MOI SKL 简报
www.moi-lab.zju.edu.cn

2022 年 第 6 期
总 第 45 期
2023 年 1 月 5 日
编 辑：夏孟华

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 TEL：0571-87951432

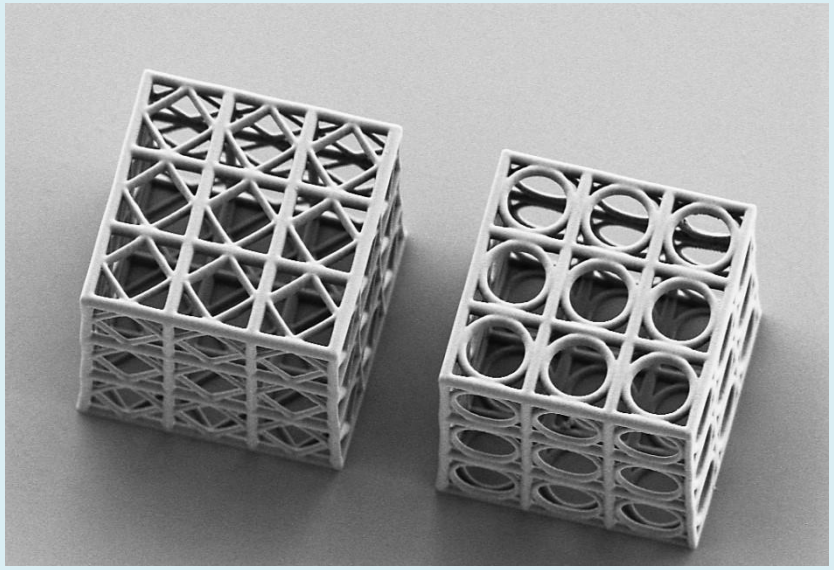
## 本期目录

**系统装备**：**刘旭、匡翠方**| 双通道激光纳米直写光刻装置.....1
**成像算法**：**刘华锋**| 深度学习结合物理模型助力高效荧光显微图像复原.....2
**核心器件**：**游建强**| 利用波导磁振子系统实现巨自旋系综.....3
**核心器件**：**高飞、陈红胜**| 辐射型反宇称时间对称等离激元系统.....4
**核心器件**：**王作佳**| 基于折纸结构的可重构磁极化激元与电路.....4
**核心器件**：**林时胜**| 极性分子极化的自驱动光电探测器.....5
**核心器件**：**王大伟、王浩华**| 实验观测光的量子拓扑态.....6
**核心器件**：**王大伟、蔡晗**| 热原子超辐射晶格的几何相位测量和含时调控.....6
**核心器件**：**林宏焘、李尔平**| 基于“鲁棒-逆向” 设计的中红外超紧凑硫系光子集成器件的实现.....7

## 系统装备 双通道激光纳米直写光刻装置

光学微纳加工技术是现代信息化产业发展的重要基础，支撑着包括芯片、半导体、传感器等产业的发展。在诸多技术中，激光直写（DLW）光刻相对与掩膜板曝光、电子束曝光等具有真三维、无掩膜、非真空的巨大优势，在当前微纳集成器件制造中发挥着重要作用。然而目前市面上流行的 DLW 装置广泛采用单焦点刻写，效率较低。此外，最小特征尺寸受限于光的衍射极限，无法突破至亚百纳米。为此，如何提高系统刻写效率同时提升刻写精度是充分发挥 DLW 真三维制造优势、推进 DLW 技术发展所亟待解决的重要问题。

最近，由浙江大学、之江实验室组成的，由**刘旭**教授、**匡翠方**教授领导的团队基于前期远场超分辨技术的研究经验，提出了一种新型的双通道激光纳米直写方法，并完成了设备样机研制。团队深入研究



发展了暗斑调控技术、双通道调控技术、边缘光抑制技术、防漂移技术、三维模型解析技术和新型光刻胶技术。所研制的装置刻写效率比市面上的单通道装置产品提升一倍，最小二维线宽达到 40nm，空间悬浮线横向线宽稳定在 20-30nm。基于偏振独立调控技术，实现了通道间的独立控制，双通道可以并行打印不同的任务。突破了传统并行方法局限于周期性结构打印的问题，能广泛应用于制造非周期性结构和高度复杂结构。这进一步扩展了 DLW 光学制造的潜在应用范围，使该装置有望成为可支持众多领域发展的实用支撑设备。

