

# 同步辐射 X 射线源的剂量 增强效应实验研究

郭红霞<sup>1,2</sup> 陈雨生<sup>1</sup> 张义门<sup>2</sup> 周辉<sup>1</sup>

韩福斌<sup>1</sup> 关颖<sup>1</sup> 龚建成<sup>1</sup>

1(西北核技术研究所 西安 710024)

2(西安电子科技大学微电子所 西安 710071)

**摘要** 设计了多层平板铝电离室, 利用北京同步辐射装置 BSRF 产生的 30—100keV 同步辐射硬 X 射线, 测量了不同材料界面 Kovar/Au/Al, Pb/Al, Ta/Al 的辐射剂量梯度分布, 给出了不同材料界面剂量增强因子 DEF. 在该装置上同时开展了硬 X 射线辐照引起的 CMOS 器件 4069 的剂量增强效应 RDEF 研究. 采用双层膜结构, 通过实验给出辐照敏感参数随总剂量的变化关系, 从而给出器件损伤增强因子. 这些方法为器件抗硬 X 射线辐射加固技术研究提供了实验技术手段.

**关键词** 多层平板电离室 X 射线 剂量增强因子 总剂量效应

## 1 引言

能量为 30—100keV 的硬 X 射线穿透力强, 不易屏蔽, 且入射在不同原子序数材料的界面时, 在靠近界面处几十  $\mu\text{m}$  内的低原子序数材料中产生较强的剂量增强效应. 由于界面到均匀块介质之间的过渡区中能量沉积仅涉及窄小的几何尺度, 实验测试比较困难. 在物理上, 它不但涉及到光子对电子的能量转移, 而且与电子的产生、散射和吸收引起的通量增减密切相关. 为研究不同材料界面的增强效应, 自行设计了测量 X 射线不同材料界面剂量分布的电离室, 用该电离室测量了 BSRF 产生的硬 X 射线(能量范围为 30—100keV)在 Kovar/Au/Al, Pb/Al, Ta/Al 材料界面附近的辐射剂量梯度分布, 给出了不同材料界面剂量增强因子. 通常以剂量增强因子表示剂量增强的程度, 剂量增强定义为物质区域的剂量与平衡剂量值之差别, 剂量增强效应的大小习惯上用剂量增强因子来表示, 即

剂量增强因子 = 实际剂量 / 平衡剂量.

随着半导体集成电路技术的飞速发展, 为了改善器件性能, 许多 VLSI 在芯片制造工艺中引入重金属工艺; 为了提高器件可靠性, 许多集成电路封装盖内层镀一层金 Au(如 Kovar 封装结构), 形成了高原子序数(如 Au, W 等)与器件灵敏区(主要成分为  $\text{SiO}_2$ , 或 Si)原子序数差异很大的界面. 高原子序数材料对低能 X 射线有较大的光电截面, 其光电效应反应截面  $\sigma_{\text{photon}} \propto Z^4$  其中,  $Z$  为原子序数. 因此, X 射线在高原子序数中将产生大量的二次电子. 部分次级电子进入交界面的半导体灵敏区中, 在灵敏区产生明显的剂量增强效应, 造成在相同的辐射剂量下, X 射线对器件和集成电路的损伤比  $\gamma$  射线要严重得多. 在 BSRF 上同时开展了硬 X 射线辐照引起的 CMOS 器件 4069 的剂量增强效应研究. 采用双层膜结构, 通过实验给出了出辐照敏感参数随总剂量的变化关系.

## 2 电离室结构、测试原理及结果

在半导体器件辐射效应研究中, 通常用硅材料在满足电子平衡时的吸收剂量(平衡剂量)来估计器件灵敏体积的吸收剂量(实际剂量). 由于 Si 和 Al 的原子序数非常接近, 可以近似用 Al 的平衡剂量数据代替.

研制的多层空腔电离室的结构如图 1 所示. 电离室的内极板用厚度为 0.005mm 高纯铝箔制成共八层, 总厚度为 0.04mm, 用环氧树脂粘贴在有机玻璃环上并与环上铜线孔槽的连出导线相连, 通过多头插座引出. 有机玻璃环厚度为 1.0mm, 内径 30mm, 外径 70mm, 在每个环上有宽为 1.0mm 深 0.3mm 的通气槽, 使空腔与大气连通. 用三根直径 6mm 的有机玻璃螺栓将所有贴有内极板的环形绝缘板按一定顺序固定在一起, 组成电离室内部组件. 图 1 为 电离室结构及测试电路示意图. 电离室由内部组件和前后两层端极板组成. 端极板均为活动结构, 可以根据实验要求更换不同原子序数、不同厚度材料. 整个电离室安装在一个侧壁厚为 30mm 的纯 Al 壳内, 辐照时前后各安装一个厚度为 5mm、内径为 25mm 的准直器. 通过多头插座用多芯同轴电缆和矩阵开关将 Keithley-619 静电计和高压接到所测电离室的两个极板上, 其他电极全部接地. 测量时, 两电极之间施加 90V 偏压, 使电离室工作在饱和状态, 通过改变极性, 得到正负偏压下电离电流的平均值, 用这种方法消除接触电势和电离室腔内电场方向对测量结果的影响.

