

## 石墨烯场效应晶体管的 X 射线总剂量效应\*

李济芳<sup>1)</sup> 郭红霞<sup>2)†</sup> 马武英<sup>2)</sup> 宋宏甲<sup>1)</sup> 钟向丽<sup>1)</sup>李洋帆<sup>1)</sup> 白如雪<sup>1)</sup> 卢小杰<sup>1)</sup> 张凤祁<sup>2)</sup>

1) (湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2023 年 11 月 21 日收到; 2023 年 12 月 5 日收到修改稿)

本文针对不同结构、尺寸的石墨烯场效应晶体管 (graphene field effect transistors, GFET) 开展了基于 10 keV-X 射线的总剂量效应研究. 结果表明, 随累积剂量的增大, 不同结构 GFET 的狄拉克电压  $V_{\text{Dirac}}$  和载流子迁移率  $\mu$  不断退化; 相比于背栅型 GFET, 顶栅型 GFET 的辐射损伤更加严重; 尺寸对 GFET 器件的总剂量效应决定于器件结构; 200  $\mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$  尺寸的顶栅型 GFET 损伤最严重, 而背栅型 GFET 是 50  $\mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$  尺寸的器件损伤最严重. 研究表明: 对于顶栅型 GFET, 辐照过程中在栅氧化层中形成的氧化物陷阱电荷的积累是  $V_{\text{Dirac}}$  和  $\mu$  降低的主要原因. 背栅型 GFET 不仅受到辐射在栅氧化层中产生的陷阱电荷的影响, 还受到石墨烯表面的氧吸附的影响. 在此基础上, 结合 TCAD 仿真工具实现了顶栅器件氧化层中辐射产生的氧化物陷阱电荷对器件辐射响应规律的仿真. 相关研究结果对于石墨烯器件的抗辐照加固研究具有重大意义.

**关键词:** 石墨烯场效应晶体管, X 射线辐照, 总剂量效应**PACS:** 85.30.Tv, 81.05.ue, 61.80.Az, 61.80.Cb**DOI:** 10.7498/aps.73.20231829

## 1 引言

石墨烯作为碳基材料的代表之一, 以其高载流子迁移率、高饱和漂移速度、高热导率等优异特性成为最有前景的二维材料之一<sup>[1,2]</sup>. 近年来, 石墨烯器件的制备工艺技术逐渐成熟, 已成功制备出性质卓越的宽带射频混频器、光电探测器、化学传感器等新型半导体器件<sup>[3-5]</sup>, 在航天领域具有重要应用前景. 然而, 工作在空间辐射环境中的电子元件不可避免受到空间辐射<sup>[6,7]</sup>的影响, 造成性能退化甚至失效, 严重影响了空间电子系统的可靠性.

作为新型半导体器件, 石墨烯器件的空间辐射效应备受关注, 尤其是制约其长寿命应用的空间总剂量效应. 2017 年, Procházka 等<sup>[8]</sup>对具有  $\text{Al}_2\text{O}_3$

钝化层的背栅石墨烯场效应晶体管 (graphene field effect transistors, GFET) 开展了 X 射线辐照实验, 指出 X 射线辐射会使得器件栅极电介质中的固有缺陷俘获空穴, 从而引起石墨烯输运特性的变化; 2020 年, Jain 等<sup>[9]</sup>对背栅 GFET 器件开展了  $\gamma$  辐照实验, 采用拉曼光谱、X 射线光电子能谱 (XPS)、以及  $I$ - $V$  测试进行表征, 指出  $\gamma$  辐射增加了氧在石墨烯表面的吸附, 导致了六方碳晶格  $\text{sp}^2$  向  $\text{sp}^3$  的转化, 从而使得转移特性退化; 2022 年, Zhang 等<sup>[10]</sup>对  $\text{SiO}_2$  背栅结构的 GFET 开展了 3 MeV 的质子辐照实验, 辐照后狄拉克点负向偏移, 指出质子辐照在器件氧化层中产生的缺陷是导致器件性能退化的主要因素.

综上所述, 石墨烯总剂量效应研究主要集中在背栅器件, 且尚未进行尺寸对辐照效应的影响规律

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12275230, 12027813) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guohongxia@nint.ac.cn

研究, 相关研究并不能满足石墨烯器件空间及加固设计的需求. 因此本文利用 10 keV-X 射线对不同器件结构、尺寸的 GFET 器件的总剂量效应开展了研究工作, 获得了不同结构、尺寸下的 GFET 的辐照响应规律, 在此基础上结合 TCAD 数值模拟研究了其潜在损伤机制.

