

辐射环境对共晶 SnPb 钎料焊点微观组织和力学性能的影响

王剑豪, 薛松柏, 吕兆萍

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了探索空间辐射环境下电子器件焊点组织和性能变化的规律, 满足未来微小型深空探测器对电子器件焊点可靠性的要求, 采用 ^{60}Co - γ 源部分模拟空间辐射环境, 研究了空间辐射对 SnPb 共晶钎料焊点微观组织, 力学性能和断口形貌的影响。结果表明: 在 0.25 Gy(Si)/s 的剂量率下, γ 射线辐照会对 SnPb/Cu 焊点形成辐照损伤, 焊点内的 Pb 基固溶体中有微孔洞和微裂纹产生, 恶化了焊点的力学性能。经过 964 kGy 剂量的 γ 射线辐照后, 焊点拉伸力降低了 14.12%。断口组织分析表明, 辐照后焊点的断裂方式仍为韧性断裂, 但其塑性较未辐照的焊点有所降低。

关键词: 空间辐射; 共晶 SnPb 钎料; 微观组织; 力学性能; 断口形貌

中图分类号: TG425+.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)10-3346-06

1957 年, 前苏联成功发射了第 1 颗人造地球卫星, 标志着人类进入了航天时代, 太空探索开始成为人们关注的重点。作为科学技术的集中体现, 航天工业在科学、军事以及国民经济领域产生了极为重大的影响, 成为国家之间新的竞争领域^[1-3]。随着航天技术的进一步发展, 人们逐渐把目光从近地空间转向了更为广袤的深空领域, 近年来各国纷纷启动了自己的深空探测计划。NASA 发射了“New Horizon”探测器完成了对冥王星的观测; 欧洲空间局启动了“ExoMars”项目, 致力于实现火星取样并返回地球; 中国的“嫦娥计划”和“火星探测计划”也在有序进行中。深空探测器不仅需要大推力火箭和适宜的发射窗口, 同时也要易于实现变轨以满足探测任务的需要。基于此, “小型化”和“轻量化”成为了深空探测器的主要发展趋势^[4,5]。

与地面不同, 在轨运行的航天器无法进行维修, 其服役环境更为复杂, 不仅要承受剧烈的温度变化, 而且由于失去了地球磁场的保护, 面临着包括 γ 射线、高能质子和重离子等在内的太空辐射粒子的影响, 对航天器内部元件的可靠性提出了非常高的要求^[6]。由于空间探测器功能密集度的提高和设计寿命的增长, 其微电子线路的集成度也不断提高, 对空间辐射环境也更为敏感^[7]。因此, 目前多采用“抗辐射加固”的办法来避免航天器电子系统遭受辐射损伤^[8]。但是“抗辐射加固”不仅工艺繁琐, 程序复杂, 而且增加了航

天器的体积和重量, 越来越难以满足深空探索的需求, 急需从材料自身的角度入手, 研究辐射环境下航天器材料辐照损伤的产生机理, 进而探索提高材料抗辐射性能的措施, 为新型深空探测器的容错设计提供理论基础。

作为电子系统的基本组成部分, 电子器件只有通过钎焊与印刷电路板形成可靠的机械连接和电连接才能够发挥功能。1998 年, 美国商业卫星“GALAXY VII”由于电子器件焊点“锡须”萌生导致失效, 焊点的可靠性逐渐受到了研究人员的关注。但是, 目前关于电子器件焊点可靠性的研究主要集中在热时效、热循环和电迁移等方面, 关于辐射环境对焊点可靠性影响的研究还是一片空白^[9-11]。由于航天工业不受 RoHS 法令的限制, 含铅钎料因为其优异的润湿性能和低温性能, 在航天器的生产制造过程中得到了大量的应用。因此本实验以共晶 SnPb 钎料为对象, 研究了 γ 射线辐照对共晶 SnPb 钎料焊点微观组织和力学性能的影响, 以期阐明辐射环境下电子器件焊点可靠性的变化规律, 为未来航天器用高可靠性钎料的研发提供参考。

1 实验

采用纯度为 99.99% 的 Sn、Pb 作为原材料, 在电阻炉中熔炼制备 Sn63Pb37 共晶钎料合金, 之后降温, 冷却, 并将熔炼好的钎料铸锭拉丝待用。在 235 °C 下, 将 SnPb 共晶钎料钎焊在清洗干净的紫铜板上, 助焊剂为

收稿日期: 2018-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(51675269); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 王剑豪, 男, 1994 年生, 博士生, 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016, 电话: 025-84896070, E-mail: wangjh_gareth@163.com

市售免清洗助焊剂。截取上述焊后试样的横截面得到焊点组织试样，并对其镶嵌、研磨、抛光和腐蚀。为了保证实验的准确性，所用组织试样均从同一个焊点试样中截取。采用 LEICA DMILM 型光学显微镜(OM)，ZEISS SIGMA 500 型扫描电子显微镜(SEM)进行焊点显微组织观察，并通过 INCA X-Act 型 EDS 进行化学成分分析。

电子器件在空间环境中实际积累的辐射剂量与服役时间、与太阳的距离、太阳及其他天体活动强度密切相关。由于地面无法按照实际的粒子类型和能量等提供完全真实的空间辐射环境，同时也为了缩短耐辐照测试的时间，目前在研究中主要采用 ^{60}Co 作为辐照源模拟宇宙环境进行辐照实验，通过改变样品与 ^{60}Co 源的间距和添加屏蔽物等方式来调节辐照剂量率^[12]。依据中国国家军用标准 GJB 548B-2005：《微电子器件试验方法和程序》的规定，对试样进行剂量为 0~964 kGy 的辐照实验，观察 γ 射线辐照对焊点组织和力学性能的影响。 γ 射线辐照实验在室温大气环境下进行，将试样置于辐照室中，通过机械装置将 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 源从保护装置中取出，开始进行辐照实验，如图 1 所示。辐照的剂量率为 0.25 Gy(Si)/s，并预先采用剂量计进行标定。

焊点的力学性能参照日本工业标准 JIS Z 3198-2003《无铅钎料试验方法—第 6 部分：QFP 引线焊点 45°拉脱试验方法》的相关规定进行，用制备好的 Sn63Pb37 钎料将 48 引脚的 QFP 元件再流焊接到印刷电路板的 Cu 焊盘上，通过 STR-1000 型微焊点强度测试仪测试不同辐照剂量下焊点的最大拉伸力，用以表征焊点的力学性能。如图 2 所示。钩针的移动速度设置为 2 mm/min。同一个参数下测试 5 次，并求平均值。同时对断口形貌进行分析，研究辐射环境下焊点力学性能的变化规律及机理。

2 结果与讨论

2.1 共晶 SnPb 钎料焊点微观组织

γ 射线波长短，频率高，具有极强的穿透性，可

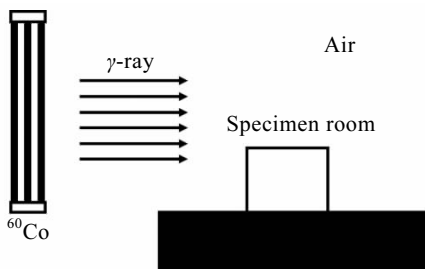


图 1 γ 射线辐照实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of γ -ray irradiation experiment

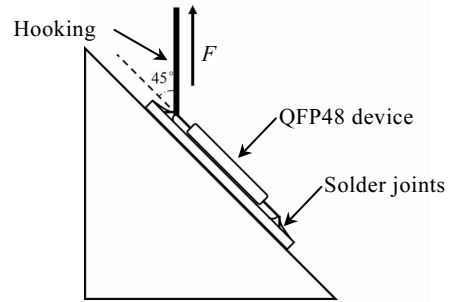


图 2 QFP 引线焊点 45°拉脱试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of 45° pull test of solder joints on QFP lead