研究成果在线发表于《Advanced Photonics》期刊。【Zhu D, Xu L, Ding C, *et al*. Direct laser writing breaking diffraction barrier based on two-focus parallel peripheral-photoinhibition lithography[J]. *Advanced Photonics,* 2022, 4(6): 066002. DOI: 10.1117/1.AP.4.6.066002.】。

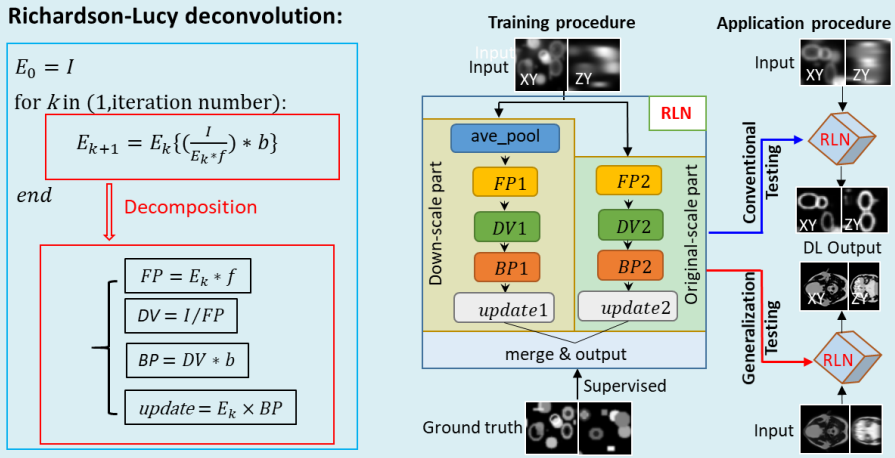
## 成像算法 深度学习结合物理模型助力高效荧光显微图像复原

荧光显微技术可以特异性地对组织、细胞、亚细胞结构与生命活动进行观察，是生命科学领域不可或缺的观察手段。荧光显微技术中存在着时间分辨率、空间分辨率、成像深度、光漂白和光毒性等多方面因素相互制约的折中关系，比如宽场荧光显微术分辨率有限但成像速度快，超分辨显微术分辨率高但采集速度和光毒性受到影响，因此仅从硬件出发很难设计出多方面令人满意的技术方案，科研人员期望从算法角度出发，减小不同因素之间的设计隔阂。

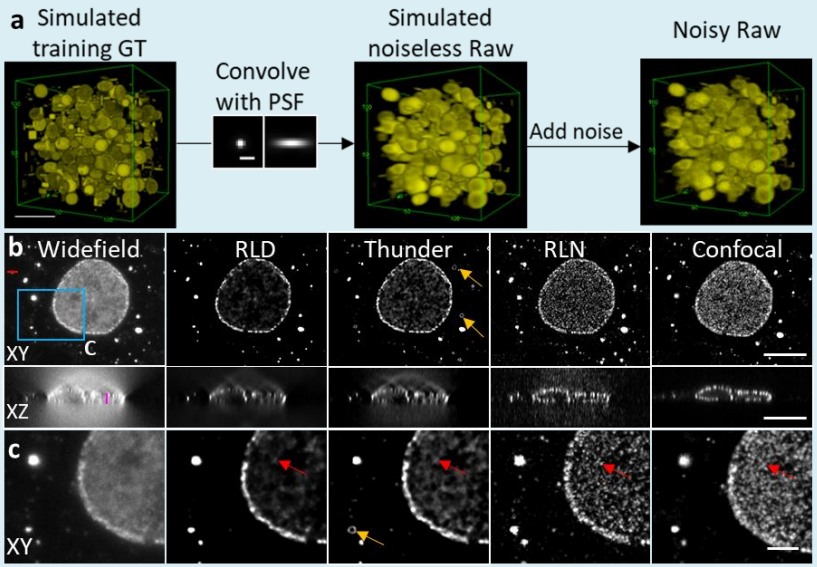
以荧光显微图像复原为例，由于成像过程可以描述为观察样本与系统矩阵的卷积，复原过程就是通过算法“去除”卷积效应，实现各个像素强度的重分配，获得细节清晰的高质量结果。目前荧光显微图像复原算法的效率还有待提升，使用传统迭代方法处理图像的时间比图像采集时间长 1~2 个数量级，而近年来热门的深度学习方法虽然处理时间很快，但其纯数据驱动的特点导致在实际应用中泛化能力受到质疑。

