

## 碳化硅衬底上外延双层石墨烯的电输运性质

胡聚罡 贾振宇 李绍春

## Electron transport property of epitaxial bilayer graphene on SiC substrate

Hu Ju-Gang Jia Zhen-Yu Li Shao-Chun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 127204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220062

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220062>

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

#### 铁基超导体的扫描隧道显微镜研究进展

Studies of scanning tunneling spectroscopy on iron-based superconductors

物理学报. 2018, 67(20): 207401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181818>

#### 二维拓扑绝缘体的扫描隧道显微镜研究

Scanning tunneling microscopy study on two-dimensional topological insulators

物理学报. 2019, 68(22): 226801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191631>

#### InGaAs(110)解理面的扫描隧道谱的理论诠释

Theoretical explanation of scanning tunneling spectrum of cleaved (110) surface of InGaAs

物理学报. 2021, 70(19): 196801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210419>

#### 扫描电子显微镜法测定金属衬底上石墨烯薄膜的覆盖度

Coverage measurement of graphene film on metallic substrate using scanning electron microscopy

物理学报. 2018, 67(7): 076802 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172654>

#### Bi (110)薄膜在NbSe<sub>2</sub>衬底上的扫描隧道显微镜研究

Scanning tunneling microscopy research of Bi(110) thin films grown on NbSe<sub>2</sub>

物理学报. 2018, 67(17): 170701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180977>

#### 单层FeSe薄膜/氧化物界面高温超导

Interface enhanced superconductivity in monolayer FeSe film on oxide substrate

物理学报. 2018, 67(20): 207415 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181681>

专题: 低维材料的新奇物性

## 碳化硅衬底上外延双层石墨烯的电输运性质\*

胡聚罡<sup>1)2)#</sup> 贾振宇<sup>1)2)3)#†</sup> 李绍春<sup>1)2)‡</sup>

1) (南京大学物理学院, 固体微结构物理国家重点实验室, 南京 210093)

2) (南京大学人工微结构科学与技术协同创新中心, 南京 210093)

3) (上海天马微电子有限公司, 上海 201201)

(2022 年 1 月 10 日收到; 2022 年 1 月 26 日收到修改稿)

石墨烯是低维材料领域研究的热点, 在这一体系中研究发现了诸多新奇的量子现象, 深入理解石墨烯的电输运性质对于其在未来电子学器件中的应用具有重要的意义. 本文通过热分解的方法在 SiC 单晶衬底上获得外延的双层石墨烯, 并系统研究了其电输运性质. 在小磁场范围内观测到弱局域化效应, 并在较大的磁场区间发现了不饱和线性磁阻. 通过角度依赖的磁阻测量, 发现该线性磁阻现象符合二维体系的磁输运特征. 还在平行场下观测到了负磁阻效应, 可能是由双层石墨烯的转角莫尔条纹导致的局部晶格起伏导致的. 本文工作加深了对于外延生长的层间具有一定转角的双层石墨烯的电输运性质的认识.

**关键词:** 外延双层石墨烯, 磁电阻, 负磁阻, 扫描隧道显微镜**PACS:** 72.80.Vp, 73.43.Qt, 07.79.Cz, 68.55.-a**DOI:** 10.7498/aps.71.20220062

## 1 引言

石墨烯由于具有优异的电子结构和物理性质, 如极高的电子迁移率、有效质量为零的载流子等<sup>[1,2]</sup>, 在未来电子学器件领域具有重要的应用价值. 石墨烯同时还具有优异的机械性能和磁性性质, 在光电、存储、量子计算等领域也有着非常好的发展前景. 双层石墨烯是沿晶体轴旋转不对称的系统, 它层间的相对转角可以调控层间的相互作用, 并呈现出丰富的物理现象<sup>[3-5]</sup>. 深入理解双层石墨烯的电输运性质对于其在未来电子学器件中的应用具有重要的意义.

研究磁阻 (magnetoresistance, MR) 性质是磁性电子器件和自旋电子器件等领域的重要内容<sup>[6]</sup>. 石墨烯的优异磁电阻性质可以应用于磁感应器和

磁存储等器件上<sup>[7]</sup>. 通常情况下, 导体的磁电阻与磁场强度的平方成正比, 在低磁场下饱和, 磁电阻的大小相对较小<sup>[6]</sup>. 对于机械剥离和外延的单层/多层石墨烯体系都已经开展过相关的磁电阻性质研究<sup>[6,8]</sup>. 研究表明, 无论是机械剥离还是外延的石墨烯单层和多层都会出现非饱和的线性磁电阻 (linear magnetoresistance, LMR). 机械剥离的石墨烯单/多层在小磁场范围内还会产生由弱局域化效应导致的负磁阻现象<sup>[9,10]</sup>. 然而, 对于外延的石墨烯体系, 仅在多层中观测到了弱局域化效应, 而在单层的外延石墨烯中并未观测到弱局域化效应<sup>[8]</sup>. 迄今为止, 外延的双层石墨烯体系的磁阻性质还少有报道.

