

石墨烯的缺陷工程取得系列研究进展（一）

北京师范大学物理系的何林老师近年致力于石墨烯的缺陷工程研究，即通过各种缺陷(包括原子缺陷、应力、周期势、和双层的转角等广义缺陷)来实现石墨烯的能带结构和电学性质的调制。2012 年，何林老师及其小组成员在石墨烯的缺陷工程研究方面取得了系列重要进展。

最近，何林老师指导博士生闫巍等人与北京大学化学学院的张艳峰教授指导的博士生刘梦溪等人合作，利用本课题组的超高真空低温四探针扫描隧道显微镜 (STM) 对生长在金属 Rh 上的小转角双层石墨烯的电子结构进行了一系列研究。他们的实验结果证明双层石墨烯的狄拉克锥由于层间耦合作用会交叠并产生两个鞍点，这两个鞍点在电子态密度上引起两个范霍夫奇异峰 (图 1)。系统的实验测量指出两个范霍夫峰的峰间距随转角满足 $\hbar v_F \Delta K$ 的关系 (图 2)。这一结果首次证明了不同转角的双层石墨烯的费米速度不随转角而发生改变，推翻了之前大量理论计算的结果(这些理论结果都预言双层石墨烯的费米速度随转角而发生改变，尤其是在角度小于 5 度后费米速度迅速下降)。相关成果发表在 9 月份的 Phys. Rev. Lett. 上 [1] (相关论文已于 6 月份挂在预印本库 arXiv:1206.5883.)。西班牙的国际知名实验组也对该课题进行了深入系统的研究，他们 9 月份在预印本库上报道的最新实验结果进一步证实了何林老师课题组的结论 (见 arXiv:1209.0991)。

何林老师课题组最近在石墨烯的缺陷工程研究方面取得的系列进展还包括：(i) 利用 STM 观察到 graphene/graphite 中一维原子缺陷在费米面处形成平带 (flat bands)，并指出这是石墨烯中一维原子缺陷的普遍行为，第一性原理计算指出这种平带来源于缺陷附近有悬挂键的两个碳原子形成的 sp^2 反键态 [2]；(ii) 利用 STM 研究了 HOPG 表面单层石墨烯由于受应力的影响而引起的能带结构变化，在 77K 观察到了零外加磁场下的朗道量子化 (在正负偏压上共观察到 9 个朗道能级)，能级的分裂相当于在石墨烯垂直方向加了一个 230 特斯拉的巨大磁场，这一结果指出在受应力的石墨烯上有望实现零磁场下的室温量子 Hall 效应和量子 valley Hall 效应 [3]；(iii) 利用 STM 和输运测量手段研究了碳化硅表面的双层石墨烯，指出有转角的双层石墨烯的能带结构和输运性质依赖于层间耦合强度，在耦合强度比较弱时表现为单层石墨烯的性质 [4]，而当层

间耦合增强时，在 Dirac 点两侧的低能态观察到两个范霍夫奇点，输运测量还指出层间耦合强度的增大引起了石墨烯谷间散射（intervalley scattering）增强 [5]。

上述研究是与北京师范大学物理系聂家财教授、窦瑞芬副教授以及北京大学的张艳峰教授、刘忠范教授组、清华大学的倪军教授组、美国宾州州立大学 Moses Chan 教授组等合作完成的。系列工作得到了国家自然科学基金、中央高校基本科研业务费专项资金、以及 973 项目的支持。

