

光电动态

月报

2022年9月
(总第一百五十九期)
《内部资料 仅供交流使用》



主编：骆清铭 张新亮 张涛 • 副主编：韩晶 陆培祥 董建绩 • 责任编辑：苟冰冰

武汉光电国家研究中心 主办

建立突触水平解析特定类型神经元长程投射模式的方法

作为神经系统的基本功能单位，神经元通过复杂的轴突投射与下游神经元形成突触连接，协同不同脑区的活动。绘制和解析神经元在生理和病理条件下的联接图谱，对于理解神经环路组织规律、探究认知等功能机制具有重要意义。近年来，科学家们在单神经元水平对神经环路结构进行解析已取得了长足的进步，然而，如何在获知神经投射的全脑靶区信息时，还能进一步明确特定类型神经元的轴突是否形成了突触，仍存在巨大的技术挑战。

9月26日，骆清铭院士团队在《美国科学院院报》在线发表了研究论文“Dissection of the long-range projections of specific neurons at the synaptic level in the whole mouse brain”，在正常与阿尔兹海默症（AD）模型鼠中分别解析了基底前脑神经元的长程投射模式。

该研究解决了全脑高分辨率数据集获取与分析中样本制备等环节的技术难点，实现了多种荧光蛋白的微弱信号保持，利用团队自主研发的荧光显微光学切片断层成像技术（fluorescence micro-optical sectioning tomography, fMOST），以 $0.23 \mu\text{m} \times 0.23 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 体素分辨率获取了小鼠全脑连续数据集，分析了神经环路的投射模式和关键脑区内突触前结构的分布规律。结果显示，基底前脑小清蛋白（Parvalbumin, PV）神经元广泛支配皮层、皮层下核团，突触前结构密集分布于海马、压后皮质、丘脑和乳头体等多个脑区，并在脑区内呈现亚区偏好性分布特征，如海马背外侧、乳头体背内侧、压后皮质第五层。对8月龄AD模型小鼠的研究中，发现PV神经元的突触前结构在海马、丘脑和内侧乳头体等学习记忆相关区域发生明显丢失，但与所在区域内神经元数目和淀粉样斑块的负荷无关，提示AD中神经元的轴突退化机制可能涉及环路的多个脑区。

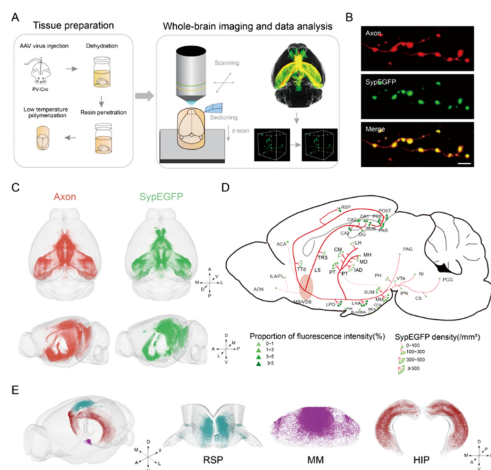


图 基底前脑PV神经元的突触水平长程投射模式。(A) 全脑长程投射信息获取流程。(B) 突触前结构沿轴突的不均匀分布。(C) 全脑三维展示基底前脑PV神经元的轴突和突触前结构的分布。(D) 基底前脑PV神经元投射模式汇总图。红色线条表示投射路径；不同颜色深浅表示突触前荧光亮度占全脑的比例；三角形数目表示突触前结构的密度。(E) 突触前结构在压后皮质（RSP）、内侧乳头体（MM）和海马（HIP）中的三维分布。

综上所述，该研究建立了在突触水平解析特定类型神经元长程投射模式的研究方法，绘制了基底前脑PV神经元带有突触信息的全脑投射图谱，并探究了其在AD的退化变化，为解析生理和病理条件下特定类型神经元全脑突触连接模式提供了新的思路。

博士生田娇娇、任淼博士后、博士生赵陪崴为并列第一作者，骆清铭院士、李向宁教授和龚辉教授为并列通讯作者，骆树康、陈莹莹、徐晓峰博士、江涛博士、孙庆涛博士、李安安教授为共同作者。该研究得到科技创新2030重大项目和国家自然科学基金项目的资助。

文章链接：<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2202536119>

超快激光3D打印多维纳米褶皱结构体

近日，华中科技大学武汉光电国家研究中心和光学与电子信息学院熊伟教授团队提出了一种多维度纳米褶皱结构体的超快激光3D打印方法，实现了高空间复杂度（几乎任意三维几何形状）和结构精细度（特征尺寸40纳米）的三维纳米褶皱结构体的制备。相关成果以“3D printing of Nano-wrinkled architectures via laser direct assembly”为题发表于最新一期《Science Advances》期刊，并在其期刊网站首页进行宣传报道。

褶皱是自然界中最广泛存在的表面结构，人工构建的褶皱结构已被广泛应用于增强物体的表面性能，并在智能表面、传感探测、微纳制造、电池储能、柔性电子等领域展现出巨大的应用前景。现有的起皱方法由于成型原理限制，只能在特定表面和指定区域形成褶皱结构，而自然界中大多数褶皱结构遵循自由曲面的空间分布，目前国际上尚缺乏具备高空间自由度并可按需设计的纳米褶皱结构体的有效制造方法。如何通过控制表面不稳定性，实现具有任意复杂三维空间几何特征的纳米褶皱结构体的成形，具有重要的科学理论和实际应用价值，也是褶皱制造领域的重要挑战。

熊伟教授团队提出了一种自下而上的激光直写组装策略，通过单一材料一步工艺实现了多维度纳米褶皱结构的无掩膜制备，打印出了具有高空间分辨率和几乎任意三维形状的纳米褶皱结构体。该策略利用响应性水凝胶前驱体在超快激光双光子聚合过程中的溶胀相变，引导体素单元表面的纳米起皱和三维自组织成形。在整个起皱过程中，仅需在单一水凝胶前驱体材料中执行飞秒激光直写步骤，通过激光直写

路径规划将纳米褶皱体素单元灵活地组装为一维、二维或三维多层次的纳米褶皱结构体。

通过调控界面应力失配程度，研究团队实现了多维纳米褶皱结构的可控按需制造和对褶皱特征形态的精确控制，其典型的褶皱结构波长为40 nm。进一步，通过引入结构应力失配，研究团队实现了纳米褶皱结构对材料表面力学性质的微观反常调控，以及褶皱晶格结构体从表面起皱到结构形变转换的仿生动态调节。该研究提出并实现了一种可制备任意多维纳米褶皱结构体的激光微纳增材制造方法，为仿生三维纳米褶皱结构体在柔性电子、组织工程、微光学、微机械和新能源器件等方面的应用奠定了基础。

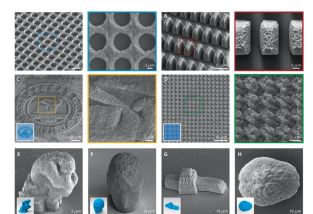


图 基于超快激光三维组装技术制备的多种纳米褶皱结构体

该论文第一作者为武汉光电国家研究中心博士生范旭浩，通讯作者为熊伟教授，研究单位为华中科技大学和湖北光谷实验室。该研究工作获得了国家重点研发计划项目、湖北光谷实验室创新基金和中国博士后科学基金的资助，并得到了华中科技大学分析测试中心、武汉光电国家研究中心微纳工艺与表征平台、光学与电子信息学院大型仪器共享平台和机械学院先进制造与技术实验中心的设施支持。

文章链接：

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abn9942>

高效非对称光学传输研究新进展

9月13日，武汉光电国家研究中心陈林教授研究小组，在《物理评论快报》发表最新研究进展“Riemann-encircling exceptional points for efficient asymmetric polarization-locked devices”。

近年来，非厄米物理学发展为现代物理学最活跃的分支之一，在广泛的应用中发挥着关键作用。其中，通过构建与外界环境之间的能量交换，并精确控制系统能量的增益或损耗参量，可以使系统位于奇异点 (exceptional point, Ep) 这一特殊状态，使得原本不同的能量本征值在这一点处趋于统一，并且共享同一个本征态。这种独特的简并特性，启发了光学系统中高灵敏度传感、光波模式控制等方面的研究与应用。

在光学中实现光波模式的控制一直以来都是人们关注的话题，不同的模式可以在光通信中携带不同的信号，有利于提高通信容量。奇异点的引入实现了光波模式的非对称调控：在耦合光波导中，通过控制两耦合波导之间的耦合失谐程度和损耗差异这两个参量，使系统的结构参量沿着光传播方向环绕奇异点，可以令某一光学模式分别从沿着正方向和反方向入射后，输出不同的光学模式。不过，以往的研究大都仅调控相同偏振方向的模式且传输效率较低，尚未实现不同偏振模式的高效非对称传输。

在2020年，陈林团队已证明了经过二维平面参量空间无穷大边界的环绕奇异点路径和高效的非对称传输之间有着密不可分的联系。在最新的研究中，该团队将二维平面参量空间映射到一个闭流形的黎曼球上，利用系统本征模式在参量空间边界处收敛到同一模式的性质，将原本难以界定的无穷大边界映射到黎曼球的北极。通过这种方法，不仅在黎曼球上更加清晰地展示出了经过无穷大边界的环绕奇异点路径，并且能够方便界定环绕不同个数奇异点路径之间的拓扑等价性。

