光电技术及应用

DOI:10.16818/j.issn1001－5868.20241222001

CMOS图像传感器辐照损伤效应试验方法

王祖军*

（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）

摘　要： CMOS图像传感器（CIS）在辐射环境中应用时会遭受辐照损伤。在空间辐射或核辐射环境中CIS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。目前国内外的研究主要通过开展CIS不同辐射粒子或射线辐照试验来评估CIS在不同辐射环境下的辐照损伤效应，因此，建立CIS辐照损伤效应试验方法对准确评估其辐照损伤具有重要意义。文章主要从辐照试验源选取、试验流程、辐照偏置条件、试验要求等方面研究了CIS电离总剂量效应、位移效应、单粒子效应辐照试验方法，从而形成CIS辐照损伤效应试验方法，为开展CIS辐照损伤评估和抗辐射加固性能考核提供了试验技术支持。

关键词： CMOS图像传感器；辐照损伤；电离总剂量效应；位移效应；单粒子效应；辐照试验方法

中图分类号： TN386.5；O605　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0180－09

Test Methods for Radiation Damage Effects on CMOS Image Sensors

WANG Zujun

（National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, CHN）

Abstract: CMOS image sensor (CIS) will suffer radiation damage when it is used in radiation environment. The radiation damage effects on the CISs in space radiation or nuclear radiation environment mainly include total ionization dose effect, displacement effect, and single particle effect. At present, it is very important to evaluate the radiation damage effects on the CISs in different radiation environments through the radiation experiments of different radiation particles or rays. This paper mainly studies the total dose effect, displacement effect and single particle effect irradiation test method of the CISs from the aspects of radiation test source, experimental procedure, radiation bias condition, and radiation test requirement, and provides the test technical support for the evaluation of the CIS radiation damage and radiation hardening performance.

Key words: CMOS image sensor; radiation damage; total ionizing dose effect; displacement effect; single event effect; radiation test method

0　引言

CMOS图像传感器（CIS）是一种基于CMOS工艺，将像素阵列、时序控制电路、读出电路及接口电路等集成在同一芯片上的光电成像器件[1-3]。CIS具有体积小、重量轻、功耗低、片上集成度高等优良性能，其与电荷耦合器件（CCD）均被广泛应用于安监安防、医学成像、航天航空、粒子探测、核工业等领域的探测和成像系统中[4-10]。然而，当CIS在空间辐射、核辐射、加速器及粒子探测辐射环境

收稿日期：2024－12－22.

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）.

* **通信作者：**王祖军

中应用时，CIS会受辐照损伤的影响，导致器件性能退化，严重时甚至出现探测、成像功能失效。

鉴于以CIS为核心器件的探测、成像系统在辐射环境中的可靠性问题备受关注，在开展CIS相关应用时，需了解和掌握CIS空间辐射损伤敏感度，为评估CIS在不同辐射环境下的辐照损伤效应提供依据。近年来，国内外均开展了大量的CIS辐照效应实验研究[11-25]。然而，国内外关于CIS辐照损伤效应试验方法相关的标准和规范研究的报道较少。美军标、国军标、美国航空航天局（NASA）、欧洲空间局（ESA）制定的与电子元器件辐照效应试验方法相关的标准、规范、指南等主要针对通用类电子元器件，仅能对CIS照损伤效应试验方法提供一般性参考。

本文针对CIS在辐射环境中应用时遭受的辐照损伤效应，参考与电子元器件辐射效应相关的国内外标准、规范和指南[26-37]，结合CIS辐射粒子输运模拟计算[38]、辐照效应仿真模拟[39-42]、辐照试验[11-25]和理论分析[43-44]，分别建立CIS电离总剂量效应、位移效应和单粒子效应地面模拟试验方法，从而形成CIS辐照损伤效应试验方法，为开展CIS辐照损伤评估和抗辐射加固性能考核提供试验技术支持。

1　CIS电离总剂量效应辐照试验方法

电离总剂量效应是指辐射诱生电荷造成材料、器件或系统电学参数长期变化的现象。CIS属于电离总剂量效应敏感器件，在辐射环境下应用的CIS需要考虑电离总剂量效应的影响。电离总剂量效应辐照损伤会诱发CIS的辐照敏感参数退化，如暗信号增大、噪声增大、电荷转移损失增大、暗信号不均匀性（DSNU）增大、光响应不均匀性（PRNU）增大、饱和输出减小、满阱容量减小、动态范围减小、信噪比减小、转换增益减小、量子效率减小等。CIS的电离总剂量效应考核评估主要通过^{60}Co γ射线辐照试验进行。

