

悬空石墨烯对其表面金纳米膜形貌的影响

田士兵 顾长志 李俊杰

Morphological evolution and liquid-like behavior of gold nanofilm on the suspended graphene

Tian Shi-Bing Gu Chang-Zhi Li Jun-Jie

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 126803 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180844

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180844>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[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 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172654>

[通过光致还原调制氧化石墨烯寿命并用于微纳图形制备](#)

Lifetime modulation of graphene oxide film by laser direct writing for the fabrication of micropatterns

物理学报.2018, 67(6): 066802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172331>

[介电层表面直接生长石墨烯的研究进展](#)

Research progress of direct synthesis of graphene on dielectric layer

物理学报.2017, 66(21): 216804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.216804>

[金属衬底上高质量大面积石墨烯的插层及其机制](#)

Intercalation and its mechanism of high quality large area graphene on metal substrate

物理学报.2017, 66(21): 216803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.216803>

[单层单晶石墨烯与柔性基底界面性能的实验研究](#)

Experimental study on interfacial mechanical behavior of single-layer monocrystalline graphene on a stretchable substrate

物理学报.2017, 66(16): 166801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.166801>

ISSN 1000-3290

物理学报

Acta Physica Sinica

2018年 第67卷 第12期

[Http://wulixb.iphy.ac.cn](http://wulixb.iphy.ac.cn)



九十
1928-2018

中国科学院物理研究所九十周年
90th ANNIVERSARY OF INSTITUTE OF PHYSICS CAS

中国科学院物理研究所 90 周年特刊

中国物理学会 中国科学院物理研究所
Chinese Physical Society Institute of Physics, CAS

物理学报

第 67 卷 第 12 期 2018 年 6 月

目 次

中国科学院物理研究所成立 90 周年专刊

总论

- 120201 基于原子轨道基的实时密度泛函理论: 方法及应用 关梦雪 廉超 孟胜
120301 量子计算与量子模拟 范桁
120302 金刚石氮空位中心自旋量子调控 刘刚钦 邢健 潘新宇
120601 室温钠离子电池材料及器件研究进展 陆雅翔 赵成龙 容晓晖 陈立泉 胡勇胜

电磁学、光学、声学、传热学、经典力学和流体动力学

- 124201 高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展 ... 丁伟 汪滢莹 高寿飞 洪奕峰 王璞
124202 激光在大气中驱动的强太赫兹辐射的理论和实验研究 ... 王伟民 张亮亮 李玉同 盛政明 张杰
124203 基于固体介质的倍频程连续光谱产生的研究进展
..... 赵昆 许思源 江昱佼 高亦谈 刘阳阳 何鹏 滕浩 朱江峰 魏志义

凝聚物质: 结构、力学和热学性质

- 126101 非晶材料与物理近期研究进展 孙奕韬 王超 吕玉苗 胡远超
罗鹏 刘明 咸海杰 赵德乾 丁大伟 孙保安 潘明祥 闻平 白海洋 柳延辉 汪卫华
126801 低维原子/分子晶体材料的可控生长、物性调控和原理性应用
..... 黄立 李更 张余洋 鲍丽宏 邬庆 林晓 王业亮 郭海明 申承民 杜世萱 高鸿钧
126802 纳米材料及 HfO₂ 基存储器件的原位电子显微学研究
..... 李超 姚溪 杨阳 沈希 高滨 霍宗亮 康晋锋 刘明 禹日成
126803 悬空石墨烯对其表面金纳米膜形貌的影响 田士兵 顾长志 李俊杰

凝聚物质: 电子结构、电学、磁学和光学性质

- 127101 新型 4d/5d 基超导体的结构和物性 宋艳鹏 陈洪祥 郭建刚 陈小龙
127201 一种数据非易失性、多功能和可编程的自旋逻辑研究进展 韩秀峰 万蔡华
127401 利用单轴压强下的电阻变化研究铁基超导体中的向列涨落 李世亮 刘墨玉 谷延红
127402 Pb 掺杂对 Cd₂Ru₂O₇ 反常金属态的调控
..... 焦媛媛 孙建平 Prashant Shahi 刘哲宏 王铂森 龙有文 程金光

- 127403** 铁硒基超导研究新进展: 高质量(Li,Fe)OHFeSe单晶薄膜
..... 董晓莉 袁洁 黄裕龙 冯中沛 倪顺利 田金朋 周放 金魁 赵忠贤
- 127501** 基于磁电耦合效应的基本电路元件和非易失性存储器 申见昕 尚大山 孙阳
- 127801** 量子相干态的二维电子光谱测量的原理、应用和发展 ... 翁羽翔 王专 陈海龙 冷轩 朱锐丹
- 127901** 新型高分辨率电子能量损失谱仪与表面元激发研究 朱学涛 郭建东

物理学交叉学科及有关科学技术领域

- 128101** 基于p-n结中反常光电转换现象的新型带间跃迁量子阱红外探测器
..... 刘洁 王禄 孙令 王文奇 吴海燕 江洋 马紫光 王文新 贾海强 陈弘
- 128102** 拓扑半金属材料的单晶生长研究进展 伊长江 王乐 冯子力 杨萌 闫大禹 王翠香 石友国
- 128103** 高质量单层二硫化钼薄膜的研究进展 魏争 王琴琴 郭玉拓 李佳蔚 时东霞 张广宇
- 128501** 锂电池失效分析与研究进展 王其钰 王朔 周格 张杰男 郑杰允 禹习谦 李泓
- 128801** 基于材料基因组方法的锂电池新材料开发 肖睿娟 李泓 陈立泉

