

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.11.010

可焊性锡镀层失效机理分析与对策

宋 键¹, 万传云^{1*}, 申 薰²

(1. 上海应用技术大学 化学与环境工程学院, 上海 201418; 2. 无锡鼎亚电子材料有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 锡具有良好的延展性、导电性、焊接性, 常作为可焊性镀层广泛用于电子焊接行业。在应用过程中, 镀层的变色、晶须生长及焊接性能的下降逐步成为人们关注并需要及时解决的技术问题。简要分析了可焊性锡镀层性能失效机理, 从电镀工序角度对提高镀层性能稳定的解决策略进行了梳理, 并对镀锡层的质量控制技术方向进行了展望。

关键词: 锡层; 晶须生长; 可焊性; 失效机理

中图分类号: TQ153.11

文献标识码: A

Failure mechanism analysis and solutions of solderable tin coating

Song Jian¹, Wan Chuanyun^{1*}, Shen Xun²

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 2. Dingya Electronic Materials Co. Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: Owing to its good ductility, conductivity and solderability, tin coating is widely used in electronic welding industry as a solderable coating. In practical application, the discoloration of tin coating, whisker growth and solderability reduction have become technical problems that need to be paid attention and to be solved. The failure mechanism of solderable tin coating is briefly analyzed, and the strategy to improve the stability of tin coating is given from the perspective of electroplating process. The development trend of control technology for tin coating quality is prospected.

Keywords: tin coating; whisker growth; solderability; failure mechanism

锡是一种银白色金属, 具有良好的可焊性和延展性, 在汽车、电子器件、集成电路等行业得到广泛应用。在集成电路的电子焊接行业, 通常会在元器件引脚上电镀一层可焊性锡镀层来提高电子器件的焊接性能, 且目前可焊性镀锡层的应用具有必需性和不可替代性, 镀锡层的品质对半导体芯片的性能影响比较突出。随着集成电路不断朝着小型化、精密化发展, 电子焊接对锡焊接和镀层的性能要求越来越高。

虽然锡的化学稳定性好, 但长期裸露在外, 表面容易变灰变黄, 导致产品焊接性能下降, 产生虚焊、少焊、空焊等质量缺陷, 如果电子器件的引脚处焊接不良; 在通电工作时, 元器件则会异常发热, 从而引发安全事故^[1]。锡晶须是锡层或锡合金层在使用过程出现的另一类镀层变质的外观表现, 它具有导电性, 能够负载较高的电流(可达 10~50 mA), 晶须的产生很容易造成小型化、精密化的集成电路短路^[2]。因此, 可焊性锡镀层的变色、晶须生长及可焊性降低

收稿日期: 2023-03-07

修回日期: 2023-04-03

作者简介: 宋键(1998—), 男, 硕士研究生, email: 15618275158@163.com

*通信作者: 万传云, email: cywan@sit.edu.cn

导致的锡层功能失效一直是困扰电子行业的技术问题。本文针对这些问题,尝试对引起问题的原因进行分析,同时对目前的改进方法进行归纳和总结,以期对该领域的研究提供参考。

1 可焊性镀锡层失效现象及原因

镀锡层的失效是外观和功能失效的综合,不仅与锡自身的特性有关,也与镀锡层的制备条件、储存及应用环境有很大关系。

1.1 锡层的变色

可焊性锡层的失效很多都是从观察到锡层的颜色改变开始的,大量的理论和实践结果表明影响锡层变色的环节很多,虽然有学者认为镀液中有机添加剂在镀层中的夹杂使镀层中含有不同程度的有机物质^[3],该有机物质会通过毛细作用从镀层的孔隙迁移至表面,氧化聚集成膜,造成锡层泛黄变色,但更多的证据表明湿度和温度共同作用下的锡层氧化是促使变色加速的主要动因^[4]。锡层长时间暴露在空气环境中,空气中酸性气体和氧化性气体如 O_2 、 CO_2 、 NO_2 、 SO_2 等会与空气中的水分作用生成带有腐蚀性的电解质,该电解质在高温下可以加速镀锡层的氧化,把 Sn 氧化成 Sn^{2+} ,生成 SnO 、 SnS 等泛黄色产物,致使镀层表面变色,严重时可以进一步变成 SnO_2 类氧化物。这些物质的存在不仅使锡层的颜色发生改变,同时会影响镀层的可焊性。

