

碳纳米管场效应晶体管的 X 射线辐照效应*

曾天祥¹⁾ 李济芳¹⁾ 郭红霞^{2)†} 马武英²⁾ 雷志锋³⁾钟向丽¹⁾ 张鸿³⁾ 王颂文¹⁾

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)

3) (工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广州 511370)

(2024 年 12 月 2 日收到; 2024 年 12 月 23 日收到修改稿)

本文针对 N 型和 P 型碳纳米管场效应晶体管 (carbon nanotube field-effect transistor, CNTFET) 开展了 10 keV-X 射线的总剂量效应研究. 结果表明, 不同类型的晶体管在辐照后均出现阈值电压漂移、跨导下降、亚阈值摆幅上升和饱和电流下降的现象; 辐照过程中, 施加浮空偏置的 N 型器件较开态偏置损伤更严重, 而施加开态偏置的 P 型器件较浮空偏置损伤更严重; N 型器件辐照后回滞宽度减小且随着沟道尺寸的增大总剂量损伤愈发严重. 辐照过程中产生的陷阱电荷是造成器件参数退化的主要原因; 不同类型器件在辐照过程中施加的栅极偏置会影响栅极介质层中陷阱对电子或空穴的捕获, 从而使器件呈现不同的辐射损伤特征; 辐照后 N 型器件回滞宽度减小可能是因为辐照产生的带负电陷阱电荷阻碍了水分子、OH 基团和栅极介质层中陷阱对电子的捕获; 此外, 晶体管的沟道尺寸也会影响辐射响应, 尺寸越大, 辐照过程中栅极介质层中和界面处产生陷阱电荷越多, 导致晶体管损伤更为严重.

关键词: 碳纳米管场效应晶体管, X 射线辐照, 总剂量效应**PACS:** 85.30.Tv, 81.05.U-, 61.80.Az, 61.80.Cb**DOI:** 10.7498/aps.74.20241670**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241670

1 引言

碳纳米管 (carbon nanotubes, CNT) 以其出色的载流子迁移率、超薄的体积和高稳定性被认为是一种非常适合构建高性能场效应晶体管 (field-effect transistor, FET) 的沟道材料^[1-7]. 经过多年研究, 以碳纳米管场效应晶体管和互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 技术为核心的碳基电子技术成功应用于数字电路、射频电子、传感探测、三维集成和特种芯片等领域中^[8], 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^[9,10]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稳定性. 碳纳米管场效应晶体管在辐射环境中的应用也引起了广泛关注^[11-13], 尤其是长时间器件工作使得器件性能退化的空间总剂量效应. 2016 年, Zhao 等^[14]在浮空偏置条件下对不同 CNT 排列方式的底栅 P 型和 N 型 CNTFET 进行了 ⁶⁰Co γ 源总剂量辐照实验, 证明了空气环境及栅氧材料对器件的辐射损伤影响显著, 另外研究了 CNT 的排列方式对器件抗辐照性能的影响, 提出了相应的提高器件辐射加固的方案; 2021 年, Zhang 等^[15]在浮空偏置条件

* 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

下进行了底栅 P 型 CNTFET 低能质子辐照实验, 证明了质子辐照下的器件会产生总剂量效应和位移损伤效应, 而 CNT 沟道区和源漏区域的位移损伤程度不同; 2021 年, Zhu 等^[16]利用 ^{60}Co γ 射线在浮空偏置条件下对顶栅 CNTFET 各组件进行了辐照实验研究, 结果表明 CNT 沟道具备一定的抗辐照能力, 衬底材料和栅氧化层材料是引起总剂量损伤的主要因素; Kanhaiya 等^[17]则在开态偏置条件下进行了不同结构 P 型 CNTFET 的 ^{60}Co γ 射线和 X 射线辐照实验, 该研究表明: 局部底栅和双栅 CNTFET 可提高器件抗总剂量辐射性能, 并且栅极介质层厚度对器件抗总剂量损伤性能有所影响。

综上所述, 现有研究主要利用 P 型 CNTFET 在单一偏置条件下进行 γ 射线的总剂量效应研究, N 型 CNTFET 的总剂量效应研究较为稀缺, 针对不同偏置条件下 N 型和 P 型 CNTFET 总剂量效应的对比分析也较少. N 型和 P 型 CNTFET 具有不同的载流子类型, 两种器件在辐照后可能表现出不同的辐射响应以及在辐照环境中, 不同的偏置条件也可能导致两种器件产生不同的性能退化. 因此, 本文通过利用 10 keV-X 射线对不同沟道尺寸的 N 型 CNTFET 进行总剂量效应研究获得了辐照响应规律, 并探讨了 P 型与 N 型 CNTFET 在不同栅极偏置条件下的总剂量效应差异, 进一步完善了 CNTFET 总剂量辐射损伤的规律与机理。

