材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260307001

4H-SiC表面极性调控的石墨薄膜生长及其柔性导电性能研究

王于洋[1,2]，赵涵雨[1,2]，裴羿成[1,2]，李云凯[1,2]，魏默予[1,2]，孔　涵[1,2]，艾辰霖[1,2]，闫果果[1,3*]，刘兴昉[1,2,3]

（1. 中国科学院半导体研究所 半导体芯片物理与技术全国重点实验室，北京 100083；2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院，北京 100049；3. 低维半导体材料与器件北京市重点实验室，北京 100083）

摘　要： 为探究4H-SiC衬底表面极性对石墨薄膜生长的调控作用，文章采用化学气相沉积（CVD）法，以甲基三氯硅烷（MTS）为前驱体，在1 700℃下制备了石墨薄膜。系统分析了石墨薄膜的物相结构与微观形貌，并对剥离后的薄膜进行了柔性与导电性验证。研究结果表明，受衬底极性调控，石墨薄膜在4H-SiC硅面上为二维层状生长，厚度约为1.94 μm；而在碳面上为纵向柱状生长，厚度达8.11 μm，但缺陷显著增多。其中，硅面上生长的石墨薄膜本征电导率约为1.5×10^4 S/cm，当弯曲直径为0.8 cm时，表面未观察到明显裂纹。经100次连续循环弯折后，该薄膜仍保持一定的电学连续性，电阻变化率最终稳定在约33.7%。该研究揭示了4H-SiC衬底不同极性表面的微观生长差异，证明了硅面生长的石墨薄膜具有一定的柔性导电特征。

关键词： 石墨薄膜；4H-SiC；柔性；表面极性；化学气相沉积

中图分类号： TN304　**文章编号：** 1001－5868(2026)04－0668－07

Growth and Flexible Conductive Properties of Graphite Films Regulated by 4H-SiC Surface Polarity

WANG Yuyang[1,2], ZHAO Hanyu[1,2], PEI Yicheng[1,2], LI Yunkai[1,2], WEI Moyu[1,2], KONG Han[1,2], AI Chenlin[1,2], YAN Guoguo[1,3], LIU Xingfang[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Chips, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, CHN; 2. School of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. Beijing Key Laboratory of Low Dimensional Semiconductor Materials and Devices, Beijing 100083, CHN)

Abstract: In this study, graphite films were prepared via chemical vapor deposition (CVD) at 1 700°C using methyltrichlorosilane (MTS) to investigate the regulatory effect of 4H-SiC surface polarity on the growth of graphite film. The phase structure and micromorphology of the films were systematically analyzed and the flexibility and conductivity of the exfoliated films were verified. The results showed that the growth of the film was governed by the polarity of the substrate; the graphite film exhibited two-dimensional layered growth on the Si-face with a thickness of ~1.94 μm, whereas it exhibited vertical columnar growth on the C-face reaching a thickness of ~8.11 μm with significantly increased defects. Specifically, the graphite film grown on the Si-face exhibited an

收稿日期：2026－03－07.

基金项目：北京市自然科学基金项目（L248097，L258007）.

* 通信作者：闫果果

intrinsic conductivity of 1.5×10^4 S/cm with no visible cracks at a bending diameter of 0.8 cm. The film remained electrically continuous after 100 continuous bending cycles, with the variation in resistance eventually stabilizing at ~33.7%. The findings of this study revealed distinct microscopic growth behaviors on different polar surfaces of the 4H-SiC substrate and confirmed the inherent flexibility and conductivity of the graphite film grown on the Si-face.

Key words: graphite film; 4H-SiC; flexibility; surface polarity; chemical vapor deposition

0　引言

近年来，柔性电子器件在可穿戴设备、人机交互等领域展现出巨大潜力。作为系统的核心组件，柔性电极需在复杂机械形变下维持稳定、高效的电学传输性能[1-6]。其中，碳基导电薄膜，如石墨烯及石墨薄膜，凭借极高的本征电导率、优异的化学稳定性与机械柔韧性，成为极具竞争力的电极候选材料[7-10]。

目前，高质量连续石墨薄膜多采用化学气相沉积（CVD）法在过渡金属箔片（如铜箔、镍箔）上制备[11]。然而，获取自支撑石墨薄膜通常需依赖强酸腐蚀去除金属衬底。这种转移工艺不仅步骤繁琐，而且易引入杂质并造成环境污染，严重制约了柔性石墨薄膜的规模化应用。因此，探索高质量的石墨薄膜的生长方法，具有重要的应用价值。

