

月基极紫外相机光子计数成像探测器 Ge 膜的空间质子辐照稳定性

李云鹏¹, 陈波², 何玲平^{2,*}, 吕鹏³

- (1. 中国刑事警察学院 公安信息技术与情报学院, 沈阳 110854;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
3. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 光子计数成像探测器是月基极紫外相机等空间成像载荷的核心成像器件。Ge 膜作为探测器的电荷感应层, 在空间质子辐照环境下的稳定性直接影响系统的成像质量。采用 Monte-Carlo 法仿真了 500 nm Ge 膜被 10、50 和 100 keV 高能质子辐照后, Ge 膜内部的质子浓度分布与空位缺陷分布。仿真结果表明, 50 keV 质子在 Ge 膜内部产生的空位缺陷对膜层内部损伤最大。对 100、230、350 和 500 nm 厚度 Ge 膜分别进行 50 keV 质子辐照实验, 经方阻仪测试显示, 越厚的薄膜辐照后方阻变化越大, 500 nm 比 100 nm Ge 膜方阻增加量高约 500 MΩ/□。通过原子力显微镜 (AFM) 表征发现, 500 nm Ge 膜辐照后出现膜层凸起与分离, 均方根表面粗糙度由 1.63 nm 增至约 10 nm。研究结果表明, 在满足方阻要求的前提下, 通过对 Ge 膜厚度的合理设计, 可以有效减小高能质子辐照带来的损伤。

关键词: Ge 膜; 质子辐照; 方块电阻; 光子计数成像探测器; 极紫外相机; 空间环境适应性

中图分类号: TN304.11 文献标识码: A 文章编号: 1003-353X (2023) 06-0470-06

Space Proton Irradiation Stability of Ge Film for Photon Counting Imaging Detector of Lunar-Based Extreme Ultraviolet Camera

Li Yunpeng¹, Chen Bo², He Lingping^{2,*}, Lü Peng³

- (1. School of Public Security Information Technology and Intelligence, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110854, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Photon counting imaging detector is the core imaging device of space imaging payload such as lunar-based extreme ultraviolet camera. Ge film is used as the induced charge layer of the detector. The stability of the Ge film in the space proton irradiation environment directly affects the imaging quality of the system. The proton concentration distribution and vacancy defect distribution in the Ge film with the thickness of 500 nm irradiated by high energy protons of 10, 50 and 100 keV were simulated by using Monte-Carlo method. The simulation results show that the hole defects generated by 50 keV protons in the Ge film cause the greatest damage to the inside of the film. The 50 keV proton irradiation experiments of Ge films with different thicknesses of 100, 230, 350 and 500 nm were carried out. The square resistance meter test shows that the thicker the film, the greater the square resistance change after

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U1931118); 辽宁省应用基础研究计划资助项目 (2022JH2/101300144); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划资助项目 (RC220488); 公安理论及软科学研究计划项目 (RKX20201033)

irradiation. The square resistance increase of 500 nm Ge film is about $500 \text{ M}\Omega/\square$ higher than that of 100 nm Ge film. Atomic force microscope (AFM) images show that the 500 nm Ge film is bulged and separated after irradiation. The root mean square surface roughness of the film increases from 1.63 nm to about 10 nm. The results show that the damage caused by high-energy proton irradiation can be effectively reduced by reasonably designing the thickness of Ge film under the premise of meeting the square resistance requirements.

Keywords: Ge film; proton irradiation; square resistance; photon counting imaging detector; extreme ultraviolet camera; space environment adaptability

EEACC: 2520C

0 引言

太阳耀斑、日冕、磁层、极光等空间天气的变化对人类的生产、生活,以及国家安全、公共安全有着重大影响。因此,人类近年来对空间天气现象进行不断探索,越来越多的空间天气成像设备被发射到宇宙空间,对地球以及太阳星体周围的空间天气现象进行观测。我国对空间天气现象的观测也有条不紊地进行中。2013年,嫦娥三号所搭载的月基极紫外相机在 30.4 nm 极紫外波段对地球磁层中的等离子体层进行观测^[1]。2017年,风云三号 D 星所搭载的广角极光成像仪在 140~170 nm 远紫外波段对地球极光进行观测^[2-3]。先进天基太阳天文台是我国太阳物理学家自主提出的综合性太阳探测专用卫星,其上搭载了全日面矢量磁像仪、太阳硬 X 射线成像仪、莱曼阿尔法太阳望远镜,用于观测太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射现象^[4]。2022年,先进天基太阳天文台成功发射,实现了我国综合性太阳卫星探测零的突破^[5]。可以看到,上述空间天气观测的光学载荷大多采用极紫外-远紫外波段成像,这是因为该波段是空间天气的最佳观测波段。但极紫外-远紫外波段辐射较弱,一般感光器件无法感知这么弱的光信号。因此,在空间天气观测设备设计中,一般优先考虑具有低噪声、高灵敏度、高动态范围等优点的光子计数成像探测器^[6-7]作为感光器件。