2 实验描述

实验样品选用顶栅型 CNTFET, 两款器件结构如图 1 所示. 由衬底、金属电极、CNT 沟道和 HfO_2 栅极介质层组成。

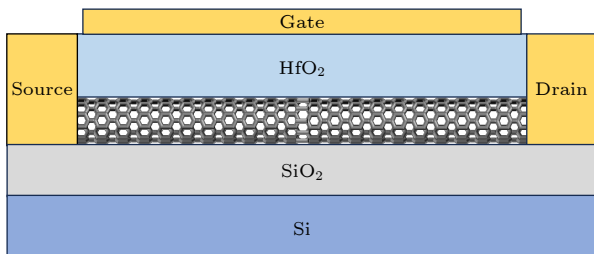


图 1 器件结构示意图

Fig. 1. Device structure diagram.

总剂量辐照实验在 10 keV-X 射线辐照平台上进行, 辐照剂量率为 200 rad(Si)/s, N 型器件辐照

累积剂量为 100 krad(Si), P 型器件为 90 krad(Si). 在辐照实验中, 设置了两种栅极偏置条件, 即开态偏置 (辐照过程中针对不同器件施加 +1 V 或 -1 V 的栅极偏置电压, 使器件处于导通状态) 和浮空偏置 (辐照过程中器件不施加任何偏置电压, 使器件处于关闭状态), 辐照均在室温、大气环境下进行。

3 结果与分析

3.1 X 射线辐照对 CNTFET 电学特性的影响

图 2 所示为沟道宽长比为 25 $\mu\text{m}/5 \mu\text{m}$ 的 N 型 CNTFET 在浮空偏置下辐照前后的转移特性曲线和输出特性曲线, 栅极电压 V_g 扫描范围为 4 — -0.5 V, 累积总剂量为 100 krad(Si); 图 3 所示为沟道宽长比为 20 $\mu\text{m}/20 \mu\text{m}$ 的 P 型 CNTFET 在浮空偏置下辐照前后的转移特性曲线和输出特性曲线, 栅极电压 V_g 扫描范围为 0.5 — -4 V, 累积总剂量为 90 krad(Si). 从图 2 和图 3 的转移特性曲线中可以看出, 辐照后 N 型器件和 P 型器件阈值电压发生了不同方向的漂移, 饱和电流下降。

从图 2 和图 3 的转移特性曲线中提取了 N 型和 P 型器件辐照前后的电学参数与其差值变化量, 如图 4 和表 1 所示. 可以看出, 辐照后 N 型和 P 型器件的电学参数均发生了退化。

辐照引起的陷阱电荷对阈值电压的影响可由 (1) 式表示^[18]:

$$V_{th} = V_{th0} + \frac{\Delta Q_{ot} + \Delta Q_{it}}{C_{ox}}, \quad (1)$$

式中, V_{th0} 为辐照前阈值电压值, ΔQ_{ot} 为氧化物陷阱电荷变化量, ΔQ_{it} 为界面陷阱电荷变化量, C_{ox} 为氧化层电容. 由 (1) 式可知辐照后的阈值电压同时受到氧化物陷阱电荷与界面陷阱电荷的共同影响. 在 X 射线辐照下, X 射线将与栅介质层中的原子作用产生电子空穴对^[19], N 型 CNTFET 在电场作用下主要捕获电子形成界面陷阱电荷, P 型 CNTFET 在电场作用下主要捕获空穴形成正氧化物陷阱电荷, 两种器件在辐照作用下阈值电压均增大, 导致器件需要更高的栅极电压才能导通, 开关延迟增大, 降低了器件的速度和性能。

