

一种实验确定微电子器件灵敏体积的方法*

路秀琴^{1;1)} 刘建成¹ 郭继宇¹ 张庆祥² 黄治² 张振龙²
郭刚¹ 沈东军¹ 惠宁¹ 倪媚楠¹ 孔福全¹ 韩建伟²

1 (中国原子能科学研究院核物理所 北京 102413)

2 (中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘要 介绍一种实验确定微电子器件单粒子翻转(SEU)灵敏体积(S_V)厚度 d 的方法. 用从低到高不同能量的重离子辐照微电子器件, 测量其 SEU 截面随离子射程的变化曲线 $\sigma_{\text{seu}}(r)$, 用数学计算从 $\sigma_{\text{seu}}(r)$ 和 $\text{LET}(r)$ 函数提取 d . 利用测得的 d 和 $\sigma_{\text{seu}}(\text{LET})$, 经过模型计算可得到更精确的空间 SEU 率的预言值.

关键词 单粒子效应 灵敏体积 重离子

1 引言

微电子器件受空间辐射引起单粒子翻转(SEU), 锁定(SEL)或烧毁(SEB)统称为单粒子效应(SEE), 它是威胁航天器及战略武器在轨正常运行和寿命的重要因素之一. 研究空间辐射对微电子器件产生的各种效应以及抗辐射加固措施成为国内外关注的重要课题. 地面模拟试验研究是此种研究的一个重要方面. 用高能质子或重离子加速器产生的高能质子和重离子模拟空间辐射环境, 辐照微电子器件或仪器, 测量其SEU, SEL, SEB截面随质子能量或重离子传能线密度(LET)的变化关系曲线, 再结合空间质子和重离子辐照环境以及离子与微电子器件相互作用模型进行理论计算, 预言器件或仪器的空间SEU(SEL或SEB)率以及其它相关参数, 实现对器件抗辐射性能的评估以及解决抗辐射加固的问题. 因而, 精确的预估SEU(SEL或SEB)率十分重要. 过高的预估会增加造价和重量, 过低的预估会导致事故发生. 要使评估准确, 需要两个因素: 一是实验数据精确, 二是理论计算中模型应用正确.

航天微电子器件灵敏体积(S_V)的厚度 d 在预估空间单粒子效应中是一个关键参数. 这是由于多数预估SEU(SEL)率的模型都用到灵敏体积的概念. 人们假定器件灵敏区是个长方的六面体(RPP模型)^[1,2],

当入射粒子在该长方六面体中沉积的能量大于临界能量时引起SEU等事件. 由于缺乏灵敏体积的准确信息, 通常采用 $2\mu\text{m}$ 的厚度, 使预估得出不满意的结果. 饱和截面的计算结果与实验测量值最好的情况也要相差两倍^[1,2]. 器件灵敏层前面的死层厚度也严重的影响测量和预估的结果. 研究从实验上测量灵敏体积(S_V)的实际大小, 是精确预估器件空间SEE的关键. D.R.Roth^[3]和J.Beauvais^[4]等分别通过测量在不同能量不同入射角度的一系列质子SEU截面来测定 S_V 厚度 d 和临界电荷. 这需要有至少200MeV的高能质子加速器. Zoutendik^[5]曾建议用低能低射程的重离子来观测器件的 S_V . Barak^[6]和Ecoffet^[7,8]最近分别实践了这一方法. C.Inguibert等^[9]测量一种重离子在一系列不同能量引起的SEU数据, 再用数学方法提取了几个器件的 S_V 和死层厚度. 他们的结果表明, S_V 厚度和上面的覆盖层厚度在不同的器件之间相差很大. 他们用测得的参数来预言质子SEU率, 使结果得到大大改善. 本文介绍采用低能重离子辐照微电子器件来确定其灵敏体积和覆盖层厚度的原理和方法.

2 原理

重离子引起的SEU截面与入射离子的传能线密度(LET)和射程(r)两者有关. 实验上测定器件的灵

* 国家自然科学基金(10375098)资助

1) E-mail: xqlu@iris.ciae.ac.cn

敏体积,就是用非常低射程的离子来观测灵敏体积. LET(r)曲线在低射程处呈现布拉格峰的形状. 如果改变入射粒子的射程就是改变入射粒子在灵敏体积内沉积的能量,从而也就改变了SEU截面. 实验上,用从低到高不同能量的重离子辐照器件测量其SEU截面,也就测量了SEU截面随射程的变化曲线 $\sigma(r)$. 在非常低能时,离子在 S_V 中沉积能量为零,直至能量升高到粒子足以穿过死层(h)进入灵敏层前,离子在器件灵敏层中沉积的能量均为零,因而器件没有翻转. 即 $\sigma_{\text{SEU}}(r \leq h) = 0$. 随着能量升高,在 S_V 中的沉积能量很快上升到最大值,SEU截面上升到最大值(其峰位应在 S_V 内),然后峰位慢慢移出 S_V ,SEU截面便缓慢地下降. 于是我们应该观测到类似于LET(r)的 $\sigma(r)$ 函数. 通常重离子翻转截面对沉积能量的曲线可以用Weibull函数拟合. 即:

$$\sigma_{\text{SEU}}(d, h, u) = \text{Weibull}(E_{\text{dep}}(d, h, u)) = \sigma_{\text{sat}} \cdot \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{E_{\text{dep}}(d, h, u) - E_c}{w} \right]^s} \right\}, \quad (1)$$

其中 σ_{sat} 是饱和截面, E_c 是临界电荷, w 和 s 是两个形状参数. 当入射能量从 E 增至 $E + dE$ 时离子的射程从 r 增加到 $r + u$. $E_{\text{dep}}(d, h, u)$ 是射程为 r 的离子在死层为 h ,灵敏层厚度为 d 的器件中沉积的能量,其表达式为:

$$E_{\text{dep}}(d, h, u) = \rho \cdot \int_h^{h+d} \Gamma(d, h, x) \cdot \text{LET}(x - u) \cdot dx, \quad (2)$$

其中 x 为入射粒子在器件中经过的距离. ρ 是器件材料的密度. 门函数 $\Gamma(d, h, x)$:

$$\begin{cases} \Gamma(d, h, x) = 1, & h \leq x \leq h + d, \\ \Gamma(d, h, x) = 0, & \text{other.} \end{cases} \quad (3)$$

表示只计算离子的射程在灵敏层厚度 d 之内的沉积能量. 将(2)式代入(1)式其逆表达为,

$$\text{Weibull}^{-1}(\sigma_{\text{SEU}}(d, h, u)) = \rho \int_0^{\infty} \Gamma(d, h, x) \cdot \text{LET}(x - u) \cdot dx. \quad (4)$$

因此,用Weibull函数拟合的 $\sigma(r)$ 曲线描述了 $\Gamma(d, h, x)$ 与LET(x)乘积的卷积过程. 而LET(x)可从TRIM程序计算得到,于是我们可以从 $\sigma(r)$ 曲线的去卷积求出 $\Gamma(d, h, x)$ 函数,也就得到了灵敏体积厚度.

3 实验和分析方法

为了测量完整的 $\sigma(r)$ 曲线,辐照离子在器件中的射程须在3—100 μm 的范围内变化. 根据HI-13串列加速器端电压的可变范围,我们用能量范围在2—90MeV的C离子作为辐照离子. 采用调节加速器端电压和降能片相结合的方法来改变辐照能量. 由于每个器件的 h 和 d 不同,能量变化的间隔要有所区别. 利用HI-13串列加速器实验室的Q3D磁谱仪上建立的单粒子效应模拟实验装置^[10]照射了HM65642等五个SRAM器件. 单能C离子通过Au膜散射,在与束流方向呈 10° 处经过Q3D磁谱仪偏转和散焦后辐照器件. 在散射室内Q3D谱仪的入口前安装了可以转动的、不同厚度的Al吸收片作为降能片. 辐照器件的同时记录器件翻转个数(包括地址)和辐照粒子个数,从中得出它们的SEU截面. 本次实验还用70MeV的F、120MeV的Cl、192MeV的Br和240MeV的I离子辐照了上述器件,得到了这些器件在LET值为5.06, 14.4, 39.7和61.5MeV/mg·cm⁻²的SEU截面. 从而得到了这些器件的SEU截面随LET值变化曲线. 图1给出器件HM65642的实验测量SEU截面随射程的变化曲线

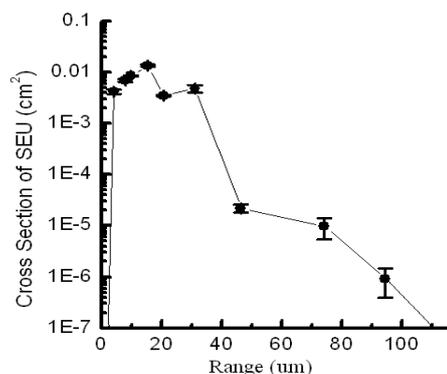


图1 SEU截面随射程的变化

($\sigma_{\text{seu}}(r)$), 图2是SEU截面随LET值的变化曲线($\sigma_{\text{seu}}(\text{LET})$). 从图1我们可以看到,在 $r = 3\mu\text{m}$ 附近截面从0很快上升,在 $r = 20\mu\text{m}$ 附近上升到最大值,然后开始缓慢下降. 从该曲线还可以推断,此器件的覆盖层死区厚度约在 $3\mu\text{m}$. 其精确值有待理论分析的结果. 图2中的LET值是没有减去在死区中能损的值,但整体形状呈Weibull函数状. 数据的处理和分析目前正在进行中. 拟进行的分析方法包括: 1)通过TSRIM程序算出各能量的离子在器件中的射程,得出SEU截面随射程的变化曲线 $\sigma(r)$. 2)用TRIM程序从 $\sigma_{\text{seu}}(\text{LET})$ 计算出 $\sigma_{\text{seu}}(E_{\text{dep}})$,此时的LET值应是在 S_V 内的有效值. 3)从 $\sigma_{\text{seu}}(r) = 0$ 计算

