

## 总剂量探测技术的空间应用\*

郭东文<sup>1,2</sup>, 杨艳<sup>3</sup>, 郑义<sup>3</sup>, 高志强<sup>3</sup>, 李军<sup>3</sup>, 史青<sup>3</sup>, 彭泳卿<sup>3</sup>

(1 北京理工大学信息与电子学院 北京 100081

2 中国载人航天工程办公室 北京 100094

3 北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 空间辐射对飞行器可造成辐射损伤甚至失效, 对航天员的生命健康安全存在着威胁。随着航天活动的深入, 对空间辐射探测技术的发展提出了更高的要求。通过辐射敏感场效应晶体管 (RADFET) 探测技术设计研制了总剂量探测器, 介绍了探测器的设计原理和测试数据分析, 以及研究发展方向和空间应用展望。

**关键词:** 空间辐射; 飞行器; 总剂量; RADFET

中图分类号: V520.6

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2022)02-0120-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210802001

引用格式: 郭东文, 杨艳, 郑义, 等. 总剂量探测技术的空间应用[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 120-126.

### Space application of total dose detection technology

GUO Dongwen<sup>1,2</sup>, YANG Yan<sup>3</sup>, ZHENG Yi<sup>3</sup>, GAO Zhiqiang<sup>3</sup>, LI Jun<sup>3</sup>, SHI Qing<sup>3</sup>, PENG Yongqing<sup>3</sup>

(1. School of Information and Electronics Beijing University of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Spacecraft System Engineering, CAST, Beijing 100094, China;

3. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Space radiation can cause radiation damage or even failure to spacecraft, which is a threat to the life, health and safety of astronauts. With the development of space activities, higher requirements are put forward for the development of space radiation detection technology. A total dose detector is designed and developed by radiation-sensitive field-effect transistor(RADFET) detection technology. In this paper, the design principle of the detector and the analysis of test data are introduced, as well as the research and development direction and the prospect of space application.

**Key words:** Space radiation; Spacecraft; Total dose; RADFET

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210802001

**Citation:** GUO Dongwen, YANG Yan, ZHENG Yi, et al. Space application of total dose detection technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 120-126.

## 引 言

因为空间辐射环境而造成损伤已成为飞行器在轨故障的主要原因。空间飞行器处于外辐射带中心的边缘, 主要受到空间高能电子的影响。高能电子在飞行器表面及内 BU 电子元器件及材料中沉积能量, 影响材料和器件的性能<sup>[1-3]</sup>。飞行器抗辐射加固技术水平的全面提高已显得更为重要和迫切, 其中基本任务之一是对空间辐射环境数据的收集和研究, 通过获取高能电子沉积的电离总剂量, 可以评估空间辐射环境以对飞行器技术研究提供数据支持。

本文介绍了基于辐射敏感场效应晶体管 RADFET 的总剂量探测技术, 以及在具体的实验中如何用实用的方法进行剂量测量和标定。

## 1 总剂量探测技术简介

### 1.1 原理介绍

总剂量测量的基本原理是: 辐射敏感场效应晶体管 RADFET 在栅氧化层中产生和俘获辐射诱导电

\*基金项目: 中国航天科技集团空间综合环境监测仪项目

收稿日期: 2021-08-02 收修改稿日期: 2021-11-15

荷从而改变了 RADFET 的阈值电压，这种变化与辐射剂量有关，输出阈值电压的变化能够通过电路进行实时测量<sup>[4,5]</sup>。本设计采用的 RADFET，是一种离散的 P 沟道 MOSFET，氧化层厚度为 100 nm，量程范围可达 20 rad~2.5 Mrad。

