

超材料前沿研究一周精选

2025 年 4 月 20 日-2025 年 4 月 26 日

索引:

- 1、现场可编程光子非线性
- 2、Dirac 异常点的实验观察
- 3、拓扑非平庸双曲超材料中的缺陷免疫声辐射
- 4、扭转石墨超润滑界面的超高导热率
- 5、基体晶格平整化在复合材料 $\text{Cu}_2\text{Se}/\text{SnSe}$ 中实现高热电性能
- 6、通过磁相互作用实现可编程机械超材料
- 7、高温高压与化学气相沉积金刚石的比较: α 辐射探测器的性能与缺陷分析

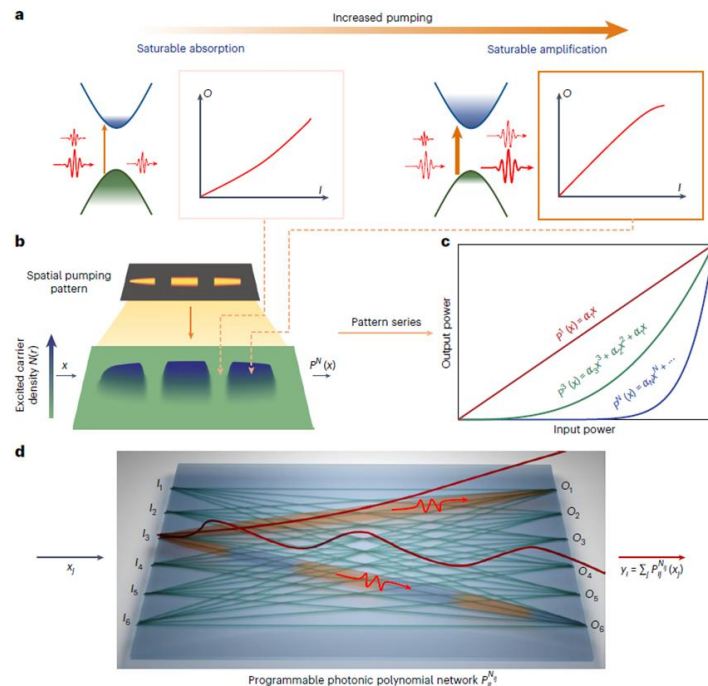
1、现场可编程光子非线性

可重构计算通过 FPGA 等可编程硬件实现高效运算,在执行矩阵乘法、卷积等神经网络核心任务时,其速度远超传统 CPU/GPU。光子学技术的引入进一步提升了性能:光计算凭借并行性、高频率和大带宽,能以极低能耗处理海量数据。然而,光子计算目前仅能实现线性运算,非线性光学虽经多年研究仍进展有限。

光与物质的非线性相互作用本质微弱,即使利用克尔效应等三阶非线性也难以实现计算所需的动态非线性映射。现有非线性光学现象往往保持光功率守恒,与计算所需的输入输出非线性变换不匹配。此外,光探测器始终呈现线性响应,导致系统整体难以突破线性限制。半导体材料中的载流子相互作用非线性强度不足,使得复杂非线性光学计算面临根本性挑战。因此,尽管光子计算在线性领域优势显著,但实现可编程非线性光互连仍需突破材料与物理机制的限制,这是推动光计算全面发展的关键瓶颈。

近日,宾夕法尼亚大学的冯亮教授团队,通过对有源半导体内分布式载流子激发及其动力学进行精细的空间控制,将光子场可编程性的能力拓展到非线性领域。该现场可编程光子非线性微处理器利用多项式构建块的光子非线性计算架构,实现了对具有动态重构非线性连接的光子多项式网络的现场训练。该研究成果为光子可重构计算的革新提供了一种新的范式,使得使用多项式网络以无与伦比的简单性和效率处理复杂任务成为可能。相关工作发表在《Nature Photonics》上。

(刘帅)

