

清华大学材料学院 简报

2024 年第 1 期（总第 40 期）

材料学院党委办公室

2024 年 3 月 31 日



本期要闻

- ◇ 材料学院沈洋课题组在高温储能聚合物电介质领域取得新进展
- ◇ 材料学院于荣团队突破显微成像信息极限
- ◇ 材料学院李敬锋、朱静课题组在热电材料领域取得新进展
- ◇ 材料学院召开办公室年度工作交流会
- ◇ 实验室管理处调研材料学院
- ◇ 材料学院召开 2023 年度学生辅导员工作述职交流会
- ◇ 材料学院举办工程硕博士专项招生与培养宣讲会
- ◇ 材料学院召开 2024 年第一次教学委员会
- ◇ 材料学院与国家卓越工程师学院开展学生工作研讨

本期导读

【科研成果】	3
材料学院沈洋课题组在高温储能聚合物电介质领域取得新进展	3
材料学院沈洋课题组在极性涡旋拓扑的诱导与调控领域取得新进展	5
材料学院符汪洋、万春磊合作基于石墨烯边缘构建量子电容传感器	7
材料学院李千课题组合作发现极性斯格明子的巨大电场诱导二次谐波产生效应	9
材料学院于荣团队突破显微成像信息极限	11
材料学院于荣团队实现晶格分辨的反铁磁成像	13
材料学院李敬锋、朱静课题组在热电材料领域取得新进展	15
【学院动态】	18
材料学院召开办公室年度工作交流会	18
实验室管理处调研材料学院	19
【党建工作】	20
材料学院召开 2023 年度学生辅导员工作述职交流会	20
材料学院党委理论中心组集中学习研讨全校教职工大会暨全校党员集中培训精神	20
【教学工作】	22
材料学院举办工程硕博士专项招生与培养宣讲会	22
材料学院召开 2024 年第一次教学委员会	23
材料学院与国家卓越工程师学院开展学生工作研讨	23

【科研成果】

材料学院沈洋课题组在高温储能聚合物电介质领域取得新进展

1月3日、4日，清华大学材料学院沈洋教授课题组围绕“高温储能聚合物电介质”主题，先后在《自然·纳米技术》(*Nature Nanotechnology*) 期刊和《自然·能源》(*Nature Energy*) 期刊上发表综述和研究成果。

聚合物电介质是薄膜电容器的核心材料，具有功率密度高、充放电速率快、使用温度范围大、耐电压能力强等优势，在各类先进电子电力系统（如电磁能装备、新能源汽车、风/光伏发电设施）中发挥着不可替代的作用。然而，聚合物电介质的能量密度相较于锂电池、超级电容器等电化学储能器件较低，例如工业上常用的双轴拉伸聚丙烯的能量密度仅有 5 J cm^{-3} ，且只能在 105°C 以下使用。为了实现器件的小型化和集成化，并保证其在严苛服役环境中的性能稳定性，聚合物电介质的高温能量密度亟待提升。

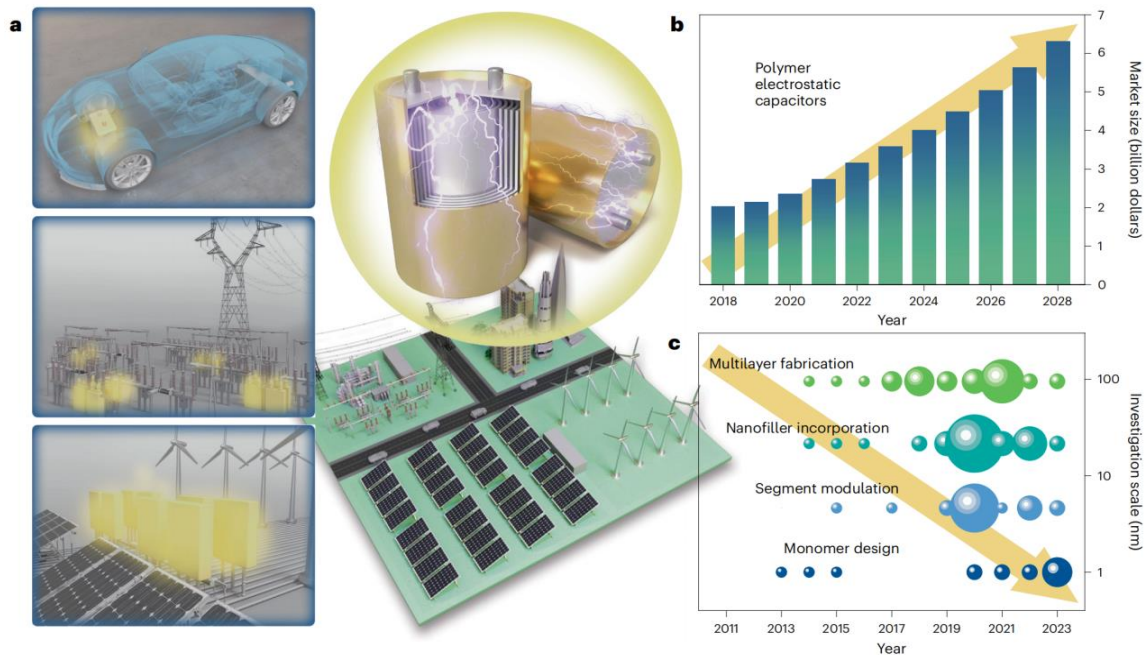


图 1. 聚合物电介质的应用与研究现状

沈洋课题组首先从纳米技术的角度综述了高温储能聚合物电介质领域的研究现状。根据影响聚合物电介质高温能量密度的三个关键因素“介电常数”“击穿场强”和“热稳定性”，梳理了提高其高温能量密度的主要研究方向，包括提升介电常数的关键在于增加偶极子数目和减弱偶极子取向阻碍，增强击穿场强需要侧重电介质的机械增强和电荷捕获，保障性能热稳定性需要兼顾高结构热稳定性和快速热导。基于上述研究方向，课题组介绍了不同尺度的纳米技术，如宏观层面的纳米级表面包覆、填料层面的纳米填料掺杂、链段层面的聚合物交联、单体层面的聚合物结构设计等。此外，课题组还对高温储能聚合物电介质的未来发展方向进行了展望。

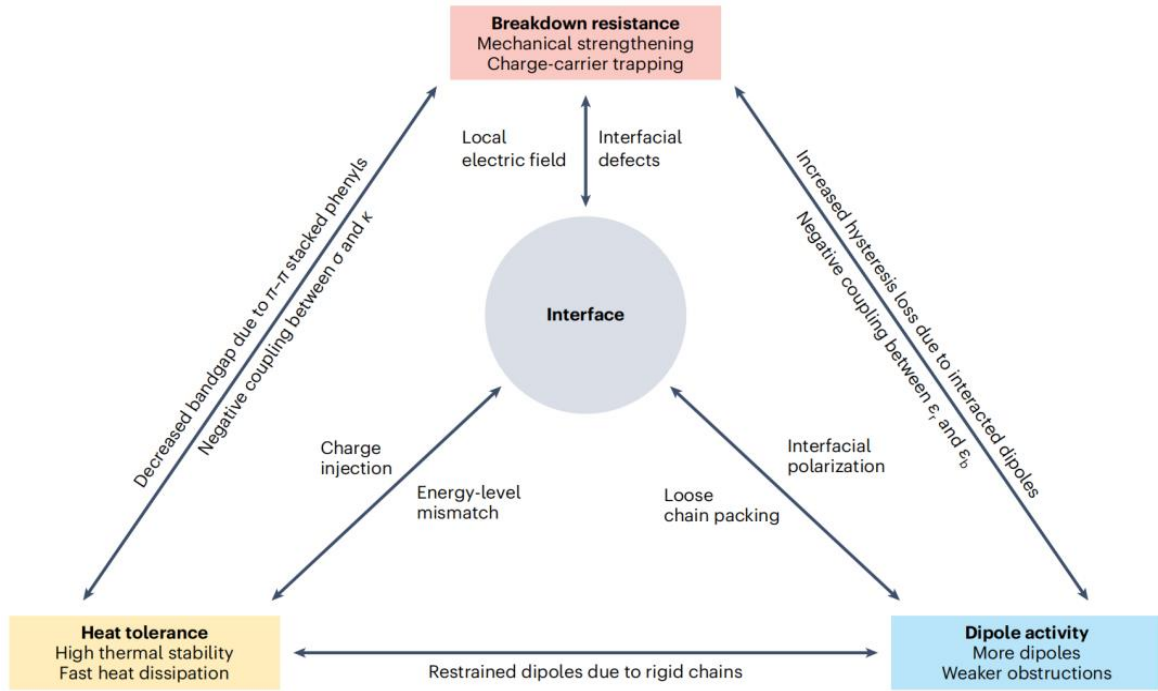


图 2. 高温储能聚合物电介质的主要研究方向

该综述以“用于电容储能的聚合物基纳米复合电介质” (*Polymer nanocomposite dielectrics for capacitive energy storage*) 为题, 发表于期刊《自然·纳米技术》 (*Nature Nanotechnology*) 上。论文的第一作者为材料学院 2020 级直博生杨敏铮, 通讯作者为沈洋, 共同通讯作者为中国科学院院士、清华大学材料学院教授南策文和澳大利亚卧龙岗大学教授张树君。