当厚栅氧的 PMOSFET 受到辐照后，在其栅极下的 SiO<sub>2</sub> 中产生电子-空穴对，一定数目的电子-空穴对会立即或很快发生复合并消失掉，另外一些没有发生复合的电子-空穴对在电场的作用下发生漂移，由于在 SiO<sub>2</sub> 中迁移率的差异，电子的漂移运动速度要比空穴快很多。外加的电压偏置条件也对漂移运动产生影响，在正的偏压条件下，电子会迅速漂移到栅极上并离开灵敏区域，与电子运动方向相反，空穴会缓慢地向 Si 衬底方向运动，作为 SiO<sub>2</sub> 的一个固有特性，在 SiO<sub>2</sub> 中会有一些空穴陷阱，在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面附近空穴陷阱的密度是最大的，这就导致一部分空穴到达界面处并生成新的界面态陷阱电荷改变界面态，其余的空穴则在漂移途中被氧化层中的陷阱俘获形成氧化物陷阱电荷。氧化物陷阱电荷与界面态陷阱电荷统称为电离陷阱电荷，电离陷阱电荷寿命很长，所以多次辐照使电离陷阱电荷累加，对辐照产生记忆作用。随着辐照总剂量的增加，SiO<sub>2</sub> 中的电离陷阱电荷也在增加，导致 PMOSFET 的阈值电压发生漂移。阈值电压的漂移与辐照总剂量存在一定的函数关系，通过测量阈值电压漂移量可以计算出辐射累积总剂量。函数关系式为：

$$\Delta V_{th} = kD^n \tag{1}$$

其中， $k$  和  $n$  为系数，它们的取值由辐照偏置条件、剂量范围以及栅氧厚度等因素决定<sup>[6,7]</sup>， $\Delta V_{th}$  中的 th 是阈值电压 Threshold voltage 的缩写。

### 1.2 设计方案

为了测量便捷，通常测量 PMOS 传感器的阈电压或其它某一恒定源漏电流下的电压，通常采用恒流偏置模式。恒流偏置模式下，PMOS 传感器适合测量辐射剂量较高且受剂量率影响较小的场所，该模式能够更加方便地对测量进行控制，是卫星载荷设备的首选工作模式。当 PMOS 传感器受到辐射时，传感器的阈电压会变化，向负向漂移，这就使得源-漏阻抗加大，恒流通过源漏极。此时，通过分析接收到的栅极电压和源极电压的差值就能轻松得到阈电压的大小，实现自动、连续电压测量。栅极和源极（与衬底短接）之间建立起的偏压即为阈电压，如图 1 所示。

为监测不同屏蔽厚度下的电离总剂量，总剂量探测器由四路总剂量传感器探头、探头驱动电路以及模拟信号调理电路组成。总剂量传感器探头为半导体 PMOS 管，四个探头埋深在不同厚度的屏蔽层下。

不同厚度的屏蔽层以台阶的方式排布，台阶及总剂量传感器探头的布置方式有以下三种，如图 2 所示，其中第三种台阶及探头布置方式，具有最大的有效张角，可以充分利用有限的设备体积，使测量结果尽量接近平板近似模型。

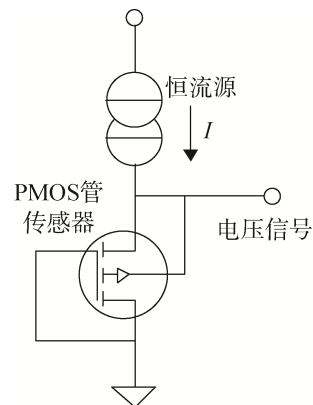
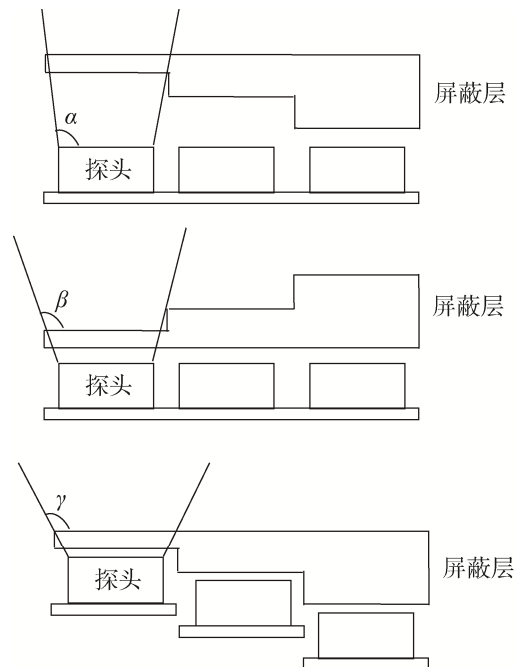


