

次级电子不平衡对CMOS器件敏感区吸收剂量和电离总效应的影响

汪元坤 王倩 王涛 刘静

(新疆大学 物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

摘要 选择双列直插塑料封装的CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)器件CC4069六反相器作为研究对象,采用蒙特卡罗方法分析了器件吸收剂量与标称辐照剂量的差异,结合电离总剂量效应敏感参数阈电压的测量,分析评估了不满足次级电子平衡条件对器件敏感区吸收剂量和电离总剂量效应的影响程度,分析比较了标称辐照剂量和修正吸收剂量的PMOS(Positive channel Metal Oxide Semiconductor)和NMOS(Negative channel Metal Oxide Semiconductor)不同偏置下的阈电压漂移变化规律。结果表明:器件敏感层中的吸收剂量只有标称辐照剂量的83.52%。次级电子不平衡下的辐照试验会影响器件的抗辐射水平考核,器件的抗辐射水平被高估了16.5%。

关键词 电离总剂量效应,次级电子平衡,吸收剂量,蒙特卡罗方法

中图分类号 TL72

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070203

Effect of secondary electron non-equilibrium on the absorbed doses of CMOS device sensitive area and total ionizing dose effect

WANG Yuankun WANG Qian WANG Tao LIU Jing

(School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract [Background] Absorbed dose is the most important physical quantity in the study of radiation effect. In the total ionizing dose experiment of ^{60}Co gamma ray, the secondary electron equilibrium condition is not satisfied in the sensitive area of a thinner device. The actual absorbed dose could be less than the irradiation dose measured by the same dosimeter. [Purpose] This study aims to analyze and evaluate the influence extent of secondary electron imbalance on the absorbed dose and total ionizing dose of the sensitive layer of the device. [Methods] By studying the total ionizing dose effect with ^{60}Co γ -rays on complementary metal oxide semiconductor (CMOS) device "CC4069 inverters", the difference between the absorbed doses of the sensitive layer of CC4069 inverters and the nominal irradiation dose measured by the dosimeter was calculated by Monte Carlo simulation. Combined with the measurement of the threshold voltage of the irradiation sensitive parameter of CC4069 inverter, the relationship between the threshold voltage drift of positive channel metal oxide semiconductor (PMOS) and negative channel metal oxide semiconductor (NMOS) under different bias conditions and the nominal irradiation dose and absorbed dose corrected by Monte Carlo simulation were analyzed and compared. [Results] The results show that the absorbed dose of the device sensitive layer is only 83.52% of the nominal irradiation dose. [Conclusion] The radiation test

国家自然科学基金(No.11765022)资助

第一作者: 汪元坤, 男, 1992年出生, 2015年毕业于汉口学院, 现为硕士研究生, 研究领域为辐射剂量学

通信作者: 王倩, E-mail: wq@xju.edu.cn

收稿日期: 2019-04-11, 修回日期: 2019-04-23

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11765022)

First author: WANG Yuankun, male, born in 1992, graduated from Hankou University in 2015, master student, focusing on radiation dosimetry

Corresponding author: WANG Qian, E-mail: wq@xju.edu.cn

Received date: 2019-04-11, revised date: 2019-04-23

under the condition of secondary electron non-equilibrium will affect the evaluation of radiation hardening of device, and the radiation hardening of the device is overestimated by 16.5%.

Key words Total ionizing dose effect, Secondary electron equilibrium, Absorbed dose, Monte Carlo simulation

空间存在以电子、质子和重离子为主的空间辐射环境^[1]。运行在空间的航天器在辐射效应作用下,其中的电子元器件性能下降、状态改变甚至功能失效,严重威胁着航天器的安全运行^[2]。所以对空间应用的电子元器件,必须研究其辐射损伤机理、抗辐射性能评估方法、抗辐射加固技术,以确保器件具有满足航天器安全运行要求的抗辐射能力。对空间应用的电子元器件,考核其抗辐射性能的准确性十分重要,它与航天器的安全运行息息相关。

