

先进制造与新材料动态

ADVANCED MANUFACTURING AND MATERIALS NEWSLETTER

监测快报

2025 第1期
(总第455期)

本期要目

- 美海军发布先进制造战略 2024
- 美量子计划 2025 财年预算补充报告涉及多项材料相关活动
- 美 DOE 参与半导体制造所和微电子研究中心建设
- 英日两国联合资助 AI、生物、半导体等研究
- 美 DARPA 投资 300 万美元开发高性能芯片材料
- 具有非易失性存储功能的室温交变磁体

中国科学院武汉文献情报中心

目 录

专 题

美海军发布先进制造战略 2024 1

战略规划

美量子计划 2025 财年预算补充报告涉及多项材料相关活动 ... 4

美 DOE 拟参与半导体制造所建设..... 5

美 DOE 资助微电子科研中心建设..... 6

项目资助

英日两国联合资助 AI、生物、半导体等研究 8

美 DARPA 投资 300 万美元开发高性能芯片材料..... 9

欧资助 7.3 亿欧元增强半导体创新能力 10

美 DOC 发放 4 亿美元加强本土硅晶圆生产能力..... 11

美 BTPI 建立半导体研究中心 11

研究进展

具有非易失性存储功能的室温交变磁体 12

革命性金刚石薄膜制造技术 13

经济高效的新型碳捕获材料——CalyChar..... 14

室温下生物质一步转化为石墨烯类材料 14

美海军发布先进制造战略 2024

编者按：先进制造涵盖了多种跨领域的技术，对国防工业基础和海军作战具有重要的意义。美国国家安全战略 2022 (NSS)、国防战略 2022 (NDS)、国防科学技术战略 2023 (NDSTS)、国防工业战略 2023 (NDIS) 都指出，先进制造是实现国家安全目标的关键推动力。随着先进制造技术的快速发展，美国海军的制造方法、生产信息和数据管理也必须不断适应。2024 年 12 月 19 日发布的《美国海军先进制造战略 2024》将提供共同的指导原则和全面框架，使美国海军始终处于先进制造的最前沿，并将先进制造与战略目标相结合，确保美国海军和海军陆战队利用尖端创新和技术进步来保持军事优势¹。

工作重点 1：利用尖端商业能力提升美国海军能力

美国海军保持竞争优势的能力取决于国防工业基地（DIB）对先进制造的使用和投资，并将现代技术整合到其供应链和后勤中。美国海军战略目标包括：

- 通过海军部（DON）的采购计划，涵盖造船、航空、弹药和陆地系统，推动先进制造商业生产；
- 扩大美国海军的工程资格和认证，以推动先进制造商业生产。包括：①发布标准，向国防工业基地传递关键性能参数和资格/认证要求；②实施符合国际和行业标准的认证流程，以增强对先进制造可靠性的信任；③促进快速资格和认证流程；④为采购制定军事规范，为流程和生产制定军事标准；⑤平衡成本效率与必要的性能标准，以商业标准作为基线，并纳入额外的性能要求以满足特定的军事需求；
- 促进和开发国内来源，扩大先进材料的供应基础；

¹ Navy Unveils Advanced Manufacturing Strategy.
<https://www.navy.mil/Press-Office/Press-Releases/display-pressreleases/Article/4012752/the-department-of-the-navy-releases-inaugural-advanced-manufacturing-strategy/>

- 与制造商建立增强型伙伴关系，利用其专业知识、能力和创新速度；
- 与国防后勤局合作，增加合格和经认证的先进制造流程生产的商业备件采购；
- 在供应链中实现完全可追溯性，无缝跟踪从原产地到最终产品的组件和材料，确保整个过程责任清晰、流程透明；
- 建立供应链反馈机制，以不断改进和适应新兴技术；
- 推动先进制造在各类设施建设和维护中的应用；
- 加强与行业之间的合作，利用先进制造来缓解部分零部件的过时问题，保障各类稀有零部件的可用性。

工作重点 2：打造现代化维修设施，加强中间部队能力

战略目标包括：

- 利用灵活和敏捷的制造和维修能力来增强现代化维修设施，利用现场/按需制造零部件来最小化后勤压力；
- 利用造船厂基础设施优化计划（SIOP）、海军航空兵的舰队战备中心基础设施优化计划（FIOP）、海军陆战队有机工业基地（MCOIB）等，推动国防工业基地现代化，实现规模化生产；
- 实施数字制造实践，促进增材制造、机器人技术和数字孪生等先进制造技术的采用；
- 实施开放架构，促进未来技术的成熟和推广；
- 整合车间，将合格的制造设计与机器连接，监控设备健康状况，并增强工作流程的互联性。

