

锯齿形石墨烯反点网络加工与输运性质研究

张婷婷 成蒙 杨蓉 张广宇

Fabrication of zigzag-edged graphene antidot lattice and its transport properties

Zhang Ting-Ting Cheng Meng Yang Rong Zhang Guang-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 216103 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.216103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.216103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I21>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

N/B 掺杂石墨烯的光学与电学性质

Optical and electronic properties of N/B doped graphene

物理学报.2016, 65(24): 248103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.248103>

双层石墨烯在栅压调控下的各向异性刻蚀

Anisotropic etching of bilayer graphene controlled by gate voltage

物理学报.2016, 65(19): 196101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.196101>

THz 谐振腔型石墨烯光电探测器的设计

Design and performance analysis of THz microcavity-enhanced graphene photodetector

物理学报.2016, 65(16): 168101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.168101>

化学气相沉积法制备的石墨烯晶畴的氢气刻蚀

Hydrogen etching of chemical vapor deposition-grown graphene domains

物理学报.2016, 65(9): 098101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.098101>

含石墨烯临界耦合谐振器的吸收特性研究

Study on the absorbing properties of critically coupled resonator with graphene

物理学报.2015, 64(23): 238103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.238103>

## 专题: 与硅技术融合的石墨烯类材料及其器件研究

编者按 碳是一种神奇的元素. 除了大家熟知的钻石, 还可以呈现从零维(富勒烯)、一维(碳纳米管)到二维(石墨烯)的稳定结构. 这些结构的核心是二维单层石墨片结构, 对其基本电子态结构的理论可以追溯到20世纪40年代(Wallace P R 1947 *Phys. Rev.* **71** 622). 单层石墨片或石墨烯的应用也至少可以追溯到20世纪70年代. 单层石墨片作为电镜样品的完美支撑膜, 对20世纪七八十年代高分子电子显微成像技术的发展也做出过巨大贡献. 但单层石墨片被单独作为一种材料, 并开始广泛影响物理学、化学等学科随后十余年的发展则始于21世纪初, 两位俄裔英国学者 Andre Geim 和 Konstantin Novoselov 于2004年成功将单层石墨片分离到绝缘基底, 并对其输运性质进行了系统的测试, 特别是在室温观察到量子霍尔效应, 一举获得了2010年的诺贝尔物理学奖. 近十年, 石墨烯研究已成为发展势头最为迅猛的领域, 2012年以石墨烯为主题的论文发表数量首次超过一万篇, 2016年已达39373篇. 在这迅猛发展的研究之后, 是对石墨烯及相关材料在未来信息技术中所能起作用的巨大期盼. 然而, 本征的石墨烯材料没有能隙, 并不适合数字电路应用. 二维石墨烯类材料, 例如半导体过渡金属硫化物等应运而生, 相关材料和器件研究也快速发展成为热点研究领域. 此外, 虽然摩尔定律发展已经接近其尽头, 但是硅基信息处理技术仍牢牢处于信息产业的霸主地位, 结合硅基技术发展石墨烯类材料及其器件也顺理成章地成为了未来该领域研究的主流和本专题的主题.

专题收录了国内高校和科研院所相关研究人员的共19篇研究论文和综述, 涉及到从石墨烯类材料的(1)生长: 金属衬底上高质量大面积石墨烯的插层及其机制(郭辉、路红亮、黄立、王雪艳、林晓、王业亮、杜世萱、高鸿钧); 介电层表面直接生长石墨烯的研究进展(杨慧慧、高峰、戴明金、胡平安); 双层石墨烯的化学气相沉积法制备及其光电器件(杨云畅、武斌、刘云圻); (2)结构表征、加工与性能调控: 锯齿形石墨烯反点网络加工与输运性质研究(张婷婷、成蒙、杨蓉、张广宇); 石墨烯纳米结构的制备及带隙调控研究(张慧珍、李金涛、吕文刚、杨海方、唐成春、顾长志、李俊杰); 二维原子晶体的低电压扫描透射电子显微学研究(黎栋栋、周武); 硼烯和碱土金属硼化物二维纳米材料的制备、结构、物性及应用研究(郭泽堃、田颜、甘海波、黎子娟、张彤、许宁生、陈军、陈焕君、邓少芝、刘飞); 石墨烯纳米带的制备与电学特性调控(张辉、蔡晓明、郝振亮、阮子林、卢建臣、蔡金明); (3)输运: 多端口石墨烯系统中的非局域电阻(王孜博、江华、谢心澄); 到(4)类石墨烯: 类石墨烯锗烯研究进展(秦志辉); 硅烯的化学功能化(杨硕、程鹏、陈岚、吴克辉); (5)器件: 基于双极性二维晶体的新型p-n结(张增星、李东); 基于六角氮化硼二维薄膜的忆阻器(吴全潭、时拓、赵晓龙、张续猛、伍法才、曹荣荣、龙世兵、吕杭炳、刘琦、刘明); 基于毫米级单晶石墨烯的倍频器性能研究(高庆国、田猛串、李思超、李学飞、吴燕庆); 硅基底石墨烯器件的现状与发展趋势(武佩、胡潇、张健、孙连峰); 石墨烯射频器件研究进展(卢琪、吕宏鸣、伍晓明、吴华强、钱鹤); 二维半导体过渡金属硫化物的逻辑集成器件(李卫胜、周健、王瀚宸、汪树贤、于志浩、黎松林、施毅、王欣然); 和(6)硅基混合系统: 石墨烯-硅基混合光子集成电路(肖廷辉、于洋、李志远); 高性能石墨烯霍尔传感器(黄乐、张志勇、彭练矛). 专题覆盖了石墨烯类材料及其器件所涉及的几乎所有方面, 是本领域不可多得的珍贵参考资料. 相信专题的发表能够进一步促进这个重要的研究领域的发展, 催生相关产业的诞生.

