
在拓扑绝缘体超结构中追踪具有可设计调控色散特性的太赫兹等离子激元极化激元

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37454.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！

在拓扑绝缘体超结构中追踪具有可设计调控色散特性的太赫兹等离子激元极化激元。 导读

在太赫兹等离子体极化激元研究领域，二维材料中狄拉克等离子体极化激元（DPPs）的光学特性调控，尤其是在太赫兹频段实现动量调谐与损耗抑制，一直是纳米光子学领域的重要挑战。近日，意大利国家研究委员会—纳米科学研究所与比萨高等师范学校的Miriam S. Vitiello团队，提出了一种基于拓扑绝缘体超结构的太赫兹DPPs调控新策略，通过设计侧向耦合的线性超结构，利用几何调控实现了DPPs波矢的可调和损耗的降低。

研究团队基于分子束外延生长的Bi₂Se₃拓扑绝缘体，制备了具有不同耦合间距的双体和三体超结构，通过相位敏感散射型扫描近场纳米显微镜直接映射了DPPs的传播特性。实验发现，当耦合间距为1 μm时，双体和三体结构中DPPs的波矢实部可提升20%，同时衰减长度增加超50%，突破了传统二维材料中DPPs损耗高、调控难的瓶颈。

研究表明，通过优化超结构的耦合距离与几何设计，可实现太赫兹DPPs色散的精准调控，其波矢远超自由空间光子动量，且在保持高动量特性的同时有效抑制损耗。这种设计不仅为拓扑绝缘体基太赫兹器件的集成化提供了新思路，还在量子信息、自旋电子学及太赫兹光子学等领域展现出重要应用潜力，为下一代超构表面器件的开发奠定了理论与实验基础。

该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》上，题为Tracing terahertz plasmon polaritons with a tunable-by-design dispersion in topological insulator metaelements，意大利国家研究委员会—纳米科学研究所与比萨高等师范学校的Leonardo Viti为论文的第一作者，Miriam S. Vitiello为论文的通讯作者。

研究背景

在太赫兹纳米光子学领域，拓扑绝缘体表面DPPs的调控与表征存在核心瓶颈：其波矢在传统结构中难以大幅调谐，且强固有损耗导致衰减长度较短，无法满足集成器件对高动量、低损耗光场的需求，而现有化学或外场调控手段又易引入额外损耗，制约了实用化进程。

同时，表征技术与结构设计存在显著局限：太赫兹频段散射型扫描近场光学显微镜难以实现高灵敏度相位分辨成像，无法精准捕捉耦合结构中DPPs的动态传播；且拓扑绝缘体多体耦合效应未被充分挖掘，超结构中DPPs相互作用机制缺乏系统

研究，导致其色散特性难以按需设计，阻碍了拓扑绝缘体基太赫兹功能器件的发展。

创新研究

研究团队创新性地设计了侧向耦合的Bi₂Se₃拓扑绝缘体超结构（如图1b、c），通过调控双体和三体超结构的耦合间距，实现了太赫兹DPPs波矢的精准调谐。在表征技术方面，研究人员采用基于太赫兹量子级联激光器的无探测器散射型扫描近场光学显微镜（如图1a），结合激光反馈干涉技术，实现了DPPs传播特性的实空间成像。