最近，在**刘华锋**教授指导下，博士生李玥通过分解 Richardson-Lucy deconvolution (RLD)算法并将其与深度学习结合，提出了名为 Richardson-Lucy Network (RLN)的新型智能荧光显微图像复原方法。对于大型透明组织光片显微数据，RLN 实现了现有数据处理流程 4-6 倍的加速。RLN 具有良好的泛化能力，使用仿真数据集训练的模型可以直接作用于真实宽场显微数据，并获得优于 Leica 商业软件 Thunder 的图像复原效果。

该研究成果发表于《Nature Methods》期刊【Yue Li., Yijun Su., Min Guo, Huafeng Liu *et al.* Incorporating the image formation process into deep learning improves network performance. *Nat Methods* 19, 1427 – 1437 (2022). DOI: 10.1038/s41592-022-01652-7】。以上工作获得了国家自然科学基金的支持。




Richardson Lucy 去卷积的分解以及 RLN 的训练和应用



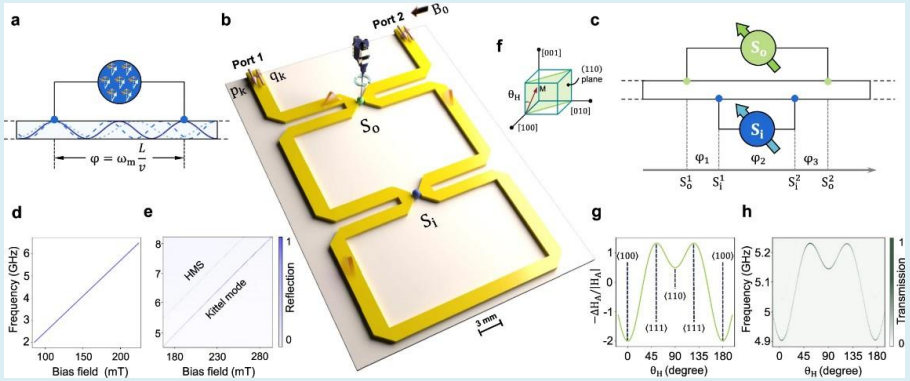

用仿真数据训练的 RLN 处理宽场显微图像的效果优于 RLD 和 Leica 商业软件 Thunder。

## 核心器件 利用波导磁振子系统实现巨自旋系综

光与物质相互作用的研究对科学与技术的发展至关重要。通常，光波长比原子的尺寸大得多，原子往往被当成一个点来处理，这就是常用的偶极近似。然而微纳技术制备的“人工原子”的尺寸可以变得与其相互作用的微波波长相比拟甚至更大，这一打破偶极近似的相互作用系统被形象地称作“巨原子”体系。许多奇特的现象出现在巨原子系统中，其中最具代表性的是由频率调控的巨原子弛豫速率和巨原子之间的无退相干相互作用。

最近，**游建强**课题组将钇铁石榴石（YIG）小球和弯曲波导在两个分离的位点耦合，首次利用波导磁振子系统提出并实现了“巨自旋系综”，并基于此平台将两个“巨自旋系综”以嵌套式的构型耦合起来。通过调节外加偏置场来改变两个小球的共振频率，进而观察两个“巨自旋系综”在不同频率下的协同行为。当微波沿着弯曲波导传输时，YIG 小球的尺寸被等效地增大至与其共振的微波波长相比拟。此时小球不能再被当作一个点来处理，两个耦合位点间将发生干涉效应。他们还研究了两个巨自旋系综的集体行为，发现通过波导作为媒介实现的两个巨自旋系综的相互作用也强烈依赖于共振频率。该研究为观测和应用“巨原子”物理提供了一个全新的实验平台，并为在波导这一开放系统中实现高相干性的信息处理、信息存储和物态调控提供了可行的方案。

