

基于半导体集成电路辐射效应的空间 辐射环境探测器

张庆祥, 侯明东, 甄红楼

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要:空间辐射环境能够引起半导体集成电路发生的总剂量效应、单粒子效应等辐射效应, 可以用来进行空间辐射环境监测。在一定条件下, 基于此原理的探测器具有常规的面垒型探测器以及 PIN 型探测器等所不具备的优点。尤其适合航天器舱内带电离子探测和用于航天医学的个人辐射剂量探测。介绍了三种基于半导体器件辐射效应的探测器。

关键词:半导体器件; 辐射效应; 总剂量效应; 单粒子效应; 空间环境探测

中图分类号: TL814 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2002)04-0374-03

空间辐射环境对宇航员和空间电子学系统构成严重威胁, 因此辐射环境的探测对保证宇航员的安全和电子学系统的正常工作至关重要。太阳质子事件以及南大西洋地磁异常区强辐射环境的探测对空间环境及其效应研究、卫星抗辐射加固设计、卫星故障分析等方面具有重要作用。空间环境中的重离子、质子以及电子通过电离辐射在半导体器件中产生电子-空穴对, 在外加或内部电场的作用下电荷的运动引起各种有害的辐射效应, 如总剂量效应、单粒子效应以及充放电效应等。辐射效应是航天器故障和失效的重要诱因, 因此辐射效应的研究引起了国际上广泛的重视。研究表明, 半导体集成电路的辐射效应可被利用进行辐射环境的探测, 例如 MOS 晶体管的某些参数的改变在一定范围内与吸收的总剂量成正比; 存储器器件发生单粒子翻转的数量与 LET 值大于某一阈值的高能离子成正比, 前者可以被用来进行航

天器内部复合的电离辐射环境以及宇航员个人剂量的监测, 后者可以用来探测高能离子。

目前, 常用的 GM 计数管、气体积分电离室、热释光剂量仪、固体径迹探测器以及面垒型探测器、PIN 型探测器等都已成功应用于航天飞机、空间站、深空宇宙探测器以及各种卫星。半导体探测器具有能量分辨率高、线性响应好以及工作可靠等优点。因此具有很好的应用前景。面垒型探测器、PIN 型探测器获取的原始信号是辐射在敏感区产生的电荷, 为了对电荷进行有效的收集, 要求加很高的电压。另外这种探测器的有效面积的直径在 cm 量级, 能够测量强度很弱的背景辐射, 但是容易受到辐射损伤的影响, 受后续电子学线路分辨率的影响, 容易形成堆积, 不适合于强辐射环境的监测。

基于辐射效应的探测器与传统探测器最大的区别是通过电离辐射产生的效应间接测量辐射环境, 虽然不能获得能谱, 而且一般不适合进行弱辐射环境的监测, 但是具有以下优点: 活动面积很小, 适合测量大于 10Gy(Si) 强辐射环境; 不需要加高电压, 电子学线路简单; 读出方便, 可以做成“主动”式, 尤其适合于舱内高能带电离子探测和航天医学的个人辐射剂量监测。更主要的是利用现成的集成电路制造工艺, 制作简单。由于目前集成电路的单元电路尺寸与人

收稿日期: 2001-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(19775058, 10075064); 中国科学院“九五”重大课题(KJ952-SI-423)

作者简介: 张庆祥(1971-), 男, 硕士, 中国科学院近代物理研究所博士生, 研究方向: 空间辐射效应。

体细胞相当的水平,因此这种类型的探测器在生物辐射效应以及医学中也有广泛的应用。

在辐射防护、放射生物学以及电子器件的辐射效应等领域中,需要采用微剂量学方法来确定在微小尺寸中能量沉积模式。现代集成电路技术可以制作大量相同尺寸为几个 μm 的二极管。McNulty 首先提出采用反向偏置的 SiP-N 结阵列来测量航天器和飞行器内部的辐射环境,其基本结构是 PN 结后接能谱系统,用多道分析器(MCA)来记录辐射产生的电荷,值得一提的是在微剂量、SEU 以及生物细胞死亡之间存在紧密的联系。这种基于 Si 二极管阵列的微剂量仪^[1]已经在医学辐射剂量领域以及单粒子翻转领域得到了广泛的应用。由于在普通的 PN 结中除了漂移,还有扩散和漏斗效应等电荷收集机制,因此 PN 结的灵敏体积难以确定,近年来利用 SOI 结构来减小扩散和漏斗效应。这种机制的探测器虽然利用集成电路,但仍属于传统的半导体探测器。下面介绍三种典型的基于集成电路的辐射效应的探测器。

