动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022041502

CMOS 图像传感器辐照损伤效应仿真模拟研究进展

王祖军[1,2*]，赖善坤[2]，杨　勰[3]，贾同轩[2]，黄　港[2]，聂　栩[2]

（1. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室，西安 710024；
2. 湘潭大学 材料科学与工程学院，湖南 湘潭 411105；3. 西安高科技研究所，西安 710024）

摘　要： CMOS 图像传感器(CIS)工作在空间辐射或核辐射环境中遭受的辐照损伤问题备受关注。对 CIS 辐照损伤效应进行仿真模拟研究有助于深入揭示辐照损伤机理，进而开展抗辐射加固设计，有效提升 CIS 抗辐照能力。文章通过梳理国内外开展 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究方面的进展情况，结合课题组已开展的电子元器件辐照效应仿真模拟和实验研究基础，从 CIS 器件建模、时序驱动电路建模、辐照损伤效应建模、仿真模拟结果校验等方面探讨了 CIS 辐照损伤效应的仿真模拟方法，分析总结了当前 CIS 辐照效应仿真模拟研究中亟待解决的关键技术问题。

关键词： CMOS 图像传感器；辐照损伤；总剂量效应；位移效应

中图分类号： TN386.5；O605　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0839－09

Simulation Research Progress of Radiation Damage Effects on CMOS Image Sensors

WANG Zujun[1,2], LAI Shankun[2], YANG Xie[3], JIA Tongxuan[2], HUANG Gang[2], NIE Xu[2]

(1. State Key Lab. of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, CHN; 2. Xiangtan University, School of Materials Science and Engineering, Xiangtan 411105, CHN; 3 Xi'an Research Institute of High-Technology, Xi'an 710024, CHN)

Abstract: The problems of radiation damage suffered by the CMOS image sensors (CISs) in space radiation or nuclear radiation environments have been paid much attention. The simulation researches of the CIS will be helpful to reveal the mechanism of radiation damage in the CISs, and then develop the radiation-resistant reinforced design, so as to improve the ability of the radiation resistance of the CISs. The simulation research progress of radiation damage effects in the CISs at home and abroad was briefly introduced. Combining the radiation effect simulation of the electronic components with a lot of practical experience in radiation experiments developed by the project team, the simulation methods of radiation damage effect in the CISs were discussed in the aspects of device physical modeling, clock driving circuit modeling, radiation damage effect modeling and simulation results verification. The key problems that need to be solved in the simulation researches of radiation damage effects in the CISs were analyzed and summarized.

Key words: CIS; radiation damage; total ionizing dose effects; displacement effect

0　引言

互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器(CIS)是一种采用 CMOS 工艺，将图像传感器的像元阵列、时序控制、信号处理、A/D 转换及接口电路等集成于一体的可见光图像传感器[1-3]。与电荷耦合器件(CCD)相比，CMOS 图像传感器具有功耗低、成本低、控制电路简单、能随机读取信号、抗总剂量能力强等优点，在可见光成像应用的诸多领域正

收稿日期：2022－04－15.
基金项目：国家自然科学基金项目(U2167208，11875223)；国家重点实验室基金项目(SKLIPR1803，SKLIPR2012，SKLIPR2113).
* **通信作者：**王祖军　**E-mail：**wzj029@qq.com

逐渐替代 CCD。然而,CIS 在辐射环境中应用时,会受到辐射损伤的影响,严重时甚至导致功能失效。大量的辐照实验研究结果表明,CIS 在空间辐射环境、核辐射环境、加速器及粒子探测等实验室辐射环境、半导体掺杂及刻蚀等工艺辐射环境下工作时遭受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[1-6]。

近 30 年来,对 CIS 辐照损伤效应的研究主要以辐照实验为主。国内外的多个研究团队通过开展 CIS 的质子[5-10]、中子[8-15]、伽马射线[16-21]、电子[21-22]、重离子[22-23]、α 粒子[24]、X 射线[25-26]等辐照实验研究,得到了辐射粒子或射线诱发 CIS 敏感参数退化的实验规律,为了解和掌握 CIS 对辐照损伤的敏感度和开展抗辐射加固研究提供了实验技术支持。然而,随着 CIS 生产工艺技术的快速发展,大阵列、高性能的 CIS 不断涌现,用于 CIS 辐照实验的芯片成本不断提高,且国内高能粒子辐射源的机时有限,导致 CIS 辐照实验的成本较高。CIS 辐照损伤效应的仿真模拟研究逐渐受到重视。通过对 CIS 辐照前后的性能进行仿真模拟,可得到辐照前后的器件特性,在抗辐射加固设计中可以减少“设计-制造-实验”次数[27]。此外,通过对辐照损伤效应的仿真模拟还可得到辐照实验难以获取的重要信息,如辐照前后 CIS 信号电荷转移过程中的载流子浓度分布、电场分布、电势分布等的变化情况,以有助于深入揭示辐照损伤效应机理。

目前,对 CIS 辐照损伤效应的仿真模拟研究相对较少[28-34],在器件建模、辐照损伤效应建模方法、仿真模拟结果校验等方面还存在诸多难题。本文基于 20 多年来研究团队在电子元器件辐照损伤效应仿真模拟研究方面的实践经验积累[34-42],结合已开展的大量光电图像传感器(CIS,CCD)辐照效应实验研究基础,从 CIS 器件建模、时序驱动电路建模、辐照损伤效应建模、仿真模拟结果校验等方面探讨了 CIS 的辐照损伤效应仿真模拟方法,综述了 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究进展,分析总结了当前在 CIS 辐照效应仿真模拟研究中亟待解决的关键技术问题。

1 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究进展及需要解决的关键技术问题

20 世纪 90 年代,随着 CMOS 集成电路制作工艺技术的快速发展,CIS 的性能得到显著提升,应用领域也不断拓展,CIS 的辐照损伤效应问题也开始受到广泛关注。

