

三氯化铁基少层石墨烯插层化合物的拉曼光谱

陈闰堃¹, 陈佳宁^{1,2}

1. 中国科学院物理研究所, 北京 100190
2. 量子物质科学协同创新中心, 北京 100190

摘要 利用拉曼光谱技术,研究了三氯化铁插层掺杂的少层石墨烯薄片。通过G带拉曼成像可判明样品不同的插层掺杂部分及其掺杂程度。G带拉曼峰在双层石墨烯和四层石墨烯中分别为单峰和双峰的不同结构。在石墨烯边缘处,G带拉曼峰会比其内部多出1个本征的 G_0 峰,说明石墨烯边缘仍然存在未经插层掺杂的石墨烯。经过插层的双层石墨烯2D带拉曼峰仍可拟合出4个洛伦兹峰。

关键词 石墨烯;拉曼光谱;少层石墨烯插层化合物;三氯化铁基

中图分类号 O469

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.001

Raman spectroscopy for FeCl_3 -based few-layer graphene intercalation compounds

CHEN Runkun¹, CHEN Jianing^{1,2}

1. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Collaborative Innovation Center of Quantum Matter, Beijing 100190, China

Abstract This paper investigates the FeCl_3 -based few-layer graphene intercalation compound flakes based on the Raman spectroscopy. Different intercalated parts of the graphene flake and the corresponding doping level can be retrieved by the G band Raman mapping. The G band Raman spectrum consists of a single peak or double peaks for the bilayer and tetralayer graphenes, respectively. A surprising intrinsic G_0 peak appears at the edges of the intercalated graphene, which suggests that the doped graphene is partially undoped at the edges. Furthermore for the bilayer graphene intercalation compound flake, the 2D band peak can fit with four Lorentzian peaks with different full width half maxima (FWHM). This study provides a better understanding of the property of the electrically modified graphene.

Keywords graphene; Raman spectroscopy; few-layer graphene intercalation compounds; FeCl_3 -based

石墨插层化合物是将不同的原子或分子插入石墨层间,形成一层新的插层剂层的复合材料。插层剂的存在使得石墨层间距增大,同时不同插层剂也会让石墨层的自由载流子发生迁移,从而得到具有不同电学、热学和磁学等性质的化合物^[1]。因此石墨插层化合物在电极、超导、催化剂、储氢、电

池、显示器等新型材料的研制方面具有重要价值^[2-5]。传统的石墨插层化合物由于尺寸原因,难以应用在微电子器件的制造领域^[6]。石墨烯是碳原子以正六边形结构周期排列而成的二维晶体。石墨烯具有极大的比表面积($2630 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)^[7]、极高的可见光透过率(97.7%),还具有良好的导电和导热能力及

收稿日期:2015-01-07;修回日期:2015-01-29

基金项目:国家自然科学基金项目(11474350);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB921001);中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB07030200)

作者简介:陈闰堃,博士研究生,研究方向为二维材料近场光学物性,电子信箱:rkchen@iphy.ac.cn;陈佳宁(通信作者),研究员,研究方向为微纳光学,电子信箱:jnchen@iphy.ac.cn

引用格式:陈闰堃,陈佳宁.三氯化铁基少层石墨烯插层化合物的拉曼光谱[J].科技导报,2015,33(5):13-17.

高强度的机械性能^[8,9],引发了材料科学、半导体技术、微电子技术等领域的研究风潮^[10,11]。因此,以少层石墨烯为基础的石墨烯插层化合物研究在新型微纳电子、透明电极、高频晶体管等器件的制造方面具有广阔的前景^[12-14]。

石墨烯插层化合物插层剂分为施主型和受主型两类。施主型插层剂中,电子从插层剂迁移到石墨层中;而受主型插层剂中,电子从石墨层迁移到插层剂层中^[1]。大多数石墨烯插层化合物在空气中都是不稳定的,然而对于 FeCl_3 、 SbCl_5 插层的石墨烯插层化合物, FeCl_3 和 SbCl_5 插层分子在空气中较为稳定,载流子转移保持更加稳定,掺杂性质保持较好,不容易被氧化^[1,6,12]。因此对于少层的石墨烯插层化合物来说,利用 FeCl_3 对石墨烯插层进行掺杂得到的化合物更加稳定,更容易实现应用。

