

转角二维量子材料中平带相关的新奇电子态物性

王仲锐 姜宇航

Physical properties of novel electronic states related to flat band in twisted two-dimensional quantum materials

Wang Zhong-Rui Jiang Yu-Hang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 127202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220064

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220064>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

石墨烯莫尔超晶格体系的拓扑性质及光学研究进展

Topological properties of graphene moiré superlattice systems and recent optical studies

物理学报. 2019, 68(22): 220303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191317>

从“魔角”石墨烯到摩尔超晶格量子模拟器

From magic angle twisted bilayer graphene to moiré superlattice quantum simulator

物理学报. 2021, 70(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210476>

二维磁性材料的物性研究及性能调控

Study on physical properties and magnetism controlling of two-dimensional magnetic materials

物理学报. 2021, 70(12): 127801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202146>

二维半导体材料中激子对介电屏蔽效应的探测及其应用

Detection of dielectric screening effect by excitons in two-dimensional semiconductors and its application

物理学报. 2022, 71(12): 127102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220054>

二维材料中贝里曲率诱导的磁性响应

Berry curvature-induced emerging magnetic response in two-dimensional materials

物理学报. 2021, 70(12): 127303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202132>

专题: 低维材料的新奇物性

转角二维量子材料中平带相关的新奇电子态物性*

王仲锐¹⁾ 姜宇航^{1)2)†}

1) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

2) (中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049)

(2022 年 1 月 10 日收到; 2022 年 3 月 3 日收到修改稿)

二维量子材料具有诸多新奇的电子态物性, 又易受到外部因素的影响和调控, 因此成为近年来凝聚态物理等研究领域的前沿课题之一. 而当以不同的旋转角度和堆叠次序制备出二维量子材料的异质结时, 莫尔超晶格的形成又进一步诱导了异质结电子能带结构的重整化, 从而形成电子平带结构, 再结合外加电场、磁场、应力场等外部条件, 即可实现对材料整体新奇物性的设计与调控. 本文主要围绕转角石墨烯及过渡金属硫族化合物异质结中的相关研究展开讨论, 包括与平带物理相关的强关联效应、非常规超导现象、量子反常霍尔效应、拓扑相以及电子晶体等行为, 并对未来的研究发展进行了展望.

关键词: 二维量子材料, 莫尔超晶格, 平带, 关联效应**PACS:** 72.80.Vp, 72.80.-r, 42.82.Cr, 68.65.-k, 79.60.Jv**DOI:** 10.7498/aps.71.20220064

1 引言

自 2004 年英国曼彻斯特大学 Geim 等^[1]成功机械剥离出单层石墨烯以来, 基于二维量子材料进行的新型材料探索和物态调控的研究逐渐成为当今凝聚态物理、化学、材料等研究领域的前沿课题之一. 当材料厚度减薄至原子层量级后, 量子限域效应可衍生出许多新奇的量子物性; 同时, 这种二维量子材料对外部环境 (如磁场、电场、应力场等) 极其敏感, 物性易受到这些外场的调控. 随着二维范德瓦耳斯异质结制备技术的发展^[2–6], 人们意识到, 如果选择功能性二维材料作为组成单元, 再以不同的旋转角和堆叠序制备出二维异质结, 就可以人为设计材料的物理性质. 如利用材料层间转角调节, 形成的莫尔超晶格 (moiré superlattice) 即可在能量空间使电子能带结构发生重整化, 通过进一步优化进而形成平带 (flat bands). 在这样的

平带中, 电子之间关联作用显著增强, 在外加电、磁场等条件下, 即可诱导转角量子材料诸多新奇的物态与相变, 如已经报道的强关联效应^[7–9]、非常规超导现象^[10,11]、量子反常霍尔效应^[12,13]、强关联诱导拓扑相^[14–17]以及电子晶体^[18–20]等工作, 相关研究和发也逐渐衍生出一门新的学科——旋转电子学 (twistronics). 本文主要讨论了由石墨烯及过渡金属硫族化合物 (transition metal dichalcogenides, TMDs) 构成的转角二维量子材料中新奇电子态物性的相关工作以及涉及的科学问题, 并对未来研究方向进行讨论.

2 转角石墨烯中的平带

2.1 转角石墨烯中的电子结构重整化

石墨烯是由单层碳原子蜂窝状排列而构成的二维狄拉克材料, 在低能区具备独特的线性色散关系 (图 1(a)). 石墨烯内的载流子具有无质量的狄拉

* 国家自然科学基金 (批准号: 12074377) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yuhangjiang@ucas.ac.cn

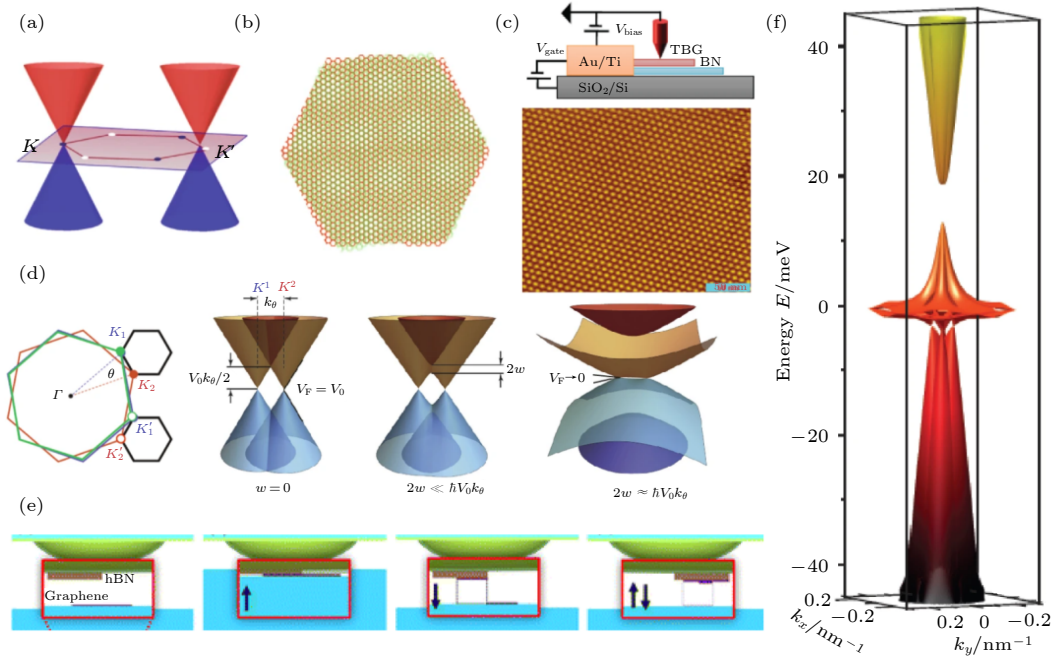


图 1 (a) 单层石墨烯低能区线性能带结构^[21]; (b) 转角石墨烯形成的莫尔超晶格^[21]; (c) STM 观测 TBG 的示意图与均匀的莫尔斑点^[21]; (d) 转角石墨烯电子能带结构^[3]; (e) 原位解理-转移制备法^[27]; (f) 第一布里渊区中的平带体系^[2]

Fig. 1. (a) Low-energy band structure of monolayer graphene^[21]; (b) moiré pattern formed by twisted graphene^[21]; (c) schematics of STM measurement of TBG sample, topography of which shows a uniform moiré pattern^[21]; (d) band structure of twisted graphene^[3]; (e) tear-and-stack technique^[27]; (f) flat band structure in the first Brillouin zone^[2].

克费米子属性, 表现出相对论效应^[21]. 将两层石墨烯旋转、堆叠, 层间范德瓦耳斯力使其结合成为转角石墨烯, 通过控制两层石墨烯之间转角 θ , 可形成具有不同周期的莫尔超晶格^[21], 如图 1(b) 所示. 莫尔超晶格周期的长度 L 与旋转角度 θ 的关系为^[22]

$$L \approx a_0 / (2 \sin(\theta/2)), \quad (1)$$

其中, $a_0 = 0.246 \text{ nm}$ 为石墨烯原胞晶格常数. 根据两层间原子堆叠构型, 莫尔超晶格分为高度对称的 AA, AB 及 BA 区域^[23]. 利用扫描探针技术, 如扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscope, STM), 可获得转角双层石墨烯 (twisted bilayer graphene, TBG) 的形貌像. 如图 1(c) 所示, 亮点对应 AA 区域, 即上层每个碳原子正下方都有一个下层碳原子与之对应; 暗点为交替的 AB 和 BA 堆垛区域, 对应石墨中的 Bernal 堆垛结构^[21].

莫尔超晶格会产生几十甚至上百倍于原子晶格常数的周期性势场, 导致转角石墨烯的布里渊区发生折叠, 并在能带结构上形成鞍点, 即范霍夫奇点^[3], 如图 1(d) 所示. 对转角石墨烯进行扫描探针隧道谱分析, 在本征的“V”型谱线上可额外观测到两个范霍夫奇点引起的共振峰. 范霍夫奇点之间的能量差 ΔE_{VHS} 和旋转角 θ 的关系^[24] 为

$$\Delta E_{\text{VHS}} = \hbar v_F k_\theta - 2w, \quad (2)$$

其中, \hbar 为约化普朗克常数, v_F 为单层石墨烯的费米速度, k_θ 为转角石墨烯狄拉克点的动量位移, w 为层间耦合强度. 当 θ 较大时, $2w$ 对于费米速度以及低能区能带结构的影响可以近似忽略, (2) 式成立; 当 θ 接近或小于 1° 时, $2w$ 与 $\hbar v_F k_\theta$ 数值相近, 能带结构发生较大改变甚至形成平带^[2], 如图 1(f) 所示. 值得注意的是, 基于实验中获得 θ 和 ΔE_{VHS} , 结合 (2) 式可以估算出大转角石墨烯异质结中层间的耦合强度 w .