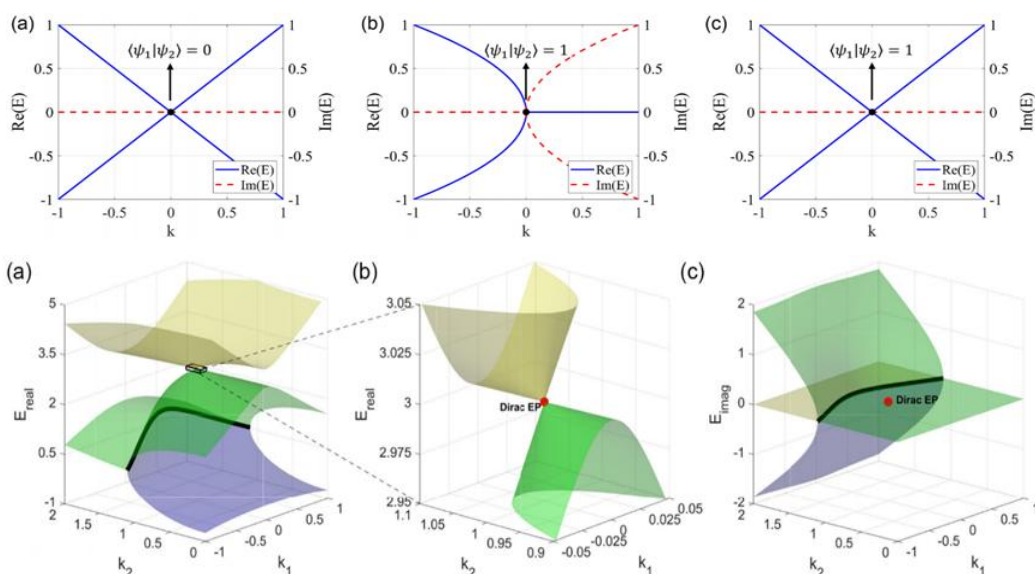


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41566-025-01660-x>

2、Dirac 异常点的实验观察

异常点 (Exceptional Points, 简称 EP) 最早在数学领域引入, 用于刻画线性算符中的能级简并, 已有逾半个世纪的研究历史。迄今为止, 实验上仅发现两类 EP: 第一类出现在厄米系统中, 例如所谓的“锥形交叉点”。此类简并点附近的本征值始终为实数, 且随参数线性变化; 尽管本征值简并, 本征态仍保持正交。这类 EP 揭示了如 Dirac 半金属和 Weyl 半金属等材料中的奇异拓扑特性。第二类是非厄米物理框架下的典型 EP, 其本征值和本征态同时简并, 常伴随对称性的破缺, 例如 PT 对称性、反 PT 对称性或粒子-空穴对称性。典型 EP 的一个显著特征是: 系统能谱在穿越 EP 时从实数跃迁为复数, 产生剧烈变化。对这类 EP 的研究不仅推动了非厄米拓扑物理的发展 (如非厄米拓扑相、异常拓扑节点、拓扑态调控等), 也催生了诸如单模激光、单向隐身器件等前沿应用。

近日, 中国科学技术大学杜江峰院士和荣星教授团队首次实验观测到一种全新类型的 EP, 称为 Dirac EP, 其构建基于钻石中氮-空位色心系统。在该 EP 点及其附近测得的所有本征值均为实数, 从而确保了系统在穿越 Dirac EP 时依然保持 PT 对称性。由于无复数本征值的存在, 典型 EP 中常见的非绝热跃迁现象在此不再出现。此外, 连接于 Dirac EP 的两个本征值随参数变化呈现出线性变化与锥形色散 (Dirac 锥), 这与典型 EP 附近的平方根依赖形成鲜明对比。Dirac EP 所展现出的丰富而独特的物理性质, 拓展了我们对非厄米系统中动力学机制的理解, 并展现出在研究无耗散、绝热演化和高效模态切换机制中的潜在应用价值。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上, 并被选为 Editors' Suggestion。(金梦成)