国外开展 CIS 辐照效应实验研究较早。1997 年,Hancock 等对 1.2 μm 标准 CMOS 工艺研制的 CIS 的总剂量效应进行了辐照实验研究[4]。随后,Hopkinson,Bogaerts,Eid,Goiffon 等分别开展了 0.7,0.5,0.35,0.18 μm 标准 CMOS 工艺研制的 CIS 的总剂量效应辐照实验研究,得到了不同 CMOS 工艺尺寸 CIS 的总剂量效应辐照实验规律[5-6,16-17]。Virmontois 等开展了质子和中子辐照 CIS 诱发位移损伤效应的实验研究[8-9]。Lalucaa 等开展了重离子辐照 CIS 诱发单粒子效应的实验研究[23]。国内开展 CIS 辐照损伤效应研究起步较晚。2010 年前,仅少数单位零星开展了 CIS 的 ^{60}Coγ 射线辐照实验,初步得到了 CIS 辐照后的图像输出特性[43-44]。2013 年以来,王祖军研究团队对基于 0.35 μm,0.18 μm,65 nm CMOS 工艺 CIS 的质子、中子、电子、^{60}Co γ 射线、X 射线、重离子辐照进行了实验研究,分析了不同剂量率、不同积分时间、不同偏置条件辐照下的总剂量效应实验规律[10,19-20]和不同能量、不同入射角度、不同注量率辐照下质子、中子、电子的位移效应实验规律[10-11,13-14,26]。2014 年,汪波等对国产 0.5 μm CMOS 工艺 3T CIS 的 ^{60}Coγ 射线总剂量效应进行了辐照实验研究,获得了器件饱和输出信号、像元单元输出信号、暗信号等参数随总剂量增大的变化规律[45]。2019 年,蔡毓龙等开展了国产 0.18 μm CMOS 工艺 4T 钳位光电二极管(PPD)CIS 的 ^{60}Coγ 射线总剂量效应辐照试验,分析了满阱容量随总剂量退化的物理机制[46]。大量辐照实验研究为了解 CIS 的抗辐射能力提供了实验依据,为开展 CIS 辐照损伤效应仿真建模和模拟结果校验工作提供了基础实验数据支持。

1.1 国外 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究进展

国内外已开展了大量 CIS 辐照损伤效应实验研究,但对 CIS 辐照损伤效应的仿真模拟研究相对较少。通常采用基于计算机辅助设计(Technology Computer Aided Design,TCAD)的商用半导体器件仿真模拟软件(如 Sentaurus TCAD,Silvaco TCAD,Medici TCAD 等)进行 CIS 的仿真模拟。2010 年以来,Goiffon 研究团队应用 Sentaurus TCAD 工具对 CIS 的像素单元进行了仿真建模,开展了总剂量效应诱发氧化层陷阱电荷和界面态对

PPD CIS 像素单元的电势、场强分布及暗信号影响的仿真模拟，为分析 CIS 总剂量损伤机理提供了理论依据[25,28]。该团队还通过 TCAD 工具对 PPD CIS 的钳位电压测试原理进行了验证，模拟了像素信号的读出模式[47]。Goiffon 等在开展 10 keV X 射线辐照 CIS 诱发的总剂量损伤规律研究时，发现仅用肖特基-里德-霍尔(SRH)产生过程来解释总剂量损伤诱发 CIS 暗信号退化的实验现象时与实际测试结果存在差异。为揭示总剂量损伤诱发 CIS 暗信号增大的退化机理，分析总剂量诱发缺陷与暗信号增大之间的定量关系，Goiffon 等以 0.18 μm 标准 CMOS 工艺制备的两种光电二极管和多种厚氧化物场效应管为研究对象，开展了总剂量范围为 3 krad(Si)～1 Mrad(Si)的 10 keV X 射线辐照实验。研究结果表明：当总剂量达到 300 krad(Si)时，辐射诱发的氧化层陷阱电荷和界面态对暗电流增大都有显著作用，而且随着总剂量增大，当氧化层陷阱电荷延伸空间电荷区到氧化层界面时，会增强界面态的 SRH 产生电流，从而导致辐射诱发暗电流增大程度大于界面态的 SRH 产生电流引起的暗电流增大程度。通过 TCAD 工具仿真模拟，证实了在总剂量约 6 krad(Si)～300 krad(Si)范围时辐射诱发的氧化层陷阱电荷延伸空间电荷区到氧化层界面时，会增强界面态的 SRH 产生电流[25]。

2012 年，Place 等研究了 γ 射线辐照下 4T PPD CIS 像素单元在不同沟道隔离(Trench Isolation)、像元几何尺寸(Pixel Geometry)、埋氧层(Buried Oxide)等工艺特征下暗电流和时域噪声的退化情况，并结合 TCAD 仿真模拟，证实了通过调节像素的沟道隔离和埋氧层可以改变总剂量效应诱发暗电流的退化程度；时域噪声的退化主要由总剂量效应导致像素结构中的源跟随器性能退化引起[48]。2012 年，Zucca 等基于 0.18 μm CMOS 工艺研制了一种用于快粒子跟踪的 CIS，并研究了其在粒子探测辐射环境下的性能退化情况，通过开展 TCAD 仿真模拟，验证了该 CIS 的抗辐射性能[49]。

2013 年，Ratti 等开展了一种 CIS 在非电离辐照损伤下电荷损失的建模研究，建立了基于蒙卡模拟的辐照诱发电荷损失模型，在 1 MeV 等效中子注量为 1×10^{14} n/cm^2 时，通过分别开展 TCAD 仿真模拟和蒙卡模拟，比较了两种模拟方法在辐照诱发电荷损失模拟计算方面的特点[50]。

2014 年，Aurora 等设计了一种适用于空间辐射环境的新型抗辐射加固 CIS 像元结构，采用 TCAD 仿真工具，对设计的新型抗辐射加固 3D 像元结构的电性能进行了仿真模拟。基于改进的内部栅场效应晶体管(Modified Internal Gat Field Effect Transistor，MIGFET)设计，提出了一种双 MIGFET 像素结构，TCAD 仿真模拟结果表明：该像素结构能显著减小界面态产生的暗信号噪声、$1/f$ 以及具备抗晕保护等抗辐射性能[51]。