(客座编辑: 中国科学院物理研究所 高鸿钧; 北京大学 彭练矛; 中国科学院物理研究所 顾长志)

## 锯齿形石墨烯反点网络加工与输运性质研究\*

张婷婷<sup>1)4)</sup> 成蒙<sup>1)</sup> 杨蓉<sup>1)4)†</sup> 张广宇<sup>1)2)3)4)‡</sup>

1)(中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2)(北京纳米材料与纳米器件重点实验室, 北京 100190)

3)(量子物质科学协同创新中心, 北京 100190)

4)(中国科学院大学物理学院, 北京 100190)

(2017年6月29日收到; 2017年8月21日收到修改稿)

具有特定边界的石墨烯纳米结构在纳电子学、自旋电子学等研究领域表现出良好的应用前景. 然而石墨烯加工成纳米结构时, 无序的边界不可避免地会降低其载流子迁移率. 氢等离子体各向异性刻蚀技术是加工具备完美边界石墨烯微纳结构的一项关键技术, 刻蚀后的石墨烯呈现出规则的近原子级平整的锯齿形边界. 本文研究了氮化硼上锯齿形边界石墨烯反点网络的磁输运性质, 低磁场下可以观测到载流子围绕着一个空位缺陷运动时的公度振荡磁阻峰. 随着磁场的增大, 朗道能级简并度逐渐增大, 载流子的磁输运行为从 Shubnikov-de Haas 振荡逐渐向量子霍尔效应转变. 在零磁场附近可以观测到反点网络周期性空位缺陷的边界散射所导致的弱局域效应. 研究表明, 在氮化硼衬底上利用氢等离子体刻蚀技术加工锯齿形边界石墨烯反点网络, 其样品质量会明显提高, 这种简单易行的方法为后续高质量石墨烯反点网络的输运研究提供了新思路.

关键词: 石墨烯, 氮化硼, 反点网络, 输运

PACS: 61.72.S-, 81.05.ue, 61.48.Gh, 05.60.Gg

DOI: 10.7498/aps.66.216103

## 1 引言

石墨烯纳米结构在纳电子学领域有广泛的应用前景, 例如场效应晶体管、传感器、自旋阀、光电探测器等<sup>[1-8]</sup>. 在石墨烯纳米结构中, 石墨烯反点网络无论在理论上<sup>[9-11]</sup>还是实验上<sup>[12-15]</sup>都引起了广泛的关注. 石墨烯反点网络可以看成是石墨烯纳米带周期性排列而成. 通过调控石墨烯反点网络格点的连接宽度, 可以有效地调控石墨烯反点网络的开关电流比, 可见反点网络结构是石墨烯能带调控工程中的一个重要分支<sup>[16]</sup>. 最近几年的研究表明二维超晶格对石墨烯能带结构有调制作

用, 为石墨烯在电子学和光电子学的应用提供了新思路<sup>[17-20]</sup>. 二维超晶格的实现是基于石墨烯和氮化硼垂直异质结, 由于石墨烯和氮化硼晶格失配为 1.8%, 不同角度堆垛下它们之间相互作用会形成不同周期的莫尔超晶格. 氮化硼衬底调制下的二维超晶格对石墨烯能带具有显著的调控作用<sup>[17,20,21]</sup>. 反点网络的周期性阵列也是一个超晶格结构, 反点网络中周期势调控是通过协同改变反点网络周期和空位缺陷大小实现的. 反点网络周期势对石墨烯能带的调控会如何影响其载流子的量子输运行为, 是否存在新奇的物理现象, 这是一个非常具有挑战性的科学问题.

在传统的二维电子气系统中, 反点网络的电学

\* 国家自然科学基金(批准号: 61325021, 11574361, 61390503)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB934500, 2013CBA01602)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ryang@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: gyzhang@iphy.ac.cn

特性在 GaAs/AlGaAs 异质结系统中得到了广泛的实验和理论研究. 公度振荡 (commensurate oscillation) 的磁阻峰可以用于研究复合费米子<sup>[22,23]</sup>、准粒子动力学<sup>[24]</sup>、霍夫施塔特蝴蝶状能谱<sup>[25]</sup>以及调控费米面形状各向异性<sup>[26]</sup>等. 而对于石墨烯反点网络而言, 研究主要集中于石墨烯反点网络中载流子的扩散输运<sup>[12-15]</sup>, 随着样品质量的提高, 载流子平均自由程增大, 石墨烯反点网络中可以实现弹道输运<sup>[27,28]</sup>.

为了得到高质量的石墨烯反点网络, 我们选取六方氮化硼为衬底. 六方氮化硼作为石墨烯的理想衬底, 它具有和石墨烯类似的晶格结构, 化学稳定性高且具有原子级平整. 将石墨烯转移到氮化硼衬底上可以大幅提高石墨烯晶体管的场效应迁移率, 从而可以观测到石墨烯的弹道输运<sup>[29]</sup>、分数量子霍尔效应<sup>[30]</sup>等一系列量子输运现象. 利用传统微纳加工方法制备的石墨烯纳米结构, 由于边界的无序导致样品迁移率大幅下降, 致使原本可以探测的量子现象被无序的边界散射淹没掉. 研究表明, 氮化硼上用传统微纳加工方法制备出的石墨烯纳米带, 其输运特性仍由边界无序占主导<sup>[31]</sup>, 所以即便有氮化硼作为石墨烯纳米结构加工的衬底, 其自然而无序的边界也必须做进一步处理. 因此, 寻找一种高效地制备高质量石墨烯纳米结构的方法具有重要的科学意义. 在之前的研究工作中, 本研究组利用远程氢等离子体刻蚀技术, 对单层、双层以及多层石墨烯实现了具有锯齿形 (zigzag) 边界的各向异性刻蚀<sup>[32-35]</sup>. 氢等离子体各向异性刻蚀加工方法得到的样品边界完美, 为研究石墨烯纳米结构的本征物理性质奠定了基础. 本文结合传统微纳加工方法和氢等离子体各向异性刻蚀技术, 在氮化硼衬底上加工具有锯齿形边界的石墨烯反点网络结构, 探索具有锯齿形边界的石墨烯反点网络的磁输运特性.

## 2 锯齿形边界石墨烯反点网络加工与输运性质测量

### 2.1 锯齿形边界石墨烯反点网络加工

选取具有原子级平整且电荷积累更少的六方氮化硼作为石墨烯的衬底. 合适厚度的六方氮化

硼 (10—50 nm) 是从六方氮化硼块体材料经过机械剥离的方法转移到覆盖了 300 nm 厚的二氧化硅的高掺杂硅片上. 高掺杂的硅作为栅电极来调节石墨烯的载流子浓度. 单层/双层石墨烯样品从高定向热解石墨机械剥离到聚乙烯醇/聚甲基丙烯酸甲酯 (PVA/PMMA) 薄膜上, 再利用干法转移<sup>[36]</sup>的方法将单层石墨烯转移到六方氮化硼衬底上. 单层/双层石墨烯可以用光学显微镜的色彩对比度来判断, 再由原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM) 进行确定. 反点网络是将 PMMA 胶覆盖在石墨烯样品后用电子束光刻 (electronic beam lithography, EBL) 曝光出所需要的反点阵列掩膜, 然后用氧气反应离子束刻蚀 (reactive ion etching, RIE) 暴露出来的部分, 得到所设计的周期点阵缺陷. 接着将石墨烯反点网络放在自行搭建的等离子体增强化学气相沉积系统 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 中, 用柔和的氢等离子体对所设计出的周期点阵缺陷进行刻蚀. 氢等离子体刻蚀会进一步放大该设计的空位缺陷. 且不会引入新的缺陷, 氢等离子体处理后得到边缘为锯齿形取向的石墨烯反点网络. 通过调控氢等离子体的功率和刻蚀时间, 可以得到不同连接宽度的石墨烯反点网络, 具体的加工步骤如图 1 (a) 所示. 反点网络拥有丰富的结构自由度, 如反点网络点阵类型、反点网络周期  $a$  与孔洞大小  $d$  及其边缘取向等. 图 1 (b) 和图 1 (c) 分别是长方形反点网络和三角反点网络结构示意图. 长方形点阵反点网络两个方向上的周期不一致, 是一个研究各向异性磁输运性质的理想平台. 图 2 (a) 和图 2 (b) 分别是在氮化硼衬底上制备出来的具有锯齿形边界取向的单层和双层的石墨烯反点网络样品的 AFM 形貌图. 单层石墨烯反点网络经过氢等离子体刻蚀后, 圆形点阵缺陷会变成六角形的点阵缺陷. 而双层石墨烯反点网络经过氢等离子体刻蚀后, 由于上下层石墨烯与衬底相互作用不同, 导致刻蚀速率不一致, 会出来两套六角孔洞. 在磁输运性质测量中, 选取的是具有三角周期阵列的单层石墨烯反点网络. 金属电极的制作过程先用电子束将 PMMA 胶曝光, 显影后先后蒸镀上 Pd 和 Au.

