简报

2023 年 第 3 期
总 第 48 期
2023 年 10 月 5 日
编 辑：夏孟华

浙江大学极端光学技术与仪器全国重点实验室 TEL：0571-87951432

本期目录

激光直写：**刘旭、匡翠方|** 可降解固态光刻胶的大面积高精度激光直写光刻.....2

激光直写：**刘旭、匡翠方|** 低成本、高分辨率 3D 纳米激光直写技术助力纳米极端制造.....2

系统装备：**刘东、刘崇|** 三视场海洋高光谱分辨率激光雷达高精度遥感海水组分综合特性.....3

系统装备：**刘东、刘崇|** 米-荧光-拉曼激光雷达遥感内陆水体叶绿素 a 剖面.....4

先进材料：**李强|** 非对称定向热辐射.....5

先进材料：**叶辉|** 具有大光学非线性的可调谐有机介电常数近零点材料的研究.....6

核心器件：**唐龙华|** 单分子蛋白电子学器件.....7

核心器件：**颜波|** 超冷原子中量子时间反射和折射.....8

核心器件：**刘峰|** 相干操纵半导体量子点中的空穴轨道态.....9

核心器件：**王大伟|** 量子诱导相干光雷达.....10

核心器件：**林宏焘|** 用于具有纳秒原位训练能力的光神经网络电可编程相变光子存储器.....11

核心算法：**魏准|** 基于狄拉克传播子物理层的多物理域联合逆散射深度学习方法.....12

核心器件：**林晓、陈红胜|** 由超低能电子激发的界面切伦科夫辐射.....13

核心器件：**林晓、陈红胜|** 低速偏好渡越辐射.....13

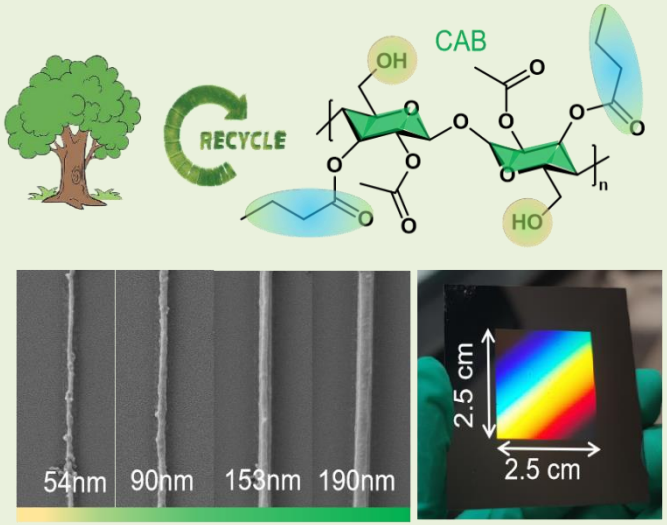
核心器件：**林晓、陈红胜|** 自由电子布鲁斯特-渡越辐射.....14

核心器件：**王作佳、陈红胜|** 基于 BIC 的非谐振自旋锁定模拟计算超表面.....15

激光直写 可降解固态光刻胶的大面积高精度激光直写光刻

基于双光子聚合的直接激光直写（DLW）是一种新兴的微纳增材制造技术，近些年在许多科学领域取得了广泛应用。然而，由于缺乏合适的固体双光子光刻胶（TPP），通过 DLW 进行大规模二维纳米增材制造仍然具有挑战性。虽然一些商用固体紫外光刻胶可用于 DLW，但其缓慢的双光子吸收导致其灵敏度和临界尺寸都不理想。同时，商用光刻胶合成复杂，难以生物降解，会对环境造成严重的污染风险。

最近，**刘旭**教授、**匡翠方**教授课题组尝试设计一种生物可降解的激光直写光刻胶。通过引入了天然的物纤维素衍生物，成功实现了可生物降解的固体光刻胶，并用于 DLW 加工。卓越的光敏性和双色光敏性使该固体光刻胶具有极高的直写速度（2.43 m s^{-1}）和优异的特征尺寸（42 nm）。随后，通过 DLW、蚀刻和剥离，获得了一个 1 英寸的二氧化硅的光栅，表明该固态光刻胶不仅可用于大面积纳米增材制造，还具有良好的抗蚀刻性能，这对于加工各种微纳器件是至关重要的。最后，通过模拟土壤环境验证了该固态光刻胶的生物降解性，结果表明其可在 90 天降解近一半。这项工作为 DLW 走向可持续的大面积二维纳米增材制造打下了基础。



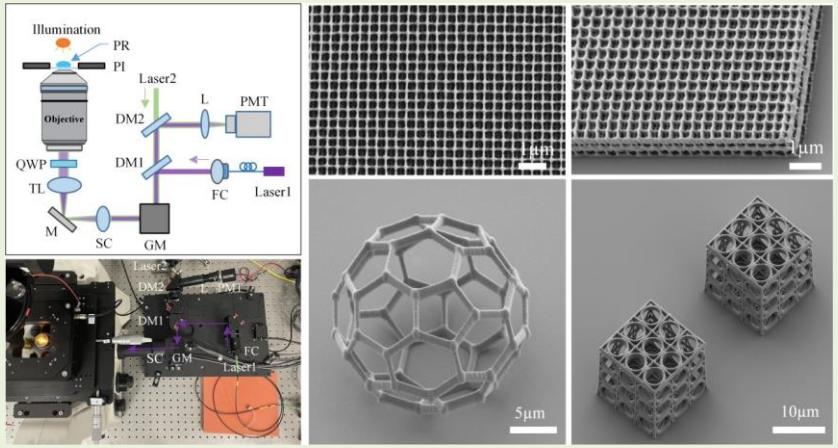
研究成果在线发表于《Additive Manufacturing》期刊上。【Chun Cao, Cuifang Kuang,* Xu Liu, and *et. al.*, Cellulose derivative for biodegradable and large-scalable 2D nano additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 2023, 74, 103740. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103740】。

激光直写 低成本、高分辨率 3D 纳米激光直写技术助力纳米极端制造

激光直写技术使用空间中极小的聚焦激光束斑，通过逐点扫描的加工方式在光刻胶中获得三维立体微结构，是一种真三维、无需掩膜版的微细加工技术。典型的飞秒激光直写技术利用飞秒激光的非线性吸收，可在光敏材料内部进行二维/三维加工。传统 3D 纳米激光直写技术通常使用价格昂贵、体积大的飞秒激光光源，这限制了该技术的普及与应用。

刘旭教授、**匡翠方**教授课题组提出了一种低成本、易操作的高分辨率 3D 纳米激光直写系统，基于特殊光引发剂的双步吸收原理，来自单模保偏光纤的 405nm 波长连续激光被准直并入射到扫描振镜，随后使用高数值孔径显微物镜将其聚焦到液态光刻胶中，直写有极精细特征的任意 2D/3D 结构。在低速下，可直写周期亚 150nm 的 2D 光