图 1 总剂量测量原理图

Fig. 1 The schematic diagram of total dosimetry



相同条件下，探头接收辐射角度  $\gamma > \beta > \alpha$

图 2 台阶及总剂量传感器探头的布置方式比较  
Fig. 2 The comparison of the layout of step and total dose sensor probe

探头驱动电路为恒流源,作用是电流加在 PMOS 管上,根据 PMOS 的数据手册要求,确定加在 PMOS 传感器上的恒定电流值。通过基准源和运放实现恒流源,基准源的输出  $U_o$  与参考点  $U_c$  电压差保持参考电压  $U_f$ 。如图 3 所示,加在 PMOS 传感器上的恒定电流为  $I_{con} = U_f/R$ 。

总剂量探头可以输出反映传感器总剂量的模拟电压信号,电压为直流慢变化电压信号,通过后级的模拟信号调理电路,对信号进行偏置、放大、滤波,输出要求范围内的直流电压信号到电子学箱进行采集存储。如图 4 所示。

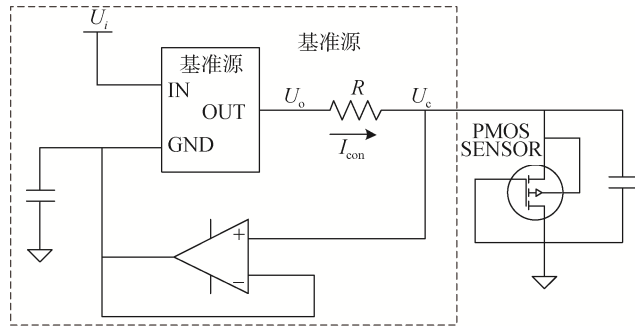


图 3 恒流源驱动电路原理图  
Fig. 3 The constant current source driver circuit schematic diagram

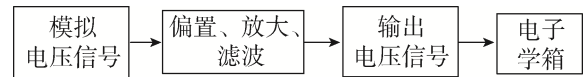


图 4 总剂量的模拟电压信号测量流程图  
Fig. 4 The flow chart of total dose analog voltage signal measurement

## 2 标定实验结果及分析

### 2.1 标定方案

标定试验采用  $60\text{Co}$ - $\gamma$ 射线放射源,辐照试验总剂量范围是  $0\sim 2.5\text{ Mrad}$ 。随着辐照增加,后期灵敏度逐渐变低,因此分两段进行标定。在  $0\sim 100\text{ krad}$  以内采用相对较低的剂量率进行标定,在  $100\text{ krad}\sim 2.5\text{ Mrad}$  采用较高剂量率进行标定,获得 RADFET 的标定曲线 ( $\Delta V_{th}\sim\text{Dose}$  的关系)。采用 4 路 RADFET 器件进行总剂量试验,获得标定曲线的标准偏差。

#### 2.1.1 试验剂量率标定方法

总剂量探头标定试验采用的剂量率采用实测方法获得,具体措施是在 RADFET 各试验件周围,布置空气电离探头。通过测量一段时间内剂量计的空气吸收辐射剂量(单位为  $G_y(\text{Air})$ ,  $1G_y(\text{Air})=100\text{ rad}(\text{Air})$ )。然而,在辐照试验中,通常以常用的 Si 材料中作为吸收媒介,因此需要将空气吸收剂量通过能量吸收系数换算成 Si 吸收剂量,然后可以得到所要标定的剂量率(单位为  $\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ )。

剂量率标定原理如下: $\gamma$ 射线在空气中的吸收剂量与在 Si 中的吸收剂量差一个系数,后者是前者的 0.897 1,而在  $\text{SiO}_2$  中和 Si 中的剂量吸收系数几乎相等,即:

$$D_{\text{Si}} \approx 0.897 1 D_{\text{Si}} \quad (2)$$

$$D_{\text{SiO}_2} \approx D_{\text{Si}} \quad (3)$$

因此,经过一定辐照时间  $t$  (单位为 s) 之后,测量获得空气所吸收的剂量,通过上述等式计算获得 Si 中的吸收剂量  $D_{\text{Si}}$  (单位为  $\text{rad}(\text{Si})$ )。由于剂量率的定义是单位时间的累积剂量,从而可以得到 Si 材料中的剂量率(单位为  $\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ )为:

$$D_{\text{rate}} = D_{\text{Si}}/t = D_{\text{SiO}_2}/t \quad (4)$$

经过换算可以获得 RADFET 所受到的辐射剂量。

#### 2.1.2 试验件偏置状态

总剂量标定试验件采用与正式产品相同的偏置条件,即恒流偏置模式。试验件采用的偏置条件如图 5 所示。

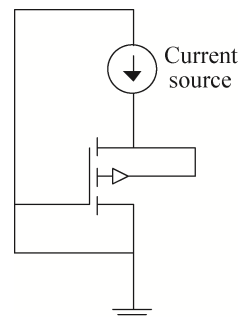


图 5 RADFET 试验件偏置状态  
Fig. 5 The offset state of RADFET test piece

总剂量标定试验电路板上可以插拔4个RADFET器件,每个器件的偏置状态一致。通过高精度万用表采集每个器件的源极电压随累积剂量变化的关系。器件布置图和采集电路框图分别如图6和图7所示。

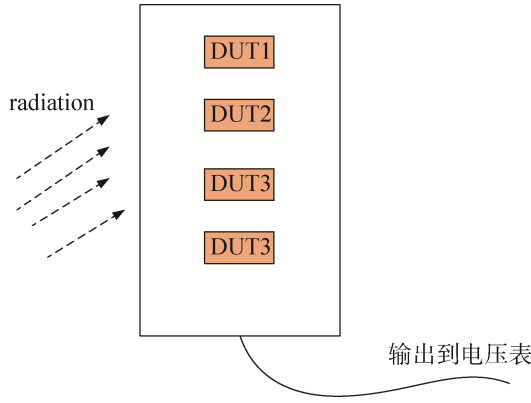


图6 RADFET 偏置电路板示意图  
Fig. 6 The schematic diagram of RADFET bias circuit board

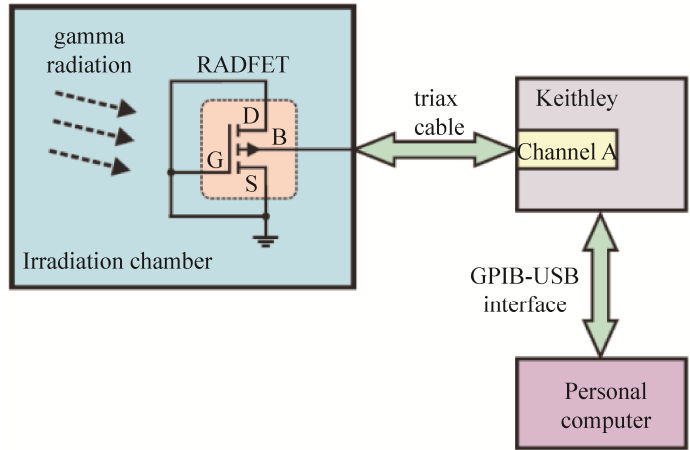


图7 试验件辐照在线测试系统框图  
Fig. 7 The block diagram of irradiation on-line test system for test piece

在分别获得0~100 krad和100 krad~2.5 Mrad 标定试验数据的基础上,对试验数据进行拟合,获得这两个范围的剂量标定曲线。

### 2.2 0~100 krad 剂量范围

RADFET 总剂量探头的电压输出随辐照剂量变化的结果如图8所示。从图中可以看出,在0~100 krad 范围内,采用  $Y=ax^b$  拟合公式可以很好地拟合总剂量探头的标定试验数据。

标定数据的拟合公式为:

$$Y = 0.01549 \times X^{0.85415} \tag{5}$$

其中,  $X$  表示辐射剂量,单位为 krad;  $Y$  为输出电压,单位为 V。

对四路 RADFET 总剂量探头的响应进行分析,以获得不同 RADFET 探头响应的差异性。图9是四路总剂量探头随着总剂量变化的关系。从图中可以看出,四路总剂量探头的一致性很好,可以代表正式产品件的总剂量响应。

