

电子工业中电沉积金镀层的应用与发展

朱晶^{1,2}

(1.北京国际工程咨询有限公司, 北京 100055; 2.北京半导体行业协会, 北京 100191)

摘要: 金镀层具有良好的导电性、耐腐蚀性、稳定性等特点, 在半导体、集成电路、电子元器件产品等方面具有重要的应用价值。随着电子产品零件表面镀金的重要性日益提升, 国内外一直在提高镀金工艺技术的稳定性、镀层功能性方面进行了大量研究, 而且在多种电子工业产品中的关键镀金技术研究方面开展的工作也越来越深入。从不同的角度综述了目前电子及相关行业中应用电镀金层及电镀金技术的情况, 探讨了电镀金层及电镀金技术在电子工业领域的应用进展, 分析了在不同基体材料表面沉积金层的技术(如制作薄膜基板的导带、线路板的接地通孔及上下层互连通孔、键合点、焊盘及空气桥等), 介绍了镀金层的主要功能(如抗变色和抗化学腐蚀性能, 低的接触电阻和导电性, 高温下的抗氧化性能, 贮存过程中的焊接性能, 物理、机械性能等)。对电子行业现代化带动镀金技术的发展与需求, 提出了开发和应用无氰镀金技术以及学科交叉对促进镀金技术发展的趋势, 肯定了镀金技术对电子领域科技进步的贡献。

关键词: 镀金; 不同基体; 电子工业; 镀金功能

中图分类号: TQ153.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0256-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.041

Application and Development of Gold Plating in Electronic Industry

ZHU Jing^{1,2}

(1.Beijing International Engineering Consulting Co., Ltd, Beijing 100055, China;

2.Beijing Semiconductor Industry Association, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Due to good conductivity, corrosion resistance and good stability, gold plating is of important application value in semiconductors, integrated circuits, electronic component products, etc. As the importance of gold plating technology on electronic products increases, a lot of studies has been done both at home and abroad to improve stability of gold plating process and plating functionality. Moreover, more thorough work has been done to study gold plating technology in various electronic industry products. Application progress of gold plating and gold plating technology in the electronic and related industries was reviewed from different perspectives. The application of gold plating and plating technology in the field of electronic industry was discussed as well. Technologies of depositing gold plating on different substrates were analyzed (such as fabricating conduction band for thin film substrate, grounding through hole as well as upper and lower interconnected hole for circuit board, bonding points, bonding pads, air bridge, etc.). Main functions of the gold plating (resistance to discoloration and chemical corrosion, low electrical conductivity and contact resistance, high temperature oxidation resistance, welding properties after long-term storage, physical and mechanical properties, etc) were introduced. For the development and demand of promoting gold plating technologies being driven by electron industry modernization, it is proposed that development and application of cyanide-free gold plating technologies as well as subject crossing tend to promote development of gold plating technologies. In addition, con-

收稿日期: 2017-11-18; 修订日期: 2017-12-04

Received: 2017-11-18; Revised: 2017-12-04

作者简介: 朱晶(1984—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电子信息、集成电路。

Biography: ZHU Jing (1984—), Female, Master, Research focus: electrical engineering, IC.

tribution of gold plating technologies to technological progress in the field of electronics is affirmed.

KEY WORDS: gold plating technology; different substrates; electronic industry; gold-plating function

电沉积金技术是一项历史悠久的工艺技术,通常零件表面的金层具有瑰丽的色泽而展现出高贵的装饰性^[1],实际上零件表面的金还具有良好的导电性、低而稳定的接触电阻、好的大气稳定性以及高的耐腐蚀性能,被广泛应用于首饰、钟表、工艺装饰品等产品之外的电子工业产品、精密产品制造等行业^[2-8]。如在晶圆制备中,电沉积金就起了很重要的作用,能加厚导电金层、图形互连、作为键合和烧结层等^[4]。超精密车削镍磷合金层后的极杆制作,也是经过精密的电镀金技术,才能制成高精度陶瓷镀金极杆^[5]。国内外在电子行业应用镀金技术比比皆是,例如航空航天产品的集成电路、继电器和电连接器等元器件与装置等^[6-10]。另外电传输装置的滚环功率/信号传输装置也需要表面镀金,才能达到传输功率大、摩擦力矩小、磨损少、电噪声小、寿命长、储存要求低的要求。

