

多层平板电离室测量不同材料界面剂量分布及其蒙特-卡洛模拟

郭红霞^{1,2)} 陈雨生²⁾ 张义门¹⁾ 吴国荣²⁾ 周 辉²⁾
关 颖²⁾ 韩福斌²⁾ 龚建成²⁾

¹⁾ 西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

²⁾ 西北核技术研究所, 西安 710024)

(2001 年 1 月 1 日收到; 2001 年 3 月 30 日收到修改稿)

研究设计了多层平板铝电离室, 用该电离室测量了 30—100 keV 宽谱同步辐射 X 射线在 Kovar/Au/Al, Pb/Al, Ta/Al 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(dose enhancement factor, DEF). 理论上用蒙特-卡洛粒子输运方法模拟计算了实测模型下的不同材料的界面剂量增强因子, 实验结果与理论模拟符合很好, 为研究不同材料的剂量增强提供了理论和实验手段.

关键词: 多层平板电离室, 剂量增强, 蒙特-卡洛模拟

PACC: 6180C, 0250, 8140

1 引 言

本项研究针对能量为 30—100 keV 的 X 射线设计了多层平板铝电离室. 该能量段的 X 射线能谱穿透力强, 不易屏蔽, 且入射在不同原子序数材料的界面时, 在靠近界面处几十微米内的低原子序数材料中产生较强的剂量增强效应^[1,2]. 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. 国外^[3-6]曾报道过用多层平板铝电离室测量⁶⁰Co γ 射线穿过不同材料的界面剂量分布, X 射线引起的材料界面剂量增强测量从未见文献报道. 鉴于此, 我们自行设计了测量 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 30—100 keV 宽谱同步辐射 X 射线在 Kovar/Au/Al, Pb/Al, Ta/Al 材料界面附近的辐射剂量梯度分布, 给出了不同材料的界面剂量增强因子. 同时用蒙特-卡洛方法模拟计算了实测模型下的不同材料的界面剂量增强因子, 实验结果与理论模拟符合很好. 填补了该项研究的空白. 材料剂量增强效应的实际测试研究结合理论预测结果的验证, 对器件灵敏体积吸收剂量的准确估计, 以及半导体器件加固水平

的正确评估都具有较大的实际意义. 为研究不同材料的界面剂量分布提供了理论和实验手段.

随着半导体集成电路技术的飞速发展, 为了改善器件性能, 许多超大规模集成电路(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 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 SiO₂ 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 $\sigma_p \propto Z^{4-5}$, 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较 γ 射线要严重得多. 为了得到其灵敏体积的实际剂量, 必须在采用常规方法测量平衡剂量的同时^[7], 设法测出剂量增强效应的增强因子(实际剂量与平衡剂量的比值).

2 电离室结构、测试原理与结果

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 和图 2 所示.图 1 是其内部结构示意图,电离室的内极板用厚度为 0.005 mm 高纯铝箔制成,总厚度为 0.04 mm 共 8 层,用环氧树脂黏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 1.0 mm,内径为 30 mm,外径为 70 mm,在每个环上有宽为 1.0 mm 深度为 0.3 mm 的通气槽,使空腔与大气连通.用三根直径为 6 mm 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 2 为电离室

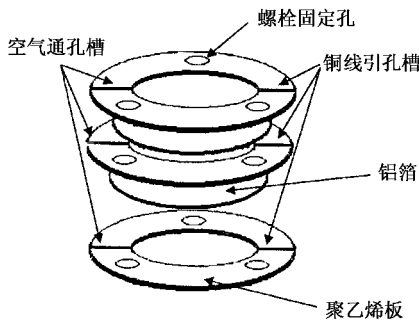


图 1 多层平板电离室内部结构示意图

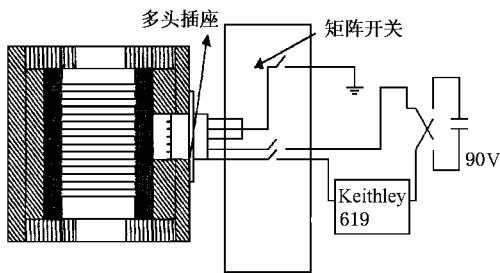


图 2 Al 多层平板电离室结构及测试电路示意图

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、不同厚度的材料.整个电离室安装在一个侧壁厚度为 30 mm 的纯 Al 壳内,辐照时前后各安装一个厚度为 5 mm、内径为 25 mm 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 90 V 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.

本工作测量了端极板为 Ta ,Pb ,Kovar/Au 三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. $DEF = \frac{I_i}{I_{i0}} \exp(-t_m(\mu_{en}/\rho)_m - t_0(\mu_{en}/\rho)_0)$,式中 $t_m(\mu_{en}/\rho)_m$ 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, $t_0(\mu_{en}/\rho)_0$ 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—100 keV 的同步辐射白光光谱光源,施加 0.4 mm Pb 滤光.经过滤光片以后的同步辐射能谱见图 3.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、反向入射的 DEF 实测结果相同.

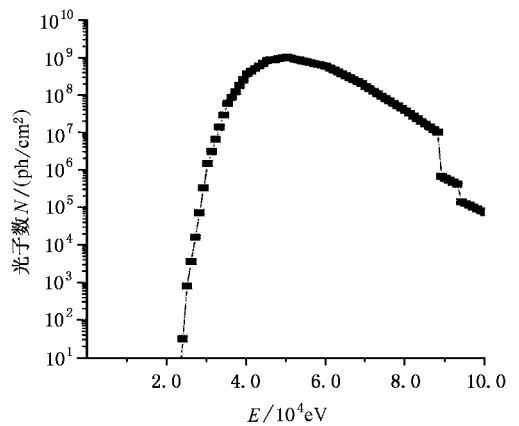


图 3 经过 400 μm 滤光片后的同步辐射光谱

3 理论模拟

针对电离室模型用蒙特-卡洛粒子输运程序进行模拟计算^[8-11].输入测得的同步辐射白光光谱能谱,跟踪 20 万个粒子.计算中对光子和次级电子的所有次级过程都模拟跟踪.整个程序主要由三部分构成.调用主程序处理用户模型信息,并建立光子输运的有关数据,然后调用建立与电子输运有关的数据,最后对源粒子逐一抽样跟踪.

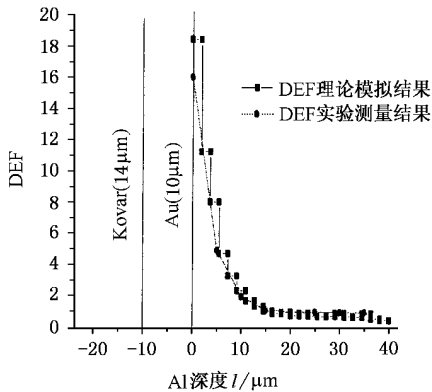
X 射线与介质相互作用主要是光电效应、康普

顿效应 ,并分别产生光电子、康普顿电子^[12]。而电子在输运过程中又发生韧致辐射。对源粒子抽样,抽取源粒子的空间位置、方向、能量、权重,确定初始状态 (r, Ω, E, W) 。用强迫碰撞抽样自由程距离 l ,新碰撞位置 $r' = r + l\Omega$ 。在 r' 处确定粒子与某种物质的某种原子发生何类反应,由入射方向 Ω 、能量 E 和微分截面抽样出射方向 Ω' 和出射能量 E' 。光子在输运过程中与核相互作用,会产生电子,同样,电子在输运过程中会产生次级光子。对此,采取了先电子后光子的模拟原则。即当光子(包括源光子与次级光子)产生了次级电子时,先将原级光子存入光子库中,立即跟踪次级电子;当电子产生次级光子时,先将次级光子存入光子库,继续跟踪原级电子。对任一条分支都按此原则处理。当一个电子分支的历史结束后,首先清查电子库,若有库存电子时,便按后存入先取出的原则取出库内电子进行模拟。在确定电子库中已无电子后,再清点光子库,若有库存光子,同样进行。此时有可能产生电子,必须把光子存起来跟踪电子。直到光子库无光子,再重新开始一个历史。直到全部粒子跟踪完毕,计算了 Pb/Al, Ta/Al, Kovar/Au/Al 结构在 Al 中的沉积能量。界面深度越大,即离界面越远, RDEF 越小,次级电子贡献越小。

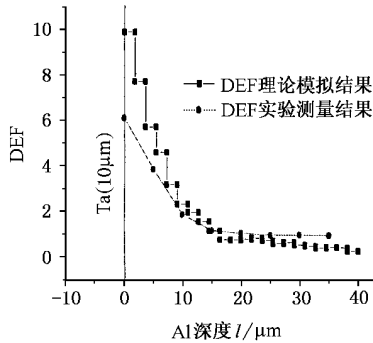
图 4 给出 Kovar/Au/Al, Ta/Al, Pb/Al 界面附近的 DEF 理论模拟和实测结果。

4 结 语

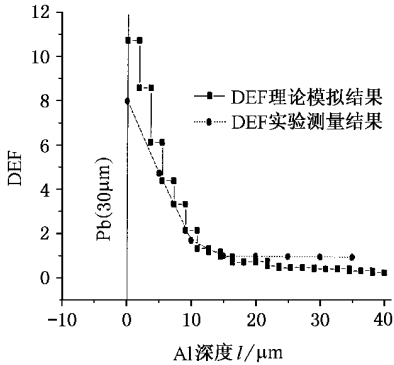
图 4 给出了实验测试结果和计算结果, Kovar/Au/Al, Pb/Al 结构理论与实验对比符合较好,对 Ta/Al 结构我们分析认为实验用的 Ta 片是合金,有低原子序数成分,而理论模拟用纯 Ta 金属,所以理论模拟数据大于实测结果。为此材料的剂量增强理论计算和实验可以互相验证。剂量增强效应是真实存在的,在 X 射线与物质相互作用产生的次级电子的一个电子射程内,都存在剂量增强效应。另外一个要考虑的问题是,是不是这么大的剂量增强对器件造成的损伤也这么大呢^[13,14]? 从实验结果看,我们应该把剂量增强和损伤增强区别开来。实际上,对于⁶⁰Co γ 射线和 X 射线因为它们产生的次级电子的能量不同,对于 10 keV 的电子的阻止本领是 1 MeV 电子(⁶⁰Co γ 射线的次级电子能量)阻止本领的 10 倍^[13],即它们的 line energy transmission(LET)值相差 10 倍,对低能电子,虽然产生的平均电子空穴对数



(a)为 Kovar/Au/Al 界面附近的 DEF 理论模拟结果与实验测量结果比较



(b)为 Ta/Al 界面附近的 DEF 理论模拟结果与实验测量结果比较



(c)为 Pb/Al 界面附近的 DEF 理论模拟结果与实验测量结果比较

图 4

目增加了,但是发生复合的概率也增加了。注意到剂量增强和复合过程几乎是同时发生的,而且两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。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,而复合过程与所加电场有关,与灵敏层厚度无关。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研究所谢亚宁同志的大力协作和支持,在此一并表示衷心地感谢!

- [1] L.Z. Lai *et al.*, Radiation Hardening Electronics -Radiation Effects and Hardening Techniques (National Defense Industry Press ,Beijing ,1998)(in Chinese) 赖祖武 ,抗辐射电子学-辐射效应及加固原理 (国防工业出版社 ,北京),1998).
- [2] W.L.Chadsey ,X-ray Dose Enhancement Vol. I Summary Report , RADC -TR-76-159 ,ADAC26248.
- [3] J.A.Wall , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-17** (1970) , 305.
- [4] M.Simons , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-44** (1997) , 2052.
- [5] J.C.Garth , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-43** (1996) , 2731.
- [6] E.Aburke , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-36** (1989) , 1890.
- [7] R.R.Harta , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-33** (1986) , 1258.

- [8] W.L.Filippone , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-34** (1987) , 1564.
- [9] J.C.Garth , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-44** (1997) , 2058.
- [10] J.A.Wall , Gamma Dose Distributions at and near the Interface of Different Materials (NWER Subtask TA040).
- [11] J.C.Garth , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-22** (1975) , 2562.
- [12] L.Liu *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **37** (1988) , 1800 (in Chinese) 刘磊等 ,物理学报 , **37** (1988) , 1800].
- [13] T.P.Ma , Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits (Printed in the United States of America , 1989).
- [14] J.C. Garth , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-33** (1986) , 1266.

USING MULTIPLE PARALLEL PLATE ALUMINUM IONIZATION CHAMBER FOR DETERMINING DOSE DISTRIBUTION AT AND NEAR THE INTERFACE OF DIFFERENT MATERIALS AND ITS MONTE-CARLO SIMULATION

GUO HONG-XIA^{1,2)} CHEN YU-SHENG²⁾ ZHANG YI-MEN¹⁾ WU GUO-RONG²⁾ ZHOU HU²⁾

GUAN YING²⁾ HAN FU-BIN²⁾ GONG JIAN-CHENG²⁾

¹⁾ (Microelectronics Institute of Xidian University , Xi'an 710071 ,China)

²⁾ (Northwest Institute of Nuclear Technology , Xi'an 710024 ,China)

(Received 1 January 2001 ; revised manuscript received 30 March 2001)

ABSTRACT

A multiple parallel plate aluminum ionization chamber has been designed for the study of dose distribution at and near the interface of different materials. The measurement of dose gradient distribution at and near the interface of Kovar/Au/Al ,Pb/Al ,Ta/Al has been done for 30—100 keV X-rays from the synchrotron radiation source , and the dose enhancement factor (DEF) are also provided. DEF for interface of different materials is calculated by Monte-Carlo simulation of particle transportation , and the results are consistent with the measured dose-enhancement factor. A reliable evaluation approach of theoretical and experimental method is proposed for studying X-ray dose enhancement.

Keywords : multiple parallel plate aluminum ionization chambers , dose enhancement factor , Monte-Carlo simulation

PACC : 6180C , 0250 , 8140