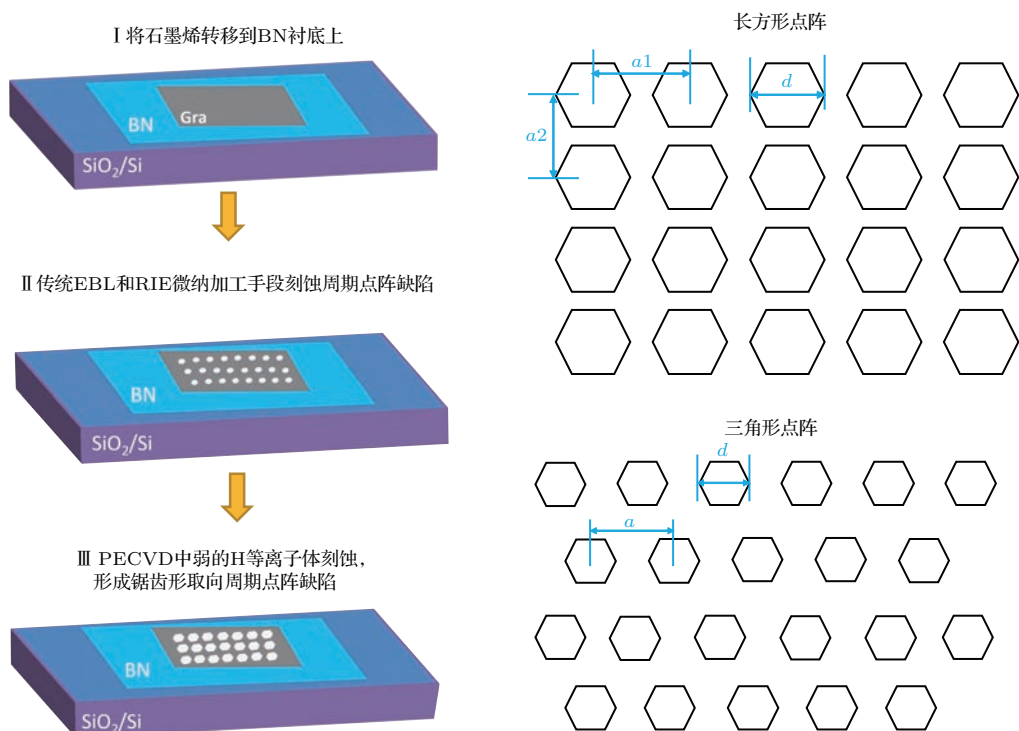


图1 锯齿形取向石墨烯反点网络加工过程与阵列设计 (a) 氮化硼上锯齿形取向石墨烯反点网络加工过程; (b) 长方形反点网络示意图; (c) 三角形反点网络示意图

Fig. 1. Schematic of fabrication of zigzag edge graphene antidote lattices (GALs) and antidot lattice design: (a) Schematic of fabrication of zigzag edge GALs on h-BN; (b) schematic views of rectangular zigzag edge GALs; (c) schematic views of triangular zigzag edge GALs.

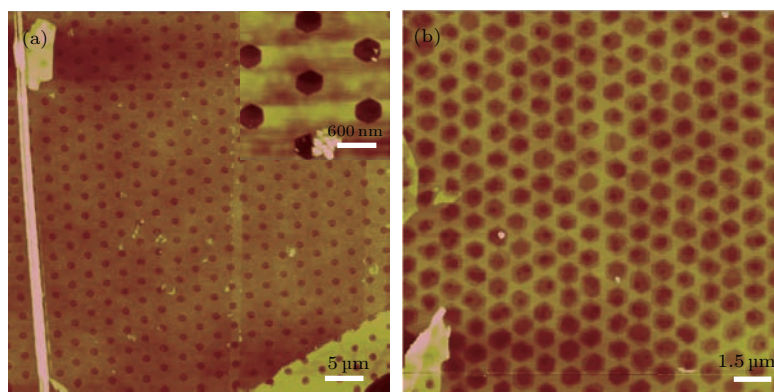


图2 氮化硼上锯齿形边界单层和双层石墨烯反点网络形貌图 (a) 单层石墨烯反点网络; (b) 双层石墨烯反点网络  
Fig. 2. AFM images of patterned zigzag-edge GALs on h-BN substrate: (a) Monolayer GALs on h-BN; (b) bilayer GALs on h-BN.