碳化硅（SiC）因其晶格结构与石墨相匹配，是生长高质量石墨薄膜的理想衬底。4H-SiC作为典型的极性晶体，其表面根据极性可分为（0001）面与（000$\bar{1}$）面，以下简称为硅面与碳面。这两种极性面不同的物理化学性质会显著影响气相沉积过程中碳原子的吸附、迁移与成核[12-13]。然而，现有研究多聚焦于SiC表面热分解制备超薄石墨烯，利用CVD法在SiC表面生长石墨薄膜的研究仍相对匮乏。

基于上述背景，本研究采用高温CVD法，以甲基三氯硅烷（MTS）为前驱体，探究了在1 700℃下4H-SiC衬底的不同极性对石墨薄膜微观生长的调控作用。研究揭示了4H-SiC硅面与碳面诱导的不同的生长机制，并进一步对4H-SiC硅面生长的石墨薄膜进行机械剥离，验证了该石墨薄膜的柔性以及电学稳定性。本工作拓展了对极性表面晶体微观生长机制的认识，并为低成本、绿色化制备柔性石墨电子材料提供了实验参考。

1　实验

实验所用衬底为n型4H-SiC硅面与4H-SiC碳面的商业化衬底，生长前经过标准清洗。在高温CVD管式炉中进行石墨薄膜的制备。将衬底置于恒温区，抽真空后通入10 slm的高纯N_2作为载气，并将炉温升至1 700℃。温度稳定后，通入20 sccm的MTS作为前驱体。沉积过程中，反应腔室压力控制在近乎0 Torr的低压环境，恒温沉积保持30 min。反应结束后，切断前驱体气源，在N_2气氛下自然冷却至室温。

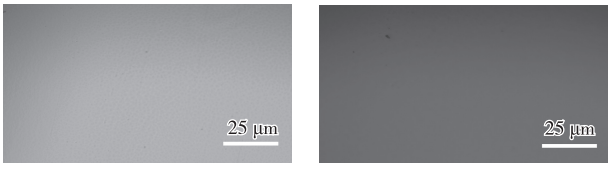
通过光学显微镜（OM）观察薄膜表面形貌，利用拉曼光谱（Raman）和X射线衍射（XRD）表征石墨薄膜的物相结构与结晶质量，使用扫描电子显微镜（SEM）观察薄膜的截面微观生长取向并测量厚度。将4H-SiC硅面生长的石墨薄膜剥离后，使用原子力显微镜（AFM）和X射线光电子能谱（XPS）表征剥离后衬底表面的微观形貌与化学成键，并使用不同直径的圆柱状玻璃棒模具评估其柔性。采用标准四探针法精确测量样品的本征电阻率与电导率。利用B1505A器件分析仪测试薄膜在平展及不同弯曲直径下的电流-电压（*I-V*）特性与循环弯折响应，以评估其导电能力及电学稳定性。

2　结果分析与讨论

2.1　石墨薄膜的物相结构表征

为了评估CVD方法在不同极性4H-SiC衬底上的石墨成膜质量，对沉积后的薄膜表面进行了光学显微形貌观测。

如图1所示，在1 700℃高温及N_2气氛下，无论是在4H-SiC硅面还是碳面上，经过MTS热解沉积后的薄膜表面均呈现出高度平整、致密且连续的宏

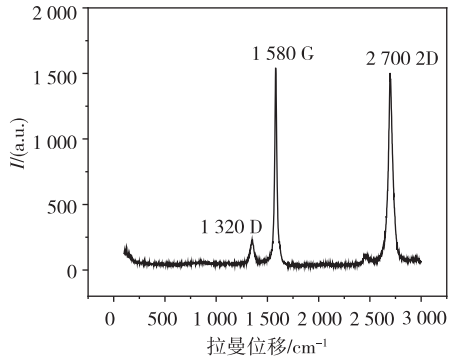


（a）硅面　　（b）碳面

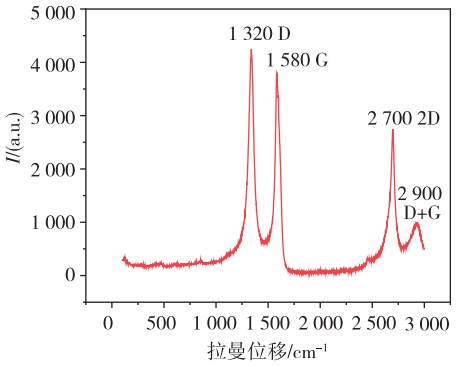
图1　4H-SiC极性面上生长的石墨薄膜表面形貌图

观形貌，未观察到明显的孔洞、裂纹或大尺寸的颗粒团聚。这表明该CVD工艺参数能够有效保证石墨薄膜的均匀沉积。

利用拉曼光谱表征石墨薄膜的物相结构，测试结果如图2所示。结果表明，两种极性面上沉积的薄膜均在约1 320 cm^{-1}、1 580 cm^{-1}和2 700 cm^{-1}处展现出了典型的石墨相特征峰，分别对应于标准石墨材料的D峰、G峰和2D峰[14-15]。这证明生长的薄膜为石墨相，而非无定形碳。



（a）硅面



（b）碳面

图2 4H-SiC极性面上生长的石墨薄膜拉曼光谱

对比图2(a)和2(b)可以发现，在4H-SiC硅面及碳面上生长的石墨薄膜在结晶质量上存在显著差异。在硅面上生长的石墨薄膜拉曼光谱中，G峰与2D峰极为尖锐，且代表缺陷的D峰强度较弱。较低的I_D/I_G比值表明，薄膜面内sp^2碳网相对完整，缺陷密度较低。同时，较强的2D峰进一步证实了该薄膜具有良好的结晶质量。相比之下，碳面上生长的薄膜光谱特征则发生改变，其D峰强度急剧增强，I_D/I_G比值大于1，并在约2 900 cm^{-1}处出现了明显的D+G复合缺陷峰。这种异常强烈的D峰也反映出该石墨薄膜内部存在较高密度的结构缺陷。同时，该样品的2D峰强度相对减弱，即I_{2D}/I_G比值下降，这也表明材料内部的层间相干性较差，呈现出典型的乱层堆垛特征[16]。拉曼光谱测试证明了在4H-SiC硅面生长的石墨薄膜缺陷密度更低、堆叠有序。

对两种薄膜进行了XRD表征，结果如图3所示。

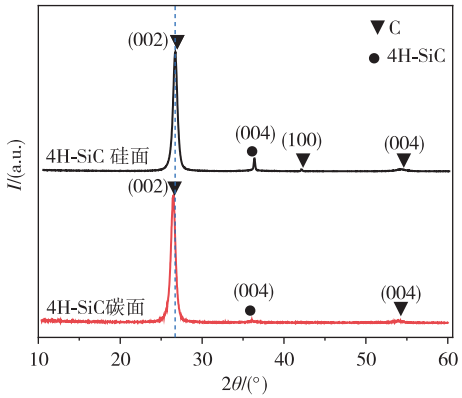
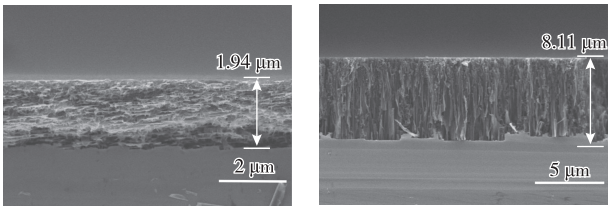


图3 4H-SiC硅面与碳面上生长的石墨薄膜XRD谱

在4H-SiC硅面生长的石墨薄膜，其(002)衍射主峰较尖锐，位于标准的26.5°附近，表明石墨薄膜原子分布较为有序。同时，在35.6°附近观察到了清晰的4H-SiC衬底峰，这与该薄膜较薄的致密层状结构相符。与之相对，4H-SiC碳面生长的薄膜其(002)主峰向低角度偏移至26.1°附近。根据布拉格定律($2d\sin\theta=n\lambda$)，衍射峰位向低角度偏移证明了薄膜内部晶面间距的增大，且因其较大的厚度几乎掩盖了衬底峰信号。XRD测试结果与拉曼光谱的结论相互印证，证明了4H-SiC硅面能够诱导石墨薄膜进行高度有序的二维层状生长，而碳面则是无序的三维乱层堆垛。