基于上述研究思路, 课题组合成了磷钨酸亚纳米片作为填料, 开发了一种聚合物基亚纳米复合电介质, 全面提升了聚合物电介质的高温储能性能。其中, 磷钨酸亚纳米片的厚度不足 1 纳米, 横向尺寸达到 3 微米, 可在复合材料中引入大量的界面区域。这使其既可通过调控周围聚合物链段分布增强偶极子极化, 提高介电常数, 也可通过界面区域的能级失配引入高密度电荷陷阱, 还可在其面外方向阻碍击穿路径扩展, 在其面内方向传导载荷, 实现机械增强。其次, 磷钨酸亚纳米片独特的周期排布团簇结构赋予其极强的电荷捕获和容纳能力, 可通过内部 W 离子变价而捕获大量空间电荷, 显著降低高温漏电流。此外, 这种亚纳米片具有柔性, 且表面接有有机表面活性剂, 和聚合物基体展现出极高的结构相容性, 这使得亚纳米复合材料的界面缺陷较少, 高温绝缘性能获得进一步提升。因此, 极小含量的亚纳米片 (0.2 wt%) 便可使复合电介质的介电常数、击穿场强和热稳定性获得显著提升, 在 150°C 和 200°C 下的能量密度分别达到 8.1 J cm^{-3} 和 7.2 J cm^{-3} (充放电效率为 90%), 并实现 200°C 环境中 50 万次的充放电循环。更为重要的是, 课题组依托乌镇实验室, 采用工业化流延设备首次实现了百米级长度的亚纳米复合电介质薄膜的卷对卷生产, 所获得的薄膜具有稳定的储能性能, 展现出广阔的工业化应用前景。

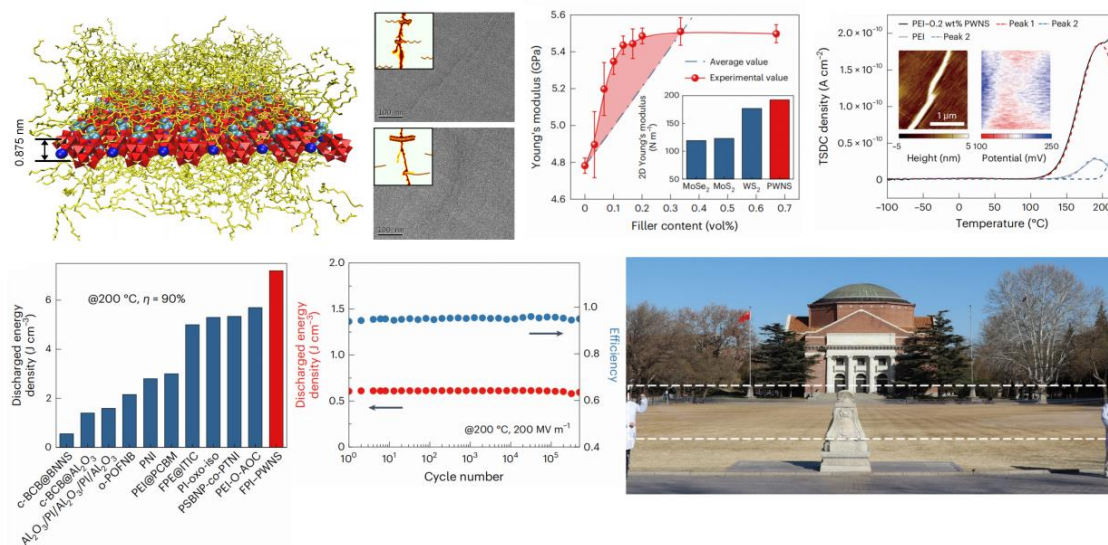


图 3. 聚合物基亚纳米复合电介质的结构与性能

该工作以“200 度下兼具高能量密度和高循环稳定性的卷对卷生产聚合物-亚纳米片复合材料 (Roll-to-roll fabricated polymer composites filled with subnanosheets exhibiting high energy density and cyclic stability at 200 °C)”为题发表于《自然·能源》(Nature Energy) 期刊上。

论文的第一作者为杨敏铮和化学系 2021 级直博生李昊阳，通讯作者为沈洋，清华大学化学系教授王训为论文共同通讯作者，论文的合作者还包括南策文，清华大学材料学院教授谷林、航空航天学院教授李晓雁，天津理工大学研究员匙文雄，武汉理工大学特聘研究员沈忠慧，中科院物理所副研究员张庆华，乌镇实验室副研究员江建勇等。

论文链接：

<https://www.nature.com/articles/s41565-023-01541-w>

<https://www.nature.com/articles/s41560-023-01416-3>

材料学院沈洋课题组在极性涡旋拓扑的诱导与调控领域取得新进展

电偶极子的组装方式与外场响应行为是电介质材料研究的核心问题。极性涡旋拓扑结构具有空间连续的极化旋转，是一类特殊的电偶极子组装形式。近年来，其凭借着新奇的物理特性与在电子器件方面的潜在应用而受到学术界的广泛关注与研究。然而，目前相关的外场调控研究主要局限于涡旋物态的产生或破坏，对其形态的连续调控较为少见。

近日，清华大学材料学院沈洋教授课题组在 P(VDF-TrFE) 基弛豫铁电聚合物中首次诱导出极性螺旋新物态。借助角分辨压电力显微镜，研究人员确认了极性拓扑“双螺旋”的极化特征，具有空间连续的 Néel 型极化旋转。研究团队进一步发现，极性螺旋可在较低的电场或力

场激励下发生非易失、准连续的旋转，分别可达 130° (120 MV m^{-1}) 与 780° (324 MPa)。结合微区表征技术、第一性原理计算与相场模拟，研究发现极性螺旋的形成与场致旋转源于聚合物螺旋链间的不对称库伦相互作用与弱介电各向异性。极性螺旋的场致旋转可进一步利用红外光读取，并具有很好的保持特性，因而该工作有望应用于神经形态系统、场控空间光调制器等领域。

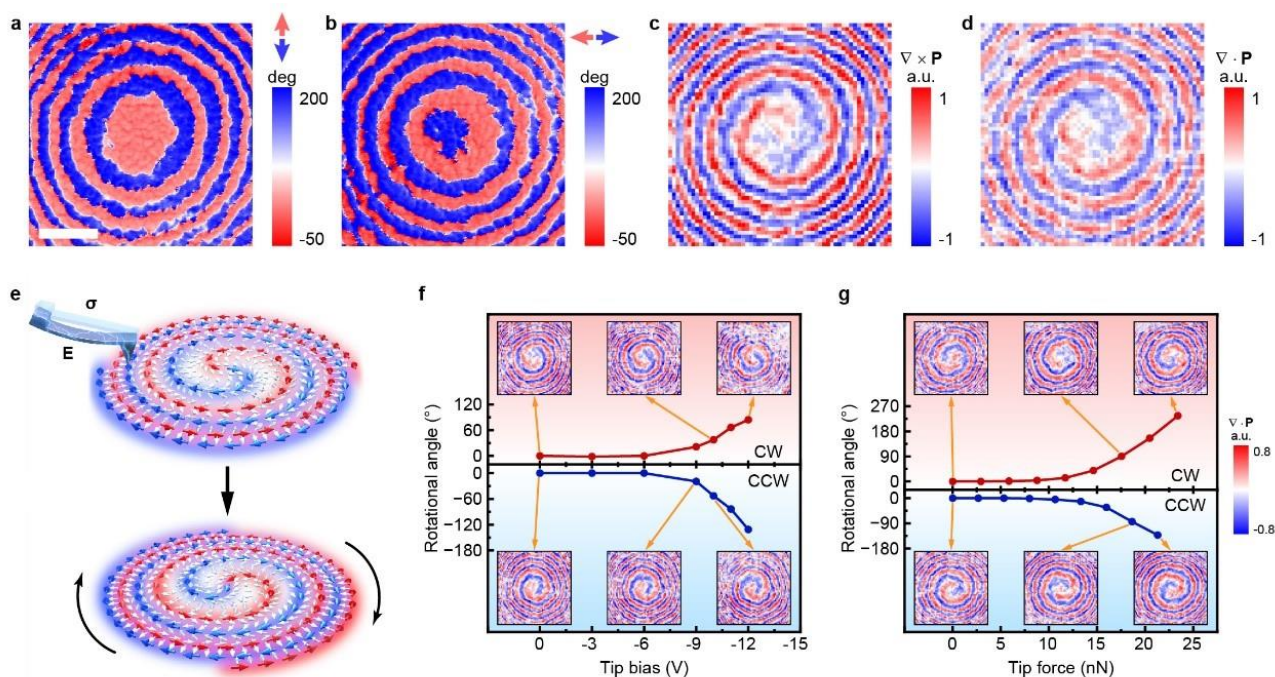


图 1. 弛豫铁电聚合物中涡旋拓扑的诱导与调控；(a, b) 极性螺旋在角分辨压电力显微镜下的成像；(c, d) 极性螺旋中极化散度与极化散度的分布；(e) 极性螺旋中诱发场致旋转的示意图；(f, g) 极性螺旋中的非易失准连续电致旋转与力致旋转

1月8日，该研究以“弛豫铁电聚合物中极性螺旋的电、力诱导旋转” (Electrically and mechanically driven rotation of polar spirals in a relaxor ferroelectric polymer) 为题，在线发表于《自然·通讯》(Nature Communications) 期刊。