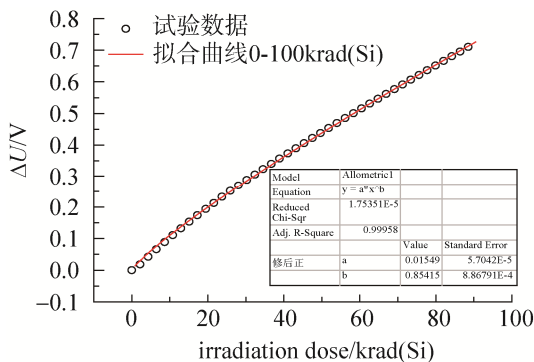


图8 RADFET 电压输出随辐照剂量变化拟合(0~100 krad)  
Fig. 8 RADFET voltage output is fitted with the change of irradiation dose (0~100 krad)

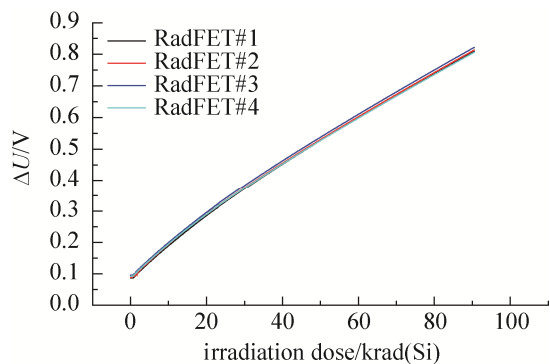


图9 四路 RADFET 探头的总剂量响应(0~100 krad)  
Fig. 9 The total dose response of 4 RADFET probes (0~100 krad)

为了定量分析得到 RADFET 探头在0~100 krad 范围内的差异性,将四路探头的电路输出进行平均,并获得四路输出电压的标准偏差。将其画在一张图中,如图10所示。从图中可以看出,RADFET 在

100 krad 范围的标准偏差很小, 几乎可以忽略。

### 2.3 100 krad~2.5 Mrad 范围

同理可以获得 100 krad~2.5 Mrad 范围内的四路 RADFET 探头的总剂量响应, 具体结果如图 11 所示。

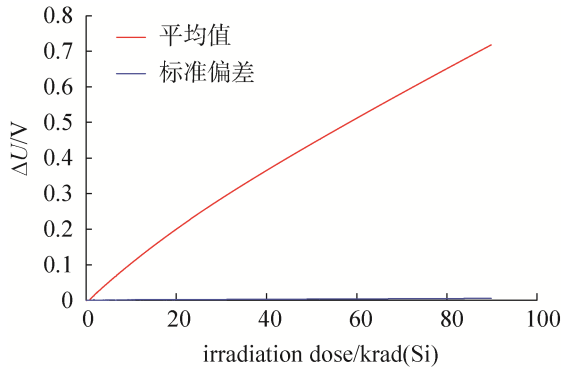


图 10 四路 RADFET 探头输出电压的平均值及偏差 (0~100 krad)

Fig. 10 The average value and deviation of output voltage of 4 RADFET probes (0~100 krad)

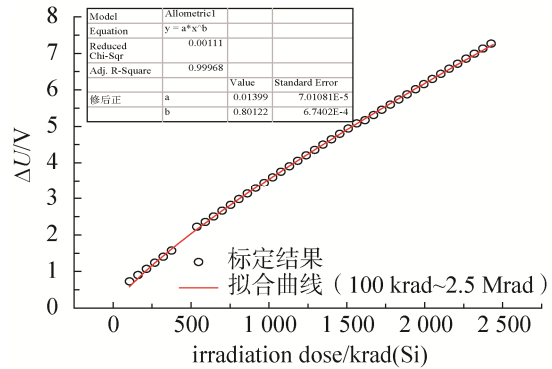


图 11 RADFET 电压输出随辐照剂量变化拟合 (100 krad~2.5 Mrad)

Fig. 11 RADFET voltage output is fitted with the change of irradiation dose (100 krad~2.5 Mrad)

标定数据的拟合公式为:

$$Y = 0.01399 \times X^{0.80122} \tag{6}$$

其中,  $X$  表示辐射剂量, 单位为 krad;  $Y$  为输出电压, 单位为 V。

可以分析获得 100 krad~2.5 Mrad 范围内, RADFET 的辐射响应差异, 见图 12 和图 13。从图中可以看出随着辐射剂量的不断增加, 四路 RADFET 间的差异性不断显现, 但最大也不超过 29%。不同 RADFET 间的差异性是由于 PMOS 传感器的灵敏度跟栅氧化层的厚度有着密切的关系, 厚度增大, 灵敏度就增高。这四路 RADFET 虽然型号相同, 但在工艺上也存在微小的差异性。