电子元器件辐射效应研究和性能考核主要是通过地面实验室辐照模拟试验来实现,其中进行电离总剂量效应(Total Ionizing Dose Effect, TID)研究和考核的辐照模拟源主要用⁶⁰Co γ 辐照源^[3]。

根据辐射剂量学原理,对 γ 射线这样的间接电离辐射,只有在满足次级电子平衡条件下,才能准确测量介质中某一点的吸收剂量^[4]。对具体应用在用剂量计测量光子吸收剂量时,须将剂量计放置在合适的平衡材料中,特别在射线入射方向剂量计前方和剂量计背面,都要设置足够厚度的平衡材料。剂量计前方的材料起到次级电子累积作用,剂量计背面的材料起到次级电子背散射作用。剂量计侧面也需要有侧向的电子平衡材料。在GB/T 139-2008使用硫酸亚铁剂量计测量水中吸收剂量的标准方法10.2.3条规定,测量X射线或 γ 射线吸收剂量时剂量计周围应使用水等效材料(如聚苯乙烯或聚乙烯)包裹,以达到近似的电子平衡条件^[5]。对⁶⁰Co γ 射线,应在剂量计周围包裹5 mm的聚苯乙烯(或等效的聚合材料)。说明平衡层厚度和背散射层厚度对辐射剂量的准确测量起着至关重要的作用。

现如今随着微电子技术的不断进步,电子器件持续向小尺寸方向发展,电子元器件的尺寸越来越小,而且结构各异、封装材料也各不相同。由于电子元器件尺寸小,无法直接测量器件内部吸收剂量。目前电离总剂量效应试验采用测量辐照试验元器件所在位置处的辐射剂量,由此代替电子元器件灵敏区域的吸收剂量的方法^[6-7]。由于辐照试验中器件辐射敏感区上面的封装材料和下方的基底层都较薄。这种情况下可能不足以满足器件灵敏体积的次级电子平衡条件。进行辐照试验时可能会出现下列情况:虽然辐照场的剂量可以准确测量,但一些电子元器件在辐照试验时,其敏感区域处于次级电子非平衡条件,敏感区接受的辐照剂量可能小于标称辐

照剂量,这会造成对器件辐射损伤的过低估计。因此,在电子元器件总剂量效应辐照试验中,研究次级电子不平衡对器件实际接受的吸收剂量的影响,评估其对电离总剂量效应研究造成的误差有多大是十分必要的。这对于提高电子元器件电离总剂量效应研究和抗辐射性能考核的准确性,推动总剂量效应试验方法和标准的完善,对保障航天器的运行安全、寿命都有重要的意义。

本文选择双列直插塑料封装的CC4069六反相器作为研究对象,采用蒙特卡罗方法分析了器件吸收剂量与标称辐照剂量的差异,结合电离总剂量效应敏感参数阈电压的测量,分析评估了不满足次级电子平衡条件对CC4069反相器敏感区吸收剂量和电离总剂量效应的影响程度。

1 器件电离总剂量效应的测试与分析

对CC4069六反相器进行了总剂量辐照试验。辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所高剂量率钴源进行,剂量率选择50 rad(Si)·s⁻¹,辐照时器件放置在PCB(Printed Circuit Board)辐照板上,施加辐照偏置。辐照板垂直于地面,射线水平方向垂直入射到器件,器件中心正对辐照源中心位置。参数测量在辐照后半小时内完成,避免效应退火的影响。器件在辐照前测量了初值,标称辐照剂量最大辐照到了2.5×10⁴ Gy(Si)。

在反相器P管源极施加+10 V电压(V_{DD}),N管源极通过电流计接地。采用美军标MIL-STD883中1022方法规定的恒流源法测量了不同偏置条件下和不同标称辐照剂量下PMOS(Positive channel Metal Oxide Semiconductor)管和NMOS(Negative channel Metal Oxide Semiconductor)管的阈电压。