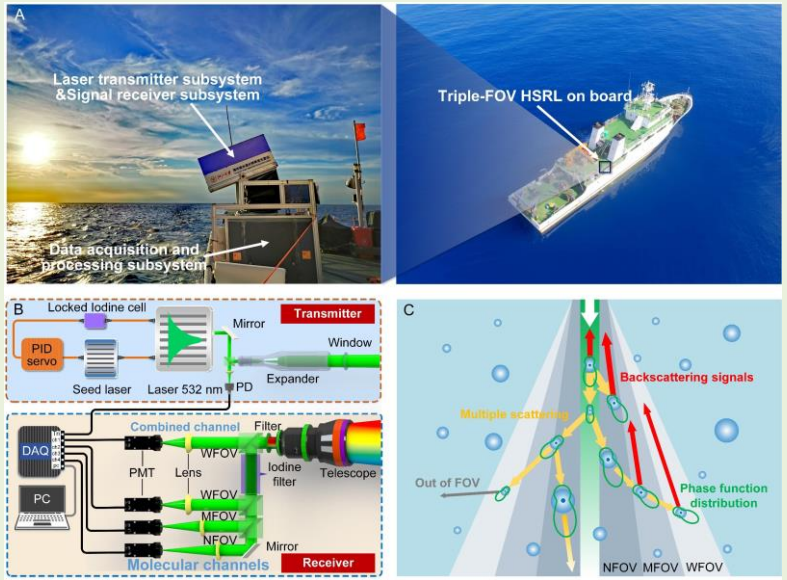
栅和横向周期 350nm 的 3D 木桩结构；在 1000um/s 更快直写速度下，仍然能以低于 1mW 激光功率，直写分辨率低于 200nm、线宽亚 50nm 的 2D 光栅。该系统使用低成本连续激光光源，系统简单，具有极高稳定性，且与大多数商用显微镜兼容，为低成本的桌面级 3D 纳米直写设备打下了基础。该技术具有媲美飞秒激光的直写精度和分辨率，可以打印超材料以及各种光学器件，如微透镜、微光学器件和超材料；有望用于多种应用，例如打印用于研究生物细胞的微/纳米结构，或制造用于虚拟/增强现实设备的专用光波导等。



研究成果在线发表于《Optics Letters》期刊上，同时被美国光学学会 OPTICA 出版社专题新闻报道。【Xi Liu, Chenliang Ding*, Xiujun Gao，Xiaoming Shen，Mengbo Tang, Zhenyao Yang，Liang Xu, Cuifang Kuang*, and Xu Liu，“High-resolution 3D nanoprinting based on two-step absorption via an integrated fiber-coupled laser diode,” *Opt. Lett.*, Vol. 48, Issue 16, pp. 4300-4303 (2023). DOI: 10.1364/OL.495286】。

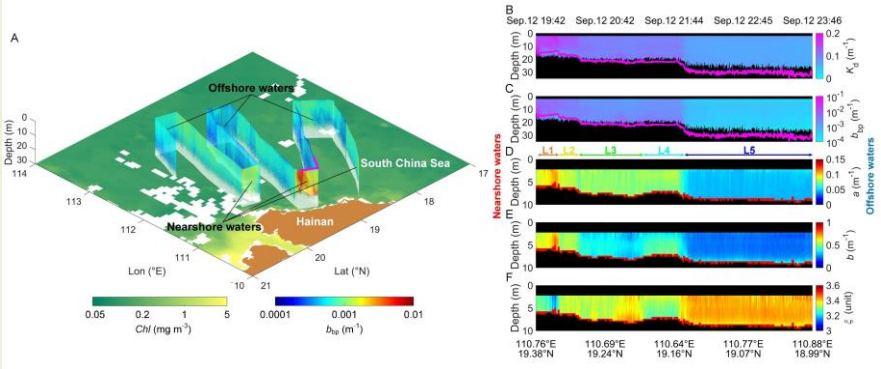
系统装备 三视场海洋高光谱分辨率激光雷达高精度遥感海水组分综合特性

海水组分的高精度探测对海洋生态系统和生物地球化学过程的研究至关重要。传统被动式光学遥感技术可提供大范围的海水表面信息，但对海水成分的垂直分布敏感度较低；原位仪器探测可提供精确的海水组分垂直数据，但其空间和时间覆盖范围有限；激光雷达是一种主动光学遥感技术，可昼夜提供上层水体光学特性的连续剖面信息，极大地提高了人们对海洋生态系统和生物地球化学过程的理解。然而迄今为止，现有海洋激光雷达的光学特性产品主要包括反向散射系数和激光雷达衰减系数，所能提供的海水组分信息有限，限制了激光雷



达在碳循环和海水分类等海洋科学中的应用。此外，激光在海水中传播中的多次散射效应，进一步增大了海水光学特性的反演难度。

近日，**刘东**教授、**刘崇**教授研究团队开发了三视场海洋高光谱分辨率激光雷达(high-spectral-resolution lidar, HSRL)系统及反演算法，解决了传统海洋激光雷达方程的不适定性和激光辐射传输的多次散射难题。该系统采用超稳频极窄线宽激光、高精度温控碘分子鉴频器、精准脉冲激光锁频等一系列关键技术，通过三个具有不同大小视场角的信号通道收集后向散射激光雷达信号，将多视场信号中包含的多次散射信息应用于水体特性的反演中，从而实现了海水组分光学特性及粒径参数剖面的综合、连续、高精度观测，有望在海水组分分类及海洋有机碳通量等研究领域获得广泛应用。



研究成果在线发表于《Research》期刊上。【Kai Zhang, Yatong Chen Hongkai Zhao, Zhongping Lee, Emmanuel Boss, Yudi Zhou, Weibiao Chen, Dong Liu. Comprehensive, Continuous, and Vertical Measurements of Seawater Constituents with Triple-Field-of-View High-Spectral-Resolution Lidar. *Research.* 6;2023:0201. DOI:10.34133/research.0201.】

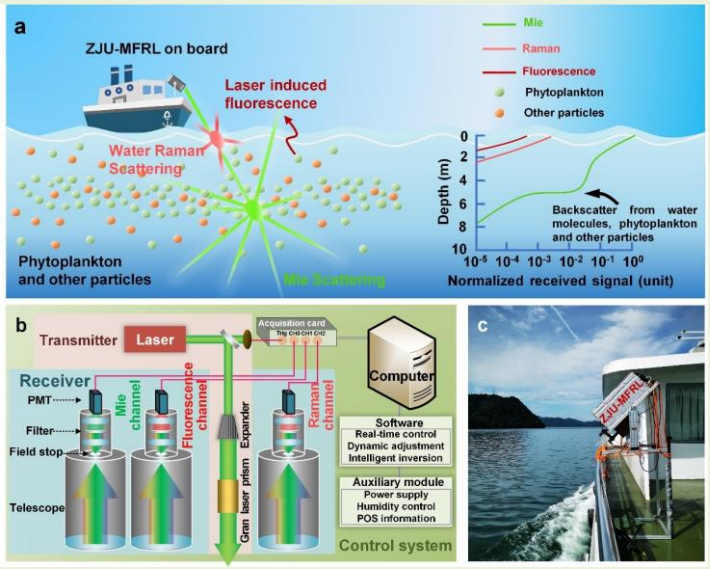
系统装备 米-荧光-拉曼激光雷达遥感内陆水体叶绿素 a 剖面

浮游植物垂直分布的高效探测对内陆水体生态系统的研究至关重要。激光雷达作为一种新兴的主动光学遥感技术，能够穿透水气界面，提供上层水体生物光学特性的连续剖面信息，在海洋生态系统中已经广泛应用，极大地提高了人们对海洋中生物地球化学过程的理解。然而，传统弹性散射激光雷达的生物光学特性产品主要由面向大洋水体的经验模型获得，该模型无法直接适用于内陆水体中，限制了激光雷达技术在内陆水体生物地球化学循环中的科学应用。