随着电子产品零件表面镀金的重要性日益提升,国内外一直在提高镀金工艺技术(包括化学镀金)的稳定性、镀金层的功能性等方面进行研究^[11-15]。本文将对目前电子应用领域中不同基材上的镀金技术、电化学沉积金的特点与镀金层的主要功能进行研究探讨,另外还展望了电镀金在电子行业的应用前景。

1 电沉积金在电子工业的应用

金是最早使用电源进行镀覆的金属镀层之一。1805 年意大利第一次实现了电镀金。1929 年首次在水溶液中进行镀金和金合金,并有了发明专利。在第二次世界大战期间,装饰镀金技术得到了快速发展,一些工艺品、首饰等零件表面经镀金处理后,外观和品质都得到了很大提升,所以工艺装饰品表面镀金技术应用很广,目的是为了产品表面的装饰与美观^[16]。

现代科技的快速发展进一步拓宽了镀金技术的应用范围,尤其是电沉积金技术在电子、IT 等领域中的作用越来越重要^[17-18],镀金技术在电子行业的应用也就越来越广。通讯雷达的某些零件表面需要镀金层,来防止这些零件表面的导电银层变色,同时表面镀金还可以提高雷达的工作精度等性能。

在日常生活与工作中接触到的大量电子仪器、家电产品、高精装置等电子器件表面,都用了镀金这项技术。有的是利用镀金层纯度高的特点,如在化合物半导体器件制备中,控制表面金镀层的厚度(3~6 μm)非常重要,因为金层厚度直接影响到表面电阻与电子传输,并且金层厚度还会影响加厚耦合线图像信号相位的精度等。保证晶圆片内各管芯性质的均匀一致,

就得严格控制整个圆片上镀金层的厚度均匀性,而控制厚度的均匀性与电沉积金的工艺参数控制有着密切的关系^[4]。另外,利用金与其他金属沉积形成金-钴、金-铜、金-镍等合金镀层,这些微量元素的引入(小于 1wt%),既可以大幅度提高金镀层的表面硬度、耐磨性等,又可以进一步扩大电子器件表面镀金层的应用范围。

从电子产品的设计要求和降低成本的角度考虑,局部镀金工艺越来越多地用于电子产品,如电连接器接触体。局部镀金的电连接器接插件无论是外观质量,还是产品性能,都可以满足产品技术要求,而且电连接器接插件用局部镀金技术还可以节约生产成本(1/3~1/2),具有显著的经济效益。

半导体制造与电子封装技术与生活中接触到的电脑、电视、手机、智能穿戴产品等有很大关系,同时也与我国工业体系中的汽车、飞机、高铁、宇宙飞船、机器人、自动化控制、工业控制系统等密切相关。在半导体制造和电子产品的封装技术中,电沉积金和化学镀金工艺起到了非常关键的作用^[19-20]。一般是在硅片上溅射钛、钛钨合金等作为粘附过渡金属层,然后在其上溅射一层薄金作为电镀导电层,在其上涂覆一层光刻胶,通过光刻显影出电镀所需要的图形表面,然后通过对其清洗,进行电镀金,褪除表面的光刻胶,蚀刻图形以外的薄金导电层,最后进行退火处理完成产品的制备。

电镀金技术在集成电路的制造中也有着广泛的应用,如在驱动 IC 封装中普遍使用镀金凸块,在 CMOS/MEMS 中用电镀金技术制作器件的开关触点和各种微结构。同时可用于高效率功率放大器,通过减小热阻而显示出良好的功率性能^[21]。另外,电镀金层还应用在雷达部件、UBM 阻挡层的保护层以及各种引线等上。

2 电子产品镀金所涉及到的基材范围

具有表面装饰要求的镀金零件的材料主要有铜或铜合金,也有一些在钢或者不锈钢上镀铜、镀镍然后进行电镀金的装饰产品。电子工业产品主要根据使用用途,选择不同的基体材料。如航空电连接器接插件用于屏蔽工况的情况下是铜合金材料镀金,而用于气密封情况下是铁合金表面镀镍再镀金。