拉曼光谱是研究石墨烯性质的常用方法,主要通过研究入射激光与石墨烯结构内的缺陷、声子等发生作用,来表征石墨烯的结构性质及电学性质^[15-20]。本文测量一块 FeCl_3 插层的石墨烯样品的拉曼光谱,通过对拉曼光谱的分析得到其结构性质。

1 实验材料及方法

样品石墨烯插层化合物通过两室气相传输法制备^[11,12,21]。首先,通过机械剥离高定向裂解石墨获得石墨烯薄片,并将其转移到 SiO_2 (300 nm)/Si衬底上;随后将无水三氯化铁粉末和石墨烯薄片放入真空石英管中,分别以 310°C 、 360°C 加热7.5 h(升温及降温速率均为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$),最后将石墨烯表面吸附的 FeCl_3 清洗干净。

实验仪器:共焦拉曼显微镜(confocal Raman microscope WITec UHTS 300),100倍物镜,数值孔径 $NA \approx 0.8$,分辨率 $R = 0.61\lambda/(NA) \approx 400 \text{ nm}$;激光器:倍频Nd:YAG(钕铝石榴石晶体)激光(德国WITec公司),532 nm激发光,0.5 mW功率;压电式扫描平台:piezo-scanner(P-500,德国Physik Instrumente公司);CCD探头:DU970_BV(英国Andor公司)。

2 结果分析和讨论

石墨烯插层化合物的插层阶数指相邻的两层插层剂原子(或分子)层间的石墨烯层数,其反映了石墨烯插层化合物插层状态。 FeCl_3 属于受主型插层剂,插层使得电子从石墨中迁移到 FeCl_3 层,增大石墨中自由载流子浓度^[1,6,12,21]。因此,不同阶数插层状态的石墨可以表征不同载流子浓度的石墨。石墨烯G带拉曼峰产生于 sp^2 杂化碳原子的平面内振动^[17],通过分析G带拉曼峰的形状位置可以表征石墨烯的掺杂类型及浓度^[16-19]。所以,可利用石墨烯G带拉曼峰的形状特征表示少层石墨烯的插层的不同插层阶数和掺杂状态。

不同阶数插层的 FeCl_3 石墨烯插层化合物,其G带拉曼峰表现出不同的特征谱线。其中,1阶插层的 FeCl_3 石墨烯插层化合物每层石墨两侧均与一层 FeCl_3 相邻,石墨中电子大量转移到

FeCl_3 层中。其G带拉曼峰为单峰,与未掺杂的石墨相比其拉曼峰蓝移至 1620 cm^{-1} 处。而2阶 FeCl_3 石墨烯插层化合物由于每层石墨只与一层 FeCl_3 相邻,因此电子从石墨中迁移至 FeCl_3 的数量较少,所以单层石墨中的载流子浓度较小,G带拉曼峰蓝移稍小至 1610 cm^{-1} 处^[1,2,22]。与石墨烯插层化合物类似,将重新定义 FeCl_3 插层的少层石墨烯插层化合物中每层石墨烯的插层状态。其中,两侧均与 FeCl_3 分子层相邻的石墨烯定义为1阶插层状态的石墨烯,而只有一侧有 FeCl_3 分子层的石墨烯定义为2阶的石墨烯层,因此少层石墨烯中会存在处于不同阶数插层掺杂状态的单层石墨烯。图1为少层石墨烯 FeCl_3 插层化合物结构示意图,可以看出少层石墨烯插层化合物中,不同的石墨烯层其插层掺杂性质并不相同。在三层石墨烯 FeCl_3 插层化合物中,中间层的石墨烯处于1阶插层状态,而顶层和底层石墨烯处于2阶插层状态。而在双层石墨烯 FeCl_3 插层化合物中每一层石墨烯均处于2阶插层掺杂态。