月球表面等空间环境的强粒子辐照^[8]对卫星上的电子元器件有着诸多不利影响,强粒子辐照对航天器材料会产生原子位移作用与电离作用,可致使航天器寿命持续缩短乃至失效。目前对航天器性能影响较大的辐射效应有单粒子效应^[9]、总剂量效应^[10]和深层充放电效应^[11]。光子计数成像

探测器在轨运行中将受到空间中高能质子的辐照作用^[12],探测器中 Ge 膜被辐照后,高能质子会通过碰撞使 Ge 原子离开正常位置成为间隙原子,原来位置形成空位缺陷^[13],这种空位缺陷会导致 Ge 膜电学性能发生变化。Ge 膜是光子计数成像探测器的位敏阳极电荷感应层^[14-15],其方块电阻的变化会使成像电荷分布形状时间常数发生改变,导致成像分辨率等参数变化^[16],严重时甚至使成像失效^[17]。因此,极紫外相机系统设计中要求探测器感应电荷层在工作中方块电阻稳定可控。然而,Ge 膜属于半导体材料,其物理结构易受辐照影响而发生变化,且因其化学性质较为活泼,化学结构也易因辐照而发生变化^[13]。所以,对 Ge 膜进行辐照环境下的性能研究具有重要科学价值和现实意义。目前,国内外对 Ge 膜等半导体材料的辐照效应研究主要集中在太阳电池领域^[18],对光子计数成像探测器中感应电荷层 Ge 膜辐照效应研究甚少。

本文为提高光子计数成像探测器中 Ge 膜在轨运行的抗辐照能力,研究了通过控制 Ge 膜厚度减小高能质子辐照造成损伤的有效方法。采用 Monte-Carlo 法仿真了高能质子在 Ge 膜中传输后的沉积分布,以及造成的缺陷分布。在哈尔滨工业大学空间辐照环境模拟系统中进行了 50 keV 高能质子辐照实验。对辐照前后的 Ge 膜电学性能和微观形貌变化进行了表征,并总结了 Ge 膜抗辐照设计的作用机制。

1 样品制备与实验方法

1.1 样品制备

本文采用控制薄膜沉积厚度的方法对方阻进行控制。薄膜沉积采用磁控溅射镀膜法,镀膜机型号为 JGP600,Ge 靶材纯度 99.99%。样品基底选用表面粗糙度小于 0.8 nm 的石英基底。图 1 为直流

磁控溅射法制备的 Ge 膜样品。图 2 为不同厚度 Ge 膜刚沉积完成时的方阻。由于 Ge 化学性质较为活泼，Ge 膜沉积完成暴露在空气中之后，其方阻值会因 Ge 膜发生氧化而逐渐增加。本文采用方阻稳定后的 Ge 膜样品进行实验。

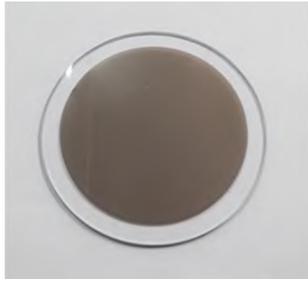


图 1 直流磁控溅射法制备的 Ge 膜样品

Fig. 1 Ge film sample prepared by DC magnetron sputtering method

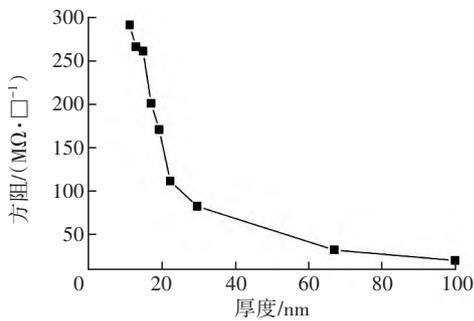


图 2 不同厚度 Ge 膜刚沉积完成时的方阻

Fig. 2 Square resistance of as-deposited Ge films with different thicknesses

1.2 辐照与测试实验方法

采用哈尔滨工业大学的空间环境地面模拟装置对 Ge 膜样品进行高能质子辐照实验。图 3 为空间环境综合模拟装置，该装置可模拟多种空间环境中高能粒子辐照环境。

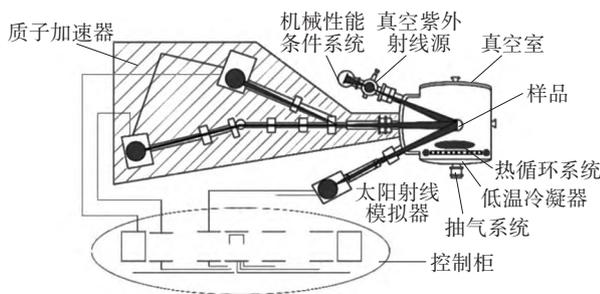


图 3 空间环境综合模拟装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the comprehensive simulation device for space environment

采用 Jandel 方阻仪对 Ge 膜方阻进行测量，如图 4 所示。测量压力为 20 N，多次测量取平均值。由于薄膜方阻受环境因素影响较大，测量时保证室温为 22 ℃。本文采用 Nanosurf Easyscan 2 型原子力显微镜 (AFM)，对辐照前后 Ge 膜表面形貌与均方根 (RMS) 表面粗糙度进行测量。其最大量程范围为 80 μm×80 μm，本文采样范围为 2 μm×2 μm~10 μm×10 μm，纵向分辨率为 0.05 nm。



图 4 Jandel RM3-AR 型方阻仪

Fig. 4 Jandel RM3-AR square resistance meter

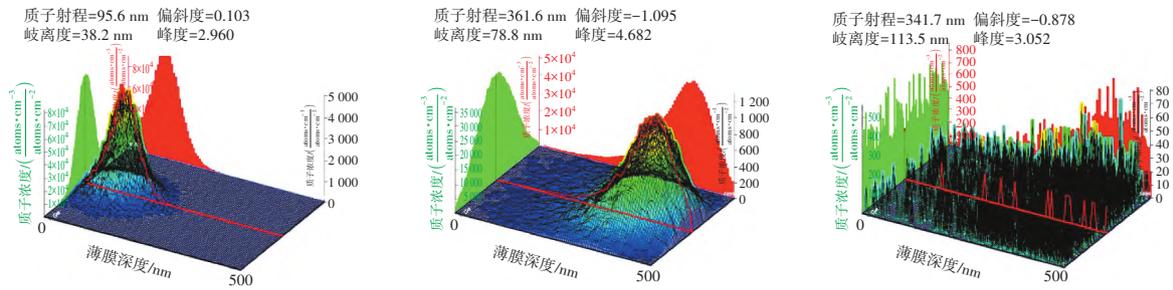
2 实验结果及分析

2.1 质子辐照模拟仿真

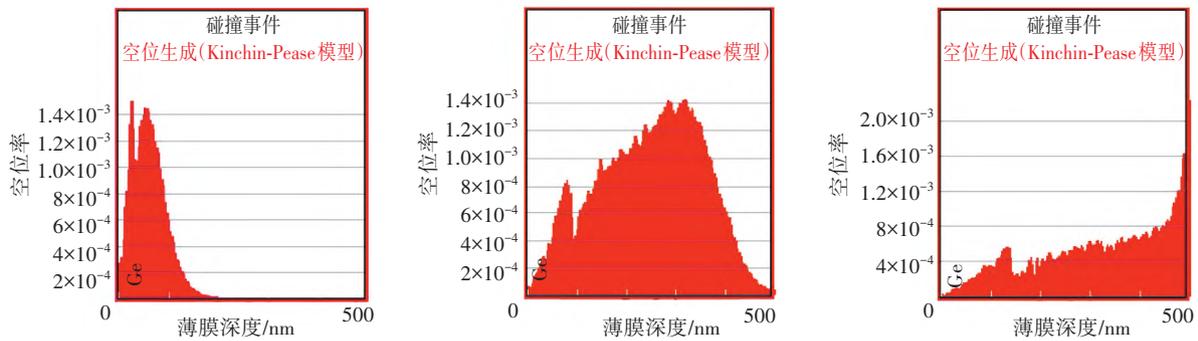
采用 SRIM 软件基于 Monte-Carlo 原理模拟了高能质子入射 Ge 膜后质子的能量损失与沉积分布等情况。质子能量选择 10、50 和 100 keV，入射质子数量为 99 999，Ge 膜厚度均为 500 nm。这三种能量质子注入 Ge 膜后的浓度分布如图 5 (a)、(b)、(c) 所示，质子辐照产生的空位缺陷分布如图 5 (d)、(e)、(f) 所示。与本文作者前期研究的 Mo/Si 多层膜的质子辐照模拟结果^[19]相似，Ge 膜高能质子辐照结果显示，能量越大，质子辐照对薄膜深层损伤越大，对浅层损伤越小。10 keV 高能质子入射产生的空位缺陷集中在膜层表面，深层并没有损伤，如图 5 (a) 和 (d) 所示；50 keV 高能质子造成的空位缺陷在整个膜层截面中以高斯形态分布，对膜层内部损伤最大，如图 5 (b) 和 (e) 所示；100 keV 高能质子在膜层内造成的空位缺陷分布较少，如图 5 (c) 和 (f) 所示，大部分沉积在样品的石英基底上。而且，由于石英材料对辐照响应较小，并没有对基底造成损伤，因此 100 keV 质子辐照对 500 nm 的 Ge 膜内部损伤较小。50 keV 高能质子辐照造成的空位缺陷损伤比 10 keV 和 100 keV 所造成的缺陷损伤都严重，如图

