

超材料前沿研究一周精选



2026年2月1日-2026年2月8日

索引：

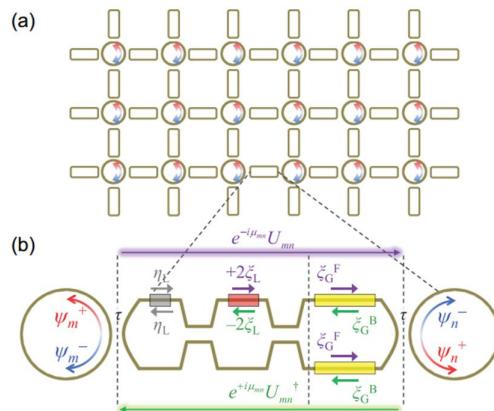
- 1、用于非阿贝尔拓扑光子学和编织的可编程晶格
- 2、机器学习驱动的微流体电路自动化设计
- 3、半金属石墨中由双极声子曳引主导的霍尔热导率
- 4、表面能匹配界面 —— 超低阻热界面材料的关键设计规则
- 5、无序多孔材料中超相对论电子束的超通道化及其辐射
- 6、编织保护的非成对奇异点的观测

1、用于非阿贝尔拓扑光子学和编织的可编程晶格

光子学中的非阿贝尔物理源于操作序列的非对易性，其揭示了新颖的拓扑自由度。近年来，在光子学领域，为实现可作为非阿贝尔量子现象经典测试平台及利用拓扑复杂性的可编程系统，开发可重构非阿贝尔平台成为重要研究方向。可编程光子电路的核心是作为可重构 $SU(2)$ 门的基本构建模块，其系统集成可实现波操纵、矩阵计算及量子计算所需的高维幺正操作。在非阿贝尔物理中，幺正操作同样至关重要，因为对称性及其规范不变性由幺正算符表征，内在对称性的非对易性要求在非对易幺正群 $U(N>1)$ 内引入矩阵值规范场。尽管静态及可调谐平台已实现了非阿贝尔规范场的模拟，并催生了新的拓扑现象及任意子系统模拟，但发展一个兼具可重构性、通用性及晶格兼容性的非阿贝尔矩阵值规范场基本单元，仍是当前可编程光子电路面临的关键挑战。

近日，韩国首尔国立大学的 Sunkyu Yu 教授与 Namkyoo Park 教授、首尔市立大学的 Xianji Piao 教授联合研究团队，提出了一种用于探索阿贝尔与非阿贝尔光子学及其混合体系的可编程晶格方案。通过设计一个多功能基本单元，构建了可重构的自旋格点，用于模拟拓扑现象。研究实现了具有相同谱响应的等谱系统家族，展示了包括量子霍尔效应及不同本征基下的量子自旋霍尔效应在内的阿贝尔拓扑现象。该工作首次引入了“非阿贝尔界面”概念，揭示了即使在体区为阿贝尔的情况下，界面处也能产生非阿贝尔物理，从而允许对拓扑保护边缘态进行拓扑平庸的工程化耦合，并导致能带重新打开。此外，研究还通过定义赝自旋可观测量上的编织群，演示了可编程的非阿贝尔编织操作及 Yang-Baxter 关系，实现了对任意子系统交换行为的模拟。该基本单元的通用性与可重构性为在单一平台上模拟从阿贝尔到非阿贝尔的各类拓扑现象提供了可能，所展现的非阿贝尔界面特性及编织操作，为在光子系统中探索拓扑平庸与非平庸效应的共存、以及实现新型光子态编织与链接开辟了新途径。研究成果发表于《Physical Review

Letters》。(刘梦洋)