文章图片的彩色效果详见网刊



扫码阅读
电子版

悬空石墨烯对其表面金纳米膜形貌的影响*

田士兵 顾长志[†] 李俊杰[‡]

(中国科学院物理研究所微加工实验室, 北京 100190)

(2018年4月28日收到; 2018年5月10日收到修改稿)

石墨烯与金属间的相互作用是石墨烯器件研究中的关键问题之一, 其涉及石墨烯器件的电学接触、锂离子电池石墨烯电极、石墨烯金属光学等方面。本文重点研究了不同层数的悬空石墨烯表面金纳米膜退火前后的形貌演化过程, 观测到两个重要的现象: 1) 排除基底影响后的悬空石墨烯层数可以通过金纳米膜的形貌特征进行确认, 但其随层数的变化趋势与有基底支撑的石墨烯正好相反; 2) 退火处理后的悬空石墨烯上的金纳米膜形貌演化过程具有类似水滴在荷叶上的行为。对悬空石墨烯表面金属纳米膜在退火前后的形貌变化规律及其现象背后的物理机理进行了详细的讨论和理论解释。

关键词: 悬浮石墨烯, 纳米金属膜, 拉曼

PACS: 68.65.Pq, 81.15.-z

DOI: 10.7498/aps.67.20180844

1 引言

自从石墨烯发现以来, 金属在石墨烯表面的行为一直是一个重要的科学和工程问题, 这是由于金属/石墨烯的界面在石墨烯器件的大量应用中起到了非常关键的作用^[1–9]。此外, 通过观察沉积在石墨烯上的金属薄膜的形貌还可以用于确定石墨烯的层数^[10–13]。然而, 大多数分析都是基于有基底支撑的石墨烯表面进行的, 石墨烯与其衬底的耦合性质和相互作用可能会隐藏和掩盖石墨烯本身的固有特性, 因此对无支撑的悬空石墨烯开展深入研究对于揭示石墨烯及其器件的本征特性和功能非常重要。最近, 已经有许多基于悬空石墨烯结构的报道, 与非悬空石墨烯器件相比, 其拥有更多的新特性, 例如弹道传输^[14], 完美的热传导^[15]以及巧妙的机电响应^[16–21]等, 而悬空石墨烯与表面金属结构的界面接触和相互作用都会对石墨烯器件的特性产生重要影响。因此, 悬空石墨烯表面金属在

各种条件下表现出的物理行为是一个迫切需要深入了解和探讨的问题。但目前金属膜与本征石墨烯界面方面的研究多集中在有基底支撑的石墨烯上, 而有关悬空石墨烯表面的金属变化行为的研究则鲜见报道。

本文研究了悬空石墨烯表面金纳米薄膜在退火前后的形貌变化行为和规律, 观察了与石墨烯层数及其表面润湿性能密切相关的金纳米薄膜的形态演变的现象。研究发现, 在退火过程之前, 悬空石墨烯表面金纳米膜的形态变化与悬空石墨烯的层数具有密切对应关系, 但其与有基底支撑石墨烯的报道结果完全不同, 反映了悬空石墨烯对其表面金纳米薄膜形态的本征影响。在快速退火过程之后, 发现悬空石墨烯上形成的金液滴具有类似于荷叶表面上水滴的行为。本文的研究结果为金纳米薄膜与悬空石墨烯之间的界面行为提供了新的视角, 有助于进一步理解和解决石墨烯器件的基础和应用研究中的新现象和新问题。

* 国家自然科学基金(批准号: 11674387, 61390503, 11574369)和国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0200800, 2016YFA0200400)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: czgu@iphy.ac.cn

‡ 通信作者。E-mail: jjli@iphy.ac.cn

2 实验

2.1 悬空石墨烯及其表面金纳米薄膜的制备与退火

为了实现悬空石墨烯，首先利用紫外光刻和反应离子刻蚀技术，在 $\text{SiO}_2(300\text{ nm})/\text{Si}$ 衬底上制作一个周期性的微孔阵列，其直径为 $5\text{ }\mu\text{m}$ ，深度为 500 nm ，如图1(a)所示。石墨烯是从天然石墨上机械剥离得到，置于事先用氧等离子体清洗过的预先形成微孔图案的 SiO_2/Si 衬底上^[22]。因此，一些微孔阵列被石墨烯薄片覆盖以形成周期性排布的悬空石墨烯，用于后面的观察和测试。通过使用光学显微镜(Leica DM4000)，在图1(a)中用红色箭头标记，在晶片上留下的石墨烯层数可以基于其颜色对比进行大致区分，但仍需要通过拉曼光谱进一步验证。在制备好的悬空石墨烯上，利用热蒸发方法沉积金纳米薄膜，在真空中 10^{-4} Pa 条件下，生长速率控制在 0.3 \AA/s ，膜厚约为 5 nm 。为了观察退火前后悬空石墨烯上的金纳米膜的形貌变化，样品在 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行热退火处理。