目前为止, 描述 LMR 效应的起源主要是通过两种模型, 即经典模型<sup>[11,12]</sup>和量子模型<sup>[13]</sup>. 前者采用的是电阻网络模拟非均匀导电系统, 发现经典

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11774149, 11790311, 92165205) 和国家重点研发计划 (批准号: 2021YFA1400403) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: jiazhenyu2014@163.com

‡ 通信作者. E-mail: scli@nju.edu.cn

LMR 受无序控制. 后者是针对零带隙和线性色散的材料系统提出的, 认为当所有电子占据到最低的朗道能级 (即所谓的量子极限条件) 时, 可以出现量子 LMR. 量子 LMR 预期会发生在拓扑绝缘体和石墨烯中. 后来的单层<sup>[14]</sup>和多层石墨烯<sup>[6]</sup>研究均报道了量子 LMR, 而经典的 LMR 也在单层石墨烯中被观测到<sup>[15]</sup>. 最近, 在对氢插层的外延双层石墨烯 (hydrogen-intercalated epitaxial bilayer graphene) 的磁阻研究中, 否定了在多层石墨烯中采用的线性磁电阻的量子模型, 并认为由位错导致的电子结构分段 (segmentation of the electronic structure) 是导致经典 LMR 的因素<sup>[16,17]</sup>.

本文聚焦于在 SiC 衬底上外延的石墨烯双层. 首先, 通过在超高真空中快速加热分解的方法, 在 SiC 的 C 终止面上制备出外延的双层石墨烯薄膜, 然后在磁场和变温条件下研究了外延双层石墨烯的电输运性质. 发现在垂直磁场的条件下, 1) 在小场 ( $B < 0.5$  T) 范围内会出现由弱局域化机制导致的负磁阻效应; 2) 在中等磁场强度区间 ( $0.5$  T  $< B < 5$  T) 出现经典的洛伦兹磁阻<sup>[18]</sup>; 3) 在大磁场区间内 ( $5$  T  $< B < 9$  T) 出现未饱和的线性磁阻现象. 这些现象与以往报道的外延多层石墨烯一致. 通过改变磁场与样品的夹角, 还在外延双层石墨烯中观测到平行场下的负磁阻现象<sup>[6]</sup>. 本文的研究结果加深了外延双层石墨烯的磁电输运性质的理解, 对未来开发以石墨烯为基础的磁电子学器件提供了帮助.

## 2 实验部分

SiC 衬底上的外延双层石墨烯是在超高真空分子束外延系统中制备的 (背景真空为  $1 \times 10^{-10}$  mbar,  $1$  bar =  $10^5$  Pa). 放入超高真空中之后, 首先对 6H-SiC (0001) 衬底 (面积大小约为  $10$  mm  $\times$   $2$  mm) 进行除气处理, 接下来将 SiC 衬底置于约  $1450$   $^{\circ}\text{C}$  的温度下进行反复煅烧, 最后再将衬底于约  $650$   $^{\circ}\text{C}$  下退火降温. 通过这种方法在 6H-SiC (0001) 的 C 终止面上热分解得到的双层石墨烯具有较大的台面和接近 1—2 个原子层的平整度. 通过原位反射式高能电子衍射 (reflective high energy electron diffraction, RHEED) 和高分辨扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscopy, STM) 对外延双层石墨烯薄膜的表面质量进行检测. 所有

的薄膜制备和形貌表征实验都是在超高真空的环境下操作的. 输运性质测试则在综合物理性质测试系统 (PPMS) 中完成, 采用标准的四电极法进行电输运测试.