清华大学材料学院博士后郭梦帆、2021级博士生徐而翔和北京理工大学教授黄厚兵为该论文的第一作者。沈洋、郭梦帆与英国剑桥大学教授尼尔·马撒 (Neil. D. Mathur) 为该论文的共同通讯作者。清华大学材料学院教授南策文，副教授马静、易迪，北京大学物理学院研究员高鹏，中国工程物理研究院研究生院副研究员徐贵，武汉理工大学材料科学与工程国际化示范学院特聘研究员沈忠慧为该研究提供了重要帮助。该研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目、国家重大科研仪器研制项目、清华大学自主科研计划、中国博士后科学基金的大力支持。

论文链接：

<https://www.nature.com/articles/s41467-023-44395-5>

材料学院符汪洋、万春磊合作基于石墨烯边缘构建量子电容传感器

近期，中美科研人员合作研制出了由高迁移率石墨烯制成的功能半导体器件，引起了全球研究人员的关注。与此同时，石墨烯、二硫化钼等二维材料以其出色的电学性能被广泛应用于生物化学传感的研究。到目前为止，大部分研究都集中在带电生物化学分子吸附在二维材料基面上对其电子性能的调制效应，而另一个重要的方面即二维材料边缘独特的传感应用仍鲜有研究。这很大程度上是由于在制造和表征方面尚存在较大难度。即便对其基面进行钝化，解耦表征边缘细微的响应仍然是一个挑战。

近日，清华大学材料学院符汪洋副教授和万春磊教授合作报道了一种简单高效制备高密度石墨烯边缘结构的技术。与传统石墨烯基面场效应晶体管不同，该陶瓷表面裸露石墨烯边缘表现出依赖于其电子态密度的量子电容和显著的边缘场增强效应。测试表明，通过感测石墨烯边缘电信息的细微变化，该量子电容效应传感器可实时监测氨基酸等生物化学分子的超低浓度吸附 (~10 ag/mL)。这为二维材料生物化学传感研究提供了新的思路。

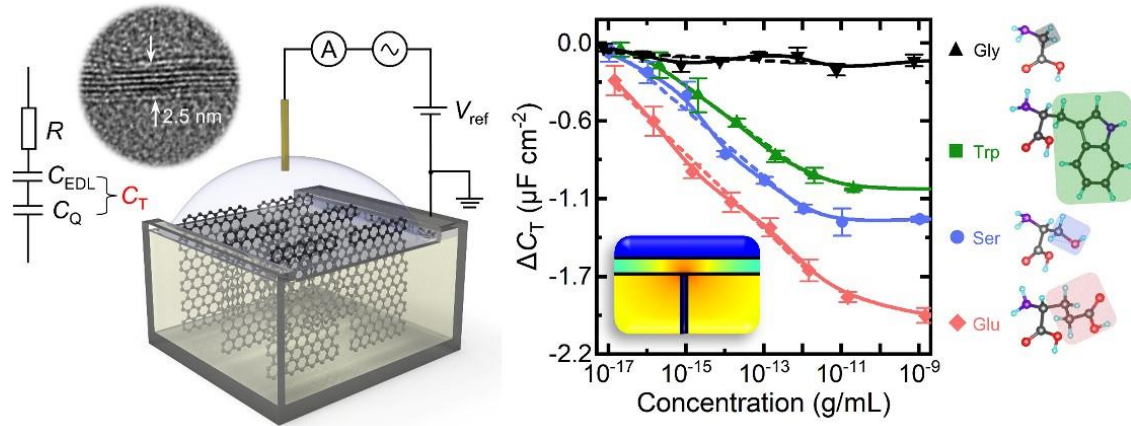


图 1. 基于石墨烯边缘构建量子电容效应生化传感器示意图

在该工作中，清华大学万春磊团队和符汪洋团队首先提出了一种高效、简单的高密度石墨烯边缘制备方法。在绝缘惰性的 SiO₂ 基体中构造平行排列的还原氧化石墨烯片层；通过垂直于排列方向切割，在表面形成高密度裸露石墨烯边缘结构。

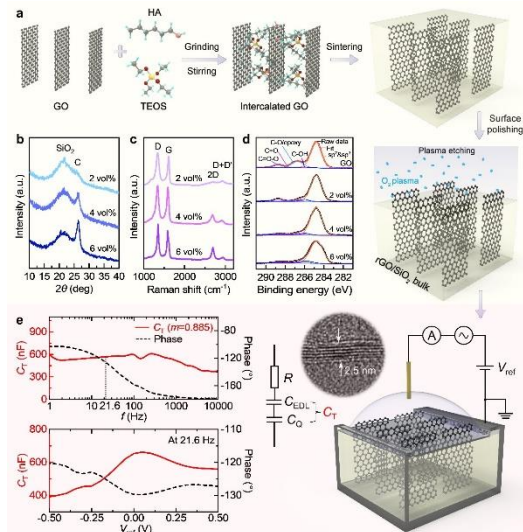


图 2. 传感器件的制备及表征。(a) rGO/SiO₂ 复合材料的制备过程示意图；(b-d) 复合材料的 XRD 图谱、拉曼光谱和 XPS 结果；(e) 富石墨烯边缘传感器的等效电路示意图和测量结果

不同于传统的电解质门控场效应晶体管传感器，利用两端法测量得到器件的界面电容。与石墨基面的“V”形双极转移特性曲线不同，石墨烯边缘展现出“Λ”形的电容-电压曲线，反映了费米能级附近的边缘局域电子态。同时，在石墨烯边缘能够观察到急剧的电压降，导致显著的局域电场增强现象。

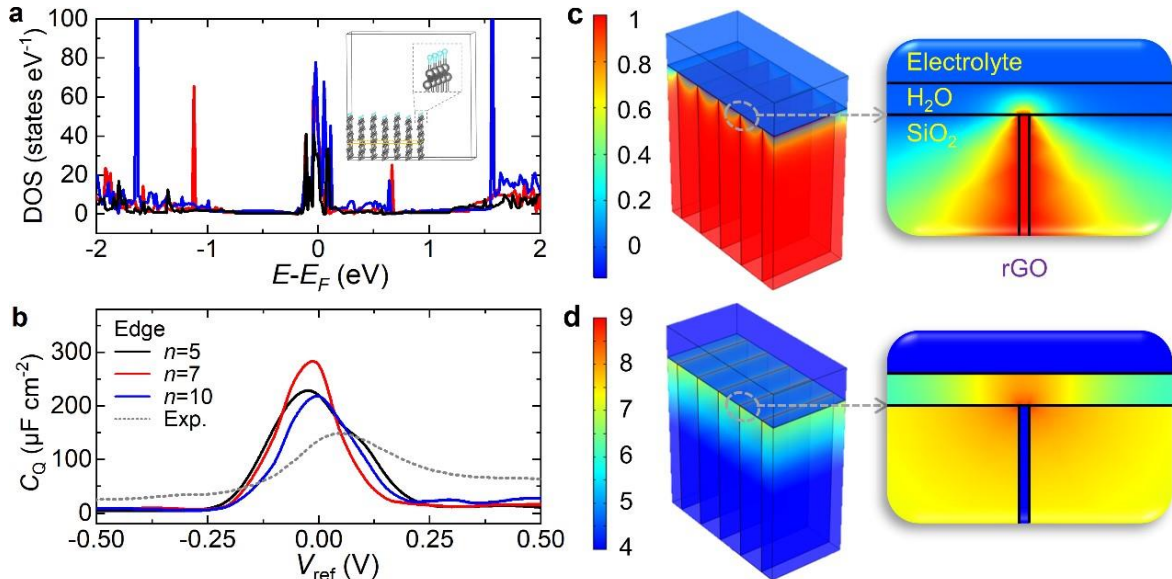


图 3. 基于石墨烯边缘模型的理论计算。(a) 具有不同层数的石墨烯边缘结构的电子态密度计算结果以及 (b) 电容-电压曲线的实验和理论计算结果比较；(c) 使用 COMSOL 多物理场模拟石墨烯边缘的局部电压分布和 (d) 局部电场分布

进一步测试发现，当氨基酸吸附于石墨烯边缘时，石墨烯边缘传感器对具有不同官能团的氨基酸具有不同的响应，其检测限低至~10 ag/mL，优于以往报道的基于石墨基面的高性能生化传感器（检测限~fg/mL）。同时，与基于剧烈氧化还原反应的电学生物传感器不同，基于量子电容的场效应传感机制，能够无损检测生物化学分子的吸附，避免电化学损伤以确保传感性能的可靠性和再现性。

