

石墨烯在氮化硼基底上的公度—非公度转变

石墨烯（Graphene）以其优异的载流子迁移率、力学性能等在凝聚态物理及材料科学领域引起了广泛的研究兴趣并取得了巨大的进展；而六方氮化硼（hBN）作为石墨烯的等电子体，具有一定的能隙、原子级平整的表面并且表面没有悬挂键，非常适合于作为承载石墨烯的基底，构成石墨烯/六方氮化硼（Graphene/hBN）异质结构。近年来的研究发现，这种二维原子晶体的异质结构具有许多独特的物理现象。

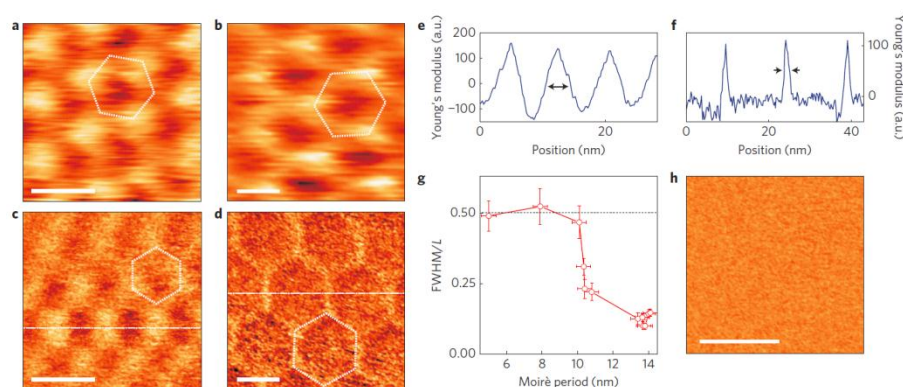
六方氮化硼和石墨烯之间的晶格失配为 1.8%，这使得由它们构造的异质结构呈现出摩尔条纹；并且摩尔条纹的周期大小可以通过改变氮化硼和石墨烯两个晶向之间的夹角 ϕ 而得到调节。之前人们的研究已发现这种摩尔周期势可以在很大程度上改变石墨烯的电子结构性质，例如，超晶格狄拉克点，Hofstadter Butterfly 能谱，分数量子霍尔效应等。然而直至目前，大家普遍认为石墨烯放在氮化硼基底上不会引起结构参数的变化。此外，不同研究组获得的异质结构性质迥异，这一点一直令科学家们感到困惑。

最近，中国科学院物理研究所纳米物理与器件实验室高鸿钧院士领导的研究组与诺贝尔奖获得者英国曼彻斯特大学 A. Geim 和 K. Novoselov 教授的研究组合作，将机械剥离的石墨烯精确转移到六方氮化硼的基底上，得到不同夹角 ϕ 的 Graphene/hBN 异质结构。用原子力显微镜（AFM）、扫描隧道显微镜（STM）、拉曼（Raman）光谱等技术发现了这种异质结体系的公度——非公度的转变：当石墨烯与氮化硼的夹角 $\phi < 1^\circ$ ，为匹配氮化硼的晶格参数，石墨烯碳-碳键的键长会改变，形成一种公度的超结构；然而当夹角 $\phi > 1^\circ$ 时，石墨烯和氮化硼的晶格常数都没有改变，构成的是一种非公度结构。在该工作中，首先用 AFM 发现了不同夹角 Graphene/hBN 样品的杨氏模量分布不同。然后，为了直接观察并测定不同摩尔区域的石墨烯晶格常数的细微变化，物理所的马瑞松、卢建臣同学和郭海明博士等通过 STM 实验获得单原子水平上的氮化硼上石墨烯的大面积精细表面结构图像，并对图像进行了统计分析，发现不同摩尔区域石墨烯的原子间距

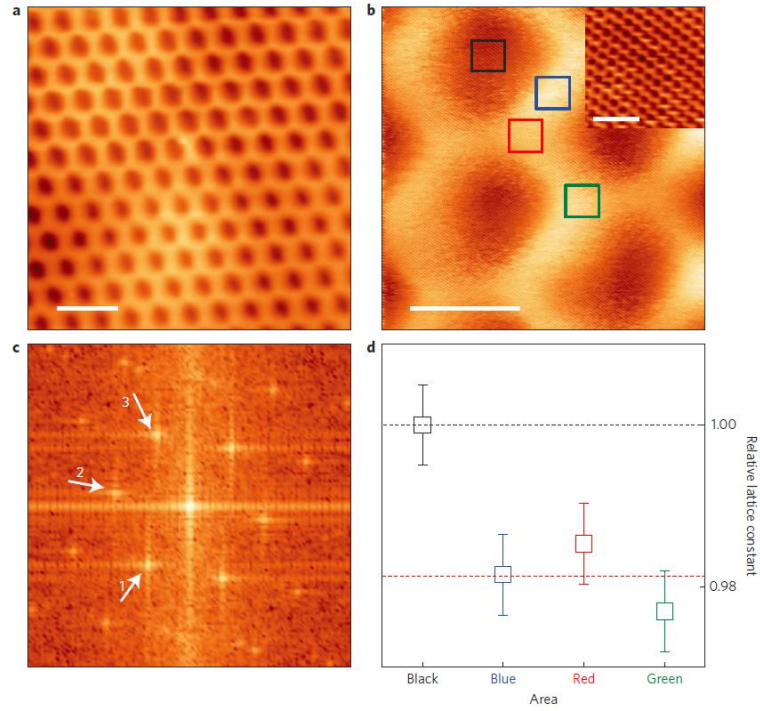
存在 $2.0 \pm 0.6\%$ 的差异。这一极细微晶格常数变化是公度——非公度转变最明确、最直接的证据；这一发现使得人们在原子尺度上对公度——非公度转变有了清晰、深入、全面、完整的认识和掌握。最后，不同结构样品的性质差异得到了 Raman 光谱以及电子输运测量结果的确认和肯定。