将测得的PMOS管和NMOS管不同辐照剂量的阈电压漂移值对标称的辐照剂量作图,可以得到阈电压漂移与标称剂量的变化关系。

图1(a)是NMOS管导通和截止偏置下的阈电压变化曲线。在导通偏置时,随着辐照剂量的增大,NMOS阈电压先是负向漂移,在10⁴ Gy(Si)时,阈电压开始减小,即正向漂移。其机理是:氧化物正电荷会使得NMOS阈电压负向漂移,界面态电荷使NMOS阈电压正向漂移。NMOS导通偏置时,氧化层电场方向是从栅极指向基底方向。辐照开始时,电离产生的电子空穴对在电场的作用下分别向栅极

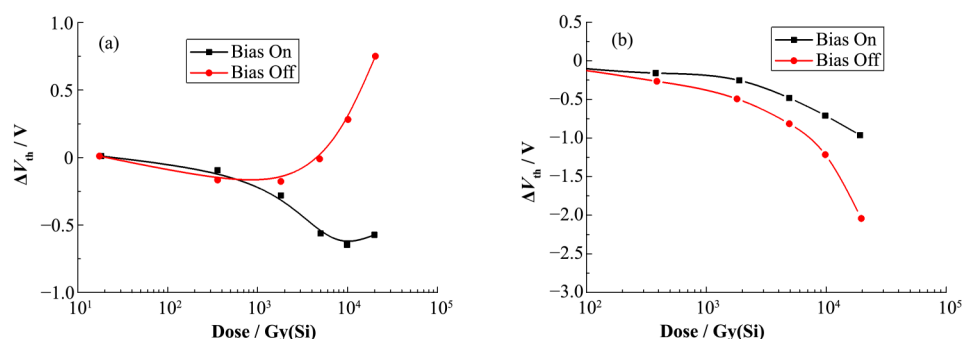


图1 NMOS (a)和PMOS (b)阈值电压漂移与标称辐照剂量的关系
Fig.1 The relation between threshold voltage drift for NMOS (a) and PMOS (b) and the nominal irradiation dose

和Si/SiO₂界面运动,电子空穴对的复合减小,Si/SiO₂界面因空穴被陷阱中心俘获而产生的氧化物正电荷增加,使阈值电压负向漂移。随着时间的增加,辐照剂量的增大,NMOS管界面态开始建立,并且产生速率大于氧化物电荷的累积,使阈值电压开始正向漂移。截止偏置下NMOS阈值电压随着辐照剂量的增加而增大。这是因为截止偏置NMOS栅极电压为0,栅氧化层中电场梯度小,电离产生的电子空穴对因漂移速度慢而大部分复合,空穴被陷阱中心俘获而产生的氧化物正电荷少。阈值电压漂移的主要贡献是界面态,因而正向漂移。对NMOS管,导通偏置阈值电压漂移大于截止偏置,导通偏置是最劣偏置。

图1(b)是PMOS管导通和截止偏置下的阈值电压变化曲线。在两种偏置下PMOS阈值电压都随着辐照剂量的增加负向漂移。这是因为对PMOS管,氧化物正电荷和界面态电荷都会使得NMOS阈值电压负向漂移。而在PMOS管导通偏置下,氧化层中电场是阻止电子和空穴运动的,所以被Si/SiO₂界面因空穴被陷阱中心俘获而产生的氧化物正电荷少于截止偏置,所以对PMOS管截止偏置是最劣偏置。

2 器件辐照试验标称辐照剂量确定方法

2.1 蒙特卡罗方法计算程序

蒙特卡罗方法是一种以概率统计理论为基础的计算方法,能够模拟电离辐射与物质相互作用的过程,并统计电离辐射在物质中的能量沉积,在辐射剂量学、辐射防护、放射治疗等领域得到了广泛的应用。本文选用Mulassis程序作为计算工具来处理电子元器件微米量级以下结构的剂量分布计算。Mulassis是由英国Qinetiq公司和欧空局ESA合作开发,基于Geant4的蒙特卡罗输运计算程序^[8],能够计算多达20层材料中的剂量沉积,每层厚度可小至纳