2.2 拉曼光谱及表面形貌表征

在图案化的 SiO_2/Si 基底上的石墨烯薄片进一步通过拉曼光谱测量进行表征，以监测它的缺陷、无序性、化学修饰和边缘特性。通过使用微拉曼光谱仪(Horiba/Jobin Yvon HR800)利用背向散射构型测量样品的拉曼光谱。使用数值孔径为0.90的100倍物镜，产生 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的激光光斑尺寸，以聚焦激光束并收集散射光。使用 532 nm 波长的激光线作为激发源，激光功率保持在小于 0.5 mW ，以防止激光引起的样品损伤。所有的测量均在室温下进行，用单一洛伦兹形状进行拟合并分析了峰的位置和半高宽^[23]。用聚焦电子束系统中扫描电子显微镜(SEM)(型号DB235)对石墨烯衬底上的金纳米薄膜进行高分辨率成像，在ETD(everhart-thornley detector)模式下拍摄照片，得到超高分辨模式下金膜的精细形貌SEM图像。

3 结果与讨论

如图1(a)所示，在图案化的 SiO_2/Si 衬底上覆盖的剥离石墨烯薄片的颜色从上到下沿着箭头从

浅到深。根据公认的经验判断，图案化的 SiO_2/Si 衬底上覆盖的石墨烯的最浅部分是单层石墨烯，其他两个区域根据颜色演变是多层石墨烯和石墨，然后再通过拉曼测量来进一步证明以上判断的正确性。图1(b)显示了在最浅区域(包括两个相邻的测量区域)上剥离的石墨烯的拉曼光谱，即在微孔上的单层悬空石墨烯的中心和在微孔外的基底上支撑的石墨烯。测量的拉曼光谱显示 sp^2 的共同特征，即所谓的G峰和2D峰，约在 1580 和 2700 cm^{-1} 处。G峰对应于布里渊区中心的 E_{2g} 声子(Γ 点)。2D峰值是D峰在 1360 cm^{-1} 附近的二阶，这是由于六原子环的呼吸模式所致。2D峰值源自拉曼散射过程，其中通过具有相反波矢量(\mathbf{q} 和 $-\mathbf{q}$)的两个声子来获得动量守恒。因此，G峰和2D峰在拉曼光谱中始终可见。2D峰在单层石墨烯中是单峰，而在多层石

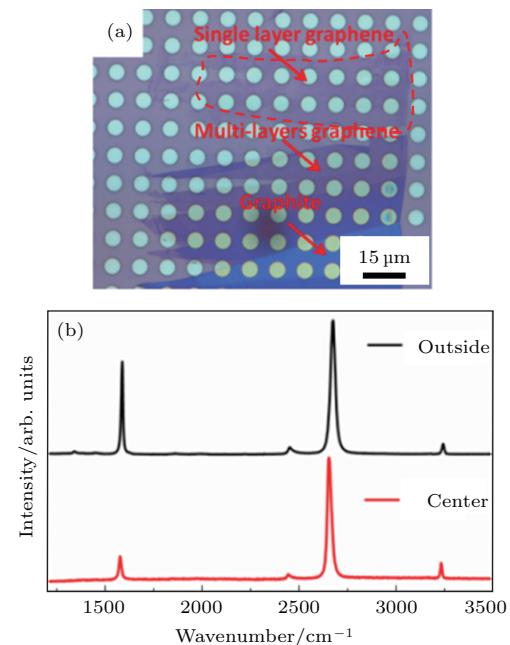


图1 (a) 在周期性微孔阵列上覆盖的石墨烯薄片的放大光学图像，其中单层石墨烯区域、多层石墨烯区域和石墨区域基于它们的颜色对比度从浅到深来粗略地区分，分别由红色箭头表示；(b) 在最浅颜色部分的两个区域上测量的拉曼光谱，即在微孔上单层悬空石墨烯的中心和在微孔外有基底支撑的石墨烯

Fig. 1. (a) A magnified optical image of graphene flakes covered on periodic pit array, where single-layer graphene region, multi-layers graphene region and graphite region are roughly distinguished based on their color contrast from shallow to deep and also denoted by red arrows, respectively; (b) Raman spectra measured on two regions of the shallowest color part: the center of a single-layer suspended graphene on the pit and supported graphene on the substrate outside the pit.

墨烯中分裂成四个谱带, 反映了谱带结构的演变^[24,25]. 因此, 可以看出, 两个区域上的石墨烯均为单层, 具有低密度缺陷, 特别是由于没有D峰而悬空石墨烯. 另外, 与基底上的石墨烯峰的峰位相比, 悬空石墨烯出现蓝移现象, 这可能是由于石墨烯在两个区域上的表面张力不同造成的. 得注意的是, 悬空石墨烯上的G峰强度变弱, 这可以解释为基底支撑的石墨烯被基底或基底与石墨烯之间的水分子强烈掺杂引起, 导致G峰强度更大^[26]. 相比之下, 悬空石墨烯几乎没有缺陷并且未掺杂, 显示出石墨烯的本征特征.