## 2 实验描述

实验样品选用顶栅型 GFET 及背栅型 GFET, 器件结构如图 1 所示. 顶栅型 GFET 及背栅型 GFET 皆以 p 型硅和 SiO<sub>2</sub> 为衬底, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为栅氧层, 单层石墨烯均采用化学气相沉积 (CVD) 和聚合物辅助转印进行生长、转移. 顶栅型 GFET 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的等效氧化层厚度为 20 nm, 背栅型 GFET 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的等效氧化层厚度为 5 nm, 两种结构的石墨烯尺寸为 50 μm×50 μm, 100 μm×100 μm, 200 μm×200 μm.

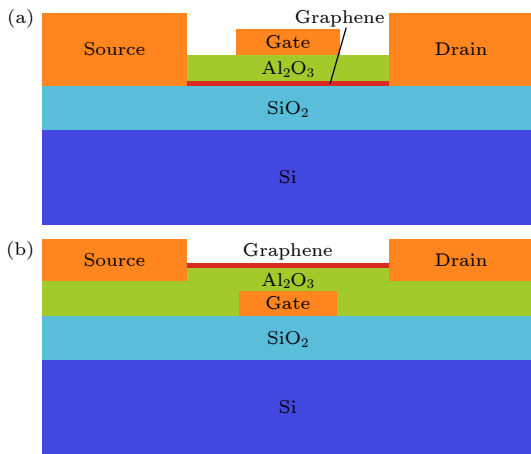


图 1 器件结构示意图 (a) 顶栅型 GFET; (b) 背栅型 GFET  
Fig. 1. Device structure diagram: (a) Top-gate GFET; (b) back-gate GFET.

总剂量辐照实验在 10 keV-X 射线辐照平台上进行, 辐照时剂量率为 200 rad (Si)/s, 在辐照过程中对两款器件施加正栅极偏置 ( $V_G = +1$  V,  $V_D = V_S = 0$  V), 在辐照过程中累积剂量至 10 krad (Si), 30 krad (Si), 50 krad (Si), 70 krad (Si) 和 100 krad (Si). 辐照均在室温、大气环境下进行. 辐照前后利用半导体参数分析仪 B1500 对器件的转移特性曲线和输出特性曲线进行表征. 顶栅型 GFET 栅极电压  $V_G$  扫描范围为  $-5 \sim +5$  V, 背栅型 GFET 栅极电压  $V_G$  扫描范围为  $-2 \sim +7$  V,

漏极电压  $V_D$  恒定为 20 mV, 源极电压  $V_S$  接地. 输出特性曲线漏极电压  $V_D$  扫描范围为  $-1 \sim +1$  V, 栅极电压  $V_G$  恒定为 0 V. 样品信息和偏置条件如表 1 所示.

表 1 样品信息及偏置条件  
Table 1. Sample information and bias conditions.

器件结构	器件尺寸	偏置条件
顶栅型GFET	50 μm×50 μm	正栅极偏置 ( $V_G = +1$ V, $V_D = V_S = 0$ V)
	100 μm×100 μm	
	200 μm×200 μm	
背栅型GFET	50 μm×50 μm	正栅极偏置 ( $V_G = +1$ V, $V_D = V_S = 0$ V)
	100 μm×100 μm	
	200 μm×200 μm	

## 3 结果与分析

图 2 给出了 50 μm×50 μm 尺寸的顶栅型 GFET 辐照前后的转移特性曲线和输出特性曲线变化趋势, 累积总剂量为 100 krad (Si). 由图 2 可知, 辐照后的  $V_{Dirac}$  负向偏移,  $V_{Dirac}$  代表了石墨烯