出 h , 从 $\sigma_{\text{seu}}(r)$ 和 $\sigma_{\text{seu}}(E_{\text{dep}})$ 推出 $E_{\text{dep}}(d, u)$. 4) 利用

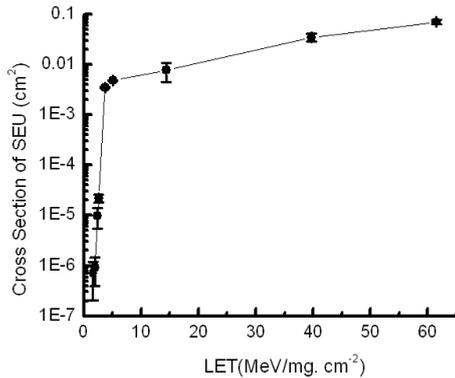


图2 SEU截面随LET的变化

公式(4)的表达, 从 $\sigma_{\text{seu}}(r)$ 和 $\text{LET}(r)$ 进行去卷积计算, 得到 $\Gamma(d, h, u)$ 函数, 提取 S_V 厚度 d 值. 5) 将得到的灵敏体积厚度 h 值应用于RPP模型, 从测得的 $\sigma_{\text{seu}}(\text{LET})$ 曲线结合空间辐射模型和离子与微电子器件相互作用模型计算, 预言空间SEU率.

4 结束语

介绍一种实验上用重离子研究微电子器件SEU灵敏体积的方法. 改变离子在器件中的射程, 测得SEU截面 $\sigma_{\text{seu}}(r)$ 曲线, 再用数学方法从 $\sigma_{\text{seu}}(r)$ 和 $\text{LET}(r)$ 的去卷积计算提取灵敏体积厚度和覆盖层厚度.

参考文献(References)

- McNulty P J, Abdel-Kader W G, Farrel G E. Radiat. Phys. Chem., 1994, **43**: 139—149
- Barak J, Levinson J, Akkerman A et al. Proc. 3rd RADECS Conf., 1995, 431—436
- Roth D.R, McNulty P J, Abdel-Kader W G et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, **40**: 1721
- Beauvais J, McNulty P J, Abdel-Kader W G et al. Proc. 2nd RADECS Conf., 1993, 540
- Zoutendyk J A, Smith L S, Soli G A. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, **32**: 4164—4169; McNulty P J, Beauvais W J, Roth D R. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1991, **38**: 1463
- Barak J, Levinson J, Akkerman A et al. Proc. 3rd RADECS Conf., 1995, 321—325
- Ecoffet R, Duzellier S, Barak J et al. Proc. 4th RADECS Conf., 1997, 576
- Ecoffet R, Duzellier S. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1997, **44**(6): 2378—2385
- Inguibert C et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2000, **47**(3): 551—558
- LU Xiu-Qin et al. NUCL. TECH., 2003, **26**(4): 271—274(in Chinese)
(路秀琴等. 核技术, 2003, **26**(4): 271—274)

A Method for Experimental Determination of the Sensitive Volume Thickness*

LU Xiu-Qin^{1;1)} LIU Jian-Cheng¹ GUO Ji-Yu¹ ZHANG Qing-Xiang² HUANG Zhi²
ZHANG Zhen-Long² GUO Gang¹ SHEN Dong-Jun¹ HUI Ning¹
NI Mei-Nan¹ KONG Fu-Quan¹ HAN Jian-Wei²

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Center for Space Science and Application Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract A method of experimental determination of the sensitive volume (S_V) thickness d of micro-electronic devices is presented. It is based upon the deconvolution of the functions of heavy ion upset cross sections versus the range of the incidentions $\sigma_{\text{seu}}(r)$, measured by varying the ion energy, and $\text{LET}(r)$. The measured $\sigma_{\text{seu}}(\text{LET})$ and d can be used for accurate prediction of the rate of Single Event Effects (SEE) in space.

Key words single event effects, sensitive volume, heavy ion

* Supported by National Natural Science Foundation of China(10375098)

1) E-mail: xqlu@iris.ciae.ac.cn