在确定了具有低密度缺陷的悬空单层石墨烯的形成之后, 进一步研究了金纳米薄膜的形态与悬空石墨烯层数的依赖关系. 图2分别显示了微孔阵列上悬空的单层石墨烯、多层石墨烯和石墨的拉曼光谱. 可以看到, 随着石墨烯层数的增加, 拉曼光谱的所有峰都出现蓝移, 其中悬空石墨的峰与基底支撑的石墨的峰相同, 这可能是源于石墨烯中的应变效应. 与悬空单层石墨烯相比, 多层石墨烯由于层间耦合效应的存在而具有较低的应变密度或较高的表面相互作用能, 并且应变密度可以降到最低并呈现出石墨的整体性质.

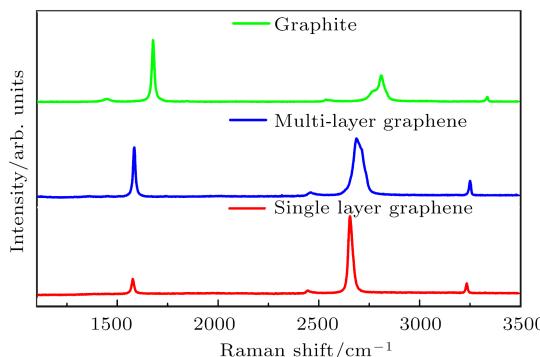


图2 悬空单层石墨烯、多层石墨烯和石墨的拉曼光谱

Fig. 2. Raman spectra of suspended single layer graphene, multi-layer graphene and graphite.

相应地, 我们在同一样品上的这三个悬空区处观察到金颗粒的形态. 图3(a)、图3(c) 和图3(e) 分别为在单层石墨烯、多层石墨烯和石墨上厚度为 5 nm 金纳米膜的SEM图像. 可以看出, 随着石墨烯层数的增加, 金纳米薄膜的延续性变好. 并且, 图3(b)、图3(d) 和图3(f) 依次显示了金颗粒的高放大倍数的SEM图, 表明随着悬空石墨烯层数的增加, 金颗粒的尺寸从约250 nm 减小到约40 nm. 这种趋势与在基底支撑的石墨烯上观察到的情况相反, 即金颗粒的尺寸随着石墨烯层数的增加而增

加, 这与以往的研究结果一致^[10]. 这种相反的趋势可以由样品模型进行解释. 具有高相互作用能量的基底(如SiO₂/Si)被另一个具有低相互作用能量的基底取代, 如空气(假设空气可以被看作是基底). 因此, 随着石墨烯层数的增加, 基底相互作用的屏蔽效应将变弱. 因此, 多层石墨烯的相互作用将大于单层石墨烯的相互作用, 这导致抵抗金原子在表面上的迁移以形成更大的颗粒. 结合我们以前从基底支撑的石墨烯中观察到的结果, 可以绘出金颗粒的尺寸随着石墨烯层数变化的完整趋势图, 如图4所示. 一般情况下, 除石墨外, 单层石墨烯上的金颗粒尺寸大于多层石墨烯上的金颗粒尺寸, 而悬空石墨烯上的金颗粒尺寸大于相同样品下衬底支撑的石墨烯上的金颗粒尺寸, 基于金纳米颗粒的形态和颗粒尺度的变化规律, 可以建立完整的测定悬空石墨烯层数的方法.

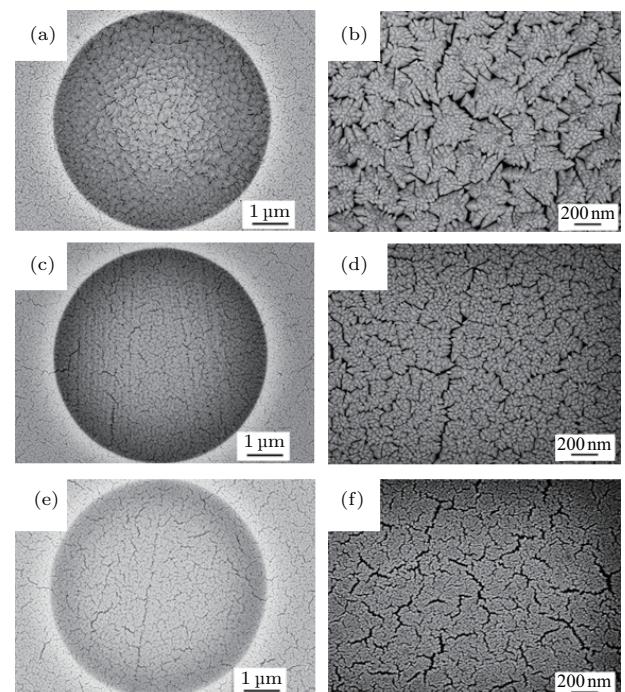


图3 金纳米膜在不同悬空基底表面的形貌对比 (a), (b) 悬空单层石墨烯上的金膜的SEM图像和中心区域的高倍率SEM图像; (c), (d) 悬空的多层石墨烯表面金膜的SEM图像和中心区域的高倍率SEM图像; (e), (f) 悬空石墨片上的金膜的SEM图像和中心区域的高倍率SEM图像

Fig. 3. Morphology comparison of gold nano-films covered on different graphene substrates: (a), (b) SEM images of gold film on the suspended single layer graphene and high-magnification SEM image of central zone of (a); (c), (d) SEM images of gold film on the suspended multi-layer graphene and high-magnification SEM image of central zone of (c); (e), (f) SEM images of gold film on the suspended graphite and high-magnification SEM image of central zone of (e).