硅基光波导技术的发展允许人们在芯片上制造具有各种功能的光信息处理系统，通过将经过黎曼球北极的环绕奇异点路径映射到L形截面硅基光波导中，可以实现不同偏振模式之间的高效非对称传输与锁定。L形的波导截面结构使同一波导内TE模式和TM模式之间能够相互耦合，并且可以控制偏振方向随截面结构参数

的变化而发生演变。通过在主干线L形波导的一侧放置另一个L形波导，可以实现仅对某一方向偏振模式的耦合吸收损耗。在正向输入时，任意偏振模式均被转化为TE偏振模式输出，反向输入时，任意偏振模式则被转化为TM偏振模式输出。输出模式的振幅与输入模式的偏振态有关，其中振幅最大的输出模式透过率接近100%，且串扰小于-20dB。

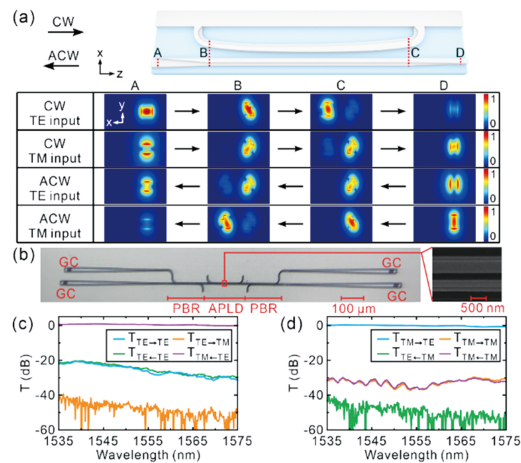


图 非对称偏振锁定硅基光波导

本工作通过构建黎曼球上环绕奇异点的理论框架，为研究奇异点相关的拓扑性质提供了新的思路。通过穿过黎曼球北极的环绕奇异点路径，实现高效非对称偏振锁定结构，丰富了片上光波模式的调控方法，为非厄米光学设备和应用带来新的机遇。

陈林指导的华中科技大学武汉光电国家研究中心博士生李翱东和新加坡国立大学陈卫锦博士为论文第一作者。该成果得到了国家自然科学基金、科技部重点研发计划等项目的支持。

文章链接：

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.129.127401>

成功拍摄单分子电荷迁移的超快电影

近日，《自然·通讯》在线发表了陆培祥教授创新研究群体在利用高次谐波光谱探测分子超快电荷迁移方面取得的最新研究成果“Filming movies of attosecond charge migration in single molecules with high harmonic spectroscopy”。

分子内部的电荷迁移是化学反应发生的根本原因。追踪这一超快过程对于理解甚至操控超快微观化学反应过程有着十分重要的意义。然而分子内部电子的运动时间尺度在阿秒 (10-18秒) 量级，如何实现如此之高的时间分辨率一直是强场物理的重要挑战。飞秒激光与分子相互作用产生的高次谐波辐射携带了丰富的分子结构

以及动力学信息，其内在的“自探测”以及“阿秒啁啾”特性为实现阿秒时间分辨的超快探测提供了有效途径。然而目前分子高次谐波实验中，由于无法实现完美分子排列，实验测量信号为排列在不同角度下分子辐射谐波相干平均的结果，不能真实反应单分子的动力学信息。

针对这一问题，兰鹏飞等创新性地提出将机器学习与高次谐波自探测方法相结合，直接从实验测量的平均信号中准确提取了单分子高次谐波偶极辐射信息。同时结合双色光驱动方案，对分子内部多轨道动力学进行分解，进而在单分子层面拍摄了N₂和CO₂分子内部电荷迁移过程，拍摄时

间分辨率达到50阿秒，这是目前关于分子电荷迁移电影时间分辨率最高的实验结果。研究结果同时揭示了分子排列角对电荷迁移过程的影响。

论文第一作者为青年教师何立新副教授，通讯作者为兰鹏飞教授和陆培祥教授。论文研究工作得到了美国

堪萨斯州立大学C. D. Lin教授的大力支持，同时获得了基金委创新研究群体、国家重点研发计划、国家自然科学基金等项目的资助。

文章连接：

<https://www.nature.com/articles/s41467-022-32313-0>

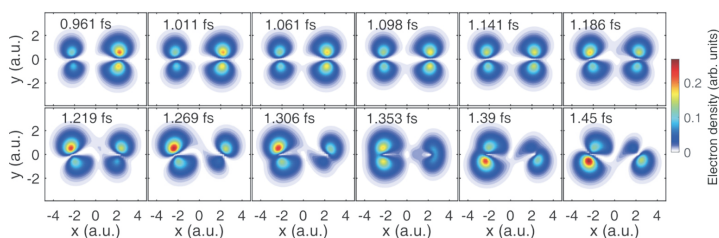


图 利用高次谐波光谱实验重构的CO₂分子平行外部激光场时内部的电荷迁移过程