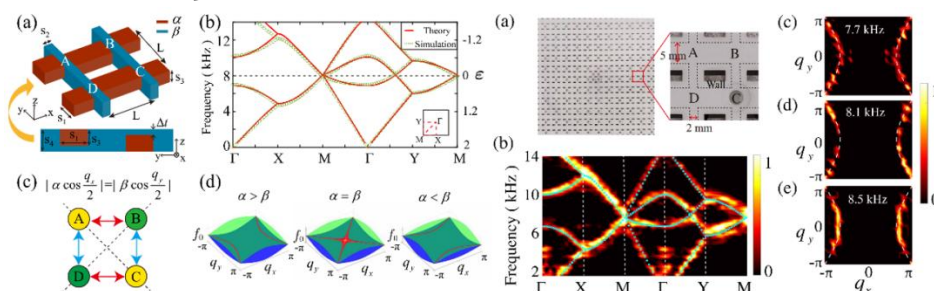
文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.153601>

3、拓扑非平庸双曲超材料中的缺陷免疫声辐射

“发射”是指能量以波动的形式从源点释放并向外传播的过程，这一现象普遍存在于多种类型和尺度的波动系统中。在电磁波领域，从纳米尺度的光子辐射到天体释放的宏观能量，均构成了典型实例。不仅如此，声波同样具备发射特性。无论是次声波、可听声波还是超声波，均可从声源向外辐射，并在环境探测、医学诊断、结构检测等诸多领域展现出重要价值。在凝聚态物理领域，拓扑绝缘体因其能带结构中支持的边缘态和角态而受到广泛关注。这些拓扑态通常局限于系统边界或特定路径上，拓展了传统“体-边界对应关系”的理解，并为量子计算与新型电子器件提供了坚实的理论基础与实验验证平台。近年来，拓扑思想已被成功拓展至人工超材料领域。借助复杂的几何设计和周期性结构，这类材料在光学、声学及力学系统中实现了对波动传播的高度可控性。基于拓扑绝缘体固有的对称性与非平凡几何相位原理，该理论框架自然地延伸至波发射与辐射调控。通过引入拓扑特性，研究人员希望为辐射波动赋予更强的方向选择性与缺陷鲁棒性，与电子系统中的拓扑受限态相互呼应。这一跨学科的研究方向有望推动通信、传感和波场调控等领域实现重大突破。在“谷对比物理”的研究背景下，近年来光子学和声学领域不断涌现出从拓扑界面泄漏出的“谷边缘态”新现象。这些态聚集于布里渊区的特定“谷”区域，具有非零的谷陈数，通常源于晶格反演对称性的破缺，从而实现了单向谷传播与高精度波束分裂等拓扑控制效果。

近日，中山大学郑立洋副教授和 IMDEA 材料研究所 Johan Christensen 教授团队提出了一种基于拓扑对称性与几何相位的新型双曲型声学超材料。该结构突破传统拓扑平庸超材料的限制，其能带色散由手征对称性与镜像对称性共同构建而成。研究表明，即便结构中引入吸收性或障碍性缺陷，只要整体对称性不被破坏，系统的远场声辐射图案依然保持稳定。这一现象体现了强烈的拓扑鲁棒性，即声波辐射对结构扰动的天然免疫能力。此外，研究还实现了基于时间调制的动态发射控制，使声辐射方向在时间周期内实现可切换。这种结合拓扑物理、波动工程与时域调控的设计理念，为高定向声学辐射、新型波动器件、室内声环境优化与城市噪声管理等应用领域提供了全新思路。相关内容发表于《Physical Review