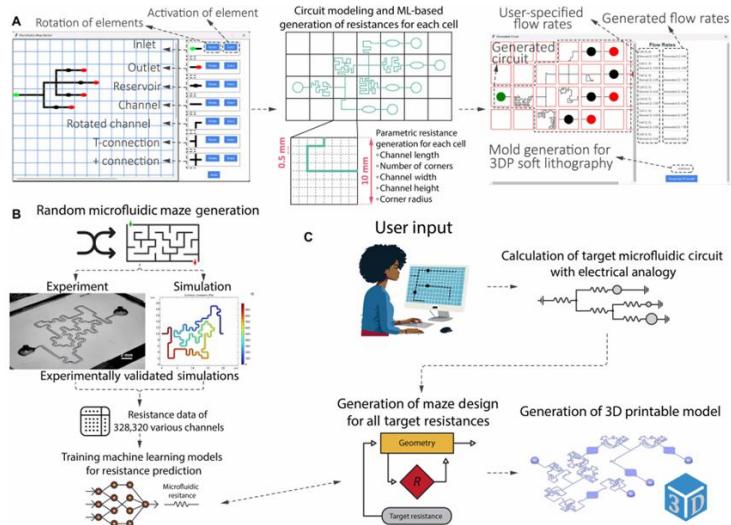


文章链接: <https://doi.org/10.1103/rgfy-n6zd>

2、机器学习驱动的微流体电路自动化设计

微流体技术能够在微米尺度上实现生物与化学物质的高精度、低成本处理，广泛应用于生物医学、化学分析及环境监测等领域。然而，微流体芯片的设计与制备通常需要深厚的专业知识和多次迭代优化，这对非专业研究者构成了较高的技术门槛。传统的设计方法依赖于计算流体动力学或有限元分析，这些方法虽能预测性能，但实施复杂且计算资源需求大。近年来，机器学习技术为处理复杂数据、提升设计效率提供了新途径，但在微流体系统设计中实现全自动、性能驱动的结构生成仍面临挑战。因此，开发一种能够自动化生成符合特定流态要求的微流体电路工具，对降低技术壁垒、推动多学科应用具有重要意义。

近日，土耳其科奇大学的 Savas Tasoglu 助理教授研究团队提出了一种名为 μ FluidicGenius (μ FG) 的开源微流体设计工具，其集成了机器学习与算法优化框架，能够根据用户定义的储液池位置、通道连接及目标流量分布，自动生成具有特定流体阻力的迷宫式微通道结构。该工具采用两阶段机器学习流程，首先基于大量仿真数据训练阻力预测模型，再结合禁忌搜索等元启发式方法生成符合目标阻力的几何布局，并通过电路类比方法将流路网络转化为可求解的矩阵模型。生成的微流体电路可直接导出为三维打印文件，实验验证表明其可实现约 90% 的流量分布准确度。该平台在保持结构可制造性的同时，显著降低了设计复杂度与时间成本，即使多出口复杂电路也可在数分钟内完成设计。此外，该工具成功应用于模拟多器官芯片中的生理相关流态分布，展现了在生物医学系统中实现定制化流路设计的潜力。研究成果发表于《Science Advances》。(刘梦洋)



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aea7598>

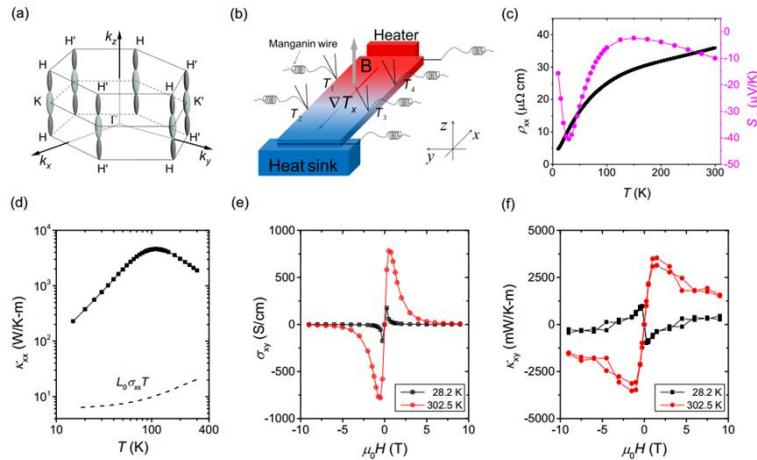
3、半金属石墨中由双极声子曳引主导的霍尔热导率

热霍尔效应，作为电霍尔效应的热学类比，近年来在多种量子材料中得到了广泛的研究。在这一效应中，热流的横向分量可以被外加的磁场引导，产生与电流相关的热响应信号，成为研究热输运的一个重要工具。传统的热霍尔效应研究通常关注由电子或自旋等载流子引起的信号，尤其在具有明显量子效应的材料中，热霍尔信号能提供关于热传导和载流子动力学的宝贵信息。然而，除了电子，其他准粒子（如声子和磁振子）也被发现能够产生热霍尔信号，这使得对热霍尔效应的理解更加复杂，并推动了对非电子载流子在热传输中的作用的进一步探索。石墨作为一种具有非常高迁移率的半金属材料，其载流子包括了电子和空穴两种不同符号的载流子，此外，石墨的晶格热导率也非常高，因而成为了研究热霍尔效应的理想材料。然而，尽管石墨在电学和热学方面有着丰富的研究，石墨的热霍尔效应，特别是由电子、声子和载流子之间相互作用所引发的信号，仍然鲜有详细探讨。尤其是在高温条件下，石墨的热霍尔效应远远超出了传统的电子贡献，产生了显著的非常规现象，这为石墨在热管理、热电和量子材料领域的应用提供了新的视角。

