

超材料前沿研究一周精选

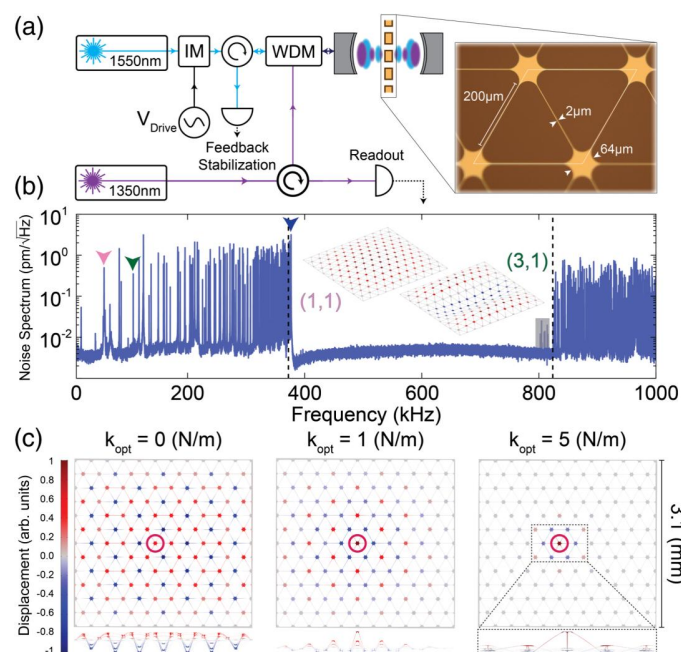
2024 年 11 月 25 日-2024 年 11 月 30 日

索引:

- 1 光学定义的声子晶体缺陷
- 2 第二自旋陈数的拓扑声子光纤
- 3 基于双波段超表面 CNN 近场定位的自适应无线供电网络
- 4 实现具有任意统计相位的一维任意子
- 5 量子三模系统中高阶 EP 点拓扑不变量的测量
- 6 将单一高亏格表面折叠成超构材料功能库
- 7 利用隐式神经表示的近各向同性、极限刚度、连续 3D 力学超构材料序列

1 光学定义的声子晶体缺陷

破坏晶体系统中的周期性会产生局部“缺陷”模式，这些模式在历史上为凝聚态、光学、电子和声学系统提供了不可或缺的功能。在光力学领域，声子晶体缺陷用于将机械模式与有损边界和“软夹”隔离开来，以减少弯曲损耗。由此产生的缺陷模式表现出足够低的损耗，可以观察到多模压缩，发挥基于测量的量子控制，实现超出标准量子极限的灵敏度，在基态下实现超长相干时间，甚至在室温下观察到量子效应。此外，声子晶体及其所承载的缺陷可以进行工程设计。例如，可以在同一晶体中产生多个缺陷，并且可以调整它们的模间耦合以用于传感和传感应用。或者，可以引入共定位光子晶体缺陷来提高光机械耦合率。这种增强有助于激光冷却到量子基态、观察量子运动以及操纵单个光子和声子。还可以利用此类缺陷阵列来实现光机械减速光、同步物理、储层工程、狄拉克物理、安德森局域化、多体现象，包括拓扑效应、改进或非互易传输，以及为光子和声子生成合成场。目前创建机械晶体缺陷的范例依赖于仔细的模拟和精确的光刻来在晶体结构中产生几何扰动。更重要的是，一旦制造出来，这些缺陷的参与质量和模式分布就会由物理实现的几何形状固定，需要多次迭代才能找到具有所需属性的设备。近日，麦吉尔大学的 Thomas J. Clark 和 Jack C. Sankey 团队，展示了一种具有光学可编程缺陷模式的机械晶体。通过将光学弹簧应用于声子晶体膜的单个晶胞，可以将单个机械模式平稳地转移到带隙中，从而将其空间分布从横跨整个晶体的空间分布定位到局限于几个晶胞内的空间分布。这种定位表现为机械频率偏移的增强，与模式参与质量的 37 倍减少相称。这种快速、可逆、全光学控制代表了一种全新的机械缺陷设计方法，具有原位重构的优势。本工作中的概念验证演示自然延伸到可编程二聚体、波导、晶格等，大大扩展了可能的光机械系统和研究的范围。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.226904>

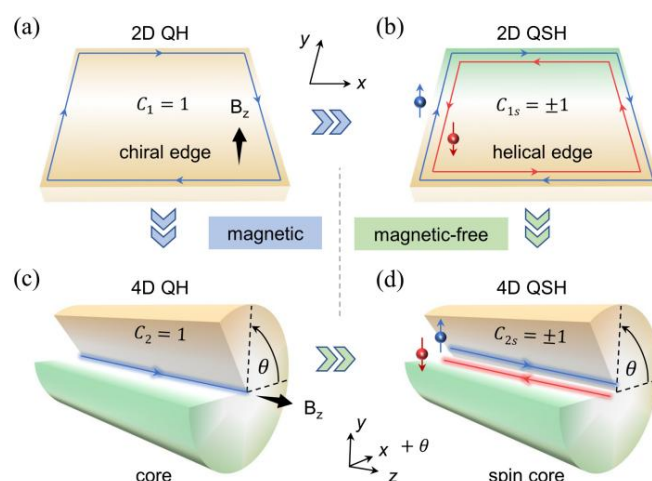


2 第二自旋陈数的拓扑声子光纤

近几十年来，寻找物质的新拓扑状态是凝聚态物理学的核心。量子霍尔（QH）族是最具代表性的拓扑类，开创性的工作涉及二维时间反演破缺系统的整数 QH 效应，其量化对应于由第一陈数决定的手性边界态。在没有磁响应的情况下，拓扑材料的一个突出成员是二维量子自旋霍尔（QSH）效应，其特征是第一自旋陈数。目前，拓扑态也已经扩展到了三维，为发现各种拓扑材料和有趣的状态提供了充足的空间，人们已经认识到对称性和维数在发展新的拓扑相中起着关键作用。在数学中，表征拓扑性质的陈数在偶数维中被很好地定义，这表明二维拓扑物理具有其四维对应物，虽然空间维度被限制为三个，但可以人工创建额外的合成维度来构建四维流形。目前的尝试包括在通用超冷原子、光子、电路和声子系统中使用拓扑电荷泵实现四维 QH 物理，其中体响应与第二陈数相关。在磁性光子光纤结构中也从理论上提出了与四维参数空间相关的拓扑核运输，作为四维 QH 材料。然而，一个悬而未决的问题是，是否存在一种具有自旋核运输的 QSH 材料的四维模拟物，其特征是第二自旋陈数，这可能成为 QH 家族的新成员。

近日，南京大学陈延峰教授、何程教授课题组，利用旋转调制作为合成维数构建了一个四维流形，实验实现了具有自旋核态和高阶面心束缚态的声子光纤，该光纤在四维流形中受到第二自旋陈数的拓扑保护。这些结果突出了高维拓扑、拓扑缺陷及其底层流形之间的相互作用，从而为拓扑波导、激光器和谐振器等实际应用开辟了可能性。在此基础上，可以期待许多新颖的拓扑现象，不仅适用于声波，还适用于各种物理平台，通过考虑更多的空间或时间自由度变化来合成维度，例如以第三自旋陈数为特征的六维 QSH 物理。实验观察到的自旋核运输和面心定位可能为未来探索具有更高性能的拓扑保护光纤和能量收集装置铺平道路。相关文章发表在《Physical Review Letters》上。（刘梦洋）