发现并深入了解这种公度——非公度转变有助于理解 Graphene/hBN 体系中新奇的现象并解答之前的疑惑。例如：在摩尔周期大于 10 纳米（对应于夹角 $\varphi < 1^\circ$ ）的样品中可以观察到在狄拉克点附近有能隙，而在小于 10 纳米的样品中很难观察到。这一成果是凝聚态物理基础研究方面的一个重大突破，同时也推动了石墨烯产业化的进程。相关工作发表在《自然-物理》杂志上【*Nature Physics*, **10**, 451–456, 2014】。此项工作得到了中国科学院、科技部 973 和国家自然科学基金委等计划的支持。

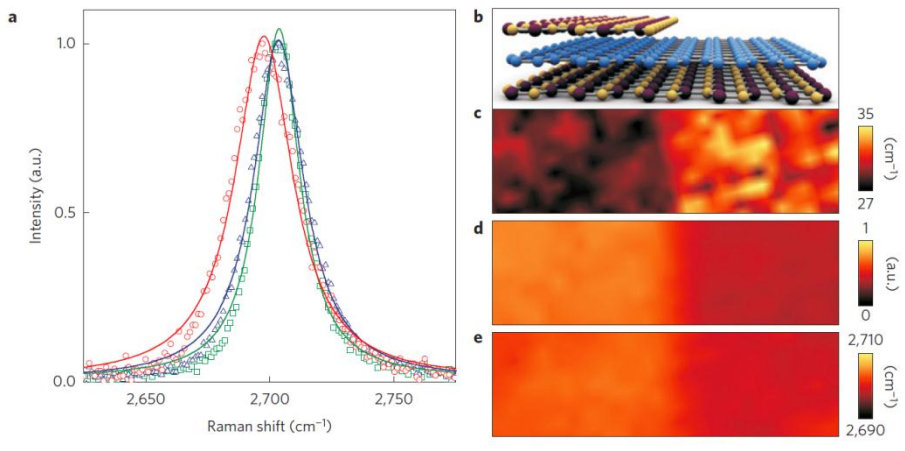
相关工作链接：<http://www.nature.com/nphys/journal/v10/n6/full/nphys2954.html>



图一. 导电 AFM 观察到不同的 graphene/hBN 样品。a, b: 摩尔周期分别为 8 nm (a)和 14 nm (b)的 Graphene/hBN 样品的电阻分布图。c, d: 摩尔周期分别为 8 nm (c)和 14 nm(d)的样品的杨氏模量分布图。e, f: 在图 c, d 中沿虚线方向的杨氏模量分布曲线。g: 杨氏模量峰宽与摩尔周期的关系曲线。h: φ 极大 ($=15^\circ$) 样品的杨氏模量分布图。图中标尺均为 10 nm。



图二. Graphene/hBN 的原子分辨 STM 实验结果。a: Graphene/hBN 的大面积 STM 图像，可以清楚的看到起伏的摩尔条纹，摩尔周期为 14 nm，标尺为 30 nm。**b:** 小范围的 STM 图像，摩尔周期和石墨烯的原子分辨同时可见，标尺为 10 nm；插入图为黑色方框中图像的数值放大图，原子分辨清晰可见，标尺为 1 nm。**c:** 图 b 红色方框中的 STM 图像的傅里叶变换图。**d:** 通过傅里叶变换分别得到了图 b 四个方框区域中相对晶格常数值；黑色方框对应区域的晶格较大。



图三. 不同 graphene/hBN 样品的拉曼光谱测量。a: 三个样品的拉曼 2D 峰曲线，绿色：摩尔周期为 8 nm 的样品；红色：摩尔周期为 14 nm 的样品；蓝色：摩尔

周期为 14 nm，但增加了上覆盖 hBN 层的样品。**b**: 左侧加 hBN 上覆盖层的石墨烯器件示意图。**c**: 摩尔周期为 14 nm 的样品的拉曼 2D 峰半高宽的空间分布图，相应于图 b，样品左半部分有 hBN 上覆盖层，右半部分没有。**d**: 与图 c 相同样品的 2D 峰幅度的空间分布图。**e**: 与图 c 相同样品的 2D 峰位置的空间分布图。