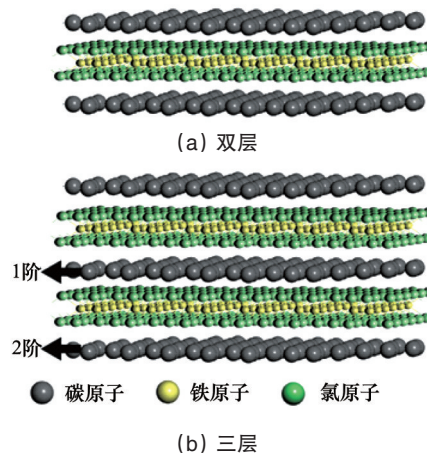


图1 FeCl_3 基少层石墨烯插层化合物结构示意图
Fig. 1 Schematic diagrams of FeCl_3 -based few-layer graphene intercalation compounds

根据 FeCl_3 石墨烯插层化合物G带拉曼峰的谱线特征,对少层石墨烯 FeCl_3 插层化合物G带拉曼峰在不同积分区间的强度积分,如图2所示。图2(b)中,石墨烯本征位移在 1580 cm^{-1} 附近的G带拉曼积分强度在整个区域内很小,而在样品边界及拉曼测量区的中间部分具有较大的本征G带拉曼峰强度。因此判断:掺杂样品整体掺杂性质比较均匀,形成高掺杂使得样品G带拉曼峰整体蓝移,而在边界及中间部分少处具有较大本征G带拉曼峰积分强度则表示在该处存在没有经过 FeCl_3 插层的石墨烯。图2(c)、(d)中,可以看到样品左侧G带拉曼峰中心在 1610 cm^{-1} 处的拉曼峰具有较大的强度,而右侧拉曼峰中心在 1620 cm^{-1} 附近的强度较大,说明两部分的石墨烯具有不同的插层掺杂状态。据此,推断样品的 FeCl_3 插层掺杂比较均匀,但在样品边缘与样品上某些较小的区域存在未插层区域,同时样品左侧与右侧的G带拉曼峰在同一积分区间内强度的不一致说明其自由载流子浓度不一致,初步

认为是由两部分的石墨烯层数不同引起。

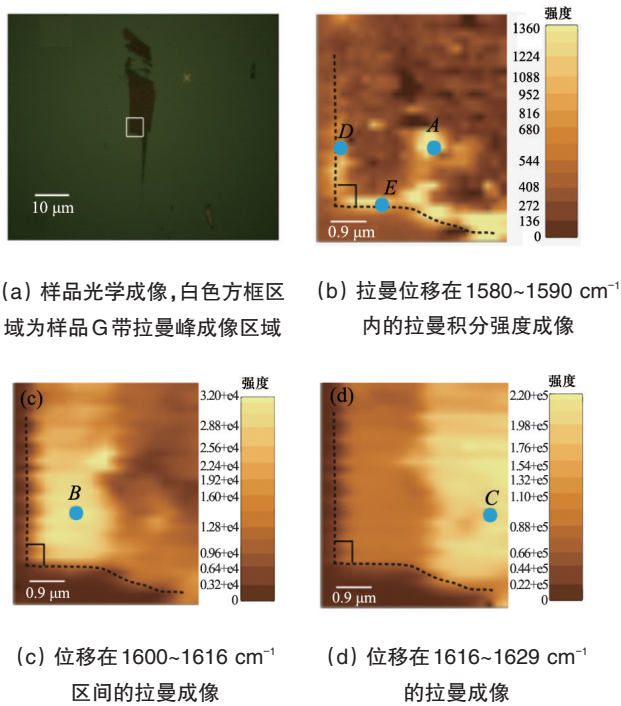


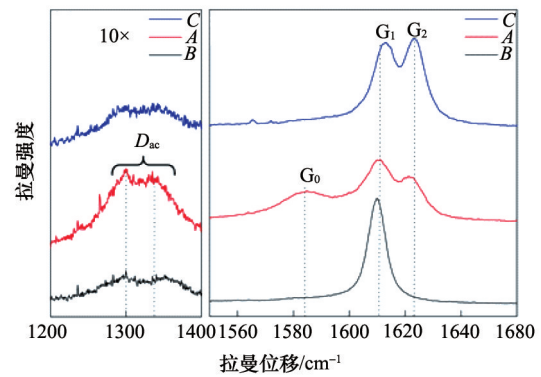
图2 样品光学成像及拉曼成像(黑色虚线表示石墨烯样品边缘)

