
超材料中的德拜弛豫过程

作者：writer 来源：科学网

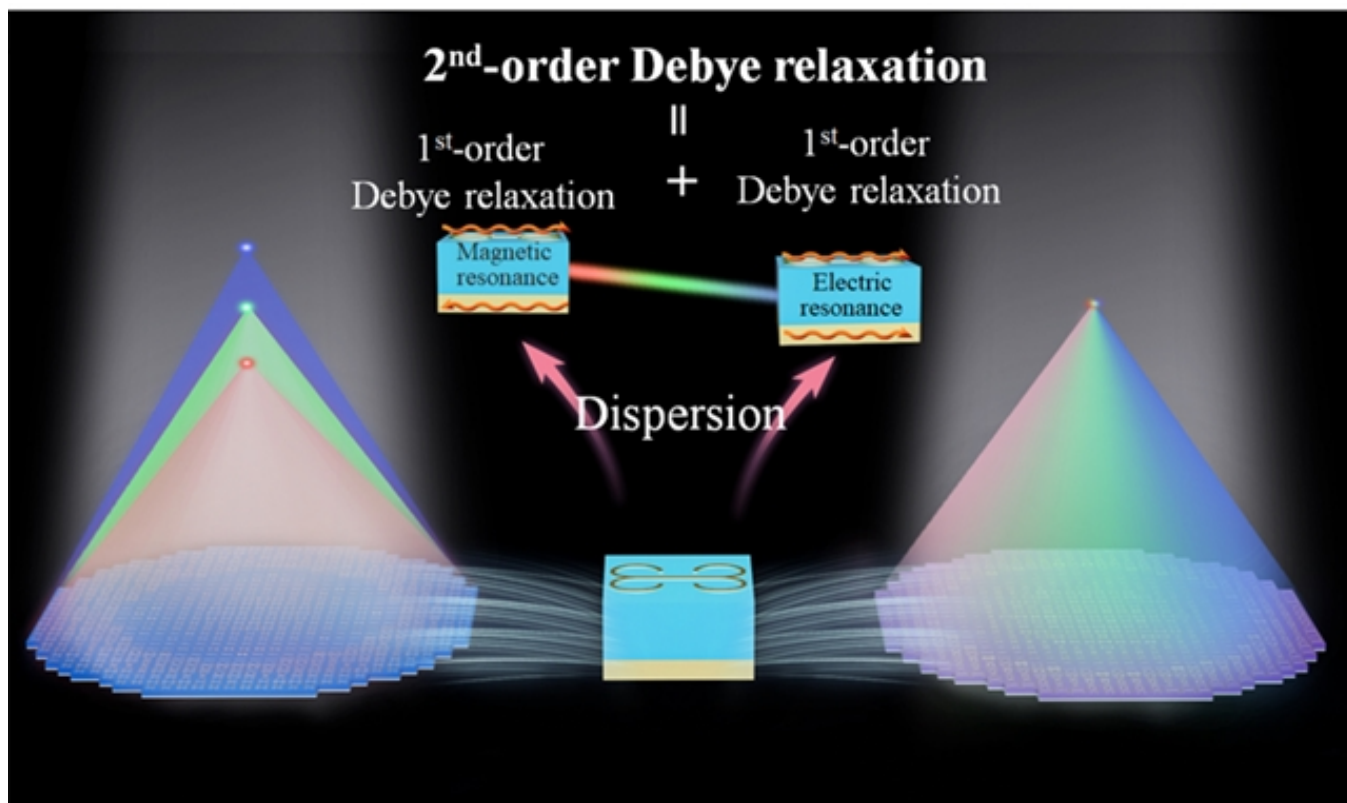
本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/34994.html>

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！

超材料中的德拜弛豫过程。 导读

超材料微结构单元的电磁响应通常采用电介质物理中的经典极化理论模型来描述，例如：Lorentz、Drude模型，但是唯独缺少在电介质物理学中非常重要的Debye模型，亟待挖掘超材料中的弛豫响应，进一步丰富超材料设计的理论体系，弥合超材料与电介质物理学衔接的空白区。近日，空军工程大学王甲富教授团队联合东南大学崔铁军院士团队立足于电介质物理中的极化理论，成功发掘出超材料微结构单元的宽带电磁响应新机制——德拜弛豫。该研究发现超材料微结构单元的电谐振和磁谐振诱导产生的相位响应均表现为一阶德拜弛豫过程，将二者协同设计可进一步构建出带宽跨度更大的二阶德拜弛豫响应。因此，通过调控设计微结构单元的一阶弛豫响应可构建二阶甚至高阶弛豫过程，从而在超宽频带内对超材料的色散特性进行灵活调控。该研究发现了超材料微结构单元电磁响应理论模型中缺失的弛豫响应，填补了超材料与电介质物理学在极化理论衔接的空白区，为超材料在新一代通信、高分辨率成像、隐身伪装等技术领域应用提供了强有力的理论支撑。相关成果以2nd-Order Debye Relaxation in Electromagnetic Metasurfaces for Wideband Dispersion Engineering为题发表在《Light: Science Applications》。