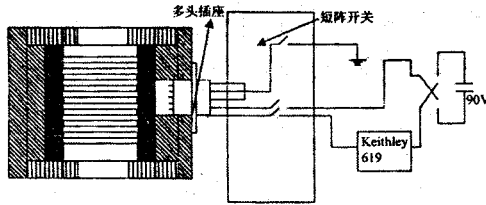


图 1 Al 多层平板电离室结构及测试电路示意

图 1 为 电离室结构及测试电路示意图. 电离室由内部组件和前后两层端极板组成. 端极板均为活动结构, 可以根据实验要求更换不同原子序数、不同厚度材料. 整个电离室安装在一个侧壁厚为 30mm 的纯 Al 壳内, 辐照时前后各安装

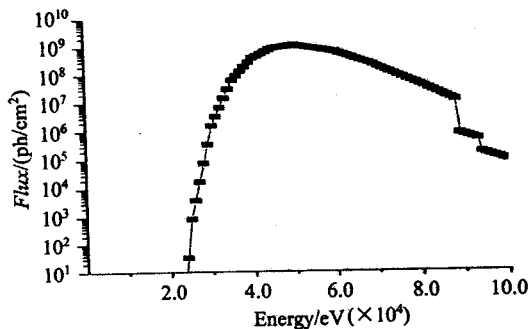


图 2 经过 400 $\mu\text{m}$  滤光片后的同步辐射光谱

本工作测量了端极板为 Ta, Pb, Kovar/Au 3 种结构材料的电离室某一空腔的电离电流  $I_i$ , 和端极板换为与内极板相同材料时同一空腔的电离电流  $I_{i0}$ , 经过入射端端极板对射线的衰减修正, 得到不同材料界面的剂量增强因子.

$$DEF = \frac{I_i}{I_{i0}} \exp \left\{ t_m \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m - t_0 \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_0 \right\},$$

式中  $t_m \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m$  为端极板的厚度与该材料光子质能吸收系数对能谱的平均值的乘积,

$t_0 \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_0$  为均匀电离室端极板 Al 的厚度与该材料光子质能吸收系数对能谱平均值的乘积.

辐射源用 0.01—100keV 的 BSRF 同步辐射白光光谱光源, 施加 0.4mm Pb 滤光. 经过滤光片以后的同步辐射能谱见图 2. 把光子从高原子序数材料一侧入射到界面, 称为正向入射, 当光子由 Al 一侧入射到高原子序数材料上称为反向入射, 由于 X 射线在材料中产生的光电子各向同性, 所以在材料界面产生的剂量增强效应与射线的入射方向没有明显的关系. 正、反向入射 DEF 实测结果相同. 实验结果如图 3 所示.

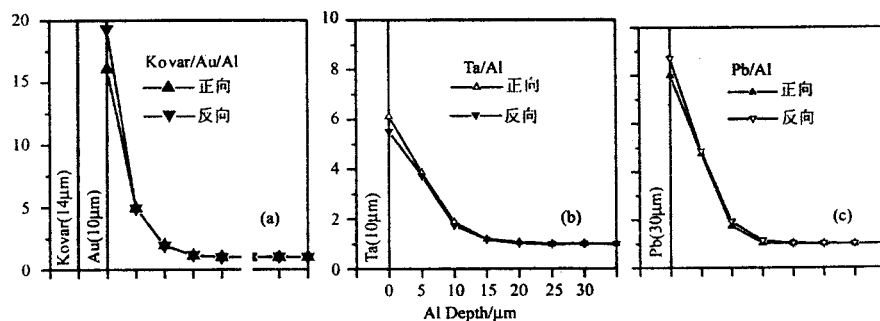


图 3

(a)Kovar/Au/Al 界面附近的 DEF 实验测量结果; (b) Ta/Al 界面附近的 DEF 实验测量结果;

(c) Pb/Al 界面附近的 DEF 实验测量结果.