1.1　电离总剂量效应辐照试验源

开展电离总剂量效应辐照试验模拟源主要包括：^{60}Co γ射线源、X射线源和电子源。开展电离总剂量效应辐照试验时，辐射源宜采用^{60}Co γ射线源。考核电子元器件的电离总剂量损伤效应时，美军标、国军标中广泛采用^{60}Co γ射线源代替加速器电子源来模拟空间总剂量效应[26,33,35]。目前国内外电子元器件的电离总剂量辐照损伤考核主要通过^{60}Co γ射线源来开展。因此，当开展CIS电离总剂量效应辐照试验时，辐射源宜采用^{60}Co γ射线源，被辐照面的辐射场不均匀性不大于10%，源活度应符合试验要求。国内外开展了大量的CIS ^{60}Co γ射线电离总剂量辐照效应试验，试验结果表明^{60}Co γ射线源可用来模拟CIS电离总剂量效应。

1.2　CIS电离总剂量效应辐照试验流程

开展CIS电离总剂量效应辐照试验前，需先测试CIS辐照损伤敏感参数，然后根据试验大纲建立被试品（Device Under Test，DUT）参数测量系统，辐照试验步骤如下：

（1）制定DUT电离总剂量效应辐照试验大纲，确定DUT辐照的电离总剂量。

（2）辐照前，测试查验样品和DUT的功能和辐射损伤敏感参数，记录相应的试验现象、试验数据。

（3）确定DUT的辐照剂量率和偏置条件。除非另有规定，DUT的辐照剂量率宜取（0.05～3）Gy（Si）/s，辐照时间不小于10 min，开展电离总剂量损伤的性能考核试验时，偏置条件应选择最恶劣的辐照偏置。

（4）DUT辐照到规定的电离总剂量。

（5）开展DUT功能测试，判断DUT功能是否正常。若出现DUT功能失效，则淘汰。辐照后，除非另有规定，当DUT在暗场环境下输出信号饱和或无法输出信号时，DUT已失去感光功能，此时判定为DUT功能失效。

（6）测试DUT的辐射损伤敏感参数，DUT的测试时间要求应按照GJB5422-2005执行。

（7）记录相应的试验现象、试验数据，并进行数据处理与分析。

（8）判断DUT的辐射敏感参数是否超差失效。若出现DUT的辐射敏感参数超差失效，则淘汰。

（9）辐照后，测试查验样品的功能和辐射损伤敏感参数（必要时），记录相应的试验现象、试验数据，并进行数据处理。

（10）试验不确定度的分析，按GJB3756A-2015中的规定执行。

（11）退火试验应按照GJB5422-2005执行。

CIS电离总剂量效应辐照试验流程如图1所示。

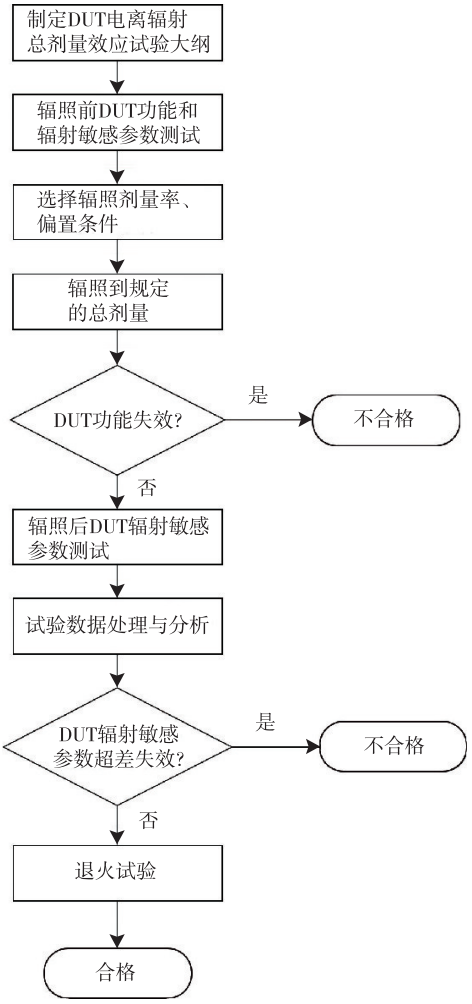

图1 CIS电离总剂量效应辐照试验流程

1.3 CIS电离总剂量效应辐照试验偏置条件

GJB5422-2005和GJB548-2005中均要求电子元器件电离总剂量效应辐照试验后退火试验时偏置条件为最恶劣辐照偏置,所以CIS进行电离总剂量辐照后退火试验的偏置条件也应为最恶劣辐照偏置。除非另有规定,当进行电离总剂量损伤的性能考核试验时,CIS的偏置条件应选择最恶劣辐照偏置。通常情况下,CIS的最恶劣辐照偏置为同时加工作电压和驱动信号,并满足CIS正常工作状态。

2 CIS位移效应辐照试验方法

位移效应是指辐射粒子与器件材料原子或晶格发生碰撞,使其离开原来位置,从而导致辐射损伤的现象。位移效应辐照损伤会诱发CIS的辐照敏感参数退化,如暗信号增大、暗信号尖峰增多、噪声增大、电荷转移损失增大、DSNU增大、PRNU增大、饱和输出减小、满阱容量减小、动态范围减小、信噪比减小、量子效率减小等。CIS的位移效应考核评估主要通过开展中子、质子辐照试验进行。

开展电子元器件位移效应辐照试验时,可选用中子源、质子源、电子源等。国内外通常选用中子源或质子源开展CIS的位移效应辐照试验,所以本文主要介绍CIS的中子、质子位移效应辐照试验方法。由于中子的穿透能力强,开展CIS中子位移效应辐照试验时,无需对CIS芯片上的光窗盖进行开盖处理。然而,当开展CIS质子位移效应辐照试验时,若选取的质子能量较低,导致质子束流无法穿透CIS光窗盖到达辐照损伤灵敏区域,则需要对CIS芯片上的光窗盖进行开盖处理。

开展中子或质子辐照试验的注量率宜在10^6～10^9 $cm^{-2}\cdot s^{-1}$范围内选取,这主要是因为辐照注量确定后,若选择的注量率太低,则需要长时间累积才能达到规定的辐照注量,而加速器质子源或反应堆中子源的工作时间是受到多种因素限制的;若选择的注量率太高,则只需要极短时间的累积就能达到规定的辐照注量,而中子源或质子源开机后在较短时间内束流的稳定性相对较差。综合考虑多种因素的影响,开展中子或质子位移效应辐照试验的注量率在10^6～10^9 $cm^{-2}\cdot s^{-1}$范围内选取,能同时兼顾到辐照源条件及方便达到试验大纲确定的辐照注量。

2.1 中子位移效应辐照试验方法

2.1.1 中子位移效应辐照试验源

开展CIS中子位移效应辐照试验时,可选用中子源(反应堆中子源、散裂中子源、加速器中子源)。NASA在“新千年计划:空间环境与电子元器件指南(New Millennium Program: Space Environments on Electronic Components Guidelines)”中给出了不同的轨道空间环境中辐射诱发位移损伤所对应的1 MeV等效中子注量:低地球轨道为5×10^9 cm^{-2}、地球同步轨道为2×10^{10} cm^{-2}、中地球轨道和木星轨道为2×10^{11} cm^{-2}[27]。

开展CIS中子位移效应辐照试验,中子辐射场应满足条件:(1)在垂直于中子束流方向,放置辐照样品的范围内,中子注量不均匀性不大于20%;(2)应选用高“中子/γ比”中子源,此时中子辐照CIS引入γ电离总剂量极小,故CIS电离总剂量损伤影响可忽略,CIS受到的辐照损伤主要是中子位移损伤。

2.1.2 中子位移效应辐照试验流程

开展CIS中子位移效应辐照试验前,需先测试

CIS中子位移效应辐照损伤敏感参数，根据试验大纲建立DUT参数测量系统，测试步骤如下：

（1）制定DUT中子位移效应辐照试验大纲，确定中子辐照注量。

（2）中子辐照前，测试查验样品和DUT的功能和辐射损伤敏感参数，记录相应的试验现象、数据。

（3）选择中子辐照注量率和偏置条件。

（4）辐照到规定的中子辐照注量。辐照过程中使用符合辐射防护要求的试验夹具，单层摆放并固定在中子辐照注量偏差允许的范围内。

（5）中子辐照后，应对DUT感生的放射性剂量进行监测，在符合规定的安全情况下，对DUT的测试应在辐照后24 h内完成；当DUT残余的放射性活度高于安全操作的规定时，进行测试前的经历时间可延长到一周，或是采取措施进行远距离测试，并记录数据和测试条件。

（6）开展DUT功能测试，判断DUT功能是否正常。若出现DUT功能失效，则淘汰。中子辐照后，除非另有规定，DUT在暗场环境下输出信号饱和或无法输出信号时，DUT已失去感光功能，此时判定为DUT功能失效。