在半导体器件的制造中,一些管壳零件的基体材料有很多,有柯伐合金、铜及铜合金(如铍青铜)、镍、陶瓷和玻璃等基材,可通过表面电镀金来获得良

好的抗高温氧化、抗腐蚀性能、抗热压（超声）键合性能^[22]、延展性、点焊密封性、低接触电阻和附着性能等^[23]。还有一些半导体元器件表面镀金^[24]用的基材是稼半导体、硼、磷、铜、铈等元素掺杂的锗和硅，砷化物和硫化锡等，在这些基材表面镀金是为了提高其表面电接触性能、熔焊性能、机械强度以及存储期间的化学稳定性等。集成电路和梁式引线器件常用铂材或钽材，镀金的目的是作为集成电路的互连通道及梁式引线的金属化系统外层等。

随着近代电子技术的发展，特别是高温、高功率、高频电子领域，短波长光电领域的微波、大功率、超小型化集成电路的发展，对于这些不同种类电子陶瓷基材，提出了一系列技术要求，如高机械强度、抗高温高湿性能、抗射线辐射、介质常数在宽范围内调节、介质损耗角的正切值小、电容量变化率可控、陶瓷材料的抗电强度和绝缘电阻值高以及老化性能优异等^[25-27]。这类陶瓷基材的电子产品可能要工作在恶劣的高温环境中，所以还需要特殊的封装工艺。电子陶瓷材料表面的金属化是制备陶瓷电容器、电阻器封装的关键，因此需要在电子陶瓷器件局部表面进行镀铜、镀镍、镀金、镀铂、镀银、镀锡、镀铬等处理，才能实现电子器件表面的焊接和气密性封接等应用。

在陶瓷基材电镀金是陶瓷金属化生产中的关键工艺，如陶瓷镀金极杆是高端四极质量分析器的核心零件，其精度与表面质量要求高，制造难度大。文献[5]介绍了一种“陶瓷基体精密磨削-化学镀镍磷合金-金刚石超精密切削镍磷合金层-电镀金”的工艺，并用此工艺制出了高精度的镀金极杆。

需要注意的是，人们为了改善电子元器件在电镀金前的表面光洁度，通常用预镀铜为底层，镀镍为中间层（阻挡表面金原子的扩散），这有利于电子器件的钎焊操作，并可增强电子器件的耐腐蚀性能。

3 镀金及金合金层的主要功能

随着电子工业的迅速发展，人们对电子产品、集成电路、线路板等产品的表面镀金提出了更高的要求，希望镀金表面有好的抗变色和抗化学腐蚀性能、表面导电性能和低的接触电阻等物理化学性能。

在集成电路小型化、高密度组装化的情况下，电子器件加工制作技术的低成本、高性能和高可靠性就显得非常重要，在这其中，基板、布线密封材料、层间介质材料等低成本电子封装材料等都需要可靠稳定的镀金技术^[28-29]来实现。

集成电路的制造过程是在不同材料、不同图形设计、不同厚度的条件下实现多层薄层相互层叠的过程。制作多层薄膜相互层叠的工艺有多种，但随着集成电路的特征尺寸变小，其性能越来越高，功能

越来越多，用电化学方法制备集成电路金属层（如镀金）的技术应用越来越广，并在电子、微电子等电子工业领域体现出了其他一些薄膜制备方法所不具备的优势与特点。

电子产品的应用实践表明，镀金工艺只有在保证器件表面镀金层的质量前提下，才能体现出电子器件的高性能。如在半导体器件的制造中，无论是管壳电子零件还是半导体元器件的电镀金技术，表面获得的镀金层质量都会直接影响电子产品的性能与功能。

实际上，影响镀金层性能的因素有很多，在镀金过程中混入或加入一些元素，得到金（铜、镍、钴等）合金镀层，从而改变了镀金层的外观、硬度、抗氧化、抗腐蚀及焊接性能等^[30-32]。一般情况下，金层中合金元素的类型与数量不同，其性能会表现出较大差异（见表1）。由表1可知，在金镀层中加入其他金属元素，可以提高镀金层的电阻率和硬度等性能，从而实现不同的应用功能。