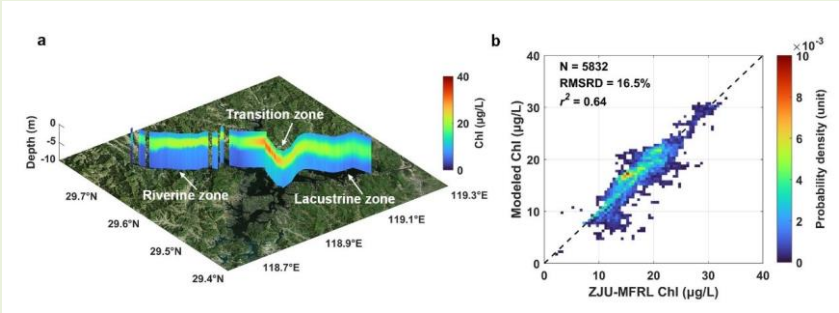
近日，**刘东**教授、**刘崇**教授研究团队开发了米-荧光-拉曼激光雷达(Mie-fluorescence-Raman lidar, MFRL)系统及生物光学特性反演算法，首次在内陆水体中实现了叶绿素 a 剖面的遥感观测，同时基于激光雷达数据集对次表层叶绿素最大值层（SCM）的三维分布进行了建模重构。该系统通过三个具有不同中心波长滤光片的信号通道，分别收集水体后向散射激光雷达信号、水面荧光信号与拉曼信号，采用水面荧光信号和拉曼信号额外获取水体生物信息，通过假设上层水体中生物量的光学贡献与水面附近相当，将水体后向散射激光雷达信号以及水面荧光信号与拉曼信号联合应用于水体生物特性的反演中，从而实现内陆水体生物光学剖面信息的高精度获取。该技术有望在碳循环与气候变化等研究领域获得广泛应用。

研究成果在线发表于《Environmental Science & Technology》期刊上。【Hongkai Zhao, Yudi Zhou*, Hongda Wu, Tiit Kutser, Yicai Han, Ronghua Ma, Ziwei Yao, Huade Zhao, Peituo Xu, Chengchong Jiang,

Qiuling Gu, Shizhe Ma, Lingyun Wu, Yang Chen, Haiyan Sheng, Xueping Wan, Wentai Chen, Xiaolong Chen, Jian Bai, Lan Wu, Qun Liu, Wenbo Sun, Suhui Yang, Miao Hu, Chong Liu*, Dong Liu*. Potential of Mie–fluorescence–Raman lidar to profile chlorophyll a concentration in inland waters, *Environ. Sci. Technol.* 57, 38, 14226-14236 (2023). DOI: 10.1021/acs.est.3c04212】浙江大学光电学院博士研究生赵泓楷为一作，浙江大学光电学院刘东教授、刘崇教授、周雨迪助理研究员为共同通讯作者。



米-荧光-拉曼激光雷达基本工作原理



叶绿素 a 三维分布建模结果与一致性验证

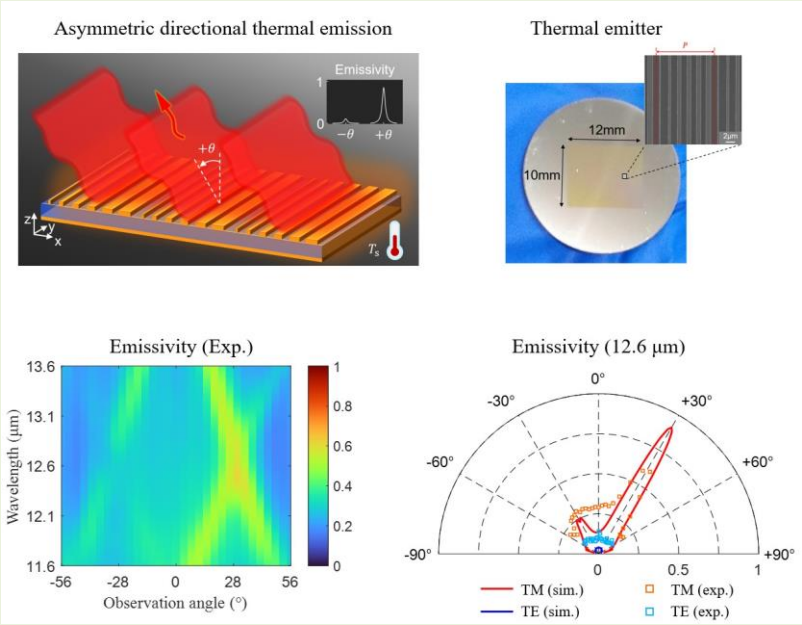
先进材料 非对称定向热辐射

热辐射是自然界中的基本现象之一，例如太阳光、燃烧煤块发出的光、白炽灯灯光等。由于热辐射的非相干性，自然产生的热辐射空间分布往往具有全角度的特点。利用人造结构调控热辐射的空间方向性，对于提高能量利用效率具有重要意义。随着纳米光子学的发展，现有研究证明可以利用超表面、光学薄膜、光栅等微纳光学结构调节热辐射的空间相干性，进而实现空间角度选择性热辐射。然而由于互易光学系统的波矢-频率色散关系具有对称性，在以往报道的角度选择性热辐射器件中，热辐射能量的空间出射角往往成对出现，并且关于法线左右两侧对称分布。如何将互易光学系统的热辐射能量集中到某个单一角度出射，从而实现空间非对称定向热辐射，仍需要进一步的研究。

浙江大学**李强**教授课题组提出了利用超表面光栅在互易光学系统中实现空间非对称定向热辐射的方法，并在实验中加以验证。研究表明对支持非局域模式的超表面结构施加周期性微扰，可以使其成为具有多个衍射级的超表面光栅，从而将原本非辐射的波导模衍射到自由空间。通过打破微结构的镜面对称性，可以使器件的辐射率呈现出角度非对称性，进而实现单一角度的热辐射。实验中研究者制备的超

表面光栅在+30° 观察角具有高辐射率 ε =0.61，而在其余方向具有低辐射率 ε <0.30。这种非对称定向热辐射源对于提高不同系统间的热量传递效率具有重要意义，在红外隐身、红外信息加密、热辐射制冷等众多领域均有潜在应用。

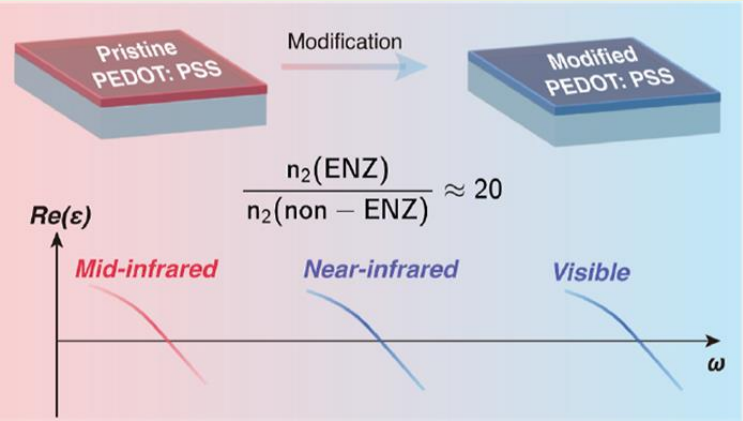
研究成果在线发表于《Advanced Materials》期刊【Jianbo Yu, *et al*. Asymmetric Directional Control of Thermal Emission. *Advanced Materials*， DOI: 10.1002/adma.202302478】