2.2 魔角石墨烯的可控制备

2011 年 Bistritzer 和 MacDonald^[6] 通过理论计算, 在 TBG 中预测了一组神奇的角度 (即“魔角”): 当双层石墨烯之间旋转角度 $\theta \approx 1.05^\circ$ 时, 线性色散关系向平带转变 (图 1(f)), 狄拉克点附近电子的有效费米速度接近 0, 电子在实空间产生准局域化现象. 在魔角下, 电子-电子相互作用强度超越电子动能, 可产生强关联效应^[3,6], 因此 TBG 为探索强关联效应提供了新的思路.

实验上, 美国罗格斯大学的 Andrei 课题组^[21,23] 利用 STM 和扫描隧道谱 (scanning tunneling spe-

ctroscopy, STS), 在高定向裂解石墨及化学气相沉积方式生长的多层石墨烯体系中观测到了预期的范霍夫奇点. 更进一步, 他们观测对比了不同转角样品的谱学特征, 验证了实空间中的旋转角与能量空间中的范霍夫奇点之间的对应关系, 实现了对魔角附近转角石墨烯样品的电子结构表征及实空间的电子态成像^[4]. 北京师范大学何林课题组^[5]也利用 STM 谱学技术观测到了转角石墨烯体系中的范霍夫奇点. Jarillo-Herrero 研究团队^[2,3]利用异质结堆叠技术, 制备了魔角石墨烯样品, 并通过低温输运实验, 观测到魔角石墨烯的平带整数填充时出现的关联绝缘态^[3,25]与其附近的超导圆顶^[2,25], 将强关联效应的研究引入了二维量子材料领域.

这一领域的发展^[2,3,25]得益于高质量转角石墨烯的精准制备与器件封装技术. 早期通过在化学气相沉积法大面积生长, 以及机械剥离过程中自然发生的折叠^[26], 研究者可以获得具有莫尔超晶格的转角材料. 但由于缺少对堆垛结构尤其是转角的精确控制, 因此很难实现更加深入的研究. 随着石墨烯制备和转移技术日臻成熟, 利用干法转移和“原位解理-堆叠”的方法(图 1(e)), 人们实现了对石墨烯旋转角度的精确控制^[27]. 具体来讲, 基于石墨烯与六方氮化硼(hBN)的范德瓦耳斯作用力强于与 SiO₂ 的黏附性, 用 hBN 拾取部分石墨烯的同时将石墨烯片撕开; 没有被 hBN 接触的部分仍留在 SiO₂ 基底上. 将石墨烯/hBN 旋转一定角度后将剩余的半片石墨烯拾取, 从而制备出魔角石墨烯^[27]. 由于两层石墨烯来自同一块材料, 所得到的转角在光学显微技术的辅助下即可达到较高的准确度, 为制备可控转角的高质量石墨烯异质结器件提供了可能性, 也是石墨烯体系中成功实现一系列新奇物态的基础. 同时, 石墨烯制备与转移技术的成熟与应用, 也推动了对各类异质结结构及其电子态的探索, 促进了转角二维量子材料奇特物态的发现和探索, 关联绝缘态、非常规超导态与量子反常霍尔效应等研究成果快速涌现.

2.3 转角石墨烯平带相关的物态

2.3.1 关联绝缘态

Jarillo-Herrero 课题组^[2,3]通过低温输运测量观测魔角石墨烯样品, 发现在平带被整数填充时, 体系表现为关联绝缘行为. 如图 2(a) 所示, 在

$T = 0.3 \text{ K}$, $\theta = 1.08^\circ$ 时, 魔角石墨烯载流子浓度为 $n \approx \pm 2.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 附近 (对应每个莫尔超晶格被 4 个电子或空穴 (填充因子 $\nu = \pm 4$) 占据), 出现了超晶格带隙带来的绝缘态; 而在 $n \approx \pm 1.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ($\nu = \pm 2$) 处, 即能带处于半填充 (每个莫尔晶格单元被 2 个电子或空位填充) 状态时, 体系也表现为绝缘态性质 (关联绝缘态)^[3]. 研究人员认为关联绝缘态的出现, 来源于费米面附近的平带结构, 其中电子关联效应发挥主导作用, 导致 Mott 相变的产生^[9,28].

随着魔角石墨烯样品均匀性的提高 (图 2(b)), Efetov 课题组^[25]在 $\nu = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ 整数填充处观测到不同程度的电阻升高行为. 通过比较样品在 10 K 范围内输运特征的温度依赖性, 他们获取关联绝缘态的激活能大小分别为 0.34 meV ($\nu = -2$), 0.37 meV ($\nu = 2$) 和 0.25 meV ($\nu = 3$); 对于 $\nu = 1$ 态, 热激活输运的特征不明显, 而 $\nu = -3$ 和 $\nu = -1$ 态甚至完全没有出现, 在 $\nu = \pm 2, 3$ 和 $\nu = \pm 1, -3$ 处分别对应关联绝缘态与半金属态的特征.

美国加州大学伯克利分校 Wang 课题组与复旦大学张远波合作^[29], 设计了一个 ABC 堆叠三层石墨烯 (ABC-TLG) 和 hBN 零度角对齐的转角异质结构, 如图 2(c) 所示. 此异质结具有周期为 15 nm 的莫尔超晶格, 其平带带宽约 10 meV, 远低于库仑排斥能 (约 25 meV), 因此他们通过输运测量观察到了预期中的 Mott 绝缘体. ABC-hBN 具有一个孤立的平带结构, 其带宽可以由垂直电位移场调控, 因此通过双栅极结构可以实现对样品中载流子浓度和能带的独立调节 (图 2(d)), 实现从超导态向关联绝缘态的转变, 为研究 Hubbard 模型提供了可调节的量子模拟平台^[30].

美国罗格斯大学 Andrei 课题组与中国科学院大学姜宇航等合作对转角石墨烯中强关联绝缘态的微观机理进行了探索^[7]. 通过 STM 成像与谱学研究发现, 当平带结构被部分填充时, 谱线中出现 Mott 带隙, 电荷呈一维有序分布 (图 2(e)), 莫尔超晶格的 C_3 旋转对称性发生破缺; 当平带结构未填充或全填满时, Mott 带隙与电荷有序结构都会消失, C_3 对称性恢复. 高温超导体系统中也曾有过相似的对称性破缺的报道, 这暗示了两者的机理存在内部关联^[7]. 另一方面, 在转角异质结的电子结构中诱导出平带及强关联效应, 需要对转角进行精确控制, 这对异质结制备技术提出了较高的要求. 为克

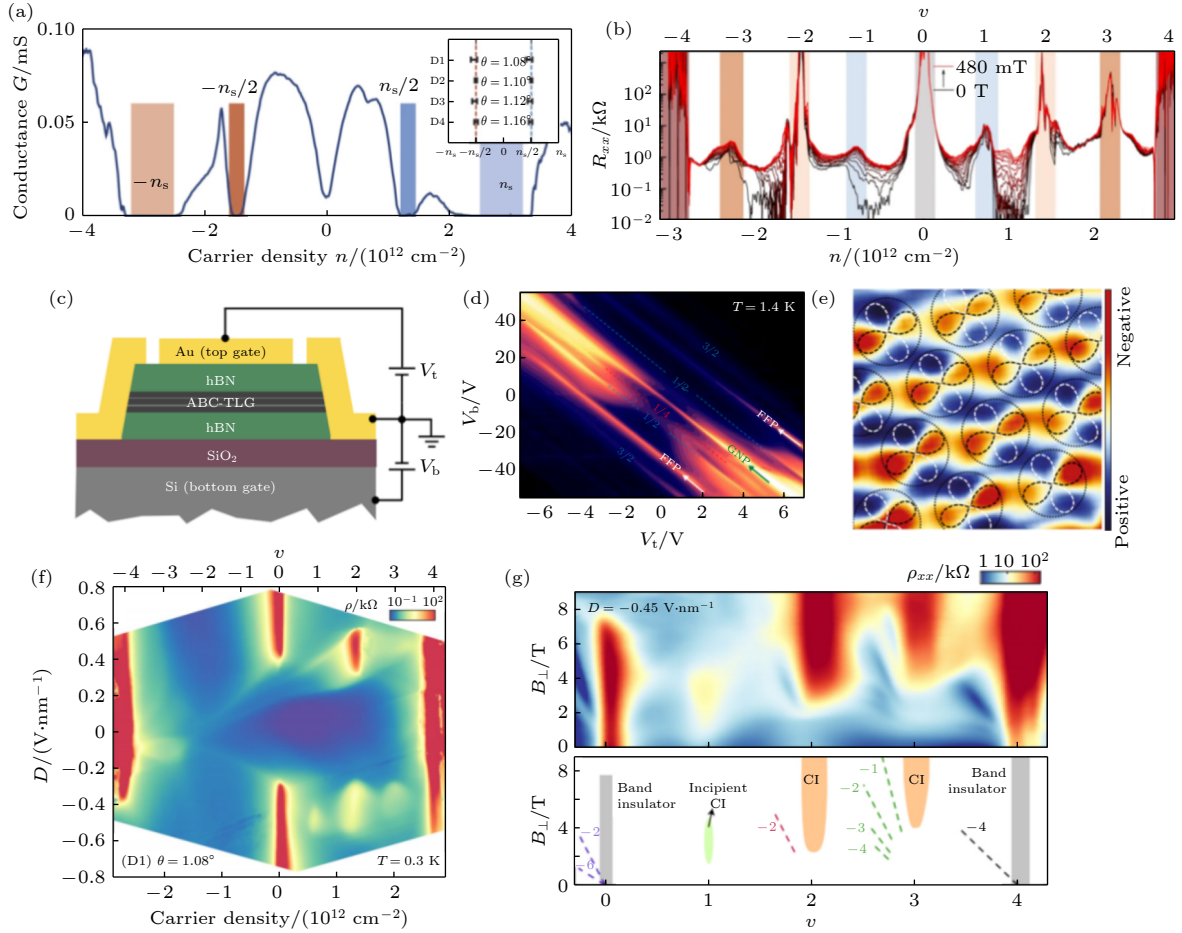


图2 转角石墨烯体系中平带相关的关联绝缘态 (a) $T = 0.3$ K时, 魔角石墨烯电导率随载流子浓度的变化^[3]; (b) 从0 T(黑色曲线)到480 mT(红色曲线)不同垂直磁场下纵向电阻随载流子浓度的变化^[25]; (c) 由hBN封装的双栅极ABC-TLG侧向示意图^[29]; (d) ABC-TLG电阻随 V_t 和 V_b 的变化(颜色从亮到暗代表电阻从100 kΩ到10 Ω, V_t 和 V_b 分别代表顶部栅压与底部栅压)^[29]; (e) 魔角石墨烯中电荷条纹有序相^[7]; (f) $T = 0.3$ K, $\theta = 1.08^\circ$ 时, TMBG的电阻率随电位移场 D 与载流子浓度的变化^[17]; (g) $D < 0$ 时, $\nu = 1, 2, 3$ 处的关联态性质^[17]