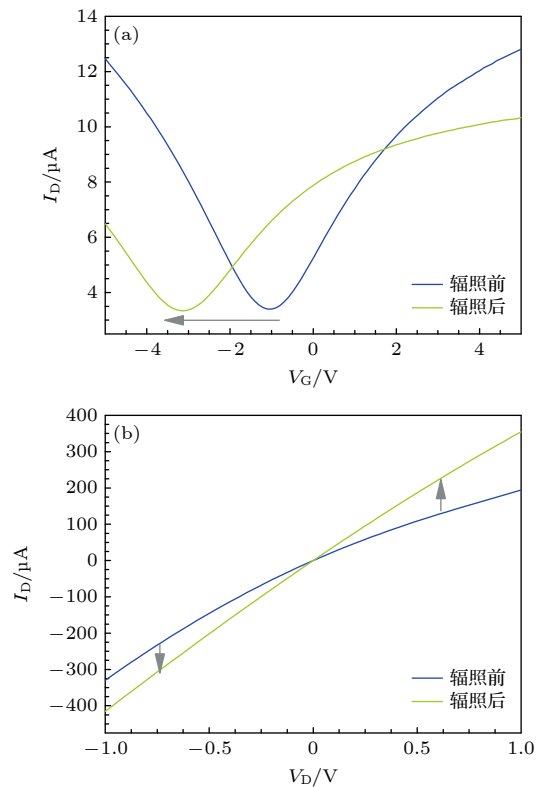


图 2 辐照前后顶栅型 GFET 的转移特性曲线和输出特性曲线

Fig. 2. Transfer characteristic curve and output characteristic curve of top-gate GFET before and after irradiation.

的导带和价带相交的狄拉克点的电压值, 当  $V_G > V_{\text{Dirac}}$  时石墨烯中的载流子为电子, 当  $V_G < V_{\text{Dirac}}$  时石墨烯中的载流子为空穴. 顶栅型 GFET 在辐照前  $V_{\text{Dirac}}$  为  $-1.05\text{ V}$ , 辐照后  $V_{\text{Dirac}}$  为  $-3.10\text{ V}$ , 变化量为  $2.05\text{ V}$ . 对于 GFET, 其载流子迁移率与漏极电流  $I_D$  和  $V_G$  的关系如 (1) 式所示 [11,12], 可以从转移特性曲线提取出 GFET 的载流子迁移率  $\mu$ :

$$\mu = \frac{L}{W} \frac{1}{C_G V_D} \frac{\partial I_D}{\partial V_G}, \quad (1)$$

其中  $\mu$  为载流子迁移率,  $L/W$  为石墨烯的长宽比,  $C_G$  为栅介质的电容,  $\partial I_D / \partial V_G$  是转移特性曲线的斜率.

顶栅型 GFET 在辐照前的空穴迁移率  $\mu_h$  和电子迁移率  $\mu_e$  分别为  $788.9$  和  $693.3\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 空穴迁移率高于电子迁移率, 这是由于金属电极与石墨烯接触导致的 [13-15]. 在辐照后空穴迁移率为  $594.7\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 电子迁移率为  $525.2\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 空穴迁移率变化量为  $194.2\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 电子迁移率变化量为  $168.1\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 载流子迁移率退化较为严重.

### 3.1 结构对 GFET 的总剂量响应的影响

图 3 为  $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$  尺寸下的顶栅型 GFET 和背栅型 GFET 器件  $V_{\text{Dirac}}$  随辐射累积剂量的变化趋势. 从图 3 中可以看出, 两个器件的  $V_{\text{Dirac}}$  都发生不同程度的退化, 背栅型 GFET 的退化程度较顶栅型 GFET 的小, 变化量为  $0.46\text{ V}$ ,  $V_{\text{Dirac}}$  正向偏移, 这与顶栅 GFET 的  $V_{\text{Dirac}}$  偏移方向不同, 这可能与背栅型 GFET 存在氧吸附现象有关 [16,17].

图 4 为  $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$  尺寸下顶栅型 GFET 和背栅型 GFET 器件载流子迁移率随辐射累积剂量的变化趋势. 由图 4 可知, 两种器件的载流子迁移率在辐照后均下降, 顶栅型 GFET 的空穴迁移率退化了约  $33.2\%$ , 电子迁移率退化了约  $29.9\%$ , 而背栅型 GFET 的空穴迁移率退化了约  $8.3\%$ , 电子迁移率退化了约  $17.3\%$ . 在辐照过程中, 顶栅型 GFET 的空穴迁移率退化更明显, 而背栅型 GFET 的电子迁移率退化更严重, 与背栅型 GFET 相比, 顶栅型的 GFET 的载流子迁移率退化更严重.

