

离子凝胶薄膜栅介石墨烯场效应管

宋航 刘杰 陈超 巴龙

Graphene-based field effect transistor with ion-gel film gate

Song Hang Liu Jie Chen Chao Ba Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 097301 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190058

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190058>

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

顶栅石墨烯离子敏场效应管的表征及其初步应用

Characterization and preliminary application of top-gated graphene ion-sensitive field effect transistors

物理学报. 2016, 65(8): 080701 <https://doi.org/10.7498/aps.65.080701>

基于石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on graphene and perovskite quantum dots

物理学报. 2018, 67(11): 118502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180129>

单晶金刚石氢终端场效应晶体管特性

Characteristics of H-terminated single crystalline diamond field effect transistors

物理学报. 2017, 66(20): 208101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.208101>

绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管中辐射导致的寄生效应研究

Radiation induced parasitic effect in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2018, 67(21): 216102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181372>

高跨导氢终端多晶金刚石长沟道场效应晶体管特性研究

Characterization of high-transconductance long-channel hydrogen-terminated polycrystal diamond field effect transistor

物理学报. 2018, 67(6): 068101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171965>

射线总剂量辐照对单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响

Influence of γ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2017, 66(7): 076101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.076101>

离子凝胶薄膜栅介石墨烯场效应管

宋航 刘杰 陈超 巴龙†

(东南大学生物科学与医学工程学院, 生物电子国家重点实验室, 南京 210096)

(2019年1月11日收到; 2019年3月11日收到修改稿)

在石墨烯场效应晶体管栅介结构中引入具有良好电容特性或极化特性的材料可改善晶体管性能. 本文采用化学气相沉积制备的石墨烯并以 PVDF-[EMIM]TF2N 离子凝胶薄膜 (ion-gel film) 作为介质层制备底栅型石墨烯场效应管 (graphene-based field effect transistor, GFET), 研究其电学特性以及真空环境和温度对 GFET 性能的影响. 结果表明离子凝胶薄膜栅介石墨烯场效应晶体管表现出良好的电学特性, 室温空气环境中, 与 SiO₂ 栅介 GFET 相比, ion-gel 膜栅介 GFET 开关比 ($J_{\text{on}}/J_{\text{off}}$) 和跨导 (g_m) 分别提高至 6.95 和 3.68×10^{-2} mS, 而狄拉克电压 (V_{Dirac}) 低至 1.3 V; 真空环境下 ion-gel 膜栅介 GFET 狄拉克电压最低可降至 0.4 V; 随着温度的升高, GFET 的跨导最高可提升至 6.11×10^{-2} mS.

关键词: 石墨烯, 离子凝胶膜, 场效应晶体管, 电学特性

PACS: 73.22.Pr, 77.55.F-, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.68.20190058

1 引言

作为一种具有高透光性、高机械性能和高载流子迁移率特性的二维材料, 石墨烯备受关注^[1,2], 通过掺杂和外加电场等方法打开石墨烯的能带、改变石墨烯的能级可影响其电学特性^[3-5]. 针对石墨烯应用于电子器件的研究, 更多地集中于场效应晶体管 (field-effect transistor, FET) 领域. Lemme 等^[6]于 2007 年研究制备出第一个石墨烯场效应晶体管 (graphene-based field effect transistor, GFET), 属于典型的顶栅型场效应管结构^[7]. 对于 GFET 性能的改进一般会针对制备工艺、GFET 器件结构等方面进行研究, 其中通过减小石墨烯纳米带宽度至 10 nm, 可提高 GFET 开关比 ($J_{\text{on}}/J_{\text{off}}$) 至 1×10^6 左右, 但石墨烯纳米带中载流子迁移能力会大幅降低而且制备难度大幅度提高^[8]. 所以很多研究开始通过改进介质层材料来提高 GFET 性能. 最早的底栅型 GFET 是以硅片为基底, 表面的 SiO₂

层作为栅极介质层, 由于 SiO₂ 材料的低介电特性, 器件的狄拉克电压普遍偏高, 例如 Echtermeyer 等^[9]研究的 SiO₂ 栅介 GFET 的狄拉克电压基本在 10 V 以上; Shih 等^[10]制备的 SiO₂ 栅介 GFET 狄拉克电压最低为 12 V, 最高达到 50 V. 通过采用高介电常数介质材料可提高载流子浓度和迁移率, 从而降低狄拉克电压、增加跨导. Fallahazad 等^[11]利用 Al₂O₃ 作为栅介材料制备双栅压 GFET, 其狄拉克电压低至 0.1 V 左右; Wang 等^[12]将 SiO₂ 与 HfO₂ 叠加作为复合栅介层, 制备出的 GFET 跨导最高达到 0.6 mS; 吴春艳等^[13]制备出以 Al₂O₃/HfO₂ 作为顶栅介质层的 GFET 狄拉克电压低至 0.2 V 并应用于生物传感器. 除了选择无机材料作为介质层外, 也有研究利用同样具有高介电常数的离子凝胶作为介质层材料来改善 GFET 电学性能^[14,15].