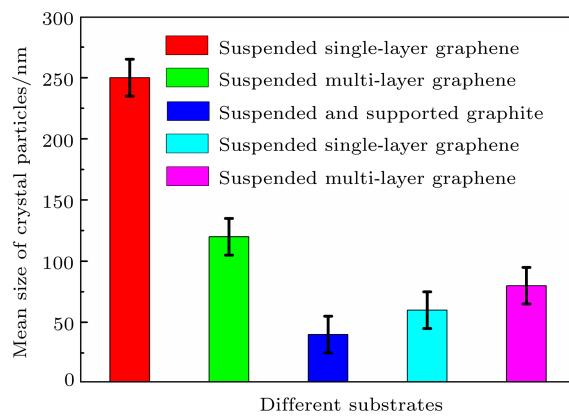


图4 金颗粒大小随石墨烯层数变化的趋势图

Fig. 4. Full tendency diagram of size of gold particles varying with number of graphene layers.

从图3所示不同石墨烯基底表面金膜形貌的变化, 可以清楚地观察到沉积在悬空石墨烯上的金属颗粒的尺寸和密度比基底支撑的石墨烯上沉积的金属颗粒大。悬空石墨烯上的金形成许多单晶颗粒的聚集, 而不是像基底支撑的石墨烯上的准连续膜。这个现象可以从金原子与石墨烯表面原子之间的相互作用能 E_s 以及金原子之间的结合能 E_a 两个方面给出解释。在沉积过程中, 金原子到达表面, E_s 可以作为拉力以防止其在表面上的更多迁移或限制其扩散路径, 并限制金原子从表面离开到真空, 而 E_a 对后到达表面的金原子起吸引作用, 以形成稳定的金颗粒。其中, 金颗粒的大小 D 就是 E_a 和 E_s 的差值, 可以写成等式^[27,28]: $D \propto e^{-(E_s - E_a)/(k_B T)}$, 其中 k_B 是玻尔兹曼常数, T 是沉积温度。众所周知, 石墨烯由于其邻近原子之间的强π键是化学惰性的, 并且石墨层之间存在弱范德瓦尔斯力。换句话说, 本征石墨烯具有非常低的 E_s , 可以直接导致高迁移率、长扩散路径, 并且在该表面上可以形成大尺寸的单个金晶粒。然而, 对于基底支撑的石墨烯, 与以前报道的石墨烯中的金属插层相比, 与基底相互作用的能量将变得很大^[29]。因此, 基底所支撑的石墨烯上的金颗粒尺寸小于悬空石墨烯上的金颗粒尺寸。此外, 由于基底上石墨烯的表面能量取决于其基底, 因此显示了石墨烯的水透明性质^[30]。可以推断, 如果其基底被空气取代, 那么石墨烯薄膜可能具有低表面能并表现出超疏水性, 如我们之前在垂直石墨烯薄片润湿中的分析^[31]。

为了进一步观察石墨烯和金属间的相互作用, 悬空石墨烯上沉积5 nm厚的金纳米膜在1200 °C条件下进行退火, 退火时间为20 s。图5(a)和

图5(b)显示了退火后悬空表面上金团聚形态的典型SEM图像。可以看出, 当温度高于金的熔点时, 金属在悬空石墨烯上的行为表现与图5(c)所示的荷花叶上水滴的行为相类似。大部分金原子聚集在一起并形成更大的金属膜, 只有少数金纳米颗粒存在于悬空石墨烯的表面上, 这是由于沉积金属使石墨烯表面可能产生少量的缺陷, 从而具有较强的吸收能力。当较高能量的金原子撞击在石墨烯表面时, 这些高能量的金原子是不可避免的, 因为它们的能量分布满足玻尔兹曼分布。为了确定石墨烯效应, 我们观察了基底上退火后金颗粒的形态, 如图5(d)所示, 与石墨烯上的情况完全不同。这表明基底对金原子的束缚能相对石墨烯对金原子的束缚非常高。因此, 悬空石墨烯上金的行为主要取决于本征石墨烯的低表面能或惰性化学性质。

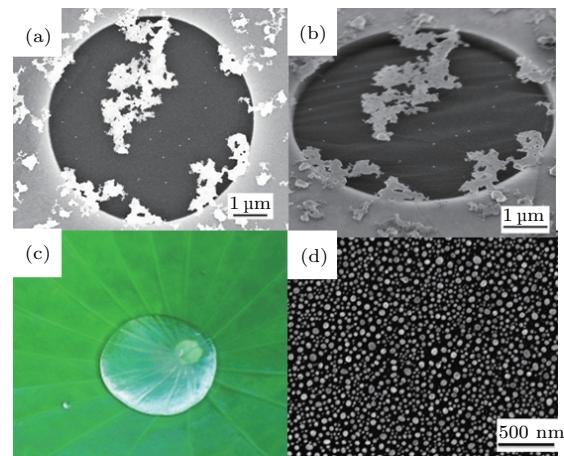


图5 金纳米薄膜的SEM图像 (a) 退火后悬空和不通风的石墨烯上的金膜; (b) 倾斜45°的图(a); (c) 荷叶效应与图(a)的比较; (d) 基底上金膜退火后的形态

Fig. 5. SEM images of gold nanofilm: (a) The gold film on the suspended graphene after annealing; (b) the panel (a) in title 45°; (c) lotus effect as a comparison with panel (a); (d) the gold nanofilm on the substrate after annealing.