Letters》上。（金梦成）

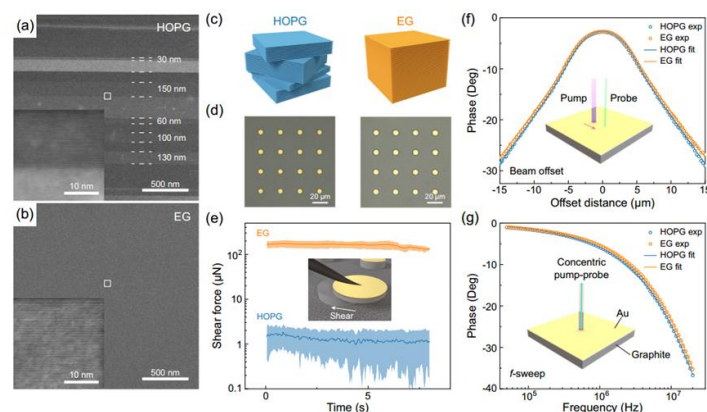


文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.156602>

4、扭转石墨超润滑界面的超高导热率

在现代微纳电子器件的持续小型化与高功率化趋势下，热管理问题已成为限制器件性能与稳定性的关键瓶颈。特别是在二维范德华材料中，跨界面的热传导效率往往远低于材料本体，成为“热瓶颈”的代表。近年来，人们注意到，范德华材料的层间“扭转”带来了一个全新的自由度：通过调控晶格之间的相对取向，能够显著改变电子、声子等激发态的输运行为，催生了如“魔角超导”“摩擦超滑”等新现象。然而，在热传导领域，尽管理论研究早已预言扭转界面可能带来热导调控的新机遇，但实验验证却困难重重。一方面，人工堆叠的扭转样品往往存在不可控的起皱、污染等问题；另一方面，极薄样品的热导测量又受到衬底效应与接触热阻的强烈干扰。如何精确探测这一“旋转自由度”对界面热导的影响，已成为二维热管理研究的前沿难题。

近日，北京大学先进微纳制造技术国家重点实验室宋柏特聘研究员、刘开辉研究员、清华大学郑泉水院士和华中科技大学 Te-Huan Liu 课题组首次实现了对石墨内在扭转界面的热导性能进行系统测量与操控。研究团队基于高取向热解石墨（HOPG）丰富的内在扭转界面，构建了微纳米尺度的石墨“台面”结构，结合高精度频域热反射技术（FDTR）和有限元建模，测得扭转界面的热导率高达 $600 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，不仅远超此前文献中报道的所有二维材料界面热导值，也与高耦合界面的“锁定”状态相比提升超过 30 倍。更重要的是，研究团队设计了一种巧妙的“旋转实验”，通过机械方式对单一界面进行原位扭转和锁定，直接对比“滑动”与“锁定”状态下的热输运，进一步验证了该高热导性能的界面正是处于结构超滑态（superlubricity）。分子动力学和第一性原理计算表明，这种扭转引起的热导调控主要源于横向声子（TA phonons）在滑动界面中的传播受阻。本研究不仅为扭转工程领域注入了热管理新维度，也揭示了热流与界面摩擦之间的普适物理关联，为未来开发高效热界面材料与可调热通道器件提供了坚实基础。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。（张琰炯）