论文共同第一作者为空军工程大学富新民博士和韩亚娟博士，通讯作者为空军工程大学王甲富教授、杨杰博士和东南大学崔铁军院士。其他具有突出贡献的作者还包括空军工程大学孙勇博士、丁畅博士、贾宇翔博士、王军副教授和屈绍波教授。



创新研究

极化理论是电介质物理最重要的理论基础。对于具有极高频率的电磁波而言，极化的本质是电子运动，表现为电介质材料中电子相对于分子/原子中心的位移或旋转，或金属中自由电子的集体振荡，产生沿外加电场方向排列的偶极矩。极化对于揭示电介质宏观电磁特性的微观机制非常重要。对于传统电介质而言，其组成粒子包括原子、分子等。一般来说，在没有外加电场的情况下，由于热运动平均化，这些粒子对宏观极化的贡献会消失。只有在施加电场的影响下，粒子才沿着电场方向排列，并对偶极矩产生贡献，从而导致宏观极化强度的产生。在电介质物理学中，电介质的电磁特性源自几种重要的极化机制，分别用Debye、Drude或Lorentz模型来描述。超材料在宏观上能表现出诸如负介电常数之类的奇异电磁参数，而导致此类参数的极化机制在电介质物理学中早有研究。对比电介质极化响应理论，我们发现，超材料作为电介质材料的延伸和拓展，其电磁响应理论缺少了一块拼图，即Drude（自由电子集体振荡）和Lorentz（束缚电子局域共振）模型频繁地被用于描述超材料的电磁响应，而在电介质物理学中非常重要的Debye弛豫模型始终缺位，如图1所示。研究团队指出：超材料电磁响应本质上源于微结构单元的极化行为，但超材料设计长期依赖于Drude和Lorentz模型。若能够在超材料中引入Debye弛豫机制，将构建出超材料电磁响应模型缺失的拼图，弥合超材料与电介质物理学衔接的空白区，进一步丰富超材料设计的理论基础，为宽带甚至超宽带超材料设计与应用提供有力的理论支撑。