工作重点 3：加强作战人员的自给自足能力以确保任务成功

战略目标包括：

- 为水兵和海军陆战队员部署和扩展适合的先进制造技术，供现场

使用；

- 优化配置管理流程，包括控制和文档管理，实现对先进制造零部件的按需使用，从而实现作战自给自足；

- 促进仓库级、中间级和组织级先进制造活动之间的协调，增强对前沿部署用户的先进制造能力支持；

- 建立必要的支撑基础设施，推动先进制造技术的成熟；

- 将机器直接与合格的制造和维修设计/指令连接；

- 利用软件以实时监控设备健康状况。

战略最后指出，要成功实现大规模先进制造技术交付，必须依靠五个主要的跨领域推动力，包括治理、制造技术成熟度、标准、数字架构和劳动力发展等。

（黄 健）

战略规划

美量子计划 2025 财年预算补充报告涉及多项材料相关活动

2024 年 12 月 18 日,美国国家量子计划(National Quantum Initiative, NQI) 发布 2025 财年预算补充报告。报告介绍了美国量子科学研发生态系统的年度亮点,以及国家标准与技术研究院(NIST)、国家科学基金会(NSF)、能源部(DOE)、国防部(DOD)、美国国家航空航天局(NASA)、国家安全局(NSA)和高级情报研究计划署(IARPA)资助的大量持续性研发活动,并简要概述了各机构在量子科学政策方面所做的努力和取得的进展。根据该报告,2024 年美国政府机构与量子材料有关的研发活动和活动亮点包括²:

(1) NIST

支持研发活动 NIST 研究人员为 DOE 量子中心“超导量子材料与系统中心”做出了贡献。

(2) NSF

研发活动亮点 2024 年 5 月,NSF 在《科学事务》发表了一篇题为“量子材料和计算概念:从梦想到使用”的文章。

提供关键基础设施 NSF 研究基础设施为量子科学的研究提供了条件。特别是 NSF 国家强磁场实验室和 NSF 高能 X-射线科学中心,二者都将继续作为量子材料前沿研究的重要平台。

(3) DOE

资助研发活动 2024 年 9 月 4 日,DOE 能源前沿研究中心计划宣布支持 10 个新建和续建的多学科、多机构研究中心,其中包括三个用于量子研发的奖项:量子光子集成设计中心、分子量子传导中心以及量子传感和量子材料中心。

(4) DOD

² The National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2025 Budget Released.
<https://www.quantum.gov/the-national-quantum-initiative-supplement-to-the-presidents-fy-2025-budget-released/>

研发计划 DOD 量子材料研究侧重于材料科学方法，旨在解决基于固态的量子系统中的科学挑战。目前的计划包括：美国空军科学研究办公室的“创造未来独立研究计划”，旨在研究用于量子传感和量子网络的宽带隙材料和 II 族氧化物；美国空军科学研究办公室/国家安全局物质科学实验室“材料表征与量子性能：相关性与因果性”研究计划，旨在研究材料特性对门控量子点和超导量子比特性能的影响；美国空军科学研究办公室“计量多学科大学研究计划”（MURIs）涉及多个方面，包括“异常点非厄米可编程材料”“位错为一维量子物质”“用于集成量子系统的压电材料与半导体界面”“非互惠量子材料和可调谐超导二极管原理”“热固态量子比特”；以及陆军研究办公室 MURI 关于“从头计算固态量子材料：在原子尺度进行设计、制造和表征”等。

资助研发活动 2024 年 2 月 23 日，美国空军科学研究办公室、陆军研究办公室和海军研究办公室发布了 2025 财年 MURI 资助公告，其中包括多量子比特门、热固态量子比特、非互惠量子材料和可调超导二极管原理、量子数据处理的量子机器学习基础、材料设计的量子模拟器以及分布式纠缠量子传感的基本极限等主题。

（蒿巧利）

美 DOE 拟参与半导体制造所建设

2024 年 12 月 17 日，美国能源部（DOE）宣布，其 10 家国家实验室将参与“制造业美国”网络中数字孪生研究所（简称 SMART USA）的建设³。

SMART USA 作为一家新的制造研究所，将通过先进的数字孪生技术变革美国本土的半导体生产。当前，美国商务部正在与半导体研究公司（Semiconductor Research Corporation，SRC）进行谈判，推动该研究所的建立和运营。

