动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251028002

CCD抗辐射加固技术研究进展

王祖军[1*]，蒋镕羽[2]，王盆生[1]，陈明雷[3]，杨　鑫[2]，李传洲[2]

（1. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室，西安 710024；2. 湘潭大学 材料科学与工程学院，湖南 湘潭 411105；3. 兰州大学 材料与能源学院，兰州 730000）

摘　要： 电荷耦合器件（CCD）在探测和成像领域应用广泛，然而其在辐射环境中应用时会遭受辐照损伤的影响。为提升CCD抗辐射性能，国内外已开展大量的抗辐射加固技术研究。文章主要从信号转移沟道设计、栅氧工艺设计、栅极工艺设计、片上放大器及读出电路抗辐射加固设计等方面综述了CCD在工艺结构方面的抗辐射加固技术研究进展；从多相钳位工作模式、电荷注入工作模式、低温工作模式、时钟驱动优化工作模式等方面综述了CCD在工作模式方面的抗辐射加固技术研究进展；此外，还介绍了CCD从图像校正、辐射屏蔽等方面的抗辐射加固技术研究进展。相关研究为开展CCD抗辐射加固设计提供了实验依据和理论基础。

关键词： 电荷耦合器件；抗辐射加固；辐照损伤效应；辐射敏感参数

中图分类号： TN386.5；O605　**文章编号：** 1001－5868（2026）01－0001－12

Research Progress of Radiation Hardening Technology Based on Charge-Coupled Devices

WANG Zujun[1], JIANG Rongyu[2], WANG Pensheng[1], CHEN Minglei[3], YANG Xin[2], LI Chuangzhou[2]

(1. National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, CHN; 2. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, CHN; 3. School of Materials and Energy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, CHN)

Abstract: Charge-coupled devices (CCDs) are widely used in detection and imaging applications. However, their application in radiation environments is affected by radiation damage. To improve the radiation hardening performance of CCD, numerous studies on radiation hardening technology have been conducted worldwide. In this paper, the research progress of the radiation hardening technology of CCDs in the working mode is reviewed in terms of signal transfer channel design, gate oxygen process design, gate electrode process design, on-chip amplifier, and read-out circuit radiation hardening design. In addition, the operating modes of the multipinned phase, effects of charge injection and low temperature, research progress of the radiation hardening technology of CCDs in image correction and radiation shielding are discussed. This study provides an experimental and theoretical basis for designing radiation-hardening CCDs.

Key words: CCD; radiation hardening; radiation damage effect; radiation sensitive parameter

0　引言

电荷耦合器件（Charge Coupled Device，CCD）是一种利用光电效应产生信号电荷，通过MOS结构的电容阵列耦合实现信号电荷的存储和转移，并通过器件的输出结构输出电信号实现光电信号转

收稿日期：2025－10－31.

基金项目：国家自然科学基金项目（U2167208）；陕西省自然科学基础研究计划项目（2024JC-JCQN-10）；全国重点实验室基金项目（NKLIPR2320）资助项目.

* 通信作者：王祖军

换的成像器件[1-3]。1969年，美国贝尔实验室首先研制成功CCD，并于1970年在《The Bell System Technical Journal》上发表相关研究成果[1]，CCD通过电子信号成像替代胶片成像，改变了成像的历史；2009年，Boyle和Smith因发明CCD获得了诺贝尔物理学奖。相对于其他成像器件，CCD具备量子效率高、动态范围大、分辨率高等优点，被广泛应用于成像、探测、通信等领域，如天基监视、辐射探测、粒子探测、医学成像、安监安防、消费电子等领域。经过五十多年的发展，CCD至今仍然在诸多领域具有广泛的应用，并且研制技术不断创新发展。尽管在成像应用领域，特别是消费类电子成像，CMOS图像传感器在部分应用领域逐步取代CCD，但由于CCD在高灵敏度、高分辨率、高清晰度等方面的独特性能，CCD仍在天文学、超大阵列成像、粒子探测、医学影像、航天成像等应用领域具有难以撼动的地位。

CCD作为一种成像和探测器件，在空间辐射、核辐射、粒子探测辐射、工艺辐射等环境下应用时，容易遭受辐照损伤的影响。辐照损伤会导致CCD性能的退化，包括电荷转移效率（Charge Transfer Efficiency，CTE）降低、量子效率降低、动态范围减小、暗电流增大、噪声增大等，严重时甚至可能导致成像和探测系统功能失效[3-6]。CCD的辐照损伤效应主要包括电离总剂量效应、位移效应、单粒子效应[3-9]。鉴于以CCD为核心器件的成像和探测系统在辐射环境中的可靠性问题备受关注，国外从上世纪70年代起就开始对CCD的辐照损伤效应及抗辐射加固技术进行研究，国内外相关机构和学者均开展了大量的实验和理论研究[3-20]，不断深入探讨CCD的辐照损伤效应和机理，这些研究成果显著提升了CCD的抗辐射能力。

鉴于CCD在极端辐射环境下的应用不断拓展，对其抗辐射能力需求不断提高，本文拟旨在梳理国内外在CCD抗辐射加固设计方面的研究进展。结合研究团队二十多年来在CCD辐照实验、仿真模拟、效应机理、损伤评估等领域的实践经验，主要从CCD工艺结构（信号转移沟道设计、栅氧工艺设计、栅极工艺设计、片上放大器及读出电路抗辐射加固设计）、工作模式（多相钳位工作模式、电荷注入工作模式、低温工作模式、时钟驱动优化）、图像校正、辐射屏蔽等方面综述CCD抗辐射加固技术研究进展。

1 CCD工艺结构加固设计

CCD的光敏单元通过光电效应产生信号电荷，然后在时序脉冲驱动下，通过纵向、横向的MOS结构电容阵列组成的转移寄存器耦合，实现信号电荷的存储和转移，最终通过输出放大器输出电信号。图1展示了N沟道三相CCD结构示意图[21]。从CCD工艺结构方面进行加固设计，主要基于上述CCD的基本结构和工作原理，从信号转移沟道、栅氧工艺、栅极工艺、片上放大器及读出电路等方面开展抗辐射加固设计。

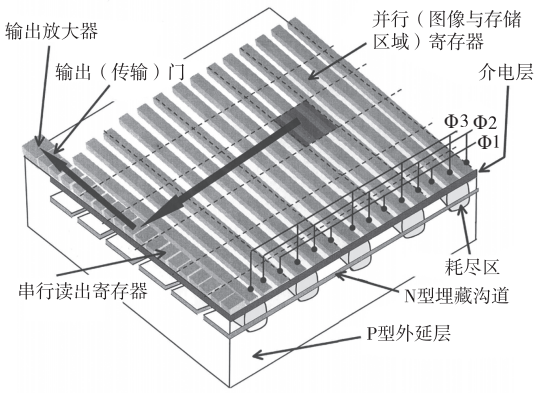


图1 N沟道三相CCD结构示意图[21]

1.1 CCD信号转移沟道抗辐射加固设计

CCD受辐照后会导致电荷转移损失（Charge Transfer Inefficiency，CTI）增大，而抑制辐照诱发CTI增大程度是CCD抗辐射加固设计的重要途径之一。CTI增大的主要因素源于辐射诱发CCD信号电荷转移沟道中产生缺陷俘获或释放电子，从而导致信号电荷出现转移损失，进而降低了CTE（$CTE=1-CTI$）。因此，对CCD信号转移沟道进行抗辐射加固设计是一种有效的提升方法。本文主要从沟道结构设计、沟道宽度调控、沟道类型选择等方面介绍了CCD信号转移沟道抗辐射加固设计研究进展。

1.1.1 沟道结构设计

从表面沟道设计到埋沟道设计，CCD的发展经历了显著的变革。早期（上世纪70至80年代）研制CCD的信号电荷存储和转移主要在半导体表面，通常称为表面沟道CCD（SCCD）。由于表面沟道与CCD栅氧化层界面直接接触，信号电荷转移沟道会受界面态陷阱电荷的影响，导致CCD的CTI和表面暗电流增大[22-23]。若在CCD栅氧层和半导体界面处引入pn结，使CCD的信号电荷存储和转移均在

半导体体内，通常称为埋沟道 CCD（BCCD）。BCCD 的信号电荷与栅氧化层界面不直接接触，从而减小了界面态的影响。将 CCD 的信号电荷从表面沟道转移设计为在埋沟道中转移，能显著减小辐射诱发界面态陷阱增多的影响，从而提升 CCD 的抗辐射能力[3]。

从埋沟道设计到埋沟凹槽（Notch）沟道设计，CCD 的研究与应用不断演进。2002 年，美国劳伦斯伯克利国家实验室的 Bebek 等在传统埋沟道设计的基础上，通过注入硼掺杂，在原有埋沟中形成一条 Notch 沟道[24]。图 2 展示了当温度为 128 K 时，分别采用标准埋沟道工艺和 Notch 注入工艺制造埋沟 CCD 中，水平转移寄存器中的 CTE 随质子辐照注量增大的变化关系曲线[24]。可以看出，与标准埋沟道 CCD 的退化程度相比，Notch CCD 的 CTE 随质子辐照注量增大的退化程度显著减小。质子辐照实验结果表明，Notch 沟道 CCD 的抗辐射能力比标准埋沟 CCD 的抗辐射能力提高约 2 倍[24]。

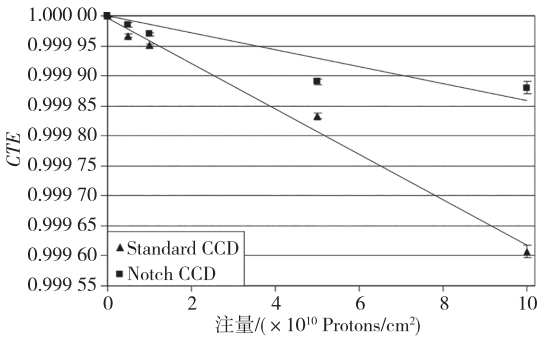


图 2　当温度为 128 K 时，分别采用标准工艺和 Notch 注入工艺生产的埋沟 CCD 时，CCD 水平转移寄存器中的 CTE 随质子辐照注量增大的变化关系[24]

2003 年，日本大阪大学的 Tsunemi 等设计了一款用于国际空间站 X 射线探测的 1 024×1 024 像素 CCD，该 CCD 采用 Notch 沟道（宽约为 3 μm）[25]。图 3 给出了 X 射线探测 CCD 的 Notch 沟道像素单元示意图[25]。图 4 给出了 X 射线探测用 CCD（Notch 沟道 P412-5B1P-4 和无 Notch 沟道 P411-5B0P-4）的 CTI 随 300 keV 质子辐照注量增大的变化曲线对比图[25]。从图 4 中可以看到，采用 Notch 沟道设计的 CCD 在相同的质子辐照注量下，CTI 增大程度明显小于无 Notch 沟道设计的 CCD。

2019 年，日本宫崎大学的 Kanemaru 等设计了一款用于 X 射线成像与光谱探测（XRISM）卫星的 p 沟道帧转移 320×256 像素 CCD，该 CCD 采用 Notch 沟道[26]。辐照实验结果表明，在 100 MeV 质子辐照下，该 Notch 沟道 CCD 的抗辐射能力比相同工艺但无 Notch 沟道的 CCD 提升 2～3 倍[26]。

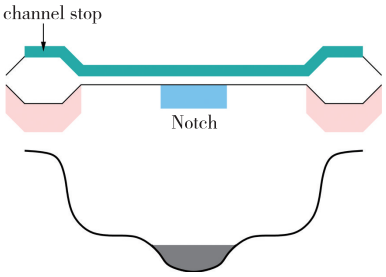


图 3　Notch 沟道 X 射线探测用 CCD 的像素单元示意图[25]

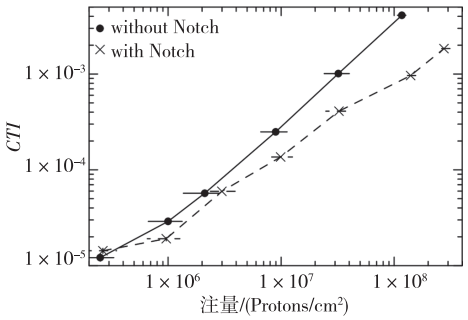


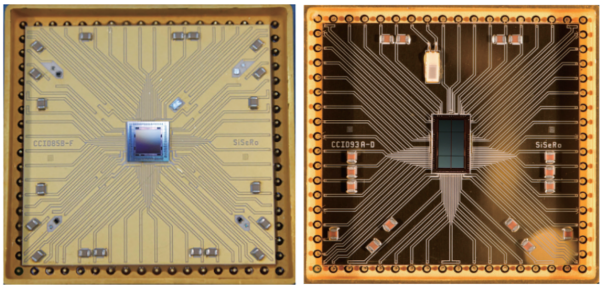
图 4　X 射线探测用 CCD（Notch 沟道 P412-5B1P-4 和无 Notch 沟道 P411-5B0P-4）的 CTI 随质子辐照注量增大的变化曲线对比图[25]

从埋沟设计到辅助埋沟（Supplementary Buried Channel，SBC）设计，CCD 的技术进步不断推进。2022 年，英国 Open 大学的 Parsons 等针对太阳风磁层相互作用全景成像卫星（SMILE）任务中软 X 射线成像（SXI）应用需求，采用 SBC 设计研制了 SMILE CCD370。CCD370 具有 4 510×4 510 个像素单元，主要用于探测 0.2～2.0 keV 能量的软 X 射线[27]。SBC 设计的主要目的是减小沟道中信号电荷与缺陷的接触，从而降低信号电荷的转移损失。实验测试结果表明，采用 SBC 设计研制的 CCD370 比没有 SBC 设计的普通埋沟 CCD270 的性能提升 3～4 倍，显示出更强的抗辐射能力[27]。

1.1.2　沟道宽度调控

2017 年，英国 Open 大学的 Hall 等针对欧空局（ESA）的“欧几里得（Euclid）任务”需求，通过减小 CCD 埋沟宽度的方式提升其抗辐射能力[28]，设计了 e2v CCD204（埋沟宽度为 50 μm）和 CCD273（埋沟宽度为 20 μm）两种不同埋沟宽度的 CCD。通过 Silvaco 软件模拟预测及实验结果验证表明，在沟道宽度减小后，CTE 提高了约 1.7 倍（采用 X 射线法测 CTE，信号电荷包约含 1 600 个电子）[28]。