2.2 衬底极性对石墨薄膜生长机制的影响

在4H-SiC硅面与碳面上生长的石墨薄膜截面SEM如图4所示。



（a）硅面 （b）碳面

图4 4H-SiC极性面上生长的石墨薄膜截面SEM形貌图

在4H-SiC硅面上生长时，石墨薄膜呈平行于衬底的致密层状生长，厚度约为1.94 μm。而在碳面上生长时，则转变为垂直于衬底的纵向柱状生长，厚度激增至8.11 μm。这是因为在硅面生长

石墨薄膜时，硅原子的表面能较低，初始沉积的活性碳原子会优先与之形成稳定的Si—C强共价键[17]，生长出一层界面缓冲层。这种缓冲层促使其进行二维横向扩展，进而堆垛成结晶质量高的层状石墨。相反，在碳面上生长时，碳原子悬挂键密度较高[18]，与MTS分解产生的碳基团之间相互作用力较弱。这导致碳原子很难在碳面上长距离平铺，而是大量在原地聚集，成为岛状成核的中心。随着这些晶核的长大与相互挤压，后续成核只能沿纵向延伸，最终演变为柱状结构。

2.3　石墨薄膜的机械剥离

施加微小外力即可将石墨薄膜从4H-SiC硅面完整剥离。这主要是因为硅面极性诱导生成的层状结构间仅靠较弱的范德华力维系，层间结合力低，从而易于机械剥离[19]。

对剥离后的4H-SiC衬底进行拉曼光谱表征，结果如图5所示。衬底表面呈现出纯净的4H-SiC晶体特征峰，未检测到石墨或无定形碳的残留信号。

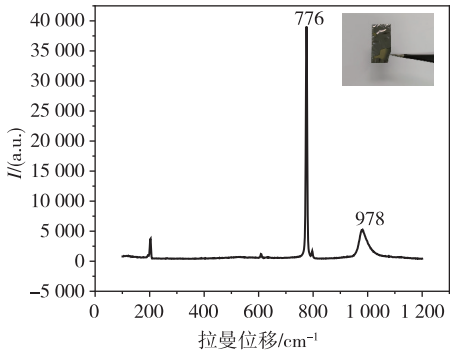


图5　剥离后的4H-SiC衬底拉曼光谱

为了确定剥离发生的具体界面位置，使用AFM对剥离后的衬底表面形貌进行了表征。如图6所示，剥离后的表面呈现出明显的台阶聚束形貌，该区域的均方根粗糙度（RMS）为6.31 nm。结合拉曼光谱中未检测到宏观石墨残留的结果，AFM形貌证实了机械断裂并未发生在石墨薄膜内部。相反，规则台阶形貌的出现表明剥离发生在平整的二维界面处。当受到物理外力时，薄膜是沿着底层强共价界面缓冲层上方、结合力较弱的范德华间隙发生剥离的。

利用XPS测试进一步确认剥离发生的具体界面以及极性面石墨薄膜的生长机理，剥离后的衬底表面的XPS表征结果如图7所示。全谱显示，两极性面衬底表面均检测到了C、Si和O元素。

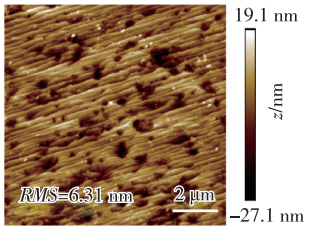
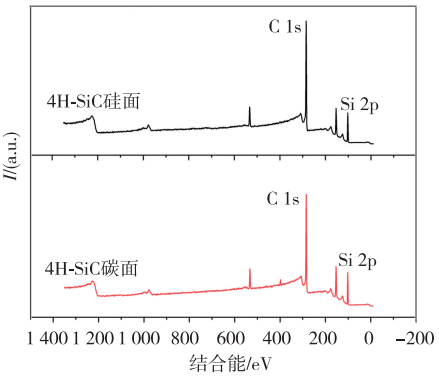
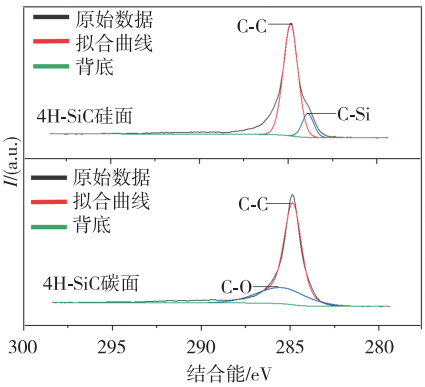