以引起物质性能变化，因而是宇宙环境中一个非常危险的环境因素。 γ 光子与物质的相互作用存在 3 种效应，分别是光电效应，康普顿效应与电子对效应。如图 3 所示，3 种效应的发生不仅取决于 γ 射线的能量，也与靶物质的原子序数有关^[13]。当 γ 射线能量较低时，其与物质主要发生光电效应； γ 射线能量适中时，康普顿效应占优势；只有 γ 射线能量很高且靶物质的原子序数较高时，电子对效应才有可能发生。 ^{60}Co 可以发射出两种 γ 射线光子，其能量分别为 1.17 和 1.33 MeV。Sn 和 Pb 的原子序数分别为 50 和 82。由图 3 可以看出，在 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线的辐照作用下，Sn63Pb37 钎料焊点中发生的主要是康普顿效应。

入射的 γ 光子与物质原子的核外电子发生弹性碰撞，将能量传递给核外电子，使该电子摆脱原子核的束缚从原子中射出而成为高能电子， γ 光子本身也改变方向继续在物质中运动，这种现象被称为康普顿效应，如图 4 所示。已有的研究表明， γ 射线光子与靶物

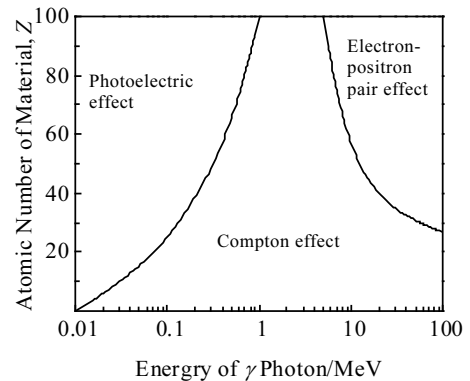


图 3 γ 射线对物质的 3 种作用方式的范围

Fig.3 Domination regions of effects of γ -ray on materials

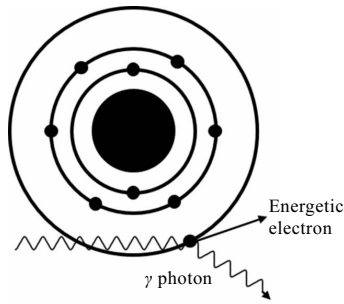


图 4 康普顿效应示意图

Fig.4 Schematic diagram of Compton Effect

质的原子核发生碰撞而直接导致原子离位的概率很低，几乎可以忽略不计。但是 γ 光子与核外电子的碰撞截面较大，可以通过康普顿效应激发高能电子^[14]。康普顿效应是高能传输占优势的事件， γ 射线传递给电子的能量与 γ 光子本身的能量近似。由于高能电子与原子核之间的碰撞截面较大，这些被 γ 射线激发的高能电子可以将原子击出晶体点阵位置而成为离位原子，并在原处留下晶体空位，也就是“Frankel 缺陷”，如图 5 所示。

Sn 与 Pb 之间的电负性差较小，由 Sn-Pb 二元相图可知，两者不会形成金属间化合物，只能相互固溶形成固溶体^[15]。图 6 为 Sn63Pb37 钎料焊点组织的 SEM

背散射电子像。区域 A 的 EDS 分析结果如图 6d 和 6e 所示^[16]，Sn63Pb37 钎料焊点由相间分布的深色 Sn 基固溶体和浅色 Pb 基固溶体组成。图 6a 为回流焊后 SnPb 共晶钎料焊点微观组织形貌。Pb 基固溶体表面光滑而平整。但是经过了 432 kGy 剂量的 γ 射线辐照后。Pb 基固溶体中有微孔洞产生。 γ 射线辐照会在材料中形成“Frankel 缺陷”。这些离位原子和点阵空位一部分会迅速复合而湮灭，但仍有相当一部分被保留下来，并通过迁移而相互聚合，在组织中形成微观缺