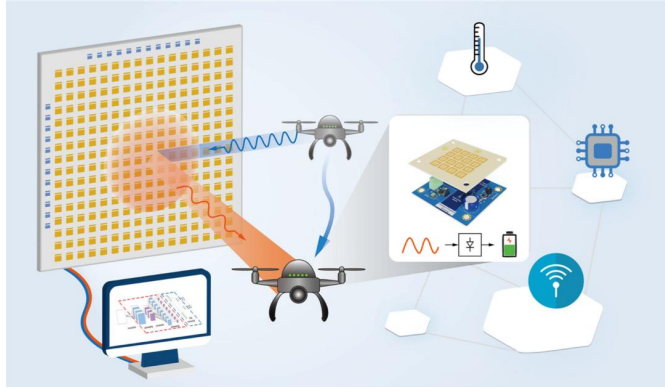
文章链接：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.226602>



3 基于双波段超表面 CNN 近场定位的自适应无线供电网络

根据库米定律，随着电子设备效率的提高，人们普遍认为，未来的消费电子产品所需的能量将比现在的同类产品少 1000 倍。此外，每年有数万亿台物联网（IoT）设备被部署。如此庞大的数量迫切需要为这些低功耗设备开发新的充电网络。考虑到目前的电池供电方式寿命不长且不环保，无线电力传输（WPT）是一种很有前途的解决方案，它具有非接触式、紧凑和可控的优点。然而，由于缺乏自适应可调性，传统感应式 WPT 的传输距离较短，并且需要充电设备固定其位置以实现最大传输效率。这似乎削弱了非接触式 WPT 的优势。近年来，可编程超表面（PMS）的兴起为灵活光束聚焦提供了一种有前途的解决方案。PMS 由无源超表面发展而来，可以通过加载电可调器件来动态切换波前相位。虽然一般来说，PMS 对电磁（EM）波的波前相位进行粗略的 1 位或 2 位量化，并且在功率聚焦效率方面存在差距。但是，可以通过设计更大的孔径来弥补这一不足。事实上，PMS 的潜力已被广泛认可和探索，例如无线通信、微波成像、雷达探测和生命体征监测。近日，西安电子科技大学李龙教授和东南大学崔铁军院士团队合作，基于双波段超表面，提出了一种自适应无线供电网络（AWPN），以实现同时无线定位和非接触式供电。它首先通过结合空时编码（STC）和卷积神经网络（CNN），在单输入单输出（SISO）系统上实现 3 厘米分辨率的定位。凭借精确的位置信息，AWPN 实时将功率束对准终端，实现稳定的能量传输。然后，无电池终端能够感知环境数据并上传结果。从测量结果来看，AWPN 的 CNN 分类准确率超过 98%，并且可以容忍一定的环境变化。因此，由于具有自适应和非接触性，该研究将推动物联网（IoT）、智能超表面和机器人行业的发展。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）

文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41467-024-54800-2>



4 实现具有任意统计相位的一维任意子

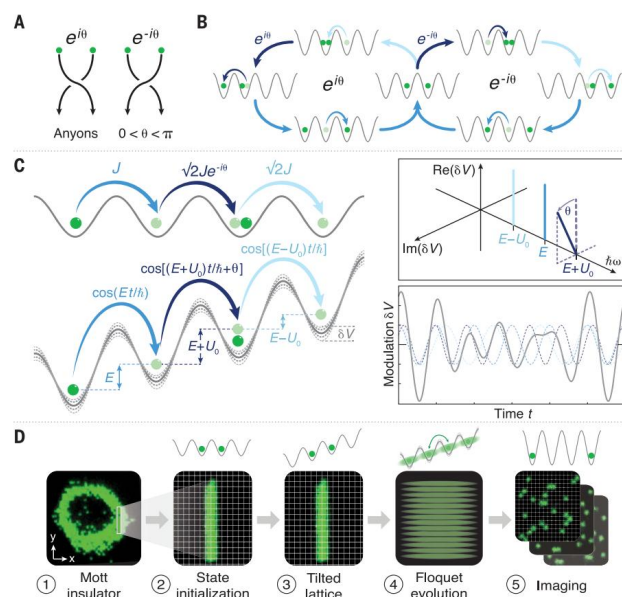
在三维空间中，量子理论区分玻色子和费米子，取决于两个相同粒子交换位置时多体波函数所获得的相位