Fig. 2 Optical image and Raman mapping of a sample (black dotted line indicates the edge of the sample)

在样品左右两侧部分及中间具有较大本征 G_0 峰强度的区域选择5个点(图2中A~E点)测量其拉曼谱线,如图3和图4所示(图中5 \times 、10 \times 表示其拉曼谱线分别放大5倍、10倍)。图3(a)和图4(a)是样品不同位置的D带拉曼峰谱线。从图3(a)中,可以看到在B、C处 $I_D/I_G \approx 1\%$,所以B、C区域石墨烯晶体结构良好,而在A处 D_{ac} 峰的强度与G带拉曼峰强度可比,表明该处石墨烯晶体结构较差,可能存在边界或者较大的缺陷^[17,18,23], D_{ac} 的双峰结构说明在加热机械剥离的石墨烯制备 FeCl_3 插层化合物时产生了无定形碳(amorphous carbon)^[24]。由于A点处于样品两部分不同区域之间,所以认为A处为两部分不同层数的石墨烯的边界。同时注意到,样品存在一个90°的边界夹角。因此样品的直角边分别为完全锯齿型(zigzag)边缘和扶手椅型(armchair)边缘结构。图4(a)为90°边界夹角的两直角边的D带拉曼峰谱线。可以看到在E点处其D带拉曼峰强度明显强于D点处的拉曼峰强度,所以E点处所在直角边为完全的扶手椅型直角边,而D点处所在直角边为完全的锯齿型直角边^[25]。

另一方面,图3(b)和图4(b)为样品G带拉曼峰谱线。可以看到样品不同位置,G带拉曼峰表现出单峰、双峰甚至三峰结构。在石墨烯边界A、D、E点处均出现了拉曼位移中心在1585 cm^{-1} 处的本征 G_0 峰,而在石墨烯内部区域B、C处均没有出现 G_0 峰。石墨烯在应力存在条件下简并的G峰会分裂为2个小峰并出现红移现象^[26],而样品G带拉曼峰出现明显的蓝

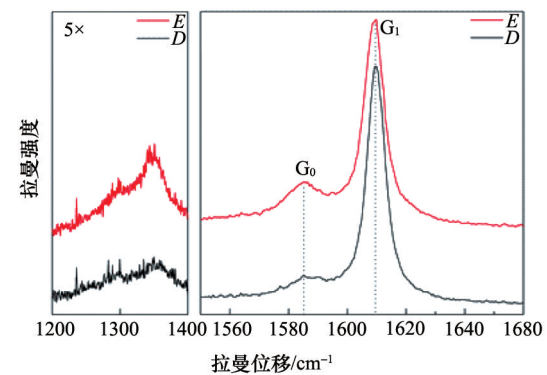
移,因此样品内部G带拉曼峰的分峰结构不可能是由于样品内部应力导致的G峰分裂。



(a) D带拉曼特征谱线 (b) G带拉曼特征谱线

图3 样品拉曼峰成像中A、B、C点的拉曼特征谱线

Fig. 3 Raman spectrum of A,B,C three blue dots in Fig. 2



(a) D带拉曼特征谱线 (b) G带拉曼特征谱线

图4 样品拉曼峰成像中D、E点的拉曼特征谱线

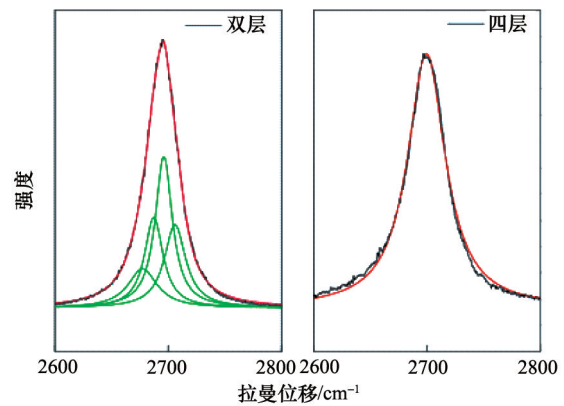
Fig. 4 Raman spectrum of D and E two blue dots in Fig. 2

