

自带“开关”的半导体石墨烯问世

■本报记者 陈彬

自 2004 年英国曼彻斯特大学的两位物理学家首次从石墨中分离出石墨烯以来，这种神奇的材料便因其在光学、电学、力学方面的优异特性，在诸多领域成为具有革命性的材料。特别是在微电子学领域，石墨烯被认为是人类从“硅时代”迈入“碳时代”的关键。

然而，要实现这一跨越却并不容易，其间有诸多必须攻克的关键技术难点，石墨烯的“零带隙”特点便是其一。

日前，天津大学天津纳米颗粒与纳米系统国际研究中心教授马雷团队发布在《自然》上的一篇文章宣告了该难题的最终解决。该成果被认为是开启石墨烯芯片制造领域大门的“钥匙”。

“零带隙”阻碍人类进入“碳时代”

作为首个被发现可在室温下稳定存在的二维材料，石墨烯有独特的碳原子排布，并形成了特有的电子学特性。

接受《中国科学报》采访时，马雷表示，石墨烯因其独特的能带结构使电子具有极高的迁移率，这意味着电子可以快速移动。例如，典型的悬浮石墨烯具有高达 200000cm²V⁻¹s⁻¹ 的迁移率，而单晶硅的迁移率只有 1000cm²V⁻¹s⁻¹。这种高电子迁移率意味着更高的运行效率和运行速度。

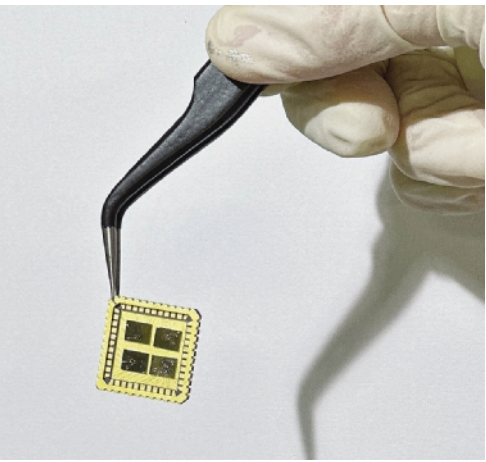
除了高迁移率外，作为二维材料，石墨烯器件还具有高集成度和低功耗的特点。这些特点使石墨烯材料有望成为人类从“硅时代”迈入“碳时代”的核心材料。

然而，正是由于“零带隙”的特性，石墨烯目前仍然无法应用于大规模数字电路器件制造。

所谓带隙，就是存在于两个能带之间的间隙。带隙的存在是实现良好开关比的关键，这样才能有效控制电流的开启或关闭。

从这个角度来看，可以将“带隙”比喻成安装在石墨烯上的一种“开关”。当有这个“开关”时，石墨烯展现出半导体特性，因此能有效完成数字电路功能。当没有这个“开关”时，石墨烯一直处于“打开”的状态，表现出金属性质，无法用于数字电路器件制造。

遗憾的是，尽管人类已经成功制备出各种类型的石墨烯，但目前没有一种既具有高迁移率又具有带隙的石墨烯。因此，寻找具备这种自带“开关”功能的高迁移率石墨烯，成为解决石



功能性半导体石墨烯器件。受访者供图

墨烯在微电子领域应用问题的关键。

被找到的“针”

马雷团队解决这个难题的做法，听起来并不复杂。

“简单地讲，我们选择不同的碳化硅晶面作为衬底，供石墨烯在其上‘生长’，在此过程中对石墨烯生长的温度、时间及气体流量等条件进行精密调控，确保碳原子在碳化硅衬底上形成高度有序的结构。”马雷说。

他表示，石墨烯对外界的变化非常敏感。生长的“衬底”不同，产生的石墨烯的性质也不同。也正因如此，找到能够满足科研人员预期特性的石墨烯非常具有挑战性，无异于大海捞针。

好在，这根“针”最终被马雷团队“捞”到了。该团队研发的半导体石墨烯拥有约 0.6 电子伏的带隙以及高达 5500cm²V⁻¹s⁻¹ 的室温迁移率，优于目前所有已知的二维半导体至少一个数量级。同时，以该材料制备的场效应晶体管，拥有高达 10⁴ 的开关比。