2017 年，Marcelot 等对一种具有抗辐射能力的 4 管(4T)PPD CIS 的 TCAD 进行了仿真模拟研究，揭示了 4T PPD 像元结构有效减少辐照诱发暗电流增大程度的物理机制，并通过辐照实验验证了仿真模拟结果的有效性。在分析辐照诱发暗电流增大物理机制的基础上，通过 TCAD 仿真模拟，提出了可通过给 3T PD 像素结构的相邻栅(Adjacent Gate)、4T PPD 像素结构的转移栅(TG)加适当的正偏压，可有效减小辐照诱发暗电流增大程度[52]。

2020 年，Rizzolo 等以一种在强辐射环境下应用的抗辐射加固型 CIS 为研究对象，研究其在 1 MeV 等效中子注量为 8.1×10^{14} n/cm^2 时的强辐射条件下性能退化情况。通过开展中子位移损伤对不同掺杂浓度下 CIS 耗尽层影响的 TCAD 仿真模拟研究，证实了中子位移损伤诱发转换增益因子(CVF)和量子效率(QE)下降主要归因于高中子注量辐照(通常在中子注量大于 1×10^{14} n/cm^2 时)对 CIS 辐射敏感区域掺杂浓度的影响(减小了耗尽区体积)，TCAD 仿真模拟结果表明：辐照前，耗尽区体积为 48 μm^3；中子注量为 8.1×10^{14} n/cm^2 辐照后，耗尽区体积为 35 μm^3[53]。2020 年，Roch 等以砷(As)浅掺杂和磷(P)基深掺杂的 3T PD 结构抗辐射加固型 CIS 为研究对象，分别开展了 50 MeV 质子和 22 MeV 中子辐照损伤效应研究，研究结果表明：对上述两种掺杂方式研制的 CIS，辐照诱发随机电报噪声(RTS)退化的平均值无明显差异；P 基深掺杂对辐照损伤诱发暗电流和 RTS 增大的影响很小。TCAD 仿真模拟结果表明：P 基深掺杂的 3T PD 结构像元中存在高场强，其对总剂量损伤诱发的界面态和氧化层陷阱电荷起到增强作用[54]。

对国外多个研究团队已发表的 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究综合分析表明，通过 CIS 辐照损伤效应的仿真模拟，在定性分析 CIS 的辐照损伤机理和开展抗辐射加固设计方面取得了良好的应用效果，但国外文献主要侧重介绍 CIS 辐照损伤效应仿

真模拟研究结果，对器件建模（如时序驱动电路模型、光照模型）、辐照效应建模（如总剂量效应模型、位移效应模型）及模型校验方面的介绍较少，尚未建立成熟的 CIS 辐照损伤效应仿真模拟方法。

1.2 国内 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究进展

国内仅有少数单位开展了 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究。2014 年以来，王祖军研究团队应用 Sentaurus TCAD 工具开展了 4T PPD CIS 像素单元的总剂量效应和位移效应仿真模拟研究[30-32,55-56]。重点开展了 CIS ^{60}Coγ 射线总剂量辐照损伤效应的仿真建模研究，构建了 4T PPD CIS 像素单元的几何结构，通过引入光照模型、载流子迁移率模型、SRH 复合模型、缺陷模型，实现了信号电荷在像素单元的动态转移过程和 PPD 区域的光电效应仿真模拟；应用中性空穴充当正氧化物陷阱电荷的缺陷模型，对总剂量损伤诱发 4T PPD CIS 像素单元的暗电流和图像滞留增大现象进行了仿真模拟[30,55-56]，结合辐照实验结果[19-20,26]，分析了 CIS 总剂量辐照损伤机理；构建了基于电荷转移路径的势阱模型、势垒模型、势阱和势垒的混合模型，通过仿真模拟验证了像素单元结构中 PPD 区域和转移栅（TG）交界区域是总剂量损伤诱发图像滞留增大的敏感区域，分析了总剂量损伤诱发图像滞留退化的损伤机理，揭示了空间辐射诱发氧化层陷阱电荷和界面态导致 PPD CIS 像素单元电势、电场分布变化的物理机制。

王祖军研究团队还开展了 CIS 质子、中子位移辐照损伤效应的仿真模拟研究[31-32,46]。分析了不同注量质子辐照对 PPD 电容、TG 沟道势垒以及浮置节点（FD）与衬底形成的耗尽层的影响，初步揭示了质子辐照诱发满阱容量减小的损伤机理，初步提出了 CIS 满阱容量抗质子辐照加固设计方案[31]。在中子辐照损伤效应建模的基础上，分别仿真模拟了不同中子辐照注量、不同积分时间、不同缺陷类型条件下，中子位移辐照损伤诱发 CIS 暗信号和电荷转移损失（CTI）的退化规律，分析了 PPD CIS 的暗信号和 CTI 均随中子辐照注量增大而增大的变化趋势及退化机理，比较了中子位移损伤诱发的多空位中心（$E_c-0.46$ eV）、双空位中心（$E_c-0.42$ eV）、C_i-O_i 中心（$E_V+0.36$ eV）等不同体缺陷对暗信号和 CTI 退化的影响程度[32]，揭示了空间辐射诱发的势垒和势阱在 PPD CIS 像元与 TG 耦合转移间引起信号转移损失的物理机制。