从以上实验结果可以看出, 剂量增强效应是真实存在的, 而且, 不同材料的增强因子最大为 7.0—18.0 之间. 在 X 射线与物质相互作用产生的次级电子的一个电子射程内, 都存在剂量增强效应. 另外一个要考虑的问题是, 是不是这么大的剂量增强对器件造成的损伤也这么大呢? 从实验结果看, 应该把剂量增强和损伤增强区别开来. 下面重点介绍硬 X 射线辐照引起的 CMOS 器件 4069 的剂量增强效应研究.

### 3 CMOS 器件 4069 的剂量增强效应研究

剂量增强效应实际上是高原子序数物质的次级电子进入原子序数较低的器件灵敏区 (Si 或 SiO<sub>2</sub>) 所引起的损伤增强. 双层膜结构相对测量就是基于模拟 Kovar/Au 封装结构, 采用双层膜 (厚 100μm Al 膜和厚 18μm 金膜) 紧贴在开盖的器件前, 辐照时颠倒双层膜顺序, 如图 4 给出的示意图. 本文把金膜紧贴器件称为金内铝外, 相反, 把铝膜紧

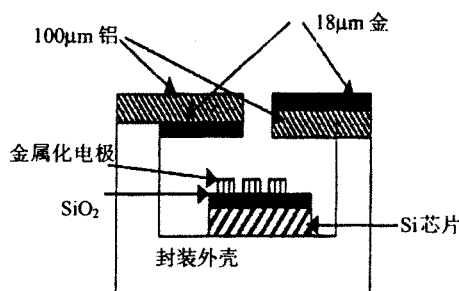


图 4 相对测量法双层膜示意图

贴器件称为金外铝内。金内铝外结构中,内层金紧贴器件灵敏区,当 X 射线辐照时,界面处 Au 中产生的次级电子穿过界面进入 MOS 器件栅氧层引起器件损伤加剧,即产生剂量增强效应,而金外铝内结构, X 射线在 Au 中产生的次级电子经 100μm Al 层达到电子平衡,不会对器件灵敏区有贡献,而 Al 的原子序数与 Si 非常接近,剂量增强效应可以忽略。由于两种顺序辐照使用的是同样厚度的双层膜, X 射线的衰减是一样的,器件辐射损伤的不同仅是由于界面处高原子序数物质产生的次级电子的贡献所致。比较这两种辐照损伤阈值,可以给出 X 射线引起的器件相对损伤增强因子。

因为主要针对硬 X 射线,所以在束流靶前加了 200μm 的铅滤光片,用中国计量院研制的 T6576 型剂量计,该剂量计主要用于测量 X 射线能量大于 30keV 的剂量,标定了器件辐照处 X 射线剂量率,并同时标定了电离室采样读数,由于装置束流不断减小,在铅滤光片后用电离室采样检测束流累积读数,从而给出器件辐照的准确剂量。实验布局示意图如图 5 所示。

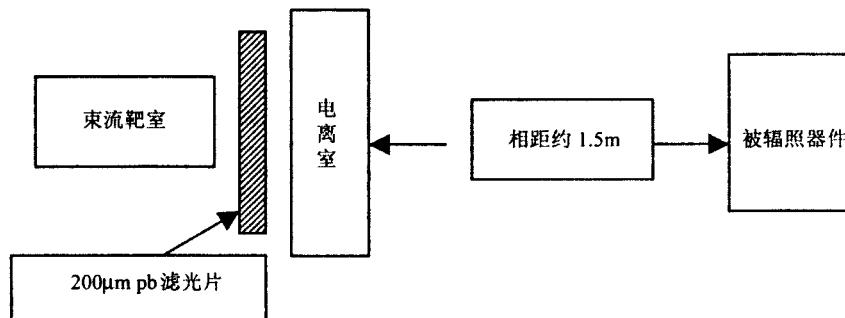


图 5 实验布局示意图

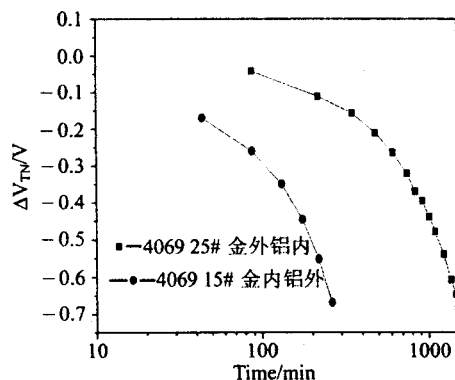


图 6 4069 双层膜结构测量的阈值电压随辐射剂量的变化

本实验研究重点是考察 N 沟道阈值电压在线辐照响应特性,目的是比较同种器件在采用双层膜结构时,阈值电压漂移与测量时间的关系,并给出相对剂量增强因子。

实验样品是国产 CC4069, 4069 为 CMOS 工艺制作的六反相器电路,六反向器并联,输入、输出、电源、地和各管脚全部引出置于辐照板上。 $V_{dd}=5V$ ,  $V_{ss}=0V$ ,所有输入端加高电位,即 N 沟一直处于导通状态。图 6 给出器件在 X 射线辐照时双层膜结构的 N 沟辐射感生阈值电压漂移随辐照剂量的变化关系。可以看出,阈值电压对辐射的响应呈平滑的曲线。这

