

## 半导体器件内离子有效 LET 值测量方法研究

史淑廷, 郭 刚, 刘建成, 蔡 莉, 陈 泉, 沈东军, 惠 宁, 张艳文,  
覃英参, 韩金华, 陈启明, 张付强, 殷 倩, 肖舒颜

(中国原子能科学研究院核物理所, 国防科技工业抗辐照应用技术创新中心, 北京 102413)

**摘 要:** 提出了一种基于电荷收集测试技术的离子有效 LET 值测量方法. 首先对半导体器件内收集电荷量与入射离子有效 LET 值之间的关系进行了分析, 根据二者之间的关系提出通过测量电荷收集量从而测量离子有效 LET 值的方法; 然后建立了半导体器件电荷收集测试系统, 利用 PN 结和 SRAM 对测量方法进行了验证; 最后成功利用该方法解释了以往单粒子效应实验中出现的异常数据.

**关键词:** 单粒子效应; 电荷收集; 有效 LET 值; SRAM

**中图分类号:** TL84, O571.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2018)10-2546-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.10.032

## Study of Measurement of the Ion Effective LET in Semiconductor Devices

SHI Shu-ting, GUO Gang, LIU Jian-cheng, CAI Li, CHEN Quan, SHEN Dong-jun, HUI Ning, ZHANG Yan-wen,  
QIN Ying-can, HAN Jin-hua, CHEN Qi-ming, ZHANG Fu-qiang, YIN Qian, XIAO Shu-yan

(Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, National Innovation Center of Radiation Application, Beijing 102413, China)

**Abstract:** An effective LET of incident ions measurement method based on charge collection test technique is proposed. Firstly, the relationship between effective LET and amount of collected charge caused by incident ions in semiconductor devices analyzed, and according to the relationship the effective LET measurement method is raised. Then a semiconductor device charge collection test system is established and the effective LET test method is verified utilizing PN junction and SRAM. Finally, the effective LET in a semiconductor device that has abnormal Single Event Upset cross-section data is measured and find the reason for the abnormal data.

**Key words:** single event effect; charge collection; effective LET; SRAM

### 1 引言

因离子入射到器件敏感区内沉积电荷量的多少与离子 LET 值密切相关, 而发生单粒子效应 (Single Event Effect, SEE) 的概率与电荷量有关, 因此 LET 值被作为单粒子效应截面参量. 然而近些年来随着半导体工艺技术发展, 单粒子效应机理发生了变化, LET 值作为 SEE 截面参量遇到了一些问题、带来了一些分歧<sup>[1]</sup>, 主要体现在以下三个方面.

第一, 高低能离子单粒子效应等效性问题. 有数据表明: 根据地面加速器测量截面数据计算所得空间错误率与器件在轨后的实际错误率相差几个量级<sup>[2,3]</sup>; 利用不同能量的加速器, 对 SRIM 程序计算所得具有相同 LET 值、不同能量的离子 SEE 截面上升区域存在量级

上的差异<sup>[4]</sup>.

第二, 离子倾斜入射时的有效 LET 值. 单粒子效应模拟实验中常采用倾斜入射的方法, 通过增加离子在敏感区内沉积电荷量的方法增加离子 LET 值, 离子有效 LET 值为:  $LET_{eff} = LET_0 / \cos\theta$ , 其中  $LET_0$  为离子初始 LET 值,  $\theta$  为入射方向与法线夹角. 然而诸多数据表明, 离子倾斜入射时其有效 LET 值并不一定遵循上述公式<sup>[5]</sup>. 另外宇宙空间离子以各向入射到器件内, 而地面模拟实验中测量截面时为获得较准确有效 LET 值多采用垂直入射, 这也是导致地面预估数据与在轨实测数据存在偏差的原因之一.

第三, 地面模拟实验中离子到达敏感区时的 LET 值, 即有效 LET 值, 与离子到达器件表面时的 LET 值, 即表面 LET 值存在较大差异. 串列加速器由于能量分

辨率高、更换离子种类快被广泛用于单粒子效应地面模拟实验.然而新型器件由于金属布线层增加,覆盖层增厚,串列加速器上产生的较重离子穿过覆盖层时损失能量较多,致使有效 LET 值与表面 LET 值差异较大<sup>[6]</sup>.