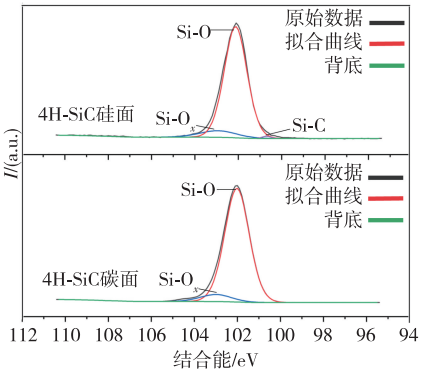
图6　剥离后的4H-SiC衬底AFM形貌图



（a）全谱



（b）C 1s谱



（c）Si 2p谱

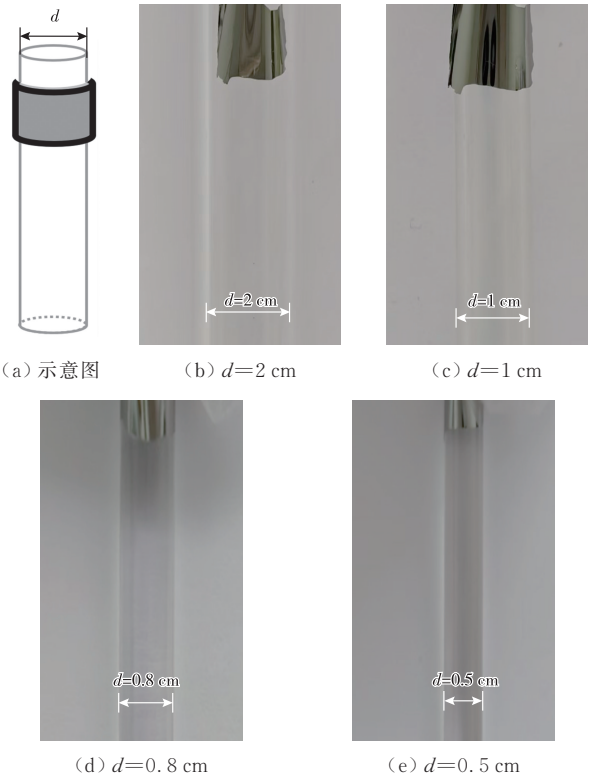
图7　4H-SiC硅面与碳面剥离后衬底的XPS能谱

重点对C 1s谱图进行分峰拟合，如图7(b)所示。在硅面的衬底表面，出现了C—C键与C—Si键。其中，C—Si共价键的出现证实了在沉积初期，碳原子

与硅面优先形成了化学结合的界面缓冲层。该缓冲层作为二维模板,诱导了后续石墨薄膜的高质量层状外延生长。XPS结果证实了剥离发生在共价缓冲层上方的范德华间隙处,因此剥离后的衬底表面仍保留了完整的缓冲层C—Si成键信号。相反,在碳面衬底的C 1s谱图中,C—Si峰位消失,并伴随C—O缺陷键出现。碳面因为没有共价结合的二维缓冲层模板,其生长的石墨薄膜与衬底之间不存在结合力较弱的范德华力结合界面,导致其较难进行机械剥离。

由于剥离后暴露的衬底表面会发生不可避免的空气自然氧化,图7(c)中两极性面的Si 2p谱图均探测到了较强的Si—O与Si—O_x峰。但尽管存在明显的氧化背景,硅面的Si 2p谱图中依然探测到了微弱的Si—C键信号,而碳面的谱图中该信号消失,这与C 1s谱图的分析结果互相印证。XPS表征从界面原子成键的层面,证明了4H-SiC硅面与碳面上生长的石墨薄膜在生长模式及剥离特性上存在差异的机理。

为了定量评估剥离后石墨薄膜的机械柔韧性,利用各直径的圆柱状玻璃棒模具对其施加了梯度的弯曲应变。具体操作如图8所示,将剥离的薄膜分别贴附于直径d为2 cm,1 cm,0.8 cm和0.5 cm的模具表面。