表1 金(合金)镀层与纯金镀层的一些基本性能
Fig1. Some basic properties of gold (alloy) plating and pure gold plating

镀层	Au/%	硬度 (HV _{0.025})	电阻率/ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$)	接触电阻/ m Ω
纯金	100	40~90	2.4	0.3
Au-Co	99.5	120~250	15.0	0.6
Au-Ni	99.3	160~200	11.0	0.3
Au-Cu-Cd	72	250~370	10.7~15.0	<10

另外，在半导体材料表面镀金，须选择与镀覆所用其他材料（如光致抗蚀剂）相适应的电镀液体系与工艺，如多用化学镀金技术来实现硅集成电路上的互连通道功能^[3]。

4 电子工业中镀金技术的新进展

镀金技术在印刷线路板等电子行业中得到了广泛应用。随着电子产品的小型化、智能化，对电子器件的功能与相关技术要求越来越高，镀金技术就显得非常重要^[35-40]。在镀金技术应用于电子行业的发展方面，主要有以下几个趋势需要关注。

首先，镀金技术的应用范围不断扩大，对于镀金技术与镀金层的性能要求会越来越高。如在集成电路制作过程中，通过减小元器件的几何特征尺寸，来获得更快的处理速度和更高的互连密度。目前，特征尺寸非常小的元器件，其性能不再取决于器件的尺寸本身，而取决于互连线的延迟时间。IBM公司在1990年就着手开发芯片的电镀铜互连工艺，这是目前电镀铜互连的主要技术。铜布线较铝布线的电阻率低40%，且不易发生电子迁移，提高了器件的可靠性。

除集成电路的铜布线技术外,还有将电镀金技术用于集成电路的互联引线等^[33]。此外,由于高频电路对信号的损失要求特别高^[34],其他表面处理技术造成的损耗比较大,而镀金技术造成的相对信号损耗比较小,所以高频电路都要求进行电镀金^[35-39]。在进入 5G(第五代移动通信)时代后,高频电路将是主流应用产品,也一定会带动对镀金技术的规模化需求。

电镀金技术在厚膜领域的应用通常是在片式元件外部电极的端头进行表面处理,由于多数片式元件的基体是陶瓷材料,其两端的金属化就需要用厚膜沉积工艺进行制作,通常由银和玻璃的烧结体构成陶瓷外部的电极端头底层,为防止银迁移及提高焊接的可靠性,还需要在银电极端头电镀金才能满足应用要求。薄膜混合电路是靠真空沉积等半导体工艺制作金属化基板的混合电路,常用电镀铜、镍和金等来制作薄膜基板的导带、接地通孔、上下层互连通孔、键合点、焊盘及空气桥等结构。另外,印制电路板生产中涉及到的表面处理工艺有:表面脱脂、去孔内壁沾污、活化处理、化学镀铜、直接电镀铜、镀铅-锡合金、铜箔蚀刻、化学镀镍及电镀金等。

目前用于印制电路板电镀技术的发展主要体现在:直接电镀技术代替化学镀铜来实现孔的金属化,用于金丝键合的镀镍和电镀金,用于焊接和铝丝键合的化学镀镍和置换镀金,用于焊接以及金丝、铝丝键合的化学镀镍、置换镀金、化学镀金和化学镀钯等表面技术。因此,在印制电路板生产中所涉及到的这些电镀技术,需要在镀液体系、电镀工艺参数控制等方面给予高度重视。

其次,随着世界各国环保意识的增强,传统电子器件镀金技术使用的含氰镀金溶液和氰化镀金技术不利于环保和清洁生产,所以开发与应用无氰镀金技术是大势所趋^[40]。相信在科技人员的努力和国家清洁生产政策的推动下,性能优良的无氰镀金技术会很快在电子工业的生产中得到应用,在 PCB、集成电路领域中尤其重要。

