

复合材料对电子辐照屏蔽有效性的蒙特卡罗计算研究

方俊¹ 卫宁² 郭红霞³ 王俊¹

(1 华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237)

(2 西北核技术研究所, 西安 710024)

(3 骊山微电子有限公司, 西安 710075)

文摘 以含铅增韧双马来酰亚胺为基体, 以高 Z 低 Z 金属粉末为填料, 制备了抗辐射复合材料, 采用蒙特卡罗方法对复合材料对电子辐照屏蔽有效性进行了模拟计算, 并与金属 W、Al 进行了比较。结果表明, Al、Ta 及复合材料的实验值与采用蒙特卡罗粒子输运方法模拟计算的结果符合性较好; W 及复合材料的防辐射性能优良, 而 Al 的防辐射性能较差; 复合材料可通过添加低 Z 组分进行性能设计, 提高对韧至辐射的防护能力, 且可以减重, 以期采用复合材料对集成电路进行封装提供数据。

关键词 蒙特卡罗, 电离辐射, 屏蔽, 复合材料

Simulation Calculation Research on Shield Effectiveness for Electron Irradiation of Composites

Fang Jun¹ Wei Ning² Guo Hongxia³ Wang Jun¹

(1 School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

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

(3 Lishan Microelectronics Corporation, Xi'an 710075)

Abstract Radiation resistant composites is prepared by using lead-contained toughened poly - (4, 4' - bis-maleimidephenmethane) as matrix and high Z and low Z metal powders as filler. The shield effectiveness for electron irradiation of the composites is simulation calculated by Monte-Carlo method and compared with that of the metal tungsten. The simulation calculated result provides some data for direct package of the IC device with composites.

Key words Monte-Carlo, Ionization radiation, Shielding, Composite

1 前言

在近地空间辐射环境中 (离地面 80 ~ 6 500 km), 存在着相当强的辐射, 它们主要来自地球辐射带粒子、太阳射线和宇宙射线。对于围绕地球运行的航天器威胁最大的是位于赤道上空的内外范艾伦辐射带, 它们主要由高能质子 (10 ~ 100 MeV) 和高能量电子 (0.4 ~ 7 MeV) 所组成, 受辐射的剂量率可分别达到 1 Gy/h ~ 数十 Gy/h。对于 LEO (Low Earth Orbit), 辐射剂量包括俘获带的电子和质子。而对于地球同步轨道, 剂量主要是电子的贡献^[1]。这些穿过卫星壳体的射线造成星内电子元器件的总剂量电离辐射损伤, 致使航天器发生故障或失效^[2]。因此为了确保护星的高可靠、长寿命的工作, 开展电子元器件

的高能电子辐射屏蔽有效性研究是非常有意义的。

国外在集成电路的辐射屏蔽封装研究上较深入^[3~4], 我国在卫星辐射屏蔽有效性研究上虽也开展了许多年^[5~6], 但开展集成电路元器件的辐射屏蔽封装研究还处于起步阶段。

本文利用电子加速器对复合材料及金属材料进行辐照, 给出某一剂量的能量沉积深度分布曲线, 并与运用辐射输运理论进行模拟计算的结果相比较, 验证计算结果的可靠性, 然后采用同一模型, 计算不同能量高能电子的能量沉积深度分布曲线, 为采用设计的复合材料对集成电路进行封装提供数据。

2 实验

2.1 复合材料的制备

收稿日期: 2006 - 06 - 21; 修回日期: 2006 - 09 - 15

作者简介: 方俊, 1968 年出生, 博士, 主要从事功能复合材料、高分子材料以及碳/碳材料研究

以含铅 10% (质量分数) 的增韧双马来酰亚胺为基体, 选择几种典型的金属粉末 (W、Al 等) 添加到树脂中, 经模压固化成型为所需的复合结构材料, 树脂体积分数 50%, 固化程序为: 180 /2 h, 200 /2 h, 230 /4 h。

2.2 辐射实验

实验在 ELV - 8 型电子加速器 (最高加速电压 2 MV, 最大输出电流 40 mA) 上进行, 辐照方式采用静态加速器自动控制剂量, 辐照累积剂量 (Si) 为 10^5 Gy。根据要求确定辐照电子的能量为 1.5 MeV, 加速器稳定输出束流 0.3 mA, 取辐照参数为 $85 \text{ mA} \cdot \text{s}$, 将被辐照材料 (Al 板、Ta 板、复合材料等) 放置在电子引出窗正下方 20 cm 处的吸热靶上, 采用 FWT - 60 蓝色赛洛芬辐射显色薄膜测量电子剂量, 薄膜测量范围在 $10^2 \sim 10^5$ Gy。

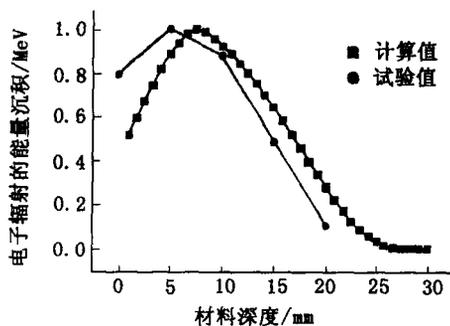
2.3 理论计算

理论模拟计算采用蒙特卡罗粒子输运方法。用 ITS 系列程序的二维 TIGERP 模拟计算。针对上述辐照条件对几种典型材料建立理论计算模型, 每次计算跟踪 2×10^5 个粒子。在计算中对电子及产生的次级光子和次级电子的所有次级过程进行模拟跟踪。为了减少计算量, 采取 Berger 方法对带电粒子的历史进行压缩, 把若干次真实碰撞合并为一次碰撞来处理。每一步的能量和飞行方向的转移概率由 Goudmit-Saudon 多次散射理论给出。

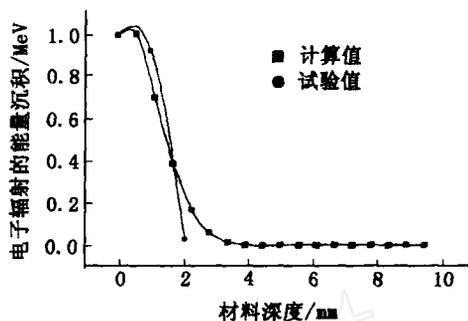
3 结果与讨论

3.1 模型运算及验证

用 Al、Ta 及复合材料进行模型验证, 将计算结果与测量结果相比较, 见图 1。可以看出, 理论与实验数据符合很好。高 Z 材料, 如 Ta, 对电子有很好的屏蔽作用, 对能量为 1.5 MeV 电子, 厚度 0.2 mm, 可以衰减一个数量级, 而 Al 则需 2 mm。复合材料对 1.5 MeV 的电子辐射, 0.5 mm 后的剂量实测为 0, 与理论计算值的 0.01 相近, 可以认为复合材料的理论值与实测值基本符合。



(a) Al



(b) Ta

图 1 高能电子在金属中的辐射能量沉积深度分布

Fig 1 Energy deposition of electron in metals

3.2 复合材料对电子辐射屏蔽有效性

空间轨道辐射环境电子谱的能量范围在 0.4 ~ 7 MeV, 本文计算了能量点分别为 1.0、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 MeV 的电子辐射在复合材料及 Al、W 中的剂量深度分布曲线。

由图 2 可知, 复合材料能量沉积曲线存在峰值, 不同能量的电子束对应的峰值也不同, 能量越高, 峰值位置越后。过了峰值后, 能量沉积曲线急剧下降, 对于能量小于 1.0 MeV 的电子辐射, 采用 0.5 mm 的复合材料薄片可将辐射屏蔽掉, 对于小于 2.5 MeV 的电子辐射 1.6 mm 的薄片就可以胜任, 而对于 4.0 MeV 的电子辐射则需要 2.8 mm。因此可以根据不同轨道辐射环境能谱和电子元器件本身的耐辐射能力, 设计复合材料厚度, 减轻防护材料质量, 达到最佳的屏蔽效果。