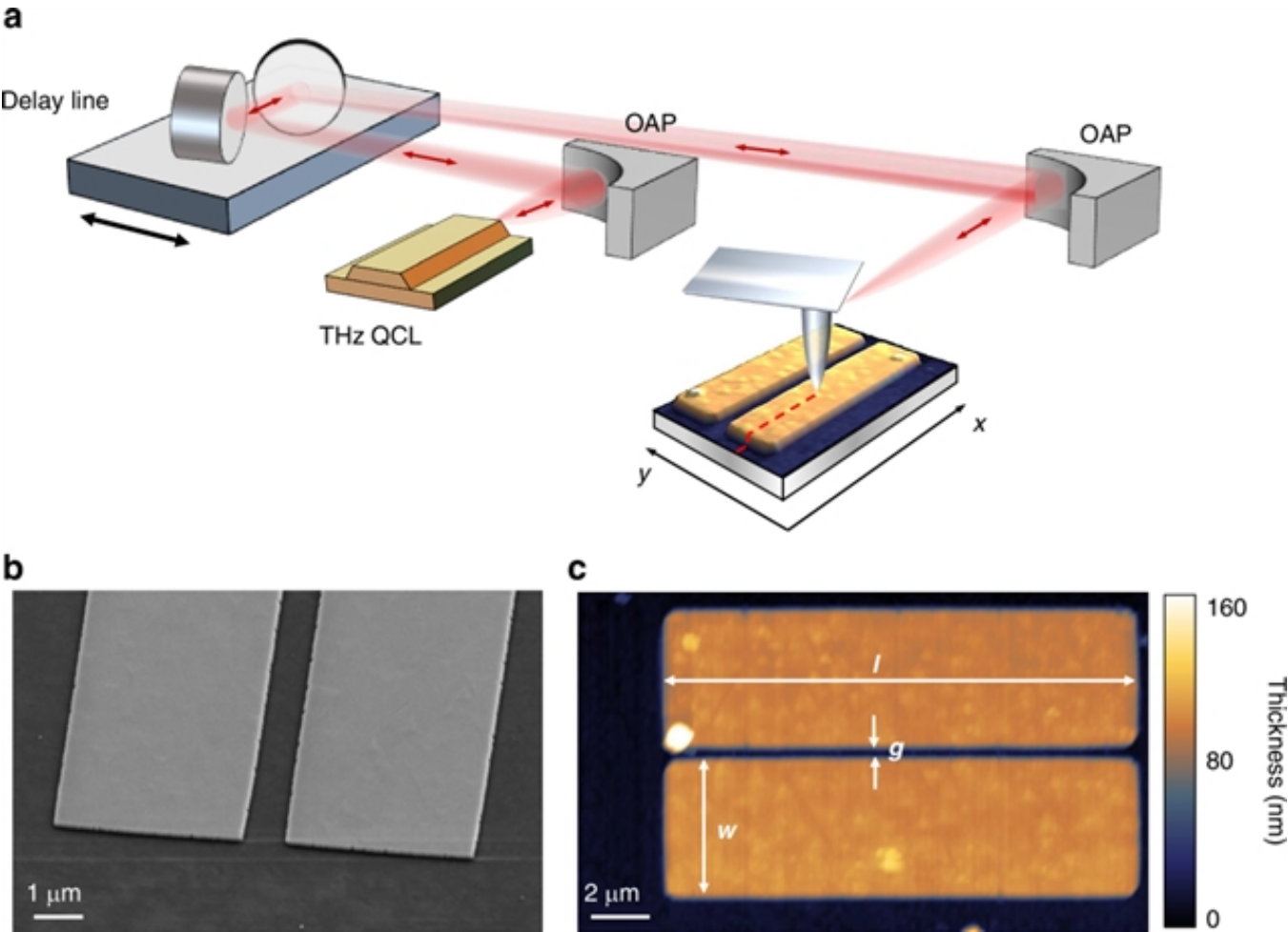


图1. 太赫兹散射型扫描近场光学显微镜实验装置与拓扑绝缘体超结构表征

实验表明，当耦合间距为 0.8 μm 时，DPPs 的波矢实部较单个超结构提升超 20%，且波矢值远超自由空间光子动量，突破了传统二维材料中 DPPs 动量调控范围有限的瓶颈，为太赫兹频段光场的纳米级操控提供了新机制（如图 2a、b）。

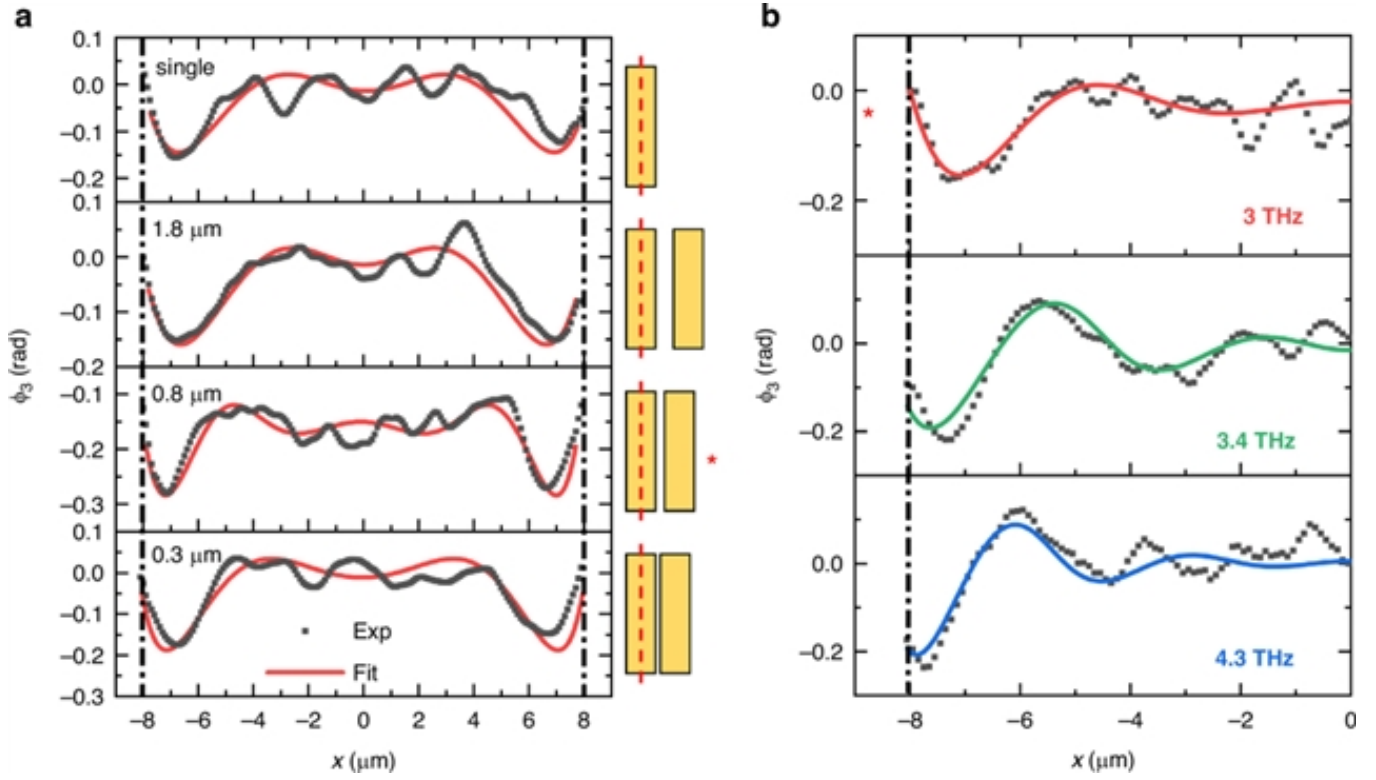


图2. 不同间隙与频率下双体天线谐振器的相位分布及色散特性

研究团队还发现侧向耦合可显著降低DPPs的传播损耗（如图3），当耦合间距为 $0.8 \mu\text{m}$ 时，双体和三体超结构中DPPs的衰减长度较单个超结构增加超50%，且相对衰减长度接近翻倍。这种损耗抑制效应源于耦合结构对DPPs横向约束的优化，避免了单一超结构中模式的几何弥散，为高性能拓扑绝缘体基太赫兹器件的设计提供了关键思路（如图3e、f）。

