

DOI: 10.11973/jxgccl201511015

磁控溅射银/铜双层膜的电性能和结合强度

王会¹, 徐晓², 冯斌¹, 王德苗¹

(1.浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027; 2.昆山万丰电子有限公司, 昆山 215313)

摘要: 采用磁控溅射工艺在微波腔体耦合器内壁沉积了银/铜双层膜, 并对该膜的电性能以及膜基结合强度等进行了研究。结果表明: 采用磁控溅射法沉积的银/铜双层膜和基体的结合强度可达 5.0 MPa; 其中, 内壁沉积有 2 μm 银/2 μm 铜双层膜的耦合器的电性能最佳, 耦合度为 5.75~6.20 dB, 隔离度为 31.02 dB, 端口驻波值为 24.43 dB, 均达到了电镀的指标, 插入损耗小于 1.70 dB, 优于电镀的; 该工艺用银量少, 无污染, 可替代电镀在微波器件表面沉积功能镀层。

关键词: 磁控溅射; 耦合腔; 双层膜; 电性能; 结合强度

中图分类号: TB43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2015)11-0065-03

Electrical Performance and Adhesion Strength of Magnetron Sputtered Cu/Ag Double-Layer Films

WANG Hui¹, XU Xiao², FENG Bin¹, WANG De-miao¹

(1. Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Kunshan Wanfeng Electronics Co., Ltd., Kunshan 215313, China)

Abstract: Ag/Cu double-layer film was deposited on internal wall of coupled cavity by magnetron sputtering process, and the electrical performance of the film and the film-substrate adhesion strength were studied. The results show that the adhesion strength between the double film and the substrate up to 5.0 MPa. The coupled cavity with 2 μm Cu/2 μm Ag has the best electrical performance, its coupling-degree was between 5.75 dB and 6.20 dB, isolation and port standing wave were 31.02 dB and 24.43 dB, respectively, these parameters were all up to the electroplating standard. Insertion losses of the coupled cavity was less than 1.70 dB, completely better than the electroplating standard. The process of low Ag coating costs and non-polluting could be used as an alternative method for the plating process.

Key words: magnetron sputter; coupled cavity; double layer film; electrical performance; adhesion strength

0 引言

微波腔体耦合器作为重要的微波传输器件, 在移动通讯领域应用广泛, 随着民用通信的发展, 对耦合器性能的要求也随之提高。银具有良好的电学性能, 常将其镀层应用于微波传输器件的内表面, 以降低损耗, 保证传输效果^[1-2]。目前, 制备表面银膜的方法主要有电镀法和化学镀法等。化学镀法由于存

在溶液稳定性差、反应速度慢以及添加剂复杂等问题, 未在微波器加工领域得以普遍应用^[3]; 而电镀法虽然可以有效解决耦合器内表面金属化问题, 但该工艺复杂, 且对环境污染严重。随着欧盟环保标准的日趋严格, 含有汞、六价铬、镉、铅、多溴和多溴二苯醚等六种具有严重污染性质的产品将严禁生产使用^[4], 这对耦合器内表面金属化提出了严峻挑战。银作为一种贵金属, 价格较高, 如果银膜太厚, 将会直接增加成本。如何在保证耦合腔损耗的前提下, 减薄银膜, 是研究者关心的热点。

磁控溅射技术作为一种成熟的工艺, 具有沉积效率高、膜层致密度高、镀层和基体结合力强、无污染等优点。基于此, 作者在保证微波腔体耦合器传

收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2015-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61204124); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2014QNA5002)

作者简介: 王会(1990-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生。

导师: 王德苗教授

输性能的基础上,利用磁控溅射技术代替传统的电镀技术在耦合器内表面沉积银/铜双层膜来代替电镀单层银膜,实现了对微波腔体耦合器功能区内表面的金属化,并对其插入损耗与膜基结合强度进行了研究。

1 银/铜双层膜的设计

微波腔体耦合器是一种具有方向性的功率分配设备,如图1所示,其技术指标主要有插入损耗、耦合度、隔离度、端口驻波、内镀层与基体的结合强度以及均匀度等。当高频电磁波通过耦合腔时,主要在耦合腔内壁表面空间很薄的镀层内传播,如图2所示,其中 μ_i 和 σ_i 分别为对应材料的磁导率和电导率, ϵ_i 为对应材料的介电常数, d_i 为对应薄膜的厚度。当电磁波在耦合腔内壁传播时,不同材料的内壁镀层具有不同的性能参数,产生的表面阻抗大小也不同,因此耦合腔内镀层的构成会直接影响电磁波传输过程中所产生的的损耗。作者对内镀层的设计以插入损耗这一指标作为依据。

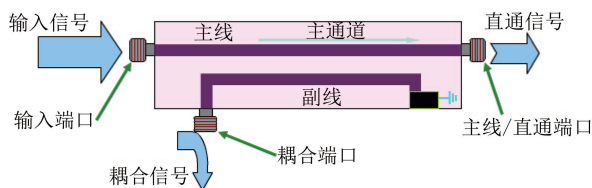


图1 耦合腔结构

Fig.1 The structure of coupled cavity

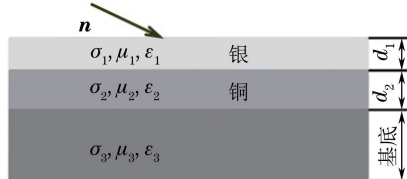


图2 对插入损耗产生影响的耦合腔内镀层材料结构示意图

Fig.2 Abridged general view of the structure of plating materials having effects on the insertion loss and location on the internal wall of the coupled cavity

考虑到金属双层膜间的反射作用可以增强表面银膜的电性能,故提出在减薄银膜的同时增加一层导电率仅次于银的中间层——铜膜,从而在减薄银膜的同时降低表面阻抗,在保证性能的同时降低损耗。采用磁控溅射技术,在工作频率为800~2 500 MHz之间的6 dB铝合金耦合腔内表面沉积铜/银双层膜。电镀纯银膜的厚度通常在3 μm 以上^[5],采用磁控溅射技术时减薄银膜至2 μm 或1 μm 厚;而中间层的铜膜即是反射层也是一部分功能层,由复合薄膜

等效表面阻抗的计算^[6-7]可知,铜膜的厚度控制在1~3 μm 比较合适。

2 试样制备与试验方法

溅射所用金属靶材是纯度为99.99%的银靶和铜靶。为保证膜层和基体之间的结合强度,试验前需要对耦合腔内壁进行表面处理,工艺流程为:表面清洗→去脂→清洗→烘干。

采用实验室自制的双靶磁控溅射仪沉积膜层。由于磁控溅射的真空度、溅射功率、靶基距离等工艺参数均会影响膜层的性能^[8-10],采用课题组前人优化之后的工艺参数进行磁控溅射^[9,11]。磁控溅射的具体参数如下:系统的本底真空度为 5.0×10^{-3} Pa,溅射时所采用的气体为纯度高达99.999%的氩气,溅射气压为0.5 Pa,基体与靶材的距离为100 mm。镀膜前,用高温胶带覆盖除待沉积内表面之外的其余部位,然后置入溅射仪内可自转、公转的基片台上,如图3所示。银膜和铜膜的沉积速率分别为233,88.3 $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

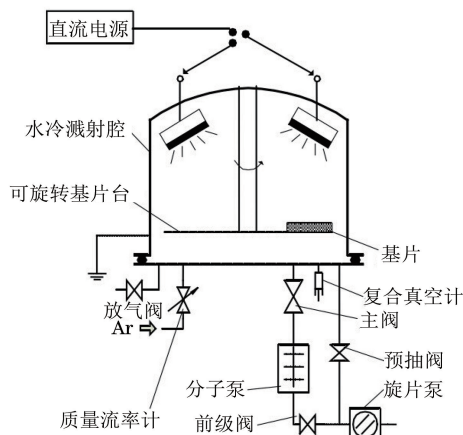


图3 磁控溅射加工示意

Fig.3 Abridