

CMOS 器件 X 射线与 γ 射线辐照效应比较

何承发 巴维真 陈朝阳

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

王 倩

(新疆大学物理系 乌鲁木齐 830046)

摘要 介绍了低能 X 射线和 γ 射线的辐照剂量及器件阈值电压漂移的测试方法。讨论了不同偏置条件和辐照方向对器件效应的影响。结果表明,对镀金 Kovar 合金封装的器件,在背向辐照的最劣辐照偏置下,X 射线产生的阈值电压漂移是 ^{60}Co γ 射线的 13.4 倍。

关键词 CMOS 器件,X 射线, γ 射线,剂量增强

中图分类号 O571.33; R144.1

在航天国防领域中,为了提高电子系统中的集成电路的性能、速度及可靠性,在器件芯片的制作中引入了重金属工艺,用于金属化层及封装等结构中。器件中的这些高原子序数材料在低能 X 射线的辐照下,会在相邻的低原子序数材料中产生剂量增强效应,使器件性能严重退化^[1]。但是由于 X 射线辐照装置的能谱、剂量测量比较困难,通常器件的总剂量辐照效应试验都在 ^{60}Co γ 辐照场中进行。本工作采用 CC4069 六反相器为样品,在中国科学院高能物理研究所同步辐射中心,进行了器件低能 X 射线辐照效应试验,并与 ^{60}Co γ 射线的结果进行了比较。

1 剂量测量

1.1 同步辐射光剂量监测

中国科学院高能物理研究所同步辐射中心 3W1A 站能够提供能量从 0.01—100keV 的连续谱 X 射线,并提供了准确的能谱。射线强度采用充氙气的电离室在线监测。

本项目将同步辐射中心提供的充气电离室送交中国计量科学研究院标准 X 射线辐射场中进行了标定,用该电离室监测了同步辐射辐照累积剂量。标定时剂量单位为空气照射量,必须换算到硅吸收剂量。

辐照时在出束口处加一层厚 $100\mu\text{m}$ 的铅过滤片,可将 10keV 以下光子全部滤除,谱的峰值在 40keV 左右。由于 X 射线穿透能力较弱,在计算吸收剂量时还对器件表面 $100\mu\text{m}$ 的镀金 Kovar 封装盖进行了衰减修正。如图 1 所示,将经过 $100\mu\text{m}$ 的 Kovar 材料前后的谱面积积分,并将其比值乘以监测电离室测量剂量,即可得出器件芯片接收的实际辐照剂量

$$\text{芯片接收剂量} = \frac{100\mu\text{m Kovar 衰减后谱面积}}{100\mu\text{m Kovar 衰减前谱面积}} \times \text{电离室监测结果}$$

1.2 ^{60}Co γ 射线剂量监测

γ 射线的辐照试验用中国科学院新疆物理研究所 $1 \times 10^{15}\text{Bq}$ ^{60}Co 辐照源进行。该辐射场及

升降源剂量均采用硅量热计进行了标定,标定结果为硅吸收剂量。辐照时选用与 X 射线辐照剂量率相当的辐照位置即可。

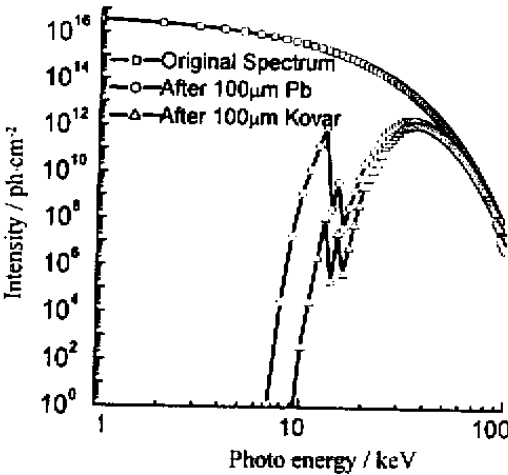


图 1 同步辐射原始谱及经过铅、Kovar 合金衰减后能谱
Fig.1 Primary energy spectrum and filtered ones with Pb and Kovar films

2 器件参数测试方法

试验样品采用用户提供的 CC4069 六反相器。X 射线辐照试验中只施加了工作模式偏置。在 ^{60}Co γ 辐照时将六个反相器分别连接成工作模式、全部管脚接地及全部管脚开路悬空等 3 种辐照偏置方式。其中,在工作模式辐照试验中,将 3 个反相器的输入端接高电平,另 3 个输入端接低电平,这样在一次辐照中便可以得到 N 管导通、截止,P 管截止、导通 4 种辐照偏置状态。还进行了器件封装盖面向辐照源及背面衬底面向辐照源两种方向的辐照试验。

MOSFET 的参数测量是在辐照后离线 10min 内完成。测量方法为:在反相器 P 管源极施加 +10V 电压(V_{DD}),N 管源极通过电流计接地。在栅极以 0.3V/s 的速率施加幅度为 10V 的三角斜波电压,用计算机控制的 Keithley 619 静电计同时采集器件的栅极电压(V_g)和漏电流(I_{DD})。

定义反相器的 $I_{\text{DD}} - V_g$ 曲线上对应 $I_{\text{DD}} = 10\mu\text{A}$ 时的栅极电压 V_g 为阈值电压(V_{gs}),用对所测 $I - V$ 曲线进行内插的方法求出 MOSFET 在各种辐照偏置及辐照方向时的阈值电压(V_t) (如图 2 所示)。每组试验采用 2—3 个样品,辐照时每个样品中 3 组反相器输入端接高电平,使反相器中 N 管导通,P 管截止;3 组反相器输入端接低电平,使反相器中 P 管导通,N 管截止。最终各种辐照偏置的阈值电压测量结果采用的是 6—9 个单管测量值的平均值。

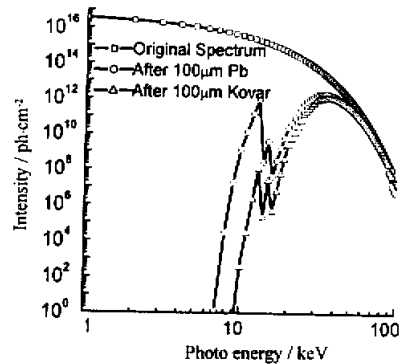


图 2 阈值电压计算方法
Fig.2 Calculating method of threshold voltages

3 实验结果与讨论

3.1 X 射线辐照

3.1.1 N 沟晶体管 N 管阈值电压漂移与 X 射线和 γ 射线辐照剂量的关系见图 3。施加导通偏置辐照时,正向偏置的作用使 N 沟 MOSFET 阈值电压先是随着辐照剂量的增大向负向漂移,但从辐照剂量 $6 \times 10^2 \text{ Gy}$ 开始,阈值电压开始恢复,向正向漂移,产生所谓的‘Rebound’现象。这是由于在剂量较小时,N 沟 MOSFET 阈值电压漂移主要贡献是辐照感生氧化物正电荷引起的,使阈值电压负向漂移。在辐照至一定剂量后 N 沟 MOSFET 因辐照产生的受主型界面态开始占主导地位,并且产生速率大于氧化物电荷的累积,使阈值电压开始正向漂移,甚至超过初始阈值电压。

截止偏置辐照下 N 沟 MOSFET 阈值电压漂移随着辐照剂量的增大而单调正向漂移,这是由于在零辐照偏置下栅氧化层中辐照产生的空穴大多都被复合,被俘获的几率较小,辐照感生氧化物正电荷远远小于正辐照偏置,引起阈值电压正向漂移的原因主要是 Si-SiO₂ 界面辐照产生的界面态所至。

在同样的辐照偏置下,由器件背面入射的阈值电压漂移稍大于正面入射,但方向性效应不如⁶⁰Co γ 射线。这是由于低能光子产生的光电子及康普顿电子的角分布中向侧面发射的几率较大^[2],所以在界面附近沉积的能量与射线入射方向关系不大。但高能光子产生的光电子及康普顿反冲电子的能量较高,其角分布中向光子入射方向的分量较大,在界面附近沉积的能量与射线入射方向关系很大。

另一方面,比较以 SiO₂ 层为中心,正向的 100 μm Kovar 合金封装盖及硅栅等与背面的硅衬底及陶瓷封装对射线的衰减。对 X 射线这种衰减有一定的差异。据估算,正向的衰减比反向大 10% 左右,因此表现出一定的方向性效应。对⁶⁰Co γ 射线,正向和反向的衰减差异很小,可以忽略。表现出的方向性效应纯粹是 γ 射线束中低能成分的剂量增强效应的方向效应所至。

3.1.2 P 沟晶体管 P 管阈值电压漂移与 X 射线和 γ 射线辐照剂量的关系示于图 4。在各种偏置条件下阈值电压均向负向漂移,剂量越大漂移越大,这是由于栅氧化层中辐照感生氧化物正电荷及 Si-SiO₂ 界面产生的施主型界面态,均使 P 管阈值电压向负向漂移。在截止偏置下从背面辐照产生的漂移最大,导通偏置下从正面辐照产生的漂移最小。在同样偏置条件下从背面辐照的漂移大于正向辐照。背面辐照大于正面的原因同 N 沟晶体管。

正偏置大于零偏置则是由于在电场作用下,栅氧化层中电子迅速向栅极漂移,而空穴缓慢向 Si-SiO₂ 界面漂移,在经过陷阱区时被俘获而形成氧化物正电荷。在零偏压下,辐照产生的电子-空穴对不能被分离而很快又复合,产生的氧化物电荷密度较小,对阈值电压漂移的贡献小。界面态的产生也与栅极施加电压有关,在负偏及零偏置时界面态产额较小,随着栅极电压

