

文章编号: 2095-4980(2022)09-0903-05

电离总剂量效应对 HfO₂ 栅介质经时击穿特性影响

魏莹^{1a,1b,2}, 崔江维^{1a,1b,2}, 蒲晓娟^{1a,1b,2}, 崔旭^{1a,1b,2}, 梁晓雯^{1a,1b,2}, 王嘉^{1a,1b}, 郭旗^{1a,1b,2}

(1. 中国科学院 a. 特殊环境功能材料与器件重点实验室; b. 新疆理化技术研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对纳米金属-氧化物-半导体(MOS)器件中采用的高介电常数 HfO₂ 栅介质, 开展电离总剂量效应对栅介质经时击穿特性影响的研究。以 HfO₂ 栅介质 MOS 电容为研究对象, 进行不同栅极偏置条件下⁶⁰Co- γ 射线的电离总剂量辐照试验, 对比辐照前后 MOS 电容的电流-电压、电容-电压以及经时击穿特性的测试结果。结果显示, 不同的辐照偏置条件下, MOS 电容的损伤特性不同。正偏辐照下, 低栅压下的栅电流显著增大, 电容电压特性的斜率降低; 零偏辐照下, 正向高栅压时栅电流和电容均显著增大; 负偏辐照下, 栅电流均有增大, 正向高栅压下电容增大, 且电容斜率降低。3 种偏置下, 电容的经时击穿电压均显著减小。该研究为纳米 MOS 器件在辐射环境下的长期可靠性研究提供了参考。

关键词: 电离总剂量效应; 高 k 栅介质; 经时击穿效应; 辐射陷阱电荷

中图分类号: TN386.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022007

Investigation of the effect of total ionization dose on time-dependent dielectric breakdown for HfO₂-based gate dielectrics

WEI Ying^{1a,1b,2}, CUI Jiangwei^{1a,1b,2}, PU Xiaojuan^{1a,1b,2}, CUI Xu^{1a,1b,2}, LIANG Xiaowen^{1a,1b,2},
WANG Jia^{1a,1b}, GUO Qi^{1a,1b,2}

(1a.Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments;
1b.Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang 830011, China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The effect of total ionizing dose on the time-dependent breakdown characteristics of the high dielectric constant HfO₂-based gate dielectric used in nano-Metal-Oxide-Semiconductor(MOS) devices has been investigated. The MOS capacitor with HfO₂-based gate dielectrics is taken as the research object, a total dose ionization irradiation experiment of ⁶⁰Co- γ rays with different gate biases is carried out. The test results of current-voltage, capacitance-voltage and time-dependent dielectric breakdown characteristics of MOS capacitor before and after irradiation are compared. The results show that the damage characteristics of MOS capacitors are different under different irradiation bias conditions. Under positive bias irradiation, the gate current increases significantly at low gate voltage, and the slope of capacitance-voltage characteristic decreases. Under zero bias irradiation, the gate current and capacitance increase significantly at high forward gate voltage. Under negative bias irradiation, the gate current increases, the capacitance increases under high forward gate voltage while the capacitance slope decreases. The time-dependent breakdown voltage of the capacitor decreases significantly under all three bias conditions. This study provides a reference for the long-term reliability study of nano-MOS devices in radiation environments.

Keywords: total ionizing dose effect; high k gate oxygen dielectric; time-dependent dielectric breakdown; radiation trap charge

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11805268); 中国科学院“西部青年学者”基金资助项目(2021-XBQNXX-021); 中国科学院青年创新促进会基金资助项目(2018473)

