亮点

转角双层石墨烯中的新发现: 手性诱导的单向磁阻效应

戴慧佳, 马天星*

北京师范大学物理学系, 北京 100875

*联系人, E-mail: txma@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-03; 接受日期: 2021-07-12; 网络出版日期: 2021-09-13

国家自然科学基金(编号: 11974049, 11774033)和北京市自然科学基金(编号: 1192011)资助项目

摘要 转角双层石墨烯中具有许多与平带和手性晶格结构相关的新奇电子现象, 如超导电性、Mott绝缘态、反常的磁性等. 最近, 研究人员计算发现转角双层石墨烯中的手性可以诱导出显著的单向磁阻. 单向磁阻代表了类似二极管的电流整流, 并且可以将电磁辐射转换为传输电流, 以进行能量收集和光电检测等. 这一发现揭示了转角双层石墨烯在电子输运方面的独特性质和应用潜力.

关键词 转角双层石墨烯, 手性, 单向磁阻

PACS: 81.05.ue, 68.65.Pq, 72.80.Vp, 73.43.Qt, 71.30.+h

2018年3月, 美国麻省理工大学Pablo Jarillo-Herrero研究组^[1,2]发表了两篇关于转角双层石墨烯的实验研究文章, 指出该材料可以调控出Mott绝缘态和超导电性等关联电子现象. 该报道使得转角双层二维材料成为凝聚态物理中新的研究热点, 一系列新奇的物理特性不断从中发现. 由于两层石墨烯之间的相对旋转会形成具有长周期的摩尔条纹, 当两层石墨烯之间的旋转角度小于 1.05° 时, 体系的费米面附近出现平带, 电子在能量空间高度局域, 电子相互作用显著增强, 从而出现Mott绝缘态. 在Mott绝缘态基础上加入少量空穴或电子载流子, 就可以成功转变为超导态, 类似于铜氧化物高温超导体. 转角双层石墨烯为研究电子关联现象提供了更加纯净且易于调控的平台.

对于转角双层石墨烯的新颖物性, 其微观物理机制成为科学家的研究重点. David Goldhaber-Gordon课题组^[3]发现导带中miniband填充接近 $3/4$ 时, 相互作用的增强导致转角双层石墨烯表现出铁磁性; 在绝缘态附近较窄的范围内还观察到突出的铁磁滞后现象, 伴随着反常霍尔效应并表现出手性边缘态. 毛金海课题组^[4]通过扫描隧道显微镜及光谱观测到伴随着全域电荷条纹有序的赝能隙相, 打破了莫尔超晶格的旋转对称性: 无论空带还是满带, 赝能隙与电荷条纹有序都会消失. 在高温超导体中, 类似的观测结果为这类系统的深层联系提供了新的证据. Dmitri K. Efetov课题组^[5]报道了莫尔平带填充时, 对称性破缺、相互作用驱动的绝缘态、轨道磁体、非零陈数态和超导“dome”

引用格式: 戴慧佳, 马天星. 转角双层石墨烯中的新发现: 手性诱导的单向磁阻效应. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 107431

Dai H J, Ma T X. New discovery in twisted bilayer graphene: Chirality-induced giant unidirectional magnetoresistance (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 107431, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0100

都会频繁出现的现象. 理论上, 傅亮课题组^[6-8]提出了新型蜂窝格子上的两轨道哈伯德有效模型, 以描述转角双层石墨烯的低能物理性质. 马天星研究组^[9-11]分别利用紧束缚模型和有效模型, 数值模拟的结果给出了金属-绝缘转变的临界点 U_c 、自旋关联函数和超导配对对称性等. 这些研究为深入理解Landau能级简并性和非常规超导电性提供了基础.

最近, 以色列Weizmann科学研究院的颜丙海研究组^[12]发现转角双层石墨烯中平带通过面内磁场的轨道效应引起大的单向磁阻(Unidirectional Magnetoresistance, UMR), 并且计算表明当减小转角时, UMR会迅速增加. 在能带结构中, 磁场导致费米速度与方向相关, 从而导致与方向相关的平均自由程, 进而导致UMR效应. UMR与费米速度成反比, 平带的存在大大增强UMR效应. 在10 T平面内磁场中, 角度为 1.5° 时, UMR可达到约20%. 如此大的UMR有望在光电和自旋电子器件中得到应用. UMR代表一种类似二极管的电流整流器, 它可以在交流电场中产生直流电流, 并且可以通过磁场进行控制. 这种整流效果可用于将辐射转化为电流来进行能量收集或光电检测. UMR对磁场方

向和幅度的依赖性为矢量磁场提供了一个传感器. 由于UMR效应起源于对称性破缺(时间反演和空间反演对称性破缺), 因此即使强电子-电子相互作用使能带结构重整化, UMR效应依然存在. 研究人员还提出了预测UMR效应的有效方法, 即利用能导致平均自由程具有方向敏感性的不对称能带结构. 因此UMR效应可以为转角双层材料中的手性和能带平坦度提供判断依据.