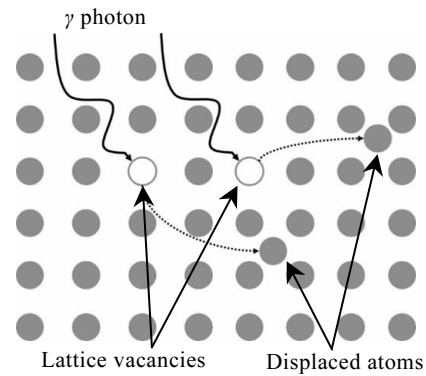


图 5 γ 射线辐照点缺陷产生过程

Fig.5 Generation mechanism of point defects under γ -ray irradiation

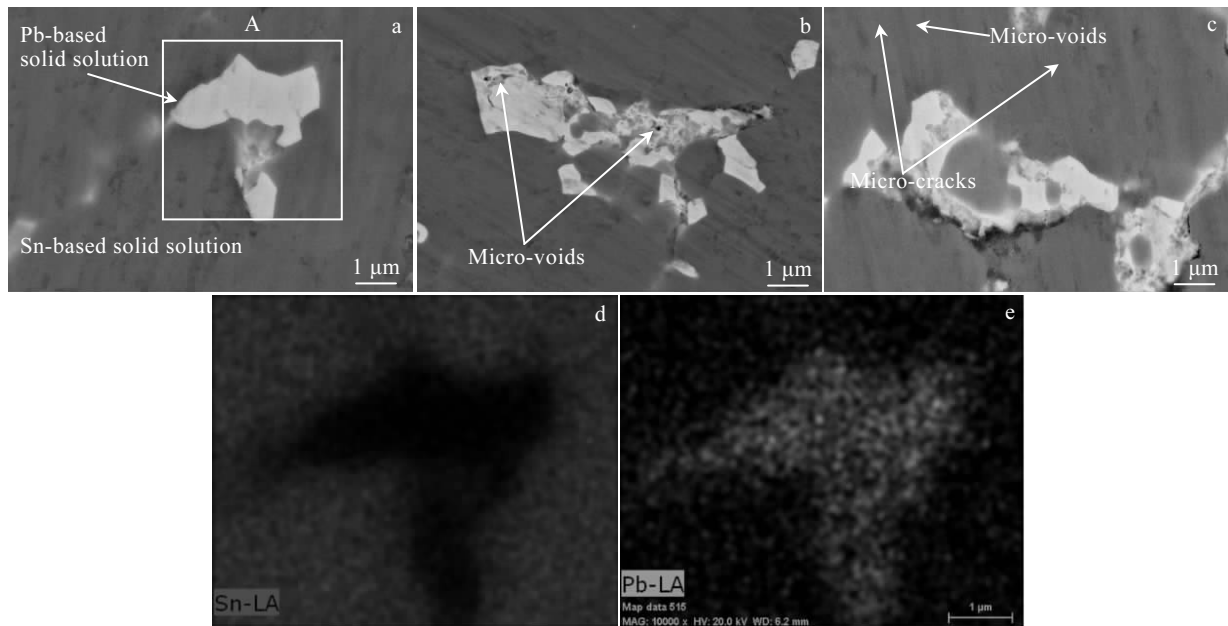


图 6 不同辐照剂量下 SnPb 共晶钎料焊点微观组织及 EDS 元素面分布

Fig.6 SEM images (a~c) and elements mapping (d, e) of eutectic SnPb solder joints after irradiation with different radiation doses^[16]: (a) 0 kGy, (b) 432 kGy, (c) 964 kGy, (d) Sn, and (e) Pb

陷^[17]。随着辐照剂量的增加， γ 射线产生的微观缺陷数量不断增多，从而在 Pb 基固溶体中形成微孔洞，如图 6b 所示。在组织应力的作用下，微孔洞极易成为应力集中区而萌生微裂纹。当辐照剂量达到 964 kGy 时，Pb 基固溶体中不仅微孔洞尺寸增大，同时也有微裂纹产生。对于一定能量的 γ 射线，康普顿效应的发生与靶物质的原子序数成正比，原子序数高的物质更容易与 γ 光子相互作用。因此与 Pb 基固溶体相比，焊点中 Sn 基固溶体受到的影响较小^[18]。