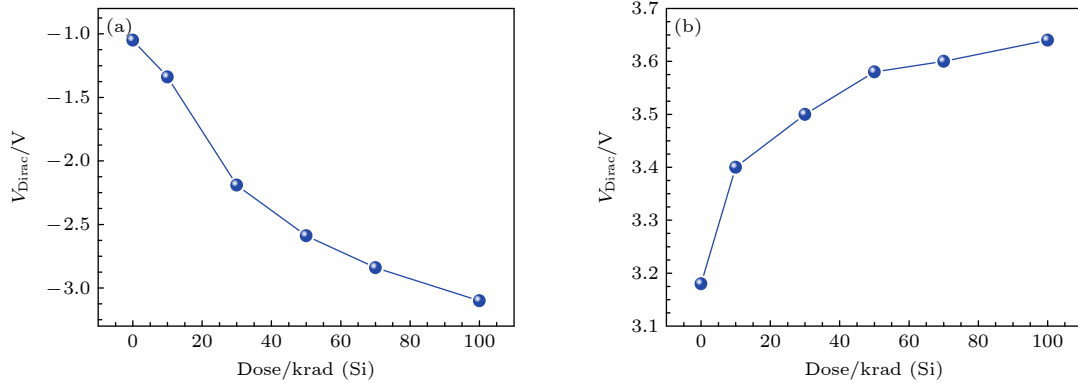


图 3  $V_{\text{Dirac}}$  随辐射累积剂量的变化趋势 (a) 顶栅型 GFET; (b) 背栅型 GFET

Fig. 3. The variations of  $V_{\text{Dirac}}$  with cumulative dose: (a) Top-gate GFET; (b) back-gate GFET.

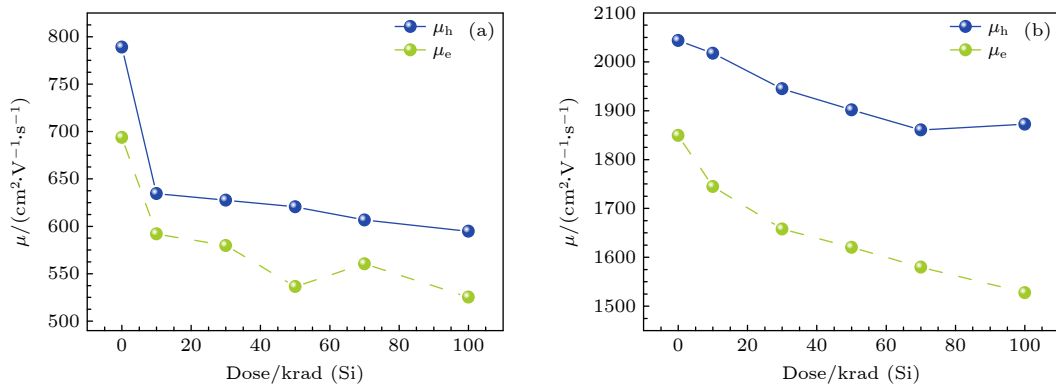


图 4 载流子迁移率随辐射累积剂量的变化趋势 (a) 顶栅型 GFET; (b) 背栅型 GFET

Fig. 4. The variations of  $\mu$  with cumulative dose: (a) Top-gate GFET; (b) back-gate GFET.

载流子迁移率与氧化物陷阱电荷的关系如(2)式和(3)式所示<sup>[18]</sup>, 载流子迁移率的退化则是在辐照过程中产生的空穴被陷阱电荷俘获, 形成氧化物陷阱电荷, 氧化物陷阱电荷增加了散射位点, 导致库仑散射增强, 载流子迁移率降低<sup>[10,15,16,18-20]</sup>:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_c(N_{ot}, Q_{gc})} + \frac{1}{\mu_{SR}}(E_{eff}), \quad (2)$$

$$\mu_c^{-1} = \alpha(N_{ot}/N_0) \left( \frac{1}{1 + Q_{gc}/Q_0} \right)^\beta, \quad (3)$$

其中,  $N_{ot}$  是氧化物陷阱电荷,  $\mu_c$  是受库仑散射影响的载流子迁移率,  $\mu_{SR}$  是受短程散射影响的载流子迁移率,  $Q_{gc}$  是电荷密度,  $E_{eff}$  是有效电场强度,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $N_0$  及  $Q_0$  是拟合参数.

### 3.2 尺寸对 GFET 的总剂量响应的影

对  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ,  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  三种尺寸下的顶栅型 GFET 和背栅型 GFET 进行辐照, 图 5 为顶栅型 GFET 和背栅型

GFET 器件辐照前后转移特性曲线的变化趋势. 从图 5 可知, 尺寸是影响 GFET 辐照响应的关键因素. 表 2 为辐照前后不同尺寸 GFET 的  $V_{Dirac}$  偏移量  $\Delta V_{Dirac}$  和载流子迁移率偏移量  $\Delta\mu$ , 可以看到顶栅型 GFET 尺寸为  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  时偏移量最大, 损伤也最明显, 整体上尺寸越大, 辐照损伤程度越明显, 这是由于受辐照的面积越大, 产生的电子空穴对越多, 在正栅极偏置下形成的氧化物陷阱电荷越多, 导致了更严重的辐射损伤. 而  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  尺寸的回栅型 GFET 辐射损伤最严重, 整体上尺寸越小, 辐照损伤程度越明显, 这可能是由于大尺寸器件的石墨烯与氧气的接触面积较大, 受氧吸附的影响也越明显, 辐射损伤与氧吸附的作用相互抵消<sup>[21,22]</sup>, 反而大尺寸器件损伤较小.

### 3.3 损伤机理及模拟仿真

对顶栅型 GFET 而言, 辐射在栅氧层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和衬底  $\text{SiO}_2$  中产生了大量的电子空穴对, 由于施加了正栅极偏置, 电子和空穴在偏置电场中复合及

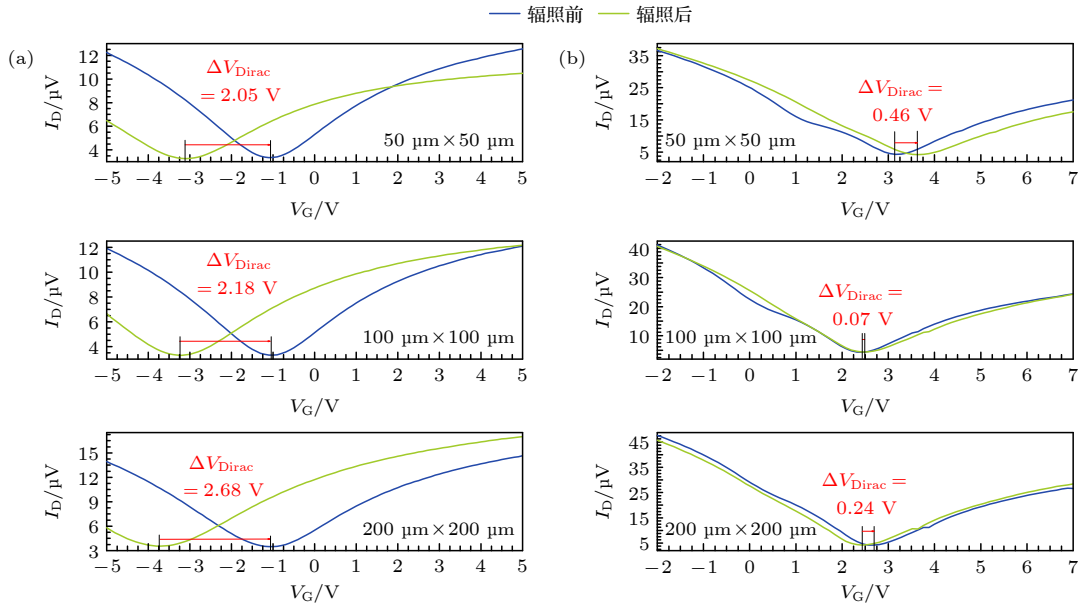


图 5 辐照前后转移特性曲线的变化趋势 (a) 顶栅型 GFET; (b) 背栅型 GFET

Fig. 5. Transfer characteristic curve of GFET before and after irradiation: (a) Top-gate GFET; (b) back-gate GFET.

表 2 辐照前后不同尺寸 GFET 的  $V_{Dirac}$  偏移量  $\Delta V_{Dirac}$  和载流子迁移率偏移量  $\Delta\mu$

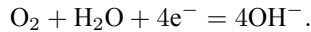
Table 2.  $V_{Dirac}$  offsets  $\Delta V_{Dirac}$  and carrier mobility offsets  $\Delta\mu$  of GFETs of different sizes before and after irradiation.