³ U.S. Department of Energy Announces Involvement in \$285 Million Award for New CHIPS for America Semiconductor Manufacturing Institute.
<https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-involvement-285-million-award-new-chips-america>

美国 DOE 在微电子和半导体研究前沿有着悠久的创新引领历史，通过百万兆次级计算相关项目，开发了 GPU 芯片的关键组件，这些组件现在对于先进模拟和人工智能而言至关重要。SMART USA 将利用 DOE 国家实验室体系的数字孪生及虚拟副本、人工智能和计算研究能力，实现 CHIPS for America 的目标。除国家实验室以外，计划加入该所的合作伙伴预计有 150 多家，遍及美国 30 多个州，来自产业界、学术界以及供应链设计和制造等领域。

（万 勇）

美 DOE 资助微电子科研中心建设

2024 年 12 月 23 日，美国能源部（DOE）宣布为三个微电子科学研究中心（MSRC）提供 1.79 亿美元的资金支持。这三个中心将开展微电子材料、器件与系统设计以及制造科学的基础研究，以变革未来的微电子技术。这些中心将由 10 个国家实验室牵头的 16 个项目网络组成，项目为期四年⁴。这三个微电子科学研究中心的基本情况如下。

（1）微电子先进技术能效研究中心（MEERCAT）

通过推进材料、设备、信息承载模式和系统架构的集成创新，变革节能微电子技术。该中心专注于智能传感、数据带宽、多路复用和高级计算，将探索无缝链接传感、边缘处理、人工智能和高性能计算的变革性解决方案。通过端到端的协同设计，涵盖纳米级材料、神经形态架构、传输中数据处理的异构集成，该中心将探索发现实时节能信息处理的新方法。通过利用最先进的综合、仿真和原型设计方法，该中心将加速新概念的落地，实现可扩展、可持续和可应对数据挑战的系统，并重新定义计算和传感范式。

（2）极端环境微电子协同设计和异构集成中心（CHIME）

通过异构集成以及不同材料、工艺和技术的无缝融合，推动极端环

⁴ Department of Energy Announces \$179 Million for Microelectronics Science Research Centers.
<https://www.energy.gov/science/articles/departments-energy-announces-179-million-microelectronics-science-research-centers>

境电子的变革性进步，助力实现下一代系统。该中心将创建强大的高性能解决方案，能够在极热和辐射等极端环境中，表现出优异性能。开展跨材料、器件、电路和系统的协同设计，该中心将利用跨学科专业知识来优化从原子级到完全集成仪器的技术。该中心将推进快速原型设计方法来加速创新进程，从而实现新概念的快速迭代和验证。通过弥合从实验室到晶圆工厂的差距，该中心还将把开创性的研究转化为可扩展、可制造的解决方案，满足重大的社会和产业需求。

（3）极限光刻与材料创新中心（ELMIC）

推动基础科学发展，助力新材料和工艺融入未来的微电子系统，重点关注以下关键领域方向，如基于等离子体的纳米制造、极紫外（EUV）光子源、二维材料系统和极大规模存储器等。该中心的科学研究将深受“从系统到物理”的理念驱动，并产生长远影响。

（尹 伟）

项目资助

英日两国联合资助 AI、生物、半导体等研究

2024 年 12 月，英国研究与创新署（UKRI）下属的三家研究理事会支持该国研究人员与日本机构开展合作研究，领域涉及人工智能、工程生物学、半导体和量子等⁵。其中，在半导体及量子领域，主要由英国工程与自然科学研究理事会（EPSRC）与日本科学技术振兴机构（JST）联合资助，获得资助的三个项目将推动功率电子、半导体光子和 AI 低功耗硬件等的技术发展，相关研究内容如下。

（1）UP-SiC：释放碳化硅在电力电子领域的未来潜力

由剑桥大学和京都大学牵头，旨在提高碳化硅在高压和电力应用中的载流子迁移率，并显著减少碳排放。

（2）用于安全通信的异质材料集成微机电系统（MEMS）/纳机电系统（NEMS）-光子平台

由南安普顿大学和东京科学大学（编者注：2024 年 10 月，由东京医科齿科大学和东京工业大学合并而成）牵头，旨在为安全信息通信技术硬件创建 MEMS/NEMS 光子平台，降低能耗，并推进量子安全通信。