离子凝胶 (ion-gel) 是一种具有离子导电性的固态混合物, 具有很好的热稳定性和电导性. 在外电场作用下离子凝胶内部发生电荷不均匀分布, 与

† 通信作者. E-mail: balong@seu.edu.cn

外部绝缘层表面的电荷层形成双电荷层分布, 这种结构可用古伊-查普曼-斯特恩 (Gouy-Chapman-Stern, GCS) 模型来解释 (图 1), 介电层中的离子和外部绝缘层表面电荷之间的附着主要依靠静电作用^[16]. 双电层和传统电容器在电场作用下产生的电容效应相似, 紧密的双电层近似于平板电容器. 相比普通介质层材料具有更大的电容值, 在微米级的厚度下就具有 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 数量级的单位面积电容^[14,17].

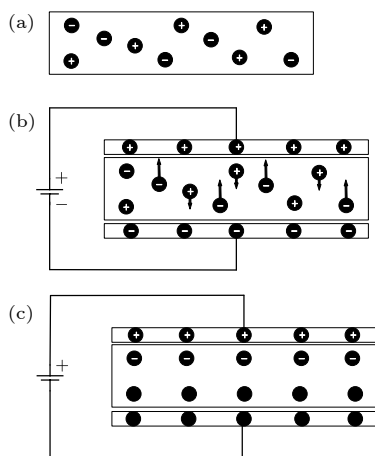


图 1 GCS 模型双电荷层分布示意图 (a) 阴阳离子分散在电介质中; (b) 在外电场作用下, 电介质内部阴阳离子开始向两级移动; (c) 达到平衡后, 电介质内阴阳离子排布情况

Fig. 1. Schematic diagram of GCS model with dual-charge layer distribution: (a) The anions are dispersed in dielectric; (b) under the action of electric field, the anions and cations begin to move in the opposite direction; (c) the distribution of anions and cations in dielectric in equilibrium.

本文将以 ion-gel(PVDF-[EMIM]TF2N) 薄膜作为底栅介质层材料, 制备底栅型 GFET, 同时与以 SiO_2 作为栅介的 GFET 进行对照, 依据电学特性曲线分析离子凝胶薄膜对 GFET 的跨导、开关比以及狄拉克电压等电学特性的影响, 同时研究真空环境和温度对离子凝胶薄膜栅介的 GFET 性能的影响.

2 实验过程

2.1 GFET 制备

1) 栅介制备. 本实验制备的离子凝胶薄膜栅介采用溶液法制备, 将配置好 (PVDF, [EMIM]TF2N 和 DMF 质量体积比为 4 : 1 : 40) 的离子凝胶溶液旋涂 (3000 r/min, 15 s) 在 ITO 玻璃表面

(图 2(b)), 160 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 (30 min) 后离子凝胶膜呈透明状 (图 3(a)), 台阶仪测试膜厚为 2 μm . 2) 石墨烯转移. 采用湿法转移^[18,19] 将石墨烯转移至离子凝胶膜表面 (图 2(c)) 和硅片的 SiO_2 表面. 3) 电极制备. 采用热蒸发真空镀膜仪制备铝电极, 样品放入真空镀膜室, 真空度达到 3×10^{-3} Pa 时开启热蒸发镀膜仪, 掩膜版源漏极之间距离 0.5 mm (沟道长度), 铝膜蒸镀厚度为 100 nm (图 2(d)).

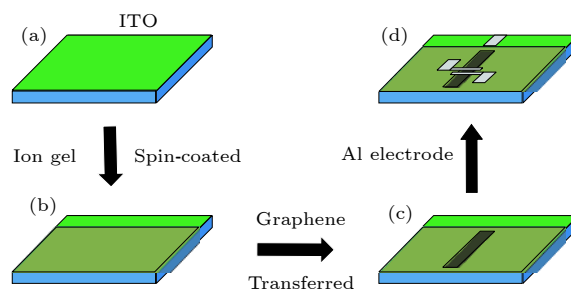


图 2 离子凝胶栅介的 GFET 制备过程
Fig. 2. Preparation of GFET with ion-gel film gate.

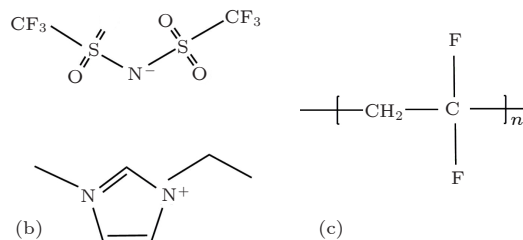
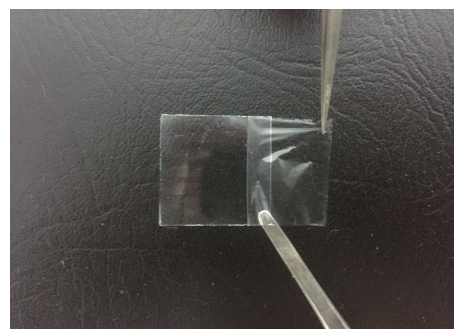


图 3 离子凝胶膜 (a) 离子凝胶膜呈透明状; (b) [EMIM]TF2N 分子式; (c) PVDF 分子式

Fig. 3. Ion-gel film: (a) Ion-gel film image; (b) molecular formula of [EMIM]TF2N; (c) molecular formula of PVDF.