Fig. 2. Correlated insulating state of flat band in twisted graphene system: (a) measured conductance of magic-angle graphene as a function of carrier density at $T = 0.3$ K^[3]; (b) longitudinal resistance against carrier density at different perpendicular magnetic fields from 0 T (black trace) to 480 mT (red trace)^[25]; (c) schematic cross-sectional view of the dual-gated ABC-TLG device encapsulated by hBN^[29]; (d) ABC-TLG resistance as a function of V_t and V_b (The colour scale is from 10 Ω (dark) to 100 kΩ (bright) in a log scale, V_t and V_b refer to the top and bottom gate voltage)^[29]; (e) stripe charge ordered phase in magic-angle graphene^[7]; (f) resistivity of TMBG plotted against electric displacement field D and carrier density under the condition of $T = 0.3$ K and $\theta = 1.08^\circ$ ^[17]; (g) properties of the correlated states at $\nu = 1, 2, 3$ for $D < 0$ ^[17].

服这一困难, 他们探索了无需转角条件的平带结构制备. 实验上, 他们将单层石墨烯堆叠在原子级平整的基底表面且引入可控应力. 在应力驱动下, 石墨烯可产生周期性褶皱并诱导周期性赝磁场, 使石墨烯能带在低能区重构为平带. 他们进一步通过电场调控使费米能级穿过该平带, 发现了关联绝缘态存在的证据, 为平带关联态的研究提供了“后石墨烯”的平台^[31].

此外, 中国科学院物理研究所张广宇课题组^[32]发现如果将两个双层Bernal石墨烯旋转堆叠(双层-双层转角石墨烯, twisted double bilayer gra-

phene, TDBG), 电位移场可以精细地控制其平带结构. 他们除了在半填充状态下观察到关联绝缘态之外, 关联绝缘态的电阻对于磁场的响应行为还表明在半填充时存在自旋极化现象. 许晓栋与Yankowitz课题组^[17]合作则发现在具有平带结构的单层-双层魔角石墨烯(twisted mono-bilayer graphene, TMBG)中, 有可能与TBG和TDBG存在潜在相似性. 结果如图2(f)和图2(g)所示, 当电位移场从双层指向单层石墨烯时, 可以观察到与TBG相似的整数填充状态下的关联绝缘态, 但未观察到超导的证据; 当电位移场方向翻转时, 则出现与

TDBG 相似的半填充状态下的自旋极化关联绝缘态. 因此, 在平带体系内实现了对关联和拓扑物态更强的调节能力.

2.3.2 非常规超导态

在双层魔角石墨烯关联绝缘态的基础上, 如果继续对半填充体系进行掺杂, 即可观测到非常规超导态^[2,25] (图 3(a)、图 3(b)). 同时, 实验发现, 尽管魔角石墨烯的超导转变温度最高仅有 3 K 左右^[25], 但其载流子浓度比相应的高温超导体要低两个数量级, 为外场调节非常规超导行为提供可行性. 另外, 魔角石墨烯超导转变的相图与铜氧化物高温超导体相似, 研究人员试图寻找二者在超导机理上的相关之处, 进而尝试通过二维量子材料的平台探索非常规超导机制^[9].

目前, 还有一种观点认为魔角石墨烯的超导现象与关联绝缘态具有不同的来源, 魔角石墨烯可能并不遵守非常规超导机理. 在双层魔角石墨烯样品的实验中, Efetov 课题组^[33]通过改变样品与栅极之间的 hBN 介电层厚度, 调控金属栅极的屏蔽效应进而改变电子之间库仑势. 实验发现, 当其距离减小至关联绝缘态消失时, 仍可观测到超导态, 甚至开始占据原本绝缘态的区域, 因此二者可能存在竞争关系^[33]. 此外, 在略微偏离魔角尺度 (如 1.15°) 的转角石墨烯体系中, 观察到没有绝缘态出现的超导现象, 如图 3(c) 所示. 更进一步, Nadj-Perge 课题组^[34]在转角石墨烯与其上方的 hBN 之间增加 WSe_2 绝缘介质, 在更小的转角 (如 0.79°) 处也观察到超导态. 这暗示了介电环境对转角二维材料中电子态结构的影响^[35], 也佐证了超导态和关联绝缘态的来源不同. 研究者进而尝试采用 Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理论电子-声子散射解释魔角石墨烯体系中的超导电阻与温度的线性关系^[36–39]: 电子-声子耦合的增强, 使半填充状态下的电子形成库珀对, 材料出现超导行为^[38]; 也由于电子-声子的耦合, 电阻温度系数增大^[39].

而 Yazdani 课题组^[40]通过密度可调扫描隧道谱和点接触谱, 发现双层魔角石墨烯在空穴掺杂时的超导相仍然具有非常规超导的特征. 如图 3(d)–(f) 所示, STS 谱线并没有出现与 BCS 超导态线形一致的各向同性带隙, 反而表现为与节点超导体相似的“V”型带隙. 点接触谱图也佐证了这一观点, 表现出非常规超导体中 T_c 附近 Andreev 过剩电

流 (I_{exc}) 被线性抑制的现象 (图 3(f)), 且在材料超导态被抑制的情况下, 隧穿能隙 Δ_T 仍然存在, 表明了赭隙相的存在. 此外, 当魔角石墨烯与基底 hBN 对齐时, 均不表现出赭能隙和超导态. 以上魔角石墨烯中的超导性质均与 BCS 机制相悖. 近期, Kim 课题组^[11]与 Jarillo-Herrero 课题组^[41], 也分别制备出旋转角度窗口更大的三层魔角石墨烯 ($\theta \approx \pm 1.56^\circ, \pm 1.57^\circ$), 通过掺杂和电位移场 D 的调节, 发现超导态发生在莫尔带极化处, 而且在高电位移场处受到范霍夫奇点的影响 (图 3(g)), 这也与 BCS 理论弱耦合的解释不一致, 而非常规超导机制可能才是此体系中的超导产生的内在根源^[11].

为了比较几种超导现象的理论解释, 如传统电子声子耦合理论、环形费米液体等, Young 课题组^[42]成功构建了稳定的 ABC-hBN 异质结构, 并尝试用不同的理论解释其超导现象. 该材料除了可以作为理解超导机制的实验平台, 同时使基于相关电子现象和弹道电子输运的新型磁场控制电子器件成为可能^[43]. 到目前为止, 转角石墨烯体系中超导现象的物理机制还在争论当中, 有待进一步的研究和探讨.

2.3.3 量子反常霍尔效应

在转角石墨烯体系的研究中, 除了关联绝缘态和超导态, 还包括有趣的铁磁性和量子反常霍尔效应, 这些发现开启了对魔角石墨烯拓扑性质的讨论^[44,45]. Goldhaber-Gordon 课题组^[44]发现, 当调节垂直于样品方向的磁场时, 转角石墨烯 ($1.20^\circ \pm 0.01^\circ$) 表现出磁滞现象和反常霍尔效应 (图 4(a) 和图 4(b)). 实验还发现量子反常霍尔电导存在 $\sigma_{xy} = Ce^2/h$ 的关系 (e 为电子电荷, h 为普朗克常数, 在不同的石墨烯基异质结构中整数 C 不同), 因此绝缘态下的反常霍尔效应可能与铁磁性拓扑绝缘体有关 (图 4(c))^[46].

量子反常霍尔效应发现于转角石墨烯与 hBN 衬底零度对齐的样品^[44,47]. 基底 hBN 会破坏转角石墨烯的 C_2 旋转对称性, 在狄拉克点产生带隙, 形成简并的单粒子谷 Chern 平带. 电子-电子相互作用可以降低这些带的简并度, 导致自旋/谷极化绝缘体的产生^[45,47]. 具体来讲, 双层魔角石墨烯的平带 $C_2\tau$ 对称性保护了价带和导带之间的狄拉克点, 而与衬底的相互作用可以通过 C_2 和 (或) τ 对称性破缺项, 在狄拉克点处打开能隙, 产生具有