辐照后两款器件跨导都发生了下降, 表示栅极电压调制漏极电流的效率变差, 导致器件的开关速度减慢. 而载流子迁移率与跨导的关系如 (2) 式

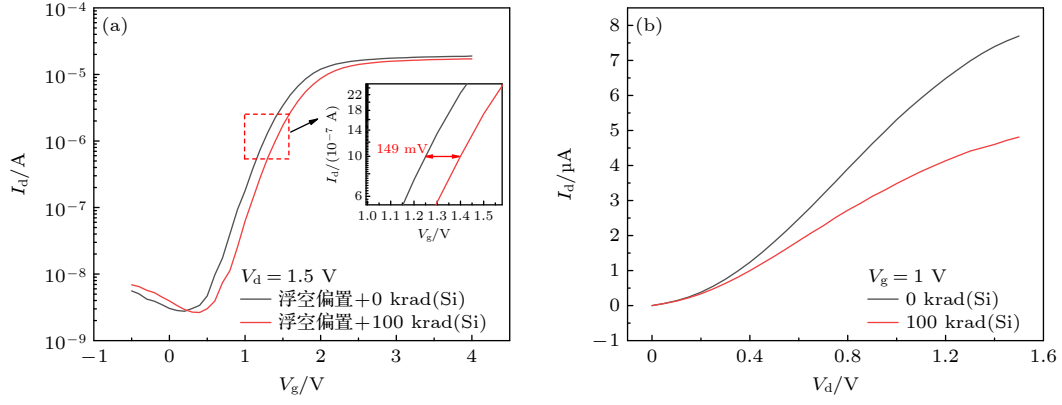


图 2 辐照前后 N 型器件的电学曲线 (a) 转移特性曲线; (b) 输出特性曲线

Fig. 2. Electrical curves of N-type devices before and after irradiation: (a) Transfer characteristic curve; (b) output characteristic curve.

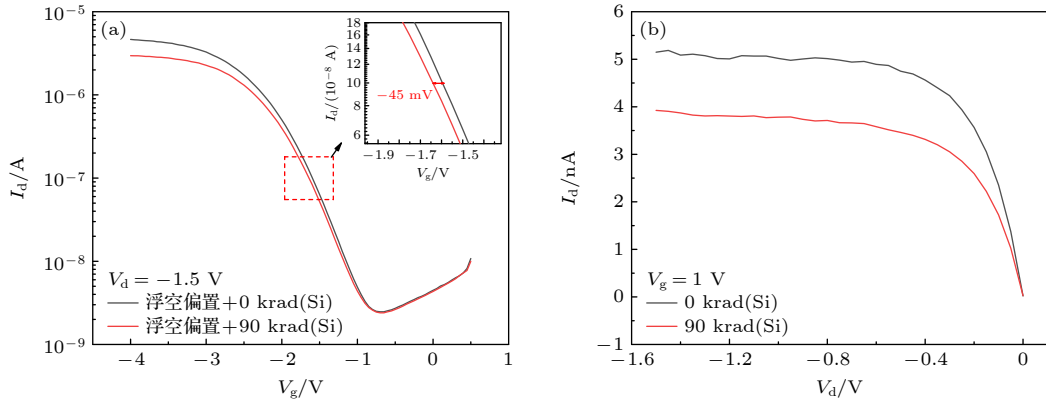


图 3 辐照前后 P 型器件的电学曲线 (a) 转移特性曲线; (b) 输出特性曲线

Fig. 3. Electrical curves of P-type devices before and after irradiation: (a) Transfer characteristic curve; (b) output characteristic curve.

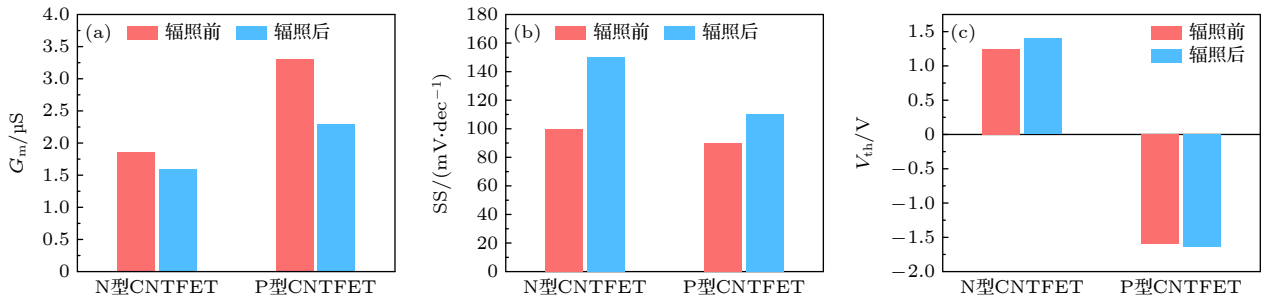


图 4 辐照前后 N 型和 P 型器件的电学参数 (a) 跨导; (b) 亚阈值摆幅; (c) 阈值电压

Fig. 4. Electrical parameters of N-type and P-type devices before and after irradiation: (a) Transconductance; (b) subthreshold swing; (c) threshold voltage.

所示:

$$G_m = \mu C_{ox}(W/L)V_{DS}, \quad (2)$$

其中, W/L 为 CNTFET 沟道宽长比, V_{DS} 为漏极电压, μ 为载流子迁移率, 由 (3) 式确定^[18,20]:

$$\mu = \mu_0 / (1 + \alpha \Delta N_{it}), \quad (3)$$

式中, μ_0 为辐照前载流子迁移率, ΔN_{it} 为界面陷阱

电荷密度变化量, α 为与器件工艺相关的参数. 根据 (2) 式和 (3) 式可知在给定的漏极电压下, 跨导仅与载流子迁移率有关, 而载流子迁移率受界面陷阱电荷密度的影响. CNTFET 在 X 射线辐照下会有界面陷阱电荷的积累, 界面陷阱电荷对沟道载流子产生散射影响, 使 CNT 中的载流子迁移率降低, 导致器件跨导的降低.

表 1 N 型和 P 型器件辐照前后电学参数变化量

Table 1. Changes in electrical parameters of N-type and P-type devices before and after irradiation.

器件类型	$\Delta G_m/\mu S$	标准差	$\Delta SS/(mV \cdot dec^{-1})$	标准差	$\Delta V_{th}/mV$	标准差
N型器件	-0.275	0.02	50	0.015	149	0.025
P型器件	-1	0.022	20	0.02	-45	0.018

辐照后两款器件亚阈值摆幅上升, 亚阈值摆幅由 (4) 式确定 [18]:

$$SS = 2.3 \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{C_d + C_{it}}{C_{ox}} \right), \quad (4)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, q 为电子电荷量, C_d 为耗尽层电容, C_{it} 为界面陷阱电容. 由于 CNT 直径小, 属于超薄沟道材料, 因此 C_d 可忽略不计 [16]. 器件辐照后亚阈值摆幅主要受到界面态电容 C_{it} 的影响, C_{it} 由 (5) 式确定 [21]:

$$C_{it} = qD_{it}, \quad (5)$$

式中, D_{it} 为界面态浓度, q 为电子电荷量. 界面态电容 C_{it} 仅与界面态浓度 D_{it} 有关, 器件辐照过程中界面态浓度增大导致陷阱电荷的积累, 进而亚阈值摆幅上升. 亚阈值摆幅的上升使器件开关性能变差, 器件在从关态转为开态时的切换效率变低.

3.2 栅极偏置对 CNTFET 总剂量效应的影响

对于 N 型和 P 型器件, 在辐照过程中对其施加了栅极开态偏置, 以探究栅极开态偏置对 CNTFET 总剂量效应的影响. N 型器件施加 +1 V 的栅极偏置, 分别测试其在 0 krad(Si) 和 100 krad(Si) 的转移特性曲线; P 型器件施加 -1 V 的栅极偏置, 分别测试其在 0 krad(Si) 和 90 krad(Si) 的转移特性曲

线, N 型和 P 型器件的转移特性曲线如图 5 所示.

图 5(a) 中, N 型器件未进行辐照时, 开态偏置下的阈值电压较浮空偏置下的阈值电压向右漂移; 在开态偏置条件下 N 型器件辐照前后的阈值电压漂移量为 12 mV, 远小于器件在浮空偏置下的阈值电压漂移量. 因此对于 N 型器件来讲, 浮空偏置下的辐射损伤较开态偏置更加严重.

图 5(b) 中, P 型器件未进行辐照时, 开态偏置下的阈值电压较浮空偏置下的阈值电压向左漂移; 在开态偏置条件下器件辐照前后的阈值电压漂移量为 82 mV, 略大于器件在浮空偏置下的阈值电压漂移量. 对于 P 型器件来讲, 开态偏置下的辐射损伤较浮空偏置更加严重, 这与 N 型器件不同.

对 CNTFET 施加栅极偏置容易受到来自沟道中的载流子注入且载流子被捕获到栅极电介质中, 这一现象已被证明 [22]. 所以 N 型器件未辐照时, 在开态偏置条件下, 沟道中的电子注入到栅极介质层中并被捕获, 进而对沟道中的载流子产生散射效应, 导致阈值电压向右漂移, 饱和电流下降; 同理, P 型器件未辐照时, 在开态偏置条件下, 沟道中的空穴注入到栅极介质层中并被捕获, 进而对沟道中的载流子产生散射效应, 导致阈值电压向左漂移, 饱和电流下降. 当 CNTFET 进行辐照时, X 射线与栅极介质层材料反应, 产生电子空穴对. 在氧化物中,

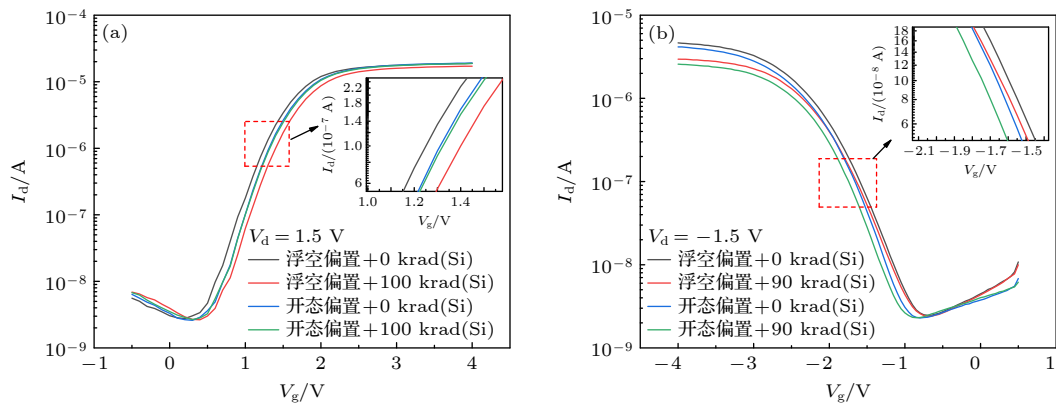


图 5 不同偏置条件下辐照前后的转移特性曲线 (a) N 型器件; (b) P 型器件

Fig. 5. Transfer characteristic curves before and after irradiation under different bias conditions: (a) N-type devices; (b) P-type devices.

电子的移动速度较空穴更快^[23]. 对于 N 型器件, 在辐照过程中施加栅极偏置, 栅极介质层中产生的电子在电场作用下容易被扫出氧化层, 陷阱电荷量减少, 导致器件在辐照前后的阈值电压漂移量小于浮空偏置下的阈值电压漂移量; 对于 P 型器件, 在辐照过程中施加栅极偏置, 栅极介质层中产生的空穴移动速度较慢而被捕获导致带正电的陷阱电荷量增多, 器件在辐照前后的阈值电压漂移量大于浮空偏置下的阈值电压漂移量.

3.3 辐照对 N 型 CNTFET 回滞特性的影响

辐照过程中器件栅极介质层中会引入陷阱电荷, 导致载流子的注入和捕获过程受到影响. 这可能使得器件的回滞特性发生变化, 从而影响其开关特性. 为了器件的抗辐射设计和高可靠性应用, 讨论了辐照对器件的回滞特性影响. 通过对 N 型 CNTFET 的转移特性曲线进行双向扫描来测量回滞特性, 先进行了栅电压正向扫描, V_g 由 -0.5 V 扫描到 4 V, 随后负向扫描, V_g 从 4 V 扫描回 -0.5 V, 实验结果如图 6. 从图 6 可以看出, 器件转移特性曲线由正向扫描到负向扫描的过程中阈值电压向右漂移, 饱和电流下降. 回滞宽度可以表示为转移特性曲线负向扫描和正向扫描的阈值电压之差^[24]. 辐照前回滞宽度为 0.85 V, 辐照后为 0.83 V, 辐照后器件的回滞宽度略微减小.

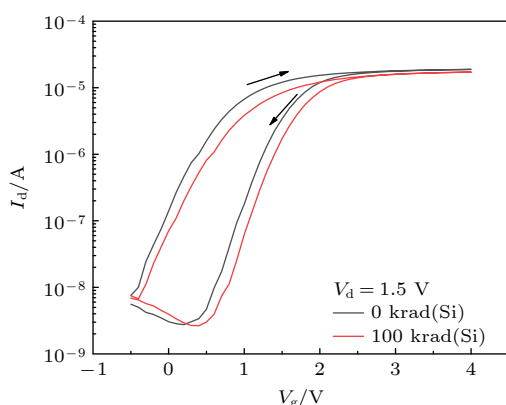


图 6 辐照前后回滞特性的变化

Fig. 6. Changes in hysteresis characteristics before and after irradiation.

CNTFET 沟道区由 CNT 材料组成, CNT 具有很强的吸附性, 在制备过程中难以避免氧气、水分子等杂质的吸附. CNT 吸附的水分子和以硅氧烷形式存在的 OH 基团是 CNTFET 回滞效应的主要来源之一^[25]. 在栅电压正向扫描过程中, 沟道

中电子浓度升高, 吸附的水分子和 OH 基团不断捕获电子^[26-28], 当栅电压负向扫描时被捕获的电子不断释放, 但被捕获电子的释放较捕获电子的速度慢, 导致饱和电流下降和阈值电压漂移. 另一方面, 栅极介质层中的陷阱对沟道中载流子的捕获和释放是产生回滞效应的另一原因^[29]. 与上述机理相似, 栅极介质层中的陷阱在正向扫描时捕获电子的速度大于负向扫描时释放电子的速度导致了回滞的产生. 辐照后器件的回滞窗口宽度略微变小可能是因为辐照产生的带负电陷阱电荷阻碍了水分子、OH 基团和栅极介质层中的陷阱对沟道中的载流子的捕获.

3.4 沟道尺寸对 CNTFET 总剂量效应的影响

对沟道宽长比 $30 \mu\text{m}/5 \mu\text{m}$, $35 \mu\text{m}/5 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}/5 \mu\text{m}$ 三种尺寸下的 N 型 CNTFET 进行 X 射线辐照, 累积总剂量为 $100 \text{ krad}(\text{Si})$. 图 7 所示为不同沟道尺寸的器件在辐照前后的转移特性曲线, 实线和虚线分别为器件辐照前后的转移特性曲线, 表 2 为其电学参数变化量. 为了展示沟道尺寸对载流子传输效率的影响, 利用单位沟道宽度对未辐照器件的转移曲线和跨导进行了归一化, 如图 8 所示.