关于 1D 分数统计系统的模型已在连续和离散晶格上提出。对于强关联的任意子哈伯德模型，该模型通过晶格的离散配置空间区分粒子交换路径，并通过 Fock 空间中的贝里相位来表现交换相位。该模型预测了许多奇异现象，包括不对称的动量分布、弗里德尔振荡的增强、由统计参数

近日，哈佛大学的 Markus Greiner 教授团队通过光学晶格中的超冷原子实现了具有任意交换统计的阿贝尔任意子，采用密度依赖的 Peierls 相位来调控统计相位。团队研究了两种任意子在量子漫步中的动态行为，观察到了任意子的 Hanbury Brown - Twiss 效应以及无本征相互作用的束缚态形成。当引入相互作用后，观察到空间不对称的输运行为，区别于玻色子和费米子的对称动力学。该研究为探索 1D 任意子的多体行为奠定了基础。相关内容发表于《Science》上。

（金梦成）

文章链接：<https://doi.org/10.1126/science.adi3252>

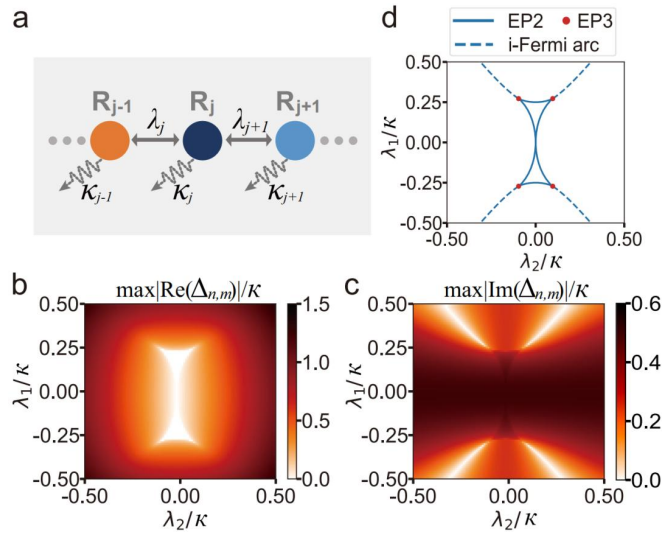


5 量子三模系统中高阶 EP 点拓扑不变量的测量

非厄米(NH)特性使得 NH 哈密顿量的两个或多个本征向量可能会在 EP 点处合并, 形成一个具有相同本征能量的简并本征态。这些 EP 点能够引发许多独特的现象, 尤其是一些在厄米系统中无法出现的拓扑现象。过去二十年, 许多实验研究了 NH 系统中的奇异特性, 包括能谱的 PT 对称相变、动力学手性行为、EP 纠缠跃迁以及 NH 拓扑现象等。NH 系统的拓扑不变量可以通过本征向量或复本征能量来量化, 这与厄米系统显著不同, 因为厄米系统的本征能量总是实数, 因此无法用来定义拓扑特性。迄今为止, NH 拓扑现象的实验观察均限于二阶例外点 (EP2s), 这些实验主要集中在经典系统或由经典驱动的量子比特上。相比 EP2s, 高阶例外点能够展现出更为丰富的拓扑性质, 而相关的能谱拓扑不变量在定义上也不同。尽管具有重要的理论价值, 但高阶 EP 点的拓扑不变量至今尚未在实验中得到明确表征。