建立一种有效 LET 值测试手段,对离子在器件内的有效 LET 值进行测量,是对上述问题进行深入研究的有效手段.针对这种需求,对基于电荷收集测量方法的有效 LET 值测量方法进行了研究,旨在为今后 SEE 试验数据修正、实验方法改进、地空单粒子效应等效性研究等提供一种有效参考技术手段.

## 2 基本原理和方法

采用基于电荷收集测量方法的有效 LET 值测量方法,需先对收集电荷量与入射离子有效 LET 值之间的关系进行分析.

### 2.1 收集电荷量与离子有效 LET 值之间的关系

采用经典的 RPP 模型<sup>[7]</sup>对这一现象进行解释,假设器件敏感区为长方体,如图 1 所示.

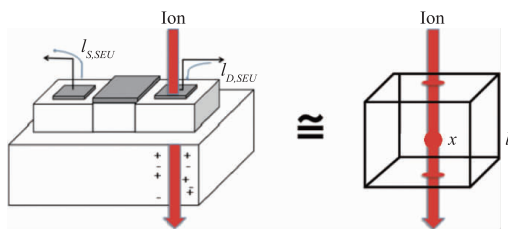


图1 敏感区长方体模型

当离子穿过敏感区时,假设离子在路径  $x$  处的 LET 值为  $LET(x)$ ,则沉积的能量为

$$E = \rho \int_0^l LET(x) \cdot dx \quad (1)$$

其中  $\rho$  为器件材料密度,  $l$  为电荷收集长度,  $LET(x)$  为离子在路径  $x$  处的 LET 值.因器件敏感区厚度很薄,可认为离子穿过时能量变化很小,在敏感区内的 LET 值恒为  $LET_{eff}$ ,因此式(1)可变为:

$$E \approx LET_{eff} \cdot l \cdot \rho \quad (2)$$

沉积能量  $E$  与电离产生的电荷量  $Q$  成正比.在同一器件中、相同温度和电压条件下,仅考虑入射离子和电荷量  $Q$  时,不同离子入射时可认为  $l$  为常数,因此有:

$$Q \propto LET_{eff} \quad (3)$$

采用线性测试系统对电荷进行测量,考虑重离子幅度亏损等因素,线性关系曲线可能不过原点,表达式如下:

$$Q \propto k \cdot LET_{eff} + b \quad (4)$$

其中  $k$  和  $b$  为比例系数和截距.

### 2.2 有效 LET 值测试方法

通过上述分析发现,在相同电压、温度等条件下,器

件收集电荷量与入射离子有效 LET 值之间存在线性关系,因此有效 LET 值测量方法为:针对具体的器件,首先利用不同种类离子进行辐照,并测量收集到的电荷量,对收集电荷量与入射离子 LET 值之间的线性关系进行刻度,进而利用这种线性关系,通过电荷收集量,求出不同种类离子在器件内的有效 LET 值.

当然,由于 RPP 模型中采用了大量近似,所以收集电荷量与离子有效 LET 值之间的关系可能仅为近似线性关系,在实验中还将进行验证,当线性关系成立时,可对有效 LET 值进行定量测量,当不成立时,可进行定性测量.

## 3 实验设置情况

### 3.1 电荷测试装置与实验环境

电荷收集采用基于脉冲幅度分析(Pulse Height Analysis, PHA)测量系统,它主要由电荷灵敏前置放大器、线性放大器、多道分析器等构成,如图 2 所示.本工作中电荷灵敏前放采用 ORTEC 142A,整形放大器采用 ORTEC 572A,多道分析器采用 AMPTEK MCA8000.

实验均在北京 HI-13 串列加速器单粒子效应专用辐照装置上进行,为确保实验所用离子能量正确,所有离子均采用金硅面垒探测器系统进行能量刻度.