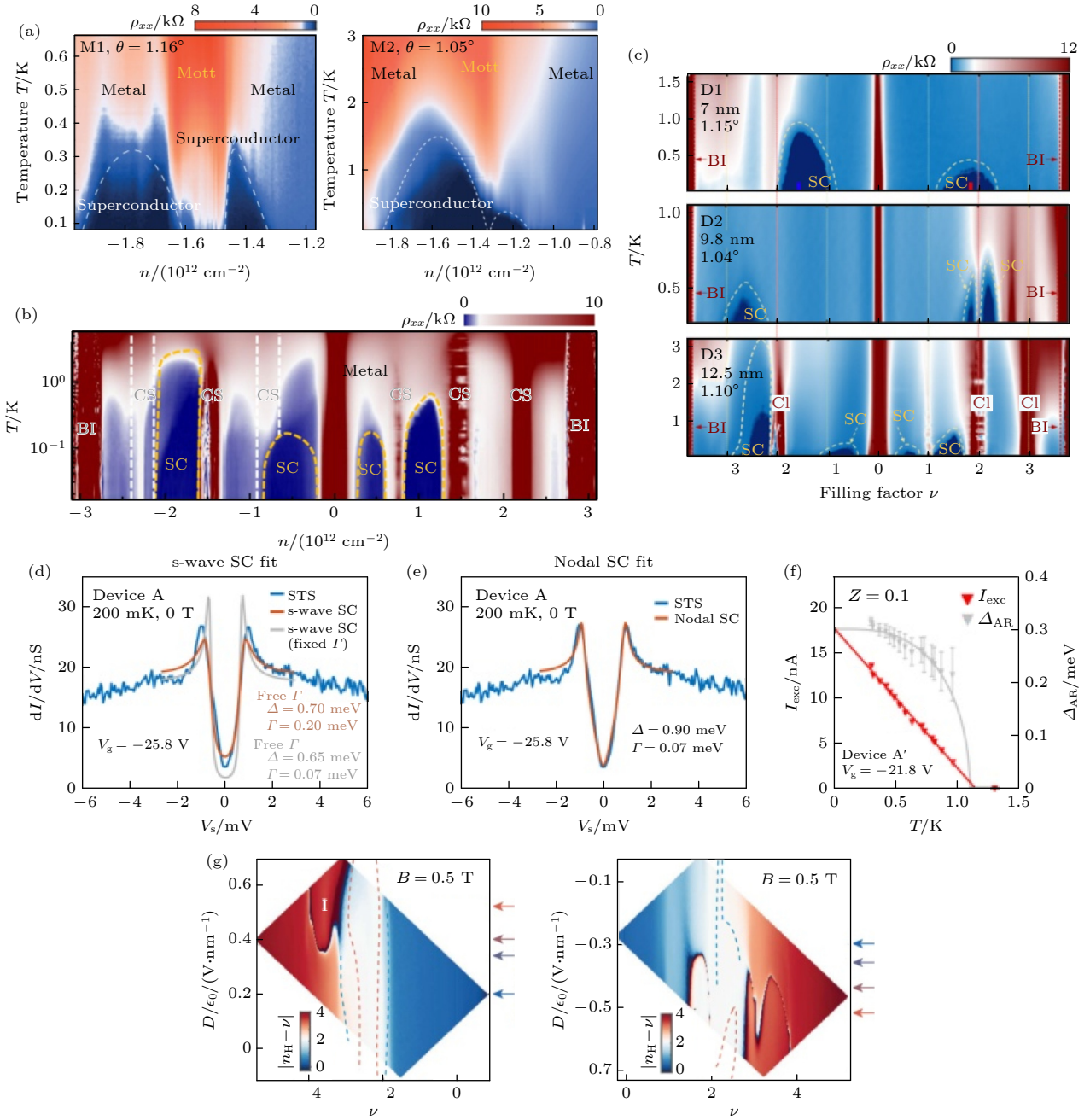


图3 魔角石墨烯非常规超导电 (a), (b) 电阻与温度和载流子浓度的关系, 显示出魔角石墨烯在 (a) 半填充^[2] 和 (b) 整数填充^[25] 绝缘态附近的超导圆顶; (c) 三个屏蔽调控的魔角石墨烯电阻与温度和填充因子关系, 在整数填充附近呈现关联绝缘态消失的超导特征^[33]; 利用 Dynes 方程对 (d) s 波超导体和 (e) 节点超导体的准粒子态密度模型进行实验谱学上的模拟^[40]; (f) 过剩电流、超导能隙与温度的关系^[40]; (g) 相对霍尔密度 $|n_H - \nu|$ 随载流子浓度和电位移场的变化^[11]

Fig. 3. Unconventional superconductivity of magic-angle graphene: (a), (b) Resistance as a function of temperature and carrier density, where shows superconductivity domes around (a) half-filling^[2] and (b) integer-filling^[25] correlated states of magic-angle graphene respectively; (c) colour plot of resistivity versus moiré band filling factor ν and temperature for three screening-controlled magic-angle TBG devices, which shows correlated insulators are completely absent, while superconductivity persists^[33]; Dynes-function fits to the experimental tunneling spectrum using the model quasiparticle density of states for (d) s-wave superconductor and (e) nodal superconductor^[40]; (f) excess current and the superconducting energy gap versus temperature^[40]; (g) subtracted Hall density $|n_H - \nu|$ as a function of carrier density and electric displacement field^[11].

Chern 数为 ± 1 的简并平坦的 Chern 带, 通过降低 (增加) 被占用 (未被占用) 子带的能量而降低了朗道自由能^[15]. Goldhaber-Gordon 课题组^[44] 在 $\nu = +3$

附近观察到 $C = +1$ 的 Chern 绝缘相, 就是由 hBN 对齐导致了 C_2 对称性破缺质量项, 在 K 和 K' 谷中产生了 Chern 数相反的平坦子带^[47]. 因此, 相互

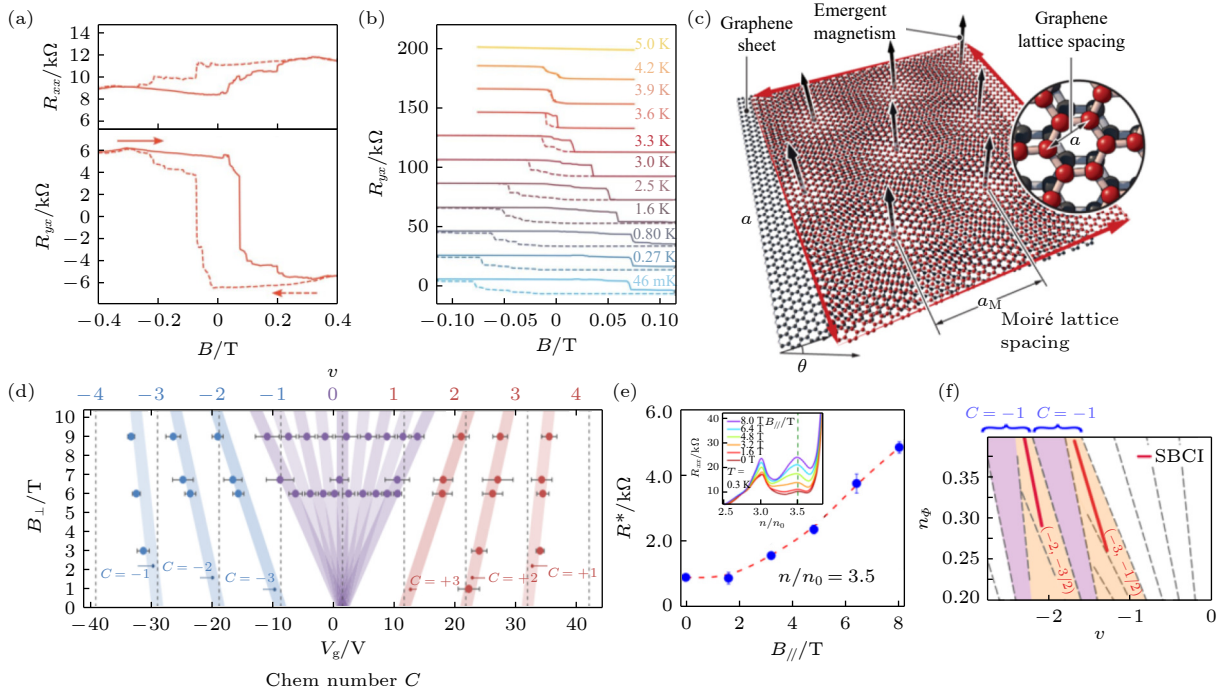


图 4 转角石墨烯的量子反常霍尔效应 (a) 30 mK 下, 3/4 填充魔角石墨烯霍尔电阻随磁场的变化; (b) $\theta = 1.20^\circ \pm 0.01^\circ$ 时, 不同温度下 3/4 填充魔角石墨烯霍尔电阻随磁场的变化 [44]; (c) 魔角石墨烯铁磁性拓扑绝缘性质示意图 [46]; (d) 强关联 Chern 绝缘体对磁场的量子化响应 [15]; (e) $T = 0.3$ K, $n/n_0 = 3.5$ 时, 纵向电阻 R^* 与平面内磁场 B_{\parallel} 的关系 [48]; (f) Chern 绝缘体示意图, 红线对应于 $(t, s) = (-2, -3/2)$ 和 $(-3, -1/2)$ 的对称破缺 Chern 绝缘体 (s 是布洛赫带填充指数; t 是与带隙相关的总 Chern 数) [49]

Fig. 4. Anomalous Hall Effect of magic-angle graphene: (a) Hall resistance of twisted graphene tested as a function of magnetic fields at 30 mK near three-quarters filling; (b) Hall resistance of twisted graphene tested as a function of magnetic fields at different temperatures near three-quarters filling at $\theta = 1.20^\circ \pm 0.01^\circ$ [44]; (c) schematic of the ferromagnetic topological insulator property of magic-angle graphene [46]; (d) quantized magnetic-field response of strongly correlated Chern insulating phases [15]; (e) in-plane field B_{\parallel} dependence of longitudinal R^* , at $n/n_0 = 3.5$, at $T = 0.3$ K [48]; (f) schematic of Chern insulator states, with red lines corresponding to SBCIs with $(t, s) = (-2, -3/2)$ and $(-3, -1/2)$ (s is the Bloch band filling index; t is the total Chern number associated with a given gap) [49].

作用可以自发地打破时间反演对称性, 使该系统发生谷极化, 形成 1 个单一的 Chern 子带, 与实验观察到的 $C = +1$ 态相一致, 相当于量子霍尔铁磁性 [15]. 而在没有 hBN 对齐的情况下观察到 $\nu = +3$ 附近的 $C = +1$ 状态, 可能说明强相互作用自发地产生 C_2 破缺质量项及打破平带自旋/能谷, 诱导出类似于 hBN 对齐样品的拓扑带. 因此, 在莫尔平带系统中, 拓扑相的产生和强关联也有关系.