1.2 晶须的生长

晶须是从锡层表面生长出来的一种单一锡晶,常见的锡晶须呈直线形、弯曲形、扭结形等形状,其外表有不规则的条纹,直径通常在 $1\ \mu m \sim 3\ \mu m$,长度在 $1\ \mu m \sim 1\ mm$,最长可达 $9\ mm$ 。自上世纪 40 年代锡晶须被首次报导,人们相继提出了“位错理论”^[5-6]、“再结晶理论”^[7-8]、“活性锡原子理论”^[9-10]、“氧化层破裂理论”^[11-12]、“氧化体积膨胀理论”^[13-14]、“V”形晶须晶粒形成机制^[15]、“滑动-扩散蠕变机制”^[16-17]等多种理论来解释晶须的生长机制,不过目前较为主流的是“压应力理论”^[18-19]:认为锡晶须的生长主要是因为镀层受到压应力的作用导致镀层龟裂而产生晶须生长点和生长能量。在铜上镀锡时,铜的扩散在铜基体与锡镀层之间的结合处产生 Cu_6Sn_5 和 Cu_3Sn 等金属间化合物^[20],这些物质与基材之间的热膨胀系数差异容易导致镀层龟裂,且铜元素扩散到锡的晶粒边缘形成了张应力区域,张应

力导致锡层内部产生应力差,促进锡晶须的生长^[21]。然而 Fisher 等人^[22]对电镀锡板施加不同水平的外压应力,证明了压应力可以提高晶须的生长速率,但有学者研究发现 Cu_6Sn_5 对锡晶须生长影响不大^[23]。总体而言,至今没有任何理论可以完整解释锡晶须的生长,还需要更加深入研究锡晶须的生长行为及相关机制,才有可能找到准确合适、且能被广泛接受与认可的锡晶须生长机理^[24]。

1.3 锡层可焊性降低

锡镀层是电子元器件电路有效结合的一种重要镀层,镀层的焊接性能在很大程度上决定了电子产品的整体质量。锡层长时间暴露在外或保管不善等原因,表面易沾染油污或生成氧化膜等杂质,有学者^[25-26]认为镀层中的光亮剂组分和镀层孔隙中残留的杂质也会在长时间的存储过程中慢慢通过毛细作用迁移到表面,与空气中的水分接触,生成氧化物等污染镀层表面的杂质;此外,高存储温度会加速上述过程的发生,导致氧化膜增厚,这些都会降低锡镀层的附着能力,恶化锡层的焊接能力。同时,肉眼可见的变化就是温度越高,锡层表面的颜色加深。而且由于工艺操作不当等原因会造成镀层内结晶异常、晶格缺陷,也会降低镀层的附着能力和锡层的可焊性^[27]。

2 改善策略

可焊性锡层功能失效对其应用的可靠性带来风险,失效原因的来源决定了其问题的解决是个系统工作,可以从以下几个方面进行考虑。

2.1 镀前管控

电镀锡的过程包括镀前处理、电镀和镀后处理三个主要环节。镀前处理不当直接影响着镀层的可焊,也是导致变色的间接原因,因此显得尤为重要^[28-29]。工件上的锈迹、碎屑、灰尘等污染物,以及机械加工、制造成型过程中的拉延油、润滑油、淬火油、防锈油、碎屑等残留物都需要在电镀之前彻底清洗,这些物质如若去除不彻底,将会污染镀槽、镀液,直接导致镀锡不良,降低产品优良率。基材表面的氧化膜也需要利用酸洗等方法去除,酸液和氧化物反应可生成可溶性的盐类,使金属表面的晶格显露并处于活化状态,并在电镀时与镀液充分接触,生成优质的镀层。