随着集成电路的不断发展,金属-氧化物-半导体(MOS)器件的工艺尺寸不断缩小,性能不断提高,在卫星等航天器中具有广泛的应用前景^[1]。当MOS器件进入纳米量级,传统的SiO₂栅介质层厚度已达到物理极限,需要采用高介电常数(高 k)的绝缘材料作为栅介质层,如HfO₂、Al₂O₃、ZrO₂等,实现栅极对沟道的有效控制^[2-3]。空间辐射环境中存在大量的高能粒子,会对MOS器件产生辐射效应,导致其工作性能下降,甚至功能失效^[4-5]。其中,电离总剂量辐射效应主要作用于MOS器件的氧化层,产生氧化物陷阱电荷和界面态,导致器件阈值电压漂移、泄漏电流增大^[6]。而高 k 栅介质材料与Si衬底晶格匹配性差,作为栅介质本身就存在大量的、多态的缺陷^[7-8]。当器件受到辐照后,会引入更多、更复杂的陷阱电荷。另一方面,航天器中的MOS器件长期处于工作状态,器件的可靠性也是需要关注的问题,例如热载流子注入(Hot Carrier Injection, HCI)、栅氧经时击穿(Time Dependent Dielectric Breakdown, TDDB)等^[9]。其中,TDDB效应是指在施加电场强度小于栅介质本征击穿强度时,经过一定时间后栅介质出现的击穿现象。已有研究表明栅氧击穿特性与栅介质层中的缺陷密切相关^[10]。因此,在空间辐射效应的作用下,纳米MOS器件的栅氧击穿问题更加突出^[11-12]。本文针对高 k 栅介质材料HfO₂,开展了电离总剂量效应对栅氧击穿特性的影响研究,采用HfO₂栅介质MOS电容为研究对象,开展了电离总剂量辐照试验,对比了辐照前后MOS电容的电学特性及击穿电压特性,分析了辐射陷阱电荷对HfO₂栅介质经时击穿特性的影响机制。

1 试验方法

试验样品为HfO₂栅介质MOS电容,结构图如图1所示,其中HfO₂栅介质厚度为10 nm, Si衬底为n型掺杂,掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,栅极电极为金属Al材料,电容面积为 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 。辐照试验在中科院新疆理化技术研究所⁶⁰Co- γ 射线源上完成,辐照剂量率为50 rad(Si)/s,累积剂量为300 krad(Si),辐照时分别设置了3种辐照偏置条件,分为正偏辐照、零偏辐照和负偏辐照,对应栅极电压分别为2.5 V、0 V和-2.5 V,衬底均接0 V。

辐照前先对MOS电容进行电学特性测试,包括电容-电压($C-U$)特性和电流-电压($I-U$)特性。测试是在Keysight 4200半导体参数测试系统上完成,其中 $C-U$ 特性的测试条件是测试频率为100 kHz,栅极电压从-3 V扫描至3 V, $I-U$ 特性的测试条件是栅极电压从-2.5 V扫描至2.5 V。

TDDB测试也是在Keysight 4200半导体参数测试系统上完成。测试采用的是阶梯电压应力(Ramp Voltage Stress, RVS)法,施加方式如图2所示,在电容的栅极上施加一个初始电压应力并监测电流,初始电压应力为2.5 V,持续100 s(Δt)后,测试电容的 $I-U$ 特性,之后增大0.1 V(ΔU)应力电压并重复以上2个步骤,直至电容的监测电流或工作电流突然急剧增大,即电容发生击穿,此时的电压即为击穿电压。