1 基于 MOS 集成电路总剂量效应的探测器

电离辐射在 MOS 晶体管栅极的氧化层中产生电子-空穴对,电子是可移动的,很容易离开氧化层,而空穴被俘获在 Si/SiO₂界面上,导致 MOS 晶体管阈值电压 V_T 的正漂移,研究表明,在100Gy(Si)以下,阈值电压的漂移 ΔV_T 与氧化层吸收的剂量 D 成正比,因此,通过测量 ΔV_T 就可以得到吸收剂量,这类探测器的特点是:

- 1) MOSFET 剂量仪既可以用于被动式,也可以用于主动式,测量结果实时读出;
- 2) 适合测量在薄层屏蔽后的累积剂量;
- 3) 活动面积小于 $1\mu\text{m}$, 适合测量某一点的剂量。这对于材料科学、航天器充电效应、原子氧(AO)实验以及电子器件的辐射效应研究非常重要。

需要指出的是温度对 V_T 影响很大,因此在具体应用中应考虑根据环境温度对数据进行修正。美国海军实验室(NRL)从70年代末就开始研制用于空间环境的高剂量 MOSFET 剂量仪。在 MIR 空间站以及俄罗斯的生物卫星 BION-10 (1992)和 BION-11 (1996)上进行的

MOSFET 剂量仪技术可行性飞行试验^[2],将该探测器放置在空间站的宇航员休息舱以及卫星外部薄屏蔽层里。测量到的剂量率可以低到 0.3 mGy/d ^[3],首次在空间应用中将 MOSFET 用于低剂量的测量。结果表明这种探测器可以替代曾经在各种载人航天器(MIR、STS')以及多颗实验卫星上使用的热释光探测器 TLD,用于宇航员个人剂量的监测。此外,英国国防评估和研究机构(DERA)的地球转移轨道实验卫星 STRV-1上采用4个双 MOSFET 用作剂量深度探测器^[3]。

2 基于可擦除浮栅工艺的剂量仪^[4]

浮栅雪崩注入型金属-氧化物-硅(FAMOS)晶体管阵列构成的 UVPROM 是一种紫外擦除的非易失型存储器,与其他非易失型存储器如 EEPROM 类似,只不过擦除的方式不同。其结构如图1所示,浮栅上的电荷代表存储的信息。写入信息时,在强电场作用下,热电子通过绝缘层输运到浮栅极,当浮栅极上存储电荷产生的电场与注入电场相当时达到饱和。此时浮栅极对沟道加负偏压,使 FET 截断,在控制极上加相应的正电压,可使 FET 打开。因此控制栅极上所加的可使沟道打开的电压反应了浮栅极上电子的数量。电离辐射导致浮栅极上电荷逐渐减少。浮栅上剩余电荷是吸收剂量的函数,而通过控制极上打开沟道所需电压就可以得到吸收剂量。

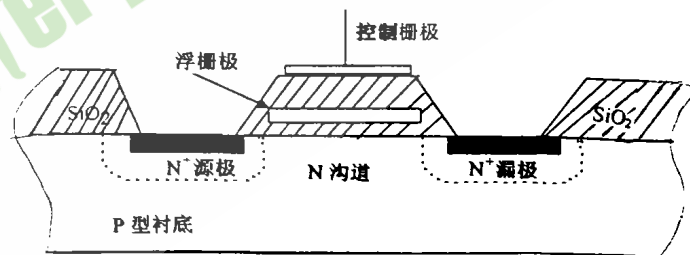


图1 FAMOS 晶体管,浮栅极存储的电荷在电源关断后仍保持,电离辐射效应使浮栅极上的电荷损失

这种方法利用商业级的数字 UVPROM 作为模拟剂量仪,测量时保证存储的数据和探测器不受损伤,而且在读出剂量时仅需要加电源即可。其分辨率取决于 UVPROM 的单元数。包含 65536 个 FAMOS 晶体管的 AMD27C64 UVPROM 在1997年发射的搭载了微电子和光电器件实验平台(MPTB)实验中作为剂量探测器已进行了可行性试验。结果其分辨率达到了

