

CMOS 器件⁶⁰Co γ 射线、电子和 质子电离辐射损伤比较*

何宝平[†] 陈 伟 王桂珍

(西北核技术研究所, 西安 710613)

(2005 年 9 月 28 日收到, 2006 年 1 月 13 日收到修改稿)

利用 TRIM95 蒙特卡罗软件计算了质子在二氧化硅中的质量阻止本领和能量沉积, 比较了质子在二氧化硅中的电离阻止本领与核阻止本领, 分析了质子在材料的表面吸收剂量与灵敏区实际吸收剂量的关系. 利用⁶⁰Co γ 射线、1MeV 电子和 2—9 MeV 质子对 CC4007RH 和 CC4011 器件进行辐照实验, 比较⁶⁰Co γ 射线和带电粒子的电离辐射损伤情况. 实验结果表明, ⁶⁰Co γ 射线、1MeV 电子和 2—7MeV 质子辐照损伤效应中, 在 0V 栅压下可以相互等效. 在 5V 栅压下, 以⁶⁰Co γ 射线损伤最为严重, 1MeV 电子的辐射损伤与⁶⁰Co γ 射线差别不大, 9MeV 以下质子辐射损伤总是小于⁶⁰Co γ 射线, 能量越低, 损伤越小.

关键词: γ 射线, 电子, 质子, 辐射损伤

PACC: 6180E, 6170A

1. 引 言

多年来, 人们一直是利用⁶⁰Co γ 射线对预定用于空间系统中的 CMOS 器件进行辐射效应模拟实验^[1-4] 来了解其抗辐射性能. 但是, 由于空间辐射环境主要是由高能质子和电子组成, 没有⁶⁰Co γ 射线, 那么, γ 射线对 CMOS 器件产生的辐射效应同那些由质子和电子产生的辐射效应是否等效, 近年来一直是国内外研究的热点, 并已取得了不少研究成果^[5-7]. 本文主要从辐射损伤效应的角度来探索 CC4007RH, CC4011 CMOS 器件⁶⁰Co γ 射线、2—9MeV 低能质子和 1MeV 电子的辐射损伤等效.

2. 实验样品和辐照实验

2.1. 实验样品描述

实验样品有 CC4007RH 和 CC4011 器件, 其中 CC4007RH 是加固型双互补对 CMOS 倒相器, 制备工艺采用 3 μ m 硅栅工艺, 栅氧化层厚度为 $t_{ox} = 70$ nm. CC4011 器件为市售产品. 表 1 给出了两种类型

CMOS 器件辐照实验描述情况.

表 1 不同 CMOS 器件对应的辐照射线能量

辐照射线类型	加固型 CC4007RH 器件	非加固 CC4011 器件
质子能量/MeV	2.5 和 7	2.5 和 9
电子能量/MeV	1	1
γ 射线剂量率/(Gy(Si) /s)	0.902	0.002

2.2. 辐照效应实验描述

2.2.1. ⁶⁰Co γ 射线辐照实验

γ 射线辐照实验是在西北核技术研究所的⁶⁰Co 源辐照中心和 7106 校准实验室上进行的, γ 射线剂量率是利用 UNIDOS 剂量仪标定的.

2.2.2. 1—9MeV 质子辐照实验

质子辐照实验是在北京大学重离子物理研究所的 EN 串列加速器上进行, 选取了 2MeV, 5MeV, 7MeV, 9MeV 等四个能量点的质子对实验器件进行开盖辐照, 用金硅面垒探测器、法拉第筒及热释光剂量仪对质子环境进行监测, 剂量率 3—10Gy(Si) /s. 质子束引到空气中来, 使实验可以方便地在空气中进行. 辐照时, 用一放在真空腔体中的金硅面垒探测器对质子束流进行实时监测, 以便对质子总剂量进行修正.

* 国防预研基金(批准号 3110705)资助的课题.

[†] E-mail: baopinghe@126.com

2.2.3. 1MeV 电子辐照实验

电子辐照实验是在西北核技术研究所的电子稳态直线加速器上进行的,剂量率为 $1 \times 10^2 \text{ Gy}(\text{Si})/\text{s}$, 加速器可以通过控制射线束流强度和辐照传动轮的速度来调节剂量率,束流面积为 $1.3\text{m} \times 0.2\text{m}$. 辐照器件置于辐照传动轮的薄膜上,当传动轮滚动时,薄膜在其上向前传动(这可以通过监测系统观测到),位于传动轮薄膜上的器件运行到束流下时,受到了电子束的辐照.辐照剂量测量采用薄膜及分光计,在传动轮速度和束流一定的条件下,将薄膜进行辐照,在分光计下给出剂量读数.实验器件采用开盖辐照.

2.3. 辐照偏置条件

在不同源辐照实验过程中,实验器件采用的辐照偏置有两种:

1) $V_{\text{gs}} = V_{\text{dd}} = 5\text{V}$, $V_{\text{ss}} = 0\text{V}$; 此时 NMOS 管导通, PMOS 管截止,处于最劣偏置状态.

2) $V_{\text{gs}} = V_{\text{ss}} = 0\text{V}$, $V_{\text{dd}} = 5\text{V}$; 其中 V_{gs} 为 CMOS 器件栅极所加的电压, V_{dd} 为 CMOS 器件电源电压, V_{ss} 为 CMOS 器件的地端.

2.4. 参数的测量

实验参数是利用由微机、HP4156A 半导体参数测试仪、HP3488 矩阵开关和 488 接口卡等组成的半导体参数自动测试系统进行获取的,并保证每次测量在辐照后 30min 内完成.

3. 质子在二氧化硅中阻止本领和能量沉积的计算

质子与物质相互作用,其能量损失可分为两部分:1) 离子的能量传递给靶核,称作核阻止或弹性能量损失;2) 离子的能量传递给靶电子,被称作电子阻止或非弹性能量损失.另外,质子在二氧化硅中的累积能量损失,不仅存在电离辐射效应,还存在位移效应, MOS 器件是一种表面器件,对电离辐射比较敏感,但位移效应是否对器件的总剂量效应产生影响,也需要进行研究.

实验中由 Faraday 圆筒或金硅面垒探测器测量得到的是质子束流率,要想得到质子在二氧化硅中的吸收剂量或吸收剂量率,需要对不同能量的质子在二氧化硅中的质量阻止本领进行计算.

TRIM95TRIM 程序是计算离子在物质中运输的

蒙特卡罗软件,适于计算能量在 0.1keV 至几 MeV 之间的带电粒子在各种物质中的能量沉积.本文利用 TRIM95 对不同能量的质子在二氧化硅中的质量阻止本领和能量沉积进行计算,计算结果^[8]如图 1、图 2 和图 3 所示.

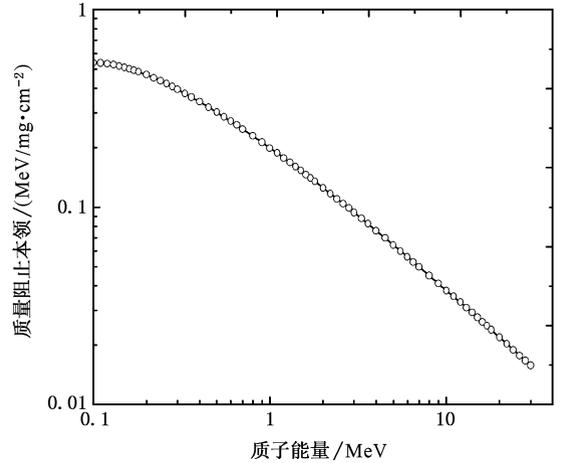


图 1 质子在二氧化硅中的电子阻止本领

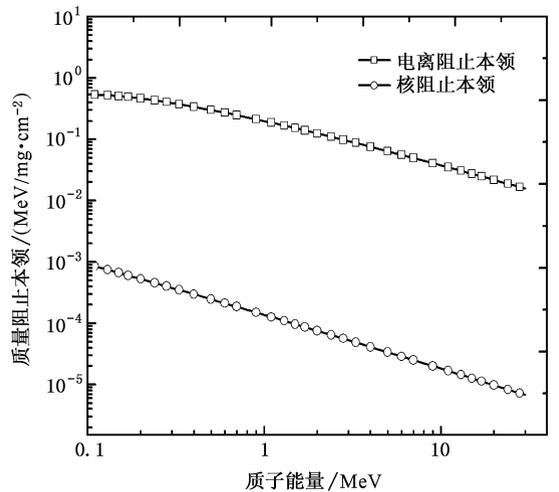


图 2 质子在二氧化硅中的电离阻止本领与核阻止本领的比较

图 1 给出了利用 TRIM95 软件计算了不同能量的质子在二氧化硅中的质量阻止本领.从图中看出,1MeV 和 10MeV 的质子在二氧化硅中质量阻止本领相差将近 20 倍,要想得到比较接近的吸收剂量,1MeV 和 10MeV 的质子束流率相差也要近 20 倍.

图 2 给出了利用 TRIM95 软件计算了各种能量的质子在二氧化硅中的电离阻止本领与核阻止本领的比较.从图中可以看出,质子在二氧化硅中用于电离的能量沉积远大于用于位移的能量沉积,两者相

差近 3 个数量级,说明质子在二氧化硅中的能量沉积主要用于电离.

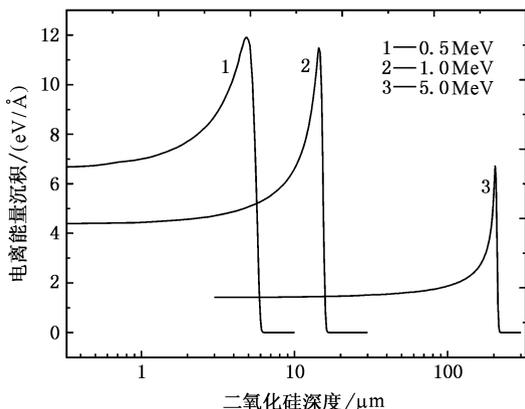


图 3 三种能量的质子在二氧化硅中的能量沉积与沉积深度的关系

图 3 给出了用 TRIM95 计算的三种能量的质子在二氧化硅中的能量沉积与深度的关系,对于 0.5MeV 的质子,在二氧化硅中的射程大约为 5μm. 对于本文实验中所用的 MOS 器件,其栅氧层的厚度为几十 nm,质子在其中的能量沉积基本均匀,说明用 Faraday 筒或热释光剂量仪测量到的表面剂量与二氧化硅实际吸收的剂量基本一致.

4. 不同源辐照实验结果

4.1. 不同偏置条件下, γ 射线、1MeV 电子和质子辐照损伤效应比较

图 4 (a) (b) 分别给出了在 $V_{gs} = V_{dd} = 5V, V_{ss} = 0V$ 和 $V_{gs} = V_{ss} = 0V, V_{dd} = 5V$ 偏压下,加固型 CC4007RH 器件 NMOS 和 PMOS 受 ^{60}Co γ 射线、1MeV 电子和 5MeV 质子辐照时,阈值电压漂移随辐照剂量的关系,其中 γ 射线辐照剂量率为 $0.902Gy(Si)s$.

从图 4 中可以看出,CC4007RH 器件辐照损伤的大小与的辐照偏置以及辐射源的种类有关,不同辐射源在不同的偏置条件下对器件造成的损伤并不一样.在 0V 栅偏压下,无论 NMOS 器件还是 PMOS 器件不同源辐照所产生的阈值电压漂移量差别不大.在 5V 栅压下,不同源辐照产生的阈值电压漂移量差别较大,γ 射线辐照漂移最大,1MeV 电子辐照漂移量次之,5MeV 质子辐照漂移量最小.因此,我们可以认为在 0V 栅压下, ^{60}Co γ 射线、1MeV 电子和 5MeV 质子相同的总剂量对 CC4007RH 器件产生的损伤是可以等效的.