在传统氰化镀金液中,还原沉积的金主要以 $\text{Au}(\text{CN})_2$ 形式存在,镀液中还有一些游离氰,这些游离氰除了具有剧毒性外,还可能腐蚀线路板的保护层,造成短路隐患。另外,游离氰对于 PCB、集成电路制造中使用的光刻胶也有溶蚀作用。因此,开展无氰镀金技术的研究就显得非常重要^[41]。目前已有部分用于 PCB、集成电路领域的金镀层可由无氰镀金技术得到^[42-43]。无氰镀金技术的关键是镀液体系,未来最有可能应用的有亚硫酸盐镀液^[44],因为通过低毒亚硫酸盐镀液获得的镀金层平滑、光亮、分散能力好。在微电子和光电子领域,亚硫酸盐镀金液表现出一些接近氰化物镀金液的特点,如具有更好的微观分散能力,在硅晶片上得到的镀金层光滑,厚度更均匀。更

重要的是其毒性比较低,对于废液废水的处理要求远远低于氰化镀金,这符合集成电路和 PCB 领域对环保和清洁生产的高要求趋势。

第三个发展趋势是在电子工业中应用镀金技术,它始终受到其他学科发展与技术进步的影响,是一种相互促进的关系。其他学科的进步对电子行业的要求越高,对电镀金技术的要求也就越高。反过来,电子工业及电镀金技术的进步,也会促进其他行业的进步,用于光纤等离子体共振传感器的集成电路,其中就有镀金所起的作用^[45]。无人机、机器人等智能制造的快速发展,局部镀金技术应运而生。另外,镀金技术还被用于 CMOS/MEMS 开关触点^[46]、半导体激光器部件^[47]等。此外,镀金与碳纳米管等新材料结合还可以用于天线^[48],与电子生物器件结合用于检测菌种以及电子医疗领域(钴铬合金支架表面镀金可有效抑制变异链球菌的粘附^[49])等。

在不同学科以及学科交叉中应用镀金技术,不但可以促进电子器件、集成电路等电子工业产品的水平^[50],同时也说明镀金技术促进了电子工业产品的发展及提高了电子工业中镀金技术的水平。

参考文献:

- [1] 刘海萍, 李宁, 毕四富, 等. 无氰化学镀金技术的发展及展望[J]. 电镀与环保, 2007, 27(3): 4-7.
LIU Hai-ping, LI Ning, BI Si-fu, et al. Development and Prospect of Non-cyanide Electroless Gold Plating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2007, 27(3): 4-7.
- [2] 杨维生. 化学镀镍、金在印制电路板制造中的应用[J]. 化工新型材料, 2002, 30(2): 24-26.
YANG Wei-sheng. Application of Electroless Nickel and Immersion Gold in the Manufacturing of the Printed Circuit Board[J]. New Chemical Materials, 2002, 30(2): 24-26.
- [3] 邓清田, 刘俊, 王俊峰. 印刷线路板中的选择性化学镀镍、金技术[J]. 电镀与涂饰, 2003, 22(5): 27-29.
DENG Qing-tian, LIU Jun, WANG Jun-feng. Technology of Selective Electroless Nickel Plating & Gold Immersion for Printed Circuit Board[J]. Electroplating & Finishing, 2003, 22(5): 27-29.
- [4] 王川宝, 王强栋, 刘相伍. 晶圆无氰电镀金厚度均匀性研究[J]. 世界有色金属, 2016(4): 173-175.
WANG Chuan-bao, WANG Qiang-dong, LIU Xiang-wu. Study on Thickness Uniformity of Cyanide Free Gold Plating on Wafer[J]. World Nonferrous Metal, 2016(4): 173-175.
- [5] 刘兴宝, 吴志勇, 赵午云, 等. 高精度陶瓷镀金极杆的制造技术[J]. 机械设计与制造, 2015(2): 104-107.
LIU Xing-bao, WU Zhi-yong, ZHAO Wu-yun, et al. The Manufacturing Technology of High Precision Ceramic Gilt Pole[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(2): 104-107.