5 (d)、(e)、(f) 所示。可见，50 keV 能量的高能质子对 Ge 膜造成的空位缺陷贯穿整个膜层。因

此本文选择这一能量进行辐照实验，以对仿真结果进行验证。



(a) 10 keV 质子辐照 Ge 膜后质子浓度分布 (b) 50 keV 质子辐照 Ge 膜后质子浓度分布 (c) 100 keV 质子辐照 Ge 膜后质子浓度分布



(d) 10 keV 质子辐照后产生的空位缺陷分布 (e) 50 keV 质子辐照后产生的空位缺陷分布 (f) 100 keV 质子辐照后产生的空位缺陷分布

图 5 10、50 和 100 keV 质子辐照后 Ge 膜内质子浓度分布和空位缺陷分布

Fig. 5 Distribution of proton concentration and vacancy defects in the Ge film after 10, 50 and 100 keV proton irradiation

2.2 辐照前后电学性能变化

50 keV 质子辐照 Ge 膜实验在空间环境地面模拟设备中进行，如图 3 所示。实验参数设置如下：高能质子能量 50 keV，辐照剂量 $6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ，该剂量与月球表面 100 h 太阳风的质子辐照剂量相当^[20]。表 1 为 50 keV 辐照各厚度样品后方阻变化情况，图 6 为相应的柱状图。可以直观看到不同厚度 Ge 膜样品在辐照后方阻都有所增加。样品 A 与样品 B 属于较薄的样品，其受辐照后方阻分别增加 23 $\text{M}\Omega/\square$ 、21 $\text{M}\Omega/\square$ 。而随着薄膜厚度的增加，样品 C 方阻从 10 $\text{M}\Omega/\square$ 增加至 88 $\text{M}\Omega/\square$ ，样品 D 方阻从 3 $\text{M}\Omega/\square$ 增加至 516 $\text{M}\Omega/\square$ 。可见较厚的薄膜内部受辐照损伤更严重，导致辐照后方阻增加显著。该现象产生的机理可由质子辐照模拟仿真结果进行解释。图 5 (b) 和 (e) 为 50 keV 质子入射 Ge 膜产生的质子浓度分布和空位缺陷分布。当薄膜较薄（如 100 nm）时，大部分粒子贯穿薄膜被基底吸收，薄膜产生的

空位缺陷较少。随着薄膜厚度增加，薄膜内部产生的缺陷越多，薄膜内部损伤越大。因此，上述研究结果表明：在满足方阻要求的前提下，通过对 Ge 膜厚度的合理设计，可以有效减小高能质子辐照带来的损伤。

表 1 经 50 keV 质子辐照前后不同厚度 Ge 膜的方阻值

Tab. 1 Square resistance values of Ge films with different thicknesses before and after 50 keV proton irradiation

样品	厚度/nm	方阻/($\text{M}\Omega \cdot \square^{-1}$)		
		辐照前	辐照后	增加量
A	100	160	183	23
B	230	32	53	21
C	350	10	88	78
D	500	3	516	513