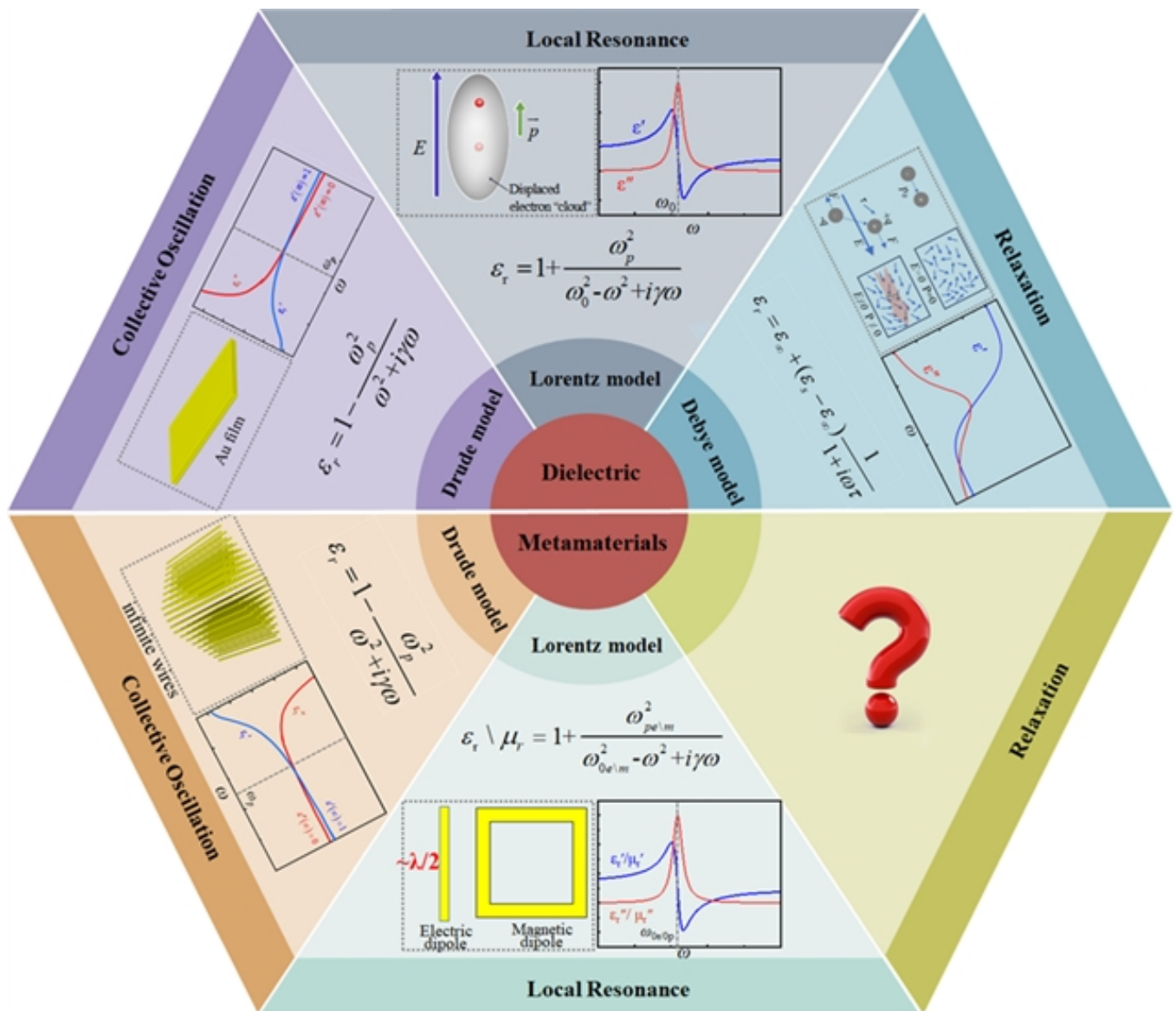


图1. 传统电介质材料和超材料的介电响应模型对比图。

研究团队提出了基于超材料电谐振-磁谐振协同设计的弛豫响应模型。研究团队首先从基础理论入手，分析了典型反射型超表面中磁谐振与电谐振产生的基本原理。根据超材料设计理论，这两种谐振可分别等效为磁偶极子和电偶极子振荡，均为Lorentz型谐振（偶极子局域振荡谐振模型）。通过理论推导，研究团队进一步发现，单个谐振下的反射相位随频率变化规律事实上遵循一阶Debye弛豫过程，革新了超材料电/磁谐振仅具备Lorentz型相位突变的传统认知。更为关键的是，通过精心设计磁谐振与电谐振的谐振频率、谐振强度、Q值等，可构建具有超宽频带相位渐变特性的二阶甚至高阶弛豫过程，如图2所示。