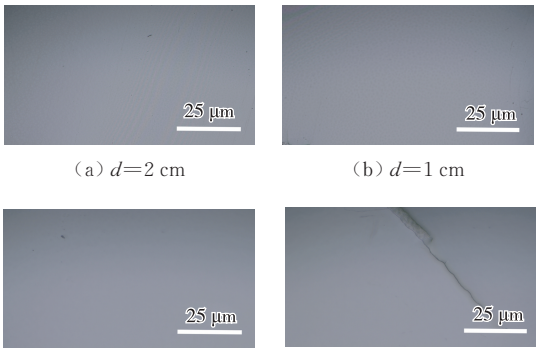


(a) 示意图 (b) d=2 cm (c) d=1 cm

(d) d=0.8 cm (e) d=0.5 cm

图8 石墨薄膜弯折测试图像

结果表明,薄膜在各个曲率下均表现出一定的柔性特征,肉眼几乎看不出薄膜破裂的痕迹。但是通过光学显微镜(图9)对其弯曲状态下的微观形貌进行观测,可以发现当弯曲直径从d=2 cm逐渐减小至d=0.8 cm时,薄膜表面始终保持平整连续,未产生可见的微裂纹。然而,当形变继续增强,弯曲直径d降低至0.5 cm时,薄膜表面出现了如图9(d)所示的贯穿性断裂纹。



(a) d=2 cm (b) d=1 cm

(c) d=0.8 cm (d) d=0.5 cm

图9 不同弯折直径时石墨薄膜的表面形貌

从材料力学角度分析,薄膜在弯曲过程中其外表面承受的最大拉伸应变ε可通过如下公式进行估算,即:

$$\varepsilon=\frac{t}{2r} \tag{1}$$

式中,t为薄膜厚度,取1.94 μm;r为弯曲半径(r=d/2)。通过计算,当发生微观破裂时,该石墨薄膜所承受的临界机械应变约为0.038%。结果在一定程度上界定了该厚度下CVD层状石墨薄膜的柔韧极限。与文献报道的氧化石墨烯(GO)柔性薄膜约1.1±0.1%的弯折应变值[20]或由膨胀石墨压延制备的柔性石墨纸约1%的断裂应变[21]相比,本工作中CVD石墨薄膜的临界应变值相对较低,但这主要是由于材料微观结构的本质不同。GO薄膜的较高应变得益于其层间水分子的滑移润滑作用,而石墨纸则依赖于内部微孔隙的形变缓冲。相比之下,本工作制备的微米级CVD石墨薄膜缺乏类似的形变缓冲空间,因此表现出厚层纯碳薄膜固有的较低应变水平。

2.4 石墨薄膜的导电性验证

图10展示了剥离出的石墨薄膜在不同弯折状态下的I-V特性曲线。石墨薄膜尺寸为0.5 cm×0.5 cm,测试时实际电极间距(L)与有效导电宽度(W)为0.4 cm。在测试偏压范围内,所有形变状态

下的 I-V 曲线几乎都呈现出线性特征，证实了内部 sp^2 导电网络的完整性。

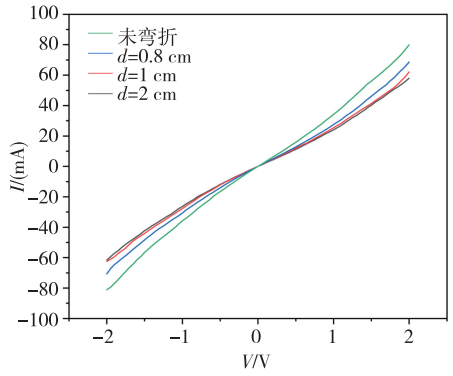
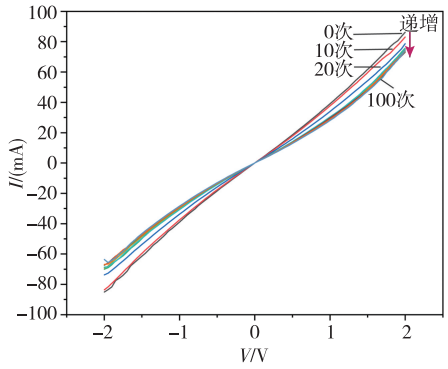