2.2 共晶 SnPb 钎料焊点的拉伸力

电子产品在服役过程中不可避免要承受力学载荷，焊点的强度一直是评价焊点性能的一个重要指标，其力学性能极大地影响着电子系统的质量。图 7 为在 0.25 Gy(Si)/s 剂量率下的 ⁶⁰Co- γ 射线辐照前后 SnPb 共晶钎料焊点拉伸力的变化情况。可以发现，随着辐照剂量的增加，焊点的力学性能不断降低。与回流焊后相比，经过 964 kGy 剂量的 γ 射线辐照后，SnPb 钎料焊点的拉伸力降低了 14.12%；同时随着辐照剂量的增大，拉伸力的下降速率有所减小。

材料的组织决定了材料的性能。 γ 射线辐照可以在 SnPb 共晶钎料焊点的 Pb 基固溶体中产生一定量的微观缺陷，这些缺陷通过迁移而聚合，形成了微孔洞和微裂纹。在焊点承受力学载荷时，这些微孔洞和微裂纹极易产生应力集中而成为裂纹源，导致焊点断裂失效，因此 γ 射线辐照后，焊点的力学性能不断降低。

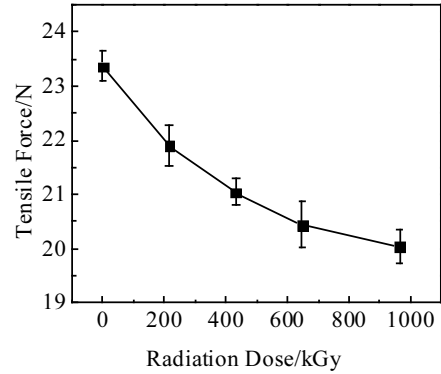


图 7 不同辐照剂量下 SnPb 共晶钎料焊点的拉伸力
Fig.7 Tensile force of eutectic SnPb solder joints after irradiation with different radiation doses

同时由于大剂量辐照后产生的过饱和点缺陷引起了晶体点阵的变形，增加了晶体点阵的应力，使得新的离位原子越来越难以产生，微观缺陷的萌生也更为困难。因此经过了大剂量 γ 射线辐照后，共晶 SnPb 焊点拉伸力的下降速率较辐照初期有所减小。

2.3 共晶 SnPb 钎料焊点拉伸断口形貌

断口形貌分析是研究材料断裂机理的重要方法，通过分析断口的种类和特点可以进一步阐明材料的力学性能变化。不同辐照剂量下，Sn63Pb37 焊点拉伸断口的形貌如图 8 所示。图 8a~8c 为 QFP 器件焊点拉伸

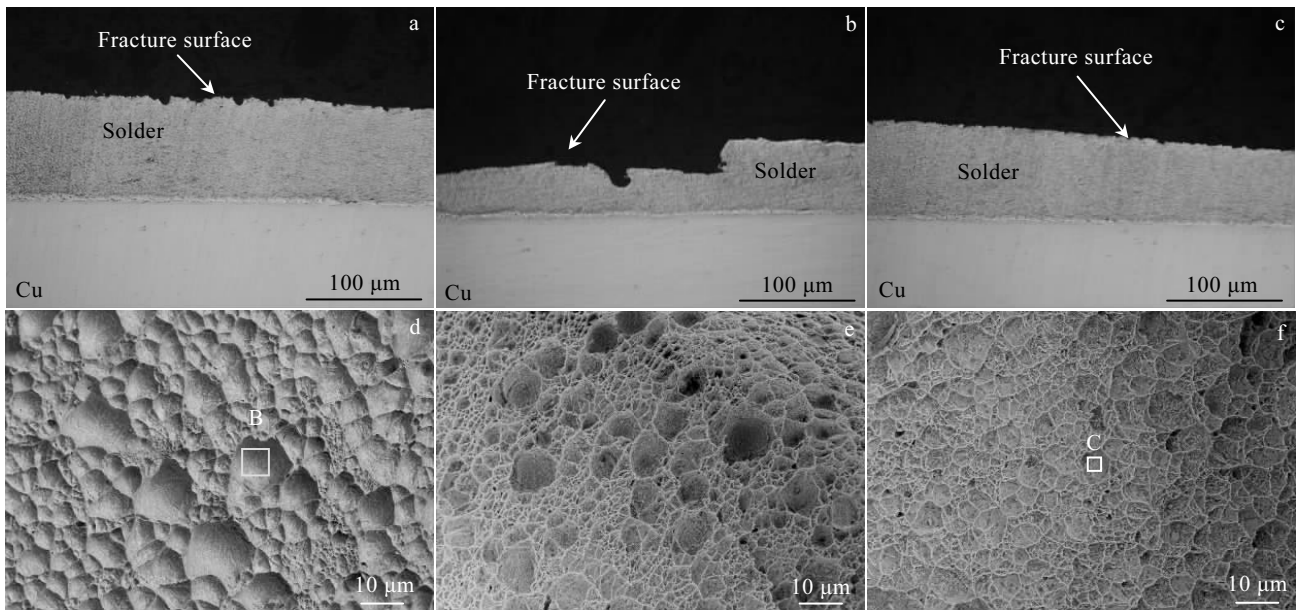


图 8 不同辐照剂量下 SnPb 共晶钎料焊点拉伸断口及截面组织

Fig.8 OM images (a-c) of fracture cross section and SEM images (d-f) of fracture morphologies of eutectic SnPb solder joints after irradiation with different radiation doses: (a, d) 0 kGy, (b, e) 432 kGy, and (c, f) 964 kGy

表 1 图 8 中区域 B 和 C 的 EDS 能谱分析结果
Table 1 EDS results of region B and C in Fig.8 (at%)

Region	Sn	Pb	Cu
B	68.56	30.76	0.68
C	66.39	32.82	0.79

断口的横截面组织。可以看出，辐照前后焊点的断裂发生在钎料内部。

焊点拉伸断口形貌的 SEM 二次电子像如图 8d~8f 所示。在 3 种辐照剂量下，焊点拉伸断口均呈现拉伸开裂的韧窝形态，表明在 γ 射线辐照前后，SnPb 共晶钎料焊点的断裂方式均为韧性断裂。对韧窝底部区域 B 和 C 进行 EDS 分析，结果如表 1 所示。经过 0 Gy 和 964 kGy 剂量的 γ 射线辐照后，焊点拉伸断口韧窝底部几乎没有 Cu 元素，这与断口横截面观察的结果相一致，因此辐照前后焊点断裂位置均为钎料内部。除此之外，从图 8d~8f 可以看出，辐照前电子器件焊点断口中的拉伸韧窝大而深，尺寸也较为均匀，因此焊点塑性良好。但随着辐照剂量的增加，焊点断口的韧窝的尺寸和深度均趋于减小，说明 γ 射线辐照后焊点塑性有所降低。 γ 光子通过康普顿效应激发高能电子，进而产生了晶格空位、间隙原子等点阵缺陷。这些点阵缺陷的存在使得钎料的韧/脆转变温度向高温区移动，引起了辐照脆化效应^[19]。高剂量的 γ 射线辐照使得焊点组织内积累了一定量的点缺陷，降低了 Sn63Pb37/Cu 焊点的塑性。

3 结 论

1) 采用 ⁶⁰Co- γ 源部分模拟研究了太空辐射环境对 SnPb 共晶钎料焊点的组织和性能的影响，发现 γ 光子可以通过康普顿效应激发高能电子，进而导致 Pb 原子离位产生“Frankel 缺陷”。随着 γ 射线辐照剂量的增加，缺陷积累量增多，Pb 基固溶体中有微孔洞和微裂纹产生。

2) γ 射线辐照会降低 Sn63Pb37 钎料焊点的力学性能。辐照剂量达到 964 kGy 时，其焊点拉伸力降低了 14.12%；同时辐照前后焊点的断裂方式均为韧性断裂，且断裂位置均在钎料内部，但辐照后焊点塑性有所降低，断口韧窝尺寸和深度均明显减小。

参考文献 References

[1] Li Xingxing, Zhang Xiaohong, Ren Xiaodong *et al. Scientific Reports*[J], 2015, 5: 8328
[2] Rufu Raluca, Canup Robin M. *The Astronomical Journal*[J],

2017, 154(5): 208
[3] Zhang Xiaoming(张小明), Cai Xiaomei(蔡小梅), Wang Hui (王 晖) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S2): 392
[4] Sandau Rainer, Brieß Klaus, Errico Marco D. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*[J], 2010, 65(6): 492
[5] Chin Keith B, Brandon Erik J, Bugga Ratnakumar V *et al. Proceedings of the IEEE*[J], 2018, 106(3): 419
[6] Bagenal F, Horányi M, McComas D J *et al. Science*[J], 2016, 351(6279): 9045
[7] Tor-Arne Grönland, Pelle Rangsten, Martin Nese *et al. Acta Astronautica*[J], 2007, 61(1-6): 228
[8] Wang Jianan(王健安), Xie Jiazhi(谢家志), Lai Fan(赖 凡). *Microelectronics*(微电子学)[J], 2014, 44(2): 225
[9] Zhang Keke(张柯柯), Guo Xingdong(郭兴东), Wang Huigai (王悔改). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(5): 1353
[10] Tai Feng(郜 枫), Ma Limin(马立民), Guo Fu(郭 福) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(S1): 190
[11] Chang Yuanwei, Cheng Yin, Xu Feng *et al. Acta Materialia* [J], 2016, 117: 100
[12] Ding Lili, Simone Gerardin, Marta Bagatin *et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*[J], 2015, 796: 104
[13] Wang Lei, Tang Jieying, Huang Qing'an. *Sensors & Actuators A Physical*[J], 2012, 177: 99
[14] Kwon Junhyun, Motta Arthur T. *Annals of Nuclear Energy*[J], 2000, 27(18): 1627
[15] Tian Shuang, Wang Fengjiang, Wang Xiaojing *et al. Materials Letters*[J], 2016, 172: 153
[16] Wang Jianhao, Xue Songbai, Lv Zhaoping *et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2018, 29(24): 20726
[17] Wu Shi(吴 石), Wang Dongjie(王东杰), He Xinfu(贺新福) *et al. Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术)[J], 2017, 51(1): 150
[18] Kumar S P, Umesh T K. *Applied Radiation and Isotopes*[J], 2010, 68(12): 2443
[19] Li Zhengcao(李正操), Chen Liang(陈 良). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(11): 1285

Microstructure and Mechanical Properties of Eutectic SnPb Solder Joints Subjected to γ -ray Irradiation

Wang Jianhao, Xue Songbai, Lv Zhaoping

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To understand the microstructure and property evolution of solder joints in cosmic irradiation environment and to meet the reliability demand of solder joints used on satellites, the effect of γ -ray irradiation on the microstructure, mechanical properties and fracture morphology of eutectic SnPb solder joints was investigated. The results show that after γ -ray irradiation, the generation of micro-voids and micro-cracks in Pb-based solid solution are observed due to the accumulation of irradiation damages. Energetic electrons induced by γ photon through Compton Effect could knock Pb atom out and form point defect, which is the cause of micro-voids and micro-cracks. After 964 kGy irradiation, the tensile force of the eutectic SnPb solder joints decreases by 14.12%. Moreover, the analysis of fracture morphology shows that the fracture of the eutectic SnPb solder joints before and after γ -ray irradiation are all ductile, but the plasticity of eutectic SnPb solder joints decreases with unobvious dimples.

Key words: cosmic irradiation; eutectic SnPb solder; microstructure; mechanical properties; fracture morphology

Corresponding author: Xue Songbai, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China, Tel: 0086-25-84896070, E-mail: xuesb@nuaa.edu.cn