4 结 论

通过悬空石墨烯上金纳米薄膜的形貌演变及退火实验, 我们发现随着悬空石墨烯层数的增加, 其表面的金颗粒尺寸从约250 nm减小到约40 nm, 这种悬空石墨烯上金属形态的厚度依赖特性与有基底支撑的石墨烯上发现的用于确定多少层石墨烯的方式正好相反, 极大地拓展了石墨烯表面的金颗粒尺寸与石墨烯层数的依赖关系, 从而完善了用金颗粒尺寸确定石墨烯层数的实验方法。此外, 由

于本征石墨烯的惰性化学性质和与金原子低的相互作用能, 在悬空石墨烯上退火后的金纳米膜的演变行为类似于荷叶表面上的水, 这种行为表明作为微纳加工过程刻蚀掩模的金纳米膜可以通过退火方法小心去除, 但又对石墨烯无破坏, 非常有利于图案化悬空石墨烯器件的加工和制造。

参考文献

- [1] Xia F, Perebeinos V, Lin Y M, Wu Y, Avouris P 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 179
- [2] Grosse K L, Bae M H, Lian F F, Pop E, King W P 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 287
- [3] Wang Z, Xie R, Bui C T, Liu D, Ni X, Li B, Thong J T L 2011 *Nano Lett.* **11** 113
- [4] Goyal V, Balandin A A 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 073113
- [5] Huard B, Stander N, Sulpizio J A, Goldhaber-Gordon D 2008 *Phys. Rev. B* **78** 121402
- [6] Giovannetti G, Khomyakov P A, Brocks G, Karpan V M, van den Brink J, Kelly P J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 026803
- [7] Krstic V, Obergfell D, Hansel S, Rikken G L, Blokland J H, Ferreira M S, Roth S 2008 *Nano Lett.* **8** 1700
- [8] Gong C, Hinojos D, Wang W, Nijem N, Shan B, Wallace R M, Cho K, Chabal Y J 2012 *ACS Nano* **6** 5381
- [9] Zan R, Bangert U, Ramasse Q, Novoselov K S 2012 *J. Phys. Chem. Lett.* **3** 953
- [10] Zhou H, Qiu C, Liu Z, Yang H, Hu L, Liu J, Yang H, Gu C, Sun L 2010 *J. Am. Chem. Soc.* **132** 944
- [11] Zhou H Q, Qiu C Y, Yu F, Yang H C, Chen M J, Hu L J, Sun L F 2011 *J. Phys. Chem. C* **115** 11348
- [12] Zhou H Q, Yu F, Yang H C, Chen M J, Wang G, Sun L F 2011 *Chem. Phys. Lett.* **518** 76
- [13] Zhou H, Yu F, Yang H, Qiu C, Chen M, Hu L, Guo Y, Yang H, Gu C, Sun L 2011 *Chem. Commun.* **47** 9408
- [14] Du X, Skachko I, Barker A, Andrei E Y 2008 *Nat. Nanotechnol.* **3** 491
- [15] Balandin A A 2011 *Nat. Mater.* **10** 569
- [16] Shi Z W, Lu H L, Zhang L C, Yang R, Wang Y, Liu D H, Guo H M, Shi D X, Gao H J, Wang E G, Zhang G Y 2012 *Nano Res.* **5** 82
- [17] Newaz A K, Puzyrev Y S, Wang B, Pantelides S T, Bolotin K I 2012 *Nat. Commun.* **3** 734
- [18] Chen C, Rosenblatt S, Bolotin K I, Kalb W, Kim P, Kymissis I, Stormer H L, Heinz T F, Hone J 2009 *Nat. Nanotechnol.* **4** 861
- [19] Klimov N N, Jung S, Zhu S, Li T, Wright C A, Solares S D, Newell D B, Zhitenev N B, Stroscio J A 2012 *Science* **336** 1557
- [20] Lindahl N, Midtvedt D, Svensson J, Nerush O A, Lindvall N, Isacsson A, Campbell E E 2012 *Nano Lett.* **12** 3526
- [21] Bunch J S, van der Zande A M, Verbridge S S, Frank I W, Tanenbaum D M, Parpia J M, Craighead H G, McEuen P L 2007 *Science* **315** 490
- [22] 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
- [23] Ni Z H, Yu T, Lu Y H, Wang Y Y, Feng Y P, Shen Z X 2008 *ACS Nano* **2** 2301
- [24] Ferrari A C, Meyer J C, Scardaci V, Casiraghi C, Lazzari M, Mauri F, Piscanec S, Jiang D, Novoselov K S, Roth S, Geim A K 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 187401
- [25] Zabel J, Nair R R, Ott A, Georgiou T, Geim A K, Novoselov K S, Casiraghi C 2012 *Nano Lett.* **12** 617
- [26] Pisana S, Lazzari M, Casiraghi C, Novoselov K S, Geim A K, Ferrari A C, Mauri F 2007 *Nat. Mater.* **6** 198
- [27] Ma L Y, Tang L, Guan Z L, He K, An K, Ma X C, Jia J F, Xue Q K, Han Y, Huang S, Liu F 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 266102
- [28] Mo Y W, Kleiner J, Webb M B, Lagally M G 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 1998
- [29] Huang L, Pan Y, Pan L D, Gao M, Xu W Y, Que Y D, Zhou H T, Wang Y L, Du S X, Gao H J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 163107
- [30] Rafiee J, Mi X, Gullapalli H, Thomas A V, Yavari F, Shi Y, Ajayan P M, Koratkar N A 2012 *Nat. Mater.* **11** 217
- [31] Tian S, Li L, Sun W, Xia X, Han D, Li J, Gu C 2012 *Sci. Rep.* **2** 511