图 10　石墨薄膜在各弯曲曲率下的 I-V 特性曲线

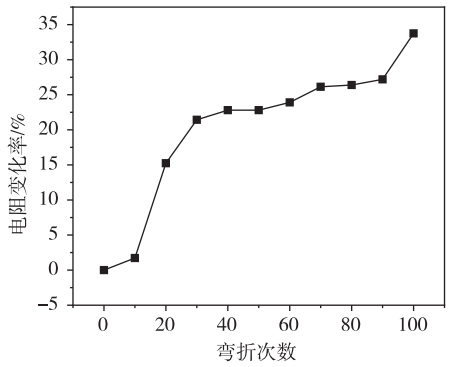
随着薄膜弯曲程度的增大，I-V 曲线的斜率出现轻微降低的趋势，这说明表面的拉伸应变会引起内部石墨层间的微观滑移，使得电子在传输过程中的散射增加，表现为系统总电阻增大。为了消除接触电阻的影响并准确评估材料性能，采用标准四探针法对样品的本征电学参数进行表征。对剥离薄膜进行了 10 次独立的重复测试，结果显示样品的本征电阻率平均值为 $(6.66\pm1.44)\times10^{-5}$ Ω·cm。结合其 1.94 μm 的厚度，计算得出该薄膜的本征片阻为 0.34±0.07 Ω/sq，对应的本征电导率约 1.5×10^{4} S/cm。

在确定薄膜的导电本征特性后，继续研究其在形变下的电学响应机制。如图 10 所示，随着薄膜弯曲程度的增大，I-V 曲线的斜率出现轻微下降的趋势。这说明表面的拉伸应变会引起内部石墨层间的微观滑移，使得电子在传输过程中的散射增加，表现为总电阻增大[22]。在达到机械破裂极限之前，所有形变状态下的 I-V 曲线几乎都维持了良好的线性特征，未发生断路失效。

对石墨薄膜进行了连续循环弯折测试以评估石墨薄膜的弯折性能与电学稳定性。测试在弯曲直径 d=0.8 cm 的条件下进行，共循环弯折 100 次。如图 11(a)所示，在整个循环过程中，样品的 I-V 特性曲线始终保持良好的线性特征，未发生宏观的断路失效。根据各循环次数下的 I-V 特性曲线提取了测试系统的电阻 R，并计算了对应的电阻变化率，电阻变化率演变趋势如图 11(b)所示。测试结果显示，在循环弯折的前 30 次，系统总电阻上升较快，电阻变化率约为 21.4%。该初期的电阻增加主要归因于测试过程中电极界面的轻微接触退化，以及薄膜内部初始残余应力释放引起的微观晶界滑移。随着循环次数继续增加，材料内部应力分布趋于动态平衡。此时测试电流稳定在约 70 mA，电阻变化率曲线逐渐平稳，最终维持在 33.7% 左右。



(a) 电流电压特性曲线



(b) 电阻变化率曲线

图 11　石墨薄膜在循环弯折过程中的电学性能变化

3　结论

本文采用化学气相沉积法研究了 4H-SiC 衬底极性对石墨薄膜生长模式的影响，并评估了剥离薄膜的结构与电学稳定性。研究结果表明，在 4H-SiC 硅面上石墨薄膜倾向于层状生长，厚度约 1.94 μm，而在碳面上则表现出柱状生长结构，厚度为 8.11 μm。对 4H-SiC 硅面生长的石墨薄膜进行机械剥离后，通过对薄膜进行柔性及标准四探针电学性能测试，发现剥离后的石墨薄膜本征电导率约为 1.5×10^{4} S/cm。在弯曲直径不小于 0.8 cm 的状态下，薄膜表面未产生可见微裂纹，且 I-V 曲线几乎维持线性特征，经 100 次连续循环弯折后，薄膜未发生宏观断路失效，且电阻变化率最终稳定在约 33.7%，表明其在该测试范围内具有一定的柔性与电学稳定性。该工作为采用极性衬底制备可剥离的碳基导电薄膜提供了一种可行性验证。

参考文献：

[1] Cai S, Han Z, Wang F, et al. Review on flexible photonics/electronics integrated devices and fabrication strategy [J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(6): 060410.

[2] Gong H, Luo S, Li H, et al. New perspectives and designs into nature-inspired flexible electronics: status and applications [J]. Materials Technology, 2022, 37(12): 1989-2000.

