光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250414002

HgCdTe红外焦平面质子位移损伤效应研究

雷雨涵[1,3,4,5]，王锦春[2]，周　东[1,3,4*]，王　斌[1,3,4,5]，
李豫东[1,3,4]，文　林[1,3,4]，郭　旗[1,3,4]

（1. 中国科学院 新疆理化技术研究所，乌鲁木齐 830011；2. 红外探测器技术航空科技重点实验室，河南 洛阳 471099；
3. 特殊环境条件功能材料与器件全国重点实验室，乌鲁木齐 830011；4. 新疆极端环境电子学重点实验室，乌鲁木齐 830011；5. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 针对红外探测器在空间应用中受高能粒子辐照导致性能衰退的问题，利用质子辐照实验，开展了位移损伤对HgCdTe红外焦平面关键参数影响的研究。通过对比辐照前后红外焦平面的性能变化，结合半导体辐射效应理论，分析了位移损伤对HgCdTe红外焦平面特性的影响机制。结果表明，HgCdTe红外焦平面经过质子辐照实验后，暗电流、噪声和盲元数量均有增大，且增幅随辐照注量的增加而增大。该工作可为深入开展HgCdTe红外探测器辐射损伤效应及损伤机理提供重要参考。

关键词： 碲镉汞；红外焦平面；质子辐照；位移损伤；退火效应

中图分类号： TN432　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0597－05

Investigation of the Displacement Damage Effects in HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays Induced by Proton Radiation

LEI Yuhan[1,3,4,5], WANG Jinchun[2], ZHOU Dong[1,3,4], WANG Bin[1,3,4,5],
LI Yudong[1,3,4], WEN Lin[1,3,4], GUO Qi[1,3,4]

(1. Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, CHN; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471099, CHN; 3. State Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environmental Conditions, Urumqi 830011, CHN; 4. Xinjiang Key Laboratory of Extreme Environment Electronics, Urumqi 830011, CHN; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: To address the issue of performance degradation in infrared detectors caused by high-energy particle irradiation in space applications, this study investigates the effects of displacement damage on key parameters of HgCdTe infrared focal plane arrays through proton irradiation experiments. By comparing the performance of the focal plane before and after irradiation and applying semiconductor radiation effect theory, the mechanisms by which displacement damage affects the characteristics of HgCdTe infrared focal planes are analyzed. The results indicate that proton irradiation leads to increased dark current, noise, and number of blind elements, with the extent of degradation proportional to the radiation fluence. These findings offer a helpful reference for future research on the radiation effects in HgCdTe infrared detectors.

收稿日期：2025－04－14.

基金项目：航空科学基金项目（ASFC-202200240Z8001）；新疆维吾尔自治区“天山英才”项目（2024TSYCCX0084）；中国科学院青年创新促进会项目（2021437）；中国科学院重点部署基础科研项目（JCPYJJ-22011）.

*通信作者：周　东

Key words: HgCdTe; infrared focal plane array; proton radiation; displacement damage; annealing effect

0 引 言

红外探测器凭借其在环境适应性、隐蔽性、探测范围、体积及功耗方面的优势，已在各类空间飞行器中得到广泛应用。无论是空间预警卫星、侦察卫星，遥感及资源探测卫星，均将其列为关键载荷并提出明确需求。$Hg_{1-x}Cd_xTe$材料是由负禁带宽度的HgTe和正禁带宽度的CdTe混合而成的赝二元化合物材料，通过调节材料中Cd的组分x，可以实现$Hg_{1-x}Cd_xTe$材料的禁带宽度在0～1.6 eV之间连续变化，光谱响应范围可覆盖可见光，红外短波、中波、长波及至甚长波段。凭借该特性，HgCdTe是制备红外探测器的理想材料，并在空间光电探测系统中占据重要地位[1]。