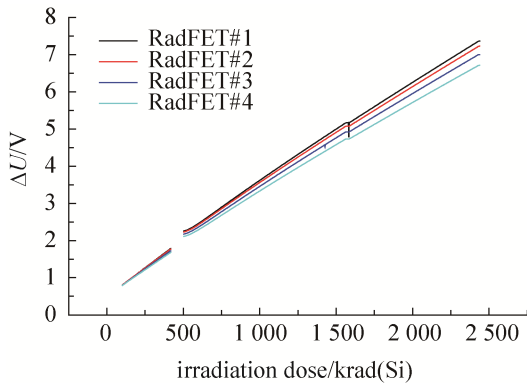


图 12 四路 RADFET 探头的总剂量响应 (100 krad~2.5 Mrad)

Fig. 12 The total dose response of 4 RADFET probes (100 krad~2.5 Mrad)

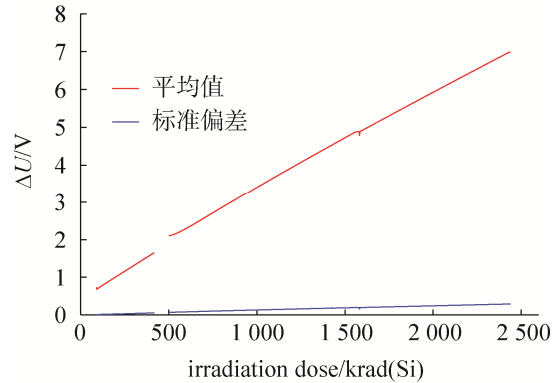


图 13 四路 RADFET 探头输出电压的平均值及偏差 (100 krad~2.5 Mrad)

Fig. 13 The average value and deviation of output voltage of 4 RADFET probes (100 krad~2.5 Mrad)

### 2.4 退火影响

PMOS 剂量计, 是利用 P 沟道 MOS 晶体管受电离辐射后感生的氧化物正电荷与施主界面态造成的阈值电压漂移来测量辐射总剂量的。已有研究表明<sup>[8-10]</sup>: MOS 管在停止辐照后, 辐射感生氧化物正电荷会发生所谓退火。温度和偏置是退火速率和程度的决定性因素, 高温退火, 初始退火速率就高, 退火幅度也较大; 低温条件下退火幅度则较小。同样的退火温度下, 正偏压有加速初始退火速率的作用, 负偏压

则起到抑制作用。负偏压越高,抑制作用越明显。正偏压与负偏压相比能较明显地提高初始退火速率,但正偏压之间,相对较低的电压却表现出更有利于退火,特别是零偏(所有管脚短接)退火,其退火程度最大<sup>[11]</sup>。

本设计采用恒流偏置模式,与零偏相似<sup>[12]</sup>。辐照试验结束后,在室温环境下退火,退火时间为135 h,图14给出了四路RADFET总剂量电路的退火特性。退火试验的结果表明所有RADFET总剂量探头的电压输出均为先保持稳定(前24 h内),而后缓慢下降。加电退火时间135 h后,RADFET电压输出相对辐照试验结束时刻的电压输出最大变化为32%。

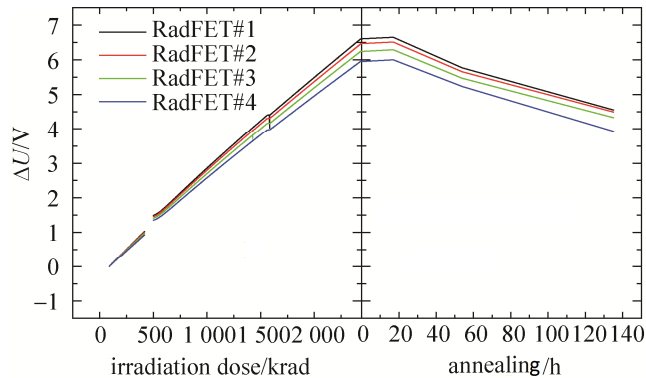


图14 四路RADFET探头的退火特性

Fig. 14 The annealing characteristics of 4 RADFET probes

图11~图14中,500 krad辐射剂量附近有小部分数据缺失,是因在实验开始阶段设备连接线意外断开导致。连接线在被发现断开后及时得到恢复。少量数据的丢失不影响曲线大趋势,对分析数据的走向基本没有影响。