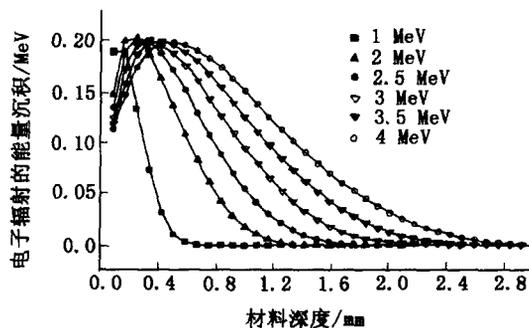


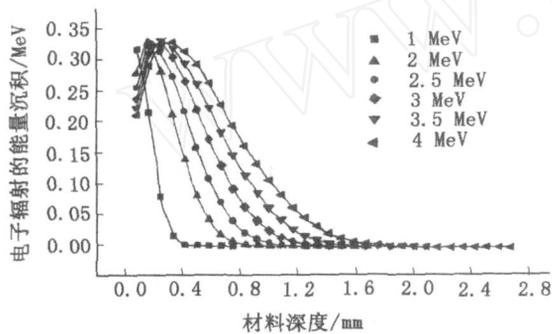
图 2 复合材料辐射能量沉积深度分布模拟曲线

Fig 2 Energy deposition of electron in different deepness of composites

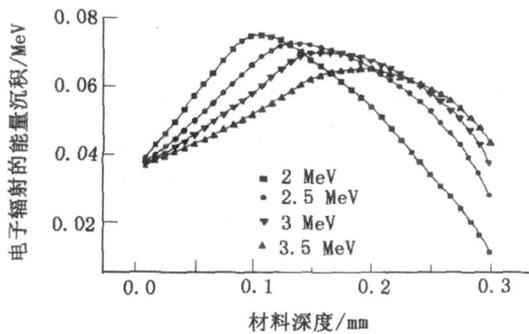
我们也同时计算了 W 和 Al 的能量沉积曲线。W 也同样存在能量沉积峰值, 而且峰值过后曲线下降斜率更大。完全屏蔽电子辐射所需厚度也更小, 见图 3(a)。例如同样对于 4.0 MeV 的电子辐射, 复合材料需要 2.8 mm, 而 W 只需要 1.6 mm。因此 W 是最好的屏蔽初级电子材料, 但从实用性设计考虑, 由于 W 是导体, 不利于特殊结构器件进行包封。而复

合材料则可通过设计,在不剧烈损失抗辐射性能的情况下,同时达到绝缘的目的。另外,高能电子在其射程范围内,会产生韧致辐射,主要是 γ 射线,在0.5~5 MeV内, γ 射线的能量损失以康普顿效应为主,其散射截面与原子序数有关,原子序数越低,散射截面越大^[7]。因此高Z的金属W却不是很好的韧致辐射屏蔽材料,较低Z的Al反而具有很好的防护效果。因此采用复合材料进行电子器件的包封,更能体现结构优化的优点。同时采用复合材料进行电子器件的封装,比单纯用金属薄板进行封装,在质量上要轻很多,这对航天器总质量的控制极为有利。

Al的屏蔽效果较差,如图3(b)所示,各层沉积能量很小且趋于一致。



(a) W



(b) Al

图3 金属材料的辐射能量沉积深度分布模拟曲线

Fig 3 Energy deposition of electron in different deepness of metals

4 结论

(1)辐照电子的能量为1.5 MeV,辐照累积剂量(Si)为 10^5 Gy的条件下,Al、Ta及复合材料的实验值与采用蒙特卡罗粒子输运方法模拟计算的结果符合性较好。

(2)不同能量条件下的能量沉积分布模拟曲线表明,W及复合材料的防辐射性能优良,而Al的防辐射性能较差。考虑到W对韧致辐射的防护较差,而复合材料可通过添加低Z组分进行性能设计,一方面可以提高对韧致辐射的防护能力,另一方面可以减重,因此复合材料作为器件封装材料的优越性更佳。对于能量小于1.0 MeV的电子辐射,采用0.5 mm的复合材料薄片可将辐射屏蔽掉,对于小于2.5 MeV的电子辐射1.6 mm的薄片就可以胜任,而对于4.0 MeV的电子辐射则需要2.8 mm。

参考文献

- 1 祁章年,陈涓,李向高. 卫星舱内宇航剂量测量与分析. 宇航学报, 1993; 10(4): 6~60
- 2 Devine R A B. The structure of SiO_2 its defects and radiation hardness. IEEE Trans Nucl Sci, 1994; 41(6): 452
- 3 Barak J, Reed R A, Label K A. On the figure of merit model for SEU rate calculation. IEEE Trans Nucl Sci, 1999; 46(6): 1504~1509
- 4 Adams L, Nickson R, Kelleher A et al. A dosimetric evaluation of the RADPARKTM using mono-energetic electrons and protons. IEEE Trans Nucl Sci, 1996; 43(3): 1014~1017
- 5 杨怀民. 电子设备总剂量辐射屏蔽和防护技术. 电子技术参考, 2000; (4): 12~24, 71
- 6 王长河. 星用微电子器件辐射效应及加固途径分析. 半导体情报, 1996; 33(4): 6~14
- 7 李星洪等. 辐射防护基础. 第一版. 北京:原子能出版社, 1982: 21

(编辑 任涛)