2019年，美国麻省理工学院林肯实验室的Bautz等针对美国航空航天局（NASA）山猫（Lynx）X射线卫星对CCD探测器的应用需求，提出一种先进的数字CCD工艺，并设计两款数字CCD，分别为CCID85和CCID93，还在CCID93的埋沟道中设计了不同宽度（0.8，1.5，2 μm）的沟槽以提升抗辐射能力。测试结果表明，宽度为0.8 μm的沟槽抗辐射能力相对更强，具有更高的信号CTE[29]。图5展示了基于数字CCD工艺设计的CCID85和CCID93芯片图[29]。图6展示了CCID93埋沟道中设计的不同宽度沟槽示意图[29]。



（a）CCID85 （b）CCID93

图5 基于数字CCD工艺设计的CCD芯片图[29]

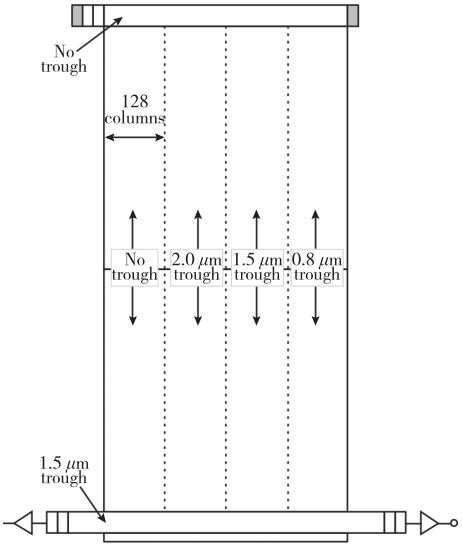


图6 CCID93埋沟道中设计的不同宽度沟槽示意图[29]

2023年，NASA喷气推进实验室的Morrissey等针对“罗马太空望远镜（Roman space telescope）”任务中对CCD探测器的应用需求，设计了三款电子倍增（EM）CCD，分别为CCD301，CCD302，CCD311。与商用标准工艺生产的EMCCD（CCD201）相比，改进设计的EMCCD在埋沟道中设计了不同宽度（3 μm，4 μm）的沟槽以提升抗辐射能力。实验测试结果表明，Morrissey等设计的新型EMCCD抗辐射能力比商用标准工艺生产的EMCCD提升了2～3倍[30]。

1.1.3 沟道类型选择

CCD的信号电荷转移沟道通常采用N埋沟道，而通过引入P埋沟道设计，可以进一步提升CCD的抗辐射能力。2004年，NASA戈达德太空飞行中心的Marshall等比较了辐射诱发美国超新星（SuperNova Acceleration Probe，SNAP）空间望远镜的P埋沟道LBNL CCD和哈勃太空望远镜（Hubble Space Telescope，HST）中的N埋沟道WFC3 CCD的性能退化差异[31]。图7给出了当辐照注量为2.5×10^9 p/cm^{2}时，63 MeV质子辐照诱发LBNL CCD和WFC3 CCD水平寄存器CTI退化随信号电荷包大小的变化情况[31]。从图7中可以看到，随着CCD沟道中的信号电荷包增多，CTI明显减小；当信号电荷包相同时，P埋沟道CCD的CTI明显小于N埋沟道CCD的CTI；当埋沟道类型相同且信号电荷包相同时，Notch沟道CCD的CTI明显小于没有Notch沟道CCD的CTI。

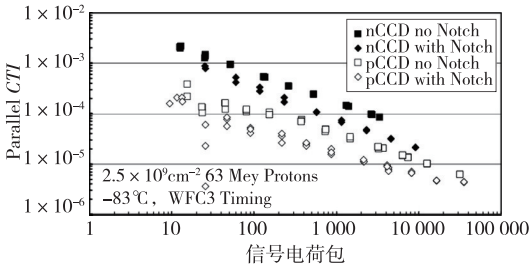


图7 当辐照注量为2.5×10^9 p/cm^{2}时，63 MeV质子辐照诱发LBNL CCD和WFC3 CCD水平寄存器CTI退化随信号电荷包大小的变化情况

2009年，英国Open大学的Gow等对e2v公司研制的N埋沟道CCD02和P埋沟道CCD47的质子辐照损伤效应进行了比较[32]。研究发现，传统的N埋沟道CCD的信号转移沟道会受到位移损伤诱发的E中心（P-V缺陷）影响，导致辐射诱发CTI增大；而P埋沟道CCD的信号转移沟道没有E中心的影响，从而提升了抗辐射能力。实验测试结果表明，在10 MeV质子辐照后，并于－90℃温度下进行测试时，P埋沟道CCD与N埋沟道CCD的CTI相比，其水平转移寄存器的抗辐射能力提升了约7倍，纵向转移寄存器抗辐射能力提升了约15倍[32]。2014年，Gow等又对e2v公司研制的N埋沟道前照（front illumniated）CCD204和P埋沟道背照（back illumniated）CCD204的质子辐照损伤效应进行了进一步比较[33]。

1.2　CCD 栅氧工艺的抗辐射加固设计

2009 年，欧洲 e2v 公司的 Burt 等针对 CCD 栅氧层进行了抗辐射加固设计，有效降低了电离辐射对 CCD 性能的影响[34]。标准 CCD 栅氧工艺主要采用相同厚度的 SiO_2 和 Si_3N_4 作为栅氧层，其在正常偏置条件下，辐照诱发平带电源漂移的典型值为 100～200 mV/krad(Si)。为提升抗辐射能力，采用 CCD 栅氧工艺进行抗辐射加固设计的 CCD47-20，其栅氧层的氮化物和氧化物均减薄到合适的厚度，以避免电子从体硅中隧穿进入 Si_3N_4 层。经过栅氧工艺抗辐射加固后，辐照诱发平带电源漂移的典型值为 6 mV/krad(Si)，从而显著提升了 CCD 抗电离辐射能力[34]。

1.3　CCD 栅极工艺抗辐射加固设计

2009 年，欧洲 e2v 公司的 Burt 等针对应用在牛顿望远镜(XMM-Newton)卫星上的 e2v CCD22，采用 Tapered-electrode 栅极设计，在信号电荷转移时通过 taper 提供的电场来加速电子的转移，使其受缺陷的影响程度减小，从而提升抗辐射能力[34]。图 8 给出了采用 Tapered-electrode 栅极设计的 CCD 像素单元图[34]。

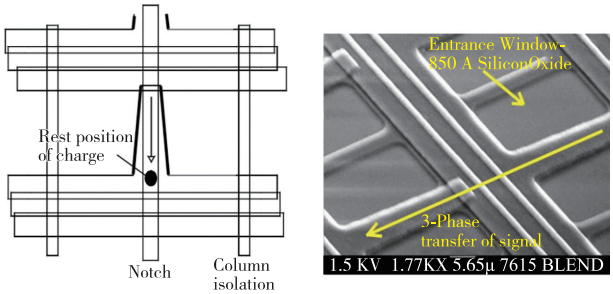


图 8　采用 Tapered-electrode 栅极设计的 CCD 像素单元图[34]