近日，来自国家脉冲强磁场科学中心极端量子输运团队的李小康副研究员、朱增伟教授以及法国巴黎高等物理化工学院 Kamran Behnia 教授对高定向热解石墨 (HOPG) 样品进行了热霍尔效应的系统研究，揭示了石墨在磁场下的热霍尔导电性 (κ_{xy}) 超出了电子贡献的预期，远超韦德曼-弗朗茨定律的预测。实验表明，在 28.2 K 时，热霍尔导电性 κ_{xy} 达到了 $-818.9 \text{ mW K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ，显著高于理论上由电子载流子贡献的热霍尔导电性，达到了一个创纪录的霍尔洛伦兹数 $164.9 \times 10^{-8} \text{ V}^2 \text{ K}^{-2}$ （接近 $67L_0$ ），这是迄今为止在金属材料中观察到的最大值。

这一结果表明，在石墨中，除了电子外，其他载流子如声子和空穴的贡献在热霍尔效应中扮演了重要角色。通过进一步的研究，课题组发现石墨的热霍尔导电性在低温时会发生反转，尤其在 100 K 附近，热霍尔导电性由负转正，这一现象表明石墨中载流子与声子之间的动量交换机制发生了变化。为了深入理解这种非电子来源的热霍尔信号，团队提出了“双极性声子拖拽”模型，这一模型通过载流子（电子和空穴）与声子之间的相互作用，显著放大了热霍尔响应。根据这一模

型, 石墨中的声子拖拽效应在低温下由电子主导, 而在常温下则由空穴主导。该研究不仅为石墨在热霍尔效应中的独特行为提供了理论解释, 还为其他类似材料的研究提供了新的思路。研究团队进一步通过热电系数 (Nernst 系数) 与热霍尔导电性的比较, 验证了这一模型的有效性, 且得到了与实验数据高度一致的结果。研究成果发表在《Physical Review Letters》。(张琰炯)



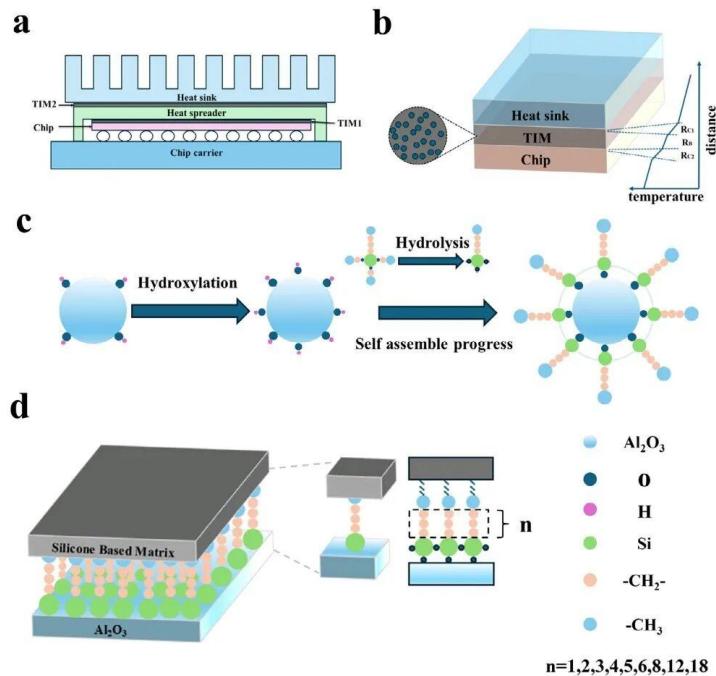
文章链接: <https://doi.org/10.1103/v7z6-bztz>

4、表面能匹配界面——超低阻热界面材料的关键设计规则

高填料含量的 TIMs 能够增加热导率, 但通常也会提高接触阻力, 因此如何在提高热导率的同时减小接触阻力, 成为了 TIMs 设计中的一大挑战。为了应对这一挑战, 科研人员采用了各种策略, 例如利用高导热填料的渗透效应、改进界面设计等手段。自组装单分子层 (SAMs) 作为一种有效的界面改性方法, 已经被广泛应用于提高 TIMs 的界面性能。SAMs 能够在材料的界面上形成具有特定表面能的分子层, 从而调节界面之间的粘附性、分散性和润湿性。这些变化可以显著改善 TIMs 的宏观热导性能。然而, 如何通过精确设计 SAM 链长, 优化表面能匹配, 以同时改善热传导和接触性能, 仍然缺乏系统性的研究和设计准则。

来自中国科学院福建物质结构研究所林悦研究员团队及中国科学院大学宁波材料工程学院的林正得研究员团队通过对自组装单分子层 (SAM) 在铝氧化物 (Al_2O_3) 填料表面上的调控, 提出了一种优化 TIMs 的界面设计新思路。他们系统地研究了不同链长的烷基硅烷 (C1 - C18) 在氢氧化铝表面的自组装过程, 探讨了链长如何影响填料的表面能、分散性、流变学特性以及与硅胶基体的相容性。研究团队发现, SAM 链长的调控可以有效匹配填料与基体之间的表面能, 从而最大限度地减少填料再聚集的现象, 并显著提高热界面材料的性能。通过表面能分析, 发现 C4 (链长为 C4 的烷基硅烷) 在表面能匹配方面表现最佳, 能够最小化热界面材料中的热阻 (REFF), 其热阻值达到 $0.142 \text{ K cm}^2 \text{ W}^{-1}$, 是目前记录中最低的。这一发现为 TIMs 的设计提供了新的思路, 即通过调整 SAM 链长来优化填料和基体之间的界面性能, 从而共同降低热阻并提高热导率。进一步的研究表明, C4-SAM 的使用不仅优化了热界面材料的分散性, 还改善了其流变性和界面接触性。通过原子力显微镜 (AFM) 测量, 研究团队发现 C4-SAM 修饰的 Al_2O_3 填料能够形成一个柔软、具有高耗能特性的界面层, 这种“分子弹簧”结构能够在加载时有效地缓解界面应力, 减少接触阻力 (RC)。这一发现为下一代高性能热界面材料的

设计提供了实用的分子到宏观的设计准则,尤其在高填料含量的 TIMs 中,C4-SAM 表现出最佳的综合性能。相关内容发表于《Advanced Functional Materials》。
(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202531931>

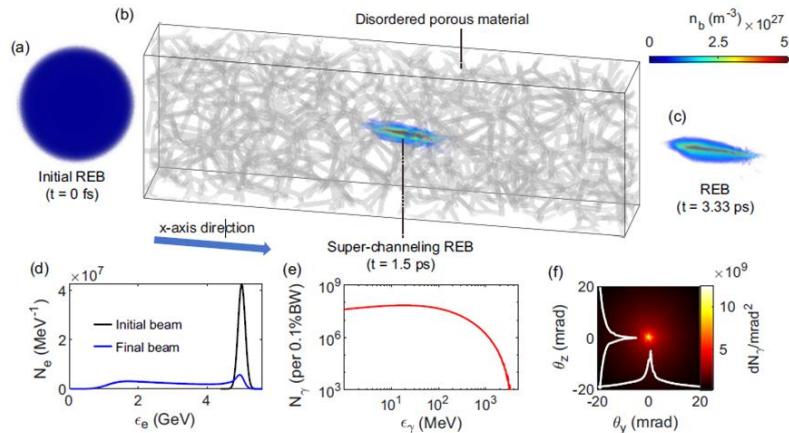
5、无序多孔材料中超相对论电子束的超通道化及其辐射

相对论电子束 (REB) 与物质的相互作用在加速器物理、医学物理、高能天体物理及高能量密度物理等领域具有重要意义,也是紧凑型辐射源发展的基础。

REB 驱动的辐射特性与材料的微观结构及电磁场激发密切相关。近年来,低维材料被提出用于激发表面电磁模式,从而高效调制自由电子并产生可调谐的 X 射线甚至伽马射线,但该机制对束流与靶材的相对取向高度敏感,且在高束流条件下易受自场和辐射场扰动,限制了辐射亮度。当高电流 REB 入射物质时,靶材可被电离为等离子体,引发非线性微不稳定性并增强电磁场,进而产生强同步辐射。通过精细设计靶结构可进一步提升伽马射线辐射效率。近期研究发现,REB 在低密度多孔材料中传播可产生极强电磁场并出现树枝状分叉,但材料内部微观结构对束流输运和辐射机制的影响仍缺乏系统认识,这些微结构可能引发非常规输运行为,并为新型辐射机制提供新的探索方向。