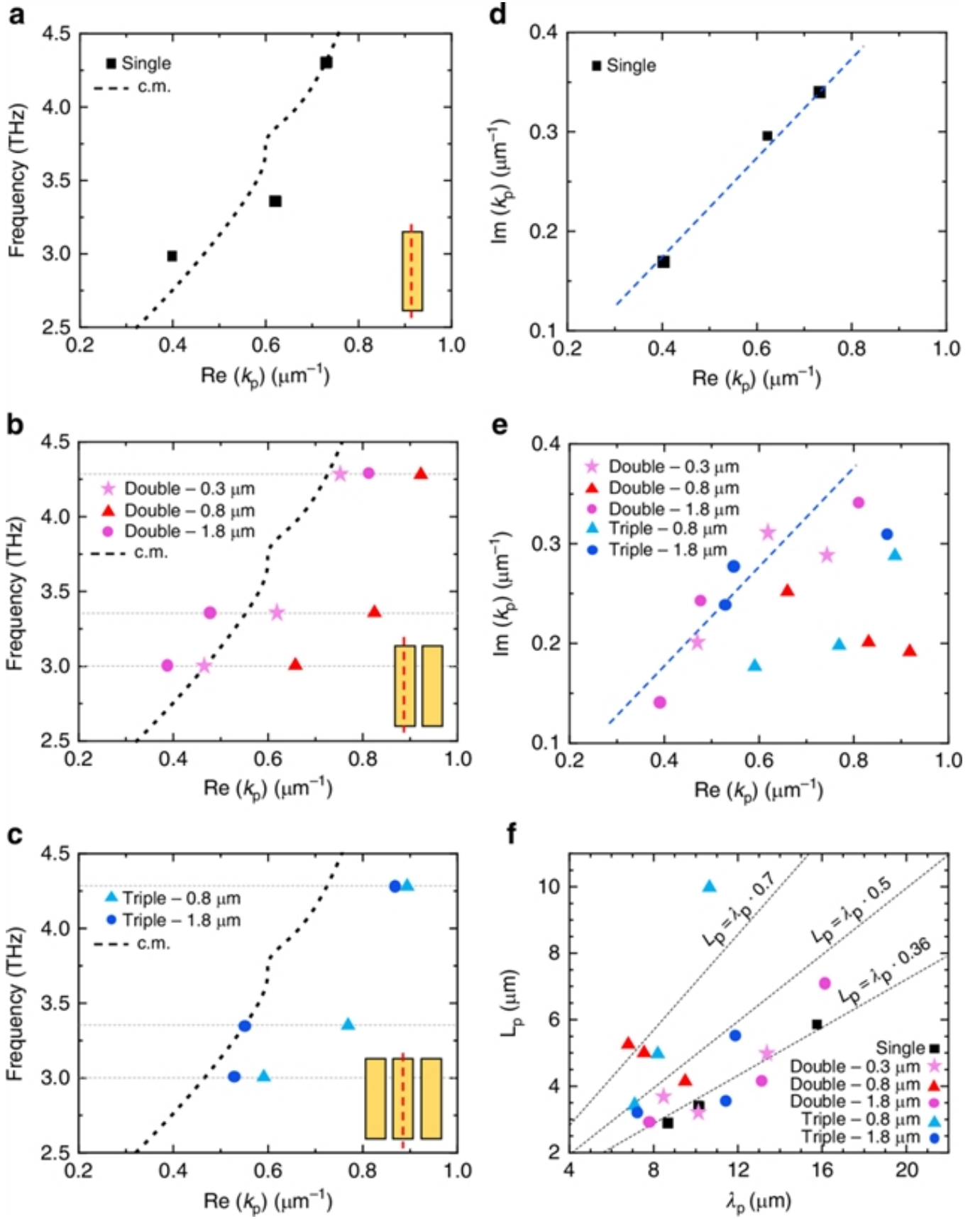


图3. 不同构型下极化激元的色散特性与衰减长度分析

总结与展望

该研究通过设计侧向耦合的Bi₂Se₃拓扑绝缘体超结构（双体和三体构型），结合基于太赫兹量子级联激光器的无探测器散射型扫描近场光学显微镜技术，系统探究了太赫兹DPPs的调控机制。研究首次实现了通过耦合间距（0.8 μm时效果最优）将DPPs波矢实部提升超20%，同时观测到衰减长度增加超50%的损耗抑制效应，证实了几何调控对拓扑绝缘体表面等离激元dispersion特性的显著影响，突破了传统二维材料中DPPs动量调控受限与损耗较高的双重瓶颈。

展望未来，可进一步拓展超结构的几何设计（如多体耦合、非对称构型），深入研究不同频段（如远红外与太赫兹交界区域）下DPPs的动态响应机制，结合理论模型优化耦合参数以实现更高效的动量调控与损耗抑制。此外，该研究为拓扑绝缘体在量子信息处理、高灵敏度太赫兹传感及集成光电子器件等领域的应用提供了实验基础，未来可通过微纳制造工艺的升级推动其从基础研究向实用化器件转化，为下一代超构表面功能器件的开发开辟新路径。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01884-0>

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：Miriam S. Vitiello 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