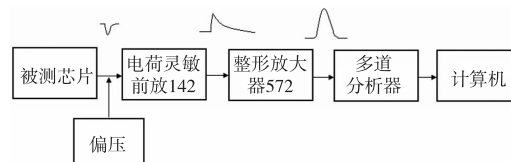


图2 基于PHA原理的电荷收集测量系统

### 3.2 电荷测量的关键技术

与半导体探测器相比,半导体芯片内耗尽层很薄,离子穿过时产生的电荷量很少,因此形成的脉冲信号幅度很弱,很容易被噪声掩盖.因此针对芯片的电荷收集测量系统关键问题之一即为信噪比的提高问题.本工作中采用同轴屏蔽电缆、使用净化电源、铺设接地阻抗小于  $2\Omega$  的良好接地等手段减小外部电磁干扰引起的噪声.

## 4 实验测试结果及分析

### 4.1 PN 结测试结果及分析

因 PN 结结构简单,内部不存在电路逻辑状态变化、相邻敏感节点电荷共享、寄生电路效应等对内部产生的电荷产生分流影响,因此利用 PN 结可以对利用电荷收集测量方法测量有效 LET 值的方法进行验证.所用 PN 结剖面图如图 3 所示.

所用离子及测试结果如表 1 所示.因穿过相同厚度靶材料时,较轻离子损失能量较少,LET 值变化较少,因

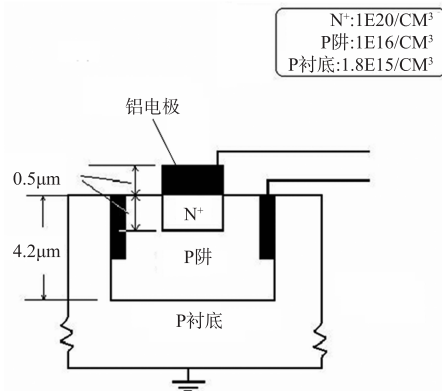


图3 PN结剖面图

此通常采用较轻离子对线性关系进行刻度,进而求出较重离子有效 LET 值。

表1 n+p型PN结内实验测试结果

辐照离子	能量 (MeV)	能谱道数	表面 LET 值 ( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ )	测量 LET 值 ( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ )
Cl	160	104	13.1	刻度离子
Ti	180	183	21.4	刻度离子
Cu	200	305	32.5	34.1

因该 PN 结表面无覆盖层,高掺杂区深度仅为  $0.5\mu\text{m}$ ,所以离子穿过时能量损失很小,LET 值变化很小,所以刻度 LET 值均采用表面值。从表 1 中可以看出,利用 Cl 和 Ti 作为刻度离子,经过对离子 LET 值与电荷收集谱峰位道数之间的线性关系进行刻度,求出了 Cu 离子在 PN 结内的有效 LET 值为  $34.1 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 。与表面值存在 4.9% 的差异,这主要是由于刻度离子种类少、未考虑耗尽层深度、SRIM 计算误差等原因引起。

为观察峰位道数与离子 LET 值线性关系对应情况,将不同离子所测电荷收集谱以及 LET 值与电荷收集谱峰位道数之间的关系汇入图 4 中。从图中可以看出,入射离子 LET 值与电荷收集谱峰位道数之间的线性关系符合很好。

#### 4.2 2K SRAM 测试结果及分析

与 PN 结相比,SRAM 内电路较为复杂。为验证通过电荷收集测量芯片内离子有效 LET 值方法的可行性,针对 SRAM 芯片进行了测试。芯片采用电子 47 所设计的  $1.5\mu\text{m}$  工艺、容量为 2K 的体硅 SRAM,其掺杂浓度等工艺参数与 PN 结相同。所测电荷收集谱峰位道数与离子表面 LET 值关系如图 5。