米量级,计算速度快,计算时间小于1 h,非常适合计算电子元器件等小尺寸结构中的剂量分布。

EGSnrc是加拿大国家研究院(National Research Council, NRC)开发的电子和光子输运计算软件^[9],特别适合计算电子和光子射线在材料中的吸收剂量分布,程序对处理低能光子和电子与物质相互作用过程有优化处理。但是在建立计算模型时,EGSnrc软件中Dosxyznrc模块的建模尺度在厘米量级,对小于微米量级的像元尺寸的电子元器件建模比较繁琐,难以应用于电子元器件剂量分布的计算。而且运算时间较长,在PC机运行一般在10 h以上。本文采用EGSnrc进行深度剂量分布和不同材料吸收剂量的转换的计算,将Mulassis作为电子元器件建模及器件结构剂量分布的计算工具。EGSnrc和Mulassis这两个软件都是免费软件,操作简便,可以在PC机windows操作系统使用。

2.2 器件辐照试验标称辐照剂量的确定方法

器件辐照试验是在⁶⁰Co γ源中进行的,钴源的剂量场测量按照GB/T 139-2008使用硫酸亚铁剂量计测量。测量时剂量计周围包裹了5 mm的聚乙烯材料模体,并且在剂量计后方放置了18 mm厚的聚乙烯板,作为剂量计和模体的支撑,同时也是剂量计的背散射层,满足了标准GB/T 139-2008规定的次级电子平衡条件。

按照上述方法测量出的水吸收剂量,可以按照GB/T 15447-2008 X、γ射线和电子束辐照不同材料吸收剂量的换算方法转换为硅吸收剂量^[10]。转换公式为:

$$D_{Si} = \left[\frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{Si}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{H_2O}} \right] D_{H_2O} = \frac{0.02652}{0.02965} D_{H_2O} = 0.894 D_{H_2O} \quad (1)$$

式中： $\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{Si}}$ 和 $\left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别是硅和水的质量能量吸收系数； $D_{\text{H}_2\text{O}}$ 是用硫酸亚铁剂量计测量出的水吸收剂量； D_{Si} 是硅吸收剂量。

式(1)是根据平均能量为 1.25 MeV 的光子在硅和水中的质量能量吸收系数转换计算的。实际钴源辐照场中含有低能散射成份，转换系数可能稍有差别。对含有低能成份的钴源，采用蒙特卡罗方法计算的水转换到硅的转换系数为 0.905^[11]。

图2给出了用 EGSnrc 计算的 ^{60}Co γ 射线在硅和水中的深度剂量分布曲线，以及采用 0.905 的转换系数由水吸收剂量转换为硅吸收剂量。为了便于查看，图中选择了 4 cm 厚度的剂量分布。可以看出，对硅累积层厚度约为 2.2 mm，对水累积层为 5 mm。水的峰值高于硅峰值。经过 0.905 的转换系数，由水转换得到的硅吸收剂量与实际的硅吸收剂量峰值基本符合。表明采用水等效模体测量水吸收剂量，然后转换为硅吸收剂量的技术路线是正确的。

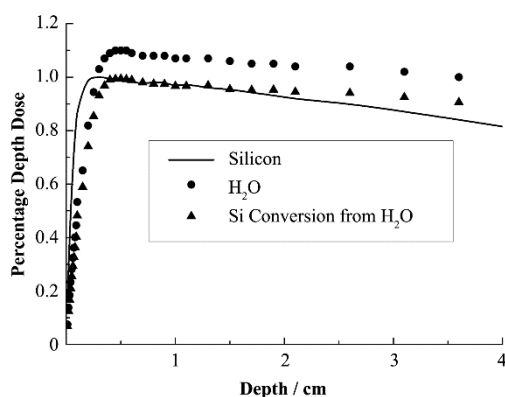


图2 ^{60}Co γ 射线在硅和水中的深度剂量分布
Fig.2 The depth dose distribution of ^{60}Co γ -rays in silicon and H_2O

此外，Si 和 SiO_2 的质量能量吸收系数也非常接近，分别是 $0.026\ 52\ \text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.026\ 61\ \text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ，其比值是 0.997，基本相同。图3是 EGS 计算的 ^{60}Co γ 射线在硅和二氧化硅中的深度剂量分布曲线，表明 Si 和 SiO_2 的剂量学特性基本相同。