2020 年，尹姝婷应用 Silvaco TCAD 仿真模拟软件对 4T CIS 基本像素结构的 X 射线总剂量效应和质子位移效应进行了初步的仿真模拟研究[57]。初步探究了总剂量损伤对 CIS 基本像素结构的电荷转移路径、传输栅性能的影响，仿真模拟结果表明：采用阈值调整层的像素传输栅阈值电压负向偏移减小、漏电流减小，从而降低了总剂量损伤对 4T 像素单元性能的影响；在浅沟隔离层（STI）和 PPD 之间添加隔离层可有效减小辐射诱发暗信号和满阱容量退化。此外，还初步探究了不同阈值调整层、不同 STI-PPD 隔离层、不同 PPD 长度时质子位移损伤对 4T 像素单元暗信号的影响。但该文的辐射效应仿真模拟研究缺少辐照实验结果校验，也没有考虑质子能量、质子电离损伤的影响，对位移损伤建模研究不够深入。

2020 年，魏莹等应用 Silvaco TCAD 工具构建了 4T-PPD CIS 像素单元的二维仿真结构，初步开展了 ^{60}Coγ 射线总剂量辐照下不同影响因素导致 CIS 暗电流退化的机理分析[33]。仿真模拟结果表明：总剂量损伤诱发暗电流增大主要来源于氧化层与体硅的界面处，总剂量诱发的带正电的氧化层陷阱电荷增大了耗尽区和界面态的接触面积；总剂量诱发的界面态使表面复合率增大，仿真模拟结果与辐照实验结果基本一致。但该文的辐射效应仿真模拟研究没有考虑在垂直二维结构图形方向中所包含的 STI 对暗电流增大带来的影响。

2021 年，宋辰昱等应用 Sentaurus TCAD 工具初步研究了总剂量损伤对 CIS 中 PPD 钳位电压的影响[34]。仿真结果表明：STI 产生的耗尽区会影响 PPD 中钳位（PIN）层与地极之间的电学接触，总剂量诱发 STI 中产生的带正电的氧化层陷阱浓度足够大（大于 3×10^{16} cm^{-3} 时），STI 附近的耗尽区将 PPD 中的 PIN 层包围（PIN 层与地极电学隔离），PIN 层电势会受到注入电势的影响，导致当 PPD 复位时所需的注入电势增大，即钳位电压增大。

国内已开展的 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究在器件建模（特别是时序驱动电路模型、光照模型）、总剂量效应和位移效应建模、模型校验等方面都取得了明显的进展，目前已初步建立了 CIS 辐照损伤效应仿真模拟方法。CIS 辐照损伤效应的仿真模拟研究结果在辐照损伤机理分析和抗辐射加固设计方面取得了较好的应用，但在提高 CIS 辐射敏感参数仿真模拟结果可信度方面还需要深入研究，需

要进一步完善器件建模、辐照效应建模、模型校验等方面的工作。

1.3 CIS 辐照损伤效应仿真模拟需要解决的关键技术问题

通过梳理国内外 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究进展表明：目前仿真模拟在辅助定性分析 CIS 辐照损伤机理方面取得了较好的应用效果，而且仿真模拟有助于开展 CIS 的抗辐射加固设计研究，但在提高 CIS 辐射敏感参数仿真模拟结果可信度及实验结果校验方面还需要深入研究。当前，开展 CIS 辐照损伤效应的仿真模拟在效应建模、模型校验等方面仍需解决如下关键技术问题：

(1)开展 CIS 的辐照损伤效应仿真建模时，辐照诱发缺陷的类型、分布、浓度、能级等信息是基于 TCAD 缺陷模型仿真模拟辐照诱发 CIS 性能退化的关键信息，然而，关于辐照 CIS 诱发缺陷产生相关的实验测试结果报道较少，实际在开展 CIS 辐照损伤效应仿真模拟建模过程中通常以文献中报道相关材料的辐照损伤缺陷信息或参考相关经验公式开展辐照效应建模，而不同结构和掺杂工艺的 CIS 受同一种粒子辐照后，在材料中产生的缺陷类型、分布、浓度、能级会存在一定的差异。因此，完善辐照损伤效应建模需要针对性设计辐照实验、建立辐照诱发缺陷的数据库，在辐照实验结果校验的基础上进行仿真模型的修正和完善，从而提高 CIS 辐射敏感参数仿真模拟结果的可信度。

(2)大量开展辐照 CIS 诱发缺陷的实验测试难度较大、成本较高，深入揭示 CIS 辐照损伤效应机理，需要研究辐射诱发微观缺陷产生及随时间演化过程的模拟计算方法。实现从辐射粒子或射线入射到 CIS 导致能量沉积，诱发微观缺陷产生到稳定过程，稳态缺陷导致器件性能退化的全物理图景联合仿真模拟研究，需要解决蒙特卡罗模拟、分子动力学模拟、动力学蒙特卡罗模拟、第一性原理、TCAD 仿真等方法相互衔接难题。由于 TCAD 中的缺陷模型简化了辐射粒子在 CIS 内产生缺陷的演化过程，因此需要结合蒙特卡罗模拟、分子动力学模拟、动力学蒙特卡罗模拟、第一性原理等方法来模拟辐射损伤诱发微观缺陷特征信息及演化过程。

(3)CIS 工作在空间辐射环境或核辐射环境中时，会同时遭受总剂量效应、位移效应、单粒子效应的影响，而开展不同类型辐照损伤耦合作用时的协和效应实验及测试工作较复杂，仅通过协和辐照效应实验很难深入揭示不同效应之间的耦合作用机制，需要借助仿真模拟工具从微观物理机制层面揭示不同辐照损伤效应之间的耦合作用机理，需要解决开展 CIS 不同类型辐照损伤效应耦合作用时的协和效应仿真建模难题，如在空间辐射环境中 CIS 总剂量辐照损伤效应和位移辐照损伤效应的协和效应仿真建模。