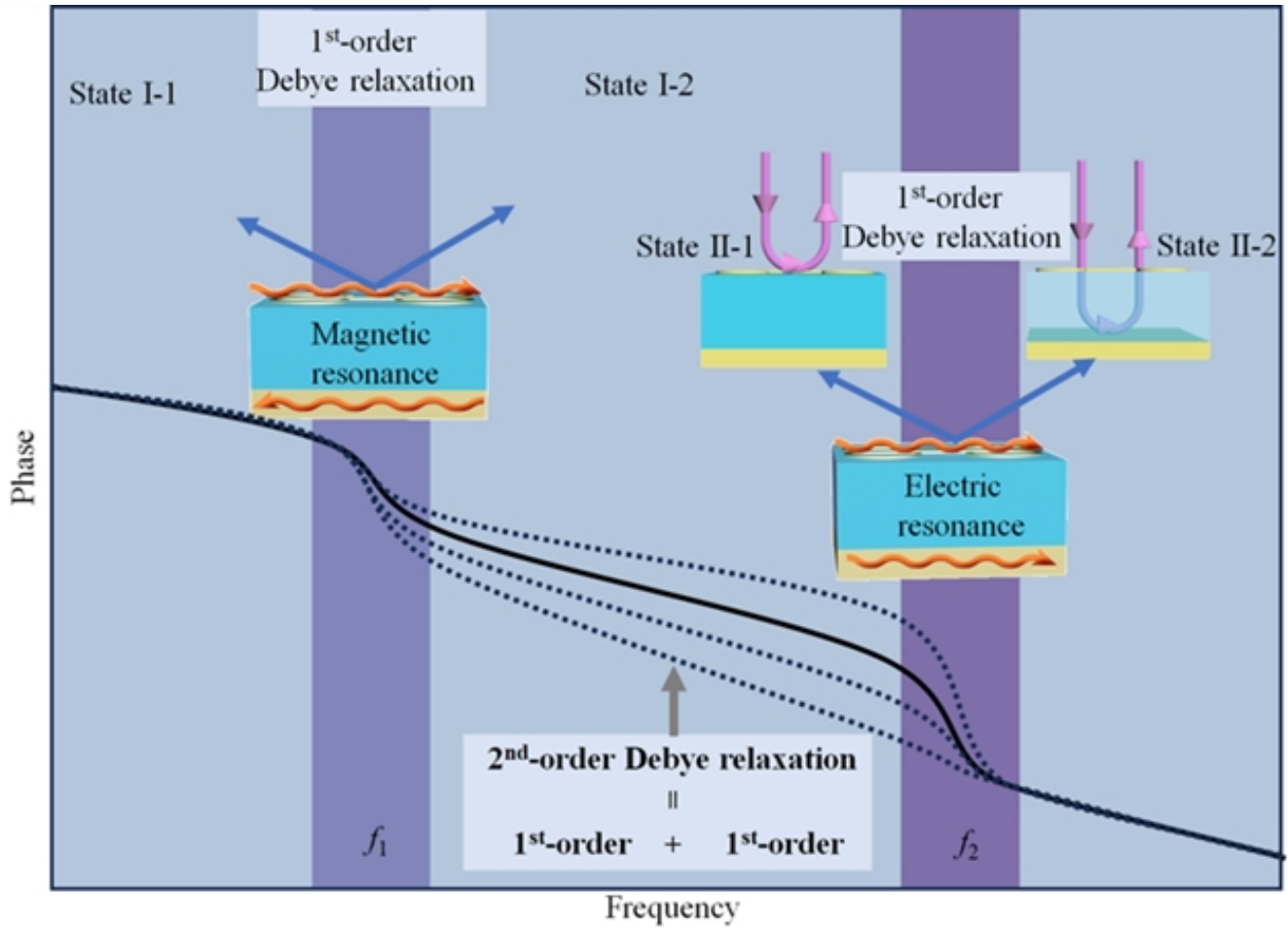


图2. 通过超表面两个一阶德拜弛豫过程构建的二阶弛豫过程示意图。

为了验证所提出的弛豫响应模型，研究团队提出了带有四个金属椭圆弧线旋臂结构（Quad-Elliptical-Arc, QEA）作为超表面的基本单元，基于二阶Debye弛豫展示了其超宽带色散调控的强大能力。该研究特别选择了圆极化电磁波作为激励源，圆极化波可本征激发QEA结构内自由电子沿金属椭圆弧线旋臂做旋转运动，生动地模拟了电介质物理学中的取向极化过程（偶极子转向极化过程）。仿真结果表明，8GHz时电流主要集中在椭圆弧上，且QEA金属结构和金属反射背板上的表面电流方向相反，表明存在磁谐振。在12GHz时，QEA金属结构和金属反射背板上的表面电流方向相同，表明存在电谐振。这两种谐振协同构成了跨越更宽频段的二阶Debye弛豫过程。通过改变QEA结构单元的几何参数，能有效调控两个一阶弛豫响应，从而定制化设计二阶弛豫过程。研究团队基于该结构单元设计了有色差反射聚焦和消色差反射聚焦两款超表面，仿真和实验证明了所设计的超表面在整个X波段（8-12GHz，相对带宽40%）内实现了有色差聚焦和消色差聚焦，从而进一步验证了基于二阶弛豫响应的宽带色散调控能力。

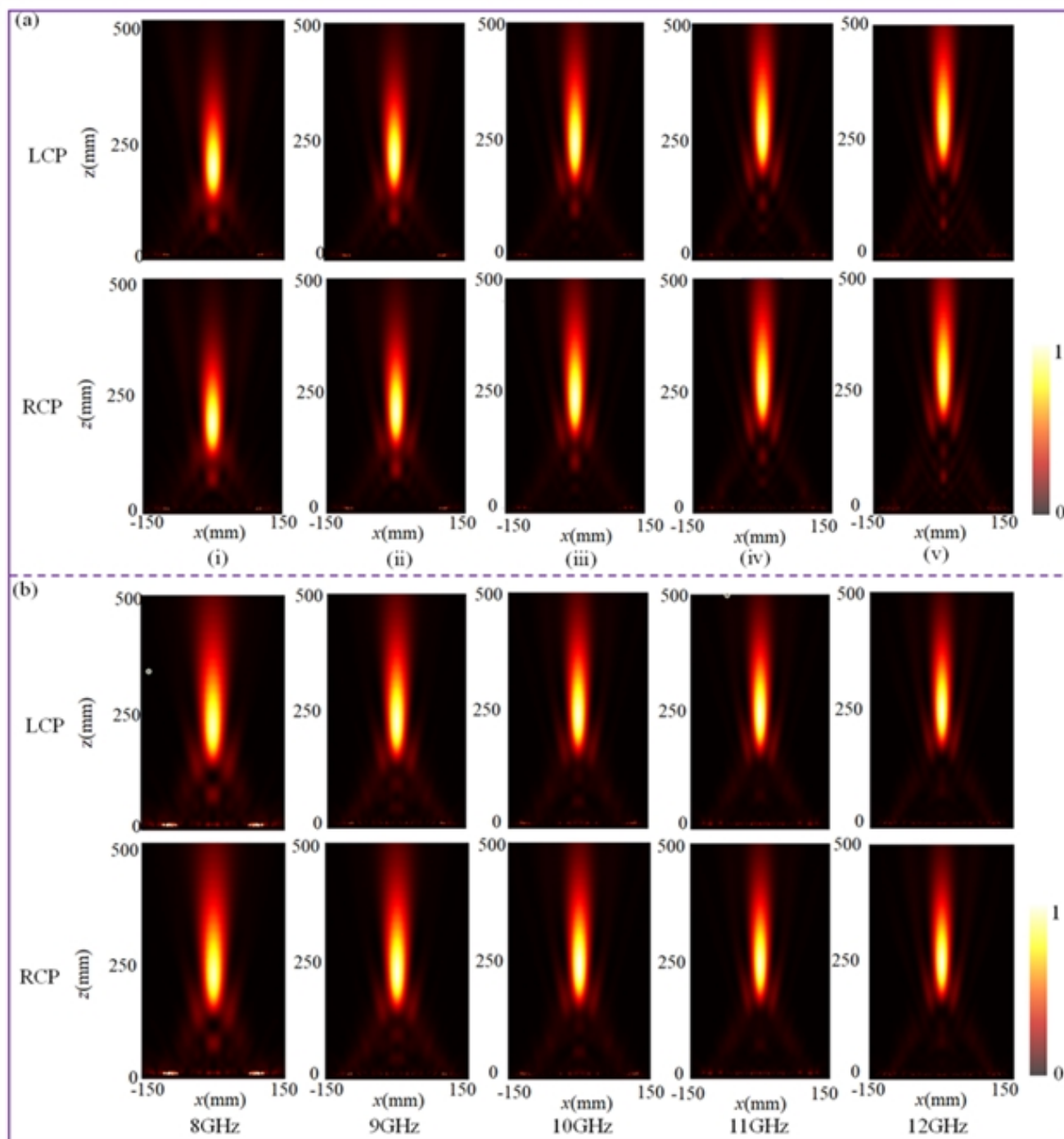


图3. 有色差聚焦和消色差聚焦对比：（a）有色差聚焦；（b）消色差聚焦。

作为电介质物理学中最重要的极化理论模型之一，Debye弛豫过程有利于在宽频带内进行材料电磁参数的调控设计。面向宽带/超宽带应用，研究团队成功建立了超材料中的Debye弛豫响应模型。以电、磁谐振为基础，首次在理论上将德拜弛豫模型引入到超材料领域，建立了超材料的二阶弛豫模型，设计了具有二阶德拜弛豫响应的超材料，实现了宽带有色差和消色差的反射聚焦超表面，完成了基于Debye弛豫的超材料色散调控仿真与实验验证。该研究不仅架起了超材料与经典电介质物理之间的桥梁，进一步丰富了超材料的理论内涵和物理模型，也开辟了超材料电磁调控新维度——宽带色散调控。该理论可方便地扩展到其他电磁频谱（如太赫兹和光波），或其他领域超材料（如声学超材料）的设计中。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01813-1>

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：崔铁军等 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