3 器件结构剂量分布的蒙特卡罗分析

塑料双列直插式封装的 CC4069 器件，器件纵向厚度为 3.2 mm，其中上封装盖厚度为 1.5 mm 塑料，0.2 mm 芯片和 1.5 mm 塑料封装底层。其中 0.2 mm 厚的芯片由 0.2 μm Si_3N_4 钝化层、1.2 μm 铝栅、0.1 μm SiO_2 氧化层、0.2 mm 硅衬底组成^[12-13]。辐照时还要加上 2 mm 的树脂 PCB 板。本文将通过蒙特卡罗方法分析这种器件结构中器件敏感层的实际

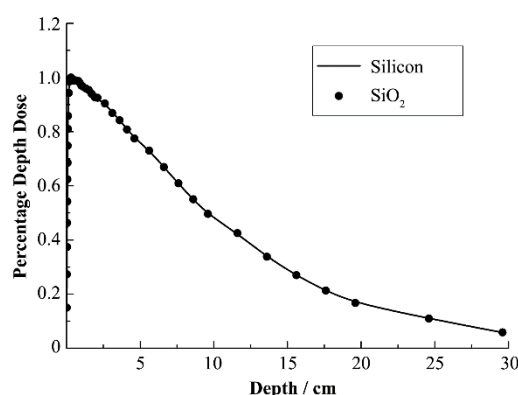


图3 ^{60}Co γ 射线在硅和二氧化硅中的深度剂量分布
Fig.3 The depth dose distribution of ^{60}Co γ -rays in silicon and SiO_2

吸收剂量，以及与标称辐照剂量的差异，进而分析次级电子不平衡对电离总剂量效应的影响程度。

建立器件蒙特卡罗计算模型时，塑料和树脂 PCB 都用聚乙烯塑料代替，三种材料都是 C 和 H 的聚合物，其剂量学特性基本相同。其他 Si_3N_4 、Si、Al 和 SiO_2 在计算程序材料库中都有相应的标准材料。

以表1的器件结构模型数据，应用 Mulassis 程序建立模型，进行蒙特卡罗输运计算。辐照射线为 ^{60}Co γ 射线，平均能量为 1.25 MeV。同时计算了器件辐照试验模型和硅材料中的深度剂量分布。将 ^{60}Co γ 射线在硅中的深度剂量分布曲线的最大值设为标称剂量 100 Gy，这也代表了满足次级电子平衡条件下测量的辐照试验所处位置的标称剂量。以标称剂量对计算所得的器件各结构中吸收剂量归一，则塑料封装 CC4069 器件各结构的剂量如表2所示。

表1 塑料双列直插封装的 CC4069 结构

Table 1 Structure of CC4069 inverters with dual-in-line plastic package

序号 Number	材料 Material	厚度 Thickness / μm	密度 Density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
1	Plastic	1 500	1.19
2	Si_3N_4	0.2	3.1
3	Al	1.2	2.699
4	SiO_2	0.1	2.2
5	Si	200	2.33
6	Plastic	1 500	1.19
7	PCB	2 000	1.19

由表2可以看出，器件结构中由入射面开始吸收剂量逐渐增大，表面 1.5 mm 封装层吸收剂量只有标称辐照剂量的 46.6%，然后逐渐上升。这也和图2所示的硅和水的深度剂量分布类似。在表面吸收剂量最小，次级电子随材料厚度增加而累积，吸收剂量

表2 塑料双列直插封装的CC4069器件各结构沉积剂量
Table 2 Deposit dose in each layer of CC4069 inverters with dual-in-line plastic package

序号 Number	材料 Material	厚度 Thickness / μm	剂量 Dose / Gy	与标称剂量 的偏差 Deviation from the nominal dose / %
1	Plastic	1 500	46.60	53.40
2	Si_3N_4	0.2	80.32	19.68
3	Al	1.2	73.50	26.50
4	SiO_2	0.1	83.52	16.48
5	Si	200	76.79	23.21
6	Plastic	1 500	99.05	0.95
7	PCB	2 000	99.96	0.04