2.2 电镀管控

2.2.1 工艺管控

在电镀环节,合适的电镀参数对控制电镀锡层的质量很重要。有研究表明:大电流下得到的镀锡层会增加镀层应力,促使锡晶须生长^[30-31]。脉冲的引入可明显减少杂质微粒与锡共沉积,提高镀层的纯度,增强锡层的耐高温和抗氧化能力,提高镀层可焊性^[32]。镀层厚度增加导致晶粒尺寸变大,能够提供更多的应力消除空间和时间来释放应力,延缓锡晶须的生成^[33-34]。另外,为了获得所需的锡镀层和改善锡镀液性能,在电镀或化学镀工艺中都需要加入一定的添加剂(稳定剂、还原剂、表面活性剂、光亮剂等^[35]),然而添加剂因吸附而引起的夹杂可能使镀层在温度、湿度等环境因素影响下氧化显色,致使镀层变色,因此在选择添加剂时,应避免采用有色或易氧化显色的组分^[36-37]。目前通过电镀能够得到光亮锡、半亮锡和雾锡等不同外观的锡层。亮锡配方中含有光亮剂,光亮剂成分遗留在镀层中会导致锡层变色^[21]。相对于亮锡,半亮锡和雾锡表面发白,具有更好的焊锡性和导电性。考虑到产品总成本及后续防变色及可焊性的需求,对镀锡层没有光亮外观要求时,优选雾锡或半光亮锡。水洗在电镀环节也起着非常重要的作用,也是每个工艺环节完成后所必须进行的一道工艺。每一次水洗不充分、不彻底,都有可能对镀层造成缺陷或危害,如产生麻点、针孔,致使表面附着力变差,镀层可焊性降低、易变色等。

2.2.2 镀层结构设计

(1)建立中间阻挡层研究发现,在铜基材镀锡时,预镀一层Ni、Ag或Ni-P层作阻挡层可避免或减缓Cu/Sn界面反应速度、减小应力、抑制锡晶须^[38-40]。Xu等^[41]发现镍层的存在有助于改变锡镀层中的应力状态,从残余压缩应力变为残余拉伸应力,同时发现预镀层能够缩小基体和镀层之间的热膨胀系数,降低锡晶须生长的可能性。在高温环境中,Ni-P层中的磷可以快速扩散到表层与氧发生氧化还原反应,延缓锡的变色,但为了避免出现磷富集现象,影响焊接强度,镀层中的磷含量控制在5%~9%之间^[42]。Yen等人^[43]给出低磷方案,利用Ni-P/Ni双层结构沉积在Cu衬底上,取得了比单层Ni更好的抑制作用,该措施对高温回流焊和波峰焊后镀锡层结合力改善有明显效果^[44]。

(2)应用镀锡合金层相对于纯锡,锡合金可以抑

制或减缓的生长,是改善锡的可焊性的有效途径^[45]。最早使用的Sn-Pb合金可以降低Sn和Cu之间IMC(主要是 Cu_6Sn_5)的生长速率,能大大降低锡晶须的生长^[46]。然而,工业无铅化的技术要求促使更多的合金出现以替代Sn-Pb合金。Sn-Ce合金具有抗氧化、化学稳定好的特点,Ce可以阻止Sn和Cu之间生成不可焊的合金扩散层^[47],明显提高镀层可焊性,然而镀液乳状浑浊、镀层易变色,导致可焊性下降;Sn-Ag合金镀层性能优良,Ag含量为3.5%时形成共晶点^[48],具有电阻小、硬度高、耐蚀好和良好可焊性等优点,然而其熔点偏高,致其润湿性降低,且成本较高;Sn-Cu合金具有低成本、低毒性、沉积速度快、镀层可焊性好等特点,在Cu含量为0.1%~2.5%时,可以替代Sn-Pb合金,但其抗蠕变性差、润湿性差,低含量的Cu(含量低于0.1%)抑制锡晶须产生能力低,高Cu含量(高于2.5%)的镀层则因为熔点过高(超过300℃)难以焊接^[49];Sn-Zn合金镀层虽然耐蚀性较好,但焊接润湿性较差,特别容易被氧化^[50];Sn-Bi合金具有共熔点低、润湿性优良、耐蚀性好等优点,然而Bi是脆性金属,合金镀层的耐热疲劳性和延展性随着Bi含量增加而下降,在镀层表面机械加工时容易发生断裂。因此,二元锡合金替代纯锡层和Sn-Pb的能力有限。Sn-Ag-Cu合金是在Sn-Ag合金基础上添加Cu形成的三元合金,与Sn-Ag和Sn-Cu二元合金相比,三元合金在机械性能、润湿性、回流焊及可靠性方面表现优异,是目前世界公认的低铅焊料^[51-53],其中Sn-3.0Ag-0.5Cu三元合金因其低熔点和优良的润湿性能被广泛的用于电子产品行业。