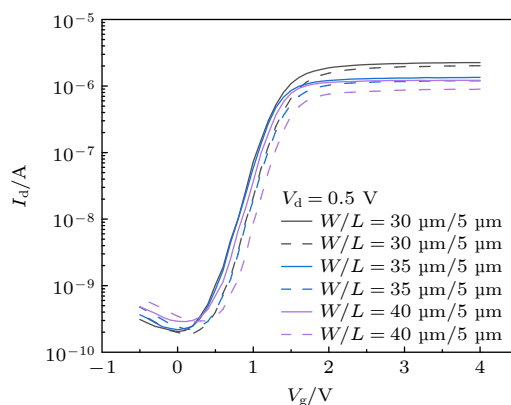


图 7 辐照前后不同沟道尺寸的 CNTFET 转移曲线

Fig. 7. Transfer curves of CNTFET with different channel sizes before and after irradiation.

通过图 7 和图 8 可以看出器件未辐照时, 随着沟道尺寸的增大, 阈值电压往右漂移, 跨导和饱和电流下降, 器件性能不断下降; 器件辐照后随着沟道尺寸的增大, 辐照前后的跨导、亚阈值摆幅和阈值电压变化量不断增大, 器件损伤越严重. 一方面随着沟道尺寸的增大, 导致载流子传输面积的增

大,从而增大载流子的传输效率.另一方面,未经使用的 CNTFET,栅极介质层中已经存在了一些陷阱电荷^[30],随着沟道尺寸的增大,沟道与栅极介质层接触面积增大,栅极介质层中自带的陷阱电荷越多,对沟道中的载流子散射作用越大,导致器件的电学性能下降越严重.两种因素相互制约,而从图 8 归一化后的曲线可以看出后者对器件性能影响更大. X 射线辐照过程中,沟道尺寸越大的器件,栅极介质层中由总剂量效应产生的陷阱电荷越多,对沟道中的载流子散射作用也越大,器件的电学性能下降越严重.

表 2 辐照前后不同沟道尺寸的 CNTFET 电学参数变化

Table 2. Changes in electrical parameters of CNTFET with different channel sizes before and after irradiation.

宽长比	$\Delta G_m/\mu\text{S}$	$\Delta SS/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	$\Delta V_{th}/\text{V}$
30 $\mu\text{m}/5 \mu\text{m}$	-0.34	52	0.15
35 $\mu\text{m}/5 \mu\text{m}$	-0.35	53	0.19
40 $\mu\text{m}/5 \mu\text{m}$	-0.65	60	0.7

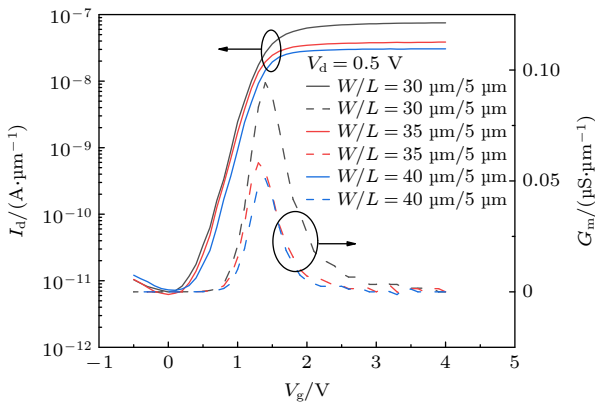


图 8 不同沟道尺寸的未辐照 CNTFET 归一化后的转移特性曲线与跨导

Fig. 8. Normalized transfer characteristic curves and transconductance of unirradiated CNTFET with different channel sizes.

4 总 结

本文研究了 N 型和 P 型 CNTFET 在 X 射线辐照下产生的总剂量效应,发现 N 型和 P 型器件在浮空偏置条件下进行辐照后的阈值电压发生漂移,漂移的方向是相反的,并且跨导下降和亚阈值摆幅上升.其主要原因是:两款器件在辐照的过程中,栅极介质层中陷阱捕获的载流子类型的不同引起了阈值电压漂移;跨导下降和亚阈值摆幅上升主