尺寸	顶栅型GFET			背栅型GFET		
	$\Delta V_{Dirac}/V$	$\Delta\mu_h/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta\mu_e/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta V_{Dirac}/V$	$\Delta\mu_h/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta\mu_e/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
$50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$	2.05	194.2	168.1	0.46	133.3	324.0
$100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$	2.18	78.3	98.5	0.07	26.1	252.1
$200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$	2.68	243.5	40.6	0.24	69.6	92.8

移动, 由于电子的移动速度要远大于空穴的移动速度,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层中的电子被扫出栅极, 空穴则向  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与石墨烯的界面处移动, 在移动中被  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中的缺陷俘获成为带正电的氧化物陷阱电荷, 而衬底  $\text{SiO}_2$  中未复合的电子向石墨烯与  $\text{SiO}_2$  的界面处移动, 在石墨烯与  $\text{SiO}_2$  的界面处形成界面陷阱电荷. 通过实验结果可知氧化物陷阱电荷是导致  $V_{\text{Dirac}}$  负向偏移的主要原因 [23-27].

根据空穴产额模型 [28], 电场是影响空穴产额的主要因素. 由于顶栅型 GFET 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的等效氧化层厚度为 20 nm, 背栅型 GFET 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的等效氧化层厚度为 5 nm, 在施加相同偏置时, 背栅型 GFET 栅氧层中的电场强度强于顶栅型 GFET 栅氧层中的电场强度, 背栅型 GFET 的空穴产额更大, 将导致更严重的辐射损伤.

对于背栅型 GFET, 还会受到氧吸附的影响. 背栅型 GFET 中的石墨烯暴露在大气中,  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  在石墨烯表面发生如下反应:



反应生成  $\text{OH}^-$ , 在反应过程中增加了电荷转移, 石墨烯中的电子流出, 这导致了 n 型掺杂的降低, 最终  $V_{\text{Dirac}}$  正向偏移, 这与氧化物陷阱电荷的作用相反, 一定程度上抵消了辐射损伤 [16]. 当氧吸附强于陷阱电荷的作用时,  $V_{\text{Dirac}}$  将正向偏移. 因此背栅型 GFET 的辐射损伤程度弱于顶栅型 GFET.

为更好地解释  $V_{\text{Dirac}}$  的负向偏移, 结合 TCAD 仿真工具研究了氧化物陷阱电荷对 GFET 的影响, 在 TCAD 工具中建立顶栅结构的 GFET 的二维模型, 该模型中石墨烯的沟道长为 50  $\mu\text{m}$ , 通过改变多晶硅的参数来替代石墨烯 [29]. 在仿真过程中

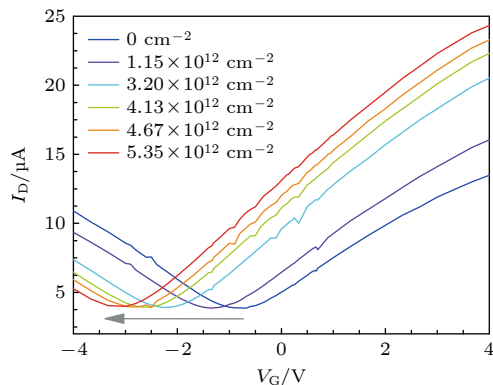


图 6 固定不同数目的陷阱缺陷的转移特性曲线

Fig. 6. Transfer characteristic curve after fixing different number of trap defects.

添加氧化层固定电荷来模拟氧化物陷阱电荷的作用. 图 6 为固定不同数目的陷阱缺陷的转移特性曲线, 从图 6 可以看出, 随着固定陷阱电荷数目的增加, 转移特性曲线负向移动, 同时在界面处的固定陷阱电荷数目越高, 转移特性曲线的偏移量越大. 这与实验结果相符, 也证明了正的氧化物陷阱电荷是造成  $V_{\text{Dirac}}$  的负向偏移的主要原因.