据介绍，一个用来实现基本逻辑关系的电路，通常由“零”和“一”两种状态组成。然而，为了确保数字信息的正常传输和操控，必须清晰区分这两种状态。如果“零”和“一”之间的区别不明显，数字信息就容易混淆。为此，科学家引用“开关比”来度量“零”和“一”，开关比的数值

越大，表示两者之间的区分度越高，混淆的可能性越小。

该团队成员表示，此前曾有人通过化学合成方式，得到过具有带隙的石墨烯纳米带，但这种方式获得的石墨烯很难用于器件制造，更不具备半导体石墨烯所具有的高迁移率。

“总体而言，这种材料展现的特性符合当前工业应用的需求。特别是在室温下的电子迁移率可以达到硅材料的 10 倍，因此在电子器件的应用中有望展现出卓越的性能。”马雷说。

此外，在制备该半导体石墨烯时，团队创新性地采用了准平衡退火方法。该方法制备的单层单晶半导体外延石墨烯具有生长面积大、均匀性高、工艺流程简单、成本低廉等特点。

让“小帆船”长成“大航母”

长期以来，硅一直是现代电子产品的核心材料。然而，随着人们对算力需求的飞速增长，加之硅电子学性能提升空间有限，人们慢慢认识到，硅材料的发展已经逼近其物理极限。

有观点认为，作为信息发展中黄金规则的摩尔定律，正逐渐失去其指导作用。在这样的背景下，半导体石墨烯的诞生无疑为整个半导体行业带来了新曙光。

目前，天津大学团队正致力于实现一个更大的目标——迅速实现从毫米级单晶到英寸级单晶半导体外延石墨烯晶圆的技术跨越。

“如果我们能够生产出 1 英寸大小的单晶半导体石墨烯晶圆，就可以将其直接用于碳基集成电路的制造。”马雷说，这一目标的实现并非易事，就好比使一艘小帆船进化成一艘庞大的航空母舰。而该目标一旦实现，人类有望从此迈入碳基电子学时代。

“最初的计算机体积庞大，占满整个房间，但是其所具备的功能甚至不能与现在一个简单的计算器相媲美；上世纪 90 年代的‘386’和‘486’台式计算机，其运算速度甚至远不及目前最低端的笔记本电脑。随着半导体石墨烯逐步登上下一代集成电路制造的舞台，未来的笔记本电脑在运算速度上有望大幅超越今天的高性能计算机。”该团队表示，他们正在全力以赴，以期加快这一天的到来。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06811-0>

中国科学院院士孙和平：懂科学的人不做科普，谁做？

■本报记者 李思辉 通讯员 杨婷婷

“如果没有万有引力，我们的生活会更方便吗？”

“如果没有万有引力，地球和生命可能都不存在了，那不是更方便了，而是一个天大的麻烦。”

1 月 12 日，武汉经开外国语学校报告厅里，院士与小学生的一问一答妙趣横生，引发现场师生的热烈掌声。

这是中国科学院院士、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员孙和平在“百名院士进百校讲科普”活动首场报告会上与观众互动的一幕。这也是不到两年时间里，孙和平的科普团队完成的第 233 场科普报告。

如此高频次地开展科普活动，动力何在？是否耽误科研？《中国科学报》就这些问题采访了孙和平。

科普是提升国家科技竞争力的重要保证

《中国科学报》：您为什么选择“地球和万有引力”作为此次活动首场报告的内容？

孙和平：地球是人类“最熟悉的陌生人”。一方面它是人类赖以生存的家园，另一方面，很多人对它的变化规律不太了解。其实，地球无时无刻不在进行着细微或剧烈的表面和内部运动，包括地球的旋转、地球的自由振荡、地震、海啸、火山爆发、地壳运动等，而这些变化都与万有引力有关。这可能是孩子们比较感兴趣的一个话题。

我觉得结合自身研究，我和团队能够比较通俗地向孩子们讲清楚万有引力在地球和太阳系形成过程中的作用，地球重力场测量技术在航空航天、前沿基础研究和国家大型工程建设领域中的作用。