## 2.2 输运性质测量

石墨烯反点网络器件在室温电学测量主要使用Agilent公司的4156C半导体特性分析仪, 低温下磁输运性质测量是在低温磁输运系统中进行. 测量之前, 石墨烯器件会先在 $H_2$ 气氛中升温到 $220\text{ }^\circ\text{C}$ , 保持若干小时进行退火, 以去除样品表面吸附的杂质. 在所有的磁输运测量中, 磁场方向都

垂直于石墨烯薄膜.

## 3 结果与讨论

石墨烯反点网络可以看成是布满周期性空位缺陷的石墨烯或者是很多石墨烯纳米带交织而成的微结构, 周期性的缺陷会极大地降低其导电能力. 为观测到被人为引入周期性缺陷导致的无序所

掩盖掉的石墨烯反点网络本征的量子现象, 需要氮化硼上的石墨烯反点网络仍能保持较高的迁移率.

图 3(a) 所示为制备的一块质量较高的单层石墨烯反点网络在不同温度下的电学输运曲线. 该石墨烯反点网络的点阵周期为 300 nm, 六角孔洞之间的平均间距和半径分别约为 180 nm 和 60 nm. 通过两端法测量了石墨烯反点网络电阻和栅极电压的关系, 样品的场效应迁移率在室温和 1.6 K 时分别可以达到  $4280 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  和  $16000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 这一结果表明本文制备的具有锯齿形边界取向的

石墨烯反点网络的质量比较高. 图 3(a) 中内插图是对应样品的 AFM 形貌表征图. 变温电学曲线表明, 石墨烯反点网络在狄拉克点附近形成一个高阻态, 该样品在室温下的开关电流比  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  为 6.67, 在低温 (1.6 K) 时, 样品的开关电流比上升到 25. 相较于石墨烯纳米带和以往在二氧化硅/硅衬底上的石墨烯反点网络的研究<sup>[22]</sup>, 低温下在本文样品中并没有观测到输运带隙, 这可能是由于石墨烯反点网络之间的间隙比较大 (180 nm) 或是由锯齿形边界的金属性边缘态所致.

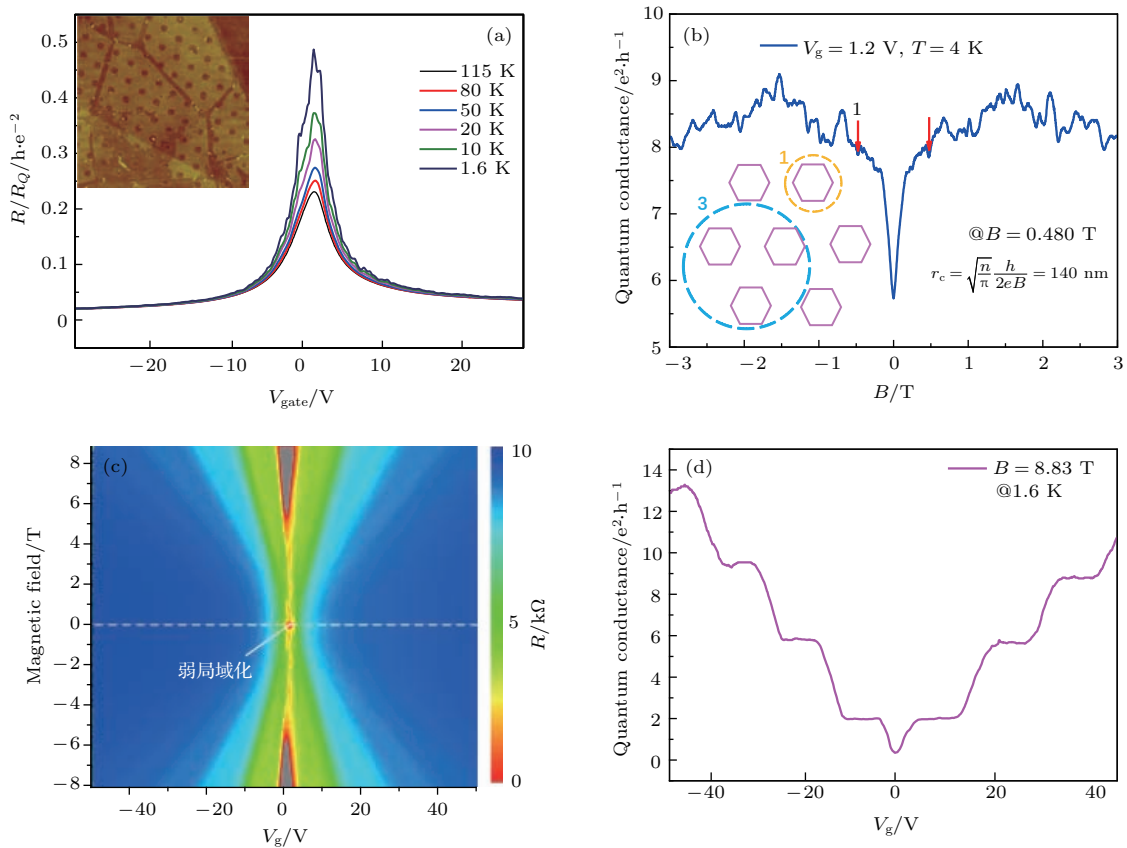


图 3 石墨烯反点网络输运性质 (a)  $I$ - $V$  曲线随着温度的变化; (b) 在栅压  $V_g = 1.2 \text{ V}$  时, 电阻随磁场的变化; (c) 磁阻随栅压和磁场强度变化的二维图像; (d) 器件的量子霍尔效应

Fig. 3. Transport characteristic of GALs at various temperature: (a) Gate dependence of quantum resistance at various temperature; (b) magnetoresistance at  $V_g = 1.2 \text{ V}$ ; (c) a magnetoresistance mapping for a zigzag edge GALs with period  $a = 300 \text{ nm}$  on h-BN substrate; (d) quantum Hall effect in zigzag edge GALs.

载流子在低磁场下的输运行为可以反映所制备的石墨烯反点网络的结构特性. 当外加垂直方向磁场时, 反点网络中主要有以下三种载流子的贡献: 散射载流子 (scattering carriers)、顶扎载流子 (pinned carriers)、漂移载流子 (drifting carriers). 载流子在磁场中运动的回旋半径与磁场和载流子浓度满足如下关系:  $2R_c = (\hbar/eB)(\pi n_s)^{1/2}$ . 当外

加磁场非常小时, 反点网络中载流子的回旋运动半径很大, 载流子在反点网络的格点中不断被散射, 复杂的散射过程可以通过反点网络器件, 对应于散射载流子的运动. 当外加磁场增大时, 对应的回旋半径逐渐变小, 当回旋半径满足围绕一个格点或者多个格点组成的圆形轨道时, 载流子局域在反点周围, 形成顶扎载流子. 这种情况下导电通道无法

形成, 在输运特性曲线上体现为磁阻峰值. 随着磁场的增大, 当回旋半径小于反点间距的一半时, 载流子可以直接漂移通过反点网络, 磁阻会有一些的回落. 高磁场下由于朗道能级的分离又会产生 Shubnikov-de Haas (SdH) 振荡. 本文制备的石墨烯反点网络器件在栅压  $V_g = 1.2$  V 时, 电导在磁场 0.480 T 处有一个极小值, 此磁场下载流子运动回旋半径满足  $2R_c = 140$  nm, 对应于载流子绕着一个空位缺陷运动, 亦即是公度振荡磁阻峰. 公度振荡磁阻峰的观测表明在氮化硼上使用氢等离子体刻蚀制备石墨烯反点网络的技术得到的样品质量较高. 在三角形阵列的反点网络中, 有可能观测到载流子围绕反点网络 1, 3, 7 个空位缺陷运动所导致的公度磁阻. 随着样品质量的增加, 载流子的平均自由程越大, 观测到的公度振荡峰也就越多. 可以尝试将锯齿形边界的石墨烯反点网络用氮化硼封装, 得到更加高质量的石墨烯反点网络样品<sup>[27]</sup>.

为了观察石墨烯反点网络载流子运动更多的细节, 将磁场和栅电压作为自变量, 将电阻作为因变量, 测量得图 3(c) 的磁阻 mapping 图. 载流子在反点网络周期性边界缺陷散射会导致弱局域化现象, 致使磁阻在零磁场时有一个极大值. 从磁阻随着栅压和磁场的二维 mapping 图, 可以看到弱局域现象在狄拉克点附近低载流子浓度区域较为明显. 随着磁场的增大, 当载流子的回旋运动半径明显小于一半的反点网络间距时, 可以观测到 SdH 振荡, 在更高磁场下, 朗道能级的简并度逐渐增大, 量子霍尔效应逐渐显现出来. 如图 3(d) 所示, 在  $B = 8.83$  T, 温度为 1.6 K 时可以清楚地看到器件的量子霍尔效应平台, 再次证明了所制备样品的质量较高.

然而, 我们更为感兴趣的反点网络周期势对石墨烯能带调控在当前样品的磁输运测量中尚未能体现出来. 一方面有可能是反点网络结构中人为引入的周期性空位缺陷对载流子散射所导致; 另一方面则与反点网络周期相关. 石墨烯与氮化硼莫尔超晶格的周期为 15 nm, 而反点网络的周期相比于莫尔超晶格比较大. 此外, 这里还存在着空位缺陷周期势和本征石墨烯与氮化硼转角周期势的复合作用, 对能带的调控更为复杂. 因此, 进一步关于反点网络周期势对石墨烯能带调控的研究, 可以集中于系统地研究反点网络的周期与相应的输运性质, 探索其是否存在一个标度关系.

## 4 结 论

结合传统微纳加工和氢等离子体各向异性刻蚀技术, 在氮化硼衬底上制备了具有锯齿形边界取向的石墨烯反点网络. 在低温磁阻测量中, 我们观测到反点网络结构信息的公度振荡磁阻峰. 随着磁场的增加, 朗道能级简并度逐渐增大, 可以观测到样品磁阻从 SdH 振荡到高磁场下的量子霍尔效应平台的转变. 这些量子化现象表明该方法制备出的石墨烯反点网络样品质量较高. 然而, 我们更为感兴趣的石墨烯反点网络所带来的超晶格周期势对石墨烯能带的调控作用在目前输运测量中并未观测到. 这有可能与反点网络的周期相关, 需要调控反点网络的周期等自由度来开展更为系统的研究. 我们在氮化硼衬底上制备的高质量锯齿形边界取向的石墨烯反点网络的方法, 为后续研究周期势所引入的新奇量子现象提供了可能.

## 参考文献

- [1] Kim K, Choi J Y, Kim T, Cho S H, Chung H J 2011 *Nature* **479** 338
- [2] Liu D P, Yu Z M, Liu Y L 2016 *Phys. Rev. B* **94** 155102
- [3] Son Y W, Cohen M L, Louie S G 2006 *Nature* **444** 347
- [4] Kim W Y, Kim K S 2008 *Nat. Nanotechnol.* **3** 408
- [5] Min S K, Kim W Y, Cho Y, Kim K S 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 162
- [6] Long M, Liu E, Wang P, Gao A, Xia H, Luo W, Wang B, Zeng J, Fu Y, Xu K, Zhou W, Lü Y, Yao S, Lu M, Chen Y, Ni Z, You Y, Zhang X, Qin S, Shi Y, Hu W, Xing D, Miao F 2016 *Nano Lett.* **16** 2254
- [7] Zhang T T, Wu S, Yang R, Zhang G Y 2017 *Frontiers Phys.* **12** 127206
- [8] Yu Z M, Pan H, Yao Y 2015 *Phys. Rev. B* **92** 155419
- [9] Nikitin A Y, Guinea F, Martin-Moreno L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 151119
- [10] Karamitaheri H, Pourfath M, Faez R, Kosina H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 054506
- [11] Pedersen T G, Flindt C, Pedersen J, Mortensen N A, Jauho A P, Pedersen K 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 136804
- [12] Shen T, Wu Y Q, Capano M A, Rokhinson L P, Engel L W, Ye P D 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 122102
- [13] Shimizu T, Nakamura J, Tada K, Yagi Y, Haruyama J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 023104
- [14] Yagi R, Shimomura M, Tahara F, Kobara H, Fukada S 2012 *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** 063707
- [15] Eroms J, Weiss D 2009 *New J. Phys.* **11** 095021
- [16] Bai J, Zhong X, Jiang S, Huang Y, Duan X 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 190