2.3 镀后处理

镀后处理作为最后环节对镀锡成品的寿命、存储和使用有着决定性的作用;同时,也可以一定程度上缓解或修复镀锡环节的问题。后处理方式有软熔、退火、涂敷保护层在内的钝化等。

软熔是指在热作用下,使锡镀层和基材表面形成合金层,同时修复电镀过程中的晶格缺陷,消除镀层表面的孔隙,制造金属光泽,提高镀层的结合力和耐蚀性^[54]。可以通过适当增加软熔时间来增大合金的晶粒尺寸和合金层的厚度^[55-56],以进一步提高镀层耐蚀性能、减小应力,抑制锡晶须的生长并形成可靠的焊点。

退火是指将金属缓慢加热到一定的温度,保持

足够时间后逐步冷却的一种金属热处理工艺,目的是细化镀层晶粒,消除镀层内残余应力、降低镀层硬度、增强表面机械性能。研究表明,可以同时增加镀层中的 Cu_6Sn_5 金属间化合物的含量,提高镀层致密性,减少镀层孔隙,抑制或延缓锡晶须的生长^[57-58]。

钝化主要是通过固相成膜或在金属表面通过吸附作用生成一层完整致密的隔离膜或一层有机单分子薄膜来隔离环境中水汽和氧气,提高镀层的稳定性^[59]。钝化处理的优点在于不改变产品厚度和颜色的同时,降低镀层变色、锡晶须生长的可能性。钝化液体分为无机钝化体系和有机体系。无机钝化体系是无机盐类物质,可以在锡层表面发生反应,生成具有隔离作用的钝化成膜来防护和提高锡层的耐蚀性^[60]。有机体系中有有机分子可以与金属离子形成配合物,在表面形成致密的单分子转化膜,阻挡腐蚀介质与金属表面接触,从而起到抑制腐蚀的作用^[61]。目前钝化液以无机—有机混合体系为主,这其中以有机可焊剂(OSP)为代表的新型后处理保护剂为主流。第一代OSP是以苯并三氮唑(BTA)为主的体系,人们通过研究BTA与无机物、有机物等复配来提高镀层的焊接性能和耐蚀性能。第二代和第三代OSP由于不耐高温和易使镀层变色已被淘汰。目前普遍流行的OSP是以日本四国化成Gliccoat-SMD F2系列^[62]、美国乐思化学Entek Plus HT系列^[63]为代表的以烷基苯并咪唑产品为主的第四代OSP体系。第四代OSP基本满足镀层的耐蚀和耐焊性能,然而高昂的成本、复杂的技术促使人们不断创新,以四国化成公司的苯基苯并咪唑体系为主的第五代OSP逐步成为新的热点。

2.4 产品的存储和使用

产品在存储时,相对湿度达到60%~70%即达到腐蚀的临界条件,当表面有污染物存在时,腐蚀的临界条件还会进一步下降^[64]。因此严格控制锡产品的相对湿度,保持一定干燥度非常必要。生产出的镀锡产品应立即用不易吸潮的包装纸带打包,如保鲜膜、牛皮纸、淋膜纸带等,避免长时间存储,造成产品氧化,导致焊接不良和金属浪费。王先锋等^[24]认为锡产品表面的划痕也会促进锡晶须的生长,因此在使用锡产品时尽量避免在镀层表面过多的划痕。此外,由于电子装置使用环境的多样化程度不断扩大,导致电子装置中的有机材料在一定的条件下可能会分解产生腐蚀气体,如果这些气体溶解到锡层表面