要是由于辐照过程中产生的界面陷阱电荷导致的. N 型器件在开态偏置条件下阈值电压变化量较浮空偏置条件减小, P 型器件在开态偏置条件下阈值电压变化量较浮空偏置条件增大,这是因为栅极介质层中的电子和空穴迁移速度不同,在偏置电压作用下栅极介质层中的陷阱捕获电子和空穴数量的不同导致的.本文还研究了 N 型器件辐照前后回滞特性的变化及沟道尺寸对器件总剂量效应的影响.辐照后器件的回滞宽度略微减小可能是因为辐照产生的带负电陷阱电荷阻碍了沟道表面的水分子、OH 基团和栅极介质层中的陷阱对沟道中电子的捕获.辐照过程中,随着沟道尺寸的增大,栅极介质层中总剂量效应产生的陷阱电荷越多,对沟道中的载流子散射作用越大,使得辐射损伤愈发严重.通过以上 X 射线辐照对 N 型和 P 型 CNTFET 的影响,可以更好地预测 CNTFET 在 X 射线辐照环境下的性能表现,从而为碳基集成电路的辐射可靠性提供理论依据.在未来的研究中,为了进一步提升 CNTFET 在辐射环境中的性能可以合理选择沟道尺寸、栅极偏置和栅极介质材料等参数,能够有效提高 CNTFET 的辐射抗性,从而为辐射加固设计提供优化方向.

参考文献

- [1] Qiu C G, Zhang Z Y, Xiao M M, Yang Y J, Zhong D L, Peng L M 2017 *Science* **355** 271
- [2] Franklin A D, Luisier M, Han S J, Tulevski G, Breslin C M, Gignac L, Lundstrom M S, Haensch W 2012 *Nano Lett.* **12** 758
- [3] Chen B Y, Zhang P P, Ding L, Han J, Qiu S, Li Q W, Zhang Z Y, Peng L M 2016 *Nano Lett.* **16** 5120
- [4] Zhu M G, Si J, Zhang Z Y, Peng L M 2018 *Adv. Mater.* **30** 1707068
- [5] Yang Y Y, Ding L, Chen H J, Han J, Zhang Z Y, Peng L M 2018 *Nano Res.* **11** 300
- [6] Shulaker M M, Hills G, Patil N, Wei H, Chen H Y, Wong H S, Mitra S 2013 *Nature* **501** 526
- [7] De Volder M F, Tawfick S H, Baughman R H, Hart A J 2013 *Science* **339** 535
- [8] Liu Y F, Zhang Z Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 068503 (in Chinese) [刘一凡, 张志勇 2022 *物理学报* **71** 068503]
- [9] 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, 陆妩, 郭旗, 何承发, 吴雪, 王信, 丛忠超, 汪波, 玛丽娅 2014 *物理学报* **63** 026101]
- [10] 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]
- [11] Krashennnikov A, Nordlund K, Sirviö M, Salonen, E,

- Keinonen J 2001 *Phys. Rev. B* **63** 245405
- [12] Tolvanen A, Kotakoski J, Krasheninnikov A, Nordlund K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 173109
- [13] Krasheninnikov A V, Nordlund K 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 071301
- [14] Zhao Y D, Li D Q, Xiao L, Liu J K, Xiao X Y, L G H, Jin Y H, Jiang K L, Wang J P, Fan S S, Li Q Q 2016 *Carbon* **108** 363
- [15] Zhang X R, Zhu H P, Peng S A, Xiong G D, Zhu C Y, Huang X N, Cao S R, Zhang J J, Yan Y P, Yao Y, Zhang D Y, Shi J Y, Wang L, Li B, Jin Z 2021 *J. Semicond.* **42** 112002
- [16] Zhu M G, Zhou J S, Sun P K, Peng L M, Zhang Z Y 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 47756
- [17] Kanhaiya P S, Yu A, Netzer R, Kemp W, Doyle D, Shulaker M M 2021 *ACS Nano* **15** 17310
- [18] Petrosjanc K O, Adonin A S, Kharitonov I A, Sicheva M V 1994 *Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures* Moscow, Russia, March 22–25, 1994 p126
- [19] Oldham T R, Mclean F B 2002 *IEEE T. Nucl. Sci.* **50** 483
- [20] Galloway K F, Gaitan M, Russell T J 1984 *IEEE T. Nucl. Sci.* **31** 1497
- [21] Lu P, Zhu M G, Zhao P X, Fan C W, Zhu H P, Gao J T, Y C, Han Z S, Li B, Liu J, Zhang Z Y 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 10936
- [22] McMorrow J J, Cress C D, Affouda C 2012 *ACS Nano* **6** 5040
- [23] Belyakov V V, Pershenkov V S, Zebrev G I, Sogoyan A V, Chumakov A I, Nikiforov A Y, Skorobogatov P K 2003 *Russian Microelectron.* **32** 25
- [24] Ni H Z, Li M, Li X H, Zhu X W, Liu H H, Xu M 2022 *IEEE T. Electron Dev.* **69** 1069
- [25] Kim W, Javey A, Vermesh O, Wang Q, Li Y M, Dai H J, 2003 *Nano Letters* **3** 193
- [26] Chua L L, Zaumseil J, Chang J F, Ou E C, Ho P K, Sirringhaus H, Friend R H 2005 *Nature* **434** 194
- [27] Lee S, Koo B, Shin J, Lee E, Park H, Kim H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 99
- [28] Cai X, Gerlach C P, Frisbie C D 2007 *J. Phys. Chem. C* **111** 452
- [29] Ha T J, Kiriya D, Chen K, Javey A 2014 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **6** 8441
- [30] Wang Y W, Wang S, Ye H D, Zhang W H, Xiang L 2023 *IEEE T. Dev. Mater. Re.* **23** 571