- [17] Yang W, Chen G, Shi Z, Liu C C, Zhang L, Xie G, Cheng M, Wang D, Yang R, Shi D, Watanabe K, Taniguchi T, Yao Y, Zhang Y, Zhang G 2013 *Nat. Mater.* **12** 792
- [18] Ponomarenko L A, Gorbachev R V, Yu G L, Elias D C, Jalil R, Patel A A, Mishchenko A, Mayorov A S, Woods R C, Wallbank J R, Mucha-Kruczynski M, Piot B A, Potemski M, Grigorieva I V, Novoselov K S, Guinea F, Fal'ko V I, Geim A K 2013 *Nature* **497** 594
- [19] Dean C R, Wang L, Maher P, Forsythe C, Ghahari F, Gao Y, Katoch J, Ishigami M, Moon P, Koshino M, Taniguchi T, Watanabe K, Shepard K L, Hone J, Kim P 2013 *Nature* **497** 598
- [20] Lu X B, Zhang G Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 077305 (in Chinese) [卢晓波, 张广宇 2015 物理学报 **64** 077305]
- [21] Lu X, Yang W, Wang S, Wu S, Chen P, Zhang J, Zhao J, Meng J, Xie G, Wang D, Wang G, Zhang T T, Watanabe K, Taniguchi T, Yang R, Shi D, Zhang G 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 113103
- [22] Nihey F, Nakamura K, Takamasu T, Kido G, Sakon T, Motokawa M 1999 *Phys. Rev. B* **59** 14872
- [23] Smet J H, von Klitzing K, Weiss D, Wegscheider W 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4538
- [24] Eroms J, Tolkiehn M, Weiss D, Rossler U, de Boeck J, Borghs S 2002 *Physica E* **12** 918
- [25] Albrecht C, Smet J H, von Klitzing K, Weiss D, Uman-sky V V, Schweizer H 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 147
- [26] Shabani J, Shayegan M, Winkler R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 096803
- [27] Sandner A, Preis T, Schell C, Giudici P, Watanabe K, Taniguchi T, Weiss D, Eroms J 2015 *Nano Lett.* **15** 8402
- [28] Yagi R, Sakakibara R, Ebisuoka R, Onishi J, Watanabe K, Taniguchi T, Iye Y 2015 *Phys. Rev. B* **92** 195406
- [29] Taychatanapat T, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P 2013 *Nat. Phys.* **9** 225
- [30] Dean C R, Young A F, Cadden-Zimansky P, Wang L, Ren H, Watanabe K, Taniguchi T, Kim P, Hone J, Shep-ard K L 2011 *Nat. Phys.* **7** 693
- [31] Bischoff D, Krähenmann T, Dröscher S, Gruner M A, Barraud C, Ihn T, Ensslin K 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 203103
- [32] Yang R, Zhang L, Wang Y, Shi Z, Shi D, Gao H, Wang E, Zhang G 2010 *Adv. Mater.* **22** 4014
- [33] Shi Z, Yang R, Zhang L, Wang Y, Liu D, Shi D, Wang E, Zhang G 2011 *Adv. Mater.* **23** 3061
- [34] Wang G, Wu S, Zhang T, Chen P, Lu X, Wang S, Wang D, Watanabe K, Taniguchi T, Shi D, Yang R, Zhang G 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 053101
- [35] Wang G L, Xie L, Chen P, Yang R, Shi D X, Zhang G Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 196101 (in Chinese) [王国乐, 谢立, 陈鹏, 杨蓉, 时东霞, 张广宇 2016 物理学报 **65** 196101]
- [36] Zomer P J, Dash S P, Tombros N, van Wees B J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 232104



# Fabrication of zigzag-edged graphene antidot lattice and its transport properties\*

Zhang Ting-Ting<sup>1)4)</sup> Cheng Meng<sup>1)</sup> Yang Rong<sup>1)4)†</sup> Zhang Guang-Yu<sup>1)2)3)4)‡</sup>

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Beijing Key Laboratory for Nanomaterials and Nanodevices, Beijing 100190, China*)

3) (*Collaborative Innovation Center of Quantum Matter, Beijing 100190, China*)

4) (*School of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

( Received 29 June 2017; revised manuscript received 21 August 2017 )

## Abstract

Graphene nanostructures with defined edges are proposed as a promising platform for the realization of nano-electronics and spin-electronics. However, patterned graphene nanostructure can lead to extra damage and drastically reduce its charge carrier mobility due to the edge disorder. The high flexibility of a top-down patterning method with edge smoothness is extremely desirable. Hydrogen plasma enhanced anisotropic etching graphene is demonstrated to be an efficient method of fabricating zigzag-edge graphene nanostructures. In addition, boron nitride is shown to be an excellent substrate for graphene due to its atomic flatness. Here in this work, we fabricate zigzag edge graphene antidot lattices on a boron nitride substrate via dry transfer method and traditional electron beam lithography, and reactive ion etching followed by hydrogen anisotropic etching approach. At low magnetic fields, weak localization is observed and its visibility is enhanced by intervalley scattering on antidot edges. We observe commensurate features in magnetotransport properties which stem from carriers around one antidot, signifying the high quality of our patterned samples. At high magnetic field, crossover from Shubnikov-de Haas oscillation to quantum Hall effect can be clearly observed due to the high mobility of our zigzag edge graphene antidot lattices. The transport properties of our patterned samples suggest that our fabrication method paves the way for achieving high quality graphene antidot lattices. High quality zigzag edge graphene antidot lattice might be a great platform to study the transport properties of lateral superlattice potential modulation graphene.

**Keywords:** graphene, boron nitride, antidot lattices, transport

**PACS:** 61.72.S-, 81.05.ue, 61.48.Gh, 05.60.Gg

**DOI:** 10.7498/aps.66.216103

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61325021, 11574361, 61390503) and the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2013CB934500, 2013CBA01602).

† Corresponding author. E-mail: [ryang@iphy.ac.cn](mailto:ryang@iphy.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [gyzhang@iphy.ac.cn](mailto:gyzhang@iphy.ac.cn)