

用 ^{12}C 离子模拟质子引起的单粒子效应

张庆祥, 侯明东, 甄红楼, 刘 杰

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 在理论分析的基础上, 提出了一种利用兰州重离子加速器提供的高能 ^{12}C 离子模拟质子引起单粒子效应的途径. 在保证核反应机制是引起单粒子效应主要机制的前提下, 用高能 ^{12}C 离子可以模拟质子在功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管中引起的单粒子烧毁以及单粒子栅极击穿, 获得质子单粒子效应的饱和截面, 定性研究质子单粒子效应的角度效应, 还可以作为高能质子单粒子效应实验前的预备实验. 该方法拓展了兰州重离子加速器加速的轻的重离子在单粒子效应实验研究方面的应用, 对现阶段国内开展质子单粒子效应实验研究具有重要意义.

关键词: 质子单粒子效应; 重离子核反应; 直接电离

中图分类号: P354.2 **文献标识码:** A

1 引言

空间辐射环境中的高能离子与集成电路以及光电器件的敏感单元相互作用, 能够引起一种对航天器电子学系统构成极大威胁的辐射效应——单粒子效应(SEE). 高能质子是辐射环境的重要组成部分. 地球捕获带中有高强度的质子流, 而随机发生的大型太阳耀斑可以在短时间累积高达 10^{13} p/cm² 的高能质子. 低轨道和转移轨道航天器发生的 SEE 大多是由质子引起的, 太阳耀斑期间静止轨道和极地轨道航天器单粒子翻转率猛增. 除了单粒子翻转(SEU), 质子还能引起单粒子闭锁(SEL)、单粒子烧毁(SEB)等破坏性 SEE. 例如, 1994 年欧空局资源卫星 ERS-1 的高度计 PRARE 仅工作了两天就发生故障, 其原因就是该设备中使用的存储器 NEC D-4464 中质子引起的 SEL^[1]; 1996 年, 国外报道了美国空军 APEX 卫星搭载的宇宙线翻转实验中发现质子引起的额定工作电压为 100 V 和 200 V 的功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)发生 SEB^[2]. 因此质子单粒子效应(简称 PSEE)的研究对确保航天器的正常工作具有重要的意义.

质子可以通过直接电离、弹性碰撞以及核反应

3 种机制引起 SEE. 高能质子的电离能力很弱, 只有在大容量的动态随机存储器、电荷耦合器件以及光电器件(如光电二极管、光电耦合器)等临界电荷极低的敏感器件中, 才可以通过直接电离引起 SEE. 而在目前使用的绝大多数器件中, 质子主要通过硅核反应产生的剩余重核以及散裂产物间接地引起 SEE. 虽然国外不同的研究小组在利用重离子实验数据推算质子 SEE 敏感度方面取得了一定进展^[3, 4], 但都是一种粗略的估算, 精确地预估器件在质子环境中的翻转率还必须依赖于高能质子实验数据. 高能质子已成为评估星用器件及系统 SEE 敏感度的重要手段之一. 模拟空间环境中的高能质子要求能量范围覆盖 30—500 MeV, 但目前国内可提供的质子最高能量仅为 35 MeV, 处于该范围的下限, 严重制约了国内开展 PSEE 的实验研究.

兰州重离子加速器(HIRFL)是我国唯一的一台中能重离子加速器, 它能够提供能量几百 MeV 至几个 GeV 的从 C 到 Ta 的多种离子. 近年来在 HIRFL 上开展了大量的 SEE 实验研究工作, 但都是用较重的离子. 本文提出一种利用 HIRFL 提供的高能 ^{12}C 离子模拟高能质子(100 MeV 以上)引起

收稿日期: 2001-03-07; 修改日期: 2001-04-26

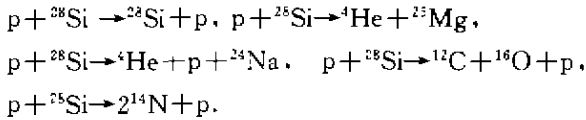
* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19775058, 10075064); 中国科学院“九五”重点项目(KJ952-S1-423)

作者简介: 张庆祥(1971-), 男(汉族), 甘肃通渭人, 在读博士, 从事宇航器件单粒子效应研究.