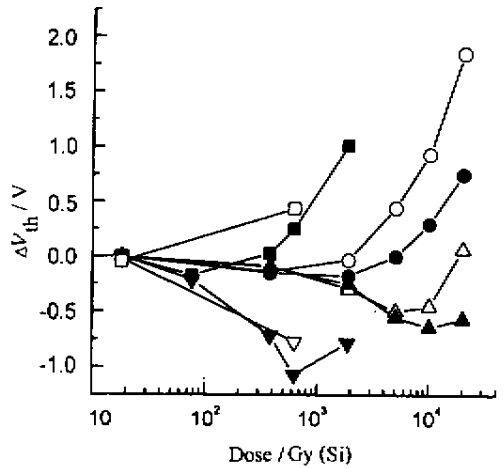


图 3 N 管阈值电压漂移与辐照剂量的关系
Fig.3 Threshold shifts of NMOS versus total dose

⁶⁰Co irradiation: face $\blacktriangle$ bias on, $\bullet$ bias off;
Back $\triangle$ bias on, $\circ$ bias off X ray irradiation: face
bias on, $\blacksquare$ bias off Back: bias on, $\square$ bias off

的增大,界面态产额达到峰值,并随电压的增大而开始缓慢下降。

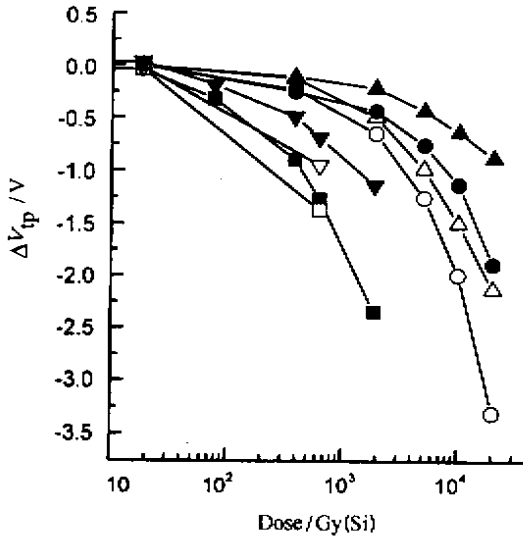


图 4 P 管阈电压漂移与辐照剂量的关系

Fig.4 Threshold shifts of PMOS versus total dose

^{60}Co irradiation : face $\blacktriangle$ bias on, $\bullet$ bias off ;
Back $\triangle$ bias on, $\circ$ bias off ; X ray irradiation : face
bias on, $\blacksquare$ bias off ; Back $\square$ bias off

3.2 ^{60}Co γ 射线辐照

^{60}Co γ 射线辐照对器件阈电压漂移的影响规律与 X 射线类似。但在同样辐照偏置及剂量下,X 射线辐照产生的漂移大于 ^{60}Co γ 射线。这是由于本次试验样品采用镀金 Kovar 合金封装结构,这种封装结构在低能 X 射线辐照下会产生很强的剂量增强效应,栅氧化层中沉积的剂量大于平衡剂量,阈电压漂移也相应较大。

以 P 沟截止偏置下背面辐照为例,比较 X 射线与 γ 射线对器件的损伤。由图 3 可知,X 射线辐照剂量 620Gy(Si),阈电压漂移为 1.37V,损伤敏感性为 0.00221V/Gy ; ^{60}Co γ 射线辐照剂量 $2 \times 10^4\text{Gy}$, 阈电压漂移为 3.30V, 损伤敏感性为 0.000165V/Gy。X 射线对器件的损伤是 ^{60}Co γ 射线的 13.4 倍。

参 考 文 献

1 Sour J R, Long D M, Millward D G. Radiation effects on and dose enhancement of electronic material. Park Ridge, New Jersey : Noyes Publication, U.S.A,1984
2 田志恒,潘自强. 辐射剂量学. 北京 : 原子能出版社,1992
TIAN Zhiheng, PAN Ziqiang. Radiation dosimetry. Beijing : Atomic Energy Press, 1992

Comparison on effects of CMOS devices irradiated by gamma and X ray

HE Chengfa BA Weizhen CHEN Zhaoyang

(*Xinjiang Institute of Physics, the Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011*)

WANG Qian

(*Xinjiang University, Urumqi 830046*)

Abstract

The methods for measuring the dose induced by low energy X rays and ^{60}Co γ rays and the threshold voltage shift the devices are described. The influences of the different biases and irradiation directions on the devices are discussed. The results for the devices packaged by gold plating Kovar alloy under a worst case in which the two kinds of rays are incident from the back side are given. The threshold voltage shift for the low energy X rays is 13.4 times larger than that for the ^{60}Co gamma rays.

Key word CMOS device, X ray, γ ray, Dose enhancement

CLC O571.33, R144.1