2 CIS 辐照损伤效应仿真模拟方法

CIS 辐照损伤效应的仿真模拟是指通过建立器件物理模型、辐照损伤效应模型，采用仿真模拟计算，求解半导体器件物理的基本方程(如泊松方程、载流子连续性方程、电流密度方程等)，并对器件内部辐照效应的基本物理过程进行仿真模拟分析，模拟器件辐照后内部载流子浓度、各区域电势、场强等的分布情况，并获得辐照前后 CIS 辐射敏感参数的退化规律。通常采用基于 TCAD 的商用半导体器件仿真模拟软件开展辐照损伤效应仿真模拟。Gummel 在 1964 年第一次提出了完整的双极型半导体晶体管的一维仿真模拟[58]；Loeb 等在 1968 年发表了半导体器件的二维仿真模拟相关论文[59]。此后，随着大规模集成电路的发展，TCAD 仿真软件得到了快速发展，当前主流应用的 TCAD 仿真软件包括 Sentaurus TCAD，Silvaco TCAD，Medici TCAD 等。王祖军研究团队基于上述 TCAD 仿真软件，通过建立相应的辐照损伤效应模型(如电离总剂量辐照损伤效应模型、位移辐照损伤效应模型、瞬时剂量率效应模型等)，开展了一系列电子元器件(如 CCD[27,35,40]、CIS[30-33,42]、PIN 光电二极管[37]、太阳电池[36,41]、半导体激光器[60]、光电耦合器[61]、超深亚微米 NMOSFET[38]、锗硅异质结器件[39]等)的辐照损伤效应仿真模拟研究。在此基础上，初步形成了 CIS 辐照损伤效应的仿真模拟方法。

开展 CIS 辐照损伤效应的仿真模拟建模时，首先对 CIS 的像素单元结构进行分析，结合 CIS 版图设计、制造工艺等信息，对 CIS 像素单元进行几何模型构建和物理参数提取，如 PPD CIS 的像素单元建模包括提取(Pre-metal Dielectric，PMD)、浅沟隔离(STI)、栅氧化层、转移栅(TG)、空间电荷区(SCR)等部分的材料种类、几何尺寸、结深、掺杂浓度、电极定义等信息，进而开展 CIS 像素单元的器件模型构建。图 1 给出了 γ 射线辐照 PPD CIS 像素单元的纵向剖面示意图。

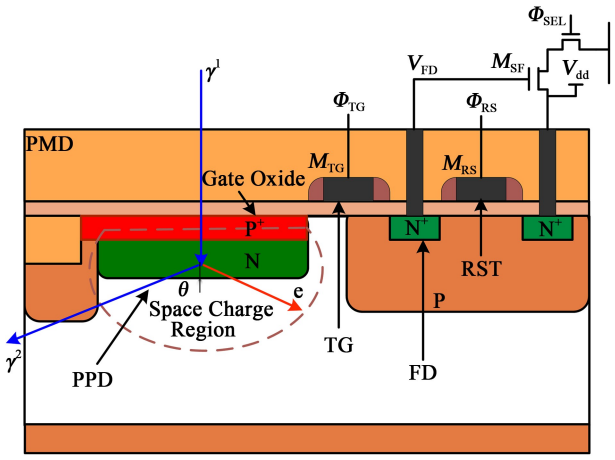


图 1 γ射线辐照 PPD CIS 像素单元的纵向剖面示意图

在 CIS 像素单元器件建模的基础上，基于 TCAD 仿真模拟软件的器件结构编辑工具进行网格划分及优化、掺杂分布、电极定义等；然后，开展 CIS 时序驱动电路设计，并通过器件物理特性仿真工具求解半导体器件物理的基本方程，从而获得 CIS 的特征参数及电学特性；最后，通过对 CIS 的仿真模拟结果与实验测试结果（特征参数及电学特性）进行比对，开展器件模型校验及修正，图 2 给出了 CIS 辐照损伤效应仿真模拟流程图。

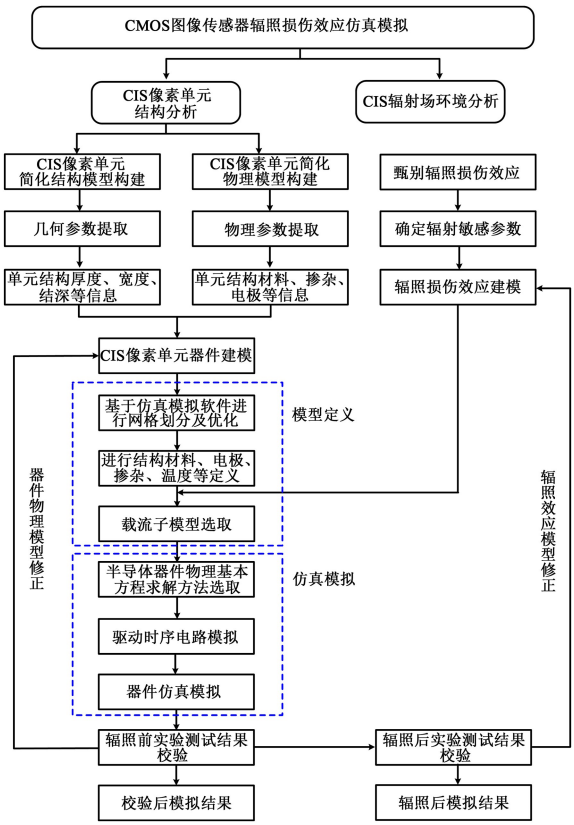


图 2 CIS 辐照损伤效应仿真模拟流程图

在 CIS 像素单元器件仿真模拟的基础上，通过辐射场环境分析，确定辐射粒子或射线种类及辐照损伤效应类别，开展辐照损伤效应建模；将建立的辐照损伤效应模型引入 CIS 像素单元进行仿真模拟计算，得到辐照后 CIS 的辐射敏感参数退化规律及电学特性，如载流子浓度分布、电场分布、电势分布等情况的变化；最后，通过对 CIS 的辐照损伤效应仿真模拟结果与辐照实验测试结果进行比对，开展 CIS 辐照损伤效应的模型校验和修正。