上图：非对称定向热辐射源示意图、样品图、以及不同观测角下的热辐射光谱

先进材料 具有大光学非线性的可调谐有机介电常数近零点材料的研究

聚乙烯二氧噻吩（PEDOT）是一种广泛应用于光电子器件的透明导电聚合物材料。近年来人们发现 PEDOT 在近红外-中红外波段具有介电常数实部接近零的特性，是一种新型的 ENZ 材料。**叶辉**教授课题组与早稻田大学贾军军副教授，浙大高分子系杜淼教授、浙大光电学院李林军研究员合作，采用强酸及极性溶剂处理商品化的 PEDOT：PSS 溶液，获得的改性 PEDOT 薄膜的 ENZ 波长在 5267nm-865nm 的宽范围内可调，利用 Z-扫描技术与 pump-probe 技术研究了改性的 PEDOT 的光学非线性性能。研究发现，材料在其 ENZ 波长处的非线性折射率 n2 及非线性吸收系数 α2 均比其在非 ENZ 波长处的值增加了 20 倍以上，且 n2 与 α2 超过了大多数无机材料。随着泵浦光强的增加，观察到 PEDOT 的透过率增加了 210%以上。以上性能与 PEDOT 中存在的双极化子（bipolarons）能级的吸收增强有关。本项研究为

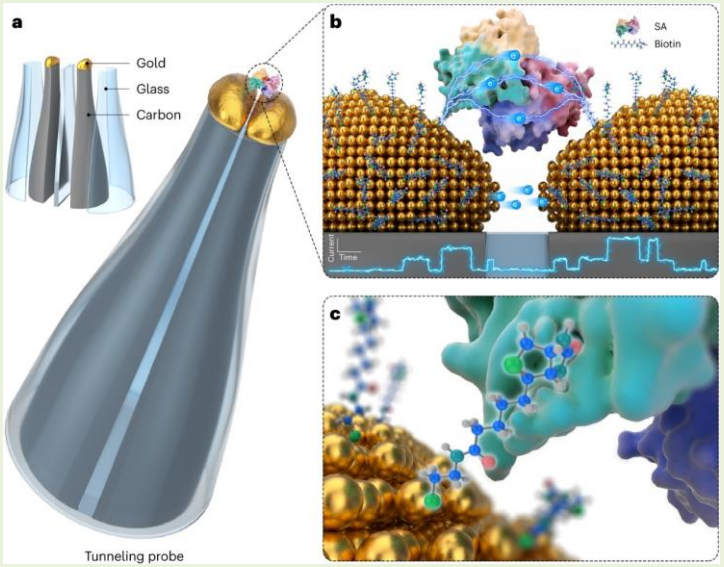


PEDOT 在等离子体光子学、非线性光学、片上纳米光子学器件等新领域的应用提供了理论及实验的可行性。

研究成果发表于美国化学学会期刊《ACS Photonics》【Qili Hu, Xinlan Yu *et al*. Tunable Organic ENZ Materials with Large Optical Nonlinearity . *ACS Photonics*， DOI: 10.1021/acsphotonics.3c00675】。第一作者是浙江大学 2017 级本科生胡启笠。

核心器件 单分子蛋白电子学器件

如何制造稳定可靠的隧穿电学器件一直是困扰蛋白质电子学领域研究的棘手问题，**唐龙华**副教授团队近期研究了一种制备纳米管的量子隧穿探针的方法，并将其用于测量单个蛋白质的电导，为该领域的进一步发展拓宽了道路。研究中介绍的量子隧穿探针基于高深宽比的双通道纳米管，集成了一对间隙小于 5 nm 的隧穿电极，通过热解沉积碳和电化学沉积金来制造。金电极可以使用广泛的表面修饰物进行功能化，以实现单蛋白电极接触。文中使用生物素化硫醇修饰金电极，构建生物素-链霉亲和素-生物素桥用于形成单蛋白分子结，能够在溶液中对同一个单蛋白质进行长达数小时的稳定电学测量。研究成果在线发表于《Nature Protocols》期刊上。



此外，唐龙华副教授还与南方科技大学张斌田等系统总结了基于单分子蛋白质生物电子学的原理、器件和应用领域，并在权威性综述性期刊《Chemical Society Reviews》发表了封面论文。该综述重点阐明了蛋白质生物电子学的物理电子传输机制、介绍了相关器件制造方法以及基于蛋白质生物电子学的各种应用的最新进展。该综述将促进蛋白质相关生物电子学的跨学科研究，并为单分子生物物理学和生物医学开辟新的研究课题。

论文 1：【Tao Jiang, Xu Liu, Long Yi, Aleksandar P. Ivanov, Joshua B. Edel, and Longhua Tang*, Fabrication of electron tunnelling probes for measuring single protein conductance, *Nature Protocols* , 2023, DOI: 10.1038/s41596-023-00846-3】

论文 2: 【Tao Jiang+, Biaofeng Zeng+, Bintian Zhang, Longhua Tang*, Single-Molecular Protein-based Bioelectronics via Electronic Transport: Fundamental, Devices and Applications, *Chemical Society Reviews* , 2023, DOI: 10.1039/D2CS00519K】

核心器件 超冷原子中量子时间反射和折射

几个世纪以来，费马原理导出的反射和折射定律一直支配着经典波与空间边界的作用。而时空对偶性则表明，这种空间边界的反射和折射效应存在时间上的对等效应。当波在通过介质的时间边界，即介质的物理性质发生突变的时刻，波会在时间边界的影响下出现时间反射和折射现象。与空间边界的效应形成鲜明对比的是，时间反射和折射波的频率发生了偏移而波矢保持不变，这正如因果律暗示的那样：波不能在时间上向后移动。这种时间边界的概念早在 50 多年前就设想过通过操纵光波来实现。然而，在光学材料中想要观察到该时间界面的效应需要对介质性质的调控速度达到光波频率的范畴，这在当前的技术下面临非常大的挑战，因此时间边界效应的实验观测仍然是难以实现的科学目标。

近日，**颜波**课题组与杨兆举课题组合作，在超冷原子系统中，首次利用基于玻色爱因斯坦凝聚（BEC）的动量晶格技术演示了时间边界的系列物理效应。在具体实验中，研究团队在 BEC 的动量空间维度构造了 Su-Schrieffer-Heeger 晶格链，并在时间维度上通过改变晶格之间的耦合来构建时间边界，研究方案如图 1 所示。研究团队首先制备了一个具有确定波矢的初态波包，并通过时间飞行测量记录了它在到达时间边界时的演化动力学，最终观测到了时域上的反射和折射现

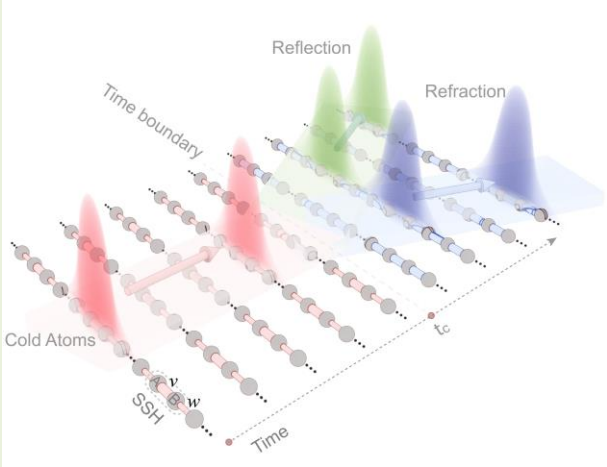


图 1：超冷原子动量晶格中时间反射和折射的实验方案示意图

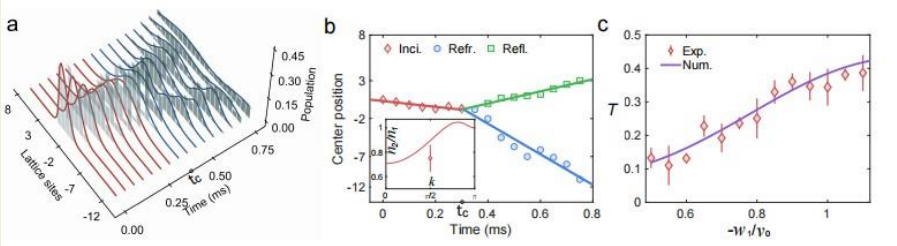


图 2: **a**，时间反射折射的实验观测结果。**b**，入射波包和反射、折射波包的中心位置。**c**，透射率随原胞间耦合改变的曲线。

象。主要实验结果如图 2(a)所示，在t_c时刻突然改变原胞之间的耦合强度及相位，波包在时间边界之后会分裂成群速度相反的时间反射波和折射波，并且波包的运动方向满足新的时空折射定理。在观测了时间反射折射后，研究者们进一步探究了时间边界变化快慢和无序对时间反射折射效应的影响。通过改变时间界面的变化快慢程度，研究者们进一步证实了时间发射折射效应发生的必要条件;通过增加时间界面的无序，研究者们发现时间发射折射效应存在较强的鲁棒性。

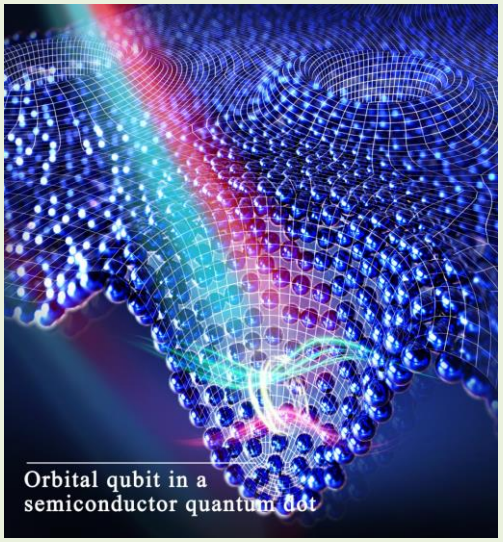
综上，该研究工作在量子系统中观测了时间反射折射，并为在冷原子体系中研究时间晶体以及时空晶体的量子多体效应开辟了新的道路。

研究成果发表于最新一期的《Nature photonics》期刊上。【Quantum time reflection and refraction of ultracold atoms，Zhaoli Dong*, Hang Li*, Tuo Wan*, Qian Liang, Zhaoju Yang#, Bo Yan# *Nature Photonics* (2023). DOI：10.1038/s41566-023-01290-1】浙江大学博士生董兆立、博士后李航以及博士生万拓是共同第一作者，颜波研究员和杨兆举研究员是论文的共同通讯作者。

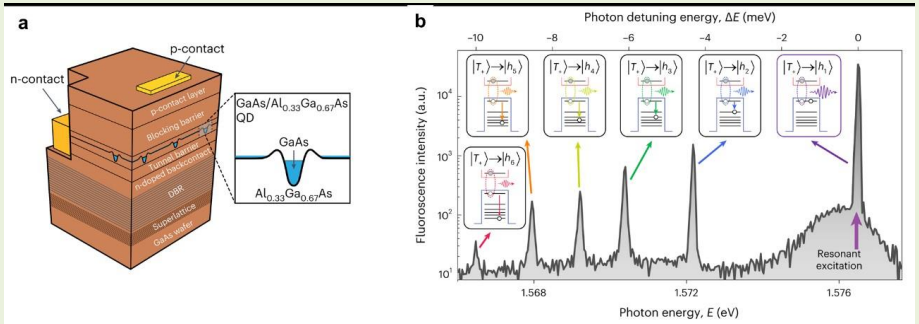
核心器件 相干操纵半导体量子点中的空穴轨道态

相干驱动下的半导体量子点是产生非经典光和实现量子逻辑门最有前景的平台之一。近些年，半导体量子点在作为连接光子和电子自旋、核自旋、激子自旋等固态量子比特的接口，已经在光量子技术领域取得了许多重要的进展。然而，到目前为止，在单个外延量子点中，对单个载流子的相干操纵主要还局限于最低轨道状态，对轨道态编码量子比特的相干操纵还没有被实现。这主要是由于量子点中轨道态的能量差在太赫兹频段，而目前商用的可调谐脉冲太赫兹激光器还难以获取。此外，由于波长较长，太赫兹信号难以很好地聚焦在极小的单个量子点上。

最近，**刘峰**研究员课题组实现了全光学方法控制量子点中空穴的轨道态，通过受激俄歇的过程实现了对轨道态的高保真度的相干操控。这一方法突破了之前由于缺乏可调谐太赫兹脉冲而导致的高轨道态相干控制的限制，解锁了量子点中高轨道态在量子计算等应用中的潜力。该方案首先设计了一个将量子点镶嵌在一个p-i-n二极管的结构，通过调节偏压使得量子点内携带单个空穴。随后通过激光脉冲共振驱动受激俄歇跃迁的产生。实验中实现了对 4 个高能量轨道态的相干制备，且保真度均达到 90%以上。最后，通过拉姆齐干涉实验，测量得



到了轨道态量子比特的相干时间。这些实验为开发一种新型的固态量子比特以及研究半导体器件中的载流子弛豫动力学提供支持。此外，脉冲共振驱动俄歇过程也可以用于对发射体的高速、高保真度退激发，这为实现高速光开关、荧光超分辨成像等应用提供了新的可能。

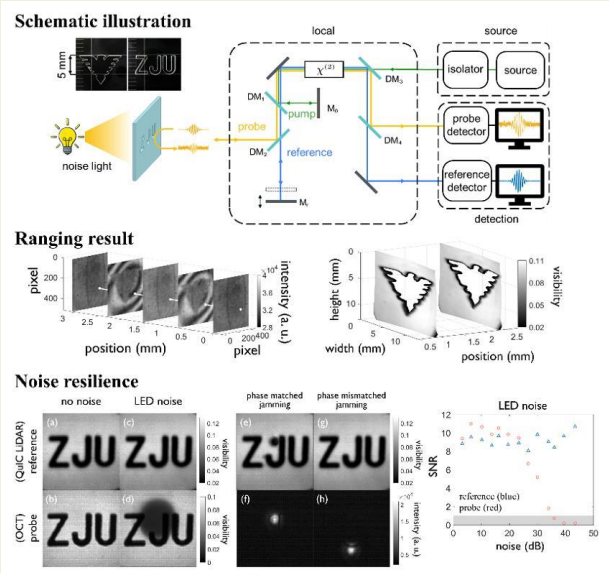


研究成果在线发表于《Nature Nanotechonology》期刊上。【Jun-Yong Yan, Chen Chen, Xiao-Dong Zhang, …, Feng Liu*, *et al*. Coherent control of a high-orbital hole in a semiconductor quantum dot, *Nat. Nanotechnol. (2023)* DOI: 10.1038/s41565-023-01442-y】浙江大学博士研究生鄢军勇为第一作者，刘峰研究员为通讯作者。

核心器件 量子诱导相干光雷达

量子光在测量与传感方面可以比经典光具有更高精度和灵敏度。在光雷达（LiDAR）方面，量子照明可以利用纠缠光之间的关联提高信噪比。但这种基于光子计数的关联探测方法要求很低的光照度（皮瓦），成像时间很长（小时），不能在日光下应用，并且测距精度局限在厘米量级。

最近，**王大伟**课题基于量子擦除的原理提出并实现了一种量子诱导相干光雷达（QuIC LiDAR）。它具有优异的光噪声抵抗能力，在强光致盲攻击下仍可使用，只需要单个硅基 CCD 即可成像和测距。成像速度达到毫秒量级，测距精度达到微米量级。该装置使用非线性晶体产生纠缠光子对，其中一个光子用于探测物体，另一个参考光子保留在本地搭建干涉仪。探测光子会泄露参考光子的路径信息，从而使其干涉条纹消失，除非有物体将其反射回来，擦除这一路径信息。利用这一量子擦除原理，只测量参考光子的干涉条纹就可以提取物体的图像和距离信息。由于噪声光既不能擦除也不能泄露路径信息，QuIC LiDAR 在至少一万倍于探测光的环境噪声强度下不受干扰。激光致盲攻击仅可以通过晶体中的非线性过程影响少数像素点的信号，而且主动改变相位匹配条件可以规避这种攻击。该雷达既具有红外光的穿



透能力，又可以使用硅基探测器进行探测，结合光学芯片技术，可用于工业领域高精度高抗噪的距离探测。

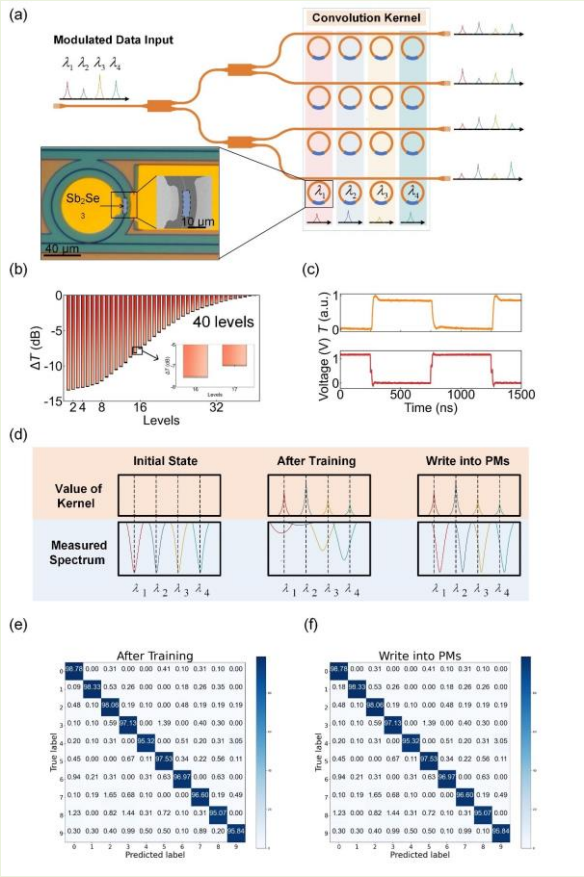
研究成果在线发表于《Physical Review Letters》期刊上。【Gewei Qian, Xingqi Xu*, Shun-An Zhu, Chenran Xu, Fei Gao, V. V. Yakovlev, Xu Liu, Shi-Yao Zhu, and Da-Wei Wang*, Quantum Induced Coherence Light Detection and Ranging, *Phys. Rev. Lett.* (2023). DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.033603.】浙江大学士研究生钱格威为第一作者，徐兴奇博士和王大伟教授为共同通讯作者。

核心器件 用于具有纳秒原位训练能力的光神经网络电可编程相变光子存储器

光子计算由于其低延迟、高并行（如波分复用）、大带宽等优势而成为一种满足现有急剧增加的算力需求的有力解决方案。迄今为止，已有一系列波分复用、相干计算等架构被提出来实现光子计算。但是当采用这些方案时，光的片上调控不可避免的将引入热积累等劣化光网络性能、导致光网络功耗急剧增加等问题。并且，现阶段光子计算架构的复杂性日益增加，通过典型的电域训练光域计算方案由于器件制备工艺引入的误差和调控引入的误差将使得计算结果产生较大偏差。因此，对适用于光域训练的低静态功耗的光子器件的需求日益增加。

林宏焘研究员课题组通过长期探索，提出了突破具有高速原位训练能力的低静态功耗的光子器件的研究瓶颈的解决方案。该课题组与西湖大学李兰教授课题组和中国科学院微电子研究所唐波高级工程师合作，将集成低损耗 PCM 与 PIN 二极管嵌入式微环谐振器集成，实现制备 2 μm 波段、挥发性调制速度为 15.2 MHz、可同时实现光神经网络原位训练和数据存储分辨率＞5 比特的光子存储器，研究结果有助于进一步构建高效节能、大规模的光神经网络。

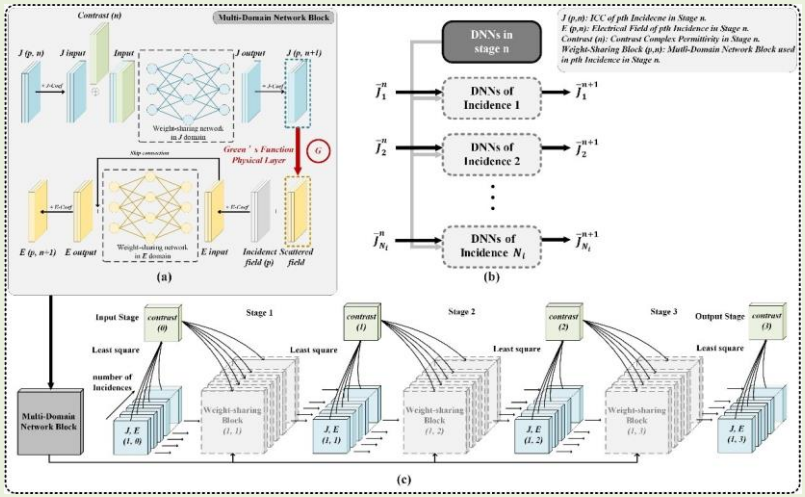
研究成果在线发表于《Advanced Photonics》期刊上。【Maoliang Wei#, Junying Li#, Zequn Chen, Bo Tang, Zhiqi Jia, Peng Zhang, Kunhao Lei, Kai Xu, Jianghong Wu, Chuyu Zhong, Hui Ma, Yuting Ye, Jialing Jian, Chunlei Sun, Ruonan Liu, Ying Sun, Wei. E. I. Sha, Xiaoyong Hu, Jianyi