## 3 结果与讨论

碳化硅热分解得到的双层外延石墨烯质量与煅烧和退火的条件都密切相关<sup>[19]</sup>. 图 1(a) 所示为碳化硅热分解得到的双层石墨烯 (BLG/SiC) 的结构示意图. 图 1(b) 所示为生长过程中监测记录的 BLG/SiC 表面的 RHEED 图案. 该图案主要由条纹构成, 表明 BLG/SiC 表面具有原子级的平整度. 图 1(c) 所示为 BLG/SiC 表面获得的 STM 形貌图, 表明 6H-SiC(0001) 衬底在经过高温煅烧和退火处理后具有较大的台面, 并且已经完全被连续的双层石墨烯所覆盖, 表面起伏在 1—2 个原子层左右. 图 1(d) 所示为原子分辨的 STM 形貌图. 除了表面碳原子晶格以外, 还可以清楚地看到莫尔图案, 这是由上下两层石墨烯接近  $4.5^{\circ}$  的转角形成的.

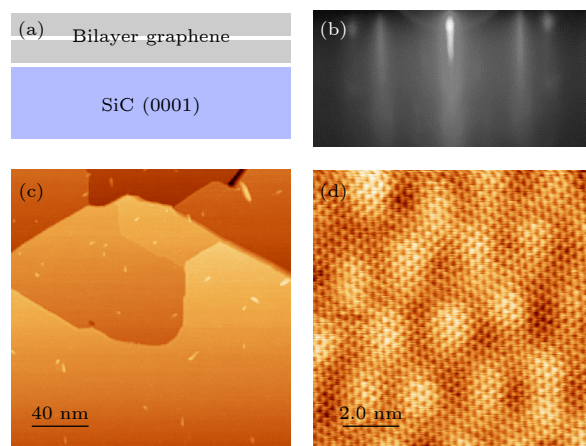


图 1 (a) 在 6H-SiC(0001) 表面外延双层石墨烯的结构示意图; (b) 生长过程在 BLG/SiC 表面监测获得的 RHEED 图案; (c) 在 BLG/SiC 表面获得的 STM 形貌图, 尺寸为  $200$  nm  $\times$   $200$  nm,  $U = 1.50$  V,  $I_t = 50$  pA; (d) 在 BLG/SiC 表面获得的原子分辨 STM 形貌图, 尺寸为  $10$  nm  $\times$   $10$  nm,  $U = 0.90$  V,  $I_t = 100$  pA. 图中可以看到莫尔周期调制

Fig. 1. (a) Structure diagram in bilayer graphene grown on 6H-SiC(0001). (b) RHEED patterns obtained by monitoring the BLG/SiC surface during growth. (c) STM morphology on BLG/SiC surface. Size:  $200$  nm  $\times$   $200$  nm,  $U = 1.50$  V,  $I_t = 50$  pA. (d) Atomic-resolved STM morphology obtained on BLG/SiC surface. Size:  $10$  nm  $\times$   $10$  nm,  $U = 0.90$  V,  $I_t = 100$  pA. Moiré period modulation can be seen in the figure.

图 2 所示为无外加磁场的情况下在 BLG/SiC 表面测量的电阻-温度 ( $R$ - $T$ ) 曲线. 可以看出, 石墨烯的电阻随着温度的降低而增大 (300—2 K). 在 50 K 以下的温度区间, 电阻随温度下降而上升的趋势变缓, 且有趋于饱和的趋势. 这种现象与 WL (weak localization) 和 VRH (variable range hopping) 模型都不符合, 可能与温度降低引起的电声散射增强有关 [8], 也可能与双层石墨烯中存在的电

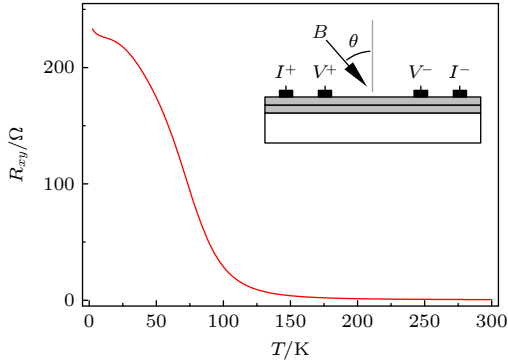


图 2 在无外加磁场下测量的 BLG/SiC(0001) 表面电阻-温度曲线, 其中插图显示为磁电阻测量的结构示意图

Fig. 2. Temperature-resistance curve measured on BLG/SiC(0001) surface without an applied magnetic field. The illustration shows a schematic diagram of the structure of magnetoresistance measurement.

子空穴泡泡 (electron-hole puddles) 或者尺寸效应相关 [20]. 在用低压力化学气相沉积 (low pressure chemical vapor deposition, LPCVD) 法合成的带转角的多层石墨烯中, 也有类似的现象, 因此也可能与石墨烯层间的转角有关 [21].