随着深度增加而快速增加,在硅厚度为2.2 mm左右时剂量达到峰值;在水深度5 mm时达到峰值。

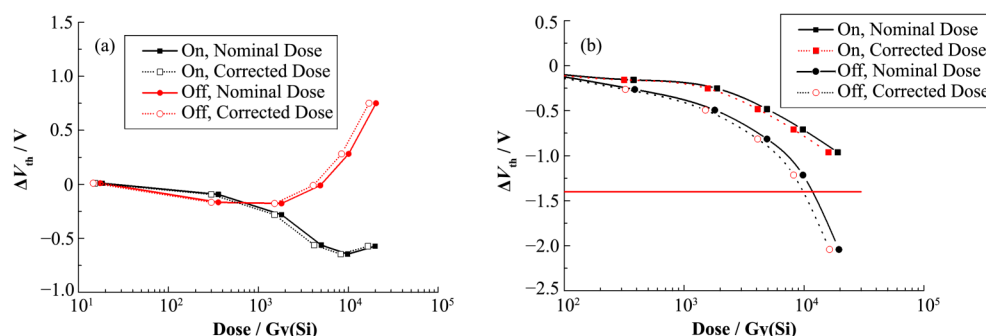


图4 NMOS (a)和PMOS (b)阈值电压漂移与标称和修正辐照剂量的关系
Fig.4 The relation between threshold voltage drift for NMOS (a) and PMOS (b) and the nominal irradiation dose and the absorbed dose corrected by Monte Carlo simulation

可以看出,经过修正后,NMOS和PMOS四种偏置条件的阈值电压漂移曲线均向左移动。其中PMOS截止偏置下,阈值电压漂移超过了1.4 V,大于美军标MIL-M-38510/657规定的阈值电压失效判据($V_{th} < 1.4 \text{ V}$)^[15]。其余三种偏置,阈值电压漂移均小于1.4 V。对PMOS截止偏置,如果根据图4中的阈值电压漂移与标称辐照剂量的关系,阈值电压漂移为1.4 V时的标称辐照剂量为 $1.18 \times 10^4 \text{ Gy}$,即该CC4069器件的抗辐射性能为 $1.18 \times 10^4 \text{ Gy}$ 。但如果以经过蒙特卡罗计算修正的剂量与阈值电压漂移的曲线来看,阈值电压漂移为1.4 V时的修正辐照剂量为 $9.85 \times 10^3 \text{ Gy}$ 。表明该CC4069器件的实际抗辐射性能为 $9.85 \times 10^3 \text{ Gy}$,比用标称辐照剂量获得的抗辐射水平 $1.18 \times 10^4 \text{ Gy}$ 偏小了16.5%。表明如果电子器件抗辐射水平考核试验时如果器件处于次级电子不平衡状态,器件实际接受的辐照剂量小于标称剂量。如果

MOSFET的辐照敏感区域为 SiO_2 栅氧化层^[14],可以看出,表2第4层0.1 μm 厚的 SiO_2 中的沉积的剂量为83.52 Gy,只有标称辐照剂量的83.52%,与标称剂量偏差为16.48%。这是因为第一层塑料封装层厚度为1.5 mm,前三层厚度之和也只有1.501 mm,小于达到次级电子平衡的厚度。所以器件敏感区吸收的剂量会小于峰值,也就是小于满足次级电子平衡条件测量的标称辐照剂量。

4 次级电子不平衡对器件电离总剂量效应的影响

图4(a)和(b)是采用蒙特卡罗方法计算得到的芯片敏感层吸收剂量,对电离总剂量效应测量得到的阈值电压漂移规律进行了修正。分别给出了NMOS和PMOS导通和截止偏置下,阈值电压漂移与标称剂量和修正后剂量的变化规律。

以标称辐照剂量作为考核标准,可能会高估被评估器件的抗辐射能力,从而会给使用该器件的载荷乃至航天器寿命造成影响。

5 结语

采用蒙特卡罗方法分析了CC4069反相器总剂量辐照试验中吸收剂量与标称辐照剂量的差异,结合电离总剂量效应敏感参数阈值电压的测量,分析评估了不满足次级电子平衡条件对器件敏感层吸收剂量和电离总剂量效应的影响程度。不满足次级电子平衡条件时器件敏感层中的吸收剂量只有标称辐照剂量的83.52%。次级电子不平衡下的辐照试验会影响器件的抗辐射水平考核,器件的抗辐射水平高估了16.5%。