X-ray irradiation effects of carbon nanotube field-effect transistors^{*}

ZENG Tianxiang¹⁾ LI Jifang¹⁾ GUO Hongxia^{2)†} MA Wuying²⁾
LEI Zhifeng³⁾ ZHONG Xiangli¹⁾ ZHANG Hong³⁾ WANG Songwen¹⁾

1) (*School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

3) (*Key Laboratory of Reliability Physics and Application Technology for Electronic Components, Fifth Institute of Electronics, Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511370, China*)

(Received 2 December 2024; revised manuscript received 23 December 2024)

Abstract

To further understand the patterns and mechanisms of total ionizing dose (TID) radiation damage in carbon nanotube field-effect transistor (CNTFET), the total dose effects of 10 keV X-ray irradiation on N-type and P-type CNTFETs are investigated in this work. The irradiation dose rate is 200 rad(Si)/s, with a cumulative dose of 100 krad(Si) for N-type devices and 90 krad(Si) for P-type devices. The differences in TID effect between N-type and P-type CNTFETs under the conditions of floating gate bias and on-state bias, the influence of irradiation on the hysteresis characteristics of N-type CNTFETs, and the influence of channel sizes on the TID effects of N-type CNTFETs are also explored. The results indicate that both types of transistors, after being irradiated, exhibit the threshold voltage shift, transconductance degradation, increase in subthreshold swing, and decrease in saturation current. In the irradiation process, N-type devices under floating gate bias suffer more severe damage than those under on-state bias, while P-type devices under on-state bias experience more significant damage than those under floating gate bias. The hysteresis widths of N-type devices decrease after being irradiated, and the TID damage becomes more severe with the increase of channel dimensions. The main reason for the degradation of device parameters is the trap charges generated in the irradiated process. The gate bias applied during irradiation affects the capture of electrons or holes by traps in the gate dielectric, resulting in different radiation damage characteristics for different types of devices. The reduction in the hysteresis width of N-type devices after being irradiated may be attributed to the negatively charged trap charges generated during irradiation, which hinders the capture of electrons by water molecules, OH groups, and traps in the gate dielectric. Moreover, the channel dimensions of the transistors also influence their radiation response: larger channel dimensions result in more trap charges generated in the gate dielectric and at the interface during irradiation, leading to more severe transistor damage.

Keywords: carbon nanotube field-effect transistor, X-ray irradiation, total dose effect

PACS: 85.30.Tv, 81.05.U–, 61.80.Az, 61.80.Cb

DOI: [10.7498/aps.74.20241670](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241670)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241670](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241670)

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

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

碳纳米管场效应晶体管的X射线辐照效应

曾天祥 李济芳 郭红霞 马武英 雷志锋 钟向丽 张鸿 王颂文

X-ray irradiation effects of carbon nanotube field-effect transistors

ZENG Tianxiang LI Jifang GUO Hongxia MA Wuying LEI Zhifeng ZHONG Xiangli ZHANG Hong
WANG Songwen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 058501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241670

CSTR: 32037.14.aps.74.20241670

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241670>

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

石墨烯场效应晶体管的X射线总剂量效应

Total X-ray dose effect on graphene field effect transistor

物理学报. 2024, 73(5): 058501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231829>

氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究

Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays

物理学报. 2021, 70(11): 116102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202028>

不同应力下碳化硅场效应晶体管器件总剂量效应及退火特性

Total dose effect and annealing characteristics of silicon carbide field effect transistor devices under different stresses

物理学报. 2021, 70(16): 166101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210515>

双极型晶体管总剂量效应的统计特性

Statistical characteristics of total ionizing dose effects of bipolar transistors

物理学报. 2021, 70(13): 136102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201835>

纳米线环栅隧穿场效应晶体管的电容模型

Capacitance model for nanowire gate-all-around tunneling field-effect-transistors

物理学报. 2021, 70(21): 218501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211128>

三维数值仿真研究锗硅异质结双极晶体管总剂量效应

Three-dimensional simulation of total ionizing dose effect on SiGe heterojunction bipolar transistor

物理学报. 2022, 71(5): 058502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211795>