的 SEE 的途径.

2 质子及重离子核反应的机制和特点

质子与 Si 核反应的主要机制有直接反应、复合核反应以及散裂反应. 质子与 Si 的典型核反应如下:



反应产物包括 p, ⁴He 等轻离子及 ²⁸Si, ²⁵Mg, ²⁴Na 等剩余重核. 对于目前工艺水平的集成电路, 敏感区中 90% 以上能量是剩余重核沉积的. 这些剩余重核能量较低, 只有在敏感区内及附近产生的剩余重核才对 SEE 有贡献, 而这些核将所有能量损失在敏感区中, 因此 SEE 的发生取决于反冲核所有的能量, 对 SEE 有贡献的核反应的数量依赖于敏感区的体积. 质子与 Si 的核反应截面随能量的变化如图 1 所示^[5], 峰值在 20 MeV 附近, 在 高能段

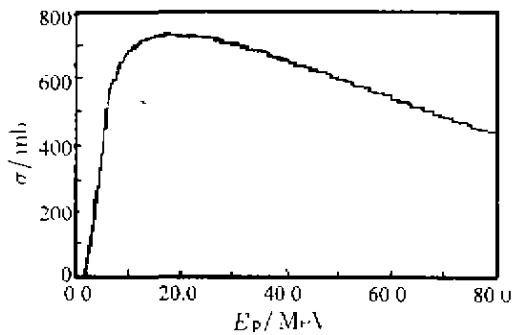


图1 质子在硅中核反应截面与能量的关系

降低到大约 400 mb. 每个人射质子产生的反应产物的数量 (N) 与沉积能量 (E_{dep}) 的关系如图 2 所示^[6]. 从图中可见, 随着 E_{dep} 的升高, 反应产物数量迅速下降. 如果采用更高能量的质子, 高 E_{dep} 反应产物的数量会增长, 因此不能用低能质子的实验结果来推出器件在 高能质子 轰击下的 SEE 特性.

随着入射离子能量的升高, 核倾向于裂变成多个碎片, 例如 Si 原子散裂为两个 ¹⁴N 核. 实验发现^[5], 这种较轻的碎片可以在探测器中沉积 30-45 MeV 的能量, 相当于有效线性能量转移 (LET) 值 30-50 MeV/(mg·cm⁻²), 因此质子可以引起具

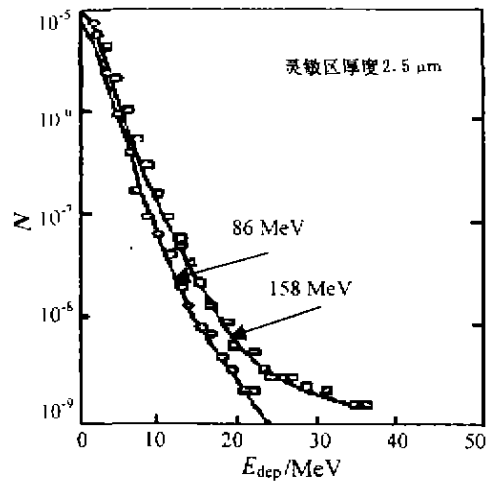


图2 面垒型探测器测得的高能质子核反应产物能量分布^[6]

有高 LET 阈值的器件翻转, 这种散裂反应的截面只有 20 mb, 占总截面的 5%, 有些文献中, 将其称为稀有事件. 在绝大多数空间应用场合, 稀有事件对 SEE 的贡献与相同环境中的重离子的贡献相比可忽略, 但在极端情况下, 如器件的 LET 阈值很高, 则稀有事件对系统的影响就可能表现出来.

重离子的直接电离能力很强, 主要通过直接电离引起 SEE, 但实验研究表明, 高能重离子也能够通过与质子类似的核反应机制引起单粒子效应: (1) 高集成度存储器的翻转截面在低 LET 值并不像预期的那样急剧下降, 而是形成一个平台, 呈现出 S 形, 如图 3 所示. 估算表明, 对于典型的静态存储器, 重离子核反应对翻转截面的贡献在 10⁻⁶ cm² 量级. 文献[8]中认为, 如果在 1 MeV/(mg·cm⁻²) 附近时, 器件的 SEE 截面小于 10⁻⁶ cm², 用 LET 值小于 1 MeV/(mg·cm⁻²) 的 E > 20 MeV/u 的离子照射器件, 核反应机制就开始起作用; (2) 高

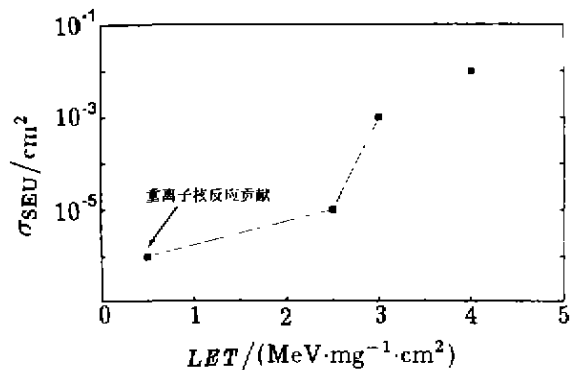


图3 典型静态存储器 sigma-LET 曲线

能重离子到达器件敏感区前经过厚的衬底材料, 例如离子从器件背面入射, 即使在敏感区中的 LET 值相同, 截面仍然高于正面入射的截面, 其原因在于初级离子与封装材料或衬底材料作用产生的具有更高 LET 值次级产物的贡献^[9]; (3) 垂直结构器件 (例如功率 MOSFET) 具有很深的敏感区, 在 LET 值相同的 3 536 MeV Xe 离子与 520 MeV Kr 离子轰击下, 发生 SEB 的阈值电压分别为 210 V 和 95 V, 具有很大的差异^[10]. 其原因: 一是两种离子与 Si 的核反应截面不同, 分别为 3 073 mb 和 1 382 mb; 二是 520 MeV 的 Kr 离子不能产生能量足以穿过器件灵敏层的二次离子. 由于 SEE 地面模拟实验中大多采用具有较高 LET 值的低能离子, 重离子反应的贡献表现不出来, 对于空间环境中大量存在的高能重离子 (空间环境重离子谱的峰值在 100 MeV/u 附近), 反应产物可能具有比初级束流更高的 LET 值, 因此更容易引起 SEE.

综上所述, 高能离子可以通过两种途径引起 SEE, 一种是初级离子直接电离, 另一种是通过核相互作用 (包括弹性碰撞和核反应) 产生的二次离子电离间接引起 SEE. 重离子和质子均可以通过以上两种途径引起 SEE, 而高能中子只能间接引起 SEE. 不过对于重离子而言, 直接电离是主要途径, 而对于目前多数器件, 质子主要通过间接途径引起 SEE. 基于以上对重离子和质子引起 SEE 机制的分析, 我们认为可以利用 HIRFL 加速的轻的重离子 (如 ^{12}C) 来模拟质子通过核反应间接引起的 SEE.