为了进一步探索外延双层石墨烯的电输运性质, 对 BLG/SiC(0001) 体系进行了磁电阻测量. 下文涉及的磁电阻  $MR$  由如下公式定义:

$$MR = \frac{R_{sq}(H) - R_{sq}(0)}{R_{sq}(0)} \times 100\%.$$

图 3(a) 所示为垂直磁场的情况下, 改变温度 (2—200 K) 获得的磁电阻曲线. 在小磁场范围内 ( $0 \text{ T} < B < 0.5 \text{ T}$ ), 磁电阻随着磁场的增加呈现向下弯曲的现象, 表现出负的磁电阻状态, 并且随着温度的升高, 这种现象逐渐减弱, 如图 3(b) 所示. 当温度接近 80 K 时, 负磁电阻现象完全消失. 这些结果与以往报道的多层石墨烯在定性上一致 [6,15], 但是弱局域化的温度范围远大于多层石墨烯 (弱局域化效应大约在 20 K 消失), 相应的临界磁场强度与多层石墨烯基本一致. 而对于报道的外延的单层石墨烯, 未观察到明显的负磁阻现象 [15]. 对于一个弱无序体系, 垂直于样品的磁场会破坏正

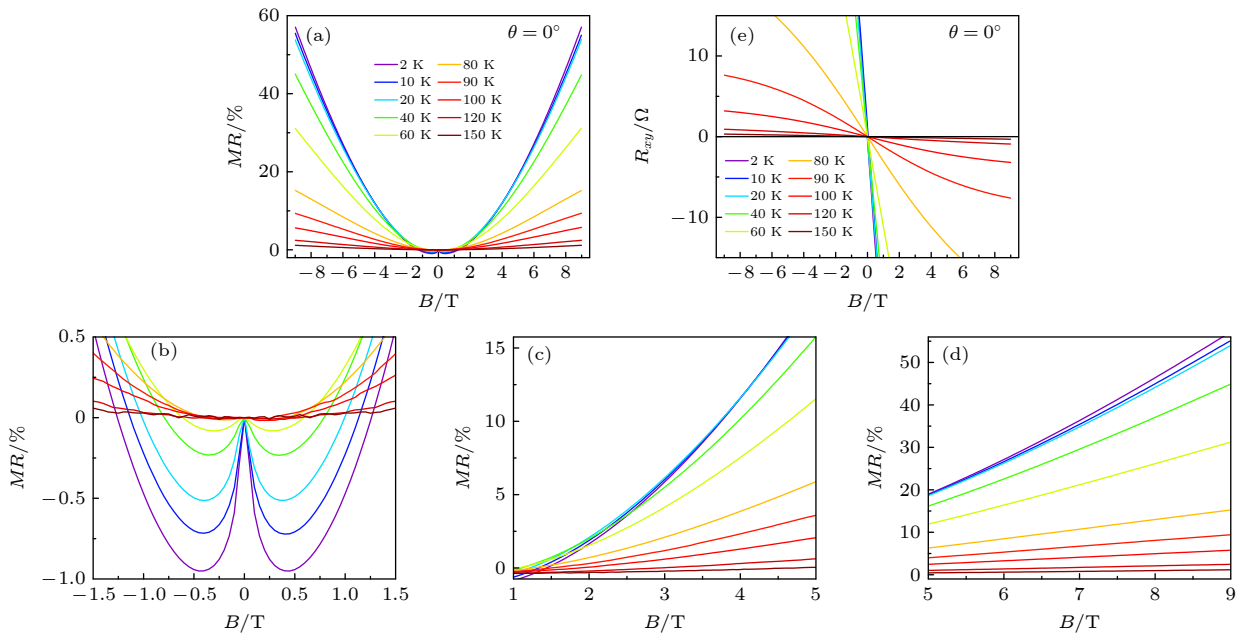


图 3 (a) 垂直磁场条件下在 -9—9 T 范围内不同温度条件的  $MR$  vs.  $B$  图; (b) 垂直磁场条件下小磁场区域  $MR$  vs.  $B$  图; (c) 垂直磁场条件下中等磁场区域  $MR$  vs.  $B$  图; (d) 垂直磁场条件下较大磁场区域  $MR$  vs.  $B$  图; (e) 不同温度条件下的霍尔测试

Fig. 3. (a)  $MR$  vs.  $B$  diagram at different temperatures in the range of -9—9 T under vertical magnetic field; (b)  $MR$  vs.  $B$  diagram of small magnetic field under vertical magnetic field; (c)  $MR$  vs.  $B$  diagram of medium magnetic field under vertical magnetic field; (d)  $MR$  vs.  $B$  diagram of large magnetic field under vertical magnetic field; (e) Hall test at different temperatures.