3 总结与展望

随着大规模集成电路技术的发展，CIS 的生产工艺尺寸不断减小，在强辐射环境下的应用不断增多，了解和掌握 CIS 对辐照损伤的敏感度和开展抗辐射加固研究的重要性日益突显。与开展 CIS 辐照实验研究相比，开展 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究有助于深入揭示 CIS 的辐照损伤机理。国内外已开展的辐照损伤效应仿真模拟研究通过揭示 CIS 的辐照损伤机理，为抑制辐射敏感参数退化和抗辐射加固设计提供了理论依据。然而，在辐照损伤效应仿真模拟方面仍有诸多问题，如联合仿真模拟方法、协和效应建模与仿真、仿真模型校验等工作需要深入开展研究。课题组拟从以下方面深入开展 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究：(1)结合蒙特卡罗模拟、分子动力学模拟、动力学蒙特卡罗模拟、第一性原理、TCAD 仿真等方法，开展 CIS 辐照损伤效应全物理图景的联合仿真模拟研究，在辐照实验数据校验的基础上，不断完善 CIS 辐照损伤效应仿真模型，提高仿真模拟数据的可信度，实现仿真模拟数据与辐照实验数据共同组成评估 CIS 辐照损伤的基础数据支撑；(2)开展 CIS 不同类型辐照损伤耦合作用时的协和效应仿真模拟研究，通过仿真模拟从微观物理机制层面揭示不同辐照损伤效应之间的耦合作用机理，如开展空间辐射环境中应用的 CIS 遭受总剂量损伤效应和位移损伤效应的协和效应仿真模拟；(3)开展不同工艺参数、不同像素结构 CIS 辐照损伤效应的仿真模拟研究，通过仿真模拟定位辐照损伤敏感区域，再进行工艺参数优化、像素结构优化，综合确定最佳的性能指标设计，为 CIS 辐照损伤评估和抗辐射加固设计提供理论依据。

本文通过梳理 CIS 辐照损伤效应仿真模拟研究方面的进展情况，从 CIS 器件建模、辐照损伤效应建模方法、仿真模拟结果校验等方面探讨了 CIS

辐照损伤效应的仿真模拟方法，分析总结了 CIS 辐照效应仿真模拟研究中亟待解决的关键技术问题，为系统深入开展 CIS 辐照效应规律、损伤机理、效应评估、抗辐射加固设计、实验方法标准或规范制定等研究提供理论依据。

参考文献：

[1] 王祖军，林东生，刘敏波，等. CMOS 有源像素图像传感器的辐照损伤效应[J]. 半导体光电，2014，35(6)：945-950.
Wang Zujun，Lin Dongsheng，Liu Minbo，et al. Radiation damage effects on the CMOS active pixel sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics，2014，35(6)：945-950.

[2] 王祖军，刘　静，薛院院，等. CMOS 图像传感器总剂量辐照效应及加固技术研究进展[J]. 半导体光电，2017，38(1)：1-7.
Wang Zujun，Liu Jing，Xue Yuanyuan，et al. Progress of total ionizing dose radiation effects and hardening technology on the CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics，2017，38(1)：1-7.

[3] 王祖军，薛院院，刘卧龙，等. CMOS 图像传感器西安 200 MeV 质子应用装置 H-辐照效应实验研究[J]. 现代应用物理，2021，12(3)：126-139.
Wang Zujun，Xue Yuanyuan，Liu Wolong，et al. H-beams irradiation effect of CMOS image sensor at Xi'an 200 MeV proton application facility[J]. Modern Appl. Phys.，2021，12(3)：126-139.

[4] Hancock B R，Soli G A. Total dose testing of a CMOS charged particle spectrometer[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，1997，44(6)：1957-1961.

[5] Cohen M，David J P. Radiation-induced dark current in CMOS active pixel sensors[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2000，47(6)：2485-2491.

[6] Hopkinson G R. Radiation effects in a CMOS active pixel sensor[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2000，47(6)：2480-2485.

[7] Bogaerts J，Dierickx B，Meynants G，et al. Total dose and displacement damage effects in a radiation-hardened CMOS APS[J]. IEEE Trans. Electron Devices，2003，50(1)：84-90.

[8] Virmontois C，Goiffon V，Magnan P，et al. Displacement damage effects due to neutron and proton irradiations on CMOS image sensors manufactured in deep submicron technology[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2010，57(6)：3101-3108.

[9] Virmontois C，Goiffon V，Magnan P，et al. Similarities between proton and neutron induced dark current distribution in CMOS image sensors[J]. IEEE Tran. on Nuclear Science，2012，59(4)：927-936.

[10] Wang Zujun，Xue Yuanyuan，Chen Wei，et al. Comparison of the dark signal degradation induced by gamma ray，proton，and neutron radiation in pinned photodiode CMOS image sensors[J]. Scientia Sinica Informationis，2019，62(6)：069403.

[11] Wang Zujun，Xue Yuanyuan，Chen Wei，et al. Fixed pattern noise and temporal noise degradation induced by radiation effects in pinned photodiode CMOS image sensors[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2018，65(6)：1-7.

[12] Deveaux M，Claus G，Deptuch G，et al. Neutron radiation hardness of monolithic active sensors for charged particle tracking[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A，2003，512：71-76.

[13] Wang Z J，Huang S Y，Liu M B，et al. Displacement damage effects on CMOS APS image sensors induced by neutron irradiation from a nuclear reactor[J]. AIP Advances，2014，4(7)：2594.

[14] 王祖军，薛院院，陈　伟，等. 中国散裂中子源白光中子辐照诱发 CIS 单粒子瞬态响应和位移损伤的实验研究[R]. 中国核科学技术进展报告，2019(7)：7-13.
Wang Zujun，Xue Yuanyuan，Chen Wei，et al. The experimental research of single particle transient response and displacement damage in CISs induced by Back-n in China spallation neutron source [R]. Progress Report on China Nuclear Science & Technology，2019(7)：7-13.

[15] Rizzolo S，Roch A L，Marcelot O，et al. High displacement damage dose effects in radiation hardened CMOS image sensors[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2020，67(1)：1256-1262.

[16] Eid E S，Chan T Y，Fossum E R，et al. Design and characterization of ionizing radiation-tolerant integrated CMOS sensors up to 30 Mrad(Si) total dose[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2001，48(6)：1796-1806.

[17] Goiffon V，Magnan P，Saint O，et al. Total dose evaluation of deep submicron CMOS imaging technology through elementary device and pixel array behavior analysis[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2008，55(6)：3494-3501.

[18] Hopkinson G R. Radiation effects on a radiation-tolerant CMOS active pixel sensor[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2004，51(5)：2573-2762.

[19] Wang Z J，Liu C J，Ma Y，et al. Degradation of CMOS APS image sensors induced by total ionizing dose radiation at different dose rates and biased conditions[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2015，62(2)：527-533.

[20] Wang Z J，Ma W Y，Huang Y S，et al. Characterization of total ionizing dose damage in COTS CMOS image sensors [J]. AIP Advances，2016，6(3)：35205.1-35205.10.

[21] Meng X T，Kang A G，Li J H，et al. Effects of electron and gamma-ray irradiation on CMOS analog image sensors[J]. Microelectronics Reliability，2003，43(7)：1151-1155.

[22] Beaumel M，Herve D，Van Aken D，et al. Proton，electron，and heavy ion single event effects on the HAS2 CMOS image sensor[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2014，61(4)：1909-1917.

[23] Lalucaa V, Goiffon V, Magnan P, et al. Single event effects in 4T pinned photodiode image sensors[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2013, 60(6): 4314-4322.

[24] Belloir J, Goiffon V, Virmontois C, et al. Dark current spectroscopy on alpha irradiation pinned photodiode CMOS image sensor[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2016, 63(4): 2183-2192.

[25] Goiffon V, Virmontois C, Magnan P, et al. Analysis of total dose-induced dark current in CMOS image sensors from interface state and trapped charge density measurements[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2010, 57(6): 3087-3094.

[26] Wang Z J, Xue Y Y, Li G, et al. Comparison of transient response characteristics in the CIS detector irradiated by gamma rays and X rays[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2019, 924: 225-229.

[27] 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.

[28] Goiffon V, Estribeau M, Marcelot O, et al. Radiation effects in pinned photodiode CMOS image sensors: pixel performance degradation due to total ionizing dose[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2012, 59(6): 2878-2887.

[29] Marcelot O, Goiffon V, Nallet F, et al. Pinned photodiode CMOS image sensors TCAD simulation: In-depth analysis of in-pixel pinning voltage measurement for a diagnostic tool [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, 64(2): 455-462.

[30] Liu J, Chen W, Wang Z J, et al. Simulation and measurement of total ionizing dose radiation induced image lag increase in pinned photodiode CMOS image sensors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2017, 856: 32-35.

[31] 杨 勰，王祖军，尚爱国，等. 质子辐照下4T CMOS图像传感器满阱容量退化模拟研究[J]. 现代应用物理，2021，12(3)：030605.1-030605.9.

Yang Xie, Wang Zujun, Shang Aiguo, et al. Simulation of full well capacity degradation of 4T CMOS image sensor irradiated by proton[J]. Modern Appl. Phys., 2021, 12(3): 030605.1-030605.9.

[32] 王祖军，杨 勰，赖善坤，等. CMOS图像传感器中子位移辐照损伤效应仿真模拟研究[J]. 现代应用物理，2022，13(3)：030601.1-030601.10.

Wang Zujun, Yang Xie, Lai Shankun, et al. Simulation of the neutron displacement radiation effects on CMOS image sensors [J]. Modern Appl. Phys., 2022, 13(3): 030601.1-10.

[33] 魏 莹，文 林，李豫东，等. 电离总剂量效应对4T CMOS图像传感器暗电流影响的数值仿真[J]. 数值计算与计算机应用，2020，41(2)：143-150.

Wei Ying, Wen Lin, Li Yudong, et al. Simulations of the total ionization dose effect on 4T CMOS image sensor dark current [J]. J. on Numerical Methods and Computer Applications, 2020, 41(2): 143-150.

[34] 宋辰昱，申人升，曲 杨，等. 总剂量效应对CMOS图像传感器中光电二极管钳位电压的影响[J]. 半导体光电，2021，42(3)：321-326.

Song Chenyu, Shen Rensheng, Qu Yang, et al. Influence of TID effect on pinning voltage of CIS [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 321-326.

[35] 王祖军，唐本奇，张 勇，等. 中子辐照诱导CCD电荷转移效率降低的数值模拟与分析[J]. 半导体光电，2005，26(增刊)：49-52.

Wang Zujun, Tang Benqi, Zhang Yong, et al. Radiation damage effects on the CMOS active pixel sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(Supplement): 49-52.

[36] 王祖军，唐本奇，张 勇，等. GaAs太阳电池1 MeV电子辐射效应数值模拟[J]. 核电子学与探测技术，2005，25(1)：97-103.

Wang Zujun, Tang Benqi, Zhang Yong, et al. Simulation of radiation effects on GaAs solar cell by 1 MeV electrons[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, 25(1): 97-103.

[37] 王祖军，刘以农，陈 伟，等. 硅PIN光电二极管γ电离脉冲辐射的数值模拟[J]. 半导体光电，2009，30(5)：681-683.

Wang Zujun, Liu Yinong, Chen Wei, et al. Simulation on photocurrent of Si PIN photodiode induced by γ ionization pulse radiation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(5): 681-683.

[38] 王祖军，陈 伟，王桂珍，等. 中子辐照超深亚微米NMOSFET的数值模拟研究初探[C]// 第二届全国核技术及应用学术交流会论文集，2009：179-185.

Wang Zujun, Chen Wei, Wang Guizhen, et al. Simulation for the neutron radiation effects on 0.18 μm LDD NMOSFET[C]// Proc. Second National Conf. on Nuclear Technology and Applied Academic Exchange, 2009: 179-185.

[39] 王祖军，刘书焕，唐本奇，等. 1 MeV中子辐照SiGe HBT器件的数值模拟[J]. 核电子学与探测技术，2010，30(3)：321-327.