（7）中子辐照后，测试DUT的辐射敏感参数，记录相应的试验现象、试验数据，并进行数据处理。

（8）判断DUT的辐射敏感参数是否超差失效；若出现DUT的辐射敏感参数超差失效，则淘汰。

（9）中子辐照后，测试查验样品的功能和辐射损伤敏感参数（必要时），记录相应的试验现象、试验数据，并进行数据处理。

（10）试验不确定度的分析，按GJB3756A-2015中的规定执行。

（11）中子辐照后的DUT及试验线路板应按照GB18871-2002的规定及国家其他有关法规与标准的要求进行处理

图2给出了CIS中子位移效应辐照试验流程图。

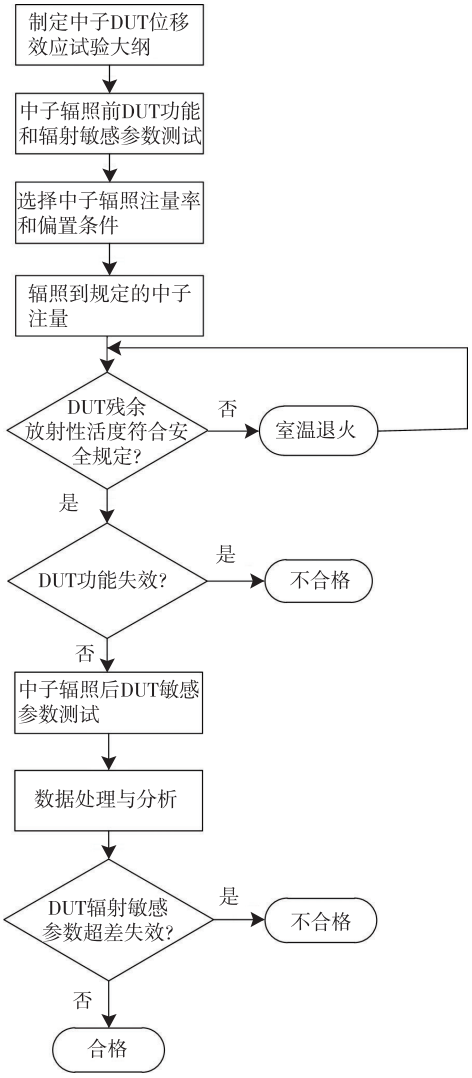

图2　CIS中子位移效应辐照试验流程

2.2　质子位移效应辐照试验方法

2.2.1　质子位移效应辐照试验源

开展电子元器件空间辐射损伤效应评估时，由于实际空间辐射环境中的位移损伤主要由空间质子引起，国内外也直接采用质子源模拟空间位移辐射损伤效应。开展CIS质子位移效应辐照试验时，可选用质子源（如回旋加速器质子源、串列加速器质子源）。除非另有规定，用质子源开展CIS位移损伤的性能考核试验时，宜选择能量不小于40 MeV的单能质子；若选择能量小于40 MeV的质子，应保证质子束流能入射到CIS的敏感区域（可通过辐射粒子输运计算预估质子束在CIS中的射程来判定）。DUT被照面的质子注量不均匀性不大于20%。质子辐照注量率可根据单能质子辐照注量确定，注量率宜在10^{6}～10^{9} cm^{-2}•s^{-1}范围内选取。

用质子源来模拟空间位移辐照效应时，需要注意以下问题：（1）质子辐照CIS诱发产生的位移损伤和电离损伤均显著（特别是低能质子），需要考虑质子源带来的电离损伤影响；（2）当质子能量较低，无法入射到CIS灵敏区时，需要对CIS芯片上的光窗盖进行开盖处理，CIS开盖后器件性能易受环境的影响，特别是器件光敏区容易受灰尘的影响，而且开盖过程很容易损坏CIS芯片。

开展CIS空间辐射损伤效应评估时，通过计算质子辐照CIS灵敏区内产生的非电离能量损失（NIEL），可将空间辐射环境中不同能量质子产生的位移损伤等效为单能质子的等效辐照注量，从而确定地面辐照试验模拟空间环境中质子位移损伤的单能质子能量和等效注量。

单能质子注量的确定按等效辐照注量公式（1）计算：

$$\Phi(E_{\text{test}})=\frac{\int_{E_1}^{E_2}\frac{\mathrm{d}\Phi(E)}{\mathrm{d}E}NIEL(E)\mathrm{d}E}{NIEL(E_{\text{test}})} \quad (1)$$

式中，$\Phi(E_{\text{test}})$表示地面模拟试验选取入射质子能量为E_{test}时的质子注量，单位为cm^{-2}；E_1和E_2分别表示CIS所处空间轨道环境中的质子最低、最高能量，单位为MeV；$\mathrm{d}\Phi(E)/\mathrm{d}E$表示空间环境中质子微分能谱；$NIEL(E)$为空间环境中质子能量为$E$时的非电离能量损失；$NIEL(E_{\text{test}})$为地面模拟试验选取入射质子能量为$E_{\text{test}}$时的非电离能量损失。

