用，导致了二倍

频和三倍频处的非线性极化增强，从而增强了二次和三次谐波的产生及发射。图1为该非线性超表面设计的示意图。

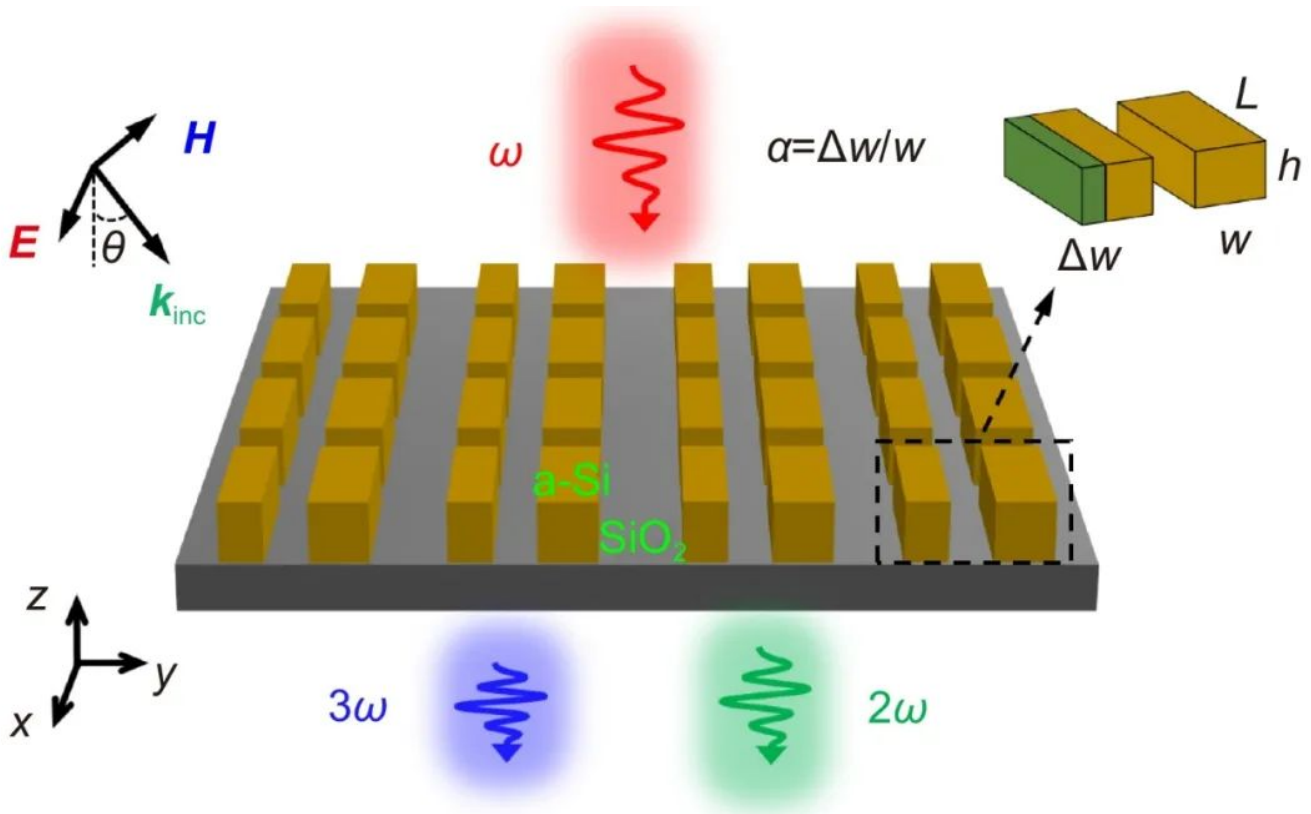


图1基于导模谐振和连续域束缚态的非线性超表面的示意图。

文章从理论技术、数值模拟和实验测量对所提出的非线性超表面进行系统的研究。在数值计算中，二次谐波的量化及分析包括表面效应和体效应两方面，而三次谐波的产生仅通过体效应进行分析。接下来，研究人员通过实验在基频处实现了具有高Q因子的光学谐振，并观测到二倍频处约550倍的二次谐波产生增强，和三倍频处近5000倍的三次谐波产生增强。通过对比，数值分析和实验测量的结果之间具有良好的一致性。图2为二阶非线性响应的实验及仿真结果，图3为三阶非线性响应的实验及仿真结果。