- [6] 何建新, 李继红, 张琳. 某军用矩形电连接器镀金插孔表面发黑故障分析[J]. 表面技术, 2013, 42(3): 94-96.
HE Jian-xin, LI Ji-hong, ZHANG Lin. Failure Analysis of Certain Type Gold-plated Military Rectangular Electrical Connectors for Surface Discoloring[J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 94-96.
- [7] 徐玉娟, 宋路路, 江洪涛. 几种连接器局部镀金的保护方法[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(9): 505-509.
XU Yu-juan, SONG Lu-lu, JIANG Hong-tao. Protection Method for Gold Plating of Connectors[J]. Electroplating & Finishing, 2015, 34(9): 505-509.
- [8] WEISBERG, ALFRED M. Gold Plating[J]. Metal Finishing, 2012, 110(9A): 325-333.
- [9] 池建明, 王丽娟. 电连接器镀金工艺[J]. 电镀与涂饰, 2002, 21(5): 34-36.
CHI Jian-ming, WANG Li-juan. Gold Plating Process for Electric Coupler[J]. Electroplating & Finishing, 2002, 21(5): 34-36.
- [10] 孙森, 徐加有. 航空电连接器接触体局部镀金工艺研究[J]. 航空制造技术, 2015(9): 70-72.
SUN Miao, XU Jia-you. Study of Selective Gold Plating on Aero Electrical Connector Contacts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(9): 70-72.
- [11] 张波, 匡加成, 王良. 不锈钢表面电镀金及真空镀氮化碳多层膜研究[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(2): 1-5.
ZHANG Bo, KUANG Jia-cheng, WANG Liang. Electroplating of Gold and Vacuum Coating of Carbon Nitride on the Surface of Stainless Steel[J]. Plating and Finishing, 2017, 39(2): 1-5.
- [12] CHEN Yi, LUO Jie, ZHONG Di-yuan, et al. Electroless Gold Plating on Printed Circuit Board in Potassium Gold(I) Thiocyanate Bath[J]. Electroplating and Finishing, 2017, 36(7): 357-360.
- [13] LIU Z W, WEST A C. Modeling of Galvanostatic Pulse and Pulsed Reverse Electroplating of Gold[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56: 3328-3333.
- [14] KIM D, KIM J, WANG G L, et al. Nucleation and Growth of Intermetallics and Gold Clusters on Thick Tin Layers in Electroplating Process[J]. Mater Sci Eng A, 2005, 393: 315-319.
- [15] VRUBLEVSKAYA O N, VOROBEOVA T N, VENGURA A V. Analysis of an Electrolyte for Gold Plating by Potentiometric Titration[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2007, 62(9): 889-893.
- [16] 刘仁志. 镀金与无氰镀金应用述评[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(5): 23-26.
LIU Ren-zhi. Gold-plated and Cyanide-free Gold-plating Application Review[J]. Plating and Finishing, 2013, 35(5): 23-26.
- [17] OKINAKA Y, HOSHINO M. Some Recent Topics in Gold Plating for Electronics Applications[J]. Gold Bulletin, 1998, 31(1): 3-13.
- [18] GREEN T A. Gold Electrodeposition for Microelectronic, Optoelectronic and Microsystem Applications[J]. Gold Bulletin, 2007, 40(2): 105-114.
- [19] TETSUYA O, YUTAKA O. Development of New Electrolytic and Electroless Gold Plating Processes for Electronics Applications[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2006(7): 425-437.
- [20] 黄剑贞, 朱琼霞, 叶泽鹏. 无氰镀金技术的研究进展[J]. 广东化工, 2016, 43(10): 141.
HUANG Jian-zhen, ZHU Qiong-xia, YE Ze-peng. Research Progress of Cyanide-free Gold-plating[J]. Guangdong Chem, 2016, 43(10): 141.
- [21] TSENG H C, CHEN J Y, CHOU J H. An Effective Device Design for Thermal Management of Multifinger InGaP/GaAs Collector-up HBTs[J]. International Journal of Numerical Modelling, 2013, 26(5): 443-447.
- [22] WANG Zhan-hua, SHEN Zhuo-shen, MU Dao-bin. Effects of Gold Plating on the Resistance to High Temperature Discoloration of the Cavity for Ceramic Packages[J]. J Univ Sci Technol Beijing, 2004, 11(1): 52-56.
- [23] 成映星, 付明, 张华云. 铍青铜零件电镀金工艺改进[J]. 电镀与环保, 2016, 36(2): 55-56.
CHENG Ying-xing, FU Ming, ZHANG Hua-yun. Improvement of Electric Gilding Process for Beryllium Bronze Parts[J]. Electroplating & Pollution Control, 2016, 36(2): 55-56.
- [24] PU S H, HOLMES A S, YEATMAN E M. Stress in Electroplated Gold on Silicon Substrates and Its Dependence on Cathode Agitation[J]. Microelectronic Engineering, 2013, 112: 21-26.
- [25] 王梦兰, 贾法龙, 张礼知. 石英毛细管内壁镀金工艺的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 8-13.
WANG Meng-lan, JIA Fa-long, ZHANG Li-zhi. Study of Gold Deposition on the Inner Wall of Quartz Capillary[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 8-13.
- [26] 陈月华, 江德凤, 刘永永. 金属镀金外壳抗盐雾腐蚀工艺的改进[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 93-97.
CHEN Yue-hua, JIANG De-feng, LIU Yong-yong. Improvement of Anti-spray-salt Corrosion Mechanism of Metal Shells[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 93-97.
- [27] 杨宇辰, 李明初, 董义. 镀金印制板可焊性工艺试验研究[J]. 质量与可靠性, 2016, 18(1): 20-22.
YANG Yu-chen, LI Ming-chu, DONG Yi. Experimental Study on Solderability of Gold Plated Printed Circuit Board[J]. Quality and Reliability, 2016, 18(1): 20-22.
- [28] 任万滨, 王鹏, 马晓明, 等. 电连接器镀金铜触点材料微动磨损特性的实验研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 119-124.
REN Wan-bin, WANG Peng, MA Xiao-ming, et al. Experimental Research on Fretting Wear Characteristics of Au-plated Copper Contacts Used in Electrical Connectors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 119-124.
- [29] ITO M, UNO M, TAKEYA J. Low-resistance Contacts