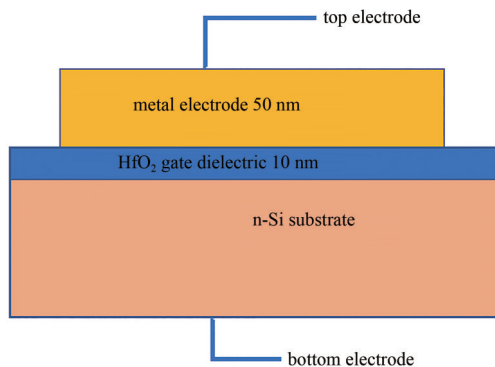


Fig.1 Schematic diagram of HfO₂-based gate dielectric MOS capacitor

图1 HfO₂栅介质MOS电容结构示意图

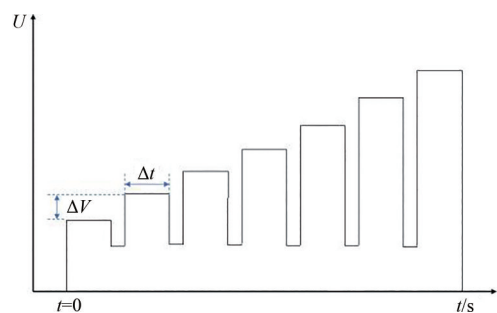


Fig.2 Schematic diagram of ramped voltage stress test

图2 栅氧经时击穿阶梯应力测试方法

2 试验结果与分析

试验中样品数量为3只,由于样品之间存在差异性,并且栅极电流和电容特性的数量级较小,随电压的变化存在波动性,以下的试验结果与分析仅给出了最具代表性的结果。图3为3种不同栅极偏置辐照条件下,辐照前后HfO₂栅介质MOS电容的栅极泄漏电流随栅极电压变化的情况。负栅压下栅极电流为负值,主要由隧穿到栅极的空穴形成,图中为了便于比较均取电流的绝对值,其中电流最小值对应的是电流从负值变为正值的转折点。正栅压下,电流由隧穿到沟道的电子组成。从图3(a)可以看出,正栅极偏置辐照后,HfO₂栅介质MOS电容的栅极电流在栅极电压范围为-1~1 V情况下显著增大,量级在 10^{-11} A左右,表明Si衬底与HfO₂栅介质界面处的电荷密度 Q_s 。

增大；从图 3(b)可以看出，零栅极偏置辐照后，栅极电流在正向高栅压时存在显著增大的现象，表明通过 Fowler–Nordheim 隧穿电子数量增大；从图 3(c)可以看出，负栅极偏置辐照后，MOS 电容的栅极电流均有所增大，特别是在栅压较高的情况下，并且电流的最小值向右偏移，表明通过 Fowler–Nordheim 隧穿和直接隧穿电子和空穴数量均有所增大。

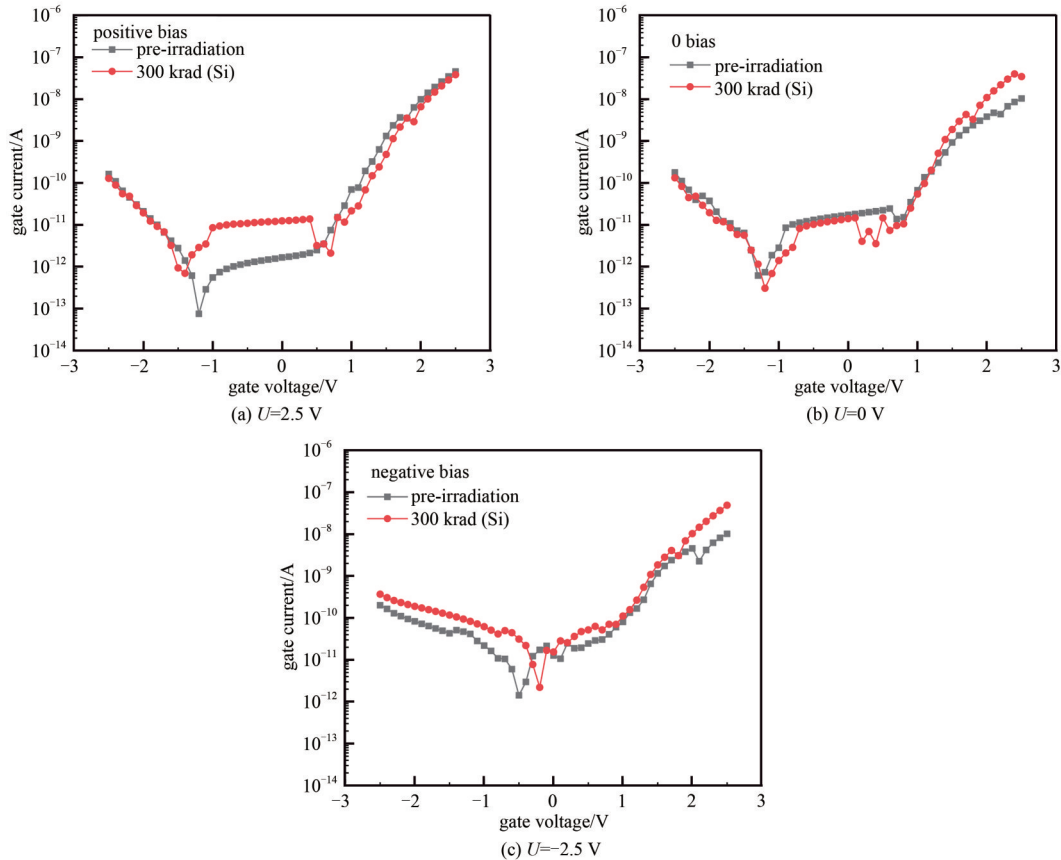


Fig.3 Gate current of the HfO₂ MOS capacitor before and after 300 krad(Si) total dose irradiation under three kinds of bias
图3 三种偏置条件下辐照前和 300 krad(Si)总剂量辐照后 HfO₂ MOS 电容栅极电流的变化