在高磁场辅助下, Yazdani 课题组 [15] 利用 STS 对双层魔角石墨烯中拓扑绝缘相进行了探索, 并观测到随填充因子变化的 Chern 数 (图 4(d)). Andrei 课题组 [48] 通过输运测量, 在双层魔角石墨烯中观察到与 $\nu = 1, 2, 3$ 相对应的 $C = 3, 2, 1$ 的 Chern 绝缘体, 并揭示了一系列整数填充非平庸子带结构, 其形成与类似 Stoner 不稳定性及范霍夫奇点有关; 在超过 5 T 的磁场下, 还观察到一个 3.5 填充的范霍夫峰 (图 4(e)), 因此他们预测在更高磁场

下可能存在分数 Chern 绝缘体; 另外在这个范霍夫奇点展现了熵驱动的 Pomeranchuk 样相变的特征, 即温度升高从金属态转变为绝缘态. 同时 Young 课题组 [49] 在磁场条件下的魔角石墨烯体系中 $C = -2$ 子带半填充时, 观察到强关联作用导致的超晶格对称性破缺的 Chern 绝缘态 (图 4(f)). 虽然这种情况曾经在与 hBN 对齐的石墨烯异质结中出现, 但所需磁场比该实验中 (8 T) 高一倍. 他们预测在莫尔平带系统中, 适当的时间反演对称破缺时, 即便在 $B = 0$ T, 也可能获得 Chern 带分数填充的奇异基态.

3 二维过渡金属硫族化合物材料中的平带

众所周知, 材料的晶体结构会产生一个晶格周期势, 电子会受其影响最终形成电子能带结构. 而转角二维材料的旋转堆叠又会引入一个新的莫

尔周期势, 这个周期势成为转角二维材料性能调节的一个重要自由度^[50]. 转角二维量子材料引发的电子平带结构为人们模拟 Hubbard 模型以及讨论多体强关联效应提供了研究平台. 在这些二维量子材料中, 除了转角石墨烯体系, TMDs 异质结也具备相当大的研究潜力^[51–53].

TMDs 与石墨烯一样具有层间可解离的结构, 在第一布里渊区 K 点附近也具有能谷; 而奇数层 TMD 由于空间反演对称性破缺, 存在不等价的两类能谷 K 和 K' , 其自旋劈裂的能谷自旋是相反的^[54,55]. 因此可以通过光学选择性, 在单层 TMD 中调控能谷自由度的研究, 称为谷电子学^[56]. 研究人员进一步还发现了本征谷电子霍尔效应, 使室温下谷电子器件的制备成为了可能^[57]. 再者, TMD 由于较大的相对原子质量, 具有较强的自旋-轨道

耦合, 为研究者提供了自旋电子学的研究平台^[58].

3.1 平带产生的位置和机制

相比于石墨烯体系只能在 1.1° 附近的转角范围实现平带结构, 理论预测 TMDs 可以在更大的角度范围内形成莫尔超晶格和平带^[59]. Tutuc 和 LeRoy 课题组^[51] 通过 STS 观测到了 3° 和 57.5° 转角双层 WSe_2 体系中的平带结构, 并且发现两种体系中平带出现的空间位置不同, 此结论也与第一性原理理论预测结果一致.

中国香港科技大学罗锦团、王宁、林念课题组^[60] 利用低温 STM, 发现在转角 $60^\circ \pm 3^\circ$ 以内, 价带边缘出现了带宽小于 10 meV 的平带, 且转角越接近 60° , 平带的数量增加、带宽减小, 如图 5(a)–(c) 所示. 他们进一步通过理论计算推测平带产生不仅

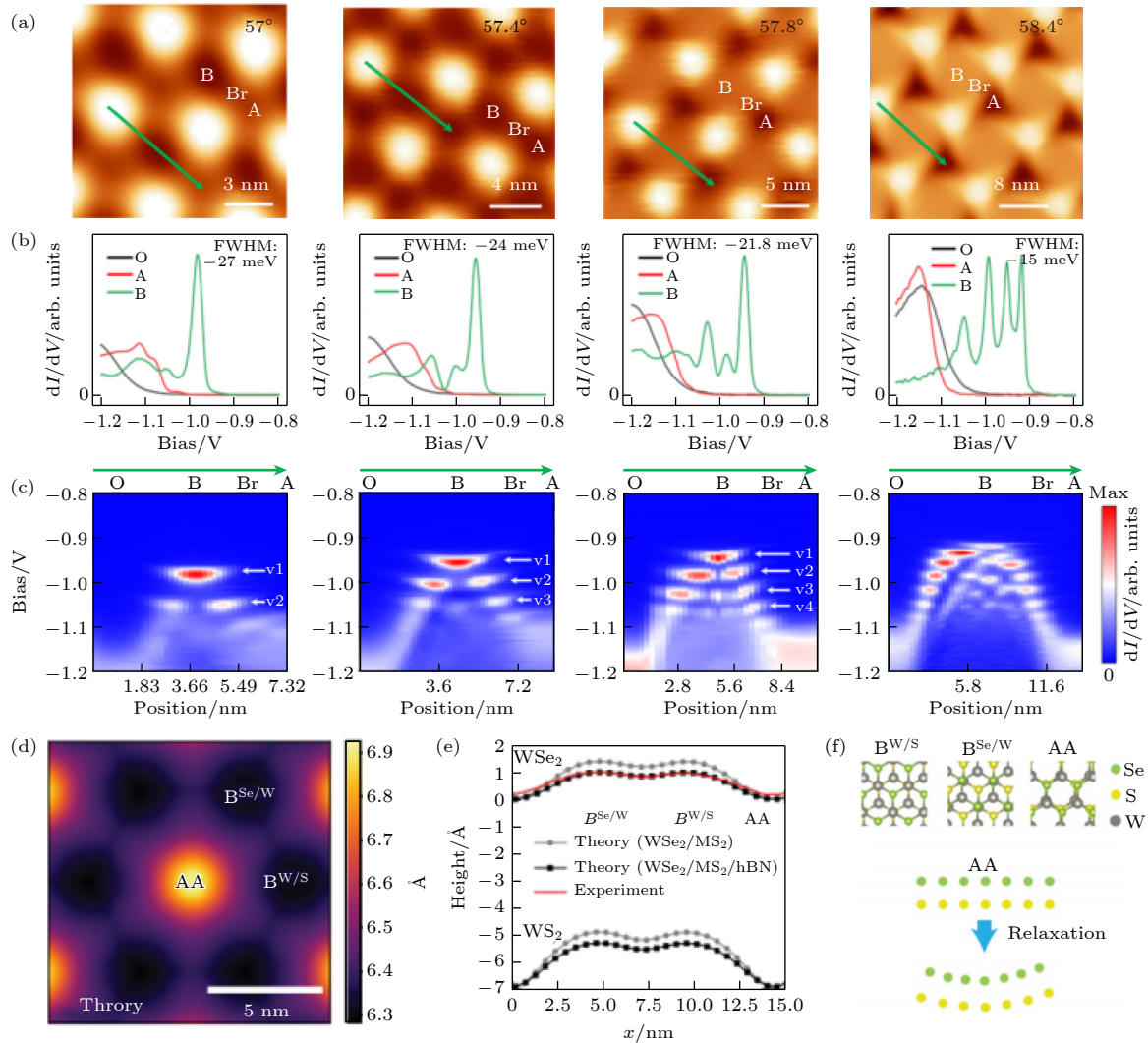


图 5 (a)–(c) 不同转角双层 WSe_2 的 STS 分析^[60]; (d)–(f) WSe_2/WS_2 异质结莫尔超晶格重构^[52]

Fig. 5. (a)–(c) STS of twisted bilayer- WSe_2 with different twisted angles^[60]; (d)–(f) moiré superlattice reconstruction of WSe_2/WS_2 heterostructure^[52].

与层间杂化有关, 还来源于莫尔超晶格中的原子级重构, 所观测到的平带数量和波函数的空间分布也证明了这种重构对平带的影响. 与之类似, 在 WSe_2/WS_2 异质结的低温 STS 工作中, Li 课题组 [52] 发现在异质结中存在平面内应力的重新分布, 形成如图 5(d)—(f) 中的三维弯曲重构, 从而主导了在价带边缘出现 K 点局域的莫尔平带.

3.2 平带相关的物态

为了调控石墨烯异质结中的平带特征, 研究人员构建了 TDBG 与 ABC-hBN 等多种堆叠结构, 并引入电场、磁场和应力等外部因素. 相比于石墨烯, TMD 材料具有更大的电子有效质量、空间反演对称性破缺和更强的自旋轨道耦合效应, 理论预测认

为转角 TMD 材料也可以产生平带, 且由于其低能区域 Wannier 轨道态的严格约束 [61], 可以比双层魔角石墨烯更准确地模拟 Hubbard 模型 [62]. 另外与双层魔角石墨烯相比, TMD 的转角窗口更大 [59], 为平带物理器件的设计与模型参数的控制提供了更广阔的调节空间. 最后, TMD 中自旋-谷的自由度耦合, 简并度降低, 致使可以通过电场诱导使小转角 (约 2°) 材料从平庸绝缘态过渡到拓扑绝缘态 [63].