（3）构建硅脑立方，打造绿色可信 AI

由伦敦帝国理工学院和东京科学大学牵头，旨在开发 3D 硬件架构，提高能源效率和可信的 AI 处理能力。

（尹 伟）

⁵ UK-Japan collaborative investments in priority technologies.
<https://www.ukri.org/news/uk-japan-collaborative-investments-in-priority-technologies/>

美 DARPA 投资 300 万美元开发高性能芯片材料

硅芯片作为日常电子设备核心，其性能正逐渐达到极限，亟需开发新型材料和技术，以制造运行速度更快、效率更高的设备。为应对这一挑战，美国国防部先进研究计划局（DARPA）向宾夕法尼亚州立大学和国防与航空航天公司诺斯罗普·格鲁曼资助 300 万美元，旨在开发一种将高性能半导体材料氮化镓与硅衬底集成的新方法⁶。

氮化镓是一种宽带隙半导体，能够承受更高的电场并维持更高的电压和温度。硅是一种窄带隙半导体，价格便宜，且硅制造基础设施十分完善。将这两种材料进行集成，可望创造出兼具二者优势的芯片。然而，传统的集成方法复杂且昂贵，并且通常需要中间层，这会引入热阻并限制设备性能。为此，项目研究人员将发展一种新型解决方案，使用一到几个原子厚度的二维材料（如二硫化钼和硒化镓）作为种子层，在工业兼容的硅（001）上生长氮化镓。硅（001）是当前半导体技术中首选的晶体取向，种子层能够作为模板或基底，影响在其表面生长材料的结构、取向和质量。该方案有望降低制造成本，并使高能效设备进入市场成为可能。此外，这笔资助将进一步加强宾夕法尼亚州立大学在半导体研究领域的领导地位，并展示学术界、工业界和政府之间的合作在解决复杂挑战方面的价值。

（吴文涛）

⁶ \$3M grant targets integrated semiconductor for smarter, greener electronics.
<https://www.psu.edu/news/materials-research-institute/story/3m-grant-targets-integrated-semiconductor-smarter-greener>

欧资助 7.3 亿欧元增强半导体创新能力

欧洲芯片联合中心及参与国的国家资助机构将共同提供 7.3 亿欧元，资助“电子元件和系统先进封装和异构集成”(APECS)试点生产线计划。该计划是《欧洲芯片法案》的核心内容，将应对微电子领域的关键挑战，助力开发下一代解决方案，从而在各种应用中提升性能、可扩展性和可持续性。对新兴芯片技术的关注将有助于打造稳健且值得信赖的异构系统，显著增强欧洲半导体行业的创新能力，并巩固其全球市场地位⁷。

APECS 联盟汇聚了来自八个欧洲国家的十家成员机构，包括德国费迪南德-布劳恩研究所、德国莱布尼茨高性能微电子研究所、奥地利格拉茨技术大学、芬兰国家技术研究中心、比利时微电子研究中心、法国原子能委员会电子与信息技术实验室、希腊研究和技术基金会、西班牙巴塞罗那微电子研究所、西班牙高等科研理事会以及葡萄牙欧盟伊比利亚国际纳米技术实验室等。APECS 由德国弗劳恩霍夫协会协调，并由德国研究微电子工厂实施。APECS 将向欧盟的众多利益相关方开放，包括高校、研究技术组织、中小企业和工业企业，以及其他有相关意向的国家。欧洲芯片联合中心已签署托管协议和联合采购协议，这是启动试点生产线采购流程的关键。

(吴文涛)

⁷ APECS marks a milestone for the European semiconductor industry.
<https://www.chips-ju.europa.eu/News-detail/?id=31b33702-2abe-ef11-b8e8-6045bde08093>

美 DOC 发放 4 亿美元加强本土硅晶圆生产能力

2024 年 12 月 17 日，美国商务部（DOC）宣布将向 GlobalWafers 公司（GWA）及其子公司 MEMC 直接发放 4.06 亿美元资金⁸。基于 7 月 17 日签订的初步条款备忘录，DOC 在完成尽职调查后批准授予该笔资金，并将根据项目里程碑进行分配。此举将提升美国国内硅晶圆生产能力，加强美国关键半导体元件的供应链。

在这项资金的资助下，GWA 在得克萨斯州的设施将成为美国首个先进的高容量 300 mm 硅晶圆设施，MEMC 在密苏里州的设施将成为美国本土生产 300 mm 硅绝缘体（SOI）晶圆的关键基地。此外，GWA 同意将其在得克萨斯州的部分现有硅外延晶圆制造设施转为制造碳化硅外延晶圆。