孩子们的提问充满着奇思妙想，闪耀着科学梦想种子的金色光芒，值得科研工作者、教育工作者用心呵护。

《中国科学报》：作为我国非常重视科普的院士之一，您怎么看待科普工作？

孙和平：世界各国对科技创新与科学普及的重视程度越来越高。

科普可以帮助公众了解科学知识、掌握科学方法、提高科学素养，从而更好适应和应对生活中的各种问题。

科普有助于培育具备较高科学素质以及其他综合素质的劳动大军，更好推动科技创新和经济可持续发展，进而提升整体科技实力、综合竞争力，为国家的发展和经济的繁荣赋能。

对青少年来说，科普尤为重要。科普进校园有助于促进他们树立远大理想和正确的人生观、世界观、价值观，有助于为科研事业培育后备力量。

动力是对社会的责任感

《中国科学报》：听说您一年作 20 多场科普报告，您的科普实验室团队一年作 100 多场科普报告，动力是什么？

孙和平：科普是科学家应该履行的重要使命。懂科学的人不做科普，谁做科普？

个人的力量是有限的，以我的名字命名的“孙和平院士精密测量科普工作室”成立以来，

采用的是“院士引领、科研人员广泛参与、研究生全面实践”的新型科普模式。我们在重庆成立科普分室、在浙江成立科普基地，就是在体制机制上进行探索。通过增加院士自身责任感，发挥院士的带头作用和科普工作室的平台功能，形成示范引领和精神激励效应，我们才能整合社会力量，发挥所在团队、所在单位、所在行业的引领带动作用。

如果问做科普的动力在哪里，我的回答是“责任感”。科普是造福于人民、造福于社会的一件好事。国家培养了科学家，人民养育了科学家，科学家有条件将所学的知识回馈社会，为什么不去做呢？所以，我觉得，我们不仅要

做科普，而且应该尽最大努力做好科普。

《中国科学报》：“孙和平院士精密测量科普工作室”采取怎样的运行机制？

孙和平：2022 年 6 月，由武汉市科协、武昌区人民政府共同组建，中国科学院精密测量科学与技术创新研究院承建的“孙和平院士精密测量科普工作室”成立，目前工作室成员已发展至百余人，包括中国科学院系统和相关行业协会的专家、中青年科研骨干、高校教师，以及地方科普工作者等。

这不是我个人的工作室，而是一大批热心科普事业的科研工作者一起做科普的联合体。工作室成立不到两年，科普团队深入学校、机关、企业、社区和农村，完成系列科普报告共计 233 场，线上线下听众超过 100 万人次。其中，由我主讲的科普报告接近 30 场，主要的工作是中青年科学家在做。

大家既在科普中奉献时间和精力，也在奉献中收获快乐和成就感，一种良性的、可持续发展的科普运行机制正在形成。

做科普未必耽误科研

《中国科学报》：一些人认为科普耽误科研，科研搞不好的人才做科普，对此您怎么看？

孙和平：科普和科研并不矛盾，而是相辅相成的。科普与科研是两个不同层次的概念。科研是创新，科普是将已有的、熟知的知识传递给大众，我做科普并没有耽误过多的科研时间。

当然，要做好科普，并不是一件容易的事，科普者需要用简洁明了的语言讲述复杂的科学现象，需要有实践，需要严谨的逻辑思维和较强的语言表达能力等。

科普也能促进科研。科普工作者可以从受众的提问中寻找灵感，提炼科研的“真难题”。例如，在一场科普活动中，有中学生向我提问：“电梯里电磁波会被屏蔽，那么引力会被屏蔽吗？”实际上，科学家一直在探索“引力能否被屏蔽”的问题，这是十分前沿的世界基础科学难题。

一个国家的科技水平越高，对科普工作的需求越强烈。在新时代背景下，我们需要重新审视科普工作与科研工作之间的关系，确立二者相互促进、共同发展的理念，探索发展的新模式。我认为，当下，我们应当更加重视科普工作，充分发挥科普工作在反哺科研工作中的作用，鼓励更多科技工作者投身科普一线，推动我国科技事业不断攀登新高峰。

新型高熵多孔陶瓷材料可耐 2000 摄氏度高温

本报讯(记者朱汉斌)近日，华南理工大学材料科学与工程学院研究员褚衍辉团队通过多尺度结构设计，成功制备出兼具超强力学强度和高隔热性能的高熵多孔硼化物陶瓷材料。同时，该材料还展现出在 2000 摄氏度下的高温稳定性。相关成果发表于《先进材料》。

制备兼具优异力学强度及隔热属性的多孔陶瓷材料一直是科学家追求的目标。然而，这两种属性在一定程度上是相互制约的。通过降低多孔陶瓷的相对密度，可显著提高材料的隔热性能，但这往往会导致材料力学强度的大幅下降。同时，传统多孔陶瓷材料耐温普遍低于 1500 摄氏度，高温服役过程中常面临体积收缩、力学性能衰减等问题，无法满足日益严苛的服役需求。