0.1Gy(Si)。目前正在两个方面进行研究,一是提高其灵敏度,以便用于个人剂量监测和在SEE研究作为微剂量仪;二是扩展量程,以便长期测量和用于极端恶劣环境。

3 基于静态存储器(SRAM)单粒子翻转的高能离子探测器^[5]

静态存储单元存储的信息会因为单个高能离子的入射而改变,即单粒子翻转。发生翻转的数量与满足一定LET值的离子数之间存在正比关系,因此可以利用对SRAM作为存储器件有害的SEU来探测高能离子的流强(Flux)。这种类型的探测器在测量太阳耀斑和南大西洋地磁异常区高能离子方面具有良好的应用前景。当然前提是保持工作电源稳定,而且不发生另外一种可导致器件烧毁的破坏性单粒子效应—单粒子闭锁SEL。该类型探测器具有以下特点:

1)灵敏区面积小,例如1.2 μ m CMOS工艺制造的4k SRAM的敏感区只有0.0017cm²,小于直径为cm量级的PIN二极管和金硅面垒探测器,因此适于强辐射环境。

2)具有5个数量级的动态量程,通过屏蔽层过滤只有落入能量探测窗口的离子才能引起SEU。SRAM单元的敏感度—临界电荷可以通过调节单元的偏置电压来调节,因此通过改变电压 V_d 可以改变探测的离子是重离子还是轻离子。

3)对电子以及 γ 射线不敏感,抗干扰能力强。

在1994年1月25日发射的Clementine Spacecraft上搭载的一个RRELAX辐射监测芯片上包括一个4k字节的粒子谱仪,经历了4

月21日太阳耀斑,穿越了地球俘获带,发现该谱仪仅仅对质子敏感,而对电子不敏感。英国国防评估和研究机构(DERA)的地球转移轨道实验卫星STRV-1上采用了一套由256k DRAM以及抗辐照能力很强的54HC电路构成读写I/O电路的质子探测器,是类似机制探测器在空间环境又一个应用^[3]。

4 结论

目前国际上正在研究各种基于辐射效应探测器,预计航天实践的发展,人类在太空活动日益频繁,基于半导体集成电路辐射效应的探测器不但在空间环境,而且在地面核物理实验以及医疗设备中也具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1]Bradley PD, et al. Charge collection and radiation hardness of a SOI microdosimeter for medical and space applications[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, NS45:2700.
- [2]Mackay GF, et al. Applications of MOSFET dosimeters on MIR and BOIN satellites[[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, NS44:2048.
- [3]Thomson I, et al. Dose-depth and SEU monitors for the STRV-1c satellite[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, NS45:2765.
- [4]Scheick LZ, et al. Dosimetry based on the erasure of floating gates in the natural radiation environments in space[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, NS45:2681.
- [5]Buehler MG, et al. Clementine RRELAX SRAM particle spectrometer[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, NS41:2404.

Dosimeters based on radiation effects of Si ICs

ZHANG Qing-xiang, HOU Ming-dong, ZHEN Hong-lou

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou of Gansu Prov. 730000, China)

Abstract Radiation effects in Si ICs, such as total dose effect, single event effect, et al., can be utilized to measure space radiation environment. Detectors based on these effects have some advantages compared with conventional semiconductor detectors (barrier detector and P-I-N diode) as dose depth monitor in spacecraft and "skin" dosimeter for personnel. Three of these kinds of detectors and their uses in space are introduced in this paper.

Key words: semiconductor detectors; radiation effects; total dose effect; single event effect; space radiation environment