参考文献

- 1 Cucinotta F A, Manuel F K, Jones J, *et al.* Space radiation and cataracts in astronauts[J]. *Radiation Research*, 2001, **156**(5): 460–466.
- 2 Ecoffet R. Overview of in-orbit radiation induced spacecraft anomalies[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, **60**(3): 1791–1815.
- 3 GJB 5422-2005. 军用电子元器件 γ 射线累积剂量效应测量方法[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005.
GJB 5422-2005. Testing method of military electronics devices for γ -ray total dose radiation[S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2005.
- 4 李士骏. 电离辐射剂量学[M]. 第2版. 北京: 原子能出版社, 1986.
LI Shijun. Ionizing radiation dosimetry[M]. 2nd Ed. Beijing: Atomic Energy Press, 1986.
- 5 GB/T 139-2008. 使用硫酸亚铁剂量计测量水中吸收剂量的标准方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 139-2008. Standard method to measure absorbed dose in water using ferrous sulfate dosimeter[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- 6 ASTM E 668-13. Standard practice for application of thermoluminescence - dosimetry (TLD) systems for determining absorbed dose in radiation-hardness testing of electronic devices[S]. US: ASTM International, 2013.
- 7 GJB 2165-94. 应用热释光剂量测量系统确定电子器件吸收剂量的方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1994.
GJB 2165-94. Methods for the application of thermoluminescence dosimetry systems for determining absorbed dose of electronic devices[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of National Defense Science and Technology Commission, 1994.
- 8 Lei F, Truscott P R, Dyer C S, *et al.* MULASSIS: a Geant4-based multilayered shielding simulation tool[J]. *Nuclear Science IEEE Transactions on*, 2002, **49**(6): 2788–2793.
- 9 Kawrakow I. Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. I. EGSnrc, the new EGS4 version[J]. *Medical Physics*, 2000, **27**(3): 485–498.
- 10 GB/T 15447-2008. X、 γ 射线和电子束辐照不同材料吸收剂量的换算方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 15447-2008. Conversion method of absorbed doses in different materials irradiated by X, γ rays and electron beams[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- 11 何承发, 郭旗, 陆妩, 等. γ 射线在不同材料吸收剂量换算的Monte Carlo模拟[C]. 中国核学会2009年学术年会论文集, 第一卷·第6册, 北京: 中国核学会, 2009: 2866–2873.
HE Chengfa, GUO Qi, LU Wu, *et al.* Monte Carlo simulation of conversion of absorbed dose in different medium for gamma-ray[C]. *Proceedings of 2009 Annual Meeting of Chinese Nuclear Society*, Vol.1, No.6, Beijing: Chinese Nuclear Society, 2009: 2866–2873.
- 12 刘超铭. CC4013集成电路电离辐射效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LIU Chaoming. Ionization radiation effects research on CC4013 integrated circuit[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- 13 无锡中微爱芯电子有限公司. CD4069六路反相器产品说明书[DB/OL]. <http://www.i-core.cn>, 2012.
Wuxi I-CORE Electronics Co, Ltd. CD4069 hex inverter product instructions[DB/OL]. <http://www.i-core.cn>, 2012.
- 14 高文钰, 严荣良, 余学峰, 等. MOSFET的电离辐照效应[J]. *半导体学报*, 1992, **13**(8): 475–481.
GAO Wenyu, YAN Rongliang, YU Xuefeng, *et al.* Ionizing radiation effect of MOSFET[J]. *Journal of Semiconductors*, 1992, **13**(8): 475–481.
- 15 何宝平, 张正选, 郭红霞, 等. 星用典型CMOS器件54HC04 ^{60}Co 源辐射效应研究[J]. *原子能科学技术*, 2000, **34**(4): 334–338.
HE Baoping, ZHANG Zhengxuan, GUO Hongxia, *et al.* Research of radiation effects on typical CMOS devices 54HC04 for space application by using the ^{60}Co source[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2000, **34**(4): 334–338.