## 4 结 论

本文研究了不同结构、尺寸的石墨烯场效应晶体管 (GFET) 的总剂量效应, 发现顶栅型 GFET 和背栅型 GFET 的  $V_{\text{Dirac}}$  和载流子迁移率随着总剂量的增大而退化, 顶栅型 GFET 的抗辐射能力弱于背栅型 GFET, GFET 总剂量效应响应规律与器件结构和器件尺寸均有很强的依赖性. 对于顶栅型 GFET, 尺寸越大的 GFET 由于受辐照面积更大, 对辐照损伤更加敏感, 而背栅型 GFET, 尺寸越小的 GFET 对辐照损伤越敏感. 辐照在栅氧层中产生的氧化物陷阱电荷是顶栅型 GFET 退化的主要原因, 而背栅型 GFET, 氧吸附一定程度上抵消了氧化物陷阱电荷的作用, 在背栅型 GFET 的辐照过程中发挥一定作用. 通过 TCAD 仿真模拟, 表明氧化物陷阱电荷是顶栅型 GFET 的  $V_{\text{Dirac}}$  退化的主要原因. 这对 GFET 的抗辐射加固设计具有重要参考价值.

## 参考文献

- [1] 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
- [2] Dong H M, Duan Y F, Huang F, Liu J L 2018 *Front. Phys.* **13** 137203
- [3] Du S C, Lu W, Ali A, Zhao P, Shehzad K, Guo H W, Ma L L, Liu X M, Pi X D, Wang P, Fang H H, Xu Z, Gao C, Dan Y P, Tan P H, Wang H T, Lin C T, Yang J Y, Dong S R, Cheng Z Y, Li E P, Yin W Y, Luo J K, Yu B, Hasan T, Xu Y, Hu W D, Duan X F 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700463
- [4] Bo X J, Zhou M, Guo L P 2017 *Biosens. Bioelectron.* **89** 167
- [5] Cui M C, Zhong X L, Fang Y, Sheng H X, Guo T T, Guo Y 2021 *Int. J. RF Microw. C. E.* **31** e22723
- [6] Ma W Y, Lu W, Guo Q, He C F, Wu X, Wang X, Cong Z C, Wang B, Maria 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 026101 (in Chinese) [马武英, 陆旻, 郭旗, 何承发, 吴雪, 王信, 丛志超, 汪波, 玛丽娅 2014 *物理学报* **63** 026101]
- [7] Dong S J, Guo H X, Ma W Y, Lv L, Pan X Y, Lei Z F, Yue S Z, Hao R J, Ju A A, Zhong X L, Ouyang X P 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 078501 (in Chinese) [董世剑, 郭红霞, 马武英, 吕玲, 潘霄宇, 雷志锋, 岳少忠, 郝蕊静, 琚安安, 钟向丽, 欧阳晓平]

- 2020 物理学报 **69** 078501]
- [8] Procházka P, Mareček D, Lišková Z, Čechal J, Šíkola T 2017 *Sci. Rep.* **7** 563
- [9] Jain S, Gajarushi A S, Gupta A, Rao V R 2020 *IEEE Sens. J.* **20** 2938
- [10] Zhang Y F, Peng S Y, Wang Y H, Guo L X, Zhang X Y, Huang H Q, Su S H, Wang X W, Xue J M 2022 *J. Phys. Chem. Lett.* **13** 10722
- [11] Feng T T 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [冯婷婷 2014 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [12] Iqbal M W, Hussain G, Kamran M A, Aslam I, Alharbi T, Azam S, Majid A, Razzaq S 2019 *Microelectron. Eng.* **216** 111044
- [13] LaGasse S W, Cress C D, Hughes H L, Lee J U 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 156
- [14] Hafi B, Boubaker A, Ismaïl N, Kalboussi A, Lmimouni K 2015 *J. Korean Phys. Soc.* **67** 1201
- [15] Nouchi R, Saito T, Tanigaki K 2011 *Appl. Phys. Express* **4** 035101
- [16] Kang C G, Lee Y G, Lee S K, Park E, Cho C, Lim S K, Hwang H J, Lee B H 2013 *Carbon* **53** 182
- [17] Xiao M, Qiu C, Zhang Z, Peng L M 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 34050
- [18] Esqueda I, Cress C, Anderson T, Ahlbin J, Bajura M, Fritze M, Moon J S 2013 *Electronics* **2** 234
- [19] Giubileo F, Di Bartolomeo A, Martucciello N, Romeo F, Iemmo L, Romano P, Passacantando M 2016 *Nanomaterials* **6** 206
- [20] Kumar S, Kumar A, Tripathi A, Tyagi C, Avasthi D K 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 161533
- [21] Fan L J, Bi J S, Xi K, Yang X Q, Xu Y N, Ji L L 2021 *IEEE Sens. J.* **21** 16100
- [22] Zhang E X, Newaz A K M, Wang B, Bhandaru S, Zhang C X, Fleetwood D M, Bolotin K I, Pantelides S T, Alles M L, Schrimpf R D, Weiss S M, Reed R A, Weller R A 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2961
- [23] Zhu M G, Zhou J S, Sun P K, Peng L M, Zhang Z Y 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 47756
- [24] Kanhaiya P S, Yu A, Netzer R, Kemp W, Doyle D, Shulaker M M 2021 *ACS Nano* **15** 17310
- [25] Shu H 2023 *M. S. Thesis* (Beijing: North China University of Technology) (in Chinese) [舒焕 2023 硕士学位论文 (北京: 北方工业大学)]
- [26] Stará V, Procházka P, Mareček D, Šíkola T, Čechal J 2018 *Nanoscale* **10** 17520
- [27] An H, Li D, Yang S, Wen X, Zhang C, Cao Z, Wang J 2021 *Sensors* **21** 7753
- [28] Oldham T R, McLean F B 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [29] Ismail M A, Zaini K M M, Syono M I 2019 *TELKOMNIKA Telecommun. Comput. Electron. Control* **17** 1845