在空间辐射环境中，HgCdTe红外探测器受高能粒子辐照，引发噪声水平升高、暗电流增大及探测率下降等，甚至造成器件功能失效，从而影响整个空间光电探测系统的精确性和可靠性[2-3]。由于光电成像器件中电荷的产生和收集过程是由少数载流子占主导作用，空间高能粒子辐射导致的位移损伤将是红外探测器空间辐射损伤的主要来源[4-6]。因此，迫切需要在地面采用辐照源模拟空间辐射环境高能粒子的辐射作用，通过辐照实验研究红外探测器的位移损伤效应，分析辐照感生缺陷的机制，从而揭示红外探测器的位移损伤机理。在位移损伤效应方面，Hello等[7]针对Raytheon公司生产的红外焦平面器件开展辐射效应研究，辐照实验中的质子能量为60 MeV，质子束斑直径为80 mm，辐照温度为180 K，测试参数包括暗电流、线性度、噪声等，经过测试发现，只有暗电流发生了显著变化，其他参数均不受影响。Hubbs等[8]分别利用7，12和63 MeV能量的质子束对长波HgCdTe红外探测器开展了辐照实验，利用非电离能损来估算HgCdTe红外探测器在质子辐照环境下响应率和暗电流等性能的退化情况。研究结果表明当入射质子的非电离能损导致原子移出晶格位置形成永久的电学缺陷，将形成位移损伤，导致暗电流增大、响应率减小、均匀性退化。Johnson等[9]针对应用于哈勃望远镜WFC3系统中的短波HgCdTe红外探测器开展了质子辐射效应的研究。研究发现，在液氮温度下，经过注量为1×10^{15} p/cm^{2}的质子辐照后，探测器出现盲元，并且暗电流急剧增大，辐照实验结束后，随着温度升高至200 K，盲元数量减少，暗电流恢复至辐照前初始值水平。Weber等[10]在55 K温度环境中利用55 MeV的质子对长波HgCdTe红外焦平面开展了辐射效应研究，研究发现经过辐照后器件暗电流增大，同时出现大量热像素，经过2个月室温退火后，暗电流基本恢复，同时热像素数量急剧减少，经过168 h，70℃退火后，器件性能恢复至初始状态。在位移损伤效应研究获得一系列成果后，英国萨里大学提出光电成像器件质子位移效应实验方法的指导意见[11]，明确提出HgCdTe红外探测器在室温状态下经过质子辐照后的性能衰退情况明显小于低温状态辐照，因此HgCdTe红外探测器位移损伤效应的研究必须在低温环境下进行。通过国外研究报道可以发现，高能粒子辐照HgCdTe红外探测器引起的位移损伤将导致器件性能明显衰退，并且随着温度的升高，器件性能将有所恢复。但是在这些研究中并未针对HgCdTe红外探测器不同温度下的位移损伤进行详细介绍，器件性能随温度升高而恢复的情况也只是针对器件的宏观电参数层面，并未对HgCdTe红外材料内部的微观参数展开分析，也没有对器件内部缺陷的产生、输运及复合过程开展研究。

国内主要有中国科学院上海技术物理研究所、中国电子科技集团11所和中国兵器集团211所等单位对红外探测器进行研制，并获得其在不同领域的应用成果[11-12]。上述单位在器件研制过程中也相继开展了器件辐射机理方面的研究，如利用γ射线辐照对中波HgCdTe光电导器件性能的影响[13]、质子辐照对HgCdTe光电二极管的性能影响[14]、γ射线辐照短波HgCdTe光伏器件的导纳谱的研究[15-16]、电子辐照对中波HgCdTe光电导器件[17]和短波HgCdTe光伏器件[18]性能的影响等。研究发现，辐照效应主要表现为：一方面，高能粒子在材料中引入大量缺陷，形成材料损伤；另一方面，在辐照环境下，缺陷能级发生位移，如Hg空位受主能级发生移动，形成深能级，并使其俘获面增加近一个数量级，而缺陷密度基本保持不变。这种能级变化最终导致器件探测率的下降。中科院新疆理化所与

中科院上海技术物理所合作开展了室温下HgCdTe红外材料和红外探测器电子和质子辐射效应研究。研究发现，经过室温辐照后，红外材料的透射光谱出现小幅退化，但是暗电流及响应率并未产生明显变化。总体来说，红外器件位移损伤方面的研究没有形成成熟的辐照实验方法，对其损伤机理的理解并不全面，同时在位移损伤效应的研究过程中没有针对器件的辐照温度以及退火过程开展研究。

本文针对空间用HgCdTe红外焦平面开展位移损伤效应研究，通过质子辐照试验，分析HgCdTe红外焦平面关键性能参数的退化规律，结合不同温度下的退火试验，揭示HgCdTe红外焦平面质子位移损伤效应失效机理，为建立红外焦平面抗辐射加固技术及试验评估方法提供支撑。

1　试验内容

1.1　器件信息

试验样品采用中国科学院上海技术物理所研制的短波512×1线列HgCdTe红外焦平面，针对其暗电流I_d、噪声V_n和盲元等关键参数，研究了质子位移损伤效应及其退火规律。

1.2　辐照试验与测试方法

辐照试验选择中国原子能研究院的H-13串列加速器为辐照源，质子能量为22 MeV，注量率为1.5×10^7 p/($cm^2\cdot s^{-1}$)，注量点选择1×10^9 p/cm^2和5×10^9 p/cm^2，辐照环境为大气环境，辐照试验环境如图1所示。在辐照过程中，利用制冷杜瓦灌装液氮的方式保证器件处于液氮温度(77 K)，并覆盖冷屏保证器件暗场环境，在线采集器件的暗场图像，每到一个注量点，停止辐照并采集暗场图像。在暗场图像采集过程中，选择五种积分时间：1，100，1 000，2 000和5 000 μs，每个积分时间采集若干图像，利用图像处理程序计算该积分时间下的暗信号、噪声及盲元数量。测试完成后，继续辐照直至试验结束。

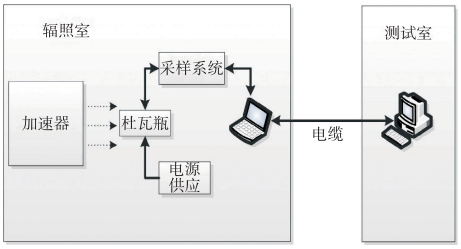


图1　辐照试验环境示意图

辐照试验结束后，对器件进行退火试验，退火温度保持77 K，与辐照温度相同。根据文献[19]报道，硅基器件在辐照结束后存在短时退火的现象。因此，在退火过程中，器件保持液氮温度，每过1 h，在五种积分时间下采集测量一次器件的暗场图像。测量完成后，继续在液氮温度下退火，由于试验条件及时间的限制，本次退火试验共进行了4轮，获得了器件在液氮温度下的退火情况。低温退火结束后，将器件温度恢复至室温，保持24 h，灌装液氮，测量器件经过室温退火后的性能变化情况。

2　试验结果及讨论

图2和3分别为暗电流和噪声随质子辐照注量的变化情况。从图中可以看出，随着辐照注量的增大，器件的暗电流和噪声随之增大，同时，器件的盲元数量也随注量的增大而增多，如表1所示。