2.2 石墨烯表征

采用 RENISHAW0963G1 型拉曼光谱仪和 SIGMA500 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 对转移石墨烯前后的离子凝胶薄膜进行表征, 验证石墨烯是否成功转移.

2.3 电学特性检测

制备完成后利用 Keithley 2612a 双通道数字源表对 GFET 的电学特性曲线进行测量, 电学检测示意图如图 4 所示. 首先在室温环境 (25 °C, 1 atm (1 atm = 1.01325 × 10⁵ Pa)) 下对离子凝胶膜栅介 GFET 和 SiO₂ 栅介 GFET 进行转移特性曲线和输出特性曲线的测量对比分析; 然后将离子凝胶膜栅介 GFET 放入真空干燥箱中, 真空度达到 100 Pa (1 × 10⁻³ atm) 时维持最低真空度, 通过测量电学特性曲线变化来检测 GFET 的狄拉克电压、跨导和开关比等电学特性与在真空环境中停留时间 (5, 10, 20, 30 min) 的关系; 当在真空环境中不再变化时, 逐渐升高温度, 检测 GFET 电学特性在不同温度 (25, 50, 75, 100, 125 °C) 中的变化.

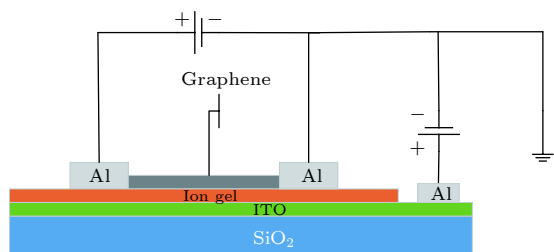


图 4 离子凝胶栅介的 GFET 电学检测示意图

Fig. 4. Schematic diagram of GFET with ion-gel film gate.

3 结果和讨论

3.1 拉曼表征

黑色曲线为离子凝胶膜基底的拉曼光谱, 仅在 2980 cm⁻¹ 处有明显的峰, 且与石墨烯的特征峰不重合. 红色曲线为转移至离子凝胶膜上的石墨烯的拉曼光谱, 从图 5 可以清楚地看到石墨烯在 1580 和 2680 cm⁻¹ 处的拉曼特征峰, 这是石墨烯原子晶格振动产生的特征峰 G 峰和 2D 峰^[20], 说明石墨烯已成功转移至离子凝胶膜表面, 同时 2D 峰处呈现出完美的单个洛伦兹峰, 表明转移的石墨烯是单层的.

3.2 扫描电子显微镜表征

图 6 为离子凝胶膜表面的 SEM 图像和转移石墨烯后离子凝胶膜表面的 SEM 图像. 通过图像对比可以看出, 石墨烯转移至离子凝胶膜后完全贴合在膜表面, PMMA 基本去除干净, 石墨烯表面基本完整.

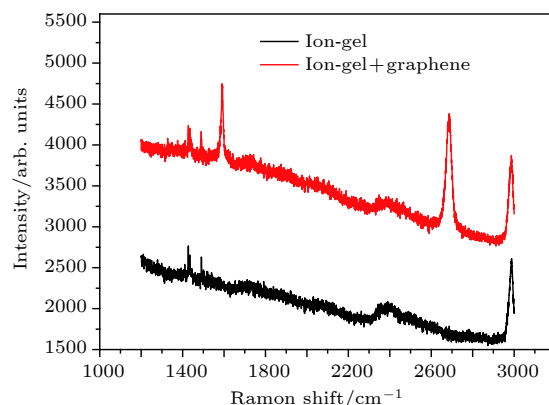


图 5 离子凝胶膜表面石墨烯拉曼光谱, 其中红线为转移石墨烯后的离子凝胶膜拉曼曲线, 黑线为未转移石墨烯的离子凝胶膜拉曼曲线

Fig. 5. Raman spectra of graphene on ion-gel. Red line corresponds to the ion-gel film with transferred graphene. Black line corresponds to the ion-gel film without graphene.

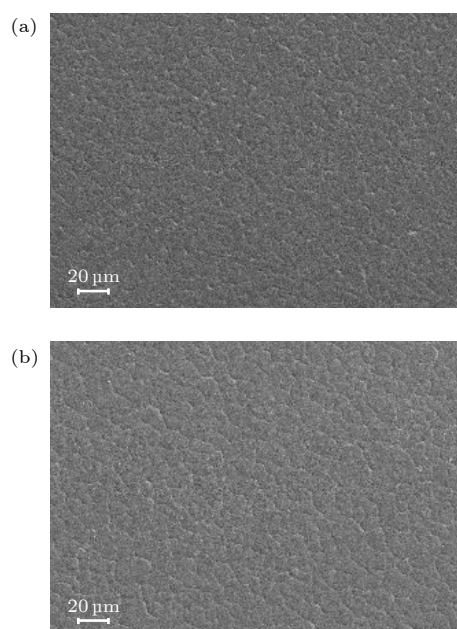


图 6 离子凝胶膜表面石墨烯 SEM 图像 (a) 未转移石墨烯的离子凝胶膜表面; (b) 转移石墨烯后的离子凝胶膜表面

Fig. 6. SEM images of ion-gel film: (a) The ion-gel film without graphene; (b) the ion-gel film with transferred graphene.

3.3 电学特性

众所周知, 金属的导带和价带是重叠的, 半导体的导带和价带是分开的 (有能带间隙), 而石墨烯的导带和价带刚好交于一点, 此点即为狄拉克点 (图 7(a)), 通过掺杂等手段可使石墨烯的能带打开 (图 7(b)), 进而提高开关比. 室温环境下 GFET 的转移特性曲线 (图 8(a)) 中的最低点对应的电压称为狄拉克电压 (V_{Dirac}), 理论上在无栅极电压作用

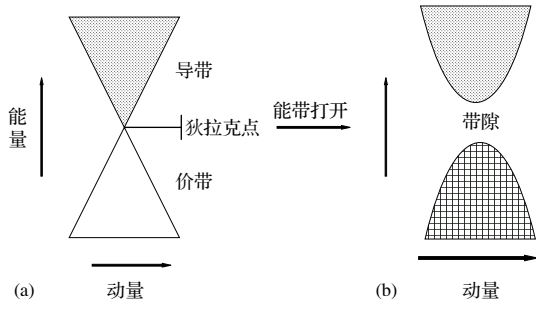


图 7 石墨烯能带示意图

Fig. 7. Band diagram of graphene.

下 ($V_g = 0$), 石墨烯沟道内载流子浓度达到最低, 电导率也达到最低; 然而图 8 中 GFET 转移曲线皆出现往右偏移, 主要是因为实验采用湿法转移石墨烯, 附着在表面的水分子和氧气能够束缚住 σ_z 轨道自由电子而表现出还原性电子转移 [21–23], 相应位置产生空穴, 使得石墨烯出现 p 型掺杂. 以图 9 石墨烯能级示意图为例, 在 $V_g = 0$ 时 (图 9(a)),

p 型掺杂的石墨烯的费米能级 (E_F) 位于本征费米能级 (E_{Fi}) 之下, 平衡状态下仍存在少数空穴载流子, 形成弱 p 型沟道. 当 $V_g < 0$ 时 (图 9(b)), 石墨烯导带能级 (E_c) 和本征费米能级进一步远离费米能级, 而价带能级 (E_v) 更接近于费米能级, 此时沟道内部产生空穴堆积, 形成强 p 型沟道; 当 $0 < V_g < V_{Dirac}$ 时 (图 9(c)), 石墨烯本征费米能级接近费米能级, 此时沟道内的少数空穴载流子被中和, 导电性最低; 当 $V_g > V_{Dirac}$ 时 (图 9(d)), 石墨烯的费米能级位于本征费米能级之上, 导带能级更接近于费米能级, 沟道内部产生电子堆积, 形成 n 型沟道, 导电性回升.

转移特性曲线中 SiO_2 栅介 GFET (图 8(c)) 的狄拉克电压约在 22 V, 而离子凝胶膜栅介 GFET (图 8(a)) 的狄拉克电压降低至 1.3 V 左右. 转移特性曲线的跨导 (g_m) 根据 $I-V$ 曲线最大斜率进行计算, 反映出栅极电压对源漏极电流的调控作

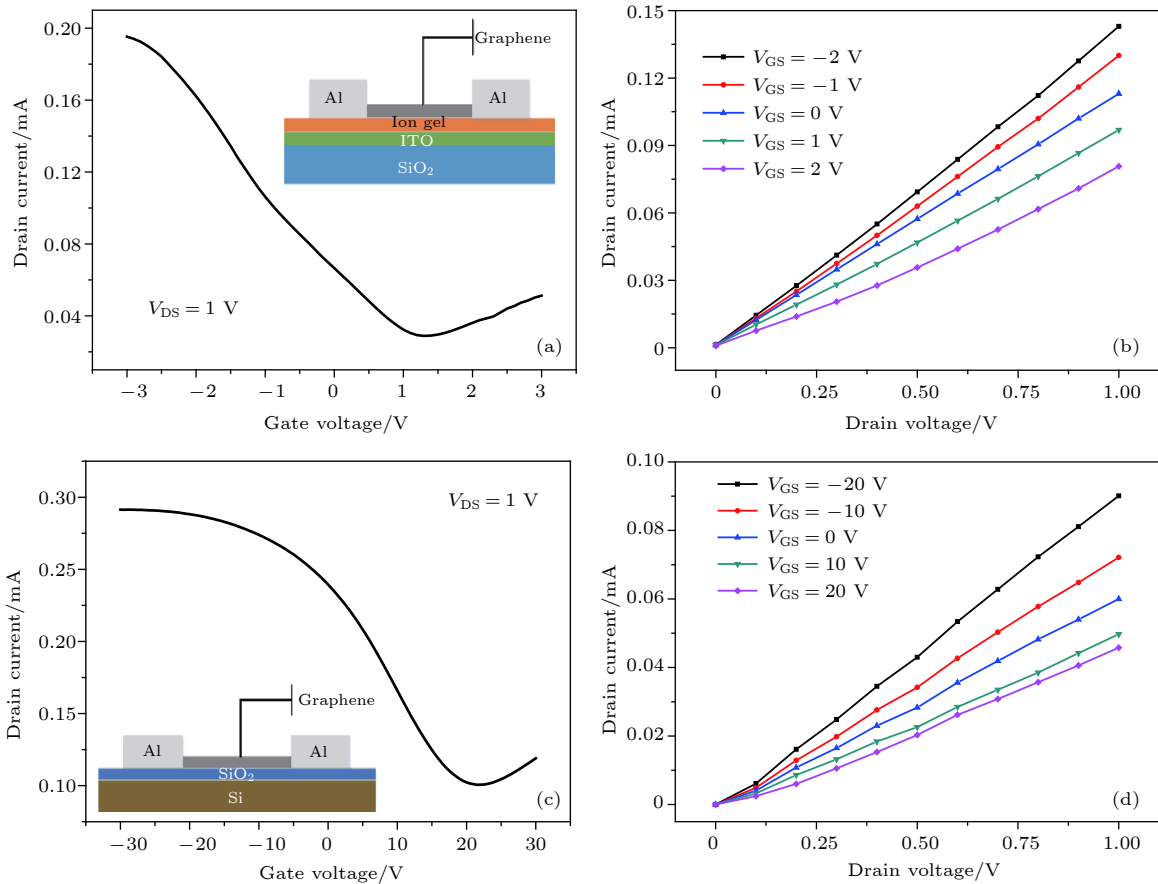


图 8 室温环境下 GFET 电学特性曲线 (a) 离子凝胶膜栅介 GFET 的转移特性曲线; (b) 离子凝胶膜栅介 GFET 的输出特性曲线; (c) SiO_2 栅介 GFET 的转移特性曲线; (d) SiO_2 栅介 GFET 的输出特性曲线

Fig. 8. Electrical characteristic curves of GFET at room temperature: (a) The transfer characteristic curve of GFET with ion-gel film gate; (b) the output characteristic curve of GFET with ion-gel film gate; (c) the transfer characteristic curve of GFET with SiO_2 gate; (d) the output characteristic curve of GFET with SiO_2 gate.

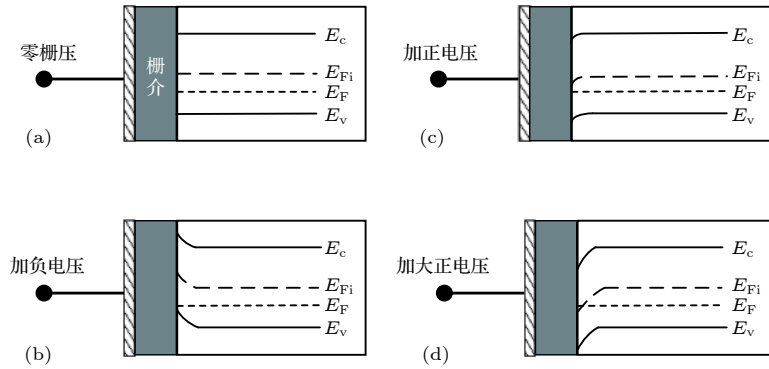


图 9 p 型掺杂石墨烯能级示意图
Fig. 9. Energy level of p-type doped graphene.

用. 计算公式如下:

$$g_m = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} \Big|_{v_{DS} = \text{const}}, \quad (1)$$

其中 ΔI_{DS} 为选取范围起始点之间电流变化值, ΔV_{GS} 为对应的栅压变化值, v_{DS} 为源流电压固定值. 由图 8 可以看出, SiO_2 栅介和离子凝胶膜栅介 GFET 的最大斜率分别位于 $V_g = 10 \text{ V}$ 和 $V_g = 0 \text{ V}$ 处, 计算得出跨导分别为 $8.35 \times 10^{-3} \text{ mS}$ 和 $3.68 \times 10^{-2} \text{ mS}$. 同时, 根据曲线计算出室温环境下 GFET 开关比 ($J_{\text{on}}/J_{\text{off}}$) 分别为 2.89 和 6.95. 离子凝胶膜栅介 GFET 在跨导和开关比上都有所提高, 主要是因为相比传统 SiO_2 栅极介质, 离子凝胶膜具有高介电常数, 使得石墨烯在相同栅压下内部载流子浓度和迁移率提高, 石墨烯导电性更强, 而中和石墨烯内部掺杂空穴所需的正向栅极电压 (狄拉克电压) 也更低.

输出特性曲线中 SiO_2 栅介 GFET (图 8(d)) 栅压变化范围为 $-20 \sim 20 \text{ V}$, 离子凝胶栅介 GFET (图 8(b)) 栅压变化范围为 $-2 \sim 2 \text{ V}$, 源漏电压 (V_{DS}) 均控制在 1 V 以内. 可以看出源漏电流 (I_{DS}) 随着 V_g 的改变而变化, V_g 对 I_{DS} 起着调控作用, 两者的 I_{DS} 与 V_{DS} 均呈线性关系, 说明石墨烯与电极之间为欧姆接触. 由综合转移特性曲线和输出特性曲线可以看出, 离子凝胶膜可以有效降低狄拉克电压, 提高 GFET 跨导和开关比, 同时降低控制电压范围, 从而提高 GFET 电学性能.