2014 年，法国图卢兹大学的 Marcelot 等基于深亚微米 CMOS 成像工艺制造了一款 CCD，图 9 给出了其结构剖面及平面设计示意图[35]。该 CCD 采用多晶硅栅极重叠的专用工艺，多晶硅栅极间隙为 130 nm，图 10 给出了其多晶硅栅极间隙扫描电子显微镜图(SEM)剖面图[35]。通过采用 CCD 多晶硅栅极重叠，促进信号电荷在栅极间转移，从而增大电荷转移效率，提升抗辐射能力。

2016 年，Marcelot 等为了降低 CCD 的 CTI，采用三维工艺计算机辅助设计(Technology Computer Aided Design，TCAD)，改进 CCD 栅极结构。TCAD 仿真结果表明，通过 V 型 CCD 栅极设计提升特定方向的 CTE 后，可使 CCD 的 CTI 降低 45%[36]。图 11 给出了 CCD 栅极结构改进示意图，form1 为改进前，form2 为改进后[36]。

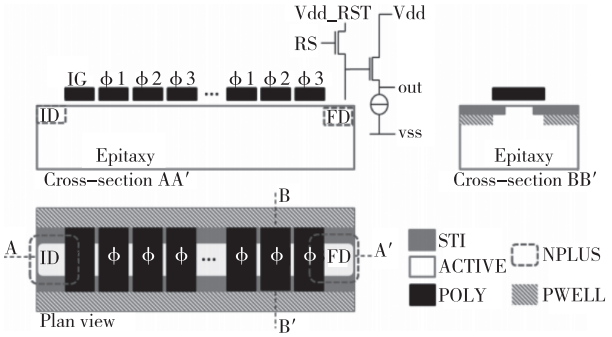


图 9　CCD 结构剖面及平面设计示意图[35]

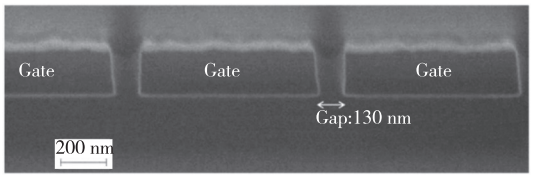


图 10　CCD 的多晶硅栅极间隙 SEM 剖面图[35]

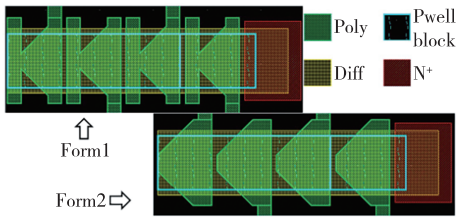


图 11　CCD 栅极结构改进示意图[36]

1.4　CCD 片上放大器及读出电路抗辐射加固设计

CCD 的片上放大器主要由 MOSFET 组成。然而，电离总剂量辐照会在 Si 和 SiO_2 界面诱发界面态产生，导致器件性能退化。辐照还会诱发 CCD 片上放大器中 MOSFET 性能参数退化。例如，当 60 MeV 质子在不同辐照注量下作用于 CCD 片上放大器时，MOSFET 特性参数退化明显。随着辐照注量的增大，阈值电压和饱和输出电流的变化不断增大，其中阈值电压变化值由 1×10^{10} p/cm^2 注量下的 0.209 V 增加至 1×10^{12} p/cm^2 注量下的 0.751 V，饱和输出电流下降幅度由 1×10^{10} p/cm^2 注量下的 0.112 mA 增加至 1×10^{12} p/cm^2 注量下的 0.335 mA[37]。这种退化主要是由于质子辐照在 MOSFET 氧化层中的能量沉积，将能量传递给晶格原子，导致原子键断裂，在 Si/SiO_2 界面处形成界面态，而一部分被栅氧层中深空穴陷阱俘获形成氧化层

陷阱电荷,产生的氧化层陷阱电荷和界面态改变了栅氧层和基底界面处的电势分布,从而引起性能参数退化[37]。

2020年,重庆光电技术研究所的欧黎等提出一种提高抗电离效应辐照能力的CCD放大器结构[38]。通过在CCD片上放大器的输出节点、复位漏、复位栅、放大器栅极、源极、漏极周围的场氧上增加抗辐射的加固栅,并向加固栅施加偏置电压来抑制复位栅和放大器栅极在场氧和栅氧过渡区的寄生晶体管的漏电流,隔绝辐照后场氧对输出节点、复位漏、源极、漏极的不利影响,并通过钝化层保护关键电极[38]。

此外,通过对CCD的片上放大器进行电路加固也可以有效降低辐照诱发CCD性能退化的影响。例如,复位(reset)MOSFET主要用于对源级跟随器的参考电压V_{DD}进行复位,美国海军实验室的Killiany等通过复位脉冲设置为辐照前后均能使其复位,通过减小氧化层电场使输出(output)MOSFET的阈值电压漂移减小等措施提升CCD的片上放大器的抗辐射能力[39]。

2018年,中国科学院高能物理研究所的Lu等针对X射线天文学应用的CCD读出电路,采用四通道全功能相关双采样(Correlated Double Sampling, CDS)专用集成电路ASIC(XCR4C)设计,引入EFBB(Even Finger Double-side Bulk Butting)布局技术,CDS电路中同时集成了(Baseline Adjustment Circuit, BLA)、鉴别器(Discriminator)、新型差分开关电容(Switched-Capacitor, SC)结构,使读出电路具有线性度高、功耗低、干扰小等优点[40]。实验测试结果表明,在^{60}Coγ射线源上,剂量率为50 rad(Si)/s,总剂量为300 krad(Si)辐照后,该CCD的性能参数退化可忽略[40]。

2019年,中国科学院高能物理研究所和微电子研究所的Lu等针对CCD读出电路的SEL效应,设计了XCR4C ASIC的抗单粒子闩锁(SEL)能力测试(HAT)实验[41]。实验测试结果表明,从版图设计和工艺两方面着手缓解SEL,其中ASIC受到$^{181}Ta^{31+}$离子的重离子辐照,线性能量转移(LET)高达81.35 MeVcm^2/mg,直到总注量高达1.68×10^7 ions/cm^2,仍未监测到任何SEL现象,辐照后的性能下降可忽略不计,验证了其具有抗SEL能力[41]。

2 CCD工作模式抗辐射加固设计

CCD在受辐照后会导致辐射敏感参数退化,因此抑制辐照诱发辐射敏感参数退化程度是进行CCD抗辐射加固设计的主要途径。根据CCD的应用需求和使用环境,通过选取不同的工作模式,可有效降低辐照CCD诱发辐射敏感参数的退化程度,如多相钳位(Multi-Pinned-Phase, MPP)工作模式、电荷注入(Charge Injection, CI)工作模式、低温工作模式、时序驱动优化工作模式等。

2.1 MPP工作模式

与传统工作模式下的CCD相比,MPP工作模式下的CCD在进行信号收集和信号读出过程中,其界面区域处于表面反型状态,从而显著抑制了表面暗电流的产生[3,42]。在缺乏表面反型的情况下,暗电流随着栅氧化层和Si层之间的界面态增大而增加。通过施加偏置电压使CCD表面出现反型层,将衬底和沟阻区域的空穴迁移到Si/SiO_2界面并填充界面陷阱,从而减小CCD的表面暗电流[43]。在MPP CCD中,器件制造期间在一个或多个时钟驱动相下进行微小电流注入,使得势阱能在所有的时钟驱动电压都减小时器件仍然维持表面反型[44]。