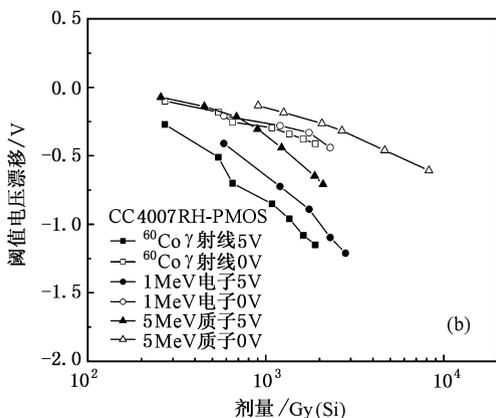
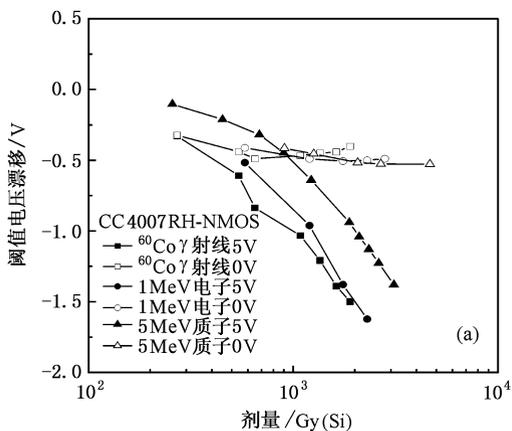


图 4 受 γ 射线、1MeV 电子和 5MeV 质子辐照时,不同栅压下 CC4007RH 器件时 ΔV_{th} 随辐射剂量的变化 (a)CC4007-NMOS; (b)CC4007-PMOS

图 5 给出了不同偏置条件下,加固型 CC4007RH 器件 2MeV, 5MeV 质子辐照实验结果.从图中可以看出,器件阈值电压漂移与质子能量和辐照偏压有关.在 5V 栅压下, NMOS 和 PMOS 器件阈值电压漂移量随能量的增加而增加;在 0V 栅压下,器件阈值电压漂移量与质子能量没有明显的关系.在相同的吸收总剂量下, 2MeV 和 5MeV 质子产生的阈值电压的漂移量差别不大.我们可以认为,在 0V 栅压下,不同能量质子辐照产生的损伤效应是可以等效的.

4.2. 最劣辐照偏置下($V_{gs} = V_{dd} = 5V, V_{ss} = 0V$)

^{60}Co γ 射线、电子和质子的辐射损伤比较

图 6 和图 7 分别给出了在 5V 栅压下, CC4007RH, CC4011 器件受 ^{60}Co γ 射线, 1MeV 电子, 2MeV 5MeV, 7MeV, 9MeV 低能质子辐照损伤比较情况.其中 ^{60}Co γ 射线剂量率选为辐照 CC4007RH 器件为 $0.902Gy(Si)s$, 辐照 CC4011 器件为 $0.002Gy(Si)s$.

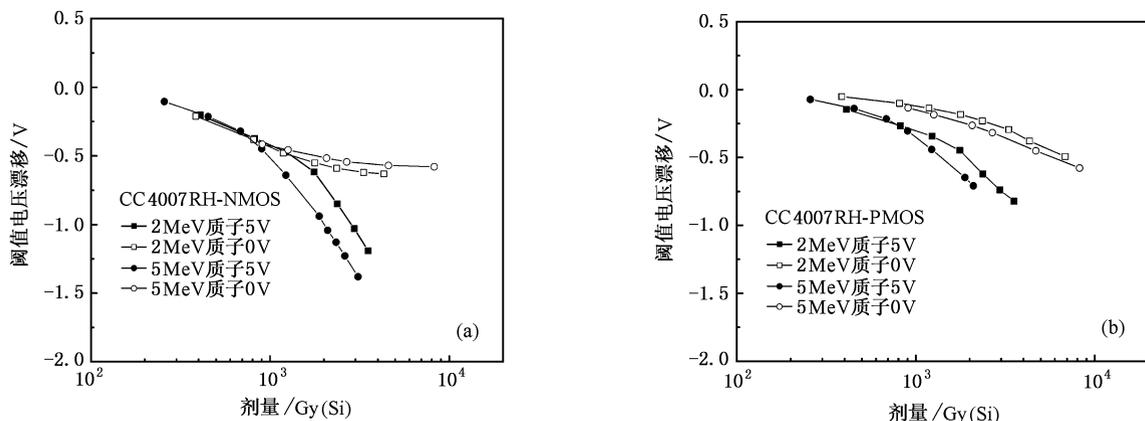


图5 受2MeV、5MeV质子辐照时,不同栅压下CC4007RH器件时 ΔV_{th} 随辐射剂量的变化 (a)CC4007-NMOS (b)CC4007-PMOS