3 质子与 ^{12}C 离子 SEE 的对应关系

由于在目前工艺水平下, 质子主要通过核相互作用中产生的重的余核引起 SEE, 而且由于余核能量较低, 射程短, SEE 的发生取决于其总能量, 而不是与离子种类有关的 LET 值, 因此可以忽略质子与 ^{12}C 离子同 Si 反应产物的差别. 考虑具有相同单核能的质子和 ^{12}C 离子, 后者核反应产生的余核具有更高的能量, ^{12}C 与 Si 主要发生非完全的熔合反应. 重离子核反应产生的重余核的能量取决于与靶核熔合的那部分弹核的质量 (Δm), 文献[6]表2给出在 20.5—46.4 MeV/u 的能量范围, ^{12}C 与 Cu 核反应中, Δm 在 2.74—7.10 u 之间. 即使只有两个核子的质量参加反应, 75 MeV/u ^{12}C 产生余核的

能量与 150 MeV 质子相当, 因此可以用 ^{12}C 模拟高能质子 (大于 150 MeV) 引起的 SEE.

两种离子和与 ^{28}Si 相近的 ^{27}Al 在相近能量下反应总截面如表 1 所示^[11, 12]. 从表中可以看出, 在几百 MeV 的能量范围内, 反应截面随能量的变化不大, 相应能量下, ^{12}C 截面大约是质子截面的 4 倍, 因此用 ^{12}C 获得的 SEE 截面也相应比质子高.

表1 质子和 ^{12}C 离子与 ^{27}Al 反应截面

离子种类	质子		^{12}C	
能量 (MeV)	208.0	315.0	216.0	300.0
反应截面 (mb)	592	580	2 319	2 399

理论上 HIRFL 能够加速的 ^{12}C 能量范围是 5—95 MeV/u, 目前已加速的最高能量是 75 MeV/u, 流强小于 0.15 e μ A. 图 4 给出了用 TRIM92 计算的质子和 ^{12}C 离子 LET 值-能量曲线. 从图中可以看出在 30—95 MeV/u, ^{12}C 离子的 LET 值小于 0.27 MeV/(mg \cdot cm $^{-2}$). 用高能段的 ^{12}C 离子, 可以保证 ^{12}C 只能通过核反应机制引起 SEE. 当然这要求加速器提供的束流中没有其它高 LET 值的杂散离子.

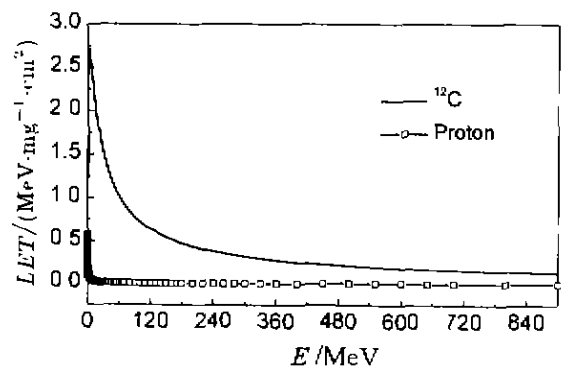


图4 质子与 ^{12}C 离子 LET -能量曲线

4 可以开展的 PSEE 实验研究工作

4.1 模拟质子引起功率 MOSFET 的破坏性 SEE

纵向 MOSFET 的介质层存在较高的电场, 当高能离子穿过时, 可能导致介质层击穿, 引起电路的永久性短路, 即 SEB 和单粒子栅极击穿 (SEGR) 效应. 星载系统中执行电源管理任务的纵向功率 MOSFET 发生的 SEB 和 SEGR 对系统构成极大的威胁. SEGR 与 SEB 强烈依赖于漏源电压 V_{DS} 和栅源电压 V_{GS} . 为此, 过去功率 MOSFET 多在额定