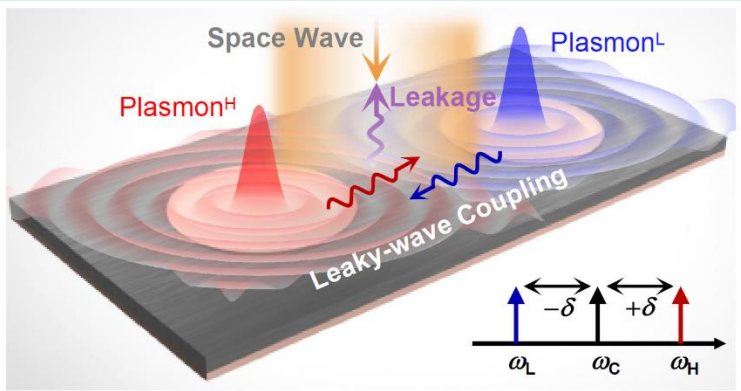
研究成果发表于《Nature Communications》期刊上。【Zi-Qi Wang, Yi-Pu Wang*, Jiguang Yao, Rui-Chang Shen, Wei-Jiang Wu, Jie Qian, Jie Li, Shi-Yao Zhu, J. Q. You*, Giant spin ensembles in waveguide magnonics, *Nat. Commun.* 13, 7580 (2022). DOI: 10.1038/s41467-022-35174-9.】博士生王梓琦为论文第一作者，游建强教授和王逸璞研究员为共同通讯作者。



## 核心器件 辐射型反宇称时间对称等离激元系统

空间波和导波，是电磁波的两种形式，分别是无线和集成技术的关键支柱；因此，研究对这两种形式电磁波的调控机制尤为必要。继宇称时间对称（PT）概念诞生后，反宇称时间对称性（APT）机制被提出，掀起了原子、光学、电路、热学等多领域的研究热潮，为电磁波调控开辟了新的研究平台。在导波调控方面，APT 系统涌现出丰富的研究成果；然而，利用 APT 机制调控空间波的研究依然缺乏，这也成为了将 APT 机制进一步应用于无线技术的阻碍。

近日，浙江大学**高飞、陈红胜**团队首次采用漏波耦合的方法，实现具有辐射特性的 APT 等离激元系统（下图），并基于该系统实现了对空间波的调控。该研究为利用空间波自由度研究 APT 新现象开辟了独特的平台，而且为基于 APT 机制的应用从近场拓展至远场提供了可能。




辐射型 APT 等离激元系统的示意图

研究成果在线发表于《Nature Communications》。【Yang, Y., Xie, X., Li, Y. *et al.* Radiative anti-parity-time plasmonics. *Nat Commun* 13, 7678 (2022). DOI:10.1038/s41467-022-35447-3】浙江大学信电学院博士生杨雨萌、谢欣荣为共同第一作者。

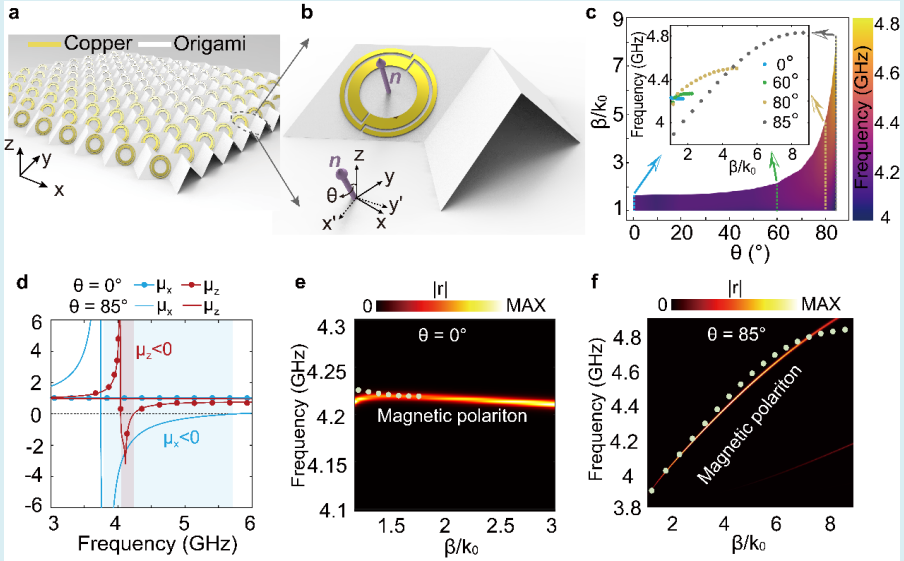
## 核心器件 基于折纸结构的可重构磁极化激元与电路

极端各向异性材料中的双曲极化激元具有独特光学特性，存在“扭转光子学”、剪切极化激元、拓扑极化激元等奇特光学现象，近年来吸引了研究人员的广泛兴趣。为充分发挥极化激元的实际应用潜力，探究极化激元动态调控是十分重要的研究课题。当前手段大多基于复合人工结构中局部材料改性技术，如改变相变材料折射率、调控二维材料载流子浓度等，这类手段存在磁响应弱和动态范围不够大的问题。