主要是由于电离辐照中, CMOS 电路阈值电压的漂移主要取决于其  $\text{SiO}_2$  氧化物正电荷和界面态的变化, 而累积剂量辐照总是引起 CMOS 电路栅极  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面氧化物正电荷和界面态的增加, 因此, 阈值电压的辐射响应呈现出相对的稳定性. 从图 6 得出, 在相同阈值电压损伤下(如  $\Delta V_{\text{TN}} = 0.7\text{V}$ ), 金外铝内双层膜结构 CC4069 器件可以辐照剂量为  $1576\text{rad}(\text{Si})$ , 而金内铝外膜只辐照了  $256\text{rad}(\text{Si})$ , 相对损伤增强因子等于 6.0.

## 4 结束语

从上述实验结果得到, 材料的剂量增强因子大于器件损伤增强因子. 这是因为剂量增强与灵敏层厚度有关, 因为它是界面效应, 与所加电场无关, 而器件的损伤还与器件所加的工作条件有关, 次级电子沉积能量在灵敏层中, 产生电子空穴对, 同时, 电子空穴还要发生复合, 复合过程与所加电场有关. 注意到剂量增强和复合过程几乎是同时发生的, 而且二者在效应上是相反的, 互相抵消, 由于复合过程, 减小了单位剂量的有效损伤. 所以在讨论到损伤增强时, 与实验条件是密切相关的, 也可能以复合为主, 也可能以剂量增强效应为主. 所以, 在理论计算的基础上, 还要根据实验条件最后给出我们关心的器件的 X 射线实际造成的损伤增强因子.

本工作得到上海航天局 808 所吾勤之同志、中国科学院新疆物理研究所何承发同志、中国科学院高能物理所谢亚宁等同志的大力协作和支持, 在此一并表示衷心地感谢!

## 参考文献(References)

- 1 Chadsey W L. X-ray dose Enhancement. Vol. I. Summary Report, RADC-TR-76-159, ADAC26248
- 2 LAI Z W et al. Radiation Hardening Electronics—Radiation Effects and Hardening Techniques, 1998(in Chinese)  
(赖祖武等. 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理. 国防工业出版社, 1998)
- 3 LONG D M, Millward D G. IEEE Trans. Nuc.Sci., 1982, NS-29:1980
- 4 Simons M. IEEE Trans. Nuc.Sci., 1997, NS-44:2052
- 5 Beutler D E. IEEE Trans. Nuc.Sci., 1987, NS-34:1544
- 6 Solin J R. IEEE Trans. Nuc.Sci., 2000, NS-47:2447
- 7 Garth J C. IEEE Trans. Nuc.Sci., 1986, NS-33:1266
- 8 MA T P. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits. Printed in the United States of America, 1989

## Experimental Study of X-Ray Induced Dose Enhancement Effect Using Synchrotron Radiation

GUO Hong-Xia<sup>1,2</sup> CHEN Yu-Sheng<sup>1</sup> ZHANG Yi-Men<sup>2</sup> ZHOU Hui<sup>1</sup>  
HAN Fu-Bin<sup>1</sup> GUAN Ying<sup>1</sup> GONG Jian-Chen<sup>1</sup>

1 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

2 (Microelectronics Institute of Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** A multiple parallel plate Aluminum ionization chamber has been designed. Using the ionization chamber the measurement dose gradient distribution at and near the interface of Kovar/Au/Al, Pb/Al, Ta/Al has been done for 30—100keV Beijing synchrotron radiation facility x-rays and DEF(Dose Enhancement Factor) are provided. Complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) 4069 devices are irradiated by hard x-rays in BSRF with emphasis on the relative dose-enhancement factor. Using Bi-laminate structure, the equivalent relation of total dose damage is setup by comparing the response of devices, damage enhancement factor of the device is provided. These methods are provided for X-rays radiation hardening technology as an effective evaluation approach .

**Key words** multiple parallel plate aluminum ionization chambers, X-rays, dose enhancement factor, Monte -Carlo effects of total dose