从图 5 可以看出,离子 LET 值与电荷收集谱峰位道数并不成线性关系。其原因是由于器件表面覆盖层较厚,离子穿过时能量发生损失,有效 LET 值与表面

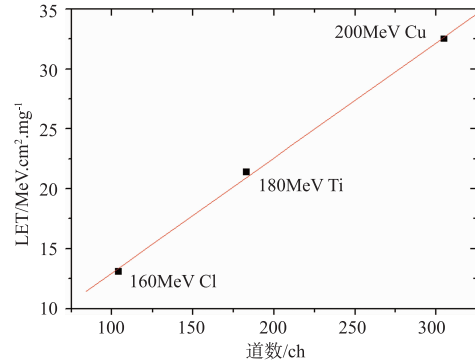


图4 三种离子LET值与电荷收集谱峰位道数的关系

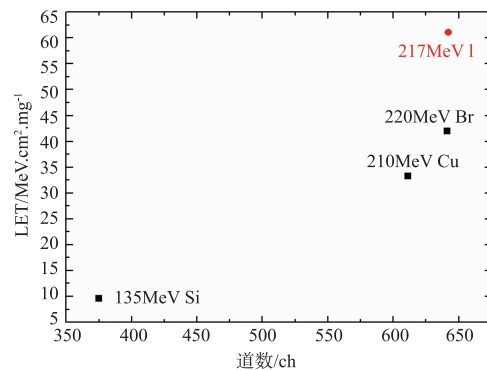


图5 2K SRAM所测离子表面LET与电荷收集谱峰数的关系

LET 值差异较大造成。

为获得离子有效 LET 值,采取如下处理方法:分别计算离子穿过不同覆盖层厚度时剩余能量对应 LET 值,并观察它与收集电荷量之间的关系。当线性关系成立时,则可根据线性关系或等效覆盖层厚度定量求出离子有效 LET 值。若无线性关系,则可根据电荷量对离子在器件内的有效 LET 值进行定性判断。方法验证:当存在线性关系时,可将所对应覆盖层厚度与器件实际覆盖层厚度进行对比进行验证。另外对于 SRAM 器件,未达到饱和截面之前,有效 LET 值越大对应截面越大,因此还可以根据截面曲线进行大致判断。

该 SRAM 计算结果表明:当覆盖层厚度(等效 Si 厚度)为  $12\mu\text{m}$  时,线性关系较好,如图 6 所示。而器件实际覆盖层硅等效层厚度为  $11.5\mu\text{m}$ ,二者基本一致。分别计算 Si、Cu、Br 离子在器件内的有效 LET 值,并利用这三种离子对线性关系进行刻度,然后算出 I 离子有效 LET 值,结果如表 2 所示。

另外还可根据离子在芯片单粒子翻转截面曲线上对应截面大小来判断。其截面曲线如图 7 所示。四种离子 LET 值分别如 A、B、C、D 所示,从图上可以看出,它们对应截面依次增大,因此可判断其在器件内的有效 LET 值依次增大,其趋势是正确的。

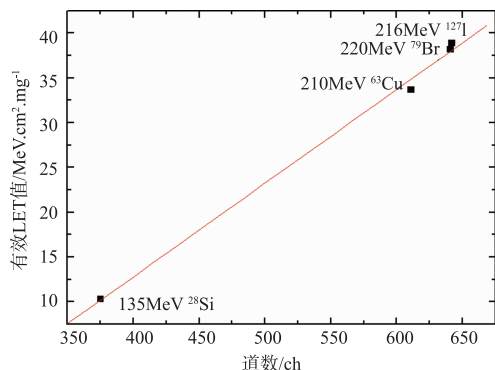


图6 当等效Si厚度为12 $\mu\text{m}$ 时离子有效 LET 值与电荷收集道数之间的关系

表 2 2K SRAM 器件内不同离子有效 LET 值测量结果

离子	表面 LET 值 ( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ )	峰位 道数	测量 LET 值 ( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ )	与表面 值差异
Si	9.3	375	10.3	11.8%
Cu	32.2	611	33.8	4.7%
Br	42	641	38.2	10.5%
I	61.0	642	38.9	38.0%

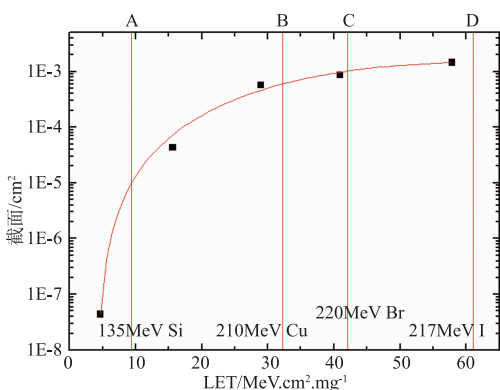


图7 2K SRAM截面曲线

### 5 有效 LET 值测试方法在 SEE 实验中的应用

以往 IDT7164 单粒子效应截面数据出现异常,表面 LET 值较大的离子引发截面反而小<sup>[6,8]</sup>.其原因可能有两种:①器件覆盖层较厚,实验时所用离子射程太低(25 $\mu\text{m}$ ),原子序数较大离子穿过时损失能量较多,造成在器件内的有效 LET 值较小;②截面测量方法存在问题.为澄清该分歧,采用基于电荷收集的有效 LET 值测量方法进行了测量.