而在不均匀掺杂的 FeCl_3 插层的双层石墨烯中,其G带拉曼峰同样出现了拉曼位移中心在1585 cm^{-1} 和1610 cm^{-1} 的 G_0 、 G_1 双峰结构。其中,位移在1585 cm^{-1} 左右的峰对应未掺杂的石墨烯的G带拉曼峰,而位移在1610 cm^{-1} 左右的峰对应 FeCl_3 插层掺杂石墨烯的G带拉曼峰^[27]。同时 FeCl_3 分子在插层中,首先需要由活化能很大的分子在边界处插层形成岛状结构打开相邻的石墨烯层,使活化能较小的 FeCl_3 分子扩散进入石墨烯层间完成插层,因此石墨烯边界处容易存在 FeCl_3 分子的岛状结构及未掺杂的石墨烯部分^[1,28,29]。注意到样品G带拉曼峰的 G_0 、 G_1 、 G_2 的拉曼位移中心刚好分别对应本征、1阶及2阶插层状态的石墨烯的拉曼位移中心。所以,认为样品G带拉曼峰 G_0 、 G_1 、 G_2 的三峰结构是由不同插层掺杂阶数的石墨烯层引起的峰结构。其中, G_0 为本征的G带拉曼峰, G_1 、 G_2 为蓝移的G带拉曼峰,并且由于石墨烯层的不同阶数的 FeCl_3 插

层状态,其自由载流子浓度不同,使得 G_1 、 G_2 蓝移量不同,出现分峰结构。同时由于使用高空间分辨率共焦拉曼显微镜,其空间分辨率约为400 nm,可以分辨边界处直径大于400 nm的未插层的石墨烯层结构,在拉曼光谱上出现 G_0 峰。由此认为样品边缘存在部分未插层的石墨烯且直径小于400 nm,所以其G带拉曼光谱同时出现本征 G_0 峰及蓝移 G_1 、 G_2 峰。

A点G带拉曼峰出现 G_0 、 G_1 、 G_2 的三峰结构,其中 G_0 为本征的G带拉曼峰,说明在A点处存在没有经过 $FeCl_3$ 插层掺杂的石墨烯层。而B点处G带拉曼峰为 G_1 单峰,其拉曼位移中心在 1610 cm^{-1} 附近,说明在B点处石墨烯的 $FeCl_3$ 插层状态均为2阶插层状态,而从少层石墨烯插层化合物的结构可以看到,由于衬底与石墨烯之间很难进行插层^[1,27],且顶部吸附的 $FeCl_3$ 分子已经被清洗,因此B处石墨烯只可能是双层的石墨烯,每层石墨烯层均与一层 $FeCl_3$ 分子层相邻,为2阶插层掺杂态。C点G带拉曼峰为 G_1 、 G_2 的双峰结构,说明在C点处的石墨烯同时存在1阶和2阶插层状态的石墨烯层。其中 G_1 、 G_2 峰强度比约为1:1^[21],由于少层石墨烯G带拉曼峰强度与层数正相关^[15],因此C点处的石墨烯只可能为三层或四层石墨烯(五层石墨烯2阶插层层数量少,其拉曼峰强度小于1阶石墨烯)。而对于边界A点处,存在本征未掺杂的石墨烯层的 G_0 峰及1阶、2阶插层的 G_1 、 G_2 峰。因此,若A点处为三层石墨烯,其内部区域则应该出现一层1阶插层的石墨烯以及两层2阶插层的石墨烯, G_1 峰的强度应大于 G_2 峰强度。C点处石墨烯为四层石墨烯,内部区域刚好分别有2层1阶和2阶插层的石墨烯,其拉曼峰强度相当。同时在边缘处, $FeCl_3$ 的岛状插层结构使得一部分石墨烯未经插层其拉曼光谱表现出一个额外的本征 G_0 峰。