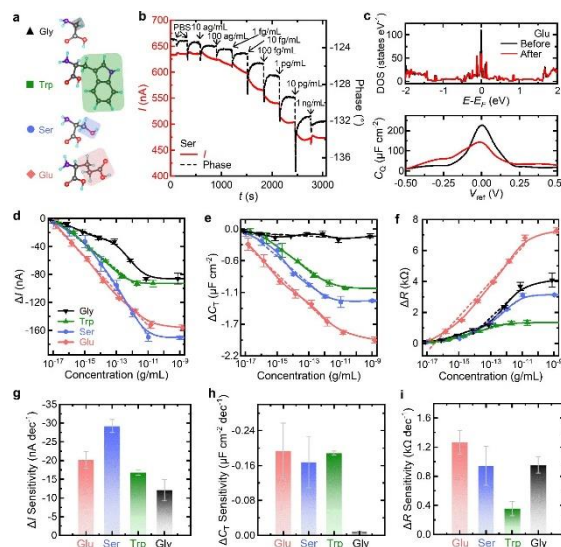


图4. 石墨烯边缘传感器对氨基酸的传感性能。(a) 氨基酸结构示意图；(b) 丝氨酸浓度变化下的电流-时间相应曲线；(c) 谷氨酸吸附前后石墨烯边缘电子态密度和电容-电压曲线的理论计算结果；(d-f) 器件随不同种类氨基酸浓度变化的电流、电容和电阻响应；(g-i) 器件对不同种类氨基酸的检测灵敏度和选择性

相关研究成果以“基于石墨烯边缘构建超灵敏量子电容效应传感器”(Ultrasensitive quantum capacitance detector at the edge of graphene)为题,于1月3日在线发表在材料领域知名期刊《今日材料》(*Materials Today*)上。

该论文的通讯作者为符汪洋和万春磊,论文的第一作者为清华大学材料学院2016级博士生黄语嘉(现佛山科学技术学院青年研究员)。清华大学材料学院教授朱宏伟等为论文工作作出了重要贡献。该研究得到国家自然科学基金、国家重点研发计划、北京市科技计划等项目的支持。

论文链接:

<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.12.011>

材料学院李千课题组合作发现极性斯格明子的巨大电场诱导二次谐波产生效应

光学二次谐波产生(SHG)是一种重要的非线性光学效应,自上世纪60年代发现以来被广泛应用在多种激光器与光电子器件中,同时作为表征分析手段在材料科学、生命科学等研究领域中也具有重要应用价值。近年来,随着电光调制器、全光开关、频率梳、量子光源等新兴集成光子学器件的发展,对研发具有高SHG调制性能的材料平台提出了要求和挑战。通常来说,传统铁电材料具有SHG效应,在外加电场作用下其内部可发生电畴翻转、晶格畸变等过程,因而可诱导SHG响应强度的变化。然而上述机制存在二阶非线性系数较低导致SHG强度低,调制深度低、调制速率慢,以及伴生的迟滞、疲劳问题等缺点,限制了传统铁电材料在SHG调制方面的应用。

近年来,在 $\text{PbTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ 等超晶格体系中发现的极性拓扑结构作为一种新型铁电材料进入了研究者的视野。极性斯格明子具有独特的纳米尺度极化构型以及拓扑保护性质,为其光电性能调控提供了全新机遇。在外加电场作用下,斯格明子中的离子极化位移产生集体相干的、短程而有规律的变化,改变晶格的宏观对称性,产生电场诱导二次谐波产生效应(EFISH)效应。这一效应不涉及畴壁形成与运动等过程,因此有望实现具有高调制深度、高调制速率、长循环寿命、宽温度区间的SHG调制器件。这一方面可以解决前述目前SHG调制器件的性能制约,拓展其应用前景;另一方面,将加深对极性拓扑结构的非线性光学性质及其调控机制的理解,有望开拓出全新的集成光子学器件研究方向。

针对上述关键问题,清华大学材料学院李千副教授课题组制备了具有高度有序化极性斯格明子的 $\text{PbTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ 超晶格薄膜,实现了对极性斯格明子体系中EFISH效应的验证。课题组

与国家纳米科学中心郑强研究员、浙江大学/浙江大学台州研究院洪子健研究员团队合作开展了电镜显微表征、相场理论模拟研究，深入阐明了极性斯格明子 EFISH 效应的微观机制 (图 1a)。研究中使用脉冲激光沉积生长出高质量的 PbTiO₃/SrTiO₃ 超晶格薄膜，并通过同步辐射 X 射线衍射倒易空间图 (图 1b) 和球差校正透射电镜 (图 1c-g) 验证其中存在有序化的极性斯格明子。在原位 EFISH 测试中 (图 2a-b)，随着外加电压的上升，SHG 强度随之上升，最高获得 664% V⁻¹ 的 EFISH 调谐率。进一步的实验和模拟结果揭示了极性斯格明子在不同方向外加电场作用下迥异的变化过程。当薄膜上电极施加正电压时，斯格明子收缩，从初始状态 (图 2c, 中) 向面外畴转变 (图 2c, 右)，从而导致原有伪中心对称性被破坏 (图 2d)，产生较强的 SHG 响应；当薄膜上电极施加负电压时，斯格明子膨胀，相互接触后合并变为迷宫状 (图 2c, 左)，向面外畴转变的路径与正电压时不同，因而产生了不同的 SHG 响应。对比多种不同的 EFISH 材料体系或器件的调谐率和二阶非线性系数 (图 2e)，其中极性斯格明子的调谐率为目前已报道的各类材料中的最高值。本工作验证了一种具有巨大 EFISH 效应的极性斯格明子体系，进一步厘清了其晶体结构、极化构型和 SHG 响应的关联，对新型非线性集成光子学材料平台的研发进程作出了重要推动。

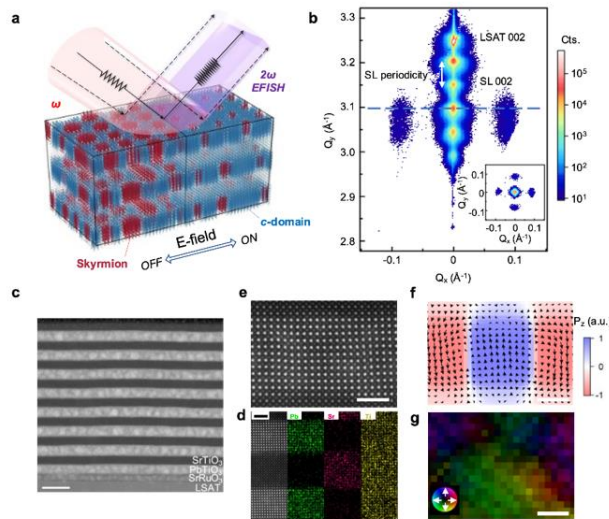


图 1. 具有有序化极性斯格明子的 PbTiO₃/SrTiO₃ 超晶格的结构特征

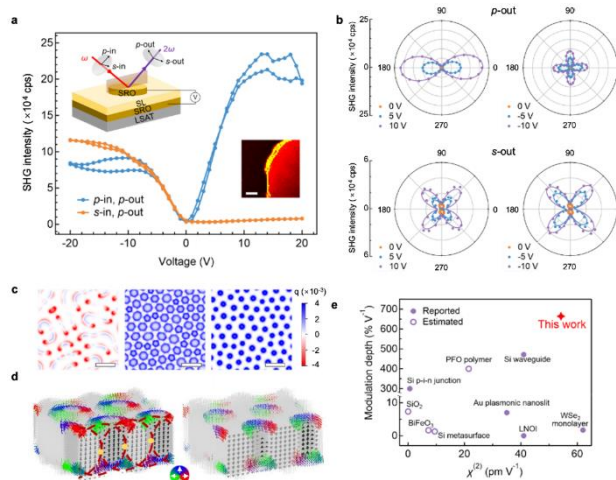


图 2. 极性斯格明子 EFISH 效应的实验发现和理论解释

相关成果以“极性斯格明子的巨大电场诱导二次谐波产生效应”(Giant electric field-induced second harmonic generation in polar skyrmions) 为题近期在线发表于《自然·通讯》(*Nature Communications*)。其中超晶格制备与非线性光学器件设计方法已提交PCT国际发明专利申请。

材料学院2020级博士生王思旭、2021级博士生李为为论文的共同第一作者,李千、郑强、洪子健为论文的通讯作者,论文的其他重要合作者包括清华大学材料学院南策文院士、李敬锋教授,上海同步辐射光源李晓龙研究员,美国威斯康星大学麦迪逊分校保罗·埃文斯(Paul G.Evans)教授,浙江大学吴勇军教授等。研究得到了国家自然科学基金基础科学中心项目、原创探索计划项目、科技部重点研发计划、北京市自然科学基金等的资助。

论文链接:

<https://doi.org/10.1038/s41467-024-45755-5>

材料学院于荣团队突破显微成像信息极限

近日,清华大学材料学院于荣团队提出并实现了局域轨道叠层成像方法,将显微成像的信息极限推进到了14 pm (0.14 Å)。

清晰的原子世界不仅在物理、化学、生命等科学上令人好奇,同时也是材料、芯片、能源等高新技术发展的基础。以高能电子作为光源的电子显微镜是高分辨成像的主要平台。本世纪初,像差校正电镜将分辨率带到了亚埃尺度。近年来,作为扫描衍射成像的叠层成像方法又实现了深亚埃分辨。叠层成像(Ptychography)是基于4D-STEM(four-dimensional scanning transmission electron microscopy)数据集的相干衍射成像技术。在配备单电子敏感的像素化探测器的电子显微镜上,通过叠层成像技术可实现深亚埃($< 0.5 \text{ \AA}$)分辨成像,成为物质微观结构分析的前沿。然而,传统的叠层成像方法用二维像素矩阵表示电子束和物函数,并不适合离散的原子世界,限制了分辨率的进一步提高。