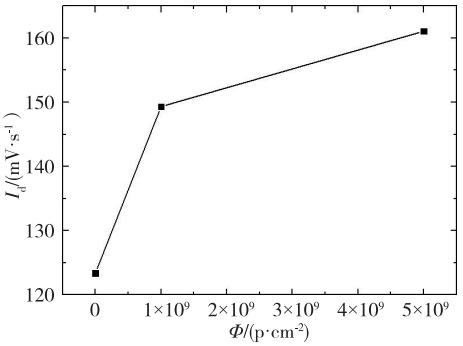


图2　暗电流随辐照注量的变化趋势

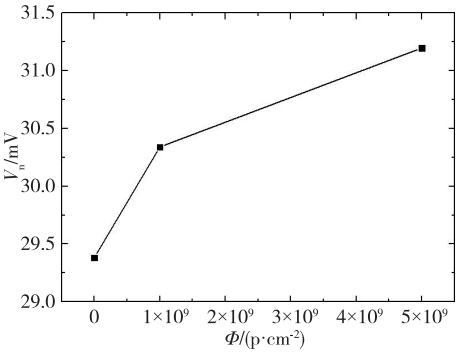


图3　噪声随辐照注量的变化趋势

表1　盲元数量随辐照注量的变化

Φ/(p/cm^2)	0	1×10^9	5×10^9
盲元数量	128	316	320

退火结果如图4～7，从图中可知，器件在辐照试验结束后，存在短时退火的现象，经过4 h的低温退火后，暗电流和噪声有小幅度的恢复，但未恢复至器件的初始状态。经过2 h的室温退火后，暗电

流和噪声继续恢复，由于退火时间较短，暗电流和噪声经过室温退火后均未恢复至初始状态。

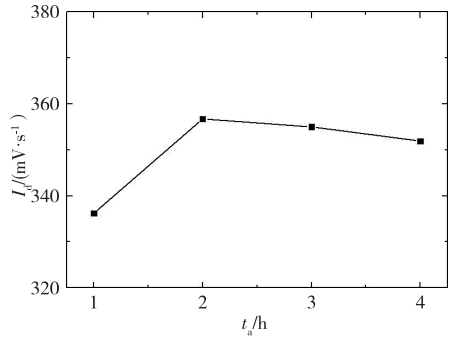


图4 暗电流在77 K的退火情况

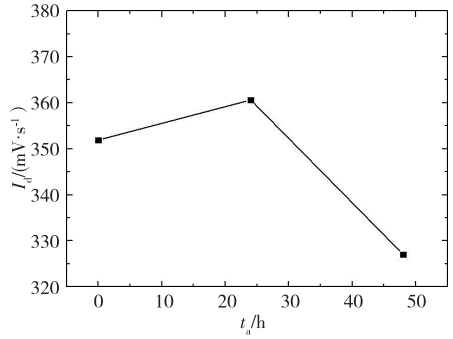


图5 暗电流在室温的退火情况

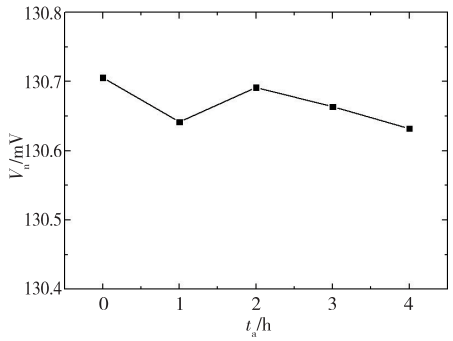


图6 噪声在77 K的退火情况

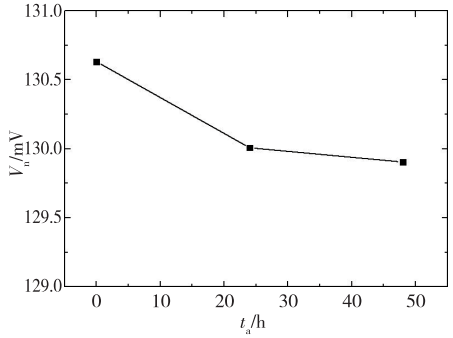


图7 噪声在室温的退火情况

表2中列出盲元数量随退火温度及退火时间的变化情况。可以看出，器件在经过低温退火后，盲元数量大幅减少，恢复至初始状态。

表2 盲元数量随退火时间的变化情况

退火温度	POST	77 K				室温	
退火时间	0 h	1 h	2 h	3 h	4 h	24 h	48 h
盲元数量	320	128	128	128	128	128	128