3.4 空气对 GFET 的影响

底栅型 GFET 最大的特点是石墨烯上表面暴露于外界环境中, 空气中的水分子、氧气等杂质分子会吸附在石墨烯表面. 将 GFET 位于真空干燥箱内持续抽真空, 不断将腔室内的空气排除的同时

也将附着在石墨烯表面的水分子、氧气等杂质分子进行脱附. 从 GFET 的转移特性曲线 (图 10(a)) 可以看出, 随着空气杂质分子脱附的进行, $I-V$ 曲线逐渐向左偏移, 狄拉克点也向零点方向偏移. 30 min 以后 GFET 狄拉克电压达到最低 0.4 V , 主要是因为空气杂质分子的脱附使得被捕获的 σ_z 轨道电子重新成为自由电子, 相应的空穴减少, 费米能级更接近于本征费米能级. 相关研究 [11,12] 采用的双栅极结构中在背栅电压施加前先顶栅加载一定的电压, 相当于对石墨烯施加掺杂效应, 从而影响非工作状态下石墨烯沟道内的单一载流子 (电子或空穴) 浓度, 进而改变 GFET 的狄拉克电压和电流开关比. 而空气杂质分子产生的 p 型掺杂也仅属于弱掺杂, 对于 GFET 开关比的影响有限.

3.5 温度对 GFET 的影响

温度对 GFET 电学特性的影响如图 11 所示. 在真空环境下排除空气杂质分子的干扰后, 逐渐升高温度, 狄拉克电压基本没有变化, 而在相同栅压下电流值逐渐升高. 根据 $I-V$ 曲线对 GFET 的跨导进行计算, 可以得到在温度升高至 $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 时跨导达到最大, 为 $6.11 \times 10^{-2} \text{ mS}$. 电导率的大小决定于半导体载流子浓度和载流子迁移率, 随着石墨烯表面杂质脱附, 受掺杂效应的影响降到最低, 所以随着温度升高本征激发开始起作用, 载流子浓度开始增大, 而迁移率会随温度的升高而降低 (晶格振动加剧, 导致声子散射增强所致); 晶体管中的栅介离子凝胶膜却因为温度升高, 非晶体系中的离子扩散更容易 [24], 电容值也会随之升高, 进而会提高石墨烯的载流子迁移率来抵消因为温度升高造成的影响, 所以晶体管的电导率会逐渐升高. 温度对狄拉克电压和开关比影响不明显, 可能是石墨烯能

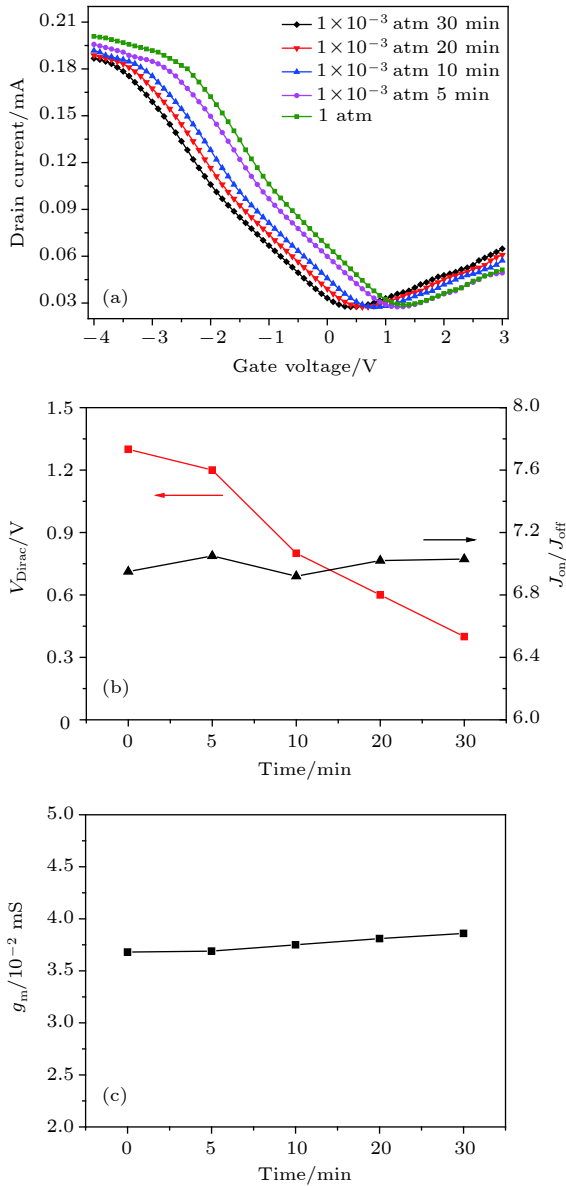


图 10 真空对 GFET 电学特性的影响 (a) 转移特性曲线; (b) 狄拉克点电压和开关比; (c) 跨导
Fig. 10. Effect of vacuum on the electrical properties of GFET: (a) Transfer characteristic curve; (b) Dirac point voltage and current switching ratio; (c) transconductance.