测量所用离子如表 3 所示,电荷收集谱峰位情况如图 8 所示.

从图 8 中可以看出,Cu 离子电荷收集谱扣除噪声后未观测到峰位,因此无法进行线性关系刻度,但是仍

然可进行定性分析.因 Cl 离子峰位高于 C 离子,C 离子高于 Cu 离子,说明三者 LET 值大小顺序为 Cl、C、Cu.因 Cu 离子峰位很低,说明器件覆盖层厚度大致接近 160MeV Cu 射程 30.1 $\mu\text{m}$ .据此可以对另外两种离子有效 LET 值进行粗略计算,得到 145MeV Cl 和 85MeV C 离子 LET 值分别为:16.6 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 、1.8 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ .还可根据截面曲线来判断这种分析是否正确.根据三种离子的表面 LET 值,他们在截面曲线上的位置如图 9 中三条直线所示.Cl 离子对应截面大于 C 离子,这说明 Cl 离子有效 LET 值大于 C 离子;Cu 离子截面略小于 C 离子截面,说明 Cu 离子在器件内有效 LET 值小于 C 离子,这也与上述分析结果一致.这说明器件截面异常原因就是由于器件表面覆盖层厚度较厚造成,这与文献[6]通过计算所得结论一致.

表 3 离子在 IDT7164 内有效 LET 测量所用离子

离子	能量 (MeV)	射程 ( $\mu\text{m}$ )	表面 LET 值 ( $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ )
C	85	139.8	1.66
Cl	145	41.2	13.6
Cu	190	30.1	32.8

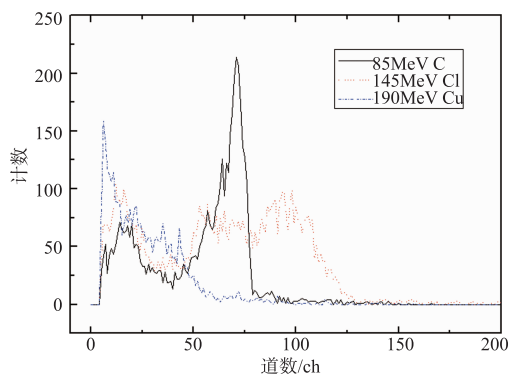


图8 IDT7164电荷收集谱

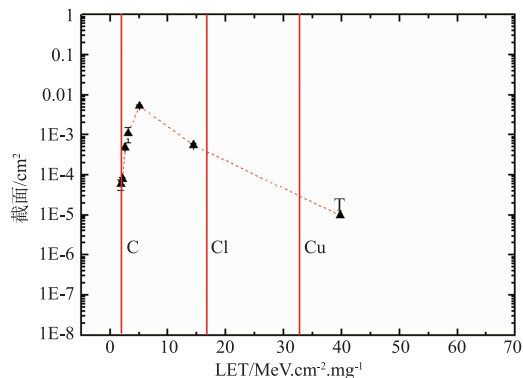


图9 IDT7164截面曲线

### 6 讨论

通过上述实验结果可知:通过测量收集电荷量,可

以获得离子在器件内的有效 LET 值. 但是文中 2.1 节对于收集电荷量与入射离子有效 LET 值之间关系的分析采用了 RPP 模型, 其中涉及到大量近似. 实际器件内受到双极放大效应<sup>[9]</sup>等影响, 并不是所有敏感区域收集电荷量与入射离子有效 LET 值之间都存在线性关系. 由于器件内存在敏感程度不同的区域, 因此大量离子入射到不同区域时的累积效果为电荷收集谱上会存在多个峰, 从测量信噪比角度来讲一般取最右侧峰对有效 LET 值进行刻度. 下面讨论线性关系是否存在时的处理方法.