当质子辐照注量为1×10^9 p/cm^{2}时，暗电流由初始值123 μA增至149 μA，增幅为21.1%；噪声均方根值由29.4 mV升至30.3 mV；盲元数量从辐照前的128个增至316个。当质子辐照注量增加至5×10^9 p/cm^{2}时，暗电流进一步增至161 μA，增幅30.9%；噪声均方根值升至31.2 mV，盲元数量增至320个。HgCdTe红外焦平面受到质子辐照后，可能导致电离损伤和位移损伤。两种不同损伤机制，解释了质子辐射引起的探测器阵列性能退化。

当电离损伤发生在质子入射探测器材料时，质子失去其动能使材料原子电离，产生大量电子-空穴对。产生额外电子-空穴对将被钝化层或界面陷阱俘获，这种额外电荷可能导致平带电压偏移并增加表面泄漏电流，引起暗电流增加。在较低器件温度下，电离损伤通常更明显，其中在钝化层中产生的电荷移动性较小，并且倾向于在较高温度下退火。因此，电离损伤主要受表面钝化层的影响，并且钝化层厚度、质量或类型的改变可减少这种影响。

位移损伤效应是入射质子与原子核弹性散射和非弹性散射导致的非电离能量损失的结果，入射质子与原子核的散射过程足以将原子从其晶格位置撞击出，并产生空位-间隙对、反位点和缺陷复合物。结合HgCdTe能带特性，质子辐照导致的位移损伤在材料中形成如Hg空位、Te间隙等缺陷，这些缺陷在禁带中引入深能级陷阱中心。深能级陷阱增加载流子的非辐射复合率，并显著缩短少数载流子寿命，从而导致暗电流增大。此外，缺陷密度的上升加剧载流子散射，表现为噪声水平提升。在退火过程中，低温（77 K）条件下，部分浅能级缺陷（如Hg间隙原子）通过局域热振动迁移至晶格空位，减少陷阱密度，因此暗电流和噪声出现小幅恢复；而当室温退火时，热激活能较高的缺陷（如Te间隙或复合缺陷）逐渐湮灭，进一步恢复材料电学性能。

3 结论

本研究分析质子辐照对HgCdTe红外焦平面性能参数的影响，通过质子辐照和不同温度下的退火试验，获得HgCdTe红外焦平面关键性能参数的退化规律。结果表明，HgCdTe红外焦平面经质子辐

照实验后，暗电流、噪声和盲元数量均增大，增幅随辐照注量的增加而增大。低温退火后，暗电流和噪声有小幅度的恢复，盲元数量大幅减少，恢复至初始状态。室温退火后，暗电流和噪声继续恢复，但均未恢复至初始状态。分析原因为质子在探测器材料中导致电离损伤和位移损伤。电离损伤在探测器钝化层中引入额外电荷，引起表面泄露电流的增加，导致探测器暗电流增加。位移损伤在探测器材料中引入缺陷，使少子寿命减小，导致探测器暗电流和噪声增加。该工作可为深入开展HgCdTe红外探测器辐射损伤效应及损伤机理提供重要参考。

参考文献：

[1] Lawson W D, Nielsen S, Putley E H, et al. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1959, 9(3/4): 325-329.

[2] Smith E C, Rauscher B J, Alexander D, et al. JWST near infrared detectors: latest test results[J]. Proc. SPIE, 2009: 741907.

[3] Rauscher B J, Alexander D, Brambora C K, et al. Detector arrays for the James Webb space telescope near-infrared spectrograph[J]. Proc. SPIE, 2007, 6690: 66900M.

[4] Pickel J C, Kalma A H, Hopkinson G R, et al. Radiation effects on photonic imagers-a historical perspective[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 671-688.

[5] Marshall C J, Marshall P W. Proton Effects and Test Issues for Satellite Designers[M]. Asheville: BiblioGov, 1999.