带的变化受温度影响有限, 而更多地与自身缺陷掺杂有关^[25-27].

4 结 论

本文通过采用湿法转移石墨烯、溶液旋涂法制备离子凝胶膜作为介质层制备底栅型 GFET, 并对其表征和电学特性测试分析. 室温空气环境中, 与 SiO₂ 栅介 GFET 相比, 离子凝胶膜栅介 GFET 开关比和跨导分别提高至 6.95 和 3.68 ×

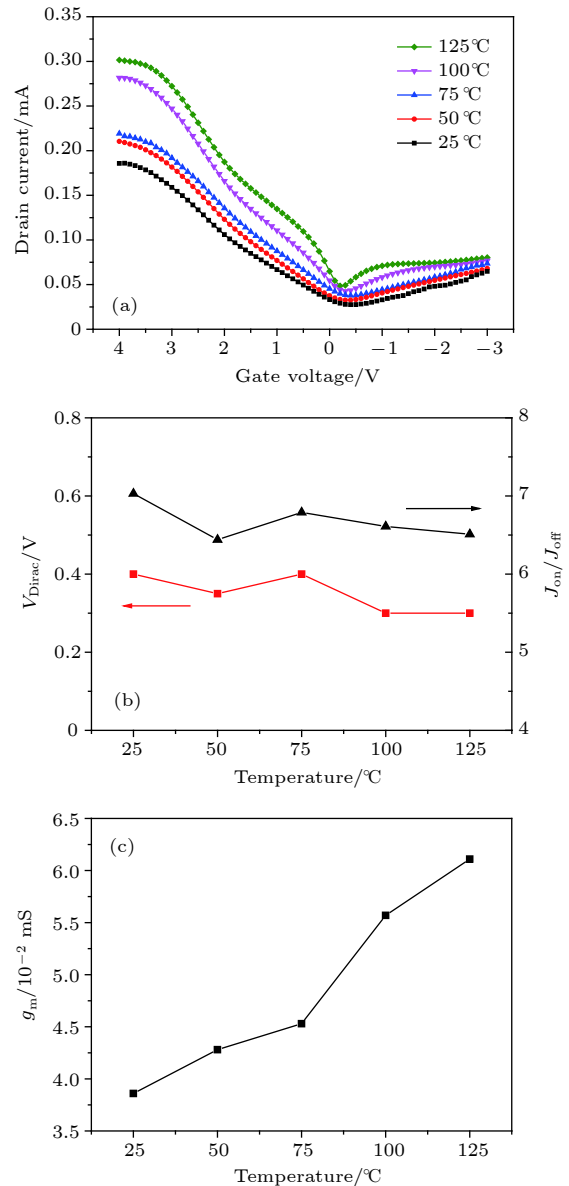


图 11 温度对 GFET 电学特性的影响 (a) 转移特性曲线; (b) 狄拉克点电压和开关比; (c) 跨导
Fig. 11. Effect of temperature on the electrical properties of GFET: (a) Transfer characteristic curve; (b) Dirac point voltage and current switching ratio; (c) transconductance.

10⁻² mS, 而狄拉克电压低至 1.3 V, 真空环境下离子凝胶膜栅介 GFET 狄拉克电压最低可降至 0.4 V; 随着温度的升高, GFET 的跨导最高可提升至 6.11 × 10⁻² mS. 结果表明, 离子凝胶膜栅介的 GFET 表现出良好的电学特性, 为有机高介电常数栅介材料进一步深入研究以及应用提供了依据.

参考文献

[1] Bolotin K I, Sikes K J, Jiang Z, Klima M, Fudenberg G, Hone J, Kim P, Stormer H L 2008 *Solid State Commun.* **146**