随着对转角双层石墨烯电子关联效应研究的不断深入, 对称性破缺、相互作用驱动的绝缘态、手性诱导的输运现象、轨道磁性、非零陈数态和超导电性等独特的现象都被一一解读出来. 而该领域还处于方兴未艾阶段, 通过扭转角度, 多层石墨烯或者其他类似结构二维材料的电子行为又会出现哪些新奇的现象? 在磁场和电场等外界调控下会发生什么样的变化? 更多的挑战等待着科研工作者^[13], 并且这些独特的实验现象又可能激发新理论模型的建立. 未来, 石墨烯以及其他相关材料的扭转多层系统将会得到更多关注, 人工调控量子材料也会迅猛发展, 并且为量子计算等现代技术领域开拓新的思路.

参考文献

- 1 Cao Y, Fatemi V, Demir A, et al. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices. *Nature*, 2018, 556: 80–84, arXiv: [1802.00553](#)
- 2 Cao Y, Fatemi V, Fang S, et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature*, 2018, 556: 43–50, arXiv: [1803.02342](#)
- 3 Sharpe A L, Fox E J, Barnard A W, et al. Emergent ferromagnetism near three-quarters filling in twisted bilayer graphene. *Science*, 2019, 365: 605–608, arXiv: [1901.03520](#)
- 4 Jiang Y, Lai X, Watanabe K, et al. Charge order and broken rotational symmetry in magic-angle twisted bilayer graphene. *Nature*, 2019, 573: 91–95, arXiv: [1904.10153](#)
- 5 Lu X, Stepanov P, Yang W, et al. Superconductors, orbital magnets and correlated states in magic-angle bilayer graphene. *Nature*, 2019, 574: 653–657, arXiv: [1903.06513](#)
- 6 Yuan N F Q, Fu L. Model for the metal-insulator transition in graphene superlattices and beyond. *Phys Rev B*, 2018, 98: 045103, arXiv: [1803.09699](#)
- 7 Koshino M, Yuan N F Q, Koretsune T, et al. Maximally localized Wannier orbitals and the extended hubbard model for twisted bilayer graphene. *Phys Rev X*, 2018, 8: 031087
- 8 Isobe H, Yuan N F Q, Fu L. Unconventional superconductivity and density waves in twisted bilayer graphene. *Phys Rev X*, 2018, 8: 041041
- 9 Huang T, Zhang L, Ma T. Antiferromagnetically ordered Mott insulator and $d+id$ superconductivity in twisted bilayer graphene: A quantum Monte Carlo study. *Sci Bull*, 2019, 64: 310–314, arXiv: [1804.06096](#)
- 10 Chen W, Chu Y, Huang T, et al. Metal-insulator transition and dominant $d+id$ pairing symmetry in twisted bilayer graphene. *Phys Rev B*, 2020, 101: 155413, arXiv: [1903.01701](#)
- 11 Dai H, Hou J, Zhang X, et al. Mott insulating state and $d+id$ superconductivity in an ABC graphene trilayer. *Phys Rev B*, 2021, 104: 035104,

arXiv: [2009.14647](#)

- 12 Liu Y, Holder T, Yan B. Chirality-induced giant unidirectional magnetoresistance in twisted bilayer graphene. *Innovation*, 2021, 2: 100085, arXiv: [2010.08385](#)
- 13 Ma Z, Li S, Zheng Y W, et al. Topological flat bands in twisted trilayer graphene. *Sci Bull*, 2021, 66: 18–22

New discovery in twisted bilayer graphene: Chirality-induced giant unidirectional magnetoresistance

DAI HuiJia & MA TianXing^{*}

Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Twisted bilayer graphene (TBG) exhibits fascinating correlation-driven phenomena, such as the superconductivity and a Mott insulating state, with flat bands and a chiral lattice structure. Recently, based on quantum-transport calculations, scientists claimed that chirality leads to a giant unidirectional magnetoresistance (UMR) in TBG. The giant UMR represents diode-like current rectification and can convert radiation (e.g., terahertz) into the current for energy-harvesting and photodetection. This discovery has revealed more novel physical properties of the TBG and inspired researchers to explore other chiral bilayer structure materials.

twisted bilayer graphene, chirality, unidirectional magnetoresistance

PACS: 81.05.ue, 68.65.Pq, 72.80.Vp, 73.43.Qt, 71.30.+h

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0100](#)