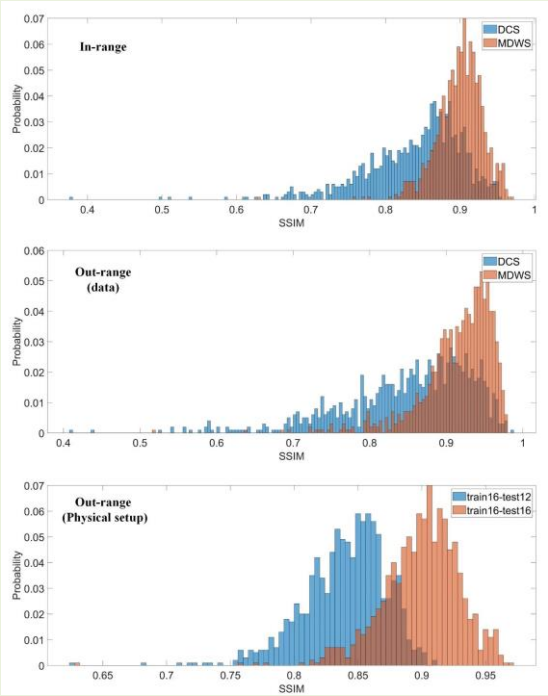
Yang, Lan Li, and Hongtao Lin*, Electrically programmable phase-change photonic memory for optical neural networks with nanoseconds in situ training capability, *Adv. Photonics* (2023). DOI: 10.1117/1.AP.5.4.046004.】浙江大学博士研究生魏茂良和特聘副研究员李钧颖为共同一作，林宏焘研究员为通讯作者。

核心算法 基于狄拉克传播子物理层的多物理域联合逆散射深度学习方法

全波电磁非线性逆散射问题（ISP）具有广泛的应用场景，对探测和成像领域影响显著。得益于较强的穿透性和低电离辐射的特点，迄今为止，在生命健康、深空/深海探测、无损检测、智能感知与成像、逆向设计等领域得到较多关注。由于 ISP 高度的非线性和不适定性，传统方法是通过建立物理模型然后对目标函数进行迭代优化以重建出最终结果，然而计算复杂度高、速度慢、无法灵活融入先验信息制约了此类方法的应用。近年来深度学习领域的发展为高效解决 ISP 提供了新的可能，兼具速度与准确度的算法相比传统方法有明显的优势。但是作为数据驱动的方法，深度学习方法较低的可解释性，泛化能力，训练模型成本高成为了主要问题。将物理知识和信息与深度学习方法结合成为了主要的研究方向。



最近，**魏准**研究员课题组通过对 ISP 系统物理模型的分析，设计了多物理域联合的参数共享深度学习方法（MDWS）。该方法在深层网络结构中构建了狄拉克格林函数快速正、反向传播物理层，融合了电流域和电场域的网络，实现了多域信息动态交互学习；同时，基于对 ISP 传统优化算法的理解，上述多物理域网络模块在整个架构中的不同级联层级和不同入射中共享权重，使得网络结构与物理场景首次实现部分解耦。以上设计使得该方法在电磁全波逆问题的基准测试中



取得了数据外泛化测试 state-of-the-art 性能，更重要的是实现了不同物理场景的泛化，大大减小了重复训练的成本，为 ISP 领域深度学习方法的可解释性，泛化能力，降低训练成本等重要方向提供了新的思路。

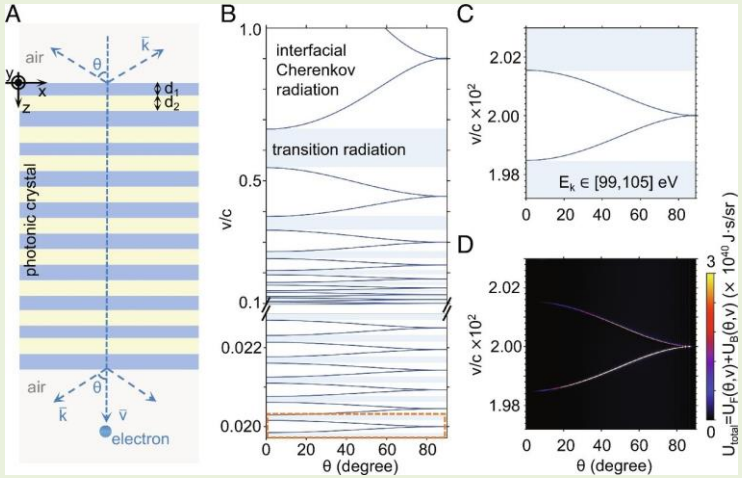
研究成果在线发表于《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》期刊上。【Wang Y, Zong Z, He S, *et al*. Push the Generalization Limitation of Learning Approaches by Multi-Domain Weight-Sharing for Full-Wave Inverse Scattering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 2023. vol. 61, pp. 1-14, 2023, Art no. 2003814, DOI: 10.1109/TGRS.2023.3303572.】浙江大学博士研究生王郁松为第一作者，魏准研究员为通信作者。

核心器件 由超低能电子激发的界面切伦科夫辐射

切伦科夫辐射（Cherenkov radiation）是一种可覆盖所有频段的高定向性辐射。其在未知粒子探测等众多基础和工程领域有广泛应用，直接导致了反质子、J/ψ粒子、中微子振荡等系列诺奖工作的发现，至今已催生了六诺贝尔物理学奖。然而，传统体切伦科夫辐射的产生条件是带电粒子速度超过切伦科夫阈值，即体材料中光的相速度。这一对高能粒子的依赖严格限制了体切伦科夫辐射在微纳光学领域的应用，譬如可集成的片上自由电子辐射光源等。

最近，**林晓**和**陈红胜**研究团队利用界面切伦科夫辐射（interfacial Cherenkov radiation）与一维光子晶体中反转散射（umklapp scattering）的组合效应，即一系列电子-界面相互作用的相长相干与反转动量平移，实现了可由超低能电子激发的界面切伦科夫辐射。此外，基于特殊设计的反转动量平移，界面切伦科夫辐射可以直接耦合到自由空间，而不受动量错位导致的全内反射的限制。

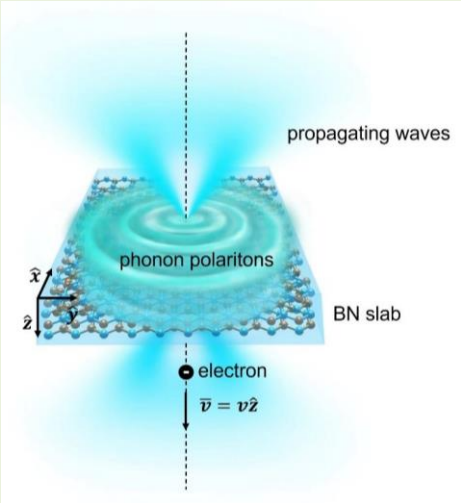
研究成果在线发表于《Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA》期刊上。【Z. Gong, J. Chen, R. Chen, X. Zhu, C. Wang, X. Zhang, H. Hu, Y. Yang, B. Zhang*, H. Chen*, Ido Kaminer, and X. Lin*, Interfacial Cherenkov radiation from ultralow-energy electrons. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **120**, e2306601120 (2023). DOI: 10.1073/pnas.2306601120.】浙江大学博士生龚政为第一作者，新加坡南洋理工大学 Baile Zhang 教授和浙江大学陈红胜教授、林晓研究员为通讯作者。



核心器件 低速偏好渡越辐射

自由电子辐射在粒子探测、新型光源以及医疗成像等领域具有重要的应用价值。为了提高自由电子辐射的强度，人们一直以来依赖于不断提高电子速度的方法。但是，这种方法使得自由电子辐射装置的体积越来越大、造价越来越贵，限制了自由电子辐射的广泛应用。