电压的50%—60%下使用,以降低 SEB 以及 SEGR 发生的几率。随着功率 MOSFET 可靠性的提高,美国航天局机构建议在最大额定电压的75%下使用,这对系统越来越高的需求无疑是有益的,但是却增加了发生 SEGR 与 SEB 的几率。1997年,在空间飞行试验中发现了质子引起功率 MOSFET 发生 SEB 后,高能质子的 SEB 和 SEGR 再次引起广泛的关注。现有的绝大多数地面模拟实验数据表明,非加固的功率 MOSFET SEB 的 LET 阈值大于 $25 \text{ MeV}/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$,而所有对于 SEGR 的测试都采用 LET 值大于 $3 \text{ MeV}/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$ 的重离子^[13]。因此可以用最大 LET 值为 $2.7 \text{ MeV}/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$ 的 ^{12}C 离子来模拟高能质子引起的功率 MOSFET 的 SEB 和 SEGR。

4.2 模拟质子引起 CMOS 集成电路的 SEL

CMOS 工艺在结构上存在寄生的 pnpn 双极晶体管,在正常工作状态下处于高阻态,单个高能离子的作用可能使该结构处于开态,如果电源能够提供相应的高电流,可能引起电路的烧毁,称之为 SEL。SEL 是 CMOS 集成电路在空间辐射环境应用中必须考虑的问题。质子通过核反应机制产生的重的余核可能引起 SEL,因此质子引起的 SEL 也是近年来国际上研究的热点之一。文献[14]中给出了目前发现质子可以引起 SEL 的器件 NEC4464, HM65162, 32C016, LSI-64811 以及微处理器 K-5 的等效 LET 阈值分别为 2.9, 2.6, 3.5, 3.1 以及 $12 \text{ MeV}/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$,因此可以利用高能段的 ^{12}C 离子来模拟以上器件由质子引起的 SEL。

4.3 获得中小规模集成电路的饱和截面

对 SEE 不敏感的器件,例如卫星使用的容量较小的静态存储器(小于 256 K)的单粒子翻转,中小规模逻辑集成电路中的单粒子瞬时脉冲,静态存储器多位翻转。 LET 阈值较高。可用高能 ^{12}C 来模拟器件对高能质子的敏感度。表征器件对质子敏感度的截面-能量曲线,在几十 MeV 时增长很快,在

100 MeV 以上变化趋缓, $75 \text{ MeV}/\text{u}$ ^{12}C 产生反冲核的能量与 150 MeV 的质子相当,因此用 ^{12}C 可以获得饱和截面。

4.4 模拟质子 SEE 的角度效应

当核反应为主要机制时,在一级近似(敏感区横向尺寸比反冲核的平均射程大)下,高能质子引起 SEE 仅与敏感体积有关,与人射角度没有关系。大多数现代器件都采用薄外延层以及 SOI/SOS 工艺,与敏感区其它尺寸相比,深度很浅,而且反应产物大多集中在前冲方向,当质子平行于敏感区长轴入射时,更多的能量沉积在敏感区中,如果 SEE 的阈值足够高,截面会强烈地依赖于入射角度^[15]。翻转截面对入射角度的依赖关系对精确预估样品在质子环境中的 SEE 几率非常重要。从图4中可以看出, ^{12}C 能量从 $100 \text{ MeV}/\text{u}$ 降低到 $30 \text{ MeV}/\text{u}$, LET 增加不大,在 Si 中穿过的距离可达 10 mm,因此 ^{12}C 离子可以模拟翻转截面的角度效应。

另外,与一般重离子 SEE 实验相比,质子实验需要大的流强 ($10^8 - 10^9 \text{ p}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$) 和累积通量 ($10^{10} \text{ p}/\text{cm}^2$),可能同时出现位移损伤、总剂量效应以及辐射安全方面的问题,而用 ^{12}C 离子通过核反应引起 SEE 需要使用与质子相当的束流强度和累积剂量,所以 ^{12}C 实验可以作为高能质子实验的预备实验,其结果将有助于合理的安排质子实验方案,以节省束流时间和提高效率。需要特别指出的是某些大容量存储器件具有很低的 LET 阈值^[16],因此这里提出的方法对高集成度器件并不适用。