对于均匀掺杂的 $FeCl_3$ 插层石墨烯来说,其2D峰由于 $FeCl_3$ 分子层的插入,石墨烯层间距变大,而 $FeCl_3$ 分子层与石墨烯晶格常数不匹配,因此石墨烯层间耦合作用减弱,双层、三层及四层等石墨烯 $FeCl_3$ 插层化合物2D峰均表现为单层石墨烯2D峰的性质,2D峰峰宽变窄,洛伦兹(Lorentz)拟合表现为单峰^[6,12,21]。对于未插层石墨烯,其2D峰的洛伦兹拟合结果可以用来表征少层石墨烯的层数。随着石墨烯层数的增加,石墨烯电子能带结构发生变化,单层石墨烯2D峰为洛伦兹峰,而双层石墨烯可以用洛伦兹拟合出4个分峰结构^[15,16,18,19,30],四层石墨烯2D峰可以拟合出3个分峰结构^[16]。如图5所示,对双层石墨烯和四层石墨烯的2D峰进行了洛伦兹拟合。双层石墨烯2D峰拉曼位移在 2694.4 cm^{-1} 处,峰宽为 30.6 cm^{-1} ,而四层石墨烯2D峰拉曼位移在 2699.4 cm^{-1} 处,峰宽为 40.6 cm^{-1} ,都出现了蓝移以及峰宽变窄的现象^[15,16]。另一方面,对经过 $FeCl_3$ 插层的双层石墨烯2D峰进行洛伦兹拟合,可以拟合出4个分峰结构,说明电子能带结构与双层石墨烯电子能带结构类似。而四层石墨烯插层部分不能拟合出3个洛伦兹分峰。



(a) 双层石墨烯石墨烯部分 2D峰洛伦兹拟合 (b) 样品四层石墨烯部分 2D峰洛伦兹拟合

图5 样品双层石墨烯和四层石墨烯部分2D峰洛伦兹拟合
Fig. 5 Lorentz fitting of 2D band Raman peak for bilayer and four-layer graphene compounds, respectively

3 结论

少层石墨烯的 $FeCl_3$ 插层化合物中的石墨烯层可能存在3种插层掺杂状态,即两侧均存在一层 $FeCl_3$ 分子层的1阶插层掺杂状态,只有一侧存在一层 $FeCl_3$ 分子的2阶插层掺杂和两侧均没有 $FeCl_3$ 分子的本征状态。认为在少层石墨烯的 $FeCl_3$ 插层化合物中,每层石墨烯都是互不影响的插层掺杂状态,因此其G带拉曼峰表现出独立的特征,因而出现不同的分峰结构。利用 $FeCl_3$ 插层对制备少层石墨烯不同区域的不同掺杂浓度的石墨烯结构材料具有重要意义。不同插层掺杂状态的石墨烯层中自由载流子浓度不同,引起的G峰的蓝移程度不一致,并且出现G峰的多峰结构,可以通过G峰的蓝移及峰型情况判断其插层掺杂状态。此外在少层石墨烯的 $FeCl_3$ 插层化合物中,由于石墨烯边缘处形成完全插层需要具有很大活化能的 $FeCl_3$,因此在石墨烯边缘处易出现 $FeCl_3$ 分子的岛状结构,使得一部分石墨烯未能插层掺杂,G带拉曼峰会比石墨烯内部区域多出现一个本征的 G_0 峰。

另一方面,经过 $FeCl_3$ 插层的石墨烯其2D峰出现蓝移并且峰宽变窄, $FeCl_3$ 插层对双层石墨烯电子能带结构的影响较小,样品双层石墨烯部分可以用洛伦兹拟合出4个分峰,电子能带结构与为插层掺杂双层石墨烯类似。 $FeCl_3$ 插层四层石墨烯洛伦兹拟合为单峰,电子能带结构与未掺杂四层石墨烯电子能带结构相差大。

参考文献(References)

- [1] Dresselhaus M S, Dresselhaus G. Intercalation compounds of graphite[J]. *Advances in Physics*, 2002, 51(1): 1-186.
- [2] Caswell N, Solin S A. Vibrational excitations of pure $FeCl_3$ and graphite intercalated with ferric chloride[J]. *Solid State Communications*, 1978, 27