针对上述问题，研究团队制备出了高熵多

孔硼化物陶瓷材料。该材料的优异性能源于“三大法宝”，即微观尺度上构筑的超细孔、纳米尺度上强晶界界面结合，以及原子尺度上严重晶格畸变。

论文共同通讯作者褚衍辉表示，在微米尺度上，团队通过超高温快速合成技术在数十秒内完成烧结，抑制晶粒生长，进而在材料内构筑均匀分布的亚微米级超细孔隙；在纳米尺度上，团队通过进一步固溶反应，建立晶粒之间强界面结合；在原子尺度上，团队通过引入严重晶格畸变，提高晶格内部的应力场和质量场波动，提高硼化物的本征力学强度。

该高熵多孔陶瓷材料在航空航天、能源化工领域具有广阔的应用前景。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1002/adma.202311870>

我国新一代气象超算系统建成

日前，中国气象局公布我国新一代气象超算系统建成，运算能力提升 6.5 倍，大幅提高天气及气候预测等方面的精准率。同时，多项气象核心技术实现突破，在全球同化预报系统方面，北半球可用预报天数首次稳定突破 8 天，实现了气象数值预报模式发展的阶段性目标，成为重要的里程碑。台风预报方面，24 小时的平均路径预报误差缩小到 62 公里，达到历史最佳，台风预报能力已居世界先进水平。在强对流天气预警方面，预警信号的发布可提前 43 分钟。

图为新一代气象超算系统。图片来源：CCTV+ / 视觉中国



挪威允许深海采矿引争议



本报讯 在挪威成为全球第一个允许深海采矿的国家后，从海底提取矿物的有争议计划又向前推进了一步，这让科学家和环保组织感到失望。他们表示，这种做法将对生物多样性和生态系统造成不可逆的破坏。

“这与人类的贪婪有关而不是生存必需，会让我们和后代付出巨大的环境代价。”荷兰深海保护联盟联合创始人 Matthew Gianni 说。据《自然》报道，1 月 9 日，挪威议会以 80 比 20 的投票结果允许在挪威海大陆架上勘探开采。其目的是绘制该国管辖范围内的海底地图，并调查目前在陆地上开采的硫化物和锰结壳是否可从海底开采。

自 2020 年以来一直在推行采矿计划的挪威政府表示，海底开采对于确保铍、钴等金属的供应是必要的，这些金属可用于制造电动汽车电池

和其他旨在帮助向低碳经济转型的电子产品。但许多科学家和科学组织表示，这种说法具有误导性，而且陆地矿产资源是足够的。

尽管关于深海采矿的生态影响的研究还不多，但已有研究表明，采矿活动可能伤害海底生物，因为这些生物可能会被采矿使用的机器碾压，也可能因采矿活动翻起的沉积物羽流而窒息。许多研究人员和一些国家呼吁，在对深海生态系统有更多了解之前，暂停深海采矿。

挪威政府的这一决定意味着其可以发放许可证，允许公司和其他实体勘探约 28 万平方公里的海床。能否商业开采还需要进一步的议会投票，但许多科学家和环境组织认为，目前的结果将为实现这一目标铺平道路。

科学家表示，目前对拟议的采矿地点的生物多样性和生态系统功能知之甚少，无法确保采矿安全进行。“当我们对伤害或风险一无所知时，我们怎么能作出有意义的判断？”挪威卑尔根海洋



像“兔子鱼”这样的深海物种很可能受到海底采矿的影响。

图片来源：SeaTops/Alamy

研究所政策主任 Peter Haugan 说。

挪威独立研究机构 NORCE 的海洋生态学家 Helena Hauss 表示，拟议的采矿地点生活着其他地方没有的种群，采矿活动会使其受到不可逆的破坏。她说：“这与挪威政府的说法不相符，即采矿活动将以可持续和负责任的方式进行。”

在国际上，关于是否允许在国家管辖范围外的矿产丰富区进行深海商业开采的谈判仍在继续。一个有争议的地点是东太平洋的克拉里昂-克利珀顿区，它位于美国夏威夷和墨西哥之间，面积约 450 万平方公里。Gianni 表示，在讨论中，挪威是坚定支持深海采矿的国家之一。（文乐乐）