最近，针对极化激元调控难题，**王作佳**研究员课题组探索折纸人工结构的电磁模态调控机理，将折纸与磁性人工单元有效结合，利用折纸的二维/三维连续变形能力，提出了折纸驱动极化激元拓扑转变的新方法。相较以往的极化激元调控方法，基于折纸变形的极化激元色散调控具有较大的动态范围。折纸变形可有效重构磁极化激元的色散等频线，实现在开口双曲和闭合椭圆之间切换。此外，折纸的三维变形特点可驱动人工结构面外磁导率的拓扑转变，从而调控极化激元群速度方向，课题组据此设计了群速度正负可控的折纸激元电路，观测了电路终始端相位差在正、负、零等多状态之间的切换能力。

研究成果在线发表于《Science Advances》期刊上。【Min Li, Guangwei Hu, Xuan Chen, Cheng-Wei Qiu*, Hongsheng Chen*, Zuojia Wang*. Topologically Reconfigurable Magnetic Polaritons. *Science*

*Advances* 8, eadd6660, (2022). DOI: 10.1126/sciadv.add6660】浙江大学信电学院博士研究生李民为第一作者，通讯作者为浙江大学王作佳研究员、陈红胜教授以及新加坡国立大学仇成伟教授，论文的共同作者有斯坦福大学博士后胡光维以及浙江大学信电学院博士研究生陈璇。

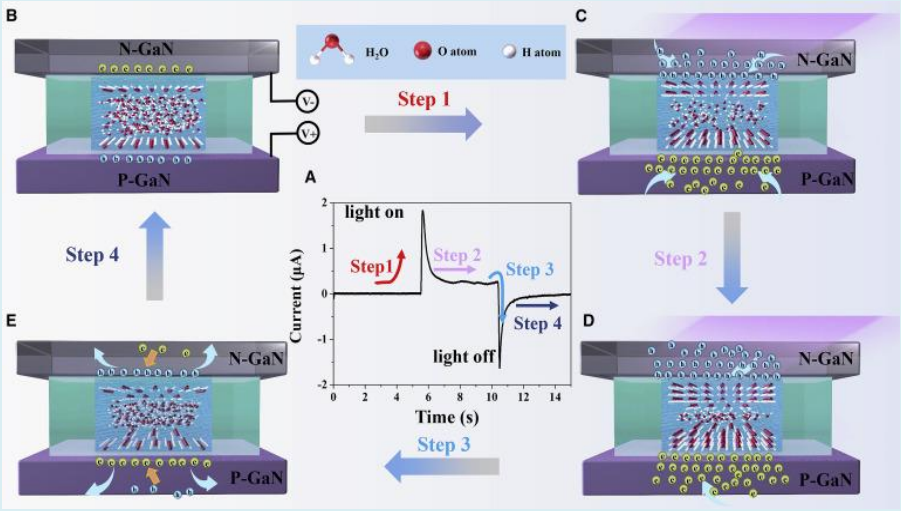



## 核心器件 极性分子极化的自驱动光电探测器

传统的异质或同质 PN 结光电探测器制备所需设备昂贵且工艺较为复杂，如需要金属有机化学气相沉积(MOCVD)、分子束外延 (MBE) 等先进真空外延设备，且这些设备对应的工艺对半导体 PN 结两侧的材料晶格匹配有非常严格的要求（一般晶格失配率不大于 5%），这限制了对不同光源探测所需半导体的选择。此外，在工作的时光激发载流子需要外加偏压作为驱动力来收集电流，这额外增加了驱动电路的成本和能源消耗。