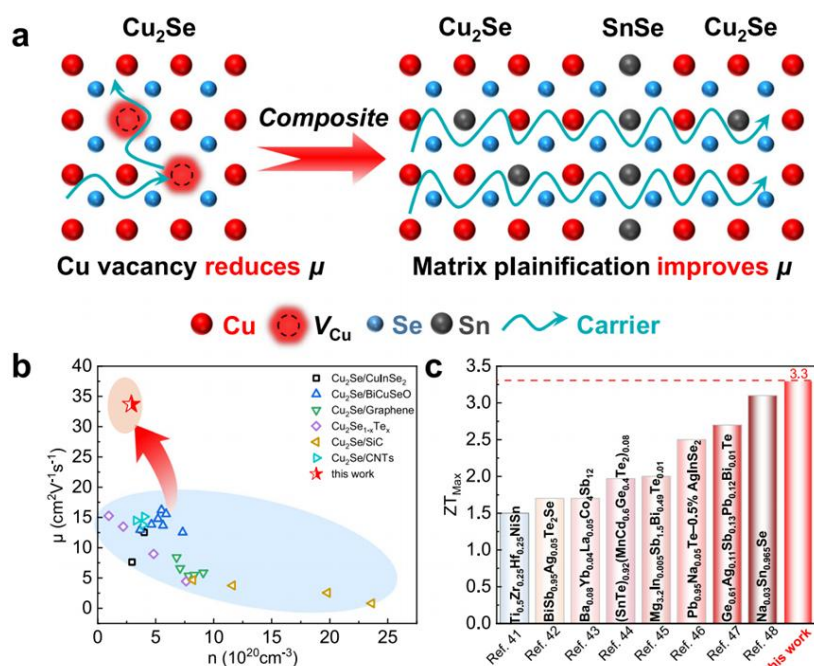


文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.146302>

5、基体晶格平整化在复合材料 Cu₂Se/SnSe 中实现高热电性能

在全球能源紧张与环境压力日益加剧的今天，热电材料因其直接将废热转化为电能独特优势，成为可持续能源技术研究的热点方向。热电器件的能量转换效率由无量纲热电优值 ZT 决定。传统热电材料往往面临载流子输运与声子散射难以有效解耦的困境：提高电导率与塞贝克系数通常会伴随热导率的上升，从而限制了 ZT 的进一步提升。此外，近年来兴起的“电子晶体、声子液体”超离子导体 β -Cu₂Se 因其固有的低晶格热导和优良电性能而备受关注，但由于 Cu⁺ 离子的高迁移性，其在高温与强电场下容易发生迁移沉积，严重影响材料的稳定性与载流子迁移率，难以在保持高性能的同时兼顾热电器件的长期可靠性。因此，如何在抑制声子传热的同时提升载流子迁移率，并解决超离子导体中 Cu 离子迁移导致的稳定性问题，成为实现下一代高效、稳定热电材料的关键挑战。

针对上述瓶颈，由南京理工大学唐国栋教授与西安交通大学武海军教授合作领导的研究团队，创新性地设计了 Cu₂Se/SnSe 复合材料，在复合材料中通过降低 Cu₂Se 材料中的空位浓度，使得 Cu₂Se 基体相的晶格平整化，大幅削弱了晶格缺陷对载流子的散射，实现了复合材料载流子迁移率和热电性能的显著提升。理论计算表明 Sn_{0.96}Pb_{0.01}Zn_{0.03}Se 复合相的 Sn 原子填充 Cu₂Se 基体相的 Cu 空位的形成能极低，Sn 原子极易进入 Cu₂Se 基体相的 Cu 空位，进一步通过球差电镜证实，复合相 SnSe 中的 Sn 原子填补了 Cu₂Se 基体中的 Cu 空位，使得 Cu₂Se 基体晶格平整化，通过该策略大幅提升了材料的载流子迁移率，明显提高了材料的电导率和功率因子，复合材料的最大功率因子高达 $16.22 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ 。同时微结构表征发现复合材料两相之间形成了准共格平直界面，能够在不影响载流子迁移率的前提下强烈散射声子，使材料在保持优异电性能的同时获得了低晶格热导率。电声输运的协同优化使 Cu₂Se/SnSe 复合材料在 973 K 下热电优值达到 3.3。在 Cu₂Se/SnSe 复合材料中还观察到了高密度的纳米孪晶结构，赋予该材料优异的塑性变形能力，其压缩应变达到 12%，相比于 Cu₂Se 基体材料提升了 4 倍。理论计算揭示了复合相 SnSe 中的 Se 原子能够捕获基体 Cu₂Se 中迁移的 Cu 离子，抑制其长程迁移扩散，经实验证实 Cu₂Se/SnSe 复合材料展现了良好的稳定性。研究成果为设计高热电性能、高稳定性、可加工的复合热电材料提供了全新范式，对推动固态热电器件的广泛应用具有重要意义。相关工作发表在《Nature Communications》(张琰炯)。