- of Electroless Plated Metals with High-mobility Organic Semiconductors: Novel Organic Field Effect Transistors with Solution Processed Electrodes[J]. Organic Electronics December, 2015, 27: 53-58.
- [30] 刘云彦, 李家峰, 崔庆新, 等. 钼铜合金表面金镀层的制备及耐高温与焊接性能[J]. 材料保护, 2017, 50(3): 47-50.
- LIU Yun-yan, LI Jia-feng, CUI Qing-xin, et al. Preparation of Gold Plating on Mo-Cu Alloy Surface and Evaluation of Its High-temperature Resistance and Welding Performance[J]. Journal of Materials Protection, 2017, 50(3): 47-50.
- [31] GAUDION M. Nickel-Gold Plating of Copper PCB Traces and Signal Losses[J]. Circuit World, 2012, 38(2): 64-67.
- [32] 陆东梅, 姚建铨, 郑义, 等. 太赫兹波在金属镀层空芯圆波导中的传输特性[J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1287-1289.
- LU Dong-mei, YAO Jian-quan, ZHENG Yi, et al. Transmission Characteristics of Hollow Metallic Film-coated Circular Waveguide for THz Radiation[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(12): 1287-1289.
- [33] PU S H, HOLMES A S, YEATMAN E M. Stress in Electroplated Gold on Silicon Substrates and Its Dependence on Cathode Agitation[J]. Microelectronic Engineering, 2013, 112: 21-26.
- [34] 叶锦群, 周定忠, 张晃初. 谈高频阶梯印制镀金插头线路板制作工艺[J]. 印制电路信息, 2015(7): 48-51.
- YE Jin-qun, ZHOU Ding-zhong, ZHANG Huang-chu. Discussion about Technology of High-frequency Step PCB with Gold Finger[J]. Printed Circuit Information, 2015(7): 48-51.
- [35] CHANG Le, ZHANG Zhi-jun, LI Yue, et al. 60 GHz Air Substrate Leaky-wave Antenna Based on MEMS Micromachining Technology[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016(11): 1656-1662.
- [36] CHANG Le, ZHANG Zhi-jun, LI Yue, et al. Air-filled Long Slot Leaky Wave Antenna Based on Folded Half-mode Waveguide Using Silicon Bulk Micromachining Technology for Millimeter-wave Band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(7): 3409-3418.
- [37] GOSWAMI S A, KARIA D. Regular Paper: A Compact Monopole Antenna for Wireless Applications with Enhanced Bandwidth[J]. International Journal of Electronics and Communications February, 2017, 72: 33-39.
- [38] SHARMA R K, KANERIYA R, PARGAIEN K C. Microwave Integrated Circuits Fabrication on Alumina Substrate Using Pattern up Direct Electroless Nickel and Immersion Au Plating and Study of Its Properties[J]. Microelectronic Engineering, 2013, 108: 45-49.
- [39] PARVIZIAN M, RAHIMI-ASHTARI F, GOODARZI A, et al. Residual Stress Improvement of Platinum Thin Film in Au/Pt/Ti/p-GaAs Ohmic Contact by RF Sputtering Power[J]. Applied Surface Science, 2012, 260: 77-79.