最近，**林时胜**教授课题组通过探索完善 2018 年原创提出的动态二极管的物理框架，进而课题组原创研发出了水分子等极性液体基的自驱动光电探测器。此类光电探测器有效避免了晶格匹配的需求，且从深紫外到近红外都实现了良好的探测性能。极性液体与 N 型半导体和 P 型半导体接触之后，由于费米能级和极性液体化学势的不同，界面处的极性液体会被极化，并在固-液两相界面感应出相应的电荷。在外部光源的辐照下，半导体被激发，大量的光生载流子聚集在极性液体的两侧并输出瞬态光极化电流。在外部光源持续辐照下，更多的极性液体分子被聚集在两侧新的光生载流子极化，诱导水分子有序旋转，产生稳定的光极化电流。

研究成果在线发表于 Cell 子刊《Cell Reports Physical Science》期刊上。【Chang Liu, Yanghua Lu, Yi Zhang, Xutao Yu, Can Wang, Runjiang Shen, Shisheng Lin*, *et al*. A self-driven, polarized-liquid-based ultraviolet photodetector, *Cell Rep. Phys. Sci.* (2022). DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.101192.】浙江大学信电学院博士研究生刘畅为第一作者，林时胜教授为通讯作者。

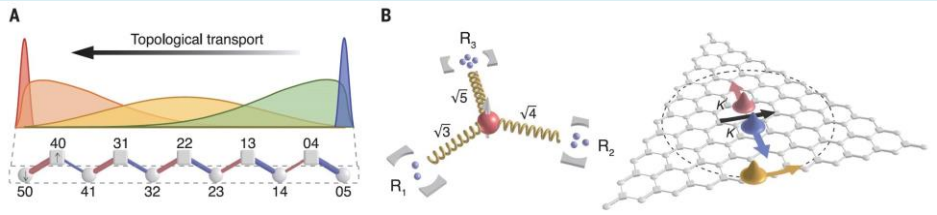


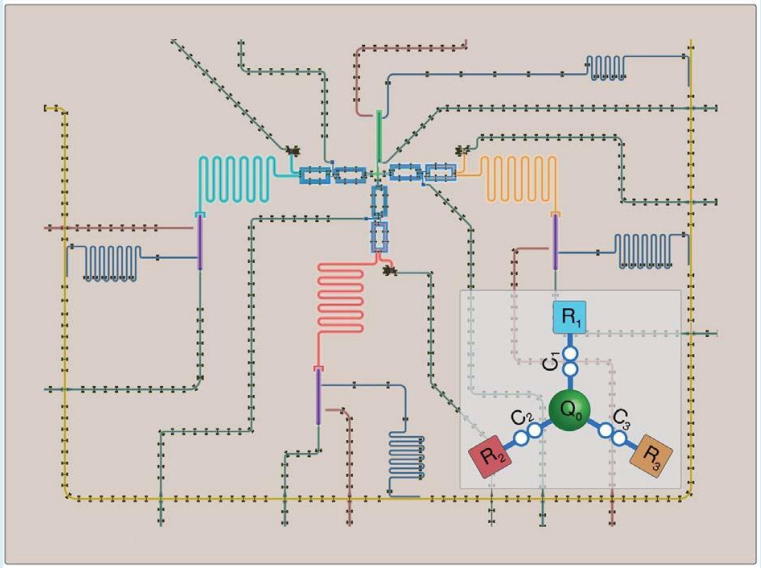
## 核心器件 实验观测光的量子拓扑态

拓扑光子学是用光学系统来模拟凝聚态拓扑物理的一个新兴研究方向。受材料拓扑性质保护的边缘模不受局部缺陷散射的影响，保持单向传输，可用于研制新型波导及激光器。在这一方向上，人们主要关注光的经典性质，利用波矢、频率、偏振或轨道角动量等经典自由度来合成拓扑模式。然而，为了让拓扑物理能够用于处理量子信息，必须要考虑光的量子属性。在之前的研究中，我们发现光场的量子化会导致经典光学所不能解释的拓扑态。实验实现光的量子拓扑态将为量子调控和量子模拟提供新的手段。

最近，浙江大学**王大伟**课题组与**王浩华**、宋超课题组合作，在自主研发的量子环形器芯片上实现了光的量子拓扑态的制备与操控。该芯片的核心部分由一个量子比特和三个谐振腔通过可调耦合器耦合组成，可用于制备一维和两维的 Fock 态晶格。在这一由光的量子态所组成的晶格结构中，该研究团队实现了拓扑物理中具有重要地位的 Su-Schrieffer-Heeger 模型和 Haldane 模型，展示了拓扑零能态的绝热传输以及手征边缘态的定向传播，并观察到了谷霍尔效应和赝朗道能级。该工作首次实现了光的量子拓扑态的制备、观测与操控，为拓扑物理在光量子信息处理中的应用打下了基础，也为拓扑物态的量子模拟提供了新的平台。

研究成果发表于《Science》【Jinfeng Deng, Hang Dong, *et al.* “Observing the quantum topology of light”, *Science* 378, 966 (2022). DOI: 10.1126/science.ade6219】。浙江大学物理学院博士研究生邓金凤、董航为共同一作，宋超、王浩华和王大伟为共同通讯作者。



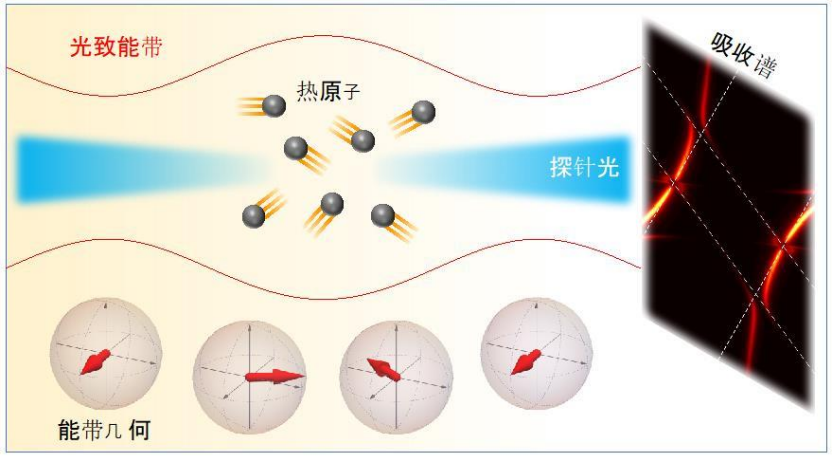

## 核心器件 热原子超辐射晶格的几何相位测量和含时调控

超辐射晶格是一种由原子集体激发态组成的、可以用于室温量子模拟的动量空间晶格。与冷原子平台相比，超辐射晶格不受低温限制，有利于推动拓扑物态在光学方面的应用。然而，这一新型晶格结构需要发展新的方法来探测其拓扑不变量，其布洛赫能带在外场调制下的响应也需要进一步探索。尤其是原子热运动对这些问题的影响，对于实现室温拓扑物态模拟至关重要。

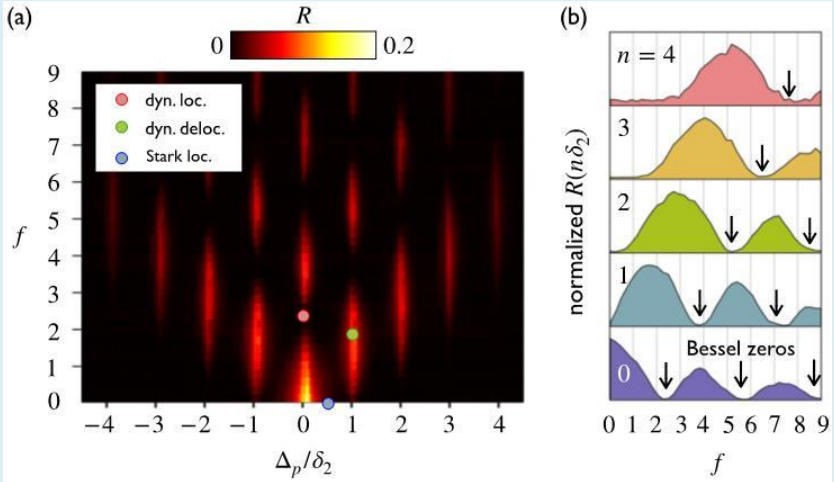
最近，**王大伟**和**蔡晗**研究团队发现原子热运动在动量空间超辐射

晶格中起到了静电场的作用。利用几何相位与瓦尼尔波函数之间的关系，该团队从超辐射晶格的吸收谱中得到了多种两能带晶格的几何相位，从而为一维和两维拓扑不变量的测量提供了新的方法。更进一步地，通过引入弗洛凯调制，研究团队将超辐射晶格从一维推广到了两维，从室温传输谱中同时观察到了动力学局域化、动力学非局域化和弗洛凯手性流相图，超越了冷原子平台对相关参数空间的探索。这些研究为室温条件下模拟拓扑物态、研究其动力学响应并发展其光学应用奠定了基础。

两项研究成果在线发表于《*Light: Science & Applications*》期刊【Rousong Mao, Xingqi Xu, Jiefei Wang, *et al.* Measuring Zak phase in room-temperature atoms, *Light Sci. Appl.* 11, 291 (2022) DOI: 10.1038/s41377-022-00990-7】和《*Physical Review Letters*》期刊【Xingqi Xu, Jiefei Wang, *et al.* Floquet Superradiance Lattices in Thermal Atoms, *Phys. Rev. Lett.* 129, 273603 (2022) DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.273603】**王大伟**研究员与**蔡晗**研究员为共同通讯作者。




几何相位测量实验原理示意图




动力学局域化-非局域化实验结果

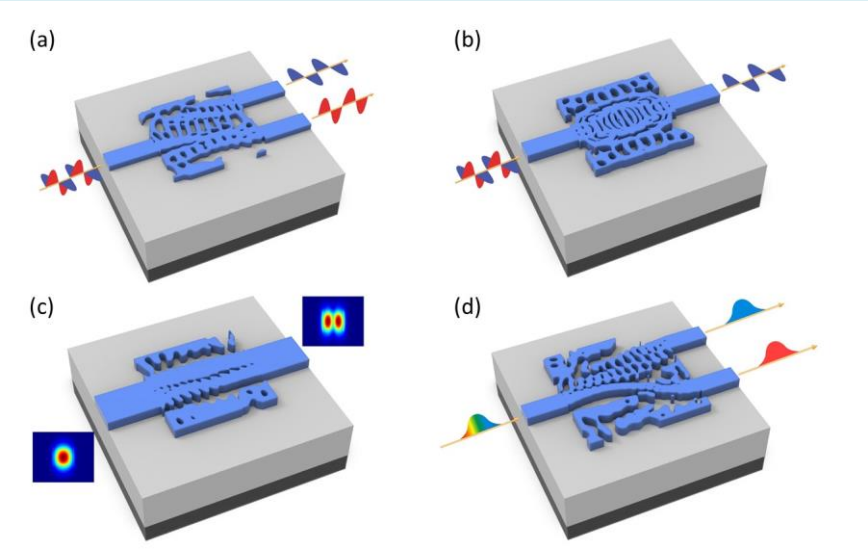
## 核心器件 基于“鲁棒-逆向” 设计的中红外超紧凑硫系光子集成器件的实现

中红外集成光学器件在红外成像、传感，光通信等方面具有极高的应用价值。传统的中红外光子器件的设计依赖于规则的几何结构，以经验为主导。而逆向设计方法也受限于优化时间过长、局部最优和低鲁棒性等缺点。

最近，**林宏焘**研究员、**李尔平**教授团队提出了一种新的“鲁棒-逆向”设计方法，并首次实现中红外超紧凑硫系光子逆向设计器件。新的设计方法避免了传统的中红外光子学器件设计中一直依赖于基于直觉的缺陷，同时也解决了传统逆向设计方法所面临的对于工作条件

和加工误差敏感的低鲁棒性劣势。在保证与传统逆向设计方法几乎相同优化时间的前提下，将器件设计的鲁棒性提升十倍。基于上述方法，研究团队也首次展示了多种不同功能的超紧凑的中红外硫系光子器件。

研究成果发表于《Laser & Photonics Reviews》期刊上。【Xiaobin Lin, Maoliang Wei, Kunhao Lei, Songtao Yang, Hui Ma, Chuyu Zhong, Ye Luo, Da Li, Junying Li, Changgui Lin, Wei Zhang, Shixun Dai, Xiaoyong Hu, Lan Li, Erping Li*, Hongtao Lin*, *Laser & Photonics Reviews*, 2022, DOI: 10.1002/lpor.202200445】，浙江大学信电学院博士生林晓斌为论文第一作者，林宏焘研究员和李尔平教授为本文的共同通讯作者。




中红外硫系光子器件结构示意图：(a)偏振分束器；(b) 波导偏振器；(c) 模式转换器件；(d) 波分解复用器