[3] Hassan M, Abbas G, Li N, et al. Significance of flexible substrates for wearable and implantable devices: recent advances and perspectives [J]. Advanced Materials Technologies, 2022, 7(3): 2100773.

[4] Ju H, Jeong J, Kwak P, et al. Robotic flexible electronics with self-bendable films[J]. Soft Robotics, 2018, 5(6): 710-717.

[5] Yoo J Y, Yang J S, Chung M K, et al. A review of geometric and structural design for reliable flexible electronics[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2021, 31(7): 074001.

[6] Zhou Y L, Cheng W N, Bai Y Z, et al. Rise of flexible high-temperature electronics[J]. Rare Metals, 2023, 42(6): 1773-1777.

[7] Tan M, Chen D, Cheng Y, et al. Anisotropically oriented carbon films with dual-function of efficient heat dissipation and excellent electromagnetic interference shielding performances[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(31): 2202057.

[8] Wang M S, Wang G L, Wang S, et al. *In situ* catalytic growth 3D multi-layers graphene sheets coated nano-silicon anode for high performance lithium-ion batteries[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356: 895-903.

[9] Xie Z, Yao L, Fang H, et al. Multi-functional and flexible nano-Silver@MXene heterostructure-decorated graphite felt for wearable thermal therapy[J]. Small, 2024, 20(31): 2310191.

[10] Zhang Y, Shu H, Chen Z, et al. Chemical vapor deposition growth and characterization of graphite-like film[J]. Materials Research Express, 2020, 7(1): 015609.

[11] Liu Z D, Yin Z Y, Du Z H, et al. Low temperature growth of graphene on Cu-Ni alloy nanofibers for stable, flexible electrodes[J]. Nanoscale, 2014, 6(10): 5110.

[12] Souqui L, Sharma S, Högberg H, et al. Texture evolution in rhombohedral boron carbide films grown on 4H-SiC$(000\bar{1})$ and 4H-SiC (0001) substrates by chemical vapor deposition [J]. Dalton Transactions, 2022, 51(41): 15974-15982.

[13] Zhang X, Yan C, Zeng C, et al. Epitaxial synthesis of graphene on 4H-SiC by microwave plasma chemical vapor deposition[J]. Materials Research Express, 2020, 7(11): 116410.

[14] Kato M, Uki K, Harako S, et al. Fabrication of graphene and graphite thin films from organic coating[J]. Microelectronic Engineering, 2014, 121: 96-99.

[15] Negishi R, Hirano H, Ohno Y, et al. Thickness control of graphene overlayer *via* layer-by-layer growth on graphene templates by chemical vapor deposition[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50(6S): 06GE04.

[16] Zhang H, Ding F, Li H, et al. Controlled synthesis of monolayer graphene with a high quality by pyrolysis of silicon carbide[J]. Materials Letters, 2019, 244: 171-174.

[17] Cai S, Liu Z, Zhong N, et al. Effect of growth pressure on epitaxial graphene grown on 4H-SiC substrates by using ethene chemical vapor deposition[J]. Materials, 2015, 8(9): 5586-5596.

[18] Sun C, Cai W, Hong R, et al. Tuning electronic properties of epitaxial multilayer-graphene/4H-SiC (0001) by Joule heating decomposition in hydrogen[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2020, 137: 109224.

[19] Fabbri F, Scarselli M, Shetty N, et al. Silicene nanosheets intercalated in slightly defective epitaxial graphene on a 4H-SiC(0001) substrate[J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 33: 102262.

[20] Dikin D A, Stankovich S, Zimney E J, et al. Preparation and characterization of graphene oxide paper[J]. Nature, 2007, 448(7152): 457-460.

[21] Solfiti E, Berto F. Mechanical properties of flexible graphite: review[J]. Procedia Structural Integrity, 2020, 25: 420-429.

[22] Simionescu O G, Pachiu C, Ionescu O, et al. Nanocrystalline graphite thin layers for low-strain, high-sensitivity piezoresistive sensing[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2020, 59(1): 306-313.

作者简介：

王于洋(2001—)，男，河南省周口市人，硕士研究生，主要从事SiC外延生长及SiC基异质界面材料的工艺研究；

闫果果(1985—)，女，北京市海淀区人，博士，高级工程师，主要从事碳化硅半导体材料方面的研究。