5 结论

用 HIRFL 提供的高能轻的重离子模拟质子单粒子效应,为现阶段国内开展高能质子单粒子效应实验研究提供了一条有效的途径,对星用电子器件的质子单粒子效应敏感度评估及机理研究具有重要的意义。下一步还需要通过进一步的模拟计算和实验来确定 ^{12}C 离子与质子 SEE 实验结果之间的精确对应关系。

参 考 文 献:

- [1] Adams L, Daly E J, Harboe-Sorensen R, *et al.* A Verified Proton Induced Latch-up in Space [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, 39(6): 1 804—1 808.
- [2] Adolphsen J W. First Observation of Proton Induced Power MOSFET Burnout in Space: The CRUX experiment on APEX [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 43(6): 2 921—2 926.

- [3] Petersen E L. The Relationship of Proton and Heavy Ion Upset Thresholds [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, 39(6): 1 600—1 604.
- [4] Rollins J G. Estimation of Proton Upset Rates from Heavy Ion Test Data [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1990, 37(6): 1 961—1 964.
- [5] Petersen E L. Approaches to Proton Single Event Rate Calculations [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, 43(6): 496—504.
- [6] Teleaty S E, Farrell G E, McNulty P J. Charge Deposition in Thin Slabs of Silicon Induced by Energetic Protons [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1983, 30(6): 4 394—4 397.
- [7] 吴定清, 李文新, 孙彤玉, 等. 20—46 MeV ^{12}C 离子和 Cu 相互作用中靶核的反冲性质研究[J]. 高能物理与核物理, 1996, 20(1): 13—20.
- [8] Koga R, Cram S H, Cram W R, *et al.* Comparative SEU Sensitivities to Relativistic Heavy Ions [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45(6): 2 475—2 482.
- [9] Musseau O, Cavros V F, Campbell A B, *et al.* Comparison of Single Event Phenomena for Front/Back Irradiations [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44(6): 2 250—2 255.
- [10] Kuboyama S, Matasuda S, Kanno T, *et al.* Single Event Burnout of Power MOSFETs Caused by Nuclear Reaction with Heavy Ions [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 2 210—2 215.
- [11] Wilcke W W, Birkelund J R, Wollersheim H J, *et al.* Reaction Parameters for Heavy-ion Collision [J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, Academic Press, 1980(19/11), 25(5/6): 389—619.
- [12] Scofield W. Tables of Reaction and Total Cross Section for Proton-nucleus Scattering Below 1 GeV [J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1986, 35(6): 429—417.
- [13] Wheatley C F, Titus J L. Proton-induced Dielectric Breakdown of Power MOSFETs [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1998, 45(6): 2 891—2 897.
- [14] Johnston A H, Swift G H, Edmonds L D. Latchup in Integrated Circuits from Energetic Protons [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44(6): 2 367—2 377.
- [15] Reed R A, McNulty P J, Abdel-Kader W G. Implication of Angle of Incidence in SEU Testing of Modern Circuits [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 2 049—2 051.
- [16] Ecoffet R, Duzellier S, Falguere D, *et al.* Low LET Cross-section Measurements Using High Energy Carbon Beam [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44(6): 2 234—2 236.

Simulation of Proton Induced SEE with High Energy $^{12}\text{C}^*$

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

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The mechanisms for proton and heavy ion induced single event effect (SEE) are discussed and a method to simulate proton induced SSEE (PSEE) with high energy ^{12}C is proposed in this paper. The experiments which can be done by using this method include single event burnout (SEB) and single event gate rupture in power MOSFET, single event upset (SEU) and single event transient (SET) in less sensitive device and angle effect. The experiments with high energy ^{12}C can also be a preliminary test before proton irradiation. This method may be of a great importance for PSEE experimental study of present stage in China.

Key words: single event effect induced by proton (PSEE); ion nuclear reaction; ionization

* **Foundation item:** NSFC(19775058, 10075064); Major Subject of the Chinese Academy of Sciences (KJ952-SI-423)