# Total X-ray dose effect on graphene field effect transistor\*

Li Ji-Fang<sup>1)</sup> Guo Hong-Xia<sup>2)†</sup> Ma Wu-Ying<sup>2)</sup> Song Hong-Jia<sup>1)</sup>Zhong Xiang-Li<sup>1)</sup> Li Yang-Fan<sup>1)</sup> Bai Ru-Xue<sup>1)</sup>Lu Xiao-Jie<sup>1)</sup> Zhang Feng-Qi<sup>2)</sup><sup>1)</sup> (*School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)<sup>2)</sup> (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

(Received 21 November 2023; revised manuscript received 5 December 2023)

## Abstract

In this paper, the total dose effects of graphene field-effect transistors (GFETs) with different structures and sizes are studied. The irradiation experiments are carried out by using the 10-keV X-ray irradiation platform with a dose rate of 200 rad(Si)/s. Positive gate bias ( $V_G = +1$  V,  $V_D = V_S = 0$  V) is used during irradiation. Using a semiconductor parameter analyzer, the transfer characteristic curves of top-gate GFET and back-gate GFET are obtained before and after irradiation. At the same time, the degradation condition of the dirac voltage  $V_{Dirac}$  and the carrier mobility  $\mu$  are extracted from the transfer characteristic curve. The experimental results demonstrate that  $V_{Dirac}$  and carrier mobility  $\mu$  degrade with dose increasing. The depletion of  $V_{Dirac}$  and carrier mobility  $\mu$  are caused by the oxide trap charge generated in the gate oxygen layer during X-ray irradiation. Compared with the back-gate GFETs, the top-gate GFETs show more severely degrade  $V_{Dirac}$  and carrier mobility, therefore top-gate GFET is more sensitive to X-ray radiation at the same cumulative dose than back-gate GFET. The analysis shows that the degradation of top-gate GFET is mainly caused by the oxide trap charge. And in contrast to top-gate GFET, oxygen adsorption contributes to the irradiation process of back-gate GFET, which somewhat mitigates the effect of radiation damage. Furthermore, a comparison of electrical property deterioration of GFETs of varying sizes between the pre-irradiation and the post-irradiation is made. The back-gate GFET, which has a size of  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ , and the top-gate GFET, which has a size of  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ , are damaged most seriously. In the case of the top-gate GFET, the larger the radiation area, the more the generated oxide trap charges are and the more serious the damage. In contrast, the back-gate GFET has a larger oxygen adsorption area during irradiation and a more noticeable oxygen adsorption effect, which partially offsets the damage produced by irradiation. Finally, the oxide trap charge mechanism is simulated by using TCAD simulation tool. The TCAD simulation reveals that the trap charge at the interface between  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and graphene is mainly responsible for the degradation of top-gate GFET property, significantly affecting the investigation of the radiation effect and radiation reinforcement of GFETs.

**Keywords:** graphene field effect transistor, X-ray irradiation, total-ionizing-dose effect**PACS:** 85.30.Tv, 81.05.ue, 61.80.Az, 61.80.Cb**DOI:** [10.7498/aps.73.20231829](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231829)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12275230, 12027813).

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