物理系的优秀本科生储昭栋、贺文字等人也在相关工作中做了重要贡献，在此特别欢迎高年级的优秀本科生加入本课题组的研究。

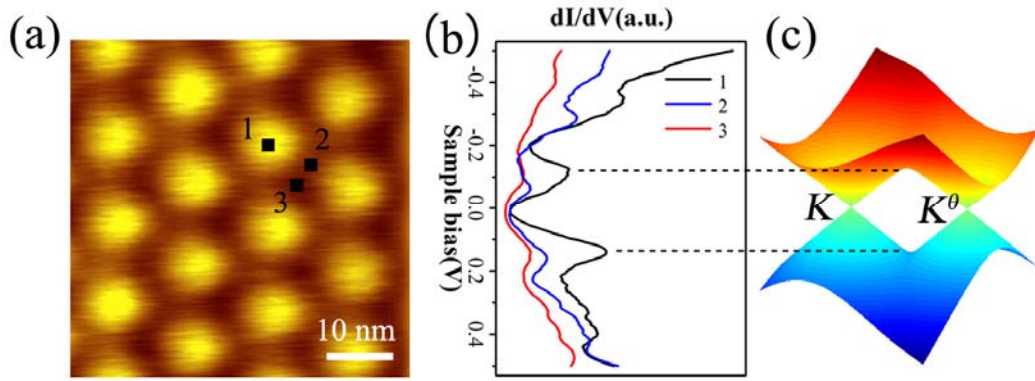


图 1. 双层石墨烯的 Dirac cones 交叠产生两个鞍点，在态密度谱上显示为两个明显的范霍夫奇点峰。

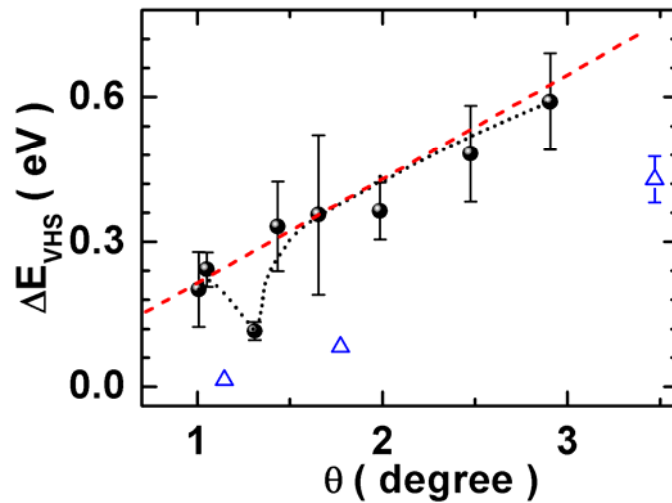


图 2. 两个范霍夫峰间距随双层石墨烯转角的变化图。

2012 年, 何林老师及其小组成员在石墨烯的缺陷工程研究方面已发表的论文:

- [1] W. Yan, M. Liu, R.-F. Dou, L. Meng, L. Feng, Z.-D. Chu, Y. F. Zhang, Z. F. Liu, J.-C. Nie, and **L. He***, “Angle Dependent Van Hove Singularities in Slightly Twisted Graphene Bilayer”. **Phys. Rev. Lett.** Vol: 109, PP. 126801, (2012). <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v109/i12/e126801>
- [2] L. Feng, X. Lin, L. Meng, J.-C. Nie, J. Ni, and **L. He***, “Flat Bands near Fermi Level of Topological Line Defects on Graphite”. **Appl. Phys. Lett.** Vol: 101, PP. 113113, (2012). http://apl.aip.org/resource/1/applab/v101/i11/p113113_s1
- [3] H. Yan, Y. Sun, **L. He***, J. C. Nie, and M. H. W. Chan, “Observation of Landau level-like quantizations at 77 K along a strained-induced graphene ridge”. **Phys. Rev. B** Vol: 85, PP. 035422, (2012). <http://prb.aps.org/abstract/PRB/v85/i3/e035422>
- [4] L. Meng, Y. Zhang, W. Yan, L. Feng, **L. He***, R.-F. Dou, and J.-C. Nie, “Single-layer behavior and slow carrier density dynamic of twisted graphene bilayer”. **Appl. Phys. Lett.** Vol: 100, PP. 091601, (2012). http://apl.aip.org/resource/1/applab/v100/i9/p091601_s1
- [5] L. Meng, Z.-D. Chu, Y. Zhang, J.-Y. Yang, R.-F. Dou, J.-C. Nie, and **L. He***, “Enhanced Intervalley Scattering of Twisted Bilayer Graphene by Periodic AB Stacked Atoms”. **Phys. Rev. B** Vol: 85, PP. 235453, (2012). <http://prb.aps.org/abstract/PRB/v85/i23/e235453>

本课题组长期致力于研究低维体系由于表面/界面效应、量子受限效应、和量子相干效应所表现出的新奇物理性质。更多关于本课题组的研究进展, 请访问:

<http://physics.bnu.edu.cn/application/faculty/helin/index.htm> 。