的液膜中,会形成腐蚀性离子或电解质,加速锡及其合金的腐蚀进程,因此要避免锡产品存储和使用中接触到这些腐蚀性气体^[65]。

综上所述,合理的镀前处理、合适的电镀工艺及合理的镀层组成均有利于改善镀锡层的可焊性及其寿命。镀后锡表面的防护处理可以有效延缓镀锡层功能失效,镀锡件合理的储存和使用过程也会对其寿命产生有利影响。

3 总结与展望

本文以人们较为关注的锡变色、锡晶须、锡可焊这三大方向为切入点,梳理了可焊性镀锡层性能失效的原因。从可焊性镀锡层的生产流程角度,对现有的改进方法和应对措施加以归纳总结。发现可焊性镀层质量的控制贯穿在镀锡生产的全过程,且配方的选择、工艺的细节等均对可焊性锡镀层的质量有重要影响。目前,人们在改进可焊锡层电镀技术的同时,也在寻找环保、无毒、成本可控且又可以完全代替铬化膜的后处理技术。

参考文献

- [1] Huang C M, Nunez D, Coburn J, et al. Risk of tin whiskers in the nuclear industry[J]. *Microelectronics Reliability*, 2018, 81: 22-30.
- [2] 王先锋, 贺岩峰. 锡须生长机理的研究进展[J]. *电镀与涂饰*, 2005(8): 49-51.
- [3] 贺岩峰, 孙江燕, 张丹. 无铅纯锡电镀中的若干问题[J]. *电子工艺技术*, 2007(1): 20-23, 27.
- [4] 李立清, 杨丽钦. 锡镀层变色原因初探[J]. *腐蚀与防护*, 2007(11): 593-594.
- [5] Peach Milton O. Mechanism of growth of whiskers on cadmium[J]. *Journal of Applied Physics*, 1952, 23(12): 1401-1403.
- [6] Eshelby J D. A tentative theory of metallic whisker growth[J]. *Physical Review*, 1953, 91(3): 755-756.
- [7] Ellis W C, Gibbons D F, Treuning R C. Growth of metal whiskers from the solid, growth and perfection of crystals [M]. New York: John Wiley & Sons, 1958: 102-120.
- [8] Vianco P, Rejent J. Dynamic recrystallization (DRX) as the mechanism for Sn whisker development. Part I: A model[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38 (9): 1815-1825.
- [9] Xian A P, Liu M. Observations of continuous tin whisker growth in NdSn_3 intermetallic compound[J]. *Journal of*