1988年,美国JPL的Janesick等采用全帧转移成像模式的MPP CCD提升抗辐射能力,其表面暗电流减小因子约为100[44-45]。1990年,Murata-seawalt等针对NASA太阳和日光层观测站(Solar Heliospheric Observatory, SOHO)中采用的Tektronix 1 024×1 024 MPP CCD(TK1024 MPP CCD)开展了地面模拟低地球轨道质子辐照实验研究,研究结果表明,未采取MPP工作模式的TK512 CCD辐照后的暗电流比TK1024 MPP CCD辐照后的暗电流高出25倍,MPP CCD的抗辐射能力显著提升[46]。

2009年,重庆光电技术研究所的雷仁方等研究了MPP CCD的结构制作工艺技术,并分析了工艺过程、温度特性对MPP CCD的暗电流的影响[47]。研究表明,采用MPP CCD制作工艺有效抑制了界面态的热产生,当MPP注入剂量为(6±2)×10^{11} cm^{-2}时,制作的器件性能较好,其暗电流密度下降到之前的1/3[47]。2011年,重庆光电技术研究所的汪朝敏等针对抗辐射加固1 024×1 024元CCD进行了研究,结果表明,采用MPP工作模式有效降低了界面态对CCD性能的影响[48]。

2.2　电荷注入工作模式

电荷注入工作模式是指在CCD的移位寄存器或像素阵列中注入额外的电荷，以补偿由辐照损伤或其他因素引起的电荷损失。当CCD受到辐照损伤导致信号电荷在转移过程中损失增大时，通过电荷注入，能补偿辐照损伤诱发的信号电荷损失，从而提升CCD抗辐射能力。“胖0”（fat zero）工作模式本质上也是一种电荷注入工作模式。电荷注入的方法主要有两种：（1）像素单元注入，即通过向像素单元的特定区域加偏压来实现直接在像素单元进行电荷注入，这种方法可以精确控制电荷注入量；（2）移位寄存器注入，即在移位寄存器中进行电荷注入，这些注入的电荷与像素单元中的信号电荷一起进行转移读出，这种方法对CCD信号输出的影响范围更大，但其电荷注入的精确度不如像素单元注入。

2014 年，法国图卢兹大学的 Marcelot 等针对一款表面沟道CCD开展了不同电荷注入后的CTI测试。图12给出了加复位和不加复位偏置两种情况下，测得的CTI随电荷注入量增大而减小的变化曲线。从图12中可以看到，电荷注入量越大，则CTI越小，这主要是因为电荷注入量的增加使得在转移过程中被界面态缺陷俘获的信号电荷比例减小，从而降低了电荷转移损失[35]。

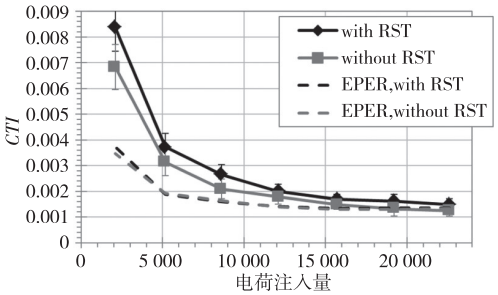


图12　在加复位和不加复位偏置的两种情况下，CCD的CTI随电荷注入量增大而减小的变化曲线[35]

2020 年，英国 Open 大学的 Parsons 等针对 SMILE 任务中 SXI 应用需求，通过在 SMILE CCD280中的像素单元注入约8 500个信号电子，对辐照诱发的缺陷进行预填充。在－110℃～130℃范围的低温下测试，电荷注入工作模式下CTI的退化程度比没有进行电荷注入模式下CTI的退化程度减少了10%～20%[49]。

2020 年，美国麻省理工学院的 Lamarr 等对CCID93进行了40 MeV质子辐照实验，辐照注量为 5.4×10^{9} p/cm^2。图13给出了辐照后CCID93分别在电荷注入和无电荷注入条件下，CTI随温度增大的变化曲线[50]。从图13中可以看到，在进行电荷注入后，CCID93的CTI在不同温度下均显著低于无电荷注入情况。

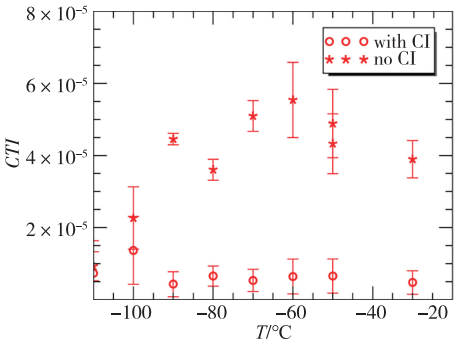


图13　辐照后CCID93分别在电荷注入和无电荷注入条件下，CTI随温度增大的变化曲线[50]

2.3　低温工作模式

CCD在低温下工作可有效减小辐照诱发CCD性能参数的退化程度。低温工作模式能有效抑制辐照CCD诱发暗电流和CTI增大程度。因此，在航天器上常采用电制冷低温工作模式来抑制辐照诱发CCD性能参数的退化。

1991 年，英国布鲁内尔大学的 Robbins 等针对e2v公司的三相N埋沟道CCD（e2v UT101）开展了1～2 MeV β射线辐照实验及测试。实验测试结果表明，选择合适的工作温度可以减小辐射诱发CCD性能的退化程度，在210～270 K范围内，CTI随温度升高而增大，而温度越低则CTI越小[51]。

1996 年，英国布鲁内尔大学的 Holmes-Siedle 等针对ESA在X射线多重镜面任务（X-ray Multi-Mirror Mission，XMM）任务中采用e2v公司的CCD02开展了10 MeV质子辐照实验，辐照注量为 1.0×10^{9} p/cm^2。实验测试结果表明，质子辐照诱发CCD02的CTI退化，其主要影响因素是由E中心缺陷（Ec-0.42 eV）引起，而该缺陷在－120℃～－50℃的温度范围内对CTI影响较大，在－120℃时影响较小[52]。

2001 年，英国赛瑞（Sira）公司的 Hopkinson 等针对e2v公司的CCD47-20开展了10 MeV质子辐照实验，辐照注量为 1.8×10^{10} p/cm^2。实验测试结果表明，测试温度在－100℃～－45℃时，CCD47-20的纵向（Vertical）CTI随温度升高而增大，即温度越低，CTI越小[53]。

2005 年，美国海军天文台（Naval Observatory）

的Dorland等针对天体测绘探测器(Astrometric Mapping Explorer, AMEX)任务中采用的STA1046 CCD开展了63.3 MeV质子辐照实验,辐照注量为5.0×10^9 p/cm^2[54]。实验测试结果表明,测试温度在−120℃~0℃时,STA1046 CCD的暗电流随温度升高而增大,即温度越低,暗电流越小;当测试在−120℃时,CTI最小[54]。