最近，**林晓**和**陈红胜**研究团队提出，通过电子与折射率近零材料（ENZ）的作用，可以利用低速（非相对论速度）电子产生与高速（相对论速度）电子同样强的自由电子渡越辐射；并以氮化硼为例进行了系统理论分析，发现这种低速偏好的渡越辐射可以将电子动能-光子的转化效率提高 8 个数量级。这一发现不仅有助于新型片上微纳光源和粒子探测器的研发，而且为提升自由电子辐射强度开辟了全新的研究思路。

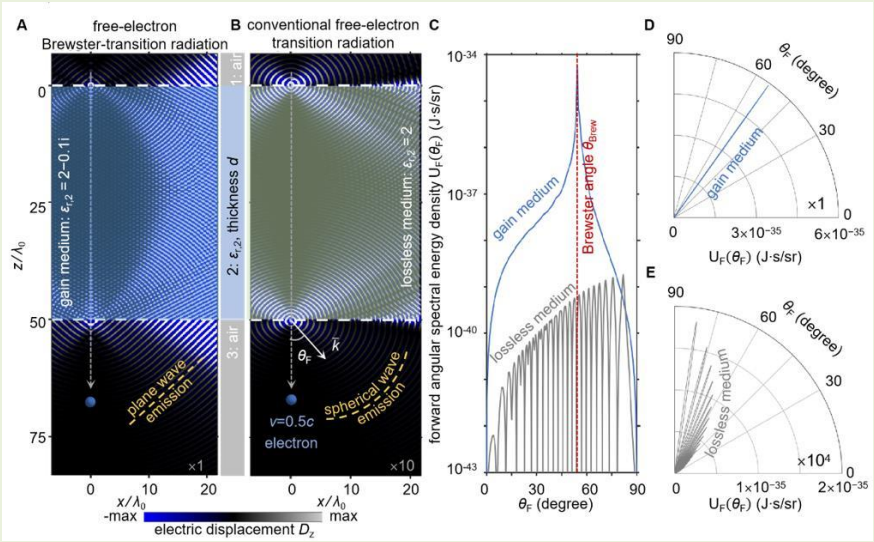


研究成果在线发表于《Physical Review Letters》期刊上。【J. Chen, R. Chen, F. Tay, Z. Gong, H. Hu, Y. Yang, X. Zhang, C. Wang, I. Kaminer*, H. Chen*, B. Zhang, and X. Lin*, Low-velocity-favored transition radiation. *Physical Review Letter* 131, 113002 (2023)。 DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.113002】浙江大学博士生陈佳林为第一作者，以色列理工学院 Ido Kaminer 教授和浙江大学陈红胜教授、林晓研究员为通讯作者。

核心器件 自由电子布鲁斯特-渡越辐射

自由电子辐射起源于快速移动带电粒子和光学物质之间的相互作用，可以在任何频率产生辐射，广泛用于设计新型光辐射源、探测高能粒子、光学生物成像等。由于单个带电粒子与物质之间作用极弱，自由电子辐射的强度非常弱。

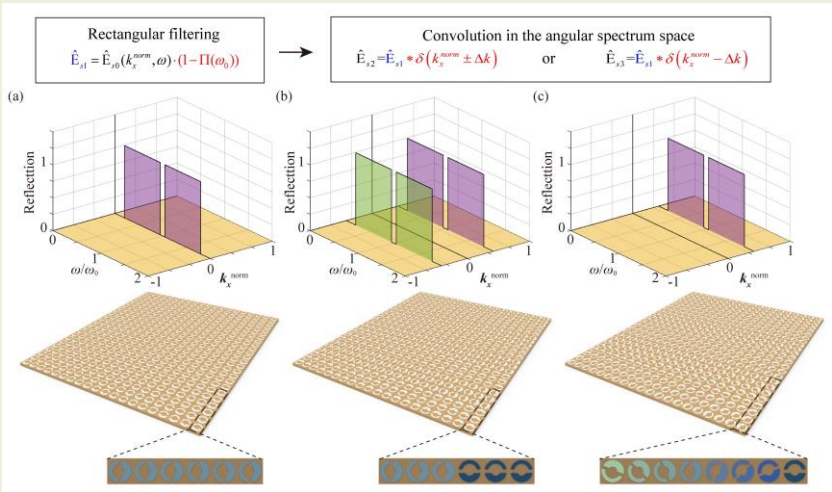
最近，**林晓**和**陈红胜**研究团队提出，利用增益材料的赝布鲁斯特效应，率先发现了自由电子布儒斯特-渡越辐射现象；可有效增强自由电子与物质的相互作用，实现了自由电子辐射强度至少四个数量级的增强。所揭示的自由电子布儒斯特-渡越辐射具有高定向性；对于任意速度自由电子，所产生的自由电子渡越辐射强度始终在布鲁斯特角最强；且所揭示的自由电子辐射布儒斯特-渡越辐射对增益材料速度变化不敏感。该工作为增强自由电子辐射提供了新思路。



研究成果在线发表于《Science Advances》期刊上。【R. Chen#, J. Chen#, Z. Gong, X. Zhang, X. Zhu, Y. Yang, I. Kaminer*, H. Chen*, B. Zhang, and X. Lin*, Free-electron Brewster-transition radiation. *Science Advances* 9, eadh8098 (2023). DOI:10.1126/sciadv.adh8098.】浙江大学博士研究生陈若曦和陈佳林为共同第一作者，以色列理工学院 Ido Kaminer 教授和浙江大学陈红胜教授、林晓研究员为通讯作者。

核心器件 基于 BIC 的非谐振自旋锁定模拟计算超表面

连续域束缚态（Bound state in the continuum，BIC）是指无辐射情况下保持完美束缚的局域波。理想 BIC 具有无限品质因子，在电磁频谱中表现为具有零带宽谐振，无法直接进行观测，通常只能在无损和无限结构中获得。理想 BIC 可被转换为有限高品质因子的准 BIC（Quasi-BIC）的模式，这一思路被广泛用于设计特殊光学性质的超表面结构。

最近，**王作佳**研究员课题组提出了一种基于 BIC 的非谐振自旋锁定模拟计算反射型超表面。理论分析表明，可以通过角谱方式表示反射型超表面的散射场，并且对于波矢进行归一化，从而将超表面对散射场角谱域和频谱域的操作进行统一表达。该工作实现了一种混合域光学模拟计算方式，包括了角谱域的卷积操作和频谱域的乘法操作。具体实现方法为：基于对称保护型 BIC 的非对称分裂环结构能够在特定频率产生高品质因数的谐振，而在较宽的非谐振频域（off-resonance frequencies）可以保持入射波的极化，这一功能可以等效为频谱域的滤波操作。根据 PB 相位理论在单元内引入可调的几何相位，两种不同设计的相位分布分别实现了光栅分束和异常反射的功能，可以等效为角谱域的卷积操作，并保持圆极化波反射自旋保持的功能。这项工作为面向模拟信号处理的自滤波光学计算超表面提供了一个新的设计思路。

研究发表于《Advanced Functional Materials》期刊上。【Haochen Yang, Xuan Chen, Enzong Wu, Peng Tang, Liqiao Jing, Fei Gao, Hongsheng Chen*, Zuojia Wang*, Off-Resonance Spin-Locked Metasurfaces Empowered by Quasi-Bound States in the Continuum for Optical Analog Computing. *Adv. Funct. Mater*. 2023, 2305110. DOI: 10.1002/adfm.202305110】浙江大学博士生杨昊晨为第一作者，王作佳研究员、陈红胜教授为共同通讯作者。