(1) 当最右侧峰位道数与离子有效 LET 值存在线性关系时, 可对线性关系进行刻度或者通过计算得到的覆盖层厚度计算得到离子有效 LET 值.

(2) 当最右侧峰与离子有效 LET 值不存在线性关系时, 可以采用电荷收集谱上其他峰位进行测量, 因为器件内存在多个敏感程度不同、电荷收集机制不同的敏感区域.

(3) 若无法获取其它峰位或者线性关系仍然存在, 则可以根据峰位道数对离子有效 LET 值进行定性判断.

## 7 结论

针对 PN 结和 SRAM 器件建立了基于 PHA 原理的电荷收集测试技术, 利用 PN 结和 2K SRAM 对方法的可行性进行了实验验证, 结果表明: 在 PN 结和 SRAM 器件内, 均可通过电荷收集测量的方法, 通过不同种类离子电荷收集量定量或定性获得离子在器件内的有效 LET 值. 方法建立后, 针对以往截面出现异常的 IDT7164 器件, 对几种离子的电荷收集谱进行了测量, 通过分析成功解释了截面出现异常的原因. 通过本研究, 加深了对重离子在半导体器件电荷收集机制及测量方法的认识, 为今后提升地面 SEE 实验技术、深入开展 SEE 机理研究提供了数据和技术参考.

## 参考文献

- [1] DODD P E, SHANEYFELT M R, SCHWANK J R, FELIX J A. Current and future challenges in radiation effects on CMOS electronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(4): 1747 - 1763.
- [2] REED R A, WELLER R A, MENDENHALL M H. Impact of ion energy and species on single event effects analysis [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2312 - 2321.

- [3] 高丽娟, 郭刚, 蔡莉, 等. 离子径迹结构对 SRAM 单粒子翻转截面的影响[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(8): 1496 - 1501.  
GAO Li-juan, GUO Gang, CAI Li, et al. Effect of ion track structure on SRAM SEU cross section[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(8): 1496 - 1501. (in Chinese)
- [4] DODD P E, SCHWANK J R, SHANEYFELT M R. Impact of heavy ion energy and nuclear interactions on single-event upset and latch-up in integrated circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2303 - 2311.
- [5] REED R A, MCNULTY P J, BEAUVAIS W J, et al. Charge collection spectroscopy [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, 40(6): 1880 - 1887.
- [6] 黄建国, 韩建伟, 林云龙, 等. 一种 SEU 实验数据的处理方法[J]. 空间科学学报, 2002, 22(3): 268 - 274.  
HUANG Jianguo, HAN Jianwei, LIN Yunlong, et al. A method for processing SEU data [J]. Chinese Journal of Space Science, 2002, 22(3): 268 - 274.
- [7] Kevin M WARREN, Robert A WELLER, Marcus H MENDENHALL. The contribution of nuclear reactions to heavy ion single event upset cross-section measurements in a high-density SEU hardened SRAM [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, 52(6): 2125 - 2131.
- [8] 路秀琴, 刘建成, 郭继宇, 等. 微电子器件 SEU 灵敏体积研究[J]. 中国原子能研究院年报, 2001. 57.
- [9] MUSSEAU O. Charge collection and SEU mechanisms [J]. Radiation Physics and Chemistry, 1994, 43(1/2): 151 - 163.

## 作者简介



史淑廷 男. 1979 年 11 月出生, 山东日照人. 副研究员, 硕士生导师. 2007 年、2016 年分别于四川大学原子核技术研究所、中国原子能科学研究院获得工学硕士和理学博士学位. 现在中国原子能科学研究院从事微电子器件辐射效应及地面模拟实验技术方面工作.

E-mail: sst1124@163.com



郭刚 男. 1966 年 9 月出生, 重庆宜宾人. 研究员, 博士生导师. 国防科技工业抗辐照应用技术创新中心副主任. 中国原子能科学研究院辐射效应研究室主任、院学术带头人. 主要从事微电子器件辐射效应及地面模拟实验技术方面工作.

E-mail: ggg@ciae.ac.cn