2.4 时钟驱动优化工作模式

2022年,英国Open大学的Buggey等针对ESA行星凌日和恒星震荡(PLATO)任务中应用的CCD,采用多级时钟驱动(Multi-level clocking)优化技术以减小CTI,实现CTI减小范围为8%以内,并提升CCD探测器的整体性能[56]。该多级时钟驱动优化通过采用三相电压(标准时钟驱动采用两相电压)来抑制CCD辐照损伤诱发缺陷的影响,使CTE提高。图14给出了缺陷在多级时钟驱动与标准时钟驱动下发射电子的对比示意图(左侧为标准时钟驱动,右侧为多级时钟驱动)。以信号电子从Φ1转移至Φ4级为例,辐照诱发CCD信号转移沟道中的缺陷会俘获和发射信号电子。如果缺陷在第2或第3阶段发射电子,则被缺陷俘获的信号电子被发射回源信号电荷包,因为源信号电荷包最接近俘获信号电子的缺陷。在标准时钟驱动模式下,当信号电子到达第4阶段时,源信号电荷包的前一个信号电荷包此时最接近俘获信号电子的缺陷;如果缺陷俘获的信号电子此时发射,俘获信号电子将加入到非源电荷包,导致信号电荷包出现转移损失。然而,在多级时钟驱动模式下,Φ3下的势垒减小,使得被缺陷俘获的信号电子能发射回源信号电荷包,进而减小了源信号电荷包的转移损失。

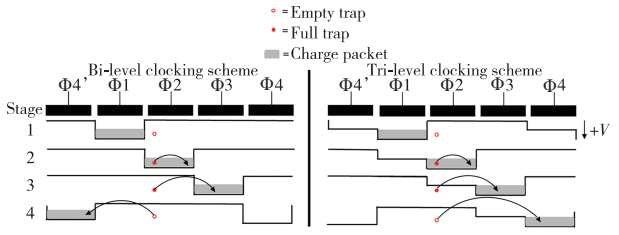


图14 缺陷在多级时钟驱动与标准时钟驱动下发射电子的对比示意图[56]

3 CCD图像校正加固设计

CCD作为成像器件,在受到辐照损伤的影响后,图像质量会出现退化。通过研究辐照损伤对图像影响的特征规律,对辐照后的CCD图像进行校正,消除辐照损伤对图像质量的影响,从而提升CCD的抗辐射能力。

2010年,英国爱丁堡皇家天文台的Massey等基于HST上的先进勘察CCD相机在轨拍摄图像分析,提出一种基于像素CTI校正的图像拖尾校正模型,以减少CTI拖尾对CCD相机输出图像的影响。在CCD信号电荷转移读出过程中,如果前一个信号电荷包中的电子被缺陷俘获,这些被缺陷俘获的电子会被陆续释放到后续信号电荷包,从而形成拖尾现象。距离读出寄存器最远端的像素受到拖尾的影响最严重,因为从最远端开始转移的信号电荷包在整个电荷转移的过程中遇到的缺陷最多。为了更精确地去除CTI拖尾,需要对原始像素数据进行图像校正。在HST传回的在轨图像中,由于地球大气层之上的空间辐射损伤,CTI增大,进而在轨图像中会产生虚假的拖尾现象。通过测量CCD势阱被电子填充的速率以及势阱中电荷陷阱的特性,建立了一个读出过程模型,并将其应用于真实图像数据校正。通过图像校正后,能将所有空间辐射通量下的CCD在轨图像的CTI拖尾显著减小,图像质量提升优于一个数量级[57-58]。

2013年,ESA的Short等针对盖亚(GAIA)空间天体测量任务中应用的CCD面临的空间辐射损伤问题,为降低辐射诱发CCD中CTI增大带来的影响,依据肖特莱-里德-霍尔(Shockley-Read-Hall, SRH)理论,解析计算CCD信号转移沟道中的缺陷俘获和发射信号电子过程,提出一种基于电荷畸变模型(Charge Distortion Model, CDM)的解析模型校正方法,应用该方法的理论计算结果与实验测试结果吻合较好[59]。此外,该模型适用于时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI)和成像模式的CCD,显示出较强的通用性。

2016年,美国巴尔的摩空间望远镜科学研究所的Baggett等针对HST上的e2v 4 096×4 096像元CCD遭受空间辐射损伤性能退化问题,提出一种基于像素校正来提升CTE的方法。通过评估在轨图像中热像素(warm pixels)在偏压和暗场条件下的变化来评估CTE。通过CTE校正,能有效提升在轨图像校正后的图像质量[60]。

4 CCD辐射屏蔽加固设计

通过辐射屏蔽防护,可有效抑制辐照损伤诱发

CCD性能参数退化。根据不同辐射环境中的辐射粒子或射线种类，选取合适的屏蔽材料减少辐射损伤对CCD的影响，国内外均开展了CCD辐射屏蔽加固设计研究，提升了CCD的抗辐射能力[46,61-63]。

1990年，Murata-seawalt等针对NASA的SOHO中采用的Tektronix 1 024×1 024 MPP CCD（TK1024 MPP CCD）开展了质子辐照实验，辐照过程中开展了钽（tantalum）屏蔽研究。实验研究结果表明，质子辐照诱发CCD暗电流显著增大。在CCD辐照时分别经过1 mm，2 mm，4 mm钽屏蔽后，质子辐照诱发CCD暗电流增大程度相对于没有屏蔽时分别减少12%，28%，56%，这表明钽屏蔽有效减小了质子辐照诱发增大的暗电流[46]。

2007年，中国工程物理研究院的章法强等针对14 MeV中子照相中CCD芯片的屏蔽防护问题，应用MCNP（Monte Carlo N-particle）对不同屏蔽材料组合条件下CCD芯片的吸收剂量进行了计算，并根据计算结果给出了CCD芯片的屏蔽方案。计算结果表明，在对CCD进行有效的屏蔽后，芯片的吸收剂量是屏蔽前的3%[61]。

2013年，兰州空间技术物理研究所的高欣等提出针对空间辐射环境中应用的CCD，应当根据特定的辐射环境，选择合适结构和厚度的屏蔽材料，以达到最佳的防护效果。通过分析轨道辐射环境，给出特定的屏蔽结构，然后进行粒子输运计算，获得CCD器件接受到的辐射剂量；再根据CCD辐射效应数据分析与屏蔽效果的要求，确定合适的辐射屏蔽设计[62]。

2017年，英国Open大学的Hall等针对ESA的Euclid任务需求，提出通过CCD辐射屏蔽防护、器件优化设计、工作模式选取、图像校正等四个方面来降低辐照损伤对CCD性能的影响，并指出进行CCD辐射屏蔽时需要考虑屏蔽带来的次级粒子的影响，推荐采用“分级Z屏蔽”（graded-Z shielding）来降低次级粒子的影响[63]。

5　研究展望

随着CCD在极端辐射环境下的应用需求及对图像质量要求的不断提升，催生了CCD抗辐射加固技术的不断发展。国内外研究机构和科研人员在CCD工艺结构抗辐射加固技术方面，基于CCD结构和工作原理，从信号转移沟道、栅氧工艺、栅极工艺、片上放大器及读出电路等方面均进行了抗辐射加固设计研究，并在不同应用环境、不同任务需求、不同CCD器件类型中得到实践，特别是CCD信号转移沟道结构抗辐射加固方面，从表面沟道设计到埋沟道设计、从埋沟道设计到Notch沟道和SBC设计，不断提升CCD信号转移沟道的抗辐射能力；从沟道宽度调控、沟道类型（P沟道和N沟道，前照和背照）设计等方面进一步增强了CCD信号转移沟道抗辐射加固效果。在CCD工作模式抗辐射加固技术方面，介绍了MPP工作模式、电荷注入工作模式、低温工作模式、时钟驱动优化工作模式等方面研究进展。此外，还介绍了CCD在图像校正、辐射屏蔽等方面的抗辐射加固技术研究进展。基于上述CCD抗辐射加固设计基础，随着CCD新材料、新工艺、新结构的发展，今后还将会出现更多、更新的CCD抗辐射加固技术，如基于CMOS工艺的新型抗辐射CCD，3D堆叠CCD等。

本文梳理的国内外CCD抗辐射加固设计研究进展，将为CCD器件研制和应用单位进行CCD抗辐射加固设计、器件选型、辐射屏蔽防护、辐射损伤评估等研究提供理论和实验依据。

参考文献：

[1] Boyle W S, Smith G E. Charge coupled semiconductor devices[J]. Bell System Technical Journal, 1970, 49(4): 587-593.