（董金鑫）

美 BTPI 建立半导体研究中心

2024 年 12 月 17 日，美国布鲁克斯科技政策研究所（Brooks Tech Policy Institute, BTPI）获得美国国防部 300 万美元资金，用于建立美国半导体研究中心，该中心将致力于评估和提高全球半导体基础设施互联网的韧性⁹。

该中心已经组建了一支由计算机科学、电气和计算机工程以及社会科学等领域的团队，针对半导体供应链中的关键脆弱性，制定及时、有针对性的缓解策略，同时为学术界、工业界和政府之间的持续合作奠定基础。

（董金鑫）

⁸ Biden-Harris Administration Announces CHIPS Incentives Awards with GlobalWafers to Support Domestic Production of Silicon Wafers.
<https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/12/biden-harris-administration-announces-chips-incentives-awards>

⁹ With DoD grant, Cornell to enhance semiconductor supply chain resilience.
<https://news.cornell.edu/stories/2024/12/dod-grant-cornell-enhance-semiconductor-supply-chain-resilience>

研究进展

具有非易失性存储功能的室温交变磁体

日本东京大学 Shinichiro Seki 教授团队研究发现首个具有非易失性存储功能的室温交变磁体：磁性半导体 FeS。在没有外场的情况下，该材料可借助自旋态的相反配置（ $\uparrow\downarrow$ 和 $\downarrow\uparrow$ ）实现信息存储，并通过电信号进行读写¹⁰。

与传统铁磁材料相比，交变磁体在应用方面具有诸多优势特性。例如，由于没有杂散场导致相邻比特间的干扰，交变磁体更适合集成设备；响应速度比传统铁磁材料快 100 倍；对磁干扰具有很强的耐受性等。凭借这些优势，交变磁体有望成为具有超高密度、超高速和超低能耗的下一代信息介质。

上述研究工作发表在 *Nature Materials*（文章标题：Spontaneous Hall effect induced by collinear antiferromagnetic order at room temperature）。

【快报延伸】

在人们以往的认识中，永久磁性材料只有两种，即铁磁体和反铁磁体。作为第三种磁性材料，交变磁体在 2024 年从理论走向现实，它结合了铁磁体和反铁磁体的特性，具有独特的“双重性格”。正因为此，“第三种磁性材料交变磁体发现”成为由科技日报社主办、部分两院院士和媒体负责人共同评选的 2024 年国际十大科技新闻之一。

（尹 伟）

¹⁰ Discovery of room-temperature altermagnet with non-volatile memory function.
<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/en/press/pr2024-12-13-002>

革命性金刚石薄膜制造技术

金刚石在室温下具有极高热导率、载流子迁移率、介质击穿强度以及超宽带隙等特性，成为制造先进大功率、高频电子设备和光子设备等的理想材料。然而，金刚石的惰性和刚性晶体结构给制造和批量生产带来了巨大挑战，尤其是超薄金刚石膜。香港大学 Zhiqin Chu 领导的联合研究团队开发出一种革命性的超薄、超柔性金刚石膜生产方法，克服了传统制造难题¹¹。

研究团队使用粘胶带进行边缘暴露剥离，可快速批量生产大面积（2 英寸晶片）、超薄（亚微米厚度）、超平（亚纳米表面粗糙度）和超柔（360° 可弯曲）的金刚石膜。新工艺只需 10 秒钟就能生产出金刚石晶片，为该领域的效率和可扩展性树立了新的标杆，而传统方法通常成本高、耗时长、尺寸有限。高质量的金刚石膜具有平坦的可加工表面，支持标准的微型制造技术，其超柔性可直接用于弹性应变工程和形变传感。系统的实验和理论研究表明，剥离膜的质量取决于剥离角度和膜厚度。这种一步法制备技术为大批量生产高精度金刚石膜开辟了新途径。金刚石膜与当前的半导体制造工艺高度兼容，有望在电子学、光子学、机械学、热学、声学 and 量子技术领域开展重要的工业应用，也为下一代柔性和可穿戴电子及光子设备开辟了新的可能性。

上述研究工作发表在 *Nature*（文章标题：Scalable production of ultraflat and ultraflexible diamond membrane）。

（冯瑞华）

¹¹ HKU engineering researchers develop revolutionary diamond fabrication technology.
https://www.hku.hk/press/news_detail_28012.html