- (10): 961–967.
- [3] Enoki T S M, Endo M. Graphite intercalation compounds and applications [M]. London: Oxford University Press, 2003.
- [4] Underhill C, Leung S Y, Dresselhaus G, et al. Infrared and Raman spectroscopy of graphite–ferric chloride[J]. Solid State Communications, 1979, 29(11): 769–774.
- [5] Grüneis A, Attaccalite C, Rubio A, et al. Electronic structure and electron–phonon coupling of doped graphene layers in KC₈[J]. Physical Review B, 2009, 79(20): 205106.
- [6] Zhao W, Tan P H, Liu J, et al. Intercalation of few–layer graphite flakes with FeCl₃: Raman determination of fermi level, layer by layer decoupling, and stability[J]. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(15): 5941–5946.
- [7] Liu C, Yu Z, Neff D, et al. Graphene–based supercapacitor with an ultrahigh energy density[J]. Nano Letters, 2010, 10(12): 4863–4868.
- [8] Park S, Ruoff R S. Chemical methods for the production of graphenes[J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(4): 217–224.
- [9] Stankovich S, Dikin D A, Dommett G H, et al. Graphene–based composite materials[J]. Nature, 2006, 442(7100): 282–286.
- [10] Lin Y M, Dimitrakopoulos C, Jenkins K A, et al. 100–GHz transistors from wafer–scale epitaxial graphene[J]. Science, 2010, 327(5966): 662–662.
- [11] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183–191.
- [12] Khrapach I, Withers F, Bointon T H, et al. Novel highly conductive and transparent graphene–based conductors[J]. Advanced Materials, 2012, 24(21): 2844–2849.
- [13] Das A, Pisana S, Chakraborty B, et al. Monitoring dopants by Raman scattering in an electrochemically top–gated graphene transistor[J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(4): 210–215.
- [14] Chen J H, Jang C, Xiao S, et al. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂[J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(4): 206–209.
- [15] Ni Z, Wang Y, Yu T, et al. Raman spectroscopy and imaging of graphene [J]. Nano Research, 2008, 1(4): 273–291.
- [16] Dresselhaus M, Malard L, Pimenta M, et al. Raman spectroscopy in graphene[J]. Physics Reports, 2009, 473(5): 51–87.
- [17] Ferrari A C, Basko D M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene[J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(4): 235–246.
- [18] Ferrari A C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects[J]. Solid State Communications, 2007, 143(1): 47–57.
- [19] Ferrari A, Meyer J, Scardaci V, et al. Raman spectrum of graphene and graphene layers[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(18): 187401.
- [20] Reich S, Thomsen C. Raman spectroscopy of graphite[J]. Philosophical transactions of the royal society of London series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 362(1824): 2271–2288.
- [21] Zhan D, Sun L, Ni Z H, et al. FeCl₃–based few–layer graphene intercalation compounds: Single linear dispersion electronic band structure and strong charge transfer doping[J]. Advanced Functional Materials, 2010, 20(20): 3504–3509.
- [22] Chan C, Ho K, Kamitakahara W. Zone–center phonon frequencies for graphite and graphite intercalation compounds: Charge–transfer and intercalate–coupling effects[J]. Physical Review B, 1987, 36(6): 3499.
- [23] Casiraghi C, Hartschuh A, Qian H, et al. Raman spectroscopy of graphene edges[J]. Nano Letters, 2009, 9(4): 1433–1441.
- [24] Hong J, Park M K, Lee E J, et al. Origin of new broad Raman D and G peaks in annealed graphene[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2700..
- [25] Cançado L G, Pimenta M A, Neves B R A, et al. Influence of the atomic structure on the Raman spectra of graphite edges[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(24): 247401.
- [26] Mohiuddin T, Lombardo A, Nair R, et al. Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, and sample orientation[J]. Physical Review B, 2009, 79(20): 205433.
- [27] Kim N, Kim K S, Jung N, et al. Synthesis and electrical characterization of magnetic bilayer graphene intercalate[J]. Nano Letters, 2011, 11(2): 860–865.
- [28] Metz W, Siemsglüss L. Messungen und berechnungen zur kinetik der einlagerung von FeCl₃ in graphit[J]. Carbon, 1978, 16(4): 225–229.
- [29] Barker J, Croft R. Studies on the formation of graphite–ferric chloride complexes: Kinetics of formation[J]. Australian Journal of Chemistry, 1953, 6(3): 302–314.
- [30] Graf D, Molitor F, Ensslin K, et al. Spatially resolved Raman spectroscopy of single– and few–layer graphene[J]. Nano Letters, 2007, 7(2): 238–242.

(编辑 陈华斌)

 科技导报
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。