- [2] 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
- [3] Zhang Y, Tang T, Girit C, Hao Z, Martin M C, Zettl A, Crommie M F, Shen Y R, Wang F 2009 *Nature* **459** 820
- [4] Park J S, Choi H J 2015 *Phys. Rev. B* **92** 045402
- [5] Liu G L, Yang Z H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 076301 (in Chinese) [刘贵立, 杨忠华 2018 物理学报 **67** 076301]
- [6] Lemme M C, Echtermeyer T J, Baus M, Kurz H 2007 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **28** 282
- [7] Frank S 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 487
- [8] Li X L, Wang X R, Zhang L, Lee S, Dai H J 2008 *Science* **319** 1229
- [9] Echtermeyer T J, Lemme M C, Bolten J, Baus M, Ramsteiner M, Kurz H 2007 *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **148** 19
- [10] Shih C J, Pfattner R, Chiu Y C, Liu N, Lei T, Kong D, Kim Y, Chou H H, Bae W G, Bao Z 2015 *Nano Lett.* **15** 7587
- [11] Fallahzad B, Lee K, Lian G, Kim S, Corbet C M, Ferrer D A, Colombo L, Tutuc E 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 093112
- [12] Wang B, Liddell K L, Wang J, Koger B, Keating C D, Zhu J 2014 *Nano Res.* **7** 1263
- [13] Wu C Y, Du X W, Zhou L, Cai Q, Jin Y, Tang L, Zhang H G, Hu G H, Jin Q H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 080701 (in Chinese) [吴春艳, 杜晓薇, 周麟, 蔡奇, 金妍, 唐琳, 张荫阁, 胡国辉, 金庆辉 2016 物理学报 **65** 080701]
- [14] Kim B J, Jang H, Lee S K, Hong B H, Ahn J H, Cho J H 2010 *Nano Lett.* **10** 3464
- [15] Lee S K, Kim B J, Jang H, Yoon S C, Lee C, Hong B H, Rogers J A, Cho J H, Ahn J H 2011 *Nano Lett.* **11** 4642
- [16] Bard A J, Faulkner L R 2002 *Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications* (2nd Ed.) (Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH)
- [17] Cho J H, Lee J, Xia Y, Kim B S, He Y, Renn M J, Lodge T P, Frisbie C D 2008 *Nat. Mater.* **7** 900
- [18] Li X, Zhu Y, Cai W, Borysiak M, Han B, Chen D, Piner R D, Colombo L, Ruoff R S 2009 *Nano Lett.* **9** 4359
- [19] Kim K S, Zhao Y, Jang H, Lee S Y, Kim J M, Kim K S, Ahn J H, Kim P, Choi J Y, Hong B H 2009 *Nature* **457** 706
- [20] Beams R, Novotny L 2015 *J. Phys.: Condens. Matter* **27** 83002
- [21] Ryu S, Liu L, Berciaud S, Yu Y J, Liu H, Kim P, Flynn G W, Brus L E 2010 *Nano Lett.* **10** 4944
- [22] Yang Y, Brenner K, Murali R 2012 *Carbon* **50** 1727
- [23] Jürgen R 2006 *Science* **313** 1057
- [24] Robitaille C D, Fauteux D 1986 *J. Electrochem. Soc.* **133** 315
- [25] Geim A K, Novoselov K S 2010 *The Rise of Graphene (Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals)* (Singapore: World Scientific) pp 11–19
- [26] Gierz I, Riedl C, Starke U, Ast C R, Kern K 2008 *Nano Lett.* **8** 4603
- [27] Liu H, Liu Y, Zhu D 2011 *J. Mater. Chem.* **21** 3335

Graphene-based field effect transistor with ion-gel film gate

Song Hang Liu Jie Chen Chao Ba Long[†]

(*State Key Laboratory of Bioelectronics, School of Biological Science and Medical Engineering,
Southeast University, Nanjing 210096, China*)

(Received 11 January 2019; revised manuscript received 11 March 2019)

Abstract

Graphene is a kind of two-dimensional material with high light transmittance, high mechanical properties and high carrier mobility. The energy band of graphene can be turned by doping and electric field. Researches on the application of graphene to electronic devices focused on field effect transistors. For improving the performance, one generally improves the fabrication process and device structure, but many researchers chose to change the material or structure of dielectric layer. Ion-gel is a kind of mixture of organic polymer mesh structure with good thermal stability and high dielectric value, prepared by macromolecule organic polymer and ionic salt electrolyte material. With the effect of electric field, cations and anions in ion-gel diffuse to form a double charge layer distribution with a charge layer on the surface of material. This capacitance characteristic is similar to that of traditional capacitor. In this paper, ion-gel (PVDF-[EMIM]TF2N) film is used as a dielectric layer material to prepare the bottom-gate graphene-based field effect transistor (GFET), which is compared with the GFET with SiO₂ bottom-gate, according to electrical characteristic curves. The effect of the ion-gel film on the transconductance, switching ratio and Dirac voltage of the GFET are analyzed. The effect of the vacuum environment and temperature on the GFET performance with ion-gel film gate are also investigated. The results show that in the room-temperature environment, the switching ratio and transconductance of the ion-gel film gate GFET device increase to 6.95 and 3.68×10^{-2} mS, respectively, compared with those of the SiO₂ gate GFET, while the Dirac voltage decreases to 1.3 V. The increase in transconductance and switching ratio of ion-gel film gate GFETs are mainly due to the high capacitance of ion-gel film compared with those of conventional SiO₂ gate dielectrics. There will be more carriers inside the graphene while in the carrier accumulation region of GFET transfer characteristic curve, which makes graphene more conductive. The Dirac voltage of ion-gel film gate GFET can be reduced to 0.4 V in the vacuum environment; as the temperature increases, the transconductance of GFET can increase up to 6.11×10^{-2} mS. The results indicate that the ion-gel film-based graphene field effect transistor shows good electrical properties in serving as high dielectric constant organic dielectric materials.

Keywords: graphene, ion-gel film, field effect transistor, electrical properties

PACS: 73.22.Pr, 77.55.F-, 85.30.Tv

DOI: [10.7498/aps.68.20190058](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190058)

[†] Corresponding author. E-mail: balong@seu.edu.cn