[2] 张　坤. 国外星用CCD图像传感器的研制现状[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(3): 324-328.
Zhang Kun. Abroad development status of CCD image sensors used in secondary planet [J]. Journal of China Acadewy of Electronics and Information Technology, 2007, 2(3): 324-328.

[3] 王祖军, 唐本奇, 肖志刚, 等. CCD辐射损伤效应及加固技术研究进展[J]. 半导体光电, 2009, 30(6): 797-802, 814.
Wang Zujun, Tang Benqi, Xiao Zhigang, et al. Progress of radiation damage effects and hardening technology on CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(6): 797-802, 814.

[4] 王祖军, 唐本奇, 肖志刚, 等. CCD电离辐射效应损伤机理分析[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(3): 565-570, 619.
Wang Zujun, Tang Benqi, Xiao Zhigang, et al. The analysis of mechanism on ionization radiation damage effects on CCD[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(3): 565-570, 619.

[5] 王祖军, 黄绍艳, 刘敏波, 等. CCD位移辐射效应损伤机理分析[J]. 半导体光电, 2010, 31(2): 175-179.
Wang Zujun, Huang Shaoyan, Liu Minbo, et al. Analysis of the displacement damage mechanism of radiation effects in CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 175-179.

[6] 王祖军. 电荷耦合器件质子辐照损伤实验及数值模拟研究[D]. 北京：清华大学, 2011.

Wang Zujun. Research on proton radiation effects on charge coupled device with experiment and simulation methods [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

[7] Williams R A, Nelson R D. Radiation effects in charge coupled devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1975, 22(6): 2639-2644.

[8] Janesick J, Elliott T, Pool F. Radiation damage in scientific charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989, 36(1): 572-578.

[9] Hopkinson G R, Dale C J, Marshall P W. Proton effects in charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 614-627.

[10] Waczynski A, Polidan E J, Marshall P W, et al. A comparison of charge transfer efficiency measurement techniques on proton damaged n-channel CCDs for the Hubble Space Telescope Wide-Field Camera 3[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 1807-1814.

[11] Chugg A M, Jones R, Moutrie M J, et al. Analyses of images of neutron interactions and single particle displacement damage in CCD arrays [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(6): 3579-3584.

[12] 于庆奎, 唐 民, 朱恒静, 等. 用10MeV质子和钴60γ射线进行CCD空间辐射效应评估[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4): 391-394, 300.
Yu Qingkui, Tang Min, Zhu Hengjing, et al. Experimental investigation on radiation damage on CCD by 10 MeV proton and Cobalt 60 Gamma [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(4): 391-394, 300.

[13] Wang Z, Tang B, Xiao Z, et al. Different dose rate radiation effects on linear CCDs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(3): 1626-1631.

[14] 李豫东, 汪 波, 郭 旗, 等. CCD与CMOS图像传感器辐射效应测试系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2778-2784.
Li Yudong, Wang Bo, Guo Qi, et al. Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2778-2784.

[15] Wang Z, He B, Yao Z, et al. Dose rate and bias effects on COTS array CCDs induce dark signals increase [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(3): 1376-1380.

[16] 王祖军, 薛院院, 刘敏波, 等. CCD空间环境辐射效应地面模拟试验方法[J]. 现代应用物理, 2016, 7(4): 30-36.
Wang Zujun, Xue Yuanyuan, Liu Minbo, et al. Ground simulation test methods for space environment radiation effects on charge coupled devices[J]. Modern Applied Physics, 2016, 7(4): 30-36.

[17] 文 林, 李豫东, 郭 旗, 等. γ射线及质子辐照导致CCD光谱响应退化的机制[J]. 发光学报, 2018, 39(2): 244-250.
Wen Lin, Li Yudong, Guo Qi, et al. Mechanism of spectrum response degradation in CCD's exposed to γ-ray and proton[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(2): 244-250.

[18] Wang Z, Xue Y, Xu R, et al. Charge transfer inefficiency increase of the CCD detector induced by proton and neutron irradiations [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 978: 164431.

[19] 王祖军, 薛院院, 王 迪, 等. 西安200 MeV质子应用装置200 MeV质子辐照CCD的实验结果与分析[J]. 现代应用物理, 2021, 12(2): 93-99.
Wang Zujun, Xue Yuanyuan, Wang Di, et al. Charge coupled device irradiated by 200 MeV protons at Xi'an 200 MeV proton application facility[J]. Modern Applie Physics, 2021, 12(2): 93-99.

[20] 王祖军, 黄 港, 李传洲, 等. 面阵CCD辐射敏感参数测试电路设计及试验验证[J]. 现代应用物理, 2025, 16(2): 154-161.
Wang Zujun, Huang Gang, Li Chuanzhou, et al. Test circuit design and radiation experiment verification of array CCDs[J]. Modern Applie Physics, 2025, 16(2): 154-161.

[21] 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.

[22] Killiany J M. Low-temperature radiation damage effects in a room-temperature radiation-hard surface channel CCD [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1977, 24(6): 2194-2198.

[23] 任迪远, 张玲珊, 瞿则涛, 等. 表面n沟CCD的电离辐射损伤[J]. 核电子学与探测技术, 1987, 7(3): 139-144.
Ren Diyun, Zhang Lingshan, Qu Zetao, et al. Ionizing radiation damage in n-surface channel CCD [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1987, 7(3): 139-144.

[24] Bebek C, Groom D, Holland S, et al. Proton radiation damage in p-channel CCDs fabricated on high-resistivity silicon [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(3): 1221-1225.

[25] Tsunemi H, Hiraga J, Miyata E, et al. Radiation hardness of the Notch structure inside the charge-coupled device [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42: 1816-1819.

[26] Kanemaru Y, Sato J, Mori K, et al. Radiation hardness of a p-channel Notch CCD developed for the X-ray CCD camera onboard the XRISM satellite [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(4): C04003.

[27] Parsons S, Hall D, Buggey T, et al. Improving radiation hardness in space-based Charge-Coupled Devices: an experimental validation of a new pre-fabrication modelling technique [J]. Journal of Instrumentation, 2022, 17(10): P10025.

[28] Hall D J, Skottfelt J, Soman M R, et al. Improving radiation hardness in space-based Charge-Coupled Devices through the narrowing of the charge transfer channel [J]. Journal of Instrumentation, 2017, 12(12): C12021.