### 3 结束语

本论文围绕空间辐射探测的目标,进行了总剂量探测器系统的搭建与测试。由于RADFET体积小、功耗低,读出简单,以及可实时监测的特点,因此基于RADFET的总剂量探测器又具备低能耗和可近似点测的功能。探测器的集成微型化、模块化和标准化,有利于它在飞行器上进行多个监测点的空间分布,实现对飞行器上关键电子部件、系统的吸收剂量监测,以及子系统故障、空间突发事件的监测和分析。

发展更高性能的总剂量探测技术将是未来我国空间应用的要求,为空间材料、宇航人员防护等科学研究提供便利的技术手段。

### 参考文献

- [1] 王桂珍,姜景和,张正选,等.总剂量辐射效应中的辐射源及剂量测量[J].微电子学,2001,31(3):168-172.  
WANG Guizhen, JIANG Jinghe, ZHANG Zhengxuan, et al. Radiation Sources and Dosimetry in the Test of Total Dose Effects[J]. Microelectronics, 2001, 31(3): 168-172.
- [2] 沈自才.空间辐射环境工程[M].北京:中国宇航出版社,2013.
- [3] 李桃生,陈军,王志强.空间辐射环境概述[J].辐射防护通讯,2008,28(2):1-10.
- [4] 孙静,郭旗,张军,等.剂量率对PMOS剂量计辐射响应的影响[J].微电子学,2009,39(1):128-131.  
SUN Jing, GUO Qi, ZHANG Jun, et al. Influence of dose rate on radiation response of PMOSFET dosimeter[J]. Microelectronics, 2009, 39(1): 128-131.
- [5] 张恒,崔万照.二次电子发射能谱研究进展[J].空间电子技术,2016,13(3):7-15.  
ZHANG Heng, CUI Wanzhao. Review of research on the secondary electron emission energy spectrum[J]. Space Electronic Technology, 2016, 13(3): 7-15.

- [6] 高博, 刘刚, 王立新, 等. PMOSFET 低剂量率辐射损伤增强效应研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(5): 848–853.  
GAO Bo, LIU Gang, WANG Lixin. et al. Research on enhanced low dose rate sensitivity effect for PMOSFET used in space dosimeter[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(5): 848–853.
- [7] HOLMES Siedle A.G. Calibration and flight testing of a low-field PMOS dosimeter[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1985, NS-32(6): 4425–4429.
- [8] HOLMES Siedle A.G, ADANS L., PAULY B., et al. Linearity of PMOS dosimeters operated at zero Bias[J]. Electronics Letters, 1985, 21(31): 570.
- [9] BROWN D.B.. Time dependence of radiation-induced interface trap formation in MOS devices as a function of oxide thickness and applied field[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1984, 31(6): 1439.
- [10] MA T.P., DRESSENDORFER P.V.. Ionizing radiation effects in mos devices and circuits[J]. New York: John Wiley and Sons, 1989: 159, 222, 225.
- [11] MCWHORTER P.J., MILLER S.L., MILLER W.M.. Prediction of low dose-rate effects in power metal oxide semiconductor field effect transistors based on isochronal annealing measurements[J]. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1990, 37(6): 1682.
- [12] 范隆, 任迪远, 张国强, 等. PMOS 剂量计的退火特性[J]. 半导体学报, 2000, 21(4): 383–387.  
FAN Long, REN Diyuan, ZHANG Guoqiang, et al. Annealing characteristics of PMOS dosimeters[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(4): 383–387.

#### [作者简介]

- 郭东文 1978 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电子与信息技术。  
杨 艳 1985 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为特种传感器和光纤解调仪。  
郑 义 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为特种传感器和光学气体分析仪。  
高志强 1990 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为宽调谐及高功率量子级联激光器。  
李 军 1963 年生, 助理工程师, 主要研究方向为特种元器件测试。  
史 青 1982 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为光纤传感系统技术。  
彭泳卿 1980 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天特种传感器与传感系统技术。

(本文编辑: 潘三英)