- [40] GEZERMAN A O, ÇORBACIOĞLU B D. Development of Alternative Environment Friendly Nickel and Gold Plating Baths[J]. Surface Engineering, 2015, 31(9): 641-649.
- [41] 张叶, 吴剑, 程熹. 在硅橡胶表面无氰化学镀金研究[J]. 信息记录材料, 2017, 18(8): 43-44.
- ZHANG Ye, WU Jian, CHENG Xi. Study on Cyanide Free Electroless Gold Plating on Silicone Rubber Surface[J]. Information Recording Materials, 2017, 18(8): 43-44.
- [42] HUANG Ming-qi, LI Xian-tang, XIA Jian-wen, et al. A Conceivably Stable Non-cyanide Electroless Gold Plating for Electronic Packaging Application[J]. Electronic Packaging Technology, 2017(8): 1173-1178.
- [43] 董振华, 李德良, 高林军, 等. 无氰沉金工艺的实践[J]. 电子工艺技术, 2011, 32(4): 189-192.
- DONG Zhen-hua, LI De-liang, GAO Lin-jun, et al. New Cyanide-free Immersion Gold Process of PCB[J]. Electronics Process Technology, 2011, 32(4): 189-192.
- [44] KICHIGIN V I, PETUKHOV I V, SHEVTSOV D I, et al. Electrodeposition of Coatings from Sulfite Gold-plating Electrolyte and Their Properties[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2015, 88(12): 1950.
- [45] LI M, BAI Z, ZHANG F, et al. Red Shift of Side-polished Fiber Surface Plasmon Resonance Sensors with Silver Coating and Inhibition by Gold Plating[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-13.
- [46] MULLONI V, MARGESIN B, FARINELLI P, et al. Cycling Reliability of RF-MEMS Switches with Gold-Platinum Multilayers as Contact Material[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(9): 3843-3850.
- [47] 吴涛. 脉冲镀金在半导体激光器中的应用及工艺优化[J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 631-634.
- WU Tao. Application and Process Optimization of Pulse Au-plating in Semiconductor Laser[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(6): 631-634.
- [48] LIN Kuan-ting, HSIEH Jian-yu, CHEN Yu-jen, et al. Gold Plating Carbon Nano Tube Antenna Integrated with Voltage Control Oscillator[J]. Piers Proceedings, 2013, 65: 1726-1729.
- [49] 姜丽, 胡以俊, 丛淑敏, 等. 支架用钴铬合金表面镀金对变异链球菌粘附的影响[J]. 北京口腔医学, 2016, 24(5): 259-261.
- JIANG Li, HU Yi-jun, CONG Shu-min, et al. Effect of Gold-Plating Treatment of Co-Cr Alloy on Adhesion of Streptococcus Mutans[J]. Beijing Journal of Stomatology, 2016, 24(5): 259-261.
- [50] 刘东光, 胡江华. 细间距图形电路无氰化学镀金工艺研究[J]. 电子与封装, 2013(5): 31-33.
- LIU Dong-guang, HU Jiang-hua. Study of Cyanide-free Electroless Gold Plating for Patterned Circuits with Fine-pitch[J]. Electronics and Packaging, 2013(5): 31-33.