Morphological evolution and liquid-like behavior of gold nanofilm on the suspended graphene*

Tian Shi-Bing Gu Chang-Zhi[†] Li Jun-Jie[‡]

(*Laboratory of Microfabrication, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 28 April 2018; revised manuscript received 10 May 2018)

Abstract

The morphological evolutions of gold nanofilm on the suspended graphene is investigated before and after an annealing process, and two important phenomena are observed. First, the layer number of suspended graphene can be determined by the morphological change of gold nanofilm, and it is noteworthy that as-observed results without the substrate supporting effect are completely contrary to previously reported results of the graphene supported by the substrate. Second, after a rapid and careful annealing process, the gold nanofilm on the suspended graphene shows a liquid-like behavior as if the water is on the lotus leave surface. The mechanisms behind these phenomena are discussed in detail. These results provide very useful information for many applications such as metal intercalation in graphene, electronic contact between metal and graphene, fabrication of patterned suspended graphene device, etc.

Keywords: suspended graphene, metal nanofilm, Raman

PACS: 68.65.Pq, 81.15.-z

DOI: 10.7498/aps.67.20180844

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674387, 61390503, 11574369) and the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2016YFA0200800, 2016YFA0200400).

† Corresponding author. E-mail: czgu@iphy.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jjli@iphy.ac.cn

ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 67, No. 12, June 2018

CONTENTS

Special issue: The 90th anniversary of the Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

GENERAL

- 120201 Real-time time dependent density functional theory with numerical atomic orbital basis set: methodology and applications

Guan Meng-Xue Lian Chao Meng Sheng

- 120301 Quantum computation and quantum simulation

Fan Heng

- 120302 Quantum control of nitrogen-vacancy center in diamond

Liu Gang-Qin Xing Jian Pan Xin-Yu

- 120601 Research progress of materials and devices for room-temperature Na-ion batteries

Lu Ya-Xiang Zhao Cheng-Long Rong Xiao-Hui Chen Li-Quan Hu Yong-Sheng

ELECTROMAGNETISM, OPTICS, ACOUSTICS, HEAT TRANSFER, CLASSICAL MECHANICS, AND FLUID DYNAMICS

- 124201 Theoretical and experimental investigation of light guidance in hollow-core anti-resonant fiber

Ding Wei Wang Ying-Ying Gao Shou-Fei Hong Yi-Feng Wang Pu

- 124202 Theoretical and experimental studies on terahertz radiation from laser-driven air plasma

Wang Wei-Min Zhang Liang-Liang Li Yu-Tong Sheng Zheng-Ming Zhang Jie

- 124203 Research progress on octave supercontinuum generation in solid medium

Zhao Kun Xu Si-Yuan Jiang Yu-Jiao Gao Yi-Tan Liu Yang-Yang He Peng Teng Hao Zhu Jiang-Feng Wei Zhi-Yi

CONDENSED MATTER: STRUCTURAL, MECHANICAL, AND THERMAL PROPERTIES

- 126101 Recent progress of the glassy materials and physics

Sun Yi-Tao Wang Chao Lü Yu-Miao Hu Yuan-Chao Luo Peng Liu Ming Xian Hai-Jie Zhao De-Qian Ding Da-Wei Sun Bao-An Pan Ming-Xiang Wen Ping Bai Hai-Yang Liu Yan-Hui Wang Wei-Hua

- 126801 Construction, physical properties and applications of low-dimensional atomic/molecular crystals

Huang Li Li Geng Zhang Yu-Yang Bao Li-Hong Huan Qing Lin Xiao Wang Ye-Liang Guo Hai-Ming Shen Cheng-Min Du Shi-Xuan Gao Hong-Jun

(Continued)

- 126802 ***In situ* transmission electron microscopy studies on nanomaterials and HfO₂-based storage nanodevices**

*Li Chao Yao Yuan Yang Yang Shen Xi Gao Bin Huo Zong-Liang Kang Jin-Feng
Liu Ming Yu Ri-Cheng*

- 126803 **Morphological evolution and liquid-like behavior of gold nanofilm on the suspended graphene**

Tian Shi-Bing Gu Chang-Zhi Li Jun-Jie

CONDENSED MATTER: ELECTRONIC STRUCTURE, ELECTRICAL, MAGNETIC, AND OPTICAL PROPERTIES

- 127101 **Crystal structures and physical properties of novel 4d/5d based superconductors**

Song Yan-Peng Chen Hong-Xiang Guo Jian-Gang Chen Xiao-Long

- 127201 **Recent progress of nonvolatile, multifunctional and programmable spin logic**

Han Xiu-Feng Wan Cai-Hua

- 127401 **Nematic fluctuations in iron-based superconductors studied by resistivity change under uniaxial pressure**