[29] Bautz M W, Burke B E. Toward fast, low-noise charge-coupled

devices for Lynx [J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2019, 5(2): 021015.

[30] Morrissey P, Harding L, Bush N, et al. Flight photon counting electron multiplying charge coupled device development for the Roman Space Telescope coronagraph instrument[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2023, 9(1): 016003.

[31] Marshall C J, Marshall P W, Wacynski A, et al. Comparisons of the proton-induced dark current and charge transfer efficiency responses of n- and p-channel CCDs[J]. Proc. of SPIE, 2004, 5499:542-552

[32] Gow J, Murray N J, Holland A D, et al. A comparative study of proton radiation damage in p- and n-channel CCDs[J]. Proc. of SPIE, 2009, 7435: 74350F.

[33] Gow J P D, Murray N J, Holland A D, et al. Proton Damage Comparison of an e2v Technologies n-channel and p-channel CCD204 [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(4): 1843-1848.

[34] Burt D, Endicott J, Jerram P, et al. Improving radiation tolerance in e2v CCD sensors[J]. Proc. of SPIE, 2009, 7439: 743902.

[35] Marcelot O, Estribeau M, Goiffon V, et al. Study of CCD transport on CMOS imaging technology: comparison between SCCD and BCCD, and ramp effect on the CTI [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(3): 844-849.

[36] Marcelot O, Molina R, Bouhier M, et al. Design impact on charge transfer inefficiency of surface CCD on CMOS devices: TCAD and characterization study [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(3): 1099-1104.

[37] 晏石兴, 王祖军, 唐　宁, 等. 质子辐照诱发CCD片上放大器单管性能退化实验与仿真研究[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(11): 2412-2418.
Yan Shixing, Wang Zujun, Tang Ning, et al. Experiment and simulation research on performance of single transistor of CCD on-chip amplifier induced by proton irradiation [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(11): 2412-2418.

[38] 欧　黎, 廖乃镘, 刘昌林, 等. 提高抗电离效应辐照能力的CCD放大器结构: CN112687716B[P]. 2022-06-24.

[39] Killiany J. Radiation effects on silicon charge-coupled devices[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1978, 1(4): 353-365.

[40] Lu B, Huo J, Chen Y, et al. XCR4C: a rad-hard full-function CDS asic for X-ray CCD applications[C]//2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC), 2019: 1-5.

[41] Lu B, Huo J, Chen Y, et al. SEL-oriented rad-hard strategy and characterization of the XCR4C ASIC for X-ray CCD applications[C]//2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2019: 1-4.

[42] 宋　谦. 空间天文观测用电荷耦合器件高能辐射损伤研究[D]. 昆明: 中国科学院研究生院(云南天文台), 2002.
Song Qian. Radiation damage on the charge-coupled devices used in space astronomical observatory [D]. Beijing: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2002.

[43] Saks N S. A technique for suppressing dark current generated by interface states in buried channel CCD imagers [J]. IEEE Electron Device Letters, 1980, 1(7): 131-133.

[44] Janesick J R, Elliotte T, Bredthauer R, et al. Fano-noise limited CCDs[J]. Proc. of SPIE, 1988, 0982:14-19.

[45] Janesick J, Elliott T, Pool F. Radiation damage in scientific charge-coupled devices [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1989, 36(1): 572-578.

[46] Murata-Seawalt D, Orbock J D, Delamere A W, et al. Proton radiation effects on multi-pinned-phased CCDs [J]. Proc. of SPIE, 1990, 1242: 84-93.

[47] 雷仁方, 杜文佳, 李睿智, 等. CCD MPP结构制作工艺技术研究[J]. 半导体光电, 2009, 30(6): 867-869.
Lei Renfang, Du Wenjia, Li Ruizhi, et al. Process study on CCD's MPP structure [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(6): 867-869.

[48] 汪朝敏, 李豫东, 周建勇, 等. 抗辐射加固1024×1024元CCD[C]// 第十一届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会论文集, 2011: 202-206.

[49] Parsons S, Hall D J, Holland A D, et al. Radiation damage testing status of the CCDs for the SMILE SXI[J]. Proc. of SPIE, 2020, 11454: 114540Q.

[50] LaMarr B J, Bautz M W, Burke B, et al. Radiation testing of a back illuminated, small pixel, CMOS compatible CCD [J]. Proc. of SPIE, 2021, 11821: 118211G.

[51] Robbins M S, Roy T, Watts S J. Degradation of the charge transfer efficiency of a buried channel charge coupled device due to radiation damage by a beta source[C]//RADECS 91 First European Conference on Radiation and Its Effects on Devices and Systems, 2002: 327-332.

[52] Holmes-Siedle A, Holland A, Watts S. The impact of space protons on X-ray sensing with charge coupled devices (CCDs)[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(6): 2998-3004.

[53] Hopkinson G R. Proton-induced CCD charge transfer degradation at low-operating temperatures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 1790-1795.

[54] Dorland B N, Foltz R, Waczynski A. Found! A CCD that meets space astrometry requirements [J]. Proc. of SPIE, 2005, 5902: 59020E.

[55] Murray N J, Holland A D, Gow J P D, et al. Mitigating radiation-induced charge transfer inefficiency in full-frame CCD applications by 'pumping' traps [J]. Proc. of SPIE, 2012, 8453: 845317.

[56] Buggey T W, Hall D, Soman M, et al. Predicting the performance benefit of multi-level clocking in CCDs using the active trap model[J]. Proc. of SPIE, 2022, 12191: 121911J.

[57] Massey R, Stoughton C, Leauthaud A, et al. Pixel-based

correction for charge transfer inefficiency in the Hubble space telescope advanced camera for surveys[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 401(1): 371-384.

[58] Massey R. Charge transfer inefficiency in the Hubble space telescope since servicing mission 4[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2010, 409(1): L109-L113.

[59] Short A, Crowley C, de Bruijne J H J, et al. An analytical model of radiation-induced Charge Transfer Inefficiency for CCD detectors[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 430(4): 3078-3085.

[60] Baggett S M, Anderson J, Sosey M, et al. HST/WFC3: understanding and mitigating radiation damage effects in the CCD detectors[J]. Proc. of SPIE, 2016, 9904: 99045D.

[61] 章法强, 李正宏, 杨建伦, 等. 14MeV中子照相中CCD芯片的屏蔽计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(S1): 987-990.
Zhang Faqiang, Li Zhenghong, Yang Jianlun, et al. Shielding calculations for CCD chips in 14MeV neutron radiography[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(S1): 987-990.

[62] 高 欣, 杨生胜, 冯展祖, 等. 空间CCD图像传感器辐射损伤评估方法[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(6): 596-601.
Gao Xin, Yang Shengsheng, Feng Zhanzu, et al. The evaluation method of space radiation effects on space-borne CCD image sensors[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(6): 596-601.

[63] Hall D J, Skottfelt J, Soman M R, et al. Improving radiation hardness in space-based charge-coupled devices through the narrowing of the charge transfer channel [J]. Journal of Instrumentation, 2017, 12: C12021.

作者简介:

王祖军(1979—),男,湖北省汉川市人,研究员,博士,主要从事光电器件与系统辐照损伤效应及应用研究。