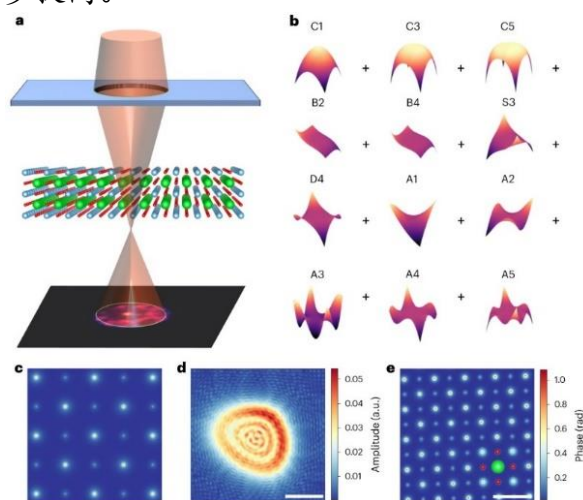


图1. 局域轨道叠层成像方法示意图。(a) 汇聚电子束在每个扫描位置与样品相互作用产生衍射图;(b) 最低的12阶像差系数的实部;(c) SrTiO₃在[001]带轴的模拟相位;(d) 用像差函数重构的电子束振幅。(e) 用局域轨道叠层重构的样品相位。

于荣团队提出了一种新的叠层成像方法，用空间局域的一类原子轨道函数来描述物体，用像差函数来描述电子束，从而充分利用原子世界的离散特征，显著提高了显微成像的分辨率和精度。局域轨道叠层成像方法不仅实现了破纪录的显微成像分辨率，达到 14 pm (0.14 Å)，还具有更高的电子剂量效率和信噪比，在低剂量成像条件下也能实现深亚埃分辨，将在金属、陶瓷、芯片和敏感物质的原子分辨率成像中得到广泛应用。

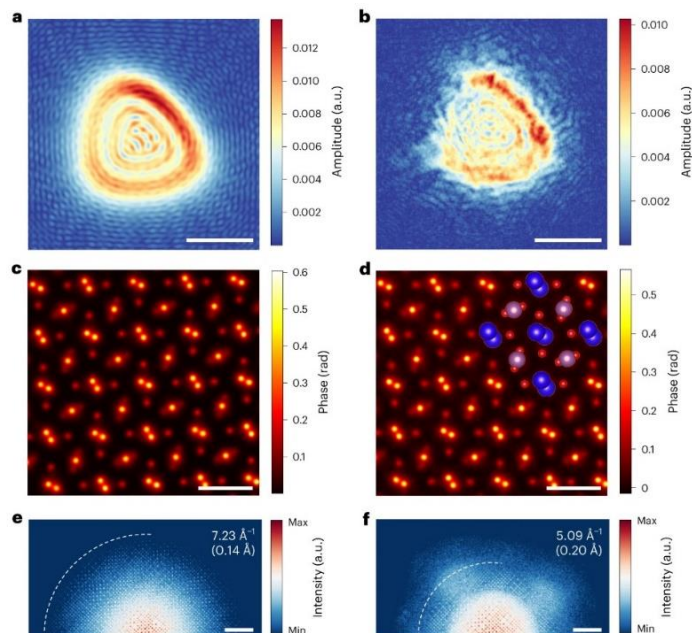


图 2. 通过局域轨道叠层成像方法实现 14 pm 分辨率。左栏是局域轨道叠层重构的电子束振幅、样品相位及其衍射图，右栏对应传统像素化叠层的重构结果。

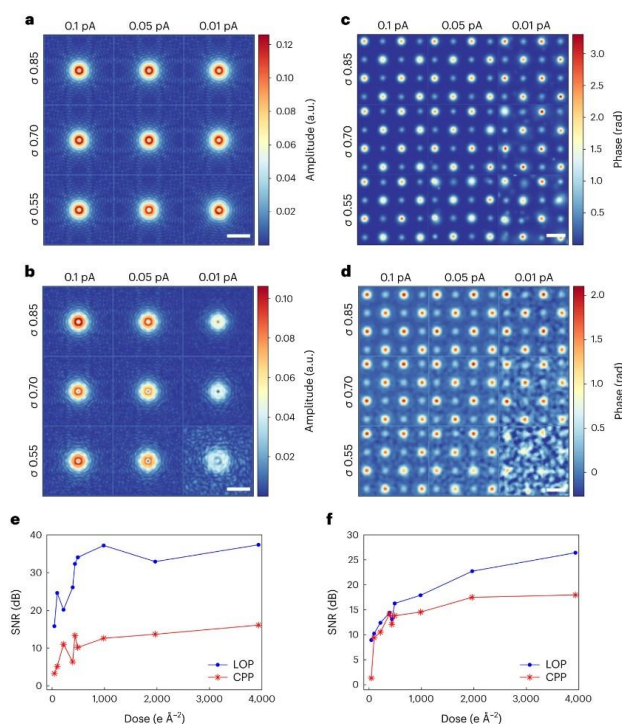


图 3. 传统像素化叠层 (CPP) 与局域轨道叠层 (LOP) 的剂量效率。(a) LOP 的电子束振幅，(b) CPP 的电子束振幅，(c) LOP 的样品相位，(d) CPP 的样品相位，(e) 电子束振幅的信噪比，(f) 样品相位的信噪比。

此外，研究还揭示了不同原子对显微成像信息极限的影响。由于物体是由离散的原子组成的，局域轨道叠层的重构结果可以方便地划分到不同原子。由于傅里叶变换是一个线性变换，总衍射图也可以划分到各个元素的独立衍射图。结果表明，信息极限与元素种类有关。金属原子 (Dy 和 Sc) 表现出比氧原子更高的信息极限。

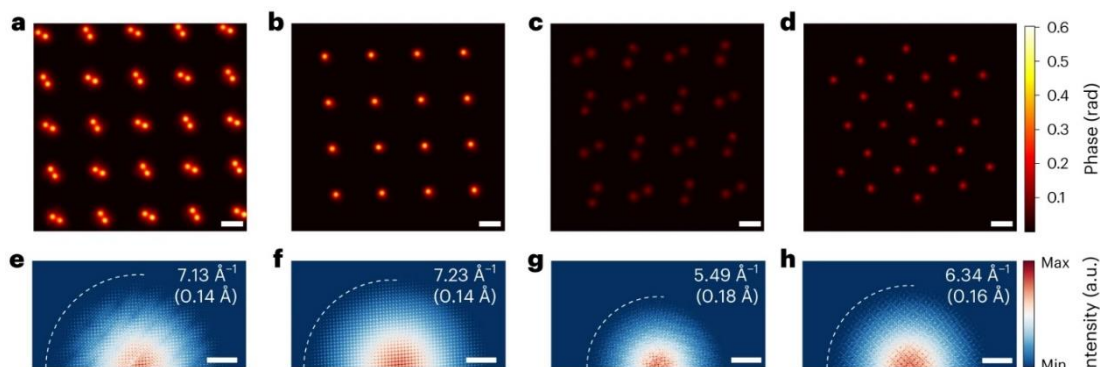


图 4. 固体中不同元素的相位图及对应的衍射图。(a) Dy, (b) Sc, (c) O1, (d) O2 的相位图及对应的衍射图 (e-f)。

这种差异可以归结为三个因素。第一，重原子将入射电子散射到更高的空间频率。这些较高的空间频率有助于在重构过程中提取更多的结构信息，从而得到更高的信息限制。第二，DyScO₃ 中 Dy、Sc、O1 和 O2 的德拜-瓦勒因子分别为 0.58 \AA^2 、 0.60 \AA^2 、 0.79 \AA^2 和 0.92 \AA^2 ，表明氧的热漫散射大于 Dy 和 Sc，这使得 Dy 和 Sc 原子的热展宽较小，信息极限更高。第三，O1 原子柱在电子束传播方向上的原子密度是 O2 原子柱的一半，导致 O1 原子柱的散射更弱，因此信息极限更低。

相关研究成果以“用于超高分辨成像的局域轨道叠层成像”(Local-orbital ptychography for ultrahigh-resolution imaging) 为题，于 2024 年 1 月 29 日在线发表于《自然纳米技术》(Nature Nanotechnology)。清华大学材料学院 2021 级直博生杨文峰和 2018 级直博生沙浩治为论文共同第一作者，2019 级直博生崔吉哲和毛梁泽为合作作者，于荣教授为通讯作者。该论文得到国家自然科学基金基础科学中心项目的支持，也得到超分辨科技的技术支持。

论文链接：

<https://www.nature.com/articles/s41565-023-01595-w>

材料学院于荣团队实现晶格分辨的反铁磁成像

对固体中的磁场分布进行成像，即磁成像，是研究磁性与超导现象的重要手段，广泛应用于磁性材料、自旋电子学、超导物理与技术等领域。晶格分辨是磁成像的分水岭。以高能电子作为光源的电子显微镜是高分辨成像的主要平台。然而，由于磁场对高能电子波函数的相位的影响很小，显微图像中的磁信号非常微弱，导致磁成像的空间分辨率长期停留在纳米尺度，难以进入晶格尺度。反铁磁材料中的磁场以晶胞为周期振荡，只有达到了晶格分辨才能对其磁场分布进行成像，因此一直是磁成像的难题。