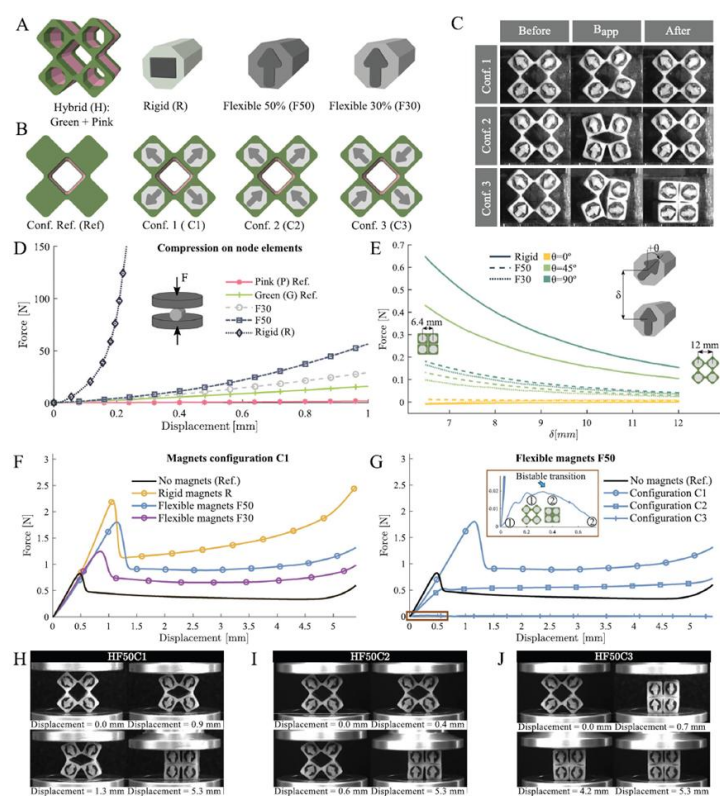


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58484-0>

6、通过磁相互作用实现可编程机械超材料

近年来,超材料因其不寻常的机械性能而引起了人们的极大兴趣,包括负泊松比或零泊松比,负压缩性,以及其他显著的属性。此外,设计工作一直致力于实现传统结构特性的可调性,如刚度和通过变形吸收能量。此外,超材料还可以设计可重复使用的结构来减轻冲击。然而,在大多数研究中,超材料表现出的变形特性完全由其未变形的几何形状决定,因此限制了它们的功能范围。刺激响应金属材料已经显示出动态适应周围环境变化的能力。磁致动提供了独特的优势,包括快速响应、可逆变形和在有限空间内不受限制的功能。磁相互作用为实现具有可重新编程响应的机械超材料提供了一个有前途的平台。

近日,哈佛大学的 Katia Bertoldi 教授和卡洛斯三世大学的 Daniel Garcia-Gonzalez 教授团队合作,通过实验证明了嵌入永磁体阵列的超材料的可重编程性,该技术利用了永磁体的平面极化特性。研究人员系统地研究了永磁体的方向、剩磁和刚度对基于旋转正方形机制的超材料静态和动态响应的影响。该机制最近因表现出有效的负泊松比而引起了广泛关注。通过调节超材料内部磁体的机械刚度、剩磁和方向,在静态和动态范围内实现了显著的可调谐性。此外,通过施加外部磁场来调节磁相互作用,可重编程性得到进一步增强。这项研究将成为设计具有可定制机械响应的工程结构部件的途径,这些部件可以通过重新分配磁性元件或外部磁场进行系统地重新编程。相关工作发表在《Advanced Materials》上。(刘帅)