3.2.1 关联绝缘态

Pasupathy 和 Dean 课题组 [64] 采用与石墨烯异质结相似的“原位解理-堆叠”法, 制备出转角双层 WSe_2 异质结, 如图 6(a) 所示. 在低温输运实验中, 他们发现当平带被半填充时, 体系表现为转角

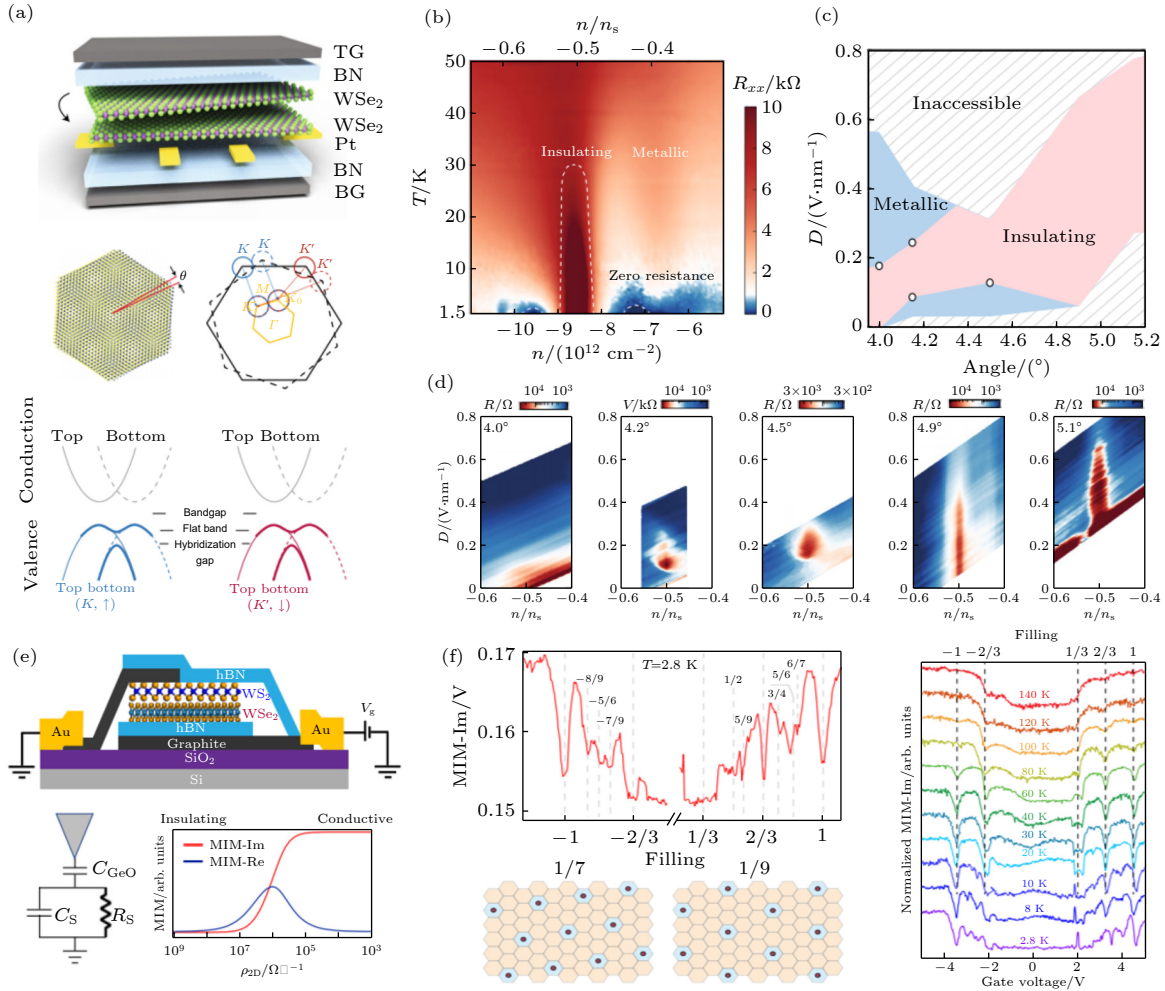


图 6 (a) 转角 WSe_2 异质结示意图与莫尔超晶格平带结构 [64]; (b) 电阻随温度和载流子浓度变化的相图 ($D = 0.45 \text{ V/nm}$, $\theta = 5.1^\circ$, 顶部栅压 $V_{\text{tg}} = -12.25 \text{ V}$) [64]; (c), (d) 转角与电位移场共同调制的关联绝缘态 [64]; (e) WS_2/WSe_2 异质结器件结构示意图 [67]; (f) 2.8—140 K 时的关联绝缘态以及晶格填充情况的蒙特卡罗模拟 [67]

Fig. 6. (a) Schematic of the twisted bilayer- WSe_2 sample and the moiré superlattice flat bands structure [64]; (b) resistance color plotted against temperature and carrier density ($D = 0.45 \text{ V/nm}$, $\theta = 5.1^\circ$, top gate $V_{\text{tg}} = -12.25 \text{ V}$) [64]; (c), (d) angle and electric displacement field dependence of the correlated insulating states [64]; (e) schematic of the WS_2/WSe_2 device structure [67]; (f) correlated insulating states at a temperature range from 2.8 K to 140 K and spatial filling patterns gained from Monte Carlo simulation [67].

和电位移场可调制的关联绝缘态; 在低于 3 K 时, 同在半掺杂附近出现了零电阻相, 这表明此关联绝缘态有过渡到超导态的可能性 (图 6(b)—(d)).

而 WS_2/WSe_2 的异质结材料在平带半填充状态下, 也出现了相似的关联绝缘态. MacDonald, Shan 与 Mak 课题组 [65] 通过由外磁场与栅电压调控载流子浓度, 在莫尔超晶格半填充状态下, 观察到与 Hubbard 理论一致的具有反铁磁规律的 Mott 绝缘态, 当填充因子达到 0.6 左右时, 反铁磁性转变为弱铁磁性. 值得注意的是, 与转角双层 WSe_2 的超晶格整数填充的关联绝缘态不同, WS_2/WSe_2 异质结即使在分数填充时也可以表现出关联绝缘态. 起初在每个莫尔单元填充一个空位的 Mott 绝缘态和每个莫尔单元填充 $1/3$ 和 $2/3$ 空位的广义

维格纳晶态的出现, 说明最近邻莫尔单元之间有强相互作用 [66]. 同时, 在更长程的范围里, 人们发现了更多的分数填充的关联绝缘态: 在 WS_2/WSe_2 异质结中 (图 6(e)), 分数填充 (比如 $+1/6$, $\pm 1/3$ 和 $\pm 3/4$ 等) 时也出现了关联绝缘状态 [67]; 有些关联绝缘态甚至被理论预言可以保持到 120 K, 这些令人惊奇的现象体现了异质结材料中复杂的强关联作用. 根据库仑气体模型的蒙特卡罗模拟, 分数填充来源于莫尔晶格中具有不同三角形和条纹相空间分布的长程电子序 (图 6(f)) [67].

3.2.2 电子晶体

电荷密度旋转对称性的破缺与条纹相的出现是强相关系统的特征之一, 比如魔角石墨烯体系中就曾观察到电荷的条纹相 [7]. Fu, Shan 和 Mak 课

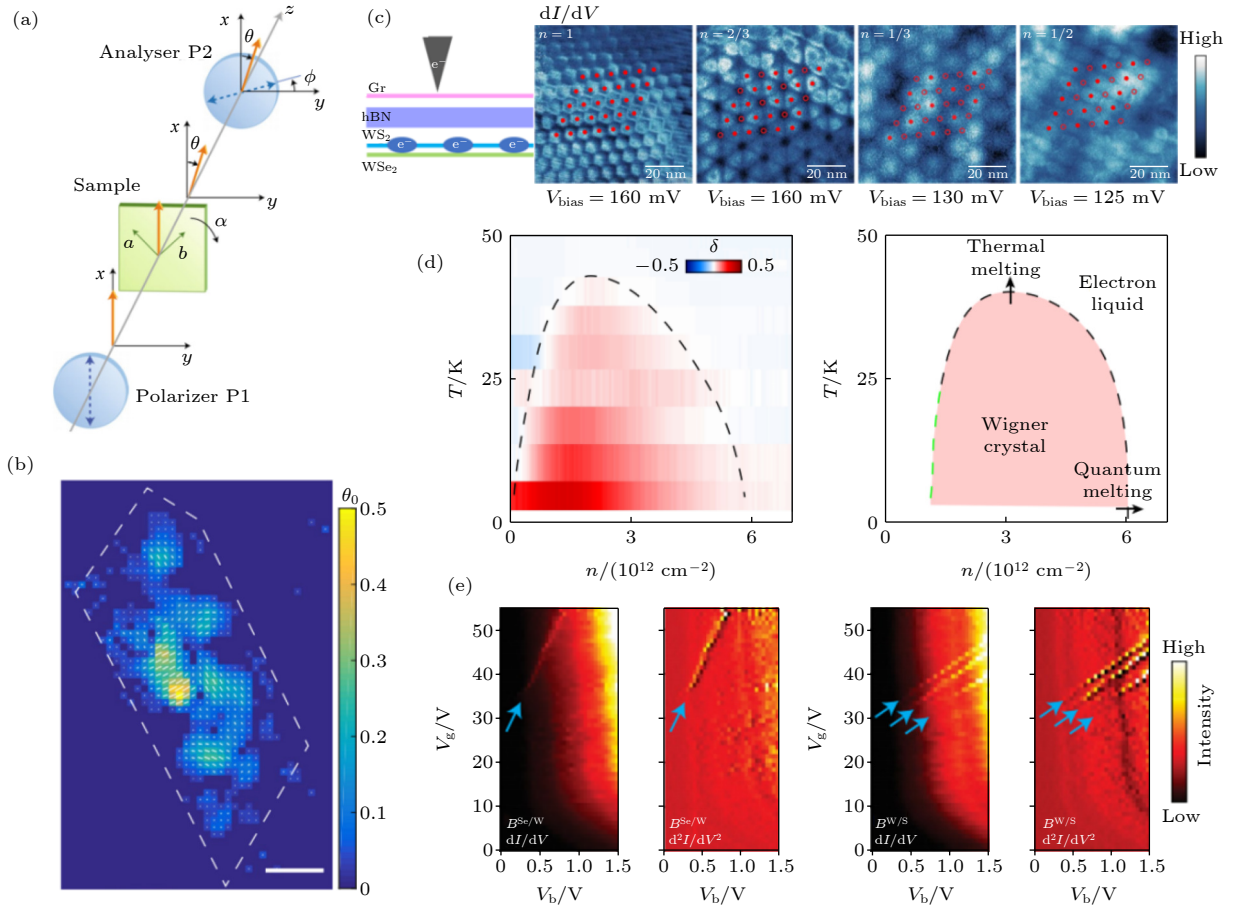


图 7 4% 晶格错配 WS_2/WSe_2 莫尔超晶格 (a) 光学各向异性测量示意图 [68]; (b) $1/2$ 填充时电子条纹的结构域图 [68]; (c) WS_2/WSe_2 异质结示意图及广义 Wigner 晶格 [18]; (d) 双层 MoSe_2 中 Wigner 晶体的量子与温度相变 [20]; (e) 不同栅压下 Se/W 莫尔位点的 dI/dV 谱, 显示出 STM 针尖在莫尔周期里的局部放电现象 (蓝色箭头表示充放电时表面色散特征) [53]

Fig. 7. 4% mismatch WS_2/WSe_2 moiré superlattice: (a) Schematics of optical anisotropy measurement [68]; (b) electronic stripe domain patterns at half filling [68]; (c) schematic of correlated states and generalized Wigner crystal states in a WS_2/WSe_2 moiré superlattice [18]; (d) MoSe_2 bilayer Wigner crystals' quantum and thermal phase transitions [20]; (e) gate-dependent dI/dV spectra measured at the Se/W moiré sites, showing local discharging of moiré site induced by the STM tip (The blue arrows indicate surface dispersion characteristics during charge and discharge) [53].

题组^[68]利用图 7(a) 所示的高灵敏度的光学技术, 在 WSe_2/WS_2 莫尔超晶格中, 观察到电荷密度自发对称破缺引起的条纹相. 他们通过对光学各向异性和电子压缩性的测量, 发现在一个很大的掺杂浓度范围内, 电荷各向异性的特性都有体现, 但在 $1/2$ 填充时达到极大值, 产生了绝缘的条纹相 (图 7(b)); 另外, 在 $1/4$, $2/5$ 和 $3/5$ 填充下也观察到相似的条纹晶体.

Crommie 与 Wang 课题组^[18]发现, WSe_2/WS_2 莫尔超晶格在平带被 $1/2$ 填充时, C_3 对称性被打破, 形成电荷的条纹相; 此外还观察到在 $1/3$, $1/2$ 和 $2/3$ 的分数填充时 Wigner 晶格的实空间图像, 结果见图 7(c). Wigner 晶格出现在载流子浓度较低时, 此时电子库仑势能高于动能, 二维电子连续平移对称性会被打破, 为了降低势能, 电子倾向于规则排列, 因而形成一定的周期性结构. 起初研究人员在高磁场下对单朗道能级进行输运测量观察 Wigner 晶格, Demler 的两个课题组^[19,20]在没有外界磁场的情况下, 对不同堆叠序的 MoSe_2 材料中对 Wigner 晶格进行光学分析, 发现可以在更高的温度, 以及更大的载流子浓度下观察到 Wigner 晶格 (图 7(d)).

在利用 STM 探测 WS_2/WSe_2 的 Wigner 晶格时, 为了避免 STM 针尖对表面电子性质的影响, 研究人员^[18]在异质结的最上面覆盖一层石墨烯, 作为信号传感层. 当 STM 针尖直接接触样品表面时, 观察表面电荷的响应成像, 可以获取 Hubbard 模型参数以及实空间不同位置的能量; 如果倾斜 STM 针尖, 还可以操纵表面电荷状态, 使莫尔超晶格出现关联电子的局部级联放电, 进而可以估算其最近邻库仑相互作用^[53], 见图 7(e).

4 结论与展望

本文主要围绕转角二维量子材料领域平带电子学的研究历程和最新研究成果进行了梳理和介绍. 关联绝缘态、超导态、量子反常霍尔效应、电子对称性破缺等诸多现象都说明石墨烯与 TMD 的转角异质结体系是研究强关联量子物态和模拟 Hubbard 模型的良好研究平台; 然而, 关于转角二维材料的研究仍存在一些问题, 对于许多观察到的现象也有待进一步的深入讨论, 比如在转角石墨烯中, 对半填充附近非常规超导现象的解释、量子反

常霍尔效应的原理机制等.

同时, 除了本文着重介绍的电子学相关的新奇物性, 转角二维体系中的平带在光子学中也有许多重要的研究^[69]. 相较于电子, 转角光子结构中相邻成分的波长差可以从亚纳米量级到光子波长进行调制; 另外, 层间电磁耦合也为转角体系的设计引入了新的自由度^[69]. 因此, 转角光子结构有望提供新奇的光-物质作用的实验平台, 进而推动一系列光子学方面的应用^[70–72]. 比如, 魔角激光器的莫尔超晶格与光子晶体单缺陷激光腔结构相比, 具有模式体积小、质量因子高和带宽小的优点, 这使实现紧凑和可重构的纳米激光阵列成为可能^[72]. 另外, 转角材料平带体系还可以进行激子方面的相关探索. 比如, 二维 TMD 结构中出现了束缚能较大的激子, 当与转角体系相结合时, 层间激子受到莫尔周期势的调制形成莫尔激子^[73]. 此外, 二维转角量子材料还为人们提供了其他更广泛的探索空间, 比如二维准晶体^[74]、费米液体^[75]等. 随着人们测量手段的不断提高和更加深入的理解, 可以预测未来在转角二维量子材料体系中还将发现更多令人惊喜的新奇量子物态.

参考文献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [2] Cao Y, Fatemi V, Fang S, Watanabe K, Taniguchi T, Kaxiras E, Jarillo-Herrero P 2018 *Nature* **556** 43
- [3] Cao Y, Fatemi V, Demir A, Fang S, Tomarken S L, Luo J Y, Sanchez-Yamagishi J D, Watanabe K, Taniguchi T, Kaxiras E, Ashoori R C, Jarillo-Herrero P 2018 *Nature* **556** 80
- [4] Li G, Luican A, Lopes dos Santos J M B, Castro Neto A H, Reina A, Kong J, Andrei E Y 2010 *Nat. Phys.* **6** 109
- [5] Yin L J, Qiao J B, Zuo W J, Li W T, He L 2015 *Phys. Rev. B* **92** 081406
- [6] Bistritzer R, MacDonald A H 2011 *PNAS* **108** 12233
- [7] Jiang Y H, Lai X Y, Watanabe K, Taniguchi T, Haule K, Mao J H, Andrei E Y 2019 *Nature* **573** 91
- [8] Kerelsky A, McGilly L J, Kennes D M, Xian L, Yankowitz M, Chen S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Dean C, Rubio A, Pasupathy A N 2019 *Nature* **572** 95
- [9] Xie Y L, Lian B, Jäck B, Liu X M, Chiu C L, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Yazdani A 2019 *Nature* **572** 101
- [10] Yankowitz M, Chen S, Polshyn H, Zhang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Graf D, Young A F, Dean C R 2019 *Science* **363** 1059
- [11] Hao Z Y, Zimmerman A M, Ledwith P, Khalaf E, Najafabadi Danial H, Watanabe K, Taniguchi T, Vishwanath A, Kim P 2021 *Science* **371** 1133
- [12] Jiao L, Howard S, Ran S, Wang Z Y, Rodriguez J O, Sigrist M, Wang Z Q, Butch N P, Madhavan V 2020 *Nature* **579** 523