近日, 福州大学的杨贞标教授和郑仕标教授, 杭州师范大学的杨垂平教授联合团队研究了高阶 EP 点相关的量子力学 EP 拓扑, 并在理论与实验中进行了探索。研究的 NH 复合系统由多个相互作用的模式组成, 这些模式的非单位演化引发了单激发子空间中的高阶 EP 点, 且无需量子跃迁。每个高阶 EP 点的拓扑性质可以通过同伦不变量来量化。团队在超导电路中实验性地构建了一个 NH 三模系统, 其中一个非线性 χ mon 模式被可控地耦合到两个存储在微波谐振腔中的光子模式。系统的非厄米性通过一个光子模式的显著耗散效应表现出来。该系统的 NH 哈密顿量在实参数空间中具有四个 EP3 (三阶 EP) 点。通过在参数空间的第一象限沿着围绕该 EP3 的回路映射出本征能量, 团队定量地表征了与 EP3 相关的同伦不变量。系统的本征能量是通过在单激发子空间中测量三模系统在不同演化时间下的输出状态得到的。这是首次实验性地表征与高阶 EP 相关的拓扑不变量。相关内容发表于《Nature Communications》上。(金梦成)

文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54662-8>



6 将单一高亏格表面折叠成超构材料功能库

力学超构材料的特性源于其内部结构而非材料成分, 展现非传统力学特性如拉胀性、负弹性模量/密度和可重构性。拓扑力学与超构材料设计的交叉研究发现了受 k 空间拓扑结构控制的拓扑麦克斯韦晶格等新超构材料。其特性在边缘聚焦软

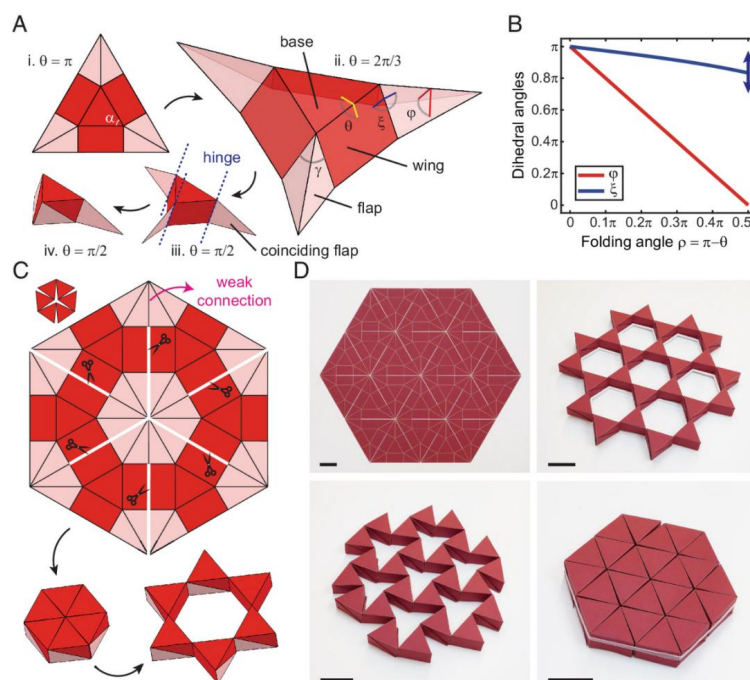
化模式和应力承载模式，由晶格带状结构控制。理想晶格中铰链连接，实际晶格中弹性韧带取代。拓扑特性在线性和非线性变形中均存在，表现为边缘变形模式的不对称性。剪纸是一种 2D 大变形编程方法，其变形由缝隙分布和厚度与铰链宽度比决定。制作有限厚度剪纸机构需平衡残余材料刚度和强度。一般来说，通过传统制造方法（如 3D 打印、切割或铸造）获得的剪纸结构会受到平面内刚度和平面外强度之间不利竞争的影响，从而阻碍其响应。