近期，清华大学材料学院于荣教授团队通过此前发展的自适应传播因子叠层成像（APP）方法，精确测量了电子波函数的相位，实现了晶格分辨的反铁磁成像。

研究团队首先以典型的反铁磁晶体 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 为例，分析了静电势和磁矢势对高能电子的相位贡献。如图 1 所示，磁相位和静电相位在实空间和倒空间中的分布均不同，实空间中静电相位峰值出现在 Fe 原子柱上，而磁相位的峰值出现在 Fe 原子层之间；倒空间中，静电相位和磁相位的周期不同，其衍射的分布也不同。这种可分离的相位分布是高分辨磁成像的基础。然而，由于磁相位仅约静电相位的 1%，从总相位中提取磁相位需要很高的相位精度。叠层成像方法在引入自适应传播因子后，进一步提高了相位测量的精度，使得高分辨磁相位提取成为可能。

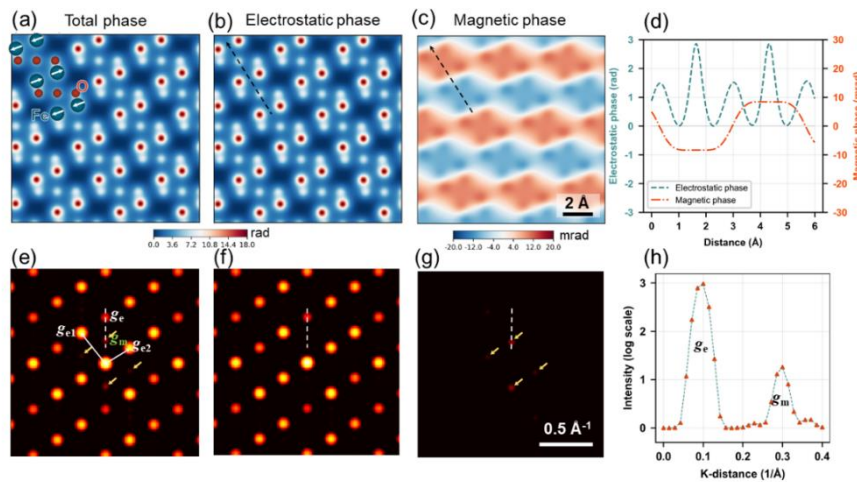


图 1. 静电势和磁矢势对高能电子波函数的相位贡献。其中 (a) - (d) 为实空间中相位分布，(e) - (h) 为相位分布的傅里叶变换

高分辨反铁磁成像的另一阻碍来自于透射电镜薄膜样品不可避免的表面损伤层。图 2 给出了表面损伤层和晶体内部的相位分布。由于静电相位远大于磁相位，即使很薄的表面损伤层，其静电相位也会比晶体内部的本征磁相位大一到两个数量级。因此，只有将表面损伤层的静电相位剥离，才能测量晶体内部很弱的本征磁相位。

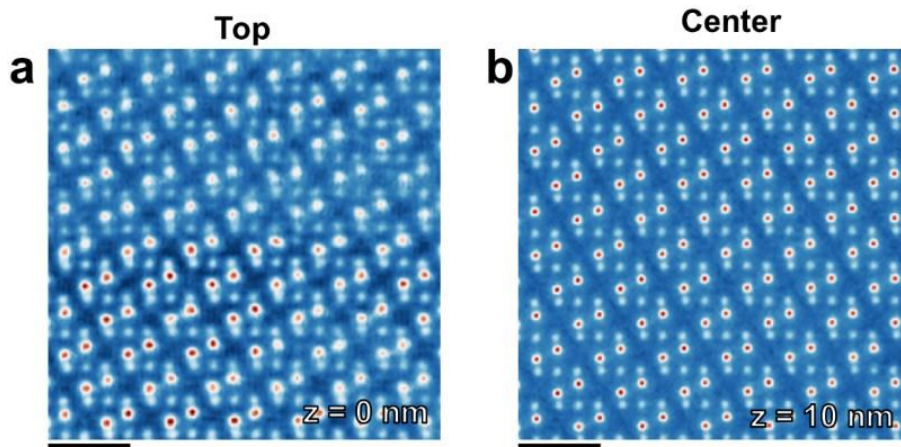


图 2. 实验样品的表面不可避免存在空位和台阶等表面缺陷。(a) 和 (b) 分别为样品表面和内部的相位像

图3是通过APP方法提取反铁磁相位的流程。首先是通过APP方法来获取高能电子波函数的相位，而后去除表面层，仅用完整的中间层来分析本征磁相位。该方法突破了传统磁成像技术只有纳米尺度空间分辨率的限制，实现了晶格分辨的磁成像，将在磁性材料与器件、超导物理等领域产生广泛应用。

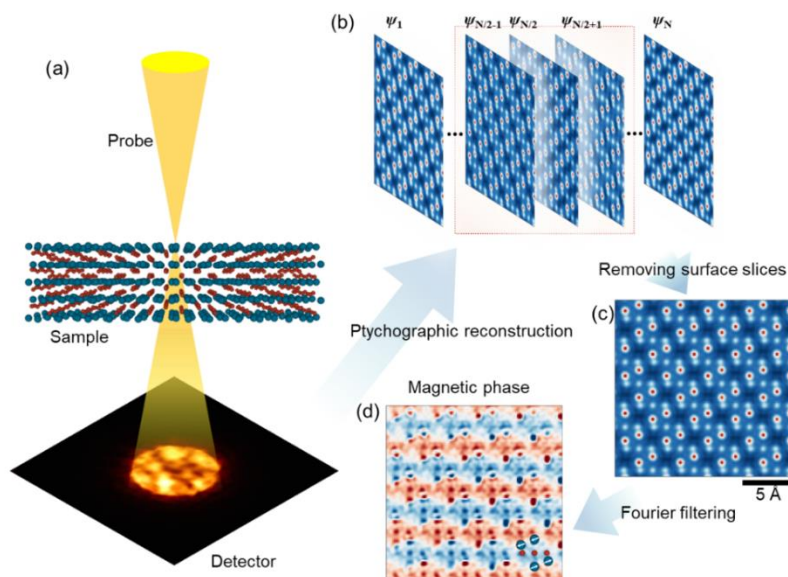


图3. 从叠层成像的总相位中提取磁相位的流程图。(a) 4D数据采集示意图；(b) 叠层重构得到的不同深度片层的相位像；(c) 被选取的中间片层的平均相位；(d) 使用傅里叶滤波法实现的晶格分辨的反铁磁成像

相关研究成果以“反铁磁成像的叠层相位恢复方法”(Antiferromagnetic imaging via ptychographic phase retrieval)为题在线发表于《科学通报》(*Science Bulletin*)。

清华大学材料学院2019级博士生崔吉哲和2018级博士生沙浩治为论文共同第一作者，2021级博士生杨文峰为合作作者，于荣为通讯作者。该研究得到国家自然科学基金基础科学中心项目的支持。

论文链接：

<https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.12.044>

材料学院李敬锋、朱静课题组在热电材料领域取得新进展

热电材料能够实现热能与电能之间的直接相互转换，在温差发电和固态制冷领域具有广阔的应用前景，研发低成本高性能的高效能热电材料成为推广其应用的关键。与碲化铋和碲化铅等经典热电材料体系相比，硒化亚铜(Cu_2Se)因其资源丰度高、环境兼容性好且具有高温高热电性能而备受关注。但是，硒化亚铜属于超离子导体，铜离子在电场作用下易发生定向迁移，造成材料劣化和器件失效。因此，如何抑制铜离子迁移，研发出高稳定性的硒化亚铜基高效热电材料是热电领域长期关注的难题之一。

为了突破这一难题，清华大学材料学院李敬锋教授课题组与朱静院士课题组开展合作，先后在 Cu_2Se 的晶体结构表征及其热电性能提升机理研究等方面取得一系列研究进展。在前期工作的基础上，研究团队提出利用阴阳离子共掺杂，通过增强元素电负性差异及空间障碍作用，从而提高铜离子激活能以抑制其长程迁移的新思路（图 1）。发现在 Cu_2Se 中掺入少量氟化物（ AgSbF_6 ）既能显著改善材料稳定性，又能显著提高热电性能，热电优值（ZT 值）突破该材料体系的最高值，达到 3.0（1050K），其热电模块的实测转换效率达到 13.4%，并经 120 次循环仍没有出现明显的性能劣化（图 2）。团队利用先进电子显微学方法和 X 射线光电子能谱确认了阴（ F^- ）、阳（ Ag^+ ）离子的共掺杂（图 3），占据 Cu 位的大尺寸 Ag 离子结合增强的 Cu-F 键能可以显著抑制 Cu 离子长程迁移及电离，从而有效提升材料的稳定性。