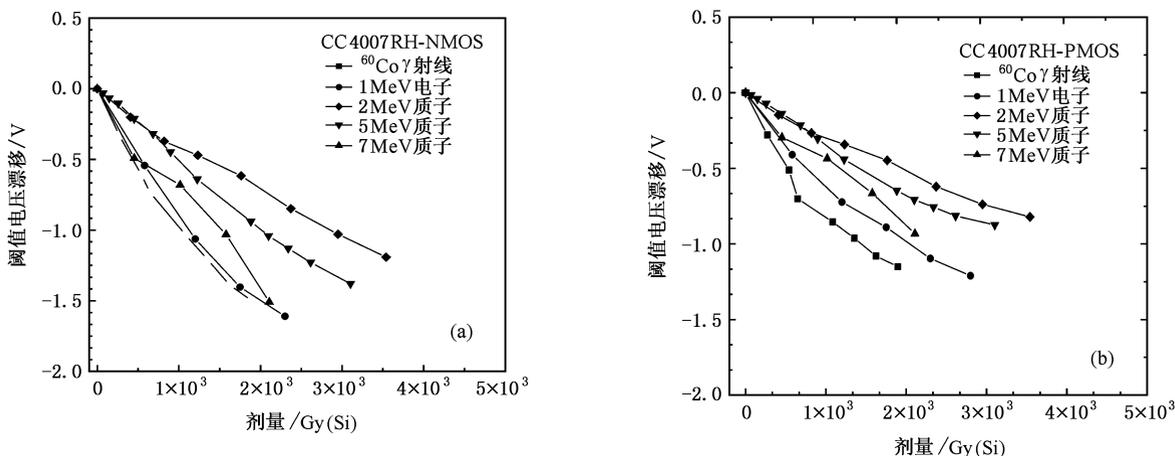


图6 γ 射线、1MeV电子和2—7MeV质子辐照时,在5V栅压下CC4007RH器件 ΔV_{th} 随辐射剂量的变化 (a)CC4007RH-NMOS (b)CC4007RH-PMOS

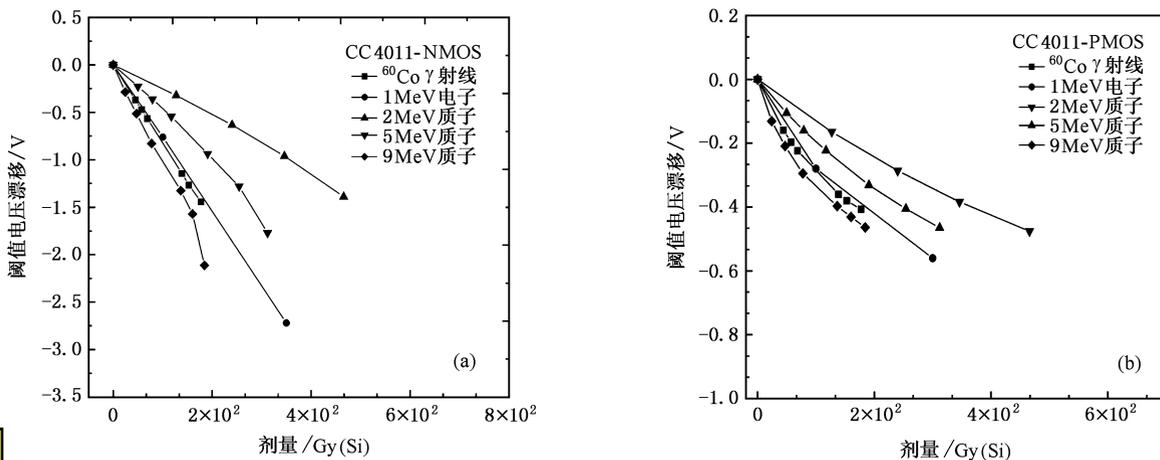


图7 γ 射线、1MeV电子和2—9MeV质子辐照时,在5V栅压下CC4011器件 ΔV_{th} 随辐射剂量的变化 (a)CC4011-NMOS (b)CC4011-PMOS

比较图6和图7中⁶⁰Co γ射线和质子的辐射损伤效应.从阈值电压的漂移来看,在5V栅压下,器件辐射损伤与质子能量成正比,即器件电离辐射损

伤随着质子能量的增加而增加,较高能量的质子比较低能量的质子造成更大的损伤.这是因为在相同的总剂量条件下,质子的能量越大,它的累积通量也

越大,对器件的损伤就越大;对于 CC4007RH 器件来讲,能量在 7MeV 以下的质子要小于 γ 射线的辐射损伤.而对 CC4011 器件而言,能量低于 9MeV 的质子损伤要小于 ^{60}Co γ 射线的辐射,能量为 9MeV 的质子对器件的损伤要大于 ^{60}Co γ 射线.