- Materials Research, 2009, 24(9): 2775-2783.
- [10] Liu M, Xian A P. Spontaneous growth of whiskers on RE-bearing intermetallic compounds of Sn-RE, In-RE, and Pb-RE[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1-2): 590-596.
- [11] Tu K N. Irreversible processes of spontaneous whisker growth in bimetallic Cu-Sn thin-film reactions[J]. Physical review B, 1994, 49(3): 2030.
- [12] Lau J H, Pan S H. 3D nonlinear stress analysis of tin whisker initiation on lead-free components[J]. Journal of Electronic Packaging: Transactions of the ASME, 2003, 125(4): 621-624.
- [13] Barsoum M W, Hoffman E N, Doherty R D, et al. Driving force and mechanism for spontaneous metal whisker formation[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(20): 206104.
- [14] Dudek M A, Chawla N. Mechanisms for Sn whisker growth in rare earth-containing Pb-free solders[J]. Acta Materialia, 2009, 57(15): 4588-4599.
- [15] Galyon G. Whisker formation concepts-the end game[J]. Transactions on Components, 2011, 1(7): 1098-1109.
- [16] Smetana J. Theory of tin whisker growth: "the end game" [J]. Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2007, 30(1): 11-22.
- [17] Boettinger W J, Johnson C E, Bendersky L A, et al. Whisker and hillock formation on Sn, Sn-Cu and Sn-Pb electrodeposits[J]. Acta Materialia, 2005, 53(19): 5033-5050.
- [18] Jadhav N, Buchovecky E, Chason E, et al. Real-time SEM/FIB studies of whisker growth and surface modification[J]. Packaging and Manufacturing Technology, 2010, 62(7): 30-37.
- [19] Galyon G T, Palmer L. An integrated theory of whisker formation: The physical metallurgy of whisker formation and the role of internal stresses[J]. Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2005, 28(1): 17-30.
- [20] Lee B Z, Lee D N. Spontaneous growth mechanism of tin whiskers[J]. Acta Materialia, 1998, 46(10): 3701-3714.
- [21] 施文洁, 陈燕秀, 黄仿元, 等. 锡后处理对锡晶须生长的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(1): 128-130.
- [22] Fisher R M, Darken L S, Carroll K G. Accelerated growth of tin whiskers[J]. Acta Metallurgica, 1954, 2(3): 368-373.
- [23] Fujiwara K, Ohtani M, Isu T, et al. Interfacial reaction in bimetallic Sn/Cu thin films[J]. Thin Solid Films, 1980, 70(1): 153-161.
- [24] 王先锋, 贺岩峰. 抑制锡须的方法[J]. 电镀与涂饰, 2007(6):30-32.
- [25] 孙红旗, 孙江燕, 贺岩峰. 高速纯锡镀层回流焊变色原因和控制对策[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(15): 808-811.
- [26] 董昌林. 电子连接器表面锡层高温焊接变色原因分析[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(13): 696-700.
- [27] 谢康, 潘廷龙, 石蔚春. 谈影响半导体器件引线可焊性的因素[J]. 海峡科技与产业, 2018(4): 96-97, 100.
- [28] 肖鑫. 锡镀层变色的原因分析及解决[J]. 电镀与涂饰, 2002(4): 56-58.
- [29] 方国富. 镀锡可焊性研究[J]. 世界有色金属, 2020(20): 31-32.
- [30] Liu S H, Chen C, Liu P C, et al. Tin whisker growth driven by electrical currents[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(12): 7742-7747.
- [31] Fukuda Y, Osterman M, Pecht M. The impact of electrical current, mechanical bending, and thermal annealing on tin whisker growth[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(1): 88-92.
- [32] 孟跃辉, 林乐耘, 崔大为, 等. 脉冲参数对可焊性镀锡层性能的影响[C]//中国材料研究学会青年委员会. 第十届全国青年材料科学技术研讨会论文集(C辑), 科学出版社, 2005: 333-336.
- [33] Chason E, Jadhav N, Pei F, et al. Growth of whiskers from Sn surfaces: Driving forces and growth mechanisms [J]. Progress in Surface Science, 2013, 88(2): 103-131.
- [34] Toben M. Tin whiskers in electrodeposits: An overview of the mechanisms that drive their growth[C]//Proceedings of AESF Annual Technical Conference. American Electroplaters & Surface Finishers Soc Inc, 2001.
- [35] 高箫遥, 王守绪, 陈苑明, 等. 硫酸盐光亮镀锡添加剂的研究[J]. 电镀与环保, 2019, 39(4): 20-23.
- [36] Walsh F C, Low C T J. A review of developments in the electrodeposition of tin[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 288: 79-94.
- [37] 黄草明. 光亮剂对印制电路板低温硫酸盐化学镀锡的影响[J]. 材料保护, 2017, 50(12): 59-62.
- [38] Dimitrovska A, Kovacevic R. Mitigation of Sn whisker growth by composite Ni/Sn plating[J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(12): 2516-2524.
- [39] Horvath B, Illes B, Harsanyi G. Investigation of tin whisker growth: The effects of Ni and Ag underplates [C]//International Spring Seminar on Electronics Technology, IEEE, 2009: 1-5.

- [40] Panashchenko L, Osterman M. Examination of nickel underlayer as a tin whisker mitigator[C]//Electronic Components and Technology Conference, IEEE, 2009: 1037-1043.
- [41] Xu C, Zhang Y, Fan C, et al. Driving force for the formation of Sn whiskers: compressive stress-pathways for its generation and remedies for its elimination and minimization[J]. Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2005, 28(01): 31-35.
- [42] 高官荣, 侯海昌, 龙安. 电子电镀中电镀纯锡层相关质量问题探究[J]. 机电元件, 2022, 42(5): 32-37.
- [43] Yen Y W, Liou W, Jao C. Investigation of interfacial reactions and Sn whisker formation in the matte Sn layer with NiP/Ni/Cu and Ni/Cu multilayer systems[J]. Transactions on Components, 2011, 1(6): 951-956.
- [44] Lin Y W, Lai Y S, Lin Y L, et al. Tin whisker growth induced by high electron current density[J]. Journal of Electronic Materials, 2008, 37(1): 17-22.
- [45] Brusse J, Ewell G, Siplon J. Tin whiskers: Attributes and mitigation[J]. Carts Europe, 2002, 16: 67-80.
- [46] 李芳, 李才巨, 彭巨擘, 等. 锡锌系无铅钎料合金化研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(13): 195-204.
- [47] 王庆良. 稀土在材料表面处理技术中的应用[J]. 表面技术, 1995(5): 5-8, 49.
- [48] Bui Q V, Nam N D, Noh B I, et al. Effect of Ag addition on the corrosion properties of Sn-based solder alloys[J]. Materials and Corrosion, 2010, 61(1): 30-33.
- [49] 史建卫. 无铅化 PCB 表面材料及工艺特点[J]. 电子工艺技术, 2011, 32(5): 306-313.
- [50] Pietrzak K, Grobelny M, Makowska K, et al. Structural aspects of the behavior of lead-free solder in the corrosive solution[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(5): 648-654.
- [51] Wang M, Wang J, Ke W. Corrosion behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead-free solder joints[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 73: 69-75.
- [52] Tu X, Yi D, Wu J, et al. Influence of Ce addition on Sn-3.0Ag-0.5Cu solder joints: Thermal behavior, microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 698: 317-328.
- [53] Liao B, Cen H, Chen Z, et al. Corrosion behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu alloy under chlorine-containing thin electrolyte layers[J]. Corrosion Science, 2018, 143: 347-361.
- [54] Zumelzu E, Cabezas C. Observations on the influence of microstructure on electrolytic tinplate corrosion[J]. Materials Characterization, 1995, 34(2): 143-148.
- [55] 黄久贵, 李宁, 蒋丽敏, 等. 软熔条件对镀锡板合金层组织及其耐蚀性的影响[J]. 上海金属, 2004(3): 19-22.
- [56] Van Haastrecht G C, Miedema J, Hoogovens Groep B V. A mathematical model of the reflow process during tin-plating[C]//Fifth International Tinplate Conference. The International Tin Research Institute. London. 1992, 10: 99.
- [57] Galyon G T. Annotated tin whisker bibliography and anthology[J]. Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2005, 28(1): 94-122.
- [58] Kim K S, Kim J H, Han S W. The effect of postbake treatment on whisker growth under high temperature and humidity conditions on tin-plated Cu substrates[J]. Materials Letters, 2008, 62(12-13): 1867-1870.
- [59] 查全性. 金属钝化理论的进展[J]. 化学通报, 1963(11): 15-19, 5.
- [60] Rehim S, Hassan H H, Mohamed N F. Anodic behavior of tin in maleic acid solution and the effect of some inorganic inhibitors[J]. Corrosion Science, 2004, 46(5): 1071-1082.
- [61] 刘仁辉, 刘斌斌, 喻玺, 等. 黄铜表面植酸钝化膜耐蚀性及其成膜机理[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 197-202.
- [62] Carano M. Gliccoat SMD organic solderability preservatives[J]. Technical Bulletin Gliccoat SMD F2 and F2LX, 2004, 20: 1-4.
- [63] Pas F V D. New highest reliable generation of PWB surface finishes for lead-free soldering and future applications[C]//European Institute of Printed Circuits, Stockholm, June, 2005.
- [64] Mansfeld F, Kenkel J V. Electrochemical measurements of time-of-wetness and atmospheric corrosion rates[J]. Corrosion, 1977, 33(1): 13-16.
- [65] 樊阳文, 尹东海, 闫明, 等. 腐蚀性气体对金属镀层的影响[J]. 装备制造技术, 2018(7): 97-99.