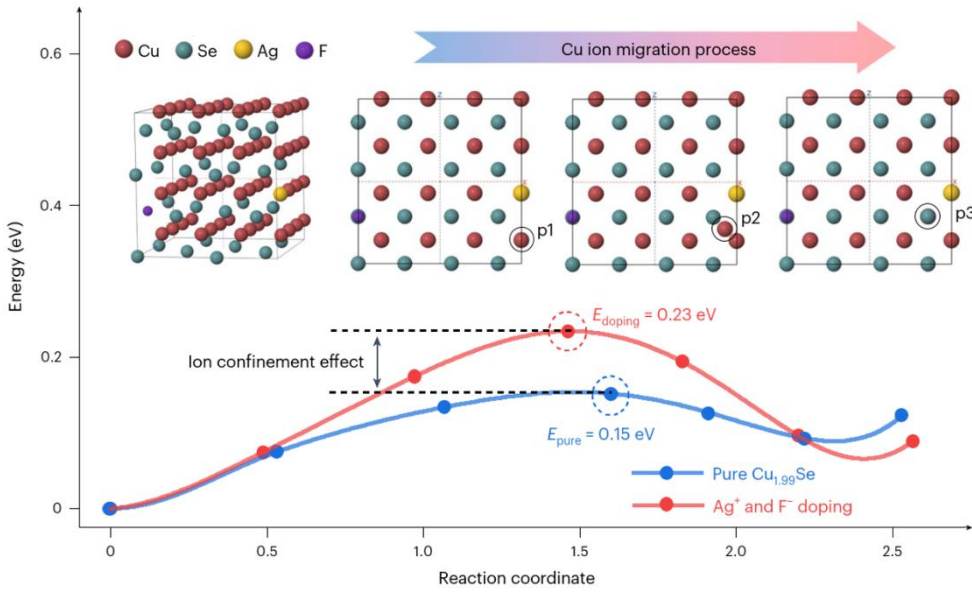


图 1. Cu_2Se 中掺杂 AgSbF_6 引入的 Cu 离子限域效应

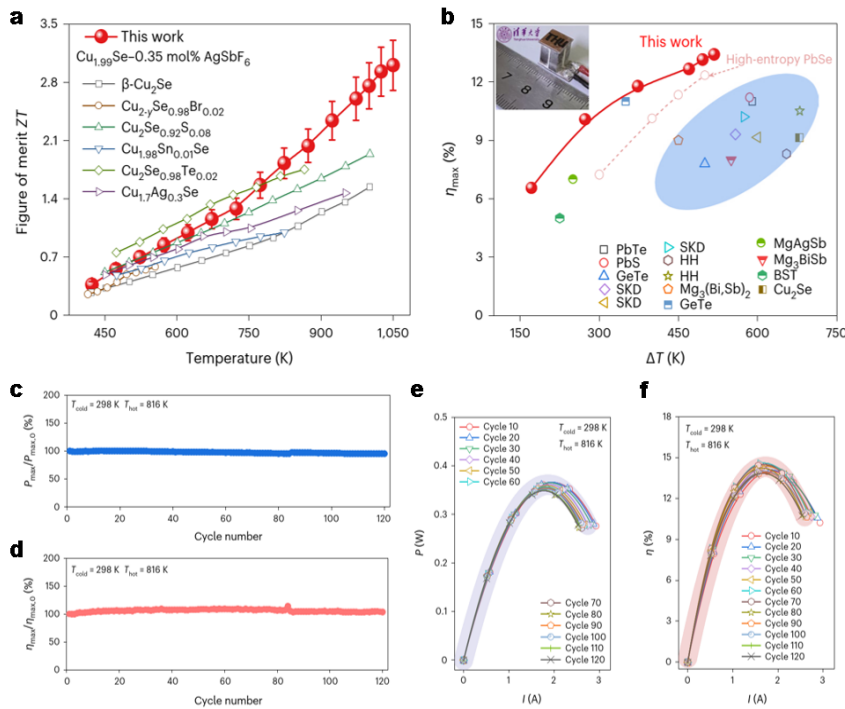


图 2. AgSbF_6 掺杂 $\text{Cu}_{1.99}\text{Se}$ 的热电性能及器件稳定性

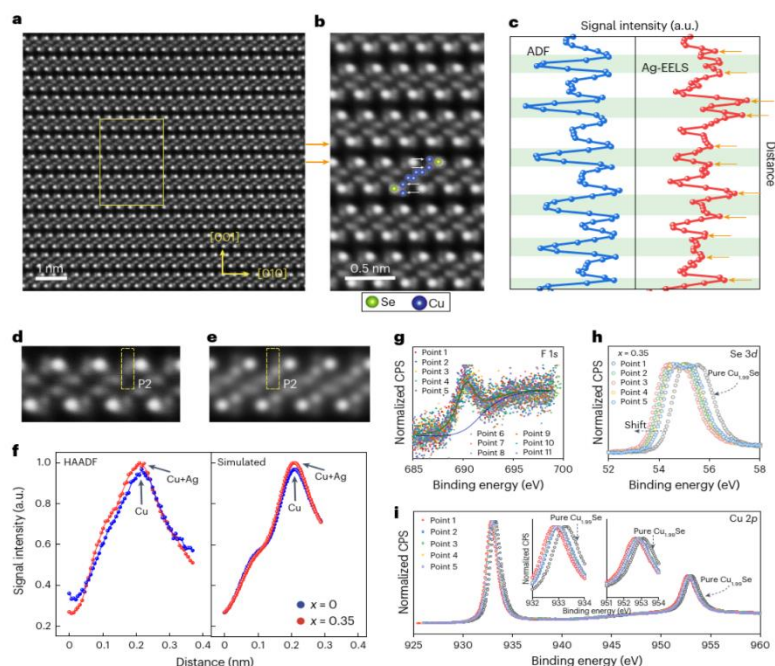


图 3. 原子尺度结构表征与掺杂元素占位分析

相关研究成果以“高效稳定的热电硒化亚铜”（Highly stabilized and efficient thermoelectric copper selenide）为题，近日发表在国际著名期刊《自然·材料》（*Nature Materials*）上。

清华大学 2018 级博士生胡海华和鞠艺伟为论文的共同第一作者，余锦程博士后、朱静院士和李敬锋教授为论文共同通讯作者。重要合作者有北京科技大学教授张波萍，清华大学材料学院副教授李千，广西见炬科技有限公司蔡博文博士等。印度贾瓦哈拉尔尼赫鲁先进科学研究中心卡尼什卡·比斯瓦斯（Kanishka Biswas）院士对此在同期《自然·材料》发表题为“为实现更好的热电性能限制离子移动”（Mobile ion confinement for better thermoelectrics）的评述，指出通过离子限域效应来抑制局域移动离子的定向偏析，可以实现优异的热电性能和服役稳定性。

研究得到国家自然科学基金委基础科学中心项目以及国家重点研发计划等的支持。

论文链接：

<https://doi.org/10.1038/s41563-024-01815-1>

【学院动态】

材料学院召开办公室年度工作交流会

1月23日上午，材料学院办公室年度工作交流会在逸夫技术科学科学楼会议室召开。学院党政领导班子成员、各部门分管领导及院办公室工作人员等20余人参加会议。会议由副院长巩前明主持。

会议分别从教学、科研、党务及行政等几个方面展开。院办各位老师针对自身岗位工作进行了年终总结和分享交流，系统梳理了2023年度所负责各项工作的开展情况，结合岗位说明书的具体工作要求进行自查自纠，全面深入地进行了工作内容的分析以及对未来工作的展望。其中，来自教学和行政的3位老师还结合岗位工作进行了聘期总结汇报。



与会成员就相关工作内容展开交流。阐述了对岗位工作内容的理解以及如何更好地开展相关工作，主动作为，服务师生，服务育人，建设院办服务示范窗口。

院党委副书记张弛代表院党委感谢一年以来大家的辛苦付出。2023年度学院经历了校党委专项巡视、审计、主题教育、行政换届、建院十周年暨建系三十五周年庆祝活动等一系列重大事项，院办各位老师兢兢业业，配合学院顺利完成了各项工作，感谢各位老师的辛勤工作，希望大家在未来的工作中继续践行“宁可踩脚，不要漏球”工作原则，继续齐心协力服务好全院师生。此外，要进一步加强内部的风气建设，各位老师要借助于学校和学院提供的各个学习平台积极提升自我，加强彼此间的合作交流，夯实院办团结作风建设。

实验室管理处调研材料学院

1月23日下午，实验室管理处处长王玉军、副处长艾德生带队调研了材料学院的实验室安全工作。王老师一行8人首先参观了学院逸夫技科楼中控室，了解了学院的实验室安全物防、技防工作的部署情况，随后在学院会议室进行了座谈交流。材料学院党委书记杨志刚、院长林元华带领院党政班子成员及相关安全工作人员参加了会议，会议由杨志刚老师主持。



杨志刚老师首先对实验室管理处的调研表示热烈欢迎并介绍了材料学院实验室安全的总体概况。王玉军老师向大家介绍了实验室管理处此次调研的目的，希望借此机会深入了解材料学院在实验室安全方面已开展的工作及对实验室管理处工作的建议。

材料学院副院长巩前明向与会人员详细汇报了材料学院近年在实验室安全方面所开展的工作。重点介绍了学院“无安全、不科研”的文化理念、在物防与技防结合、从“人防”到“心防”所开展的一些特色工作和成效。简要汇报了学院未来在实验室安全方面的工作规划，希望在实验室管理处的指导和帮助下，进一步提升学院的实验室安全管理水平和师生的科研学习环境。

与会成员就相关内容展开了深入交流。实验室管理处气体安全专员李款、危化品管理系统高级主管刘鹏、安全文化建设高级主管周玉杰等老师分别介绍了相关工作的要求、措施和建议。林元华老师等与会人员对实验室的安全管理、未来建设蓝图及可行性进行了充分热烈的讨论。王玉军老师最后强调了安全、健康的实验环境既是科研工作的保障，也是人才培养过程中“生命至上”价值观塑造的重要平台，要充分运用现代科技手段提升实验室安全管理水平。