向和反向跳跃路径之间的时间反转对称性,破坏了量子相干效应,从而产生负磁阻态<sup>[22]</sup>,而弱局域化效应与温度的变化有着密切的联系,因此本实验中出现的负磁阻现象可以归结为弱局域化效应.在本文扭角双层石墨烯中的弱局域化效应强于外延的单层、多层石墨烯体系,原因在于外延的双层石墨烯之间的转角增强了层间的电子跃迁,因此增强了谷间散射以及弱局域化效应<sup>[23]</sup>.

图 3(c) 着重显示了中等磁场区间 ( $0.5 \text{ T} < B < 5 \text{ T}$ ) 内磁电阻行为.由图 3(c) 可以看出,磁阻与磁场接近平方的关系,即  $MR \propto B^2$ ,说明在这一磁场区间内双层石墨烯符合经典的洛伦兹磁阻性质<sup>[18]</sup>.图 3(d) 着重显示了大磁场区间 ( $5 \text{ T} < B < 9 \text{ T}$ ) 内不同温度下的磁阻曲线.在测量温度范围内所有磁阻曲线均出现了线性行为,而不是抛物线行为,且在实验所用的最大磁场 (9 T) 条件下仍然没有出现磁阻饱和的现象.实验中观测到线性磁阻在正负场下对称,说明实验中出现的线性电阻与霍尔电阻无关<sup>[24]</sup>.之前的 STM/STS 研究报道曾指出, SiC

表面外延双层石墨烯的电子结构在空间存在不均匀性<sup>[25]</sup>.因此,我们认为本工作中观测到的线性磁阻很可能与外延双层石墨烯中空间电子结构不均匀性有关.除此之外,还发现在一定磁场下,磁电阻随着温度的降低而显著升高.这种依赖关系与单层石墨烯的规律相同,但是与外延的多层石墨烯完全相反,这种差异可能是由于外延的双层石墨烯之间存在转角,其输运性质会与单层石墨烯的类似<sup>[23]</sup>有关,同时也表明石墨烯的磁阻性质是与薄膜的厚度密切相关的.在随后的霍尔电阻测量中(如图 3(e) 所示),当温度变化时,没有发现载流子类型发生转变,而微晶石墨体系中报道的线性磁阻现象只在特定的温度条件下才存在,且与载流子类型的转变有关<sup>[26]</sup>.这一区别表明微晶石墨体系中出现的线性磁阻与我们研究的外延双层石墨烯体系中的线性磁阻可能具有不同的本质.