比较图 6 和图 7 中 1MeV 电子和 ^{60}Co γ 射线器件的辐射效应.从阈值电压的漂移来看,在 5V 栅压下,虽然 ^{60}Co γ 射线对器件的辐射损伤要大于 1MeV 电子,但差别并不是很大.因为 ^{60}Co γ 射线的能量为 1.17MeV 和 1.33MeV,这个能量的 γ 射线与二氧化硅的作用主要是康普顿散射, γ 射线能量沉积在二氧化硅中,所沉积的能量被康普顿电子得到,其最大能量为 $\sim 1\text{MeV}$,所以, γ 射线与 1MeV 电子对器件造成的损伤在误差范围内应该相当.

一般情况下,CMOS 器件的损伤程度往往用损伤灵敏度来表示,它定义为单位剂量下阈值电压漂移值.电离效应造成的损伤程度与总电离剂量密切相关,但不同的辐射源造成的影响是不一样的.表 2 表 3 分别给出了加固 CC4007RH-NMOS 和 PMOS 器件在不同源辐照下的损伤灵敏度以及与 ^{60}Co 的比较情况.表 4,表 5 分别给出了非加固 CC4011-NMOS 和 PMOS 器件在不同源辐照下的损伤灵敏度以及与 ^{60}Co 的比较情况. ^{60}Co 光子能量为 1.17MeV 和 1.33MeV,其平均能量为 1.25MeV.

表 2 加固 CC4007RH-NMOS 器件在 5V 偏值不同源辐照下的辐照损伤灵敏度

辐射源种类	辐射源能量 /MeV	损伤灵敏度 (V/Gy)	和 ^{60}Co 比较
^{60}Co	1.25	0.0996	1.0
电子	1	0.0831	0.83
	2	0.0386	0.39
质子	5	0.0471	0.47
	7	0.0781	0.78

表 3 加固 CC4007RH-PMOS 器件在 5V 偏值不同源辐照下的辐照损伤灵敏度

辐射源种类	辐射源能量 /MeV	损伤灵敏度 (V/Gy)	和 ^{60}Co 比较
^{60}Co	1.25	0.083	1.0
电子	1	0.055	0.66
	2	0.028	0.34
质子	5	0.031	0.37
	7	0.049	0.59

表 4 非加固 CC4011-NMOS 器件在 5V 偏值下不同源辐照下的辐照损伤灵敏度

辐射源种类	辐射源能量 /MeV	损伤灵敏度 (V/Gy)	和 ^{60}Co 比较
^{60}Co	1.25	0.82	1.0
电子	1	0.77	0.94
	2	0.27	0.33
质子	5	0.49	0.60
	9	1.07	1.30

表 5 非加固 CC4011-PMOS 器件在 5V 偏值下不同源辐照下的辐照损伤灵敏度

辐射源种类	辐射源能量 /MeV	损伤灵敏度 (V/Gy)	和 ^{60}Co 比较
^{60}Co	1.25	0.294	1.0
电子	1	0.233	0.79
	2	0.111	0.38
质子	5	0.18	0.61
	9	0.363	1.23

从表 2—表 5 的来看,在 5V 栅压下,能量小于 9 MeV 的低能质子的损伤灵敏度比 ^{60}Co γ 射线要小,质子对 CMOS 器件造成的每单位剂量的损伤随着质子能量的增加而增加.在 1~7MeV 质子、 ^{60}Co γ 射线和 1MeV 电子辐照效应中,以 ^{60}Co γ 射线损伤灵敏度最大,1MeV 电子损伤灵敏度要小于 ^{60}Co γ 射线,但二者的差别不大.实验结果与文献公布的结果^[6,17]基本一致.