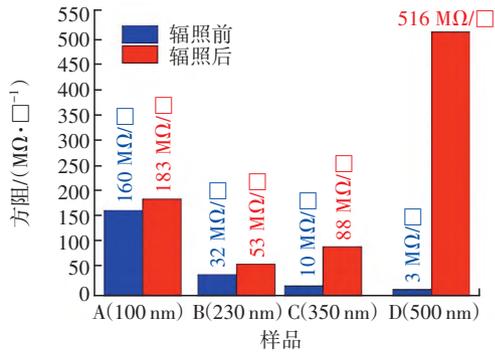


图 6 经 50 keV 质子辐照前后不同厚度 Ge 膜的方阻变化柱状图

Fig. 6 Histogram of square resistance variation of Ge films with different thicknesses before and after 50 keV proton irradiation

2.3 辐照前后微观形貌变化

厚度为 500 nm 的 Ge 膜经过 50 keV 辐照后，方阻变化最大，其微观形貌变化亦非常明显。本文对 50 keV 辐照前后的 500 nm Ge 膜样品表面形貌进行了 AFM 微观形貌表征。图 7 (a) 为辐照前的 500 nm Ge 薄膜样品，表面平整光滑，膜层均匀分布，初始 RMS 表面粗糙度仅为 1.63 nm。辐照后该样品表面粗糙度显著增加，如图 7 (b)、(c)、(d) 为辐照后该样品的 3 个不同区域 AFM 测试结果，RMS 表面粗糙度分别为 10.55、6.26 和 9.98 nm。Ge 膜样品辐照后不同区域表面形貌变化

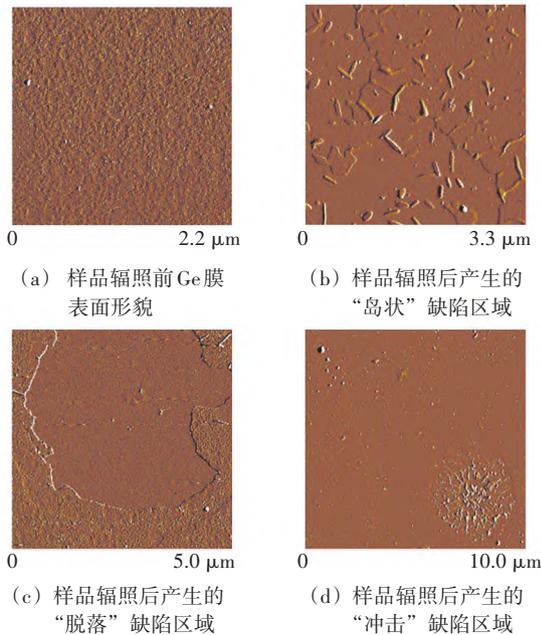


图 7 500 nm Ge 膜样品辐照前后表面形貌对比

Fig. 7 Comparison of surface morphology of the 500 nm Ge film sample before and after irradiation

也不相同。如图 7 (b) 所示，膜层表面出现条索状凸起，膜层形成不同程度的剥离，呈现分割的“岛状”结构。这种现象形成的机制是由于辐照过程中薄膜材料内部产生位移损伤和孔洞缺陷，造成薄膜宏观膨胀，使材料机械性能降低。辐照损伤严重的区域形成大面积薄膜脱落，如图 7 (c) 所示。图 7 (d) 中显示，部分区域形成明显的“冲击”缺陷，这是由于薄膜结构塌陷，形成了环岛形突起。

“岛状”、“脱落”、“冲击”等辐照产生的缺陷是高能质子注入 Ge 膜后造成的。高能质子注入 Ge 膜内部后俘获电子形成 H 原子，H 原子在薄膜内部空位处不断聚集形成气泡核，气泡核在辐照中持续聚集，当气泡压力大于薄膜和基底结合力时，就造成薄膜的脱落；当气泡压力大于薄层表面张力时就发生薄膜破裂。Ge 膜作为感应电荷层在此时已经失效。极紫外相机在轨运行时，虽然在机械结构的保护下受如此大的能量辐照的可能性较小，但一旦被高能质子辐照，可能会造成 Ge 膜器件失效。因此，在设计时对 Ge 膜厚度进行合理选择，是减小高能质子辐照造成器件损伤的有效方法。

3 结论

本文从理论模拟、电学性能测试、微观形貌表征三方面对 Ge 膜的抗辐照能力进行了深入研究。采用 Monte-Carlo 方法模拟仿真了不同能量质子注入 Ge 膜后的质子浓度与缺陷分布情况，仿真表明 50 keV 能量高能质子产生的空位缺陷对膜层内部损伤最大。在空间环境地面模拟设备中，对 100、230、350 和 500 nm 厚度 Ge 膜的样品分别进行 50 keV 高能质子辐照，实验显示越厚的薄膜经辐照后方阻变化越大，500 nm 比 100 nm Ge 膜方阻增加量高约 500 MΩ/□。采用 AFM 对辐照前后 500 nm Ge 膜微观形貌进行了表征，辐照后的 Ge 膜不同区域分别出现了“岛状”、“脱落”、“冲击”等辐照缺陷，粗糙度大幅增加，薄膜功能失效。本文研究了高能质子在 Ge 膜中的运输规律，研究表明通过对感应电荷层 Ge 膜厚度的合理设计，可以有效减小高能质子辐照带来的损伤。该工作可为探测器抗辐照设计提供参考，提高器件寿命，使航天器长期有效地工作。

参考文献:

- [1] CHEN B, SONG K F, LI Z H, et al. Development and calibration of the Moon-based EUV camera for Chang'e-3 [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14 (12): 1654-1663.
- [2] ZHANG X X, CHEN B, HE F, et al. Wide-field auroral imager onboard the Fengyun satellite [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8 (1): 47-1-47-12.
- [3] DING G X, LI J W, ZHANG X X, et al. Wide-field aurora imager onboard Fengyun satellite: data products and validation [J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, 5 (1): 73-78.
- [4] FENG L, GAN W Q, LIU S Q, et al. Space weather related to solar eruptions with the ASO-S mission [J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8: 45-1-45-11.
- [5] 先进天基太阳天文台介绍 [EB/OL]. [2023-01-20]. <http://aso-s.pmo.ac.cn/chinese/index/introduce.jsp>.
- [6] 张宏吉, 何玲平, 王海峰, 等. 远紫外光子计数成像探测器检测方法与分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55 (6): 060401-1-060401-7.
- [7] LIU Y A, XU N, SHI F, et al. MCP gain and its influence on ultraviolet photon counting imaging detectors [C] // *Proceedings of the 5th Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application*. Xi'an, China, 2019: 1102318-1-1102318-6.
- [8] 王赤, 李磊, 张爱兵, 等. 月表太阳风和粒子辐射环境——“嫦娥四号”观测新结果 [J]. *深空探测学报 (中英文)*, 2022, 9 (3): 239-249.
- [9] 吴驰, 毕津顺, 滕瑞, 等. 复杂数字电路中的单粒子效应建模综述 [J]. *微电子学*, 2016, 46 (1): 117-123.
- [10] PERSHENKOV V S, PETROV A S, BAKERENKOV A S, et al. True dose rate physical mechanism of ELDRS effect in bipolar devices [J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 76/77: 703-707.
- [11] FAN S, HU Z Y, ZHANG Z X, et al. Total ionizing dose induced single transistor latchup in 130-nm PDSOI input/output NMOSFETs [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26 (3): 036103-1-036103-7.
- [12] 韩建伟, 陈睿, 李宏伟, 等. 单粒子效应及充放电效应诱发航天器故障的甄别与机理探讨 [J]. *航天器环境工程*, 2021, 38 (3): 344-350.
- [13] 吕鹏. 荷电粒子束辐照作用下若干光学器件及半导体材料的微观结构和性能 [D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- [14] 尼启良. 极紫外微通道板光子计数成像探测器性能研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33 (11): 1104001-1-1104001-5.
- [15] XU N, LIU Y A, SHENG L Z, et al. Novel electronic readout system for micro-channel plate detector with wedge and strip anode [J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66 (4/5/6): 697-701.
- [16] 李云鹏, 郑鑫, 张宏吉, 等. Ge 薄膜性能及其在光子计数成像探测器中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22 (5): 1143-1149.
- [17] 何玲平, 岳巾英, 张宏吉, 等. 基于电容分割的光子计数成像探测器读出阳极优化设计及仿真 [J]. *中国光学*, 2019, 12 (6): 1303-1310.
- [18] 李俊炜, 王祖军, 石成英, 等. GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池不同能量质子辐照损伤模拟 [J]. *物理学报*, 2020, 69 (9): 295-305.
- [19] 李云鹏. 空间环境 Mo/Si 多层膜与 Ge 膜稳定性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [20] SAMWEL S W, EL-AZIZ E A, GARRETT H B, et al. Space radiation impact on smallsats during maximum and minimum solar activity [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64 (1): 239-251.

(收稿日期: 2023-02-03)

作者简介:

李云鹏 (1988—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 副教授, 研究方向为短波光学薄膜技术;



何玲平 (1982—), 男, 江西新余人, 博士, 研究员, 研究方向为短波光学空间仪器研制、光子计数成像探测技术等。