为了进一步理解外延双层石墨烯中的磁电输运性质,还改变了磁场与样品表面之间的夹角,并在不同的夹角下进行了磁电阻的测量.图 4(a) 给

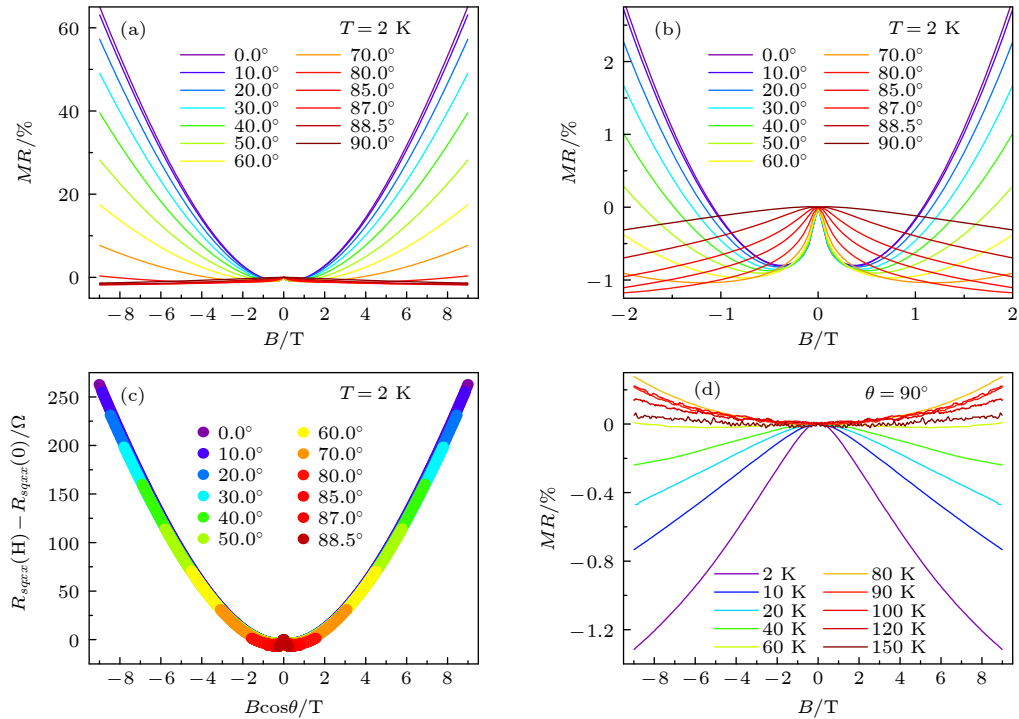


图 4 (a) 2 K 条件下, 旋转样品以改变磁场与样品夹角时的  $MR$  vs.  $B$  图, 其中  $\theta = 0^\circ$  代表磁场与样品垂直情况; (b) 图 (a) 中小磁场范围局部放大图; (c) 由图 4(a) 拟合的结果, 其中  $\theta$  是磁场与竖直方向的夹角, 横坐标代表外加磁场的竖直分量; (d) 水平磁场条件下 ( $\theta = 90^\circ$ ) 不同温度的  $MR$  vs.  $B$  图

Fig. 4. (a)  $MR$  vs.  $B$  diagram by rotating sample and hence varying the magnetic field  $B$  direction  $\theta$ , where  $\theta = 0^\circ$  represents the perpendicular condition of magnetic field and sample; (b) local enlargement of panel (a) at small and medium magnetic field range; (c) diagram according to the fitting results in Fig. 4(a), where  $\theta$  is the angle between the magnetic field and the vertical direction, and the abscissa represents the vertical component of the external magnetic field; (d)  $MR$  vs.  $B$  plots at different temperatures under horizontal magnetic field ( $\theta = 90^\circ$ ).

出了当样品在 2 K 下固定磁场 (9 T) 中旋转时, 样品的电阻随磁场旋转角度的变化情况. 图 4(b) 中的测量结果很好地符合了  $\sin\theta$  的形式 (其中  $\theta$  为磁场方向和样品表面之间的夹角), 表明外延的双层石墨烯符合二维体系的磁输运模型<sup>[6]</sup>. 此外, 图 4(c) 显示了磁场的方向对于负磁阻态的影响 (小磁场范围内), 即使在  $\theta = 90^\circ$  时, 磁阻还保持较小的数值, 但不会消失. 并且磁阻由垂直磁场时的低场负磁阻高场正磁阻变成平行磁场条件下的全负磁阻状态, 体现出磁阻与磁场方向的相关性. 图 4(d) 是在平行磁场 ( $\theta = 90^\circ$ ) 条件下, 不同温度下的磁阻曲线图. 在 60 K 以下的温度区间, 出现了明显的全负磁阻态, 且随着温度的升高, 全负磁阻态逐渐过渡到正磁阻态. 平行磁场下的负磁阻态是三维拓扑外尔半金属的典型输运特征之一<sup>[27]</sup>. 磁性元素与石墨烯的相互作用也可以产生负磁阻现象<sup>[28]</sup>. 在机械剥离的双层石墨烯中, 研究人员也观测到了类似的平行磁场下负磁阻效应<sup>[29]</sup>. 他们把产生原因归结为涟波 (ripple) 和平行磁场分量产生的磁场的垂直分量, 并进一步产生由弱局域化效应导致的负磁阻效应. 对于理想的二维电子气系统, 磁场的水平分量通常不会产生全负磁阻现象. 然而, 对于本文研究的外延双层石墨烯体系, 并不会产生机械剥离导致的宏观尺度的涟波或起伏. 由图 1 的 STM 形貌图可以看出, 上下层石墨烯之间存在一定的夹角, 从而在石墨烯表面形成了莫尔图案. 这种转角莫尔图案同时也伴随着表面原子晶格的应力变化和起伏. 我们预期, 这些莫尔图案导致的微观上的晶格起伏会与面内施加的平行外磁场相互作用, 从而产生弱局域化效应导致的负磁阻现象. 对于双层夹角体系而言, 莫尔图案导致的局部晶格起伏可以广泛地存在, 即平行场条件下负磁阻现象要强于垂直条件下的负磁阻现象, 也就是局部的晶格莫尔“起伏”结构会阻碍并弱化垂直场条件下的弱局域化效应, 但不会使其消失<sup>[30]</sup>. 更加深入地理解双层转角体系中的平行场负磁阻现象<sup>[6]</sup>, 需要进一步的理论研究工作支持. 值得一提的是, 近年来的扭角双层石墨烯研究主要关注了魔角附近的强关联效应, 如莫特绝缘体、超导、关联磁性等. 不同转角下的输运性质研究也引起了人们的关注, 如双层石墨烯在不同转角下贝利相位的变化<sup>[31]</sup>, 以及在魔角附近磁电阻值的突变<sup>[32]</sup>. 但转角与磁电阻性质的关系仍研究较少, 值得进一步的探索.

## 4 结 论

通过将 6H-SiC(0001) 衬底在超高真空中进行热分解处理, 得到了外延双层石墨烯体系, 并系统研究了外加磁场下的磁电阻输运现象. 观测到的磁电阻行为满足一个二维体系的磁输运性质. 在小磁场范围内, 出现了弱局域化, 并在强磁场区域观测到线性磁阻现象, 这可能是由双层石墨烯中电子结构的不均匀性导致的经典线性磁阻. 另外还发现在平行磁场下出现了负磁阻现象, 这种现象可能对应于样品在微观尺度上的莫尔晶格起伏.

感谢南京大学温锦生实验室和宋凤麒实验室协助输运性质的测量; 感谢苏州大学江华教授卓有成效的讨论.

## 参考文献

- [1] Du X, Skachko I, Barker A, Andrei E Y 2008 *Nature Nanotechnol.* **3** 491
- [2] Miller D L, Kubista K D, Rutter G M, Ruan M, De Heer W A, First P N, Strosio J A 2009 *Science* **324** 924
- [3] 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
- [4] Lu X, Stepanov P, Yang W, Xie M, Aamir M A, Das I, Urgell C, Watanabe K, Taniguchi T, Zhang G, Bachtold A, MacDonald A H, Efetov D K 2019 *Nature* **574** 653
- [5] 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
- [6] Sevak Singh R, Wang X, Chen W, Ariando, Wee A T S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 183105
- [7] Freitas P P, Ferreira R, Cardoso S, Cardoso F 2007 *J. Phys.: Condensed Matter* **19** 165221
- [8] Chuang C, Yang Y, Elmqvist R E, Liang C T 2016 *Mater. Lett.* **174** 118
- [9] Willke P, Amani J A, Sinterhauf A, Thakur S, Kotzott T, Druga T, Weikert S, Maiti K, Hofsass H, Wenderoth M 2015 *Nano Lett.* **15** 5110
- [10] McCann E, Kchedzhi K, Fal'ko V I, Suzuura H, Ando T, Altshuler B L 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 146805
- [11] Parish M M, Littlewood P B 2005 *Phys. Rev. B* **72** 094417
- [12] Demokritov S O, Serga A A, Demidov V E, Hillebrands B, Kostylev M P, Kalinikos B A 2003 *Nature* **426** 159
- [13] Abrikosov A A 1998 *Phys. Rev. B* **58** 2788
- [14] Zhou Y B, Wu H C, Yu D P, Liao Z M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 093116
- [15] Wang W J, Gao K H, Li Z Q, Lin T, Li J, Yu C, Feng Z H 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 182102
- [16] Butz B, Dolle C, Nickiel F, Weber K, Waldmann D, Weber H B, Meyer B, Spiecker E 2014 *Nature* **505** 533
- [17] Kisslinger F, Ott C, Heide C, Kampert E, Butz B, Spiecker E, Shallicross S, Weber H B 2015 *Nat. Phys.* **11** 650
- [18] Rein M, Richter N, Parvez K, Feng X L, Sachdev H, Kläui

- M, Müllen K 2015 *ACS Nano* **9** 1360
- [19] Creeth G L, Strudwick A J, Sadowski J T, Marrows C H 2011 *Phys. Rev. B* **83** 195440
- [20] Gopinadhan K, Jun Shin Y, Yang H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 223111
- [21] Brzhezinskaya M, Kononenko O, Matveev V, Zotov A, Khodos, II, Levashov V, Volkov V, Bozhko S I, Chekmazov S V, Roshchupkin D 2021 *ACS Nano* **15** 12358
- [22] Baker A M R, Alexander-Webber J A, Altebaeumer T, Janssen T J B M, Tzalenchuk A, Lara-Avila S, Kubatkin S, Yakimova R, Lin C T, Li L J, Nicholas R J 2012 *Phys. Rev. B* **86** 235441
- [23] Meng L, Chu Z D, Zhang Y, Yang J Y, Dou R F, Nie J C, He L 2012 *Phys. Rev. B* **85** 235453
- [24] Liao Z M, Zhou Y B, Wu H C, Han B H, Yu D P 2011 *Europhys. Lett.* **94** 57004
- [25] Brar V W, Zhang Y, Yayon Y, Ohta T, McChesney J L, Bostwick A, Rotenberg E, Horn K, Crommie M F 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 122102
- [26] Zhang X, Xue Q Z, Zhu D D 2004 *Phys. Lett. A* **320** 471
- [27] Wang Y, Liu E, Liu H, Pan Y, Zhang L, Zeng J, Fu Y, Wang M, Xu K, Huang Z, Wang Z, Lu H Z, Xing D, Wang B, Wan X, Miao F 2016 *Nat. Commun.* **7** 13142
- [28] Cai C Y, Chen J H 2018 *Chin. Phys. B* **27** 067304
- [29] Wakabayashi J, Sano K 2011 *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** 013702
- [30] Lundberg M B, Folk J A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 146804
- [31] Hong S J, Rodríguez-Manzo J A, Kim K H, Park M, Baek S J, Kholin D I, Lee M, Choi E S, Jeong D H, Bonnell D A, Mele E J, Drndić M, Johnson A T C, Park Y W 2016 *Synth. Met.* **216** 65
- [32] Finney J, Sharpe A L, Fox E J, Hsueh C L, Parker D E, Yankowitz M, Chen S W, Watanabe K, Taniguchi T, Dean C R, Vishwanath A, Kastner M, Goldhaber-Gordon D 2021 *PNAS* **119** e2118482119

## SPECIAL TOPIC—Novel properties of low-dimensional materials

**Electron transport property of epitaxial bilayer graphene on SiC substrate<sup>\*</sup>**Hu Ju-Gang<sup>1)2)#</sup> Jia Zhen-Yu<sup>1)2)3)#†</sup> Li Shao-Chun<sup>1)2)‡</sup>1) (*National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)2) (*Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)3) (*Shanghai Tianma Micro-electronics, Shanghai 201201, China*)

( Received 10 January 2022; revised manuscript received 26 January 2022 )

**Abstract**

Graphene can find great potential applications in the future electronic devices. In bilayer graphene, the relative rotation angle between graphene layers can modulate the interlayer interaction and hence induces rich physical phenomena. We systematically study the temperature dependent magnetoresistance (MR) properties in the epitaxial bilayer graphene (BLG) grown on the SiC substrate. High quality BLG is synthesized by molecular beam epitaxy in ultra-high vacuum. We observe the negative MR under a small magnetic field applied perpendicularly at temperature  $< 80$  K, which is attributed to a weak localization effect. The weak localization effect in our epitaxial BLG is stronger than previously reported ones in epitaxial monolayer and multilayer graphene system, which is possibly because of the enhanced interlayer electron transition and thus the enhanced valley scattering in the BLG. As the magnetic field increases, the MR exhibits a classical Lorentz MR behavior. Moreover, we observe a linear magnetoresistance behavior in a large field, which shows no saturation for the magnetic field of up to 9 T. In order to further investigate the negative and linear magnetoresistance, we conduct angle-dependent magnetoresistance measurements, which indicates the two-dimensional magnetotransport phenomenon. We also find that the negative MR phenomenon occurs under a parallel magnetic field, which may correspond to the moiré pattern induced local lattice fluctuation as demonstrated by scanning tunneling microscopy measurement on an atomic scale. Our work paves the way for investigating the intrinsic properties of epitaxial BLG under various conditions.

**Keywords:** epitaxial bilayer graphene, magnetotransport, negative magnetoresistance, scanning tunneling microscopy

**PACS:** 72.80.Vp, 73.43.Qt, 07.79.Cz, 68.55.-a

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220062

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11774149, 11790311, 92165205) and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2021YFA1400403).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: [jiazhenyu2014@163.com](mailto:jiazhenyu2014@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [scli@nju.edu.cn](mailto:scli@nju.edu.cn)