总剂量辐照后 3 只试验样品的电容特性的变化基本一致，图 4 给出了与图 3 同一样品的电容变化结果，即 3 种不同栅极偏置辐照条件下，辐照前后栅极与衬底之间的电容随栅极电压的变化情况。众所周知，MOS 结构的电容由氧化层电容 C_i 和半导体电容 C_s 两部分串联组成。氧化层电容 C_i 与栅压无关，而半导体电容 C_s 则随栅压变化。由于文中采用的 MOS 电容样品的 Si 衬底为低掺杂，HfO₂ 栅介质厚度较薄，在保证栅氧不击穿的负栅压条件下，衬底表面很难形成反型层，载流子对频率的响应不显著，因此低频电压特性不显著。图 4 给出的是在频率为 100 kHz 时电容电压特性。从图中可以看出栅压为 -3 V 时，耗尽层宽度最大，电容值最小；随着栅压的增大，n 型 Si 衬底中的电子不断向衬底表面处输运形成积累层，半导体电容不断增大，在栅压为 3 V 时达到最大值，此时 MOS 电容主要为氧化层电容，且电容并未出现饱和，表明 n 型 Si 衬底未发生完全积累的情况。从 3 种栅极偏置条件辐照后电容-电压特性的变化来看，正偏辐照下，电容-电压斜率略有减小，与电流电压特性受辐照影响类似，是受到界面电荷的影响；零偏辐照下，栅压为 3 V 时，电容增大，表明栅氧介质中电荷数量增大；负偏辐照同时存在斜率降低和衬底积累时电容增大的现象，如电流电压特性一致，表明界面电荷和栅介质中的电荷数量均有增大。

图 5 给出了 3 种栅极偏置条件辐照后以及未辐照的 HfO₂ 栅介质 MOS 电容栅氧经时击穿电压特性。从图中可以看出，辐照后的 MOS 电容经时击穿电压明显减小，特别是栅极为正、负电压的情况。而对于未辐照的 MOS 电容，经时击穿电流随着应力电压的增大缓慢增大，直至测试电流超过 10^{-5} A 时，认为 HfO₂ 栅介质发生了击穿。从这一结果可以看出，辐照前 HfO₂ 栅介质中的缺陷分布较为均匀，随着应力时间的增加，俘获的电荷缓慢增多，隧穿电流缓慢增大。对于辐照后的器件，如上述对电流电压特性和电容电压特性的分析，正偏辐照导致界面电荷增大，零偏时栅介质中的电荷增大，以及负偏时 2 种电荷均增大，导致辐照后的 HfO₂ 栅介质在较低的栅压下，就会发生显著的电流隧穿，使经时击穿电压显著降低。并且辐照后栅电流在击穿前几乎不随栅极电压的变化而变化，表明在栅介质中，特别是靠近界面附近，氧化物缺陷已被辐照产生的载流子占据，增大了栅氧层与衬底

之间的势垒，当施加电应力时，沟道中的电子难以注入到氧化层中形成栅电流。

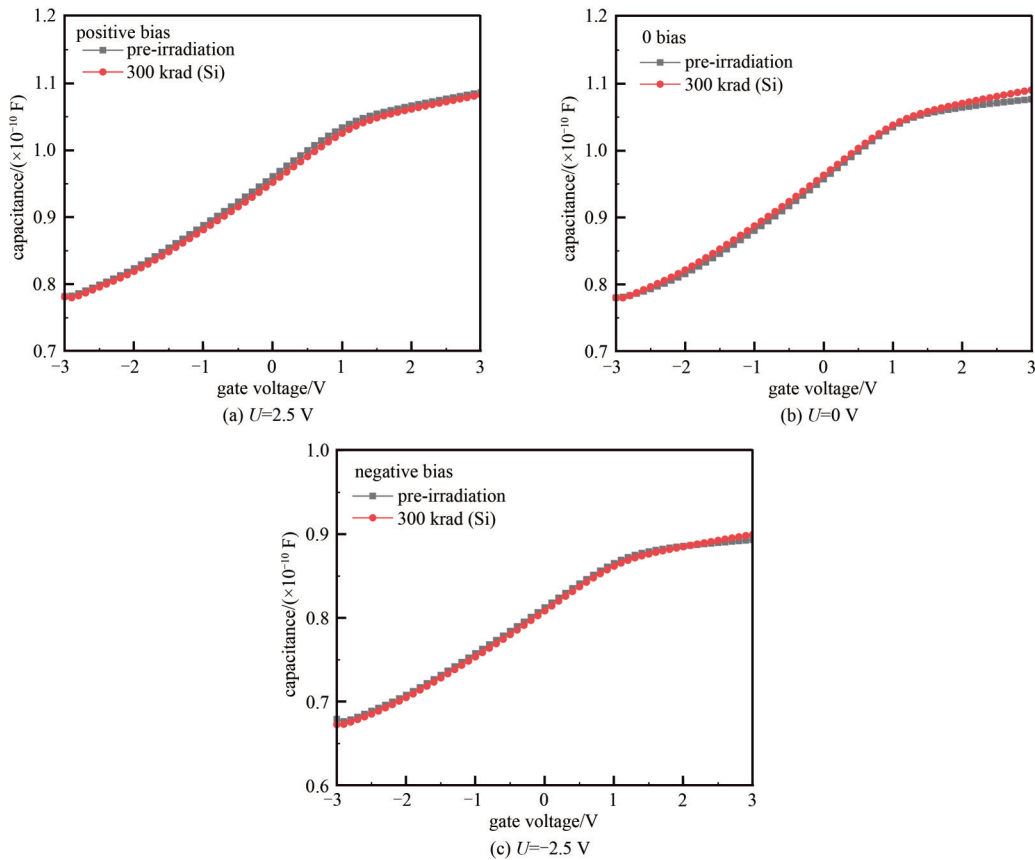


Fig.4 Gate capacitance of the HfO₂ MOS capacitor before and after 300 krad(Si) total dose irradiation under three kinds of bias
 图4 三种偏置条件下辐照前和300 krad(Si)总剂量辐照后HfO₂ MOS电容栅极电容的变化

正偏辐照和负偏辐照条件下，HfO₂栅介质与Si衬底界面电荷均呈现增大的特性，表明HfO₂的界面态具有多态性，既可以俘获空穴，也可以俘获电子。当施加正栅压的情况下，由于栅氧层中的电场作用，加速了栅氧层中空穴的运输，导致界面态增大，而氧化层中的辐射陷阱电荷并不显著。而在零偏辐照下，空穴的传输速度降低，被HfO₂栅介质中的施主型缺陷俘获，形成氧化层电荷，并且改变了栅介质的势垒分布，使Fowler–Nordheim隧穿概率增大。负偏辐照下，氧化层中的电子向衬底漂移，被HfO₂栅介质中的受主型缺陷俘获，一部分电子又逃逸出缺陷输运至界面处形成界面态，导致氧化层电荷和界面电荷均增大。HfO₂栅介质中同时存在施主和受主型缺陷，以及界面态的多态性是导致MOS电容电离总剂量辐射损伤的主要原因，且与传统的SiO₂栅介质不同。

3 结论

本文针对高 k 材料HfO₂制备的MOS电容，开展了辐照试验和经时击穿特性的测试，对比了辐照前后栅极电流、栅极与衬底之间的电容以及栅氧介质经时击穿电压的变化。从试验结果可以看出，辐照会导致MOS电容栅极电流增大、电容斜率减小、栅介质电容增大等现象，并显著影响栅介质经时击穿电压特性。辐照过程中，不同的栅极偏置条件产生的影响不同，正偏辐照下，主要引起界面态的增大，导致栅电流在较低的栅压下增大，电容电压特性的斜率降低；零偏辐照下，主要引起栅介质层中的电荷增大，导致在较大的正向栅压下，栅极电流增大，栅介质电容增大；负偏辐照下，界面电荷和栅介质电荷同时增大，导致以上损伤特性同时存在。本文

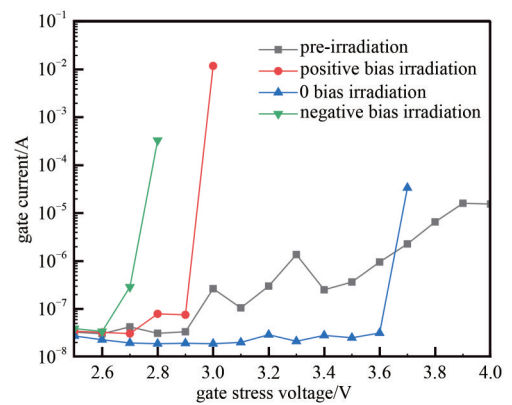


Fig.5 Time-dependent breakdown voltage characteristics of HfO₂ MOS capacitor before and after irradiation
 图5 辐照前后HfO₂ MOS电容经时击穿电压特性的变化

的研究结果表明,采用高 k 栅介质的纳米器件,其总剂量效应的损伤机制更加复杂,为了保障器件在辐射环境中的可靠性,需要对其进行更深入的研究分析。

参考文献:

- [1] FLEETWOOD D M. Evolution of total ionizing dose effects in MOS devices with Moore's law scaling[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017,65(8):1465-1481.
- [2] MANIKANTHABABU N,BASU T,VAJANDAR S,et al. Radiation tolerance,charge trapping and defect dynamics studies of ALD-grown Al/HfO₂/Si nMOSCAPs[J]. Journal of Materials Science:Materials in Electronics, 2020,31(4):3312-3322.
- [3] KAHRAMAN A,DEEVI S C,YILMAZ E. Influence of frequency and gamma irradiation on the electrical characteristics of Er₂O₃, Gd₂O₃,Yb₂O₃,and HfO₂ MOS-based devices[J]. Journal of Materials Science, 2020,55(81):7999-8040.
- [4] FLEETWOOD D M. Total-ionizing-dose effects,border traps,and 1/f noise in emerging MOS technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020,67(7):1216-1240.
- [5] LIU Zhongli. Development of nano scale CMOS integrated circuit and its radiation effects[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(6):953-960.
- [6] OLDHAM T R,MCLEAN F B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003,50(3):483-499.
- [7] SONG Zhaorui,CHENG Xinhong,ZHANG Enxia,et al. Influence of preparing process on total-dose radiation response of high- k Hf-based gate dielectrics[J]. Thin Solid Films, 2008,517(1):465-467.
- [8] ZHAO C Z,TAYLOR S,WERNER M,et al. High- k materials and their response to gamma-ray radiation[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2009,27(1):411-415.
- [9] HAO Yue, LIU Hongxia. Reliability and failure mechanism of micro nano MOS devices[M]. Beijing:Science Press, 2008.
- [10] PARK K, IM S, PARK K, et al. Reliability analysis framework for time-dependent dielectric breakdown[J]. Journal of Semiconductor Technology and Science, 2020,20(1):19-28.
- [11] SILVESTRI M,GERARDIN S,SCHRIMPF R D,et al. The role of irradiation bias on the time-dependent dielectric breakdown of 130 nm MOSFETs exposed to X-rays[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009,56(6):3244-3249.
- [12] MA T,YU X,CUI J,et al. Investigating the TDDB lifetime growth mechanism caused by proton irradiation in partially depleted SOI devices[J]. Microelectronics Reliability, 2018(81):112-116.

作者简介:

魏莹(1983-),女,博士,副研究员,主要研究方向为电子器件辐射效应.email:weiyang@ms.xjb.ac.cn.

崔江维(1983-),女,博士,研究员,主要研究方向为电子器件辐射效应.

蒲晓娟(1998-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为功率器件辐射效应.

崔旭(1996-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为纳米器件辐射效应.

梁晓雯(1992-),女,在读博士研究生,主要研究方向为功率器件辐射效应.

王嘉(1981-),男,学士,工程师,主要研究方向为辐照试验.

郭旗(1964-),男,学士,研究员,主要研究方向为电子器件辐射效应.