因质子的辐照损伤与其能量有关,即器件电离辐射损伤随着质子能量的增加而增加,较高能量的质子比较低能量的质子造成更大的损伤.所以在地面的试验中,模拟源一般选取 ^{60}Co γ 射线源或 1MeV 电子,但 ^{60}Co γ 射线源是模拟空间的最劣辐射环境.在实际的模拟实验中,我们可根据不同要求,决定采用不同的辐射源.

5. 结 论

根据 TRIM95 蒙特卡罗软件的计算结果以及 ^{60}Co γ 射线、1MeV 电子和 2—9MeV 质子对 CC4007RH 和 CC4011 器件的辐照实验结果可以得到:

1. 质子在二氧化硅中用于电离的能量沉积远大于用于位移的能量沉积,两者相差近 3 个数量级,说明质子在二氧化硅中的能量沉积主要用于电离;

对于实验中所用的 MOS 器件,其栅氧层的厚度为几百 nm,质子在其中的能量沉积基本均匀, Faraday 筒或热释光剂量仪测量到的表面剂量与二氧化硅实际吸收的剂量基本一致.

2. 在 0V 栅压下, 2—7MeV 质子、⁶⁰Co γ 射线和 1MeV 电子辐照损伤效应可以等效.

3. 在 5V 栅压下, 2—7MeV 质子、⁶⁰Co γ 射线和

1MeV 电子辐照效应中,以⁶⁰Co γ 射线损伤最为严重, 1MeV 电子损伤要小于⁶⁰Co γ 射线,但二者的差别不大.⁶⁰Co γ 射线源是模拟空间的最劣辐射环境.

4. 在 5V 栅压下, CMOS 器件电离辐射损伤随着质子能量的增加而增加, 较高能量的质子比较低能量的质子造成更大的损伤, 能量大于 7MeV 以上质子的辐照损伤要比⁶⁰Co γ 射线的大.

- [1] Zhang T Q, Liu J L, Li J J *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 2299 (in Chinese) [张廷庆、刘家璐、李建军等 1999 物理学报 **48** 2299]
- [2] Fan L, Ren D Y, Zhang G Q *et al* 2000 *Chin. J. Semicond* **21** 383 (in Chinese) [范 隆、任迪远、张国强等 2000 半导体学报 **21** 383]
- [3] He B P, Wang G Z, Zhou H *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 188 (in Chinese) [何宝平、王桂珍、周 辉等 2003 物理学报 **52** 188]
- [4] He B P, Wang G Z, Gong J C *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2239

(in Chinese) 何宝平、王桂珍、龚建成等 2003 物理学报 **52** 2239]

- [5] Stassinopoulos E G, Brucker G J, Van Gunten O 1984 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **31** 1444
- [6] Tallon R W, Ackerman M R, Kemp W T *et al* 1985 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **32** 4393
- [7] Brucker G J, Van Gunten O, Stassinopoulos E G *et al* 1983 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **30** 4157

A comparison of ionizing radiation damage in CMOS devices from ⁶⁰Co Gamma rays ,electrons and protons *

He Bao-Ping[†] Chen Wei Wang Gui-Zhen

(Northwest Institute of Nuclear Technology , Xi'an 710613 , China)

(Received 28 September 2005 ; revised manuscript received 13 January 2006)

Abstract

The stopping power and accumulation energy for protons in SiO₂ are calculated by using Monte Carlo software TRIM95. As a result , the ionizing stopping power and the nucleus stopping power are compared for protons in SiO₂ , and the relation between absorption dose of material surface and factual absorption dose of sensitive area is discussed. CC4007RH and CC4011 devices were irradiated with Co-60 gamma rays , 1MeV electrons and 1—9MeV protons to compare the ionizing radiation damage of the gamma rays with the charged particles. The result show that the radiation damages from Co-60 gamma rays , 1MeV electrons and 1—7MeV protons were equivalent for 0V gate bias conditions. Under 5V gate bias , the radiation damage for Co-60 gamma rays was most serious. The distinction in damage between 1MeV electrons and Co-60 gamma rays was not large. The damage from protons below 9MeV was always less than that from Co-60. The lower the proton energy , the less the damage.

Keywords : gamma rays , electrons , protons , radiation damage

PACC : 6180E , 6170A

* Project supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (Grant No.3110705).

[†] E-mail : baopinghe@126.com