近日，美国明尼苏达大学 Stefano Gonella 和 Glaucio H. Paulino 教授团队提出了一种协同方法：折叠式剪纸——其中，剪纸组合通过折纸图案的典型折叠方式得到了补充。除了新出现的图案本身，这种协同方法还带来了拓扑力学超构材料。虽然人们已经通过各种方法，如 3D 打印、切割、铸造和组装等，制造出了“折纸超构材料”，但“折纸超构材料”的独特性能来自于通用的折叠协议。对于目标剪纸图案，设计了一个扩展的高亏格图案，其中包含适当的折痕和切口集合，并对其进行顺序折叠，从而得到具有有限面外厚度的 2D 晶格的蜂窝结构。该策略结合了典型方法通常相互排斥的两个特点：涉及单块材料的制造和实现近乎理想的单元间铰链。文章对三角形和四边形剪纸结构的各种组合进行了测试。还展示了大量新出现的超构材料功能，包括 kagome 剪纸在极化和非极化状态之间的拓扑相位切换可重构性，以及方形菱形剪纸的非互易力学响应。相关研究发表在《Proceedings of the National Academy of Sciences》上。（徐锐）

文章链接：

DANG X, GONELLA S, PAULINO G H. Folding a single high-genus surface into a repertoire of metamaterial functionalities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024, 121(46): e2413370121.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2413370121>

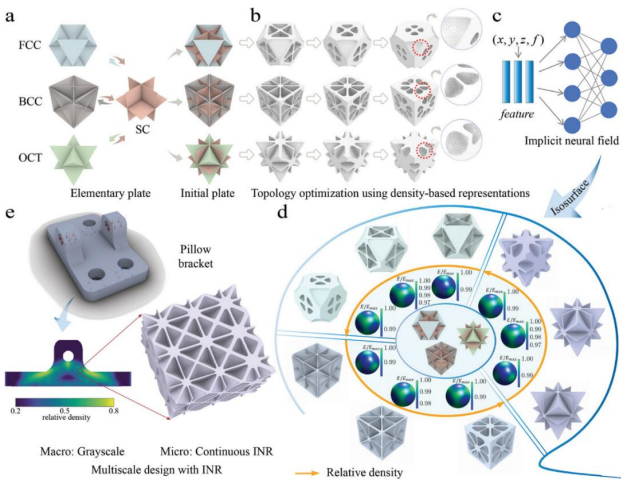


7 利用隐式神经表示的近各向同性、极限刚度、连续 3D 力学超构材料序列

力学超构材料的极限模量仍是促进高性能力学材料设计的一项重要工作。各向同性力学超构材料因其性能均匀、简化制造、减少应力集中、增强承载力和耐久性而尤为重要。连续超构材料序列确保连通性，可制造性能可变的功能梯度材料。在设计大相对密度间隔的连续超构材料序列上，接近 Hashin-Shtrikman (HS) 上限，作为多尺度结构的基本构件，确保各向局部刚度一致，提供可预测性能。早期 3D 超构材料研究集中于类桁架结构，闭孔优于开孔，板状结构因平面内均匀分布而优异。实现各向同性需特定策略，如 n 级层压板，至少 6 级增加几何复杂性。组合板结构可达理论极限。近年提出多种数值技术，如拓扑、形状优化和机器学习，但难以生成接近各向同性、极端刚度、连续的 3D 超构材料序列。近日，中国科学技术大学翟晓雅教授团队结合拓扑优化和数据驱动设计，提出了三种近各向同性、极端刚度和连续的 3D 力学超构材料序列。通过创新的结构设计，这些序列在最不利方向上达到了 Hashin-Shtrikman 上限的 98% 以上。这一性能跨越了 0.2-1 的相对密度范围，超越了以往在中等和更高密度下表现不佳的设计。此外，超构材料序列创新性地采用了隐式神经函数表示，因此无需分辨率即可显示连续变化的密度。实验验证证明了这三种序列的可制造性和高刚度。相关研究发表在《Advanced Science》上。（徐锐）

文章链接：

ZHAO Y, WANG L, ZHAI X, HAN J, MA W W S, DING J, GU Y, FU X M. Near-Isotropic, Extreme-Stiffness, Continuous 3D Mechanical Metamaterial Sequences Using Implicit Neural Representation[J]. Adv Sci (Weinh), 2024: e2410428.
<https://doi.org/10.1002/advs.202410428>



（来源：两江科技评论）