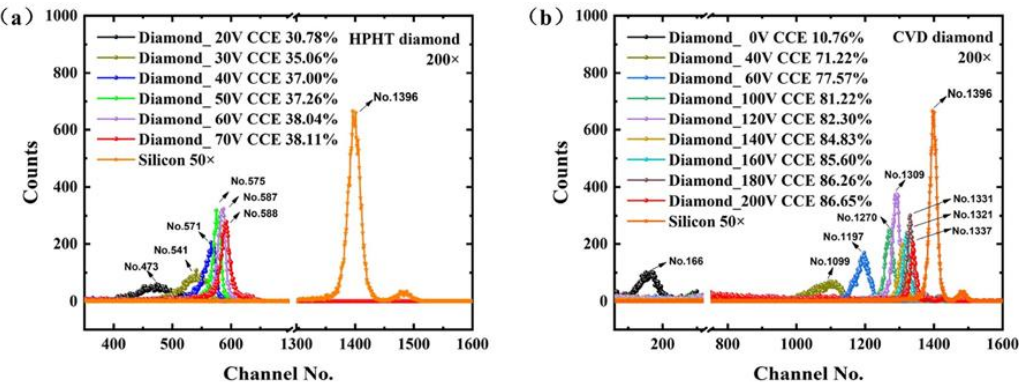
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202412353>

7、高温高压与化学气相沉积金刚石的比较: α 辐射探测器的性能与缺陷分析

目前,高纯度单晶金刚石的制备仍具挑战性,这限制了金刚石在电子学领域的应用。本研究通过反应腔体设计与等离子体纯化技术相结合,在 IIa 型高温高压 (HPHT) 金刚石基底上制备了 IIa 型化学气相沉积 (CVD) 单晶金刚石,并基于缺陷分析对比了两种 IIa 型单晶金刚石探测器的性能。采用同步辐射 X 射线白光形貌术直接观测到金刚石中的位错缺陷,CVD 金刚石因采用高质量 HPHT 基底而展现出相对较低的位错密度。光致发光 (PL) 谱中未观察到氮空位 (NV) 色心杂质,通过电子顺磁共振 (EPR) 表征了替代氮 (Ns) 的微量杂质:CVD 金刚石中 Ns 浓度极低 (2.1 ppb),远低于 HPHT 金刚石的数十 ppb 水平,该数值与 Element Six 公司报道的电子级金刚石相当。进一步将 HPHT 和 CVD 单晶金刚石封装成典型三明治结构的 α 粒子辐射探测器,采用 Ni/Al (50 nm/500 nm) 金属电极。HPHT 和 CVD 金刚石探测器的能量分辨率分别为 2.04% 和 0.86%。基于肖特基接触与缺陷调控,CVD 金刚石探测器在零偏压下即可实现 α 粒子辐射响应,电荷收集效率 (CCE) 达 10.76%;施加正向偏压后,HPHT 与 CVD 探测器的 CCE 分别为 38.11% 和 86.65%。HPHT 金刚石中 Ns 杂质对载流子的深能级陷阱效应是其低 CCE 的主因,而 CVD 金刚石中缺陷引发的空间极化效应形成内建电场,是影响其载流子运输的关键因素。

近期,北京科技大学刘金龙研究员研究团队和郑州工程技术学院朱志甫教授研究团队合作,对化学气相沉积 (CVD) 金刚石探测器与原始高温高压 (HPHT) 基底制备的探测器性能进行了对比。通过反应腔体设计与等离子体纯化技术相结合,

成功外延生长出高纯度单晶金刚石。基于肖特基接触与缺陷调控，CVD 金刚石探测器在零偏压下即可实现 α 粒子响应，电荷收集效率（CCE）达 10.76%；施加正向偏压后，HPHT 与 CVD 探测器的 CCE 分别提升至 38.11%和 86.65%。相关研究成果以“Comparative of HPHT and CVD diamond: performance and defect analysis for alpha radiation detector”为题发表在《Functional Diamond》上。（郑佳慧）



文章链接: <https://doi.org/10.1080/26941112.2023.2271510>
(来源: 两江科技评论)