- [13] Falson J, Xu Y, Liao M H, Zang Y Y, Zhu K, Wang C, Zhang Z, Liu H C, Duan W H, He K, Liu H W, Smet J H, Zhang D, Xue Q K 2020 *Science* **367** 1454
- [14] Choi Y J, Kim H, Peng Y, Thomson A, Lewandowski C, Polski R, Zhang Y R, Arora H S, Watanabe K, Taniguchi T, Alicea J, Nadj-Perge S 2021 *Nature* **589** 536
- [15] Nuckolls K P, Oh M, Wong D, Lian B, Watanabe K, Taniguchi T, Bernevig B A, Yazdani A 2020 *Nature* **588** 610
- [16] Chen Q Y, Luo X B, Xie D H, Li M L, Ji X Y, Zhou R, Huang Y B, Zhang W, Feng W, Zhang Y, Huang L, Hao Q Q, Liu Q, Zhu X G, Liu Y, Zhang P, Lai X C, Si Q, Tan S Y 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 106402
- [17] Chen S, He M, Zhang Y H, Hsieh V, Fei Z, Watanabe K, Taniguchi T, Cobden D H, Xu X, Dean C R, Yankowitz M 2021 *Nat. Phys.* **17** 374
- [18] Li H Y, Li S W, Regan E C, Wang D Q, Zhao W Y, Kahn S, Yumigeta K, Blei M, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Zettl A, Crommie M F, Wang F 2021 *Nature* **597** 650
- [19] Smoleński T, Dolgirev P E, Kuhlenskamp C, Popert A, Shimazaki Y, Back P, Lu X, Kroner M, Watanabe K, Taniguchi T, Esterlis I, Demler E, Imamoğlu A 2021 *Nature* **595** 53
- [20] Zhou Y, Sung J, Brutschea E, Esterlis I, Wang Y, Scuri G, Gelly R J, Heo H, Taniguchi T, Watanabe K, Zaránd G, Lukin M D, Kim P, Demler E, Park H 2021 *Nature* **595** 48
- [21] Andrei E Y, MacDonald A H 2020 *Nat. Mater.* **19** 1265
- [22] Yankowitz M, Xue J M, Cormode D, Sanchez-Yamagishi J D, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P, Jacquod P, LeRoy B J 2012 *Nat. Phys.* **8** 382
- [23] Andrei E Y, Li G, Du X 2012 *Rep. Prog. Phys.* **75** 056501
- [24] Brihuega I, Mallet P, González-Herrero H, Trambly de Laissardiére G, Ugeda M M, Magaud L, Gómez-Rodríguez J M, Ynduráin F, Veuillen J Y 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 196802
- [25] Lu X B, Stepanov P, Yang W, Xie M, Aamir M A, Das I, Urgell C, Watanabe K, Taniguchi T, Zhang G Y, Bachtold A, MacDonald A H, Efetov D K 2019 *Nature* **574** 653
- [26] Cong C X, Yu T 2014 *Nat. Commun.* **5** 4709
- [27] Kim K, Yankowitz M, Fallahzad B, Kang S, Movva H C P, Huang S Q, Larentis S, Corbet C M, Taniguchi T, Watanabe K, Banerjee S K, LeRoy B J, Tutuc E 2016 *Nano Lett.* **16** 1989
- [28] Choi Y, Kemmer J, Peng Y, Thomson A, Arora H, Polski R, Zhang Y, Ren H, Alicea J, Refael G, von Oppen F, Watanabe K, Taniguchi T, Nadj-Perge S 2019 *Nat. Phys.* **15** 1174
- [29] Chen G R, Jiang L L, Wu S, Lyu B S, Li H Y, Chittari B L, Watanabe K, Taniguchi T, Shi Z W, Jung J, Zhang Y B, Wang F 2019 *Nat. Phys.* **15** 237
- [30] Chen G R, Sharpe A L, Gallagher P, Rosen I T, Fox E J, Jiang L L, Lyu B S, Li H Y, Watanabe K, Taniguchi T, Jung J, Shi Z, Goldhaber-Gordon D, Zhang Y B, Wang F 2019 *Nature* **572** 215
- [31] Mao J H, Milovanović S P, Andelković M, Lai X Y, Cao Y, Watanabe K, Taniguchi T, Covaci L, Peeters F M, Geim A K, Jiang Y H, Andrei E Y 2020 *Nature* **584** 215
- [32] Shen C, Chu Y B, Wu Q S, Li N, Wang S P, Zhao Y C, Tang J, Liu J Y, Tian J P, Watanabe K, Taniguchi T, Yang R, Meng Z Y, Shi D X, Yazyev O V, Zhang G Y 2020 *Nat. Phys.* **16** 520
- [33] Stepanov P, Das I, Lu X B, Fahimniya A, Watanabe K, Taniguchi T, Koppens F H L, Lischner J, Levitov L, Efetov D K 2020 *Nature* **583** 375
- [34] Arora H S, Polski R, Zhang Y, Thomson A, Choi Y J, Kim H, Lin Z, Wilson I Z, Xu X D, Chu J H, Watanabe K, Taniguchi T, Alicea J, Nadj-Perge S 2020 *Nature* **583** 379
- [35] Saito Y, Ge J Y, Watanabe K, Taniguchi T, Young A F 2020 *Nat. Phys.* **16** 926
- [36] Berdyugin A I, Xu S G, Pellegrino F M D, Kumar R K, Principi A, Torre I, Shalom M B, Taniguchi T, Watanabe K, Grigorieva I V, Polini M, Geim A K, Bandurin D A 2019 *Science* **364** 162
- [37] Gallagher P, Yang C S, Lyu T, Tian F L, Kou R, Zhang H, Watanabe K, Taniguchi T, Wang F 2019 *Science* **364** 158
- [38] Lian B, Wang Z, Bernevig B A 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 257002
- [39] Choi Y W, Choi H J 2018 *Phys. Rev. B* **98** 241412
- [40] Oh M, Nuckolls K P, Wong D, Lee R L, Liu X M, Watanabe K, Taniguchi T, Yazdani A 2021 *Nature* **600** 240
- [41] Park J M, Cao Y, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P 2021 *Nature* **590** 249
- [42] Zhou H X, Xie T, Taniguchi T, Watanabe K, Young A F 2021 *Nature* **598** 434
- [43] Zhou H X, Xie T, Ghazaryan A, Holder T, Ehrets J R, Spanton E M, Taniguchi T, Watanabe K, Berg E, Serbyn M, Young A F 2021 *Nature* **598** 429
- [44] Sharpe A L, Fox E J, Barnard A W, Finney J, Watanabe K, Taniguchi T, Kastner M A, Goldhaber-Gordon D 2019 *Science* **365** 605
- [45] Liu J P, Dai X 2021 *Phys. Rev. B* **103** 035427
- [46] Pixley J H, Andrei E Y 2019 *Science* **365** 543
- [47] Serlin M, Tschirhart C L, Polshyn H, Zhang Y, Zhu J, Watanabe K, Taniguchi T, Balents L, Young A F 2020 *Science* **367** 900
- [48] Wu S, Zhang Z Y, Watanabe K, Taniguchi T, Andrei E Y 2021 *Nat. Mater.* **20** 488
- [49] Saito Y, Ge J Y, Rademaker L, Watanabe K, Taniguchi T, Abanin D A, Young A F 2021 *Nat. Phys.* **17** 478
- [50] Gao X G, Li X K, Xin W, Chen X D, Liu Z B, Tian J G 2020 *Nanophotonics* **9** 1717
- [51] Zhang Z M, Wang Y M, Watanabe K, Taniguchi T, Ueno K, Tutuc E, LeRoy B J 2020 *Nat. Phys.* **16** 1093
- [52] Li H Y, Li S W, Naik M H, Xie J X, Li X Y, Wang J Y, Regan E, Wang D Q, Zhao W Y, Zhao S H, Kahn S, Yumigeta K, Blei M, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Zettl A, Louie S G, Wang F, Crommie M F 2021 *Nat. Mater.* **20** 945
- [53] Li H Y, Li S W, Naik M H, Xie J X, Li X Y, Regan E, Wang D Q, Zhao W Y, Yumigeta K, Blei M, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Zettl A, Louie S G, Crommie M F, Wang F 2021 *Nat. Phys.* **17** 1114
- [54] Xiao D, Liu G B, Feng W X, Xu X D, Yao W 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 196802
- [55] Zhu Z Y, Cheng Y C, Schwingenschlögl U 2011 *Phys. Rev. B* **84** 153402
- [56] Zhao C, Norden T, Zhang P Y, Zhao P Q, Cheng Y C, Sun F, Parry J P, Taheri P, Wang J Q, Yang Y H, Scrase T, Kang K F, Yang S, Miao G X, Sabirianov R, Kioseoglou G, Huang W, Petrou A, Zeng H 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 757
- [57] Wu Z F, Zhou B T, Cai X B, Cheung P, Liu G B, Huang M Z, Lin J X Z, Han T Y, An L H, Wang Y W, Xu S G, Long G, Cheng C, Law K T, Zhang F, Wang N 2019 *Nat. Commun.* **10** 611
- [58] Cui J, Li P L, Zhou J D, He W Y, Huang X W, Yi J, Fan J, Ji Z Q, Jing X N, Qu F M, Cheng Z G, Yang C L, Lu L, Suenaga K, Liu J W, Law K T, Lin J H, Liu Z, Liu G T 2019 *Nat. Commun.* **10** 2044

- [59] Naik M H, Jain M 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 266401
- [60] Li E, Hu J X, Feng X M, Zhou Z S, An L H, Law K T, Wang N, Lin N 2021 *Nat. Commun.* **12** 5601
- [61] Wu F C, Lovorn T, Tutuc E, MacDonald A H 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 026402
- [62] Koshino M, Yuan N F Q, Koretsune T, Ochi M, Kuroki K, Fu L 2018 *Phys. Rev. X* **8** 031087
- [63] Wu F C, Lovorn T, Tutuc E, Martin I, MacDonald A H 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 086402
- [64] Wang L, Shih E M, Ghiotto A, Xian L D, Rhodes D A, Tan C, Claassen M, Kennes D M, Bai Y S, Kim B, Watanabe K, Taniguchi T, Zhu X Y, Hone J, Rubio A, Pasupathy A N, Dean C R 2020 *Nat. Mater.* **19** 861
- [65] Tang Y H, Li L Z, Li T X, Xu Y, Liu S, Barmak K, Watanabe K, Taniguchi T, MacDonald A H, Shan J, Mak K F 2020 *Nature* **579** 353
- [66] Regan E C, Wang D Q, Jin C H, Bakti Utama M I, Gao B N, Wei X, Zhao S H, Zhao W Y, Zhang Z C, Yumigeta K, Blei M, Carlström J D, Watanabe K, Taniguchi T, Tongay S, Crommie M, Zettl A, Wang F 2020 *Nature* **579** 359
- [67] Huang X, Wang T M, Miao S N, Wang C, Li Z P, Lian Z, Taniguchi T, Watanabe K, Okamoto S, Xiao D, Shi S F, Cui Y T 2021 *Nat. Phys.* **17** 715
- [68] Jin C H, Tao Z, Li T X, Xu Y, Tang Y H, Zhu J C, Liu S, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J C, Fu L, Shan J, Mak K F 2021 *Nat. Mater.* **20** 940
- [69] Chen J L, Lin X, Chen M Y, Low T, Chen H S, Dai S Y 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 240501
- [70] Wu Z L, Liu Y R, Hill E H, Zheng Y B 2018 *Nanoscale* **10** 18096
- [71] Zhang X Y, Zhong Y H, Low T, Chen H S, Lin X 2021 *Phys. Rev. B* **103** 195405
- [72] Mao X R, Shao Z K, Luan H Y, Wang S L, Ma R M 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 1099
- [73] Jin C H, Regan E C, Yan A M, Iqbal Bakti Utama M, Wang D Q, Zhao S H, Qin Y, Yang S J, Zheng Z R, Shi S Y, Watanabe K, Taniguchi T, Tongay S, Zettl A, Wang F 2019 *Nature* **567** 76
- [74] Ahn S J, Moon P, Kim T H, Kim H W, Shin H C, Kim E H, Cha H W, Kahng S J, Kim P, Koshino M, Son Y W, Yang C W, Ahn J R 2018 *Science* **361** 782
- [75] González J, Stauber T 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 186801

SPECIAL TOPIC—Novel properties of low-dimensional materials

Physical properties of novel electronic states related to flat band in twisted two-dimensional quantum materials*

Wang Zhong-Rui¹⁾ Jiang Yu-Hang^{1)2)†}¹⁾ (College of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)²⁾ (Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 10 January 2022; revised manuscript received 3 March 2022)

Abstract

Two-dimensional (2D) materials can exhibit novel quantum phenomena and be easily tuned by the external environment, which has made them one of the most attractive topics in condensed matter physics during the recent decades. The moiré superlattice induced by varied stacking geometry can further renormalize the material band structure, resulting in the electronic flat bands. With the help of external fields, one can tune the electron-electron correlated interaction in these flat bands, even control the overall physical properties. In this paper we review the recent researches of novel properties in twisted 2D materials (graphene and transition metal dichalcogenide heterostructure), involving strong correlation effect, unconventional superconductivity, quantum anomalous Hall effect, topological phase, and electronic crystals. We also discuss some open questions and give further prospects in this field.

Keywords: two-dimensional quantum materials, moiré superlattice, flat bands, correlation effect**PACS:** 72.80.Vp, 72.80.-r, 42.82.Cr, 68.65.-k, 79.60.Jv**DOI:** 10.7498/aps.71.20220064

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12074377) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China.

† Corresponding author. E-mail: yuhangjiang@ucas.ac.cn