经济高效的新型碳捕获材料——CalyChar

英国提赛德大学和爱丁堡大学的联合研究团队开发出一种名为 CalyChar 的创新材料，该材料在二氧化碳捕获方面展现出巨大潜力，且成本远低于传统脱碳技术¹²。

研究团队将氨基酸和金属氧化物添加到水热炭（hydrochar）中创造了 CalyChar，这是一种类似木炭的新型水热炭材料，通过水热碳化过程处理有机或生物废物而形成。该材料能够以稳定的碳酸盐形式捕获和储存二氧化碳数年。到 2030 年，这种新型材料有望每年助力英国捕获 350-500 万吨二氧化碳，在全球范围内捕获近 3000 万吨二氧化碳。该材料捕获二氧化碳的成本约为 100 英镑/吨，与现有直接空气捕获（DAC）技术相比，是一种更实惠的脱碳途径。此外，CalyChar 还可用于生物混凝土和生物水泥，实现长期碳储存，推动建筑和农业领域的发展。

（冯瑞华）

室温下生物质一步转化为石墨烯类材料

石墨烯及其相关二维材料因具有优异的理化性质，在基础科学和工程探索方面均具有广泛应用。然而，当前这类材料的制造技术面临着能耗高、产量低、需要高端制造设备等挑战。因此，亟需建立一种简单通用的方案，用于大规模制备石墨烯类材料。

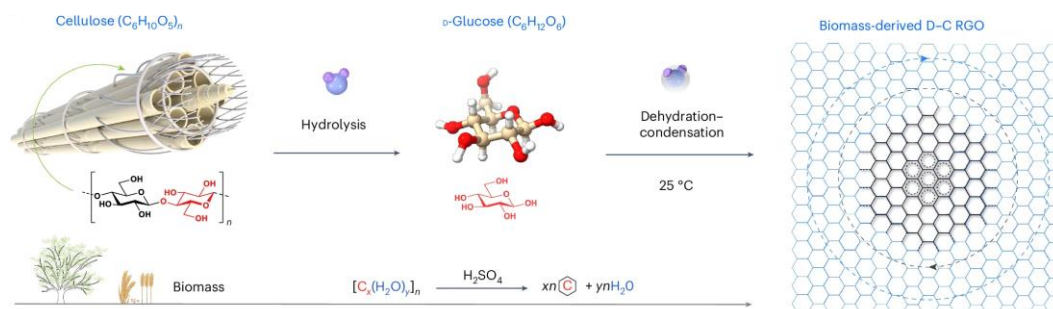
美国西北大学 J. Fraser Stoddart、浙江大学郭庆辉等开发了一种绿色合成方法，能够在室温、常压下将生物质一步转化为还原氧化石墨烯。该方法能耗极低，产量可达克级，且制备条件温和，为绿色、可持续生产石墨烯及其相关二维材料开辟了新的方向¹³。

研究发现，当在室温常压下用浓硫酸处理纤维素、葡萄糖等生物质原料时，可引发脱水缩合反应生成还原氧化石墨烯。进一步实验表明，

¹² New material could capture millions of tonnes of atmospheric carbon.
https://www.tees.ac.uk/sections/news/pressreleases_story.cfm?story_id=8651

¹³ One-step conversion of biomass to reduced graphene oxide at room temperature.
<https://www.nature.com/articles/s41893-024-01480-x>

杨木、小麦秸秆、毛竹粉、茅草、生姜和亚麻等多种生物质原料均适用此法，所得产物的电导率和结构特性与传统还原氧化石墨烯相当。进一步的机理研究显示，满足分子通式 $C_x(H_2O)_y$ 的碳水化合物均可通过此脱水缩合法转化为石墨烯。此方法打破了传统概念，将生物质石墨化温度从约 2000 °C 降低到了 25 °C，能耗降低了 98% 以上，不仅为石墨烯商业应用带来了革命性变化，也降低了废弃生物质造成的温室效应威胁。



室温下生物质一步转化为还原氧化石墨烯示意图

上述研究工作发表在 *Nature Sustainability*（文章标题：One-step conversion of biomass to reduced graphene oxide at room temperature）。

（吴文涛）

中国科学院武汉文献情报中心

先进制造与新材料情报研究



微信扫一扫，关注我们

编辑：中国科学院武汉文献情报中心战略情报部

地址：湖北省武汉市武昌区小洪山西 25 号

电话：027-8719 9180

传真：027-8719 9202

邮箱：[amto at whlib.ac.cn](mailto:amto@whlib.ac.cn)