【党建工作】

材料学院召开2023年度学生辅导员工作述职交流会

近日，为加强学生工作队伍建设，全面准确地掌握辅导员和德育助理的工作情况，增强学生辅导员的凝聚力和组织管理能力，推动学生工作顺利有序开展，材料学院举行学生辅导员工作述职交流会。院党委副书记王炜鹏、研究生工作组组长李千、学生工作组组长马静、学生事务工作教师黄婧、学生部思教办辅导员梁文瑄，本科生辅导员、研究生德育工作助理共30余人参与本次述职大会。会议由研会主席牛奕茗主持。



参加述职评议的辅导员和德育助理围绕思想政治教育、党团班一体化建设、心理健康、职业规划与就业指导、学生日常管理工作和各自所负责的专项工作进行总结，阐述过去一年的工作思路、工作经验及工作特色，就工作中难点、亮点、创新点的相互交流、学习共鉴。

王炜鹏对本学年所有辅导员和德育助理的工作给予了充分肯定，并对同学们一年的辛苦付出表示感谢。希望两组持续加强沟通，紧密协作，以更坚定的站位、更饱满的热情、更务实的态度投入到工作中，不断创新工作方法，共建优秀集体。坚定信念，秉持热忱，共同书写学生工作的崭新篇章。

材料学院党委理论中心组集中学习研讨全校教职工大会暨全校党员集中培训精神

3月25日下午，材料学院党委理论中心组召开集中学习会，重温全校教职工大会暨全校党员集中培训精神，紧密结合《清华大学全面贯彻落实党的二十大精神行动方案》展开专题研讨。院党委书记杨志刚、院长林元华作重点发言。会议由杨志刚主持。

杨志刚首先带领大家一同重温了邱勇书记和李路明校长在全校教职工大会暨全校党员集中培训会上作的报告，并重点就“人工智能技术”与“新质生产力”展开分享。首先，他结合各人工智能平台的使用体验与典型案例阐释了人工智能技术对教育理念和教育生态重塑的影响，引导大家主动思考应对人工智能飞速发展的策略，积极采取行动应对变革，将人工智能深度融合教育教学，并不断探索人工智能赋能教学试点课程。随后，他带领大家重温了“新质生产力”提出的背景以及演变过程，要求与会成员深刻认识到新质生产力是靠科技创新发挥主导作用、摆脱传统增长路径、符合高质量发展要求的生产力跃迁新形态，是数字时代更具有融合性、更体现新内涵的生产力组合；要持续不断培育新材料、先进制造等战略性新兴产业，助力产业转型发展。

林元华重点分享了《清华大学全面贯彻落实党的二十大精神行动方案》中关于加大青年人才支持和培养力度专项行动的思考。他提到，青年人才是国家战略人才力量的源头活水，今年的政府工作报告也指出，要加大对青年科技人才支持力度，加快建立以创新价值、能力、贡献为导向的人才评价体系，这是一个非常关键的信息。本次学校专项巡视中指出了我们学院在标志性成果产出方面的进步空间，我们要紧密结合学校、学院的相关政策文件精神，提前布局青年人才培养，擘画发展蓝图，谋定而后动，笃行以致远，努力实现青年人才培养的专项突破；要运用好学科建设费等专项经费，把钱花在刀刃上，有所为有所不为，注重青年人才的高质量发展，切实以培养质量为核心，建设一流的青年人才队伍。

学院理论中心组全体成员参加学习并结合工作实际就相关学习内容开展交流研讨。

【教学工作】

材料学院举办工程硕博士专项招生与培养宣讲会

1月17日上午，材料学院在逸夫科学技术楼A205会议室举行工程硕博士专项招生与培养宣讲会。清华大学国家卓越工程师学院副院长王任模、李鹏辉，创新领军工程博士招生推广主管任娜出席会议，材料学院党委书记杨志刚，副院长巩前明、吕瑞涛、陈浩，材料与化工类别专家组组长李正操，部分教师等30余人参加会议。会议由陈浩主持。



王任模首先介绍了国家卓越工程师学院（以下简称工程师学院）的成立背景，表示清华工程师学院聚焦国家战略布局和急需领域，随后详细阐述了工程硕博专项的定位、工程硕博招生、导师资格认定等相关内容。李鹏辉系统分享了工程硕博的培养模式，并就工程硕博的论文选题、学位论文写作规范、创新成果要求等问题与大家展开讨论。他希望未来院系能和企业展开更深入的协同合作，为学生提供全方位的支持。李正操对工程博士的论文审议情况做了介绍，分析了工程博士与工学博士学位审议的不同。

交流环节，材料学院教师王琛、姚可夫等就工程硕博的招生与培养、导师资格认定等问题与工程师学院的老师们进行了讨论。杨志刚在总结发言中表示材料学院将积极配合学院的工程硕博专项改革，希望能进一步加强与工程师学院的协同交流，实现资源共享，双方在互通有无中合作共赢，同心协力将工程硕博培养好，为服务国家重大战略需求作贡献。

材料学院召开2024年第一次教学委员会

1月24日，材料学院教学委员会召开2024年第一次全体会议，专题研讨教学质量和评估工作。会议邀请了清华大学教务处教学质量评估中心（下称教评中心）王红、杨蕾、陈海蓉参会，材料学院党委书记杨志刚、副院长吕瑞涛、王轲、陈浩及学院20余名教师参加会议。材料学院教学委员会主任李正操主持会议。



杨志刚在致辞中欢迎和感谢教评中心三位老师莅临材料学院开展交流。陈浩通报了学校对材料学院教育教学工作的巡视情况，并介绍了学院的相关整改措施和取得的初步成效。

教评中心主任王红表示，教评是发展性评价，应该重点关注教师的教学生涯和课程质量的发展而不仅是一个简单的结果。杨蕾详细介绍了教学质量评价工作的重点内容，包括整体情况、课堂教学质量评估、期末学生评价以及2023年学校在课堂评价改革方面的做法和试点情况。陈海蓉对教学档案袋相关工作作了详细说明，包括教学档案袋起源、工作流程、核心要素、评价标准以及具体作用等内容。

在交流提问环节，与会教学委员会委员分享了教育教学工作的经验和体会，教评中心老师也就相关的疑问进行了详细解答。

材料学院与国家卓越工程师学院开展学生工作研讨

近日，清华大学材料学院和国家卓越工程师学院围绕工程硕博士培养改革专项、创新领军工程博士项目以及全国重点实验室研究生项目学生工作展开研讨。材料学院党委副书记王炜鹏、

党委研究生工作组组长李千、就业主管黄婧、新型陶瓷材料国家重点实验室教师及学生助理，工程师学院副院长钱婷、创新卓青工程师中心教师、学生工作办公室教师及学生助理参加本次座谈会。本次会议旨在深入探讨两学院的特色工作与人才培养策略，进一步提升专项研究生的培养质量，以期培养更多具有卓越实践能力和创新精神的领军人才。



在会议上，大家集体学习了党和国家关于专项学生培养的相关文件。深刻领会习近平总书记关于教育强国、“三个第一”更好结合以及卓越工程人才培养等方面的重要论述。钱婷指出，工程师学院当前的重点工作在于积极融入国家发展战略，对外全方位践行新型举国体制，对内则充分利用学科交叉融合的优势，推动卓越工程师教育的创新发展。学生办主任安云龙介绍了工程师学院的建设情况与运行机制，并全面阐述了学院集体建设工作的开展情况、思政工作机制以及当前学生管理所面临的挑战。

王炜鹏对各位工程师学院的老师表示欢迎和感谢，并针对如何构建校企联合卓越工程人才培养模式以及深化两院合作的问题，提出了建设性建议。他表示，希望后续以专项同学为纽带，加强工程师学院学生集体与材料学院学生集体之间的结对共建，促进两院同学间的深入交流和互动。研工组组长李千介绍了材料学院研究生管理和思政工作的特色做法。材料学院的整体发展方向为面向未来前沿科学“顶天”，面向国家重大需求“立地”。材料学院研工组始终秉持“又红又专”的优良传统，努力为学生的全面发展提供更为优质的教育环境。他表示，材料学院希望与工程师学院共同探索资源共享的合作模式，充分发挥各自的资源优势，为学生提供更广阔的发展空间和更丰富的实践机会。

双方还探讨了专项学生党建、集体建设、奖助和创新领军工程博士及专项非全日制学生管理等方面的问题。表达了对持续探索和优化学生工作模式的热切期望，并致力于充分整合资源，形成强大的合力，以进一步加强院系之间的交流合作以及更好地培养新时代红色工程师。

王炜鹏在总结发言中再次代表学院向工程师学院的各位老师表达了由衷的感谢。他表示，工程师学院的各位老师不仅在学生的成长道路上提供了宝贵的指导和帮助，还在材料学院工作的推进中给予了极大的支持。期望以本次座谈为契机，以各层面的交流为抓手，进一步深化与工程师学院的合作，不断优化学生培养模式，提升教育质量，共同为学生的成长和发展创造更多的机会和平台。

报：两办信息组

送：材料学院院务会成员

发：材料学院全体教职工

编辑：赵壮

签发：王炜鹏

电话：62783921

Email: zhaozhuang@tsinghua.edu.cn