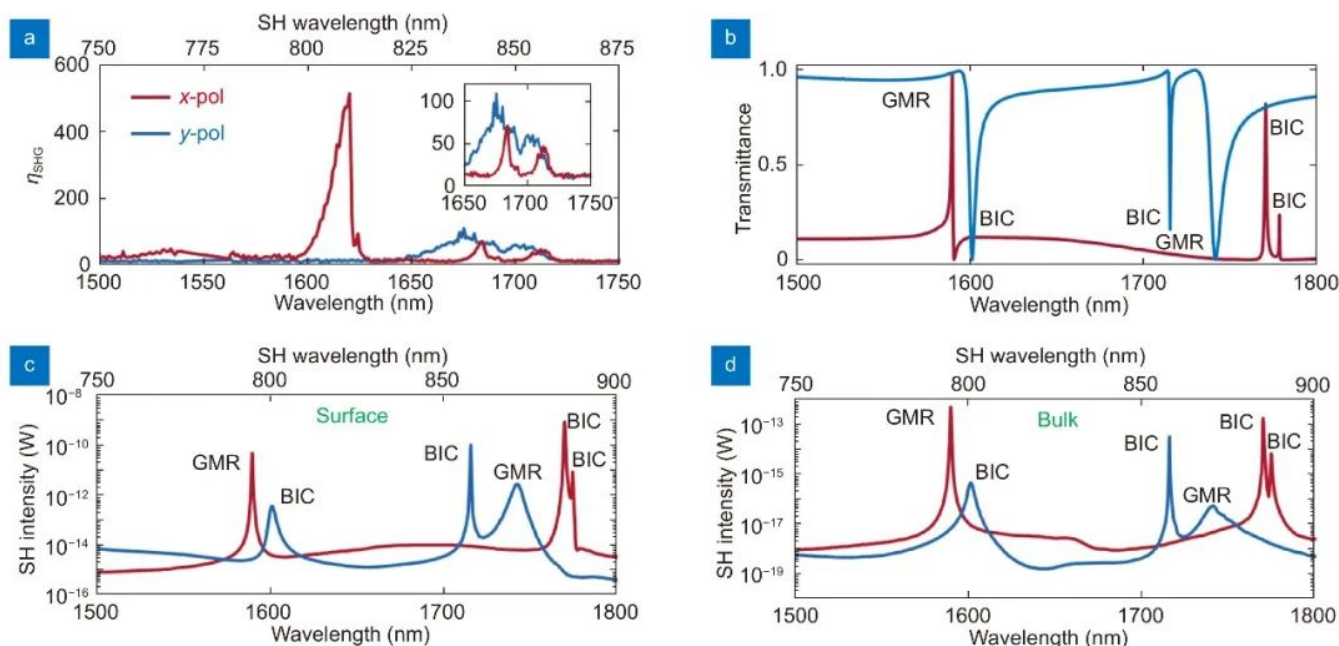


图2实验测量的二阶非线性增强结果及对应的数值计算结果。

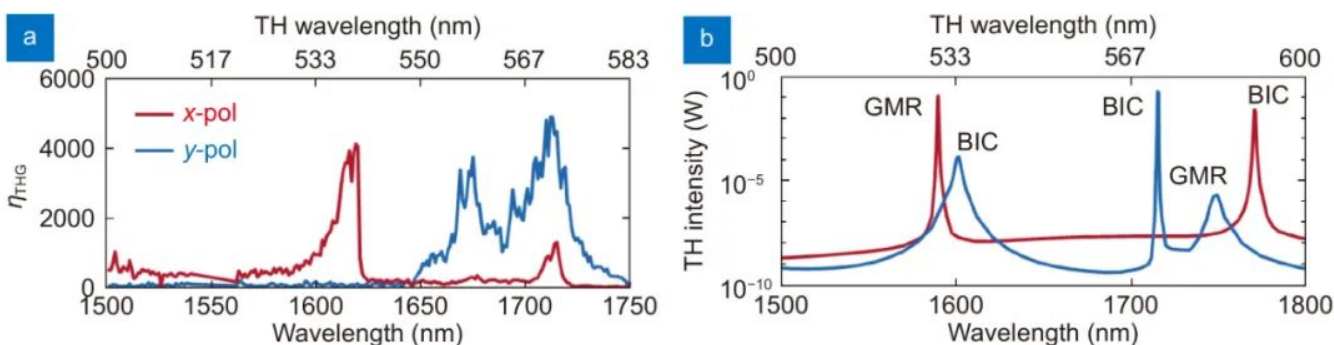


图3实验测量的三阶非线性增强结果及对应的数值计算结果。

为了更深入地了解所研究的非线性光学过程，研究团队通过数值计算进一步研究了非线性发射与超表面单元结构不对称性之间的关系，并揭示了基于线性导模谐振和连续域束缚态的谐波信号对超表面不对称的高度依赖性。

该工作提出了一种有效的方法来增强和控制全介电超表面中的不同阶谐波的产生，在非线性光学、光子学、量子光学、光学成像和传感等领域具有广泛的应用前景。该成果以Resonantly enhanced second- and third-harmonic generation in dielectric nonlinear metasurfaces为题作为封面文章发表在Opto-Electronic Advances2024年第5期。

研究团队简介

隶属于英国伦敦大学学院电子电气工程系的Nicolae C. Panoiu教授及其团队主要从事于纳米光子学的理论与计算等方面的研发工作，重点致力于硅光子学、光子纳米结构的光学特性、经典和量子超材料的基础理论研究以及电磁结构的计算建模。该小组与澳洲国立大学教授、光子学领域的国际知名学者Yuri Kivshar，以及哈尔滨工业大学（深圳）宋清海教授建立深度合作，通过谐振增强的二维超表面实现了纳米尺度下光与物质相互作用的增强，并可以有效地操纵由中心对称材料

制成的介电结构中的高次谐波产生，该成果为新型光子纳米器件的研究和设计的进一步发展奠定了基础。

Nicolae C. Panoiu教授已累计在包括Nature Photonics、Nature Physics、Nature Communications、Sciences Advances、Physical Review Letters、Opto-Electronic Advances等国际高水平期刊杂志发表SCI论文250余篇，论文被国内外同行引用10000余次。

相关论文

Wang JT, Tonkaev P, Koshelev K et al. Resonantly enhanced second- and third-harmonic generation in dielectric nonlinear metasurfaces. Opto-Electron Adv 7, 230186 (2024).

DOI:10.29026/oea.2024.230186

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