近日,深圳技术大学黄太武教授和周沧涛教授研究团队,首次报道了一种此前尚未发现的相对论电子束在无序多孔材料中的“超通道化”传播新机制。该类材料由随机分布的固体密度细骨架和空孔构成。不同于传统预期的散射或树枝状分叉行为,电子束在传播过程中能够自组织形成稳定而致密的电子细丝,并在复杂微结构中长距离稳定传输。这一现象源于电子束与材料骨架中局域回流电流所产生的、随机分布的百千特斯拉量级强磁场之间的相互作用,体现了一种电子束与无序介质相互作用的全新集体模式。在该超通道化状态下,电子在强磁场中发生剧烈的贝特龙振荡,从而辐射出高度准直、超高亮度的 GeV 能区伽马射线,其能量转换效率可超过 40%。研究通过理论分析确定了实现超通道化的参数条件,

并推导了伽马射线辐射的标度律，相关结果已由三维粒子-网格模拟加以验证。尽管该机制需要高度聚焦的电子束，但在近未来实验条件下具有实现的可行性。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）



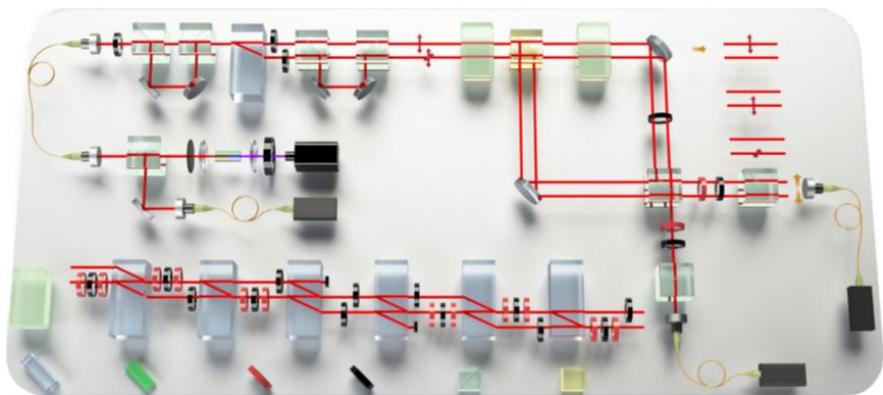
文章链接: <https://doi.org/10.1103/21z5-fr2p>

6、编织保护的非成对奇异点的观测

能带结构中的节点是谱简并的重要形式，常表现出独特的物理性质。狄拉克与外尔半金属的发现推动了对布洛赫能带中拓扑稳定节点的广泛研究。然而，Nielsen - Ninomiya 费米子倍增定理指出，在晶体体系中携带拓扑荷的节点必须成对出现，从而对其实现形成根本限制。该定理的一个关键前提是拓扑荷满足可加的阿贝尔性质，因此并不适用于满足非对易统计与路径依赖融合规则的非阿贝尔拓扑荷。非厄米耗散体系中的奇异点正携带此类非阿贝尔拓扑荷，其复杂能谱的编织结构赋予其非阿贝尔拓扑不变量，从而为突破倍增定理、实现编织保护的非成对奇异点提供可能。尽管耗散广泛存在于多种物理系统中，非成对奇异点及其非阿贝尔效应的实验实现仍极具挑战。

近日，斯德哥尔摩大学 Emil J. Bergholtz 教授和东南大学薛鹏教授研究团队，首次在实验上实现了非阿贝尔非成对三阶奇异点 (EP3)，该新型谱简并利用非厄米多能带体系中复杂的非阿贝尔拓扑结构，突破了传统倍增定理的限制。通过实验探测奇异点的融合过程，系统揭示了支撑非成对 EP3 的非阿贝尔拓扑机制。研究基于新设计的单光子干涉方案，实现了对可调非厄米哈密顿量本征态与复能谱的精确提取。该实验平台为模拟耗散多能带体系中的多种拓扑现象及探索此前仅停留在理论层面的非阿贝尔拓扑提供了可能。相关结果对理解非阿贝尔效应在动力学、输运与边界行为中的作用具有重要意义，并为实现依路径控制的高阶奇异点操控和多模态切换提供了新的手段。

相关工作发表在《Physical Review Letters》。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/q3y4-3s34>

(来源: 两江科技评论)