2.2.2 质子位移效应辐照试验流程

开展CIS质子位移效应辐照试验前，需先测试CIS质子位移效应辐照损伤敏感参数。根据试验大纲建立DUT参数测量系统，测试步骤如下：

（1）制定DUT质子位移效应辐照试验大纲，确定质子辐照注量。

（2）质子辐照前，测试查验样品和DUT的功能和辐射损伤敏感参数，记录相应的试验现象、数据。

（3）选择质子辐照能量、注量率和偏置条件。

（4）辐照到规定的质子辐照注量。辐照过程中使用符合辐射防护要求的试验夹具，单层摆放并固定在质子辐照注量偏差允许的范围内。

（5）质子辐照后，应对DUT感生的放射性剂量进行监测，在符合规定的安全情况下，对DUT的测试应在辐照后24 h内完成；当DUT残余的放射性活度高于安全操作的规定时，进行测试前的经历时间可延长到一周，或是采取措施进行远距离测试，并记录数据和测试条件。

（6）开展DUT功能测试，判断DUT功能是否正常。若出现DUT功能失效，则淘汰。质子辐照后，除非另有规定，DUT在暗场环境下输出信号饱和或无法输出信号时，DUT已失去感光功能，此时判定为DUT功能失效。

（7）质子辐照后，测试DUT的辐射敏感参数，记录相应的试验现象、试验数据，并进行数据处理。

（8）判断DUT的辐射敏感参数是否超差失效；若出现DUT的辐射敏感参数超差失效，则淘汰。

（9）质子辐照后，测试查验样品的功能和辐射损伤敏感参数（必要时），记录相应的试验现象、试验数据，并进行数据处理。

（10）辐照后，需要考虑质子电离总剂量效应对试验结果的影响。

（11）试验不确定度的分析，按GJB3756A-2015中的规定执行。

（12）质子辐照后的DUT及试验线路板应按照GB18871-2002的规定及国家其他有关法规与标准的要求进行处理。

CIS质子位移效应辐照试验流程见图3。

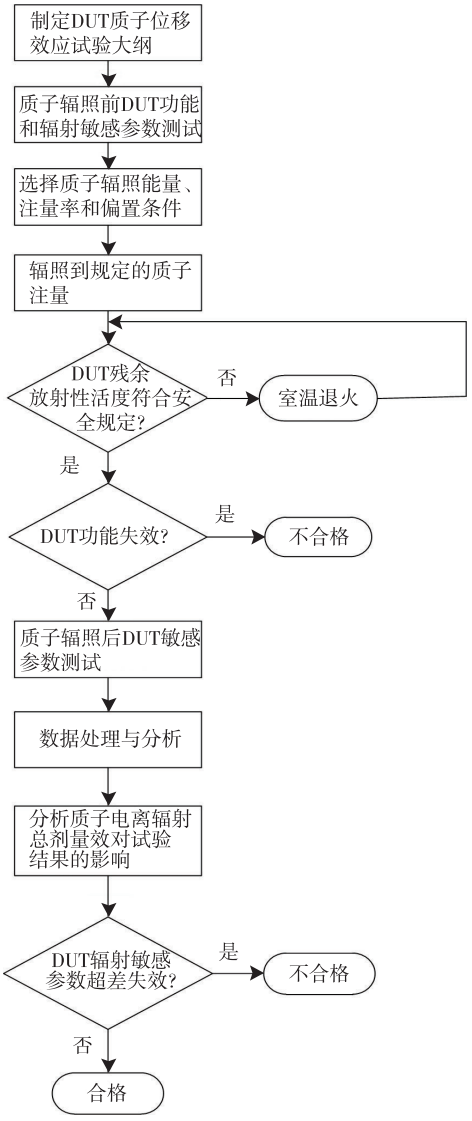

图3 CIS质子位移效应辐照试验流程

2.3　CIS位移效应辐照试验偏置条件

中子辐照CIS主要产生位移损伤，GJB548B-2005中“方法1017中子辐射”和GJB9397-2018中均规定了中子辐照试验时的偏置条件为外引线全部短路连接或者全部开路[29,33]。因此，开展CIS位移损伤效应辐照试验时，国内外通常采用不加偏置辐照。故开展CIS位移效应辐照试验时的偏置条件为：除非另有规定，开展位移效应的性能考核试验，CIS偏置条件应选择不加偏置，CIS外引线全部短路连接或采取其他有效的防静电措施。位移辐照试验后退火试验时偏置条件同辐照时偏置条件。

3　CIS单粒子效应辐照试验方法

单粒子效应是指单个粒子穿过器件敏感区域时，电离产生的电子-空穴对被电场收集形成脉冲电流，导致器件辐射损伤的现象。单粒子效应辐照损伤会诱发CIS出现单粒子瞬态（SET）、单粒子翻转（SEU）、单粒子功能中断（SEFI）、单粒子锁定（SEL）、单粒子烧毁（SEB）等现象。CIS的单粒子效应考核评估主要通过开展重离子辐照试验进行。

3.1　单粒子效应辐照试验源

开展CIS单粒子效应辐照试验时，宜采用重离子源。重离子源应满足条件：（1）除非另有规定，用重离子源开展CIS单粒子效应性能考核试验时，应保证重离子束流能入射到CIS单粒子效应敏感区域；（2）离子注量率宜在10～10^5 cm^{-2}•s^{-1}范围内可调；（3）试验试样被照面离子注量不均匀性不大于10%；（4）单粒子效应试验过程中若重离子累积注量较高，出现位移损伤，需考虑位移损伤带来的影响。

3.2　CIS单粒子效应辐照试验流程

开展CIS单粒子效应辐照试验，测试步骤如下：

（1）制定DUT重离子单粒子效应试验大纲，确定辐照注量或发生单粒子效应的总次数。

（2）重离子辐照前，测试查验样品和DUT的功能和辐射损伤敏感参数，记录相应试验现象、数据。

（3）选择离子辐照能量、注量率、有效LET值和偏置条件。

（4）辐照到规定的注量或发生单粒子效应的总次数。使用满足辐射防护要求的平面或圆弧面试验夹具，单层摆放并固定在重离子注量偏差允许的范围内。

（5）辐照过程中，应对DUT功耗电流和电压进行实时监测，测量系统应实时测量DUT单粒子效应，按器件详细规范进行单粒子效应种类的判定。

（6）记录相应试验现象、数据和辐照时间。

（7）当入射离子注量达到10^7 cm^{-2}时，需要考虑重离子电离总剂量和位移效应对试验结果的影响。

（8）试验不确定度的分析，按GJB 3756A-2015中的规定执行。

（9）重离子辐照后的DUT及试验线路板在测试后应按照GB18871-2002的规定及国家其他有关法规与标准的要求进行处理。

图4给出了CIS单粒子效应辐照试验流程图。

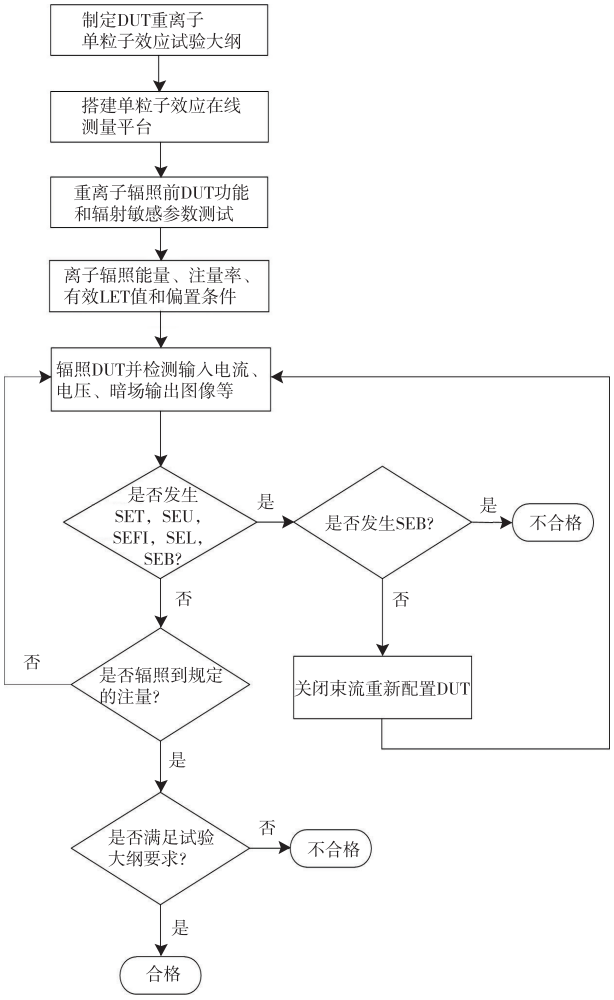

图4　CIS单粒子效应辐照试验流程

3.3　CIS单粒子效应辐照试验时的偏置条件

除非另有规定，开展单粒子效应性能考核试验时，CIS的偏置条件应选择使CIS产品手册中正常工作时的偏置条件。由于CIS开展单粒子效应试验时必须为在线测试，应选择CIS产品手册或详细规

范中使器件正常工作时的偏置条件。

4 辐照试验要求

开展CIS的辐照试验时需要满足以下基本要求:(1)试验安全与辐射防护要求。试验的辐射监测应采用质子、中子、β射线、γ射线等辐射测量仪器和个人剂量监测用X、γ辐射剂量测量装置;在质子、中子、重离子辐射场中经过辐照的DUT或设备具有放射性,应对试验后DUT的感生辐射进行监测,按GB18871-2002中的规定,在安全防护的要求下在室温下测试、贮存和处理。(2)试验仪器设备及环境要求。试验中所使用的测量仪器应符合以下要求:a)稳定度、精度和分辨率等应符合测试要求;b)辐射环境中工作的仪器应符合屏蔽要求;c)在计量检定有效期内。(3)均匀光源。除非另有规定,均匀光源应符合以下要求:a)照射到CIS光敏区的光强度不均匀性应不影响试验结果,一般小于2%;b)光强连续可调,强度应符合试验要求;c)CIS光敏区的曝光量、辐射光谱的波动范围一般小于3%。(4)暗室。除非另有规定,暗场测试环境的暗室应符合以下要求:a)暗室内部的光本底应不影响试验结果;b)暗室内部应配备通信接口;c)暗室内表面应为黑色,避免反光。

5 结论

开展CIS不同辐射粒子或射线的辐照损伤效应试验主要包括电离总剂量效应辐照试验、位移效应辐照试验、单粒子效应辐照试验。开展相关辐照试验需要选取合适的辐照试验源,针对CIS不同辐照损伤效应试验时的辐射源选取、辐照剂量率(注量率)、辐照试验流程、辐照偏置条件、辐照试验要求等方面进行了介绍,综合CIS电离总剂量效应辐照试验方法、位移效应辐照试验方法、单粒子效应辐照试验方法,形成了CIS辐照损伤效应试验方法,为开展CIS辐照损伤评估和抗辐射加固性能考核提供了试验技术支持,建立的CIS辐照损伤效应试验方法对准确评估其辐照损伤具有重要意义。

鉴于开展CIS在强脉冲辐射环境下的瞬时效应、中子和γ射线混合场下的协和效应、辐射粒子与电磁脉冲耦合作用下的协和效应等辐照试验难度较大,相关辐照试验结果报道较少,相关辐照试验方法将在后续工作中进一步深入研究。

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, 982.
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, 982.

[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 of CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(1): 1-7.

[3] 王祖军, 聂 栩, 唐 宁, 等. CMOS图像传感器辐射敏感参数测试电路设计及试验验证[J]. 半导体光电, 2024, 45(2): 216-221.
Wang Zujun, Nie Xu, Tang Ning, et al. Test circuit design and radiation experiment verification of CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 216-221.

[4] 祝晓笑, 任思伟. 安防用CMOS图像传感器片上图像信号处理电路综述[J]. 半导体光电, 2015, 36(5): 677-682.
Zhu Xiaoxiao, Ren Siwei. Overview of on-chip CMOS image sensor ISP circuit in safety surveillance system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5): 677-682.

[5] 程开富. 图像传感器在医学诊断领域中的应用[J]. 电子元器件应用, 2005, 7(6): 36-39, 50.
Cheng Kaifu. Application of image sensor in medical diagnosis field[J]. Electronic Component & Device Applications, 2005, 7(6): 36-39, 50.

[6] 岳 涛, 张宏伟, 黄长宁, 等. "嫦娥二号"卫星CMOS相机技术及应用[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(2): 12-17.
Yue Tao, Zhang Hongwei, Huang Changning, et al. The application of Chang' E-2 CMOS camera technologies [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(2): 12-17.

[7] 王 军, 李国宏. CMOS图像传感器在航天遥感中的应用[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(2): 42-47.
Wang Jun, Li Guohong. The application of CMOS image sensor in space remote sensing [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29(2): 42-47.

[8] 李 龙. 面向高能物理寻迹探测器的CMOS像素传感器的研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
Li Long. Researches on high energy physics oriented CMOS pixel sensor[D]. Ji'nan: Shandong University, 2022.

[9] 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.

[10] 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)：95-101.
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 Applied Physics，2021，12(2)：95-101.

[11] Hancock B R，Soli G A. Total dose testing of a CMOS charged particle spectrometer [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1997，44(6)：1957-1964.

[12] Hopkinson G R. Radiation effects in a CMOS active pixel sensor[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2000，47(6)：2480-2484.

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

[14] 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 Transactions on Nuclear Science，2010，57(6)：3101-3108.

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

[16] Beaumel M，Hervé D，Van Aken D，et al. Proton，electron，and heavy ion single event effects on the HAS_2 CMOS image sensor[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2014，61(4)：1909-1917.

