
首个基于溶液法合成石墨烯纳米带的超净单电子晶体管

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/21781.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

首个基于溶液法合成石墨烯纳米带的超净单电子晶体管。

2023年2月2日，德国马普微结构与物理研究所、德累斯顿工业大学冯新亮教授团队、上海交通大学麦亦勇教授团队及牛津大学Lapo Bogani教授团队合作在Nature Materials期刊上发表了一篇题为Exceptionally clean single-electron transistors from solutions of molecular graphene nanoribbons的研究成果。

该成果利用具有优异液相分散性的石墨烯纳米带，实现了超净单电子晶体管的制备，为进一步研究液相石墨烯纳米带的自旋态和拓扑态提供了可能。此外，由于该超净单电子晶体管的构建方法简单高效，大大降低了量子电子学的研究门槛。

论文通讯作者是冯新亮、Lapo Bogani;第一作者是牛雯慧，Simen Sopp，Alessandro Lodi及Alex Gee。

石墨烯纳米带(GNRs)是一类具有纳米级别宽度、长径比大于10的条带状石墨烯。受一维量子限域效应的影响，GNRs的光电等物理性质，例如带隙、载流子迁移率等，强烈依赖于它们的结构，包括宽度、边缘结构、杂原子掺杂等因素。因此，通过对其结构的精确调控，可以控制纳米带的光电性质和本征量子现象，并实现长达微秒的自旋相干时间。然而，只有洁净度较高的单电子器件才能检测到GNRs的所有电子态，进而应用到量子研究实验中。这要求在量子电子传输过程中，仅检测单根GNR的自旋及拓扑现象。

在这项工作中，冯新亮团队、麦亦勇团队及Lapo Bogani团队利用侧链修饰有刚性大基团的石墨烯纳米带，实现了超长纳米带的液相单根分散。借助纳米带优异的液相分散性和较长的长度，该团队成功制备了具有周期性且库伦菱形边缘清晰的单电子晶体管。值得强调的是，该晶体管表现出强电子-振子耦合。此外，超净单电子晶体管的构建方法十分简单高效，为进一步研究液相石墨烯纳米带的自旋态和拓扑态提供了可能，且大大降低了量子电子学的研究门槛。

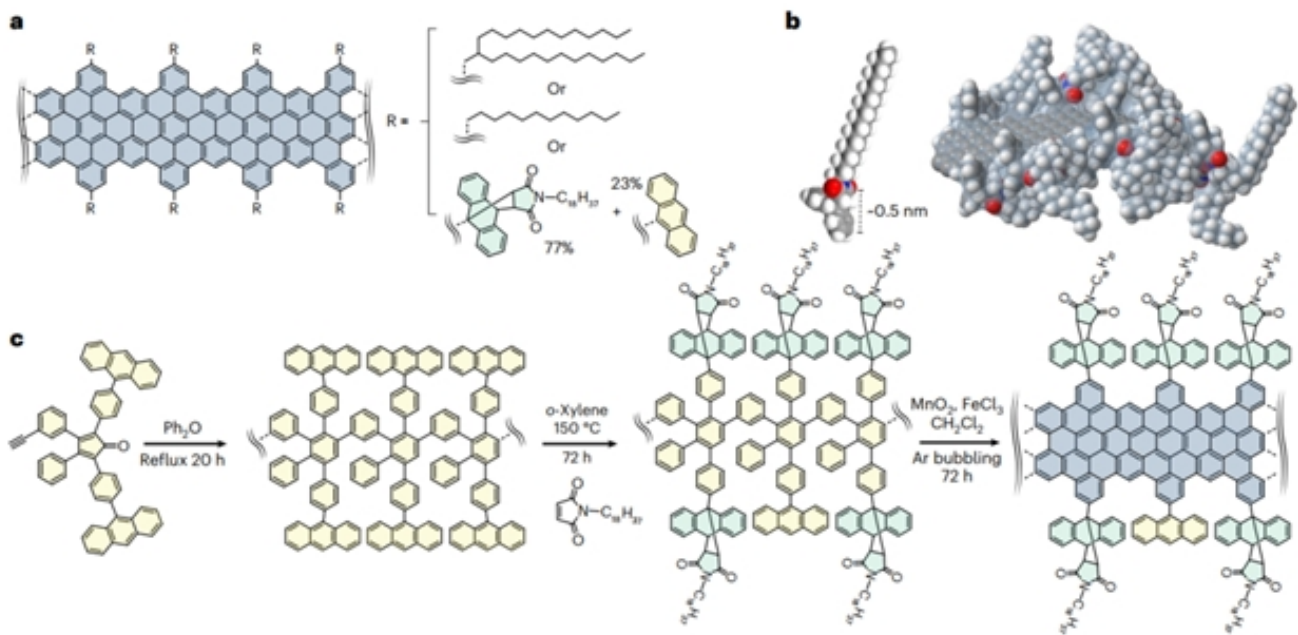


图1：烷基链修饰石墨烯纳米带(GNR 1a, 1b)和刚性大基团修饰的石墨烯纳米带(GNR 2)的结构和制备过程。

为了对比相关光物理性质和晶体管表现，该团队分别制备了烷基链修饰的GNR 1a和GNR 1b，以及刚性大基团修饰的GNR 2(图1)。

得益于刚性大基团的位阻作用，GNR 2的聚集作用被大大削弱，使其在常见有机溶剂中表现出不同于GNR 1的优异分散性。将上述GNR 1b和GNR 2的光谱进行对比，可以得知分散性差异对GNRs光物理性质的影响。与GNR 1b相比，GNR 2表现出高分辨的紫外吸收峰，最大吸收峰为544 nm，并伴随有500 nm和469 nm两个肩峰(图2a)。相比于GNR 1b($\lambda_{max} \sim 557 \text{ nm}$)，GNR 2表现出明显的吸收峰蓝移，证明了刚性大基团的引入可以有效缓解纳米带的聚集。经测试，GNR 2和GNR 1b的紫外吸收边分别为617 nm和660 nm，根据公式：

$$E_{\text{optical bandgap}} \approx 1240/\lambda_{max}$$

可推算其光学带隙分别为2.01 eV和1.88 eV。

另外，与GNR 1b被聚集猝灭的荧光光谱不同，GNR 2展现出明显的荧光光谱信号，进一步证明了刚性大基团的引入极大地改善了纳米带的聚集。通过测试不同浓度GNR 2的荧光发射光谱发现，其荧光信号峰展示出强烈的浓度依赖性(图2c)。当纳米带浓度低于0.1 g L⁻¹时，可以在600-650 nm范围内观测到两个荧光信号峰，且强度随浓度增大而升高，在达到0.1 g L⁻¹时达到饱和;高于此浓度时，两荧光信号峰强度逐渐降低(图2d)，这表明超过临界浓度后，GNR 2的聚集程度随着浓度增大逐渐严重。此外，原子力显微镜证据表明GNR 1a在表面上呈现纳米级聚集;而刚性大基团修饰的超长GNR 2表现出明显的解束，在表面上呈现单一线性结构(图2e)。

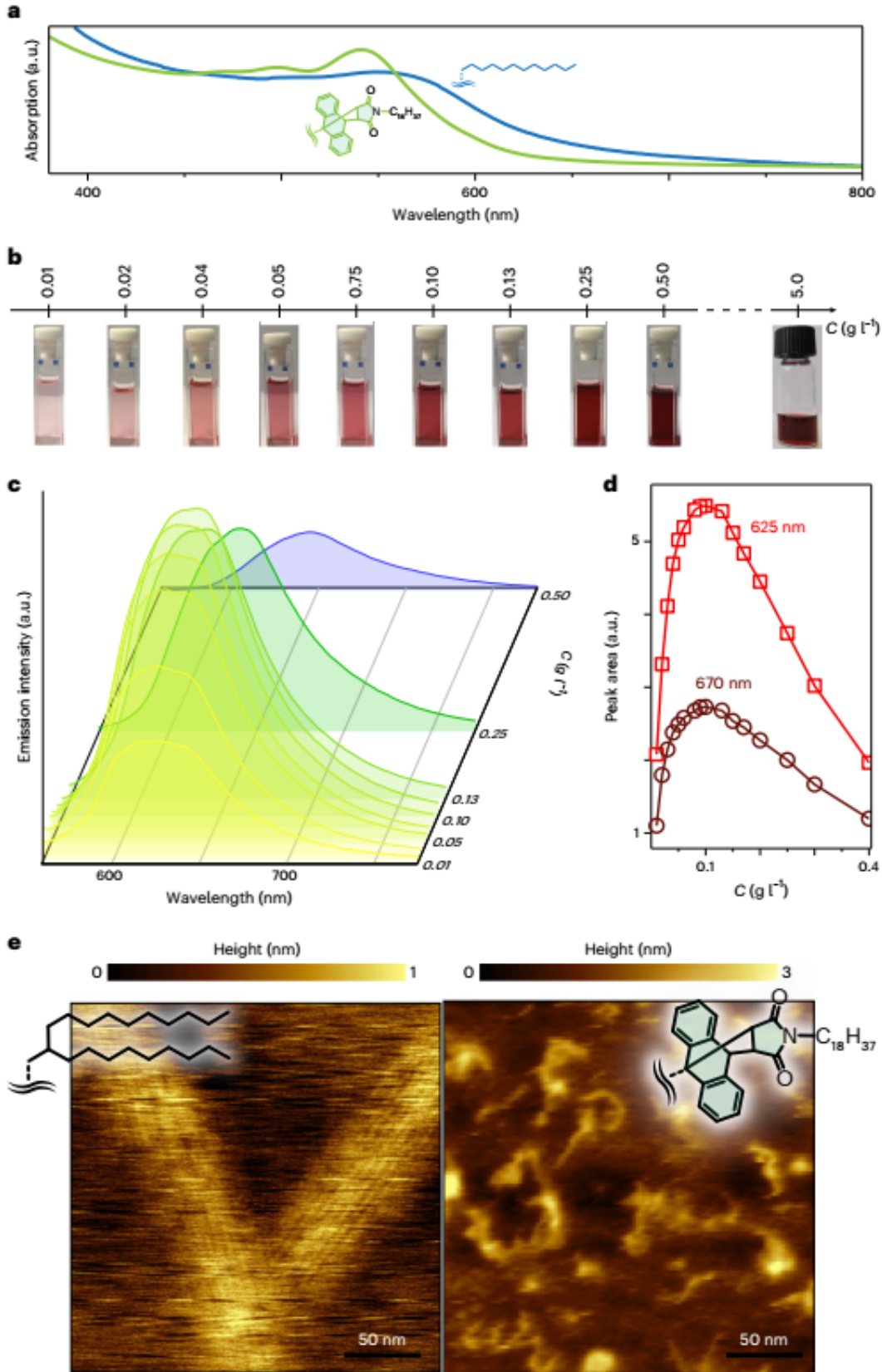


图2：两纳米带的光物理性质及AFM表征对比。

在实现了超长纳米带单根分散的前提下，冯新亮团队和麦亦勇团队与牛津大学的Lapo Bogani团队

合作，制备了单电子晶体管以进一步探索纳米带的量子特性。单电子晶体管(SET)是一种基于库仑阻塞效应的敏感电子设备。在该器件中，电子流过源漏电极之间的隧道结，到达两个隧道结之间的量子点(导电岛)。岛的电势可以通过栅极进行调节。在搭建的SET器件中(图3a)，作者通过纳米光刻技术将石墨烯电极制备在具有SiO₂层的氮掺杂硅晶片上，并通过滴涂将GNRs沉积到基底上，GNRs跨越的两个石墨烯电极之间的间隙宽度为d= 1-10 nm(图3b)。基于该器件，作者通过源极-漏极电压VSD和栅极电压VG来操控器件，同时测量了源极-漏极电流ISD。在SET中，电子通过单个通道发生传输，可通过VG调节其电势，以便电子隧穿到GNRs中。由于库仑排斥，传导通道中一个电子的存在阻碍了其它电子的通过，并且SET可以显示电导受到抑制的区域。

图3c显示了基于GNR 1a构建的SET的稳定性图。从图中可以看到电导抑制的区域呈深蓝色。在稳定性图中可以观察到模糊的库仑菱形；但是菱形是重叠的并且具有不同的大小，没有规律性。这表明由于纳米带存在严重的聚集，多条纳米带组成的纳米带束跨越了纳米级沟道并充当导电通道。将附加能量Ea视为矩形量子点，可以粗略估算出纳米带实际贡献的长度l。经过计算，GNR 1a的实际贡献长度为~28, 33, 40, 50, 60, 90, 108 nm，多个数值的存在再次证明充当导电通道的GNR 1a实际为大小不均一的聚集体状态。值得注意的是，对于GNR 1a制成的SET器件，库仑菱形中没有可以被识别的激发态。

与之形成鲜明对比的是，基于GNR 2制备的SET器件表现出超纯净的导电特性(图3d)。从SET的稳定性图中可以发现，库仑菱形大小近似，且具有显然的周期性和清晰明确的边缘，这表明此器件具有显著的单电子传输通道。并且，由平行于库仑菱形边界线的黄色亮线可以判断，GNR 2在SET中存在可被识别的激发态。

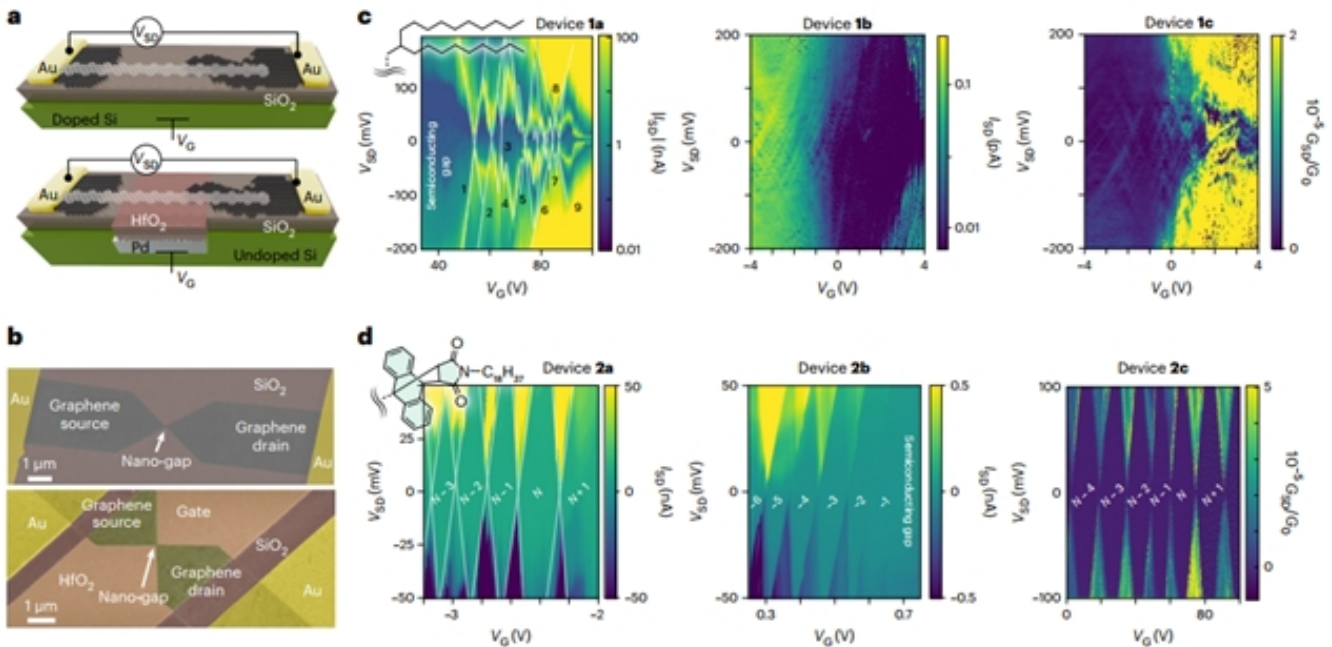


图3：单电子晶体管的量子传输表征。

SET中超纯净的传输特性允许进一步观察到电子传输过程的细节。将一个库仑菱形放大，在更精细的能量尺度下，可以观察到某些库仑边缘处的电流抑制(图4a)。这些激发态在整个VG范围内始终间隔7 meV，该结果与理论结果相吻合(图4a, e, f)。其中某些抑制特征仅每四个库仑菱形出

现一次，这可能来自于自旋诱发的暗态，同时大多数状态在每个库伦菱形中均被抑制。随着温度的增加，边缘电导的抑制被逐渐解除(图4c)。与分子光谱学中的Frank-Condon原理相似，电子移动最可能发生在原子核位置发生最小变化的情况下。因此，电声耦合抑制了低位振动状态的传输。大量表征证明该纳米带单电子器件中电声耦合强度 $= 1.5 \pm 0.2$ ，表明了纳米带中的强电子-振子耦合(图4d)。该结果证明了液相单根分散超长石墨烯纳米带在量子电子学中的潜在应用价值。

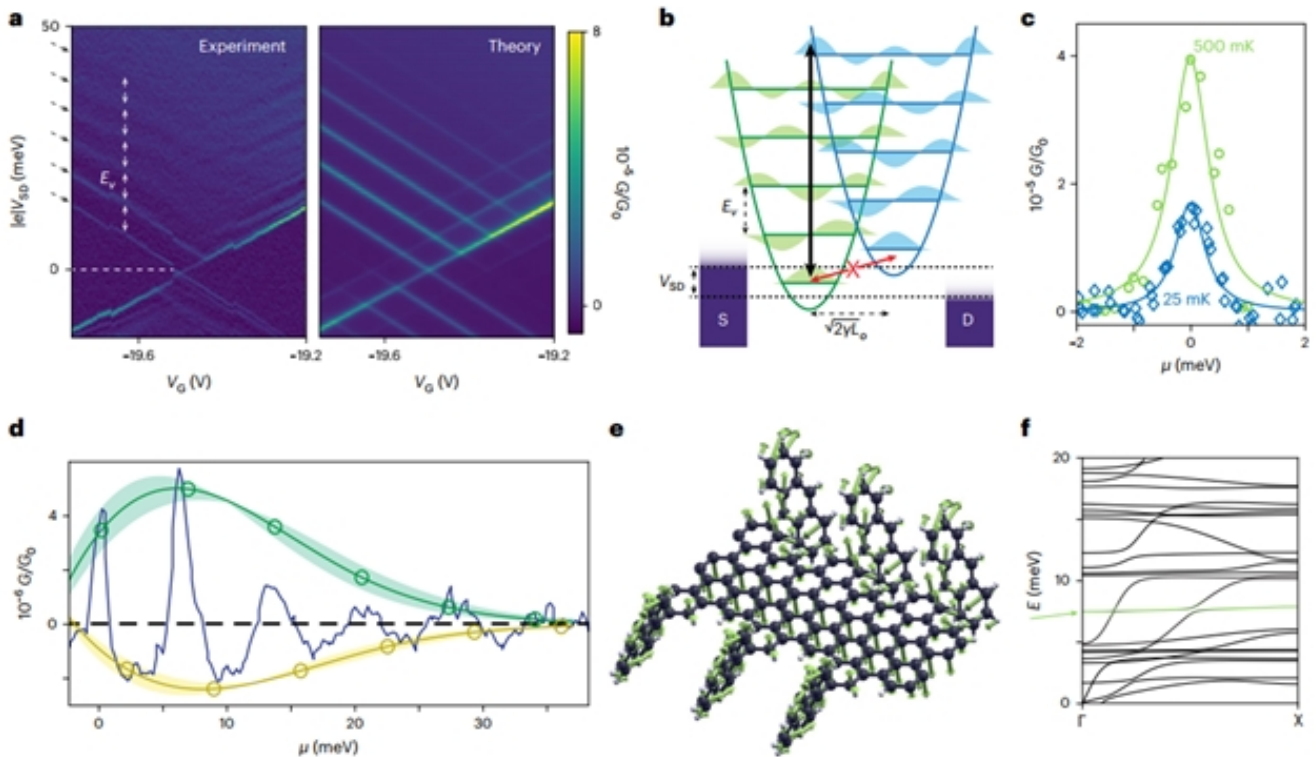


图4：纳米带的电子-振子耦合。

(来源：科学网)

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41563-022-01460-6>

作者：冯新亮等 来源：《自然—材料》

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发