Li Shi-Liang Liu Zhao-Yu Gu Yan-Hong

- 127402 **Effect of Pb doping on metallic state of cubic pyrochlore Cd₂Ru₂O₇**

*Jiao Yuan-Yuan Sun Jian-Ping Prashant Shahi Liu Zhe-Hong Wang Bo-Sen
Long You-Wen Cheng Jin-Guang*

- 127403 **New progress on FeSe-based superconductors: high-quality and high-critical-parameter (Li,Fe)OHFeSe thin film**

*Dong Xiao-Li Yuan Jie Huang Yu-Long Feng Zhong-Pei Ni Shun-Li Tian Jin-Peng
Zhou Fang Jin Kui Zhao Zhong-Xian*

- 127501 **Fundamental circuit element and nonvolatile memory based on magnetoelectric effect**

Shen Jian-Xin Shang Da-Shan Sun Young

- 127801 **Quantum coherence measurement with femtosecond time-resolve two-dimensional electronic spectroscopy: principles, applications and outlook**

Weng Yu-Xiang Wang Zhuan Chen Hai-Long Leng Xuan Zhu Rui-Dan

- 127901 **Development of novel high-resolution electron energy loss spectroscopy and related studies on surface excitations**

Zhu Xue-Tao Guo Jian-Dong

INTERDISCIPLINARY PHYSICS AND RELATED AREAS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

- 128101 **Anomalous light-to-electricity conversion of low dimensional semiconductor in p-n junction and interband transition quantum well infrared detector**

*Liu Jie Wang Lu Sun Ling Wang Wen-Qi Wu Hai-Yan Jiang Yang Ma Zi-Guang
Wang Wen-Xin Jia Hai-Qiang Chen Hong*

- 128102 **Research progress of single crystal growth for topological semimetals**

*Yi Chang-Jiang Wang Le Feng Zi-Li Yang Meng Yan Da-Yu Wang Cui-Xiang
Shi You-Guo*

(Continued)

128103 **Research progress of high-quality monolayer MoS₂ films**

Wei Zheng Wang Qin-Qin Guo Yu-Tuo Li Jia-Wei Shi Dong-Xia Zhang Guang-Yu

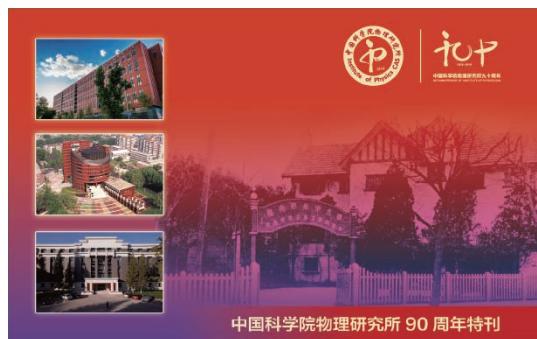
128501 **Progress on the failure analysis of lithium battery**

Wang Qi-Yu Wang Shuo Zhou Ge Zhang Jie-Nan Zheng Jie-Yun Yu Xi-Qian Li Hong

128801 **Development of new lithium battery materials by material genome initiative**

Xiao Rui-Juan Li Hong Chen Li-Quan

Color figures can be viewed in the online issue.



中国科学院物理研究所90周年特刊

公 告

为实现录用稿件的提前在线全文出版,我刊采用单篇论文给定编码的目录方案,编码的设定规则是:期号 + 文章第一个 PACS 代码的前两位数字 + 序号(按同一类代码文章录用时间的先后排序).

《物理学报》已加入“中国知网”优先数字出版,录用文章将先于印刷版期刊在中国知网 www.cnki.net 在线优先发布,如果作者不愿优先出版可在版权协议里补充说明,如无补充说明,编辑部将视为同意授权.

《物理学报》编辑部

物理 学 报 (WULI XUEBAO)

(半月刊, 1933 年创刊)

2018 年 6 月 第 67 卷 第 12 期

版 权 所 有

ACTA PHYSICA SINICA

(Semimonthly, First Published in 1933)

Vol. 67 No. 12 June 2018

© 2018 Chinese Physical Society

编 辑 出 版 《物 理 学 报》编 辑 部
(北京 603 信 箱 邮 政 编 码 100190)

主 编 欧 阳 钟 灿

主 管 中 国 科 学 院

主 办 中 国 物 理 学 会

中国科学院物理研究所
(北京 603 信 箱 邮 政 编 码 100190)

印 刷 装 订 北京科信印刷有限公司

总 发 行 处 北京报刊发行局

订 购 处 全国各邮电局

国外总发行处 中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信 箱 邮 政 编 码 100044)

广 告 发 布 登 记 文 号 京海工商广登字 20170113 号

Edited by the Editorial Office of
ACTA PHYSICA SINICA
Editor-in-Chief: Ouyang Zhong-Can
Published by Chinese Physical Society
and Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences
Distributed by China International
Book Trading Corporation
P.O. Box 399, Beijing 100044, China
Editorial Office:
P.O. Box 603, Beijing 100190, China
E-mail: apsoffice@iphy.ac.cn
<http://wulixb.iphy.ac.cn>

ISSN 1000-3290

国内邮发代号: 2-425

国内统一刊号: CN11-1958/O4

国外发行代号: M52 定价: 120 元

公 开 发 行