[17] Goiffon V，Estribeau M，Cervantes P，et al. Influence of transfer gate design and bias on the radiation hardness of pinned photodiode CMOS image sensors [J]. IEEE Transaction on Nuclear Science，2014，61(6)：3290-3301.

[18] Wang Z，Liu C，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 Transactions on Nuclear Science，2015，62(2)：527-533.

[19] Wang Z，Ma Y，Liu J，et al. Degradation and annealing studies on gamma rays irradiated COTS PPD CISs at different dose rates[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A：Accelerators，Spectrometers，Detectors and Associated Equipment，2016，820：89-94.

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

[21] Wang Z，Xue Y，Guo X，et al. Measurement and analysis of the conversion gain degradation of the CIS detectors in harsh radiation environments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A：Accelerators，Spectrometers，Detectors and Associated Equipment，2018，895：35-39.

[22] Wang Z，Xue Y，Wang Z，et al. Degradation analysis of the pinned photodiode CMOS image sensors induced by energetic proton radiation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A：Accelerators，Spectrometers，Detectors and Associated Equipment，2024，1058：168784.

[23] 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，2004，38(S1)：231-235.
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，2004，38(S1)：231-235.

[24] 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)：64-68.
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 Applied Physics，2019，10(1)：64-68.

[25] 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)：128-132，141.
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 Applied Physics，2021，12(3)：128-132，141.

[26] MIL-STD-883H (METHOD 1019.8)：Ionizing Radiation (Total dose) Test Procedure[S].

[27] Petkov M P. New Millennium Program：Space Environments on Electronic Components Guidelines [M]. Washington：NASA，2003.

[28] 电离辐射防护与辐射源安全基本标准：GB 18871—2002[S].
Basic Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources：GB 18871—2002[S].

[29] 微电子器件试验方法和程序：GJB 548B—2005[S].
Test methods and procedures for microelectronic device：GJB 548B—2005[S].

[30] 电子产品防静电放电控制大纲：GJB 1649—1993[S].
Anti-static discharge control outline for electronic products：GJB 1649—1993[S].

[31] 应用热释光剂量测量系统确定电子器件吸收剂量的方法：GJB 2165—1994[S].
Method for determining absorbed dose of electronic devices using thermoluminescence dosimetry system：GJB 2165—1994[S].

[32] 测量不确定度的表示及评定：GJB 3756A—2015[S].
Expression and evaluation of measurement uncertainty：GJB 3756A—2015[S].

[33] 军用电子元器件γ射线累积剂量效应测量方法：GJB5422—2005[S].

Testing Method of Military Electronic Devices for γ-ray Total Dose Radiation: GJB5422—2005[S].

[34] 单粒子效应试验方法和程序: GJB 7242—2011[S].
Test methods and procedures for single-event effects: GJB 7242—2011[S].

[35] 电荷耦合器件空间环境辐射效应地面模拟试验方法: GJB 9396—2018[S].
Ground simulation test method for space environment radiation effects of charge-coupled devices: GJB 9396—2018[S].

[36] 军用电子元器件中子辐射效应试验方法: GJB 9397—2018[S].
Test method for neutron radiation effects of military electronic components: GJB 9397—2018[S].

[37] 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): 32-38.
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): 32-38.

[38] Xue Y, Wang Z, Liu M, et al. Research on proton radiation effects on CMOS image sensors with experimental and particle transport simulation methods [J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(12): 120402.

[39] 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]. Journal on Numerical Methods and Computer Applications, 2020, 41(2): 143-150.

[40] 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): 133-141.
Yang Xie, Wang Zujun, Shang Aiguo, et al. Simulation of full well capacity degradation of 4T CMOS image sensor irradiated by proton [J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(3): 133-141.

[41] 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): 152-159.
Wang Zujun, Yang Xie, Lai Shankun, et al. Simulation of displacement damage of CMOS image sensors irradiated by neutron [J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(3): 152-159.

[42] 王祖军, 赖善坤, 杨勰, 等. CMOS图像传感器辐照损伤效应仿真模拟研究进展[J]. 半导体光电, 2022, 43(5): 839-847.
Wang Zujun, Lai Shankun, Yang Xie, et al. Simulation research progress of radiation damage effects on CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(5): 839-847.

[43] Wang Z, Xue Y, Chen W, et al. Fixed pattern noise and temporal noise degradation induced by radiation effects in pinned photodiode CMOS image sensors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(6): 1264-1270.

[44] Wang Z, Xue Y, Chen W, et al. Comparison of the dark signal degradation induced by Gamma ray, proton, and neutron radiation in pinned photodiode CMOS image sensors [J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(6): 69403.

作者简介:

王祖军(1979—),男,湖北省汉川市人,博士,研究员,主要从事光电材料、器件、系统的辐照损伤效应研究。