Wang Zujun, Liu Shuhuan, Tang Benqi, et al. Numerical simulation of SiGe HBT irradiated by 1 MeV neutron beam[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(3): 321-327.

[40] 王祖军，刘以农，陈 伟，等. 质子辐照CCD诱发暗信号增大[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2010，50(9)：1484-1488.

Wang Zujun, Liu Yinong, Chen Wei, et al. Proton irradiation induced dark signals in CCDs[J]. J. of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(9): 1484-1488.

[41] 李俊炜，王祖军，石成英，等. GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池不同能量质子辐照损伤模拟[J]. 物理学报，2020，69(9)：

295-305.

Li Junwei, Wang Zujun, Shi Chengying, et al. Modeling and simulating of radiation effects on the performance degradation of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells induced by different energy protons[J]. Acta Phys. Sinica, 2020, 69(9): 295-305.

[42] 杨　勰, 霍勇刚, 王祖军, 等. 位移损伤诱发 CMOS 图像传感器电荷转移损失退化的理论模拟研究[J]. 光子学报, 2022, 42(7): 0723002.

Yang Xie, Huo Yonggang, Wang Zujun, et al. Simulating analysis of transfer inefficiency degradation of CMOS image sensor induced by displacement damage [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 42(7): 0723002.

[43] Meng X T, Kang A G. Dark output characteristic of gamma ray irradiated CMOS digital image sensor[J]. Rare Metals, 2002, 21: 79-84.

[44] 孟祥提, 康爱国, 黄　强. γ 射线辐照对数字型彩色 CMOS 图像传感器输出特性的影响[J]. 原子能科学技术, 2004, 389(增刊): 231-215.

Meng Xiangti, Kang Aiguo, Huang Qiang. Effect of gamma ray irradiation on output characteristic of color CMOS digital image sensors [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 389(Suppl): 231-215.

[45] 汪　波, 李豫东, 郭　旗, 等. 0.5 μm 工艺 CMOS 有源像素传感器的总剂量辐射效应[J]. 发光学报, 2015, 36(2): 242-248.

Wang Bo, Li Yudong, Guo Qi, et al. Total dose effects in 0.5 μm CMOS active pixel image sensor [J]. Chinese J. of Luminescence, 2015, 36(2): 242-248.

[46] 蔡毓龙, 李豫东, 郭　旗, 等. γ 辐照下 4T CMOS 有源像素传感器的满阱容量退化机理[J]. 现代应用物理, 2019, 10(1): 010604-1-5.

Cai Yulong, Li Yudong, Guo Qi, et al. Degradation mechanism of full well capacity for 4T CMOS image sensors under γ-ray irradiation[J]. Modern Appl. Phys., 2019, 10(1): 010604.1-5.

[47] Marcelot O, Goiffon V, Nallet F, et al. Pinned photodiode CMOS image sensors TCAD simulation: In-depth analysis of in-pixel pinning voltage measurement for a diagnostic tool [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, 64(2): 455-462.

[48] Place S, Carrere J P, Allegret S, et al. Radiation effects on CMOS image sensors with sub-2 μm pinned photodiodes[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2012, 59(4): 909-917.

[49] Zucca S, Gaioni L, Ratti L, et al. Monolithic pixel sensors for fast particle trackers in a quadruple well CMOS technology[C]// 2012 IEEE Nuclear Science Symp. and Medical Imaging Conf. Record, 2012, N29(2): 1742-1749.

[50] Ratti L, Gaioni L, Traversi G, et al. Modeling charge loss in CMOS MAPS exposed to non-ionizing radiation[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2013, 60(4): 2574-2582.

[51] Aurora A M, Marochkin V V, Tuuva T. A novel radiation hard pixel design for space application[J]. Proc. of SPIE, 2014, 10563: 1056303.1-1056303.9.

[52] Marcelot O, Goiffon V, Rizzolo S, et al. Dark current sharing and cancellation mechanisms in CMOS image sensors analyzed by TCAD simulations[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, 64(12): 4985-4991.

[53] Rizzolo S, Goiffon V, Estribeau M, et al. Total-ionizing dose effects on charge transfer efficiency and image lag in pinned photodiode CMOS image sensors[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2018, 65(1): 84-91.

[54] Roch A L, Virmontois C, Paillet P, et al. Phosphorus versus arsenic: role of the photodiode doping element in CMOS image sensor radiation-induced dark current and random telegraph signal [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2020, 67(7): 1241-1250.

[55] 刘　静. PPD CMOS 图像传感器像素单元的总剂量效应仿真模拟研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017.

Liu Jing. Pixel simulation of total ionizing dose effect on PPD CMOS image sensor [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2017.

[56] Wang Z J, Xue Y Y, Liu J, et al. Analysis of image lag degradation in PPD CISs induced by total ionizing dose and displacement radiation damage[C]// 17th European Conf. on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2017: 1-5.

[57] 尹姝婷. CMOS 图像传感器像素的辐射效应仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

Yin Shuting. Simulation research on irradiation effect of CMOS image sensor pixel[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.

[58] Gummel H K. A self-consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculations [J]. IEEE Trans. on Electron devices, 1964, 11(10): 455-465.

[59] Loeb H W, Andrew R, Love W, et al. Application of 2-dimensional solutions of the Shockley-Poisson equation to inversion-layer MOST devices[J]. Electron. Lett., 1968, 4(17): 352-354.

[60] 宁　浩. 辐照诱发半导体激光器性能退化实验研究与仿真模拟[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.

Ning Hao. Experimental research and analogue simulation of the performance degradation of laser diode induced by radiation [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.

[61] 徐　瑞. 光电耦合器辐照效应实验及仿真模拟研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.

Xu Rui. Experimental and simulation study on irradiation effect of optocoupler[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.

作者简介：

王祖军(1979—),男,湖北省汉川市人,博士,研究员,从事光电器件及系统的辐照损伤效应研究。