[6] Srour J R, Marshall C J, Marshall P W. Review of displacement damage effects in silicon devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 653-670.

[7] Hello Y, Parisot J, Barde S, et al. Scientific Detectors for Astronomy[M]. Dordrecht: Springer, 2004.

[8] Hubbs J E, Marshall P W, Marshall C J, et al. Lateral diffusion length changes in HgCdTe detectors in a proton environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2435-2443.

[9] Johnson S D, Waczynski A, Marshall P W, et al. Radiation effects in WFC3 IR detectors[J]. Proc. SPIE, 2004, 3167: 24.

[10] Weber A, Belzner W, Haas L D, et al. Radiation hardness of two-dimensional focal plane detector arrays for LWIR/VLWIR space sounding missions[C]//2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2011: 336-339.

[11] 王　仍，焦翠灵，徐国庆，等. Au掺杂碲镉汞气相外延生长及电学性能[J]. 红外与毫米波学报，2015，34(4)：432-436.
Wang Reng, Jiao Cuiling, Xu Guoqing, et al. Growth of Au-doped $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epitaxial crystals and its Raman spectrum[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(4): 432-436.

[12] 袁　媛，岳冬青，刘晓磊. 线列TDI型红外焦平面读出电路低功耗设计[J]. 激光与红外，2015，45(12)：1488-1492.
Yuan Yuan, Yue Dongqing, Liu Xiaolei. Design of low-power ROIC of line TDI IRFPA[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1488-1492.

[13] 胡新文，李向阳，陆慧庆，等. γ射线辐照对中波HgCdTe光导器件性能的影响[J]. 红外与激光工程，1998，27(6)：48-51.
Hu Xinwen, Li Xiangyang, Lu Huiqing, et al. Effects of gamma irradiation on performance of MWIR HgCdTe photoconductive device[J]. Infrared and Laser Engineering, 1998, 27(6): 48-51.

[14] 胡新文，李向阳，赵　军，等. 质子辐照制备HgCdTe光电二极管的性能研究[J]. 功能材料与器件学报，1999，5(2)：127-131.
Hu Xinwen, Li Xiangyang, Zhao Jun, et al. Performance of HgCdTe photodiodes produced by proton irradiation[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 1999, 5(2): 127-131.

[15] Hu X, Li X, Lu H, et al. Effect of gamma irradiation on room-temperature SWIR HgCdTe photodiodes[J]. Proc. SPIE, 1998, 3553: 85-89.

[16] Hu X, Zhu K X, Li X, et al. Influence of gamma irradiation on the performance of HgCdTe photovoltaic devices[J]. Proc. SPIE, 1999, 3698: 920.

[17] 乔　辉，贾　嘉，陈新禹，等. 1 MeV电子辐照对碲镉汞中波光导器件的影响[J]. 红外与毫米波学报，2004，23(3)：172-175.
Qiao Hui, Jia Jia, Chen Xinyu, et al. Influence of 1 MeV electron irradiation on HgCdTe photoconductvie detectors[J]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 2004, 23(3): 172-175.

[18] 黄杨程，乔　辉，贾　嘉，等. 1 MeV电子辐照对短波$Hg_{1-x}Cd_xTe$光伏探测器的影响[J]. 强激光与粒子束，2005，17(1)：25-28.
Huang Yangcheng, Qiao Hui, Jia Jia, et al. Influence of 1 MeV electron irradiation on HgCdTe photovoltaic detectors[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(1): 25-28.

[19] Nimo L, Cassani M V, Salomone L S, et al. A study of pulsed-charging methods for floating gate MOSFETs designed for radiation measurements[C]//2024 Argentine Conference on Electronics, 2024: 80-85.

作者简介：

雷雨涵（2000—），女，陕西省西安市人，硕士研究生，研究方向为红外探测器、读出电路辐射效应；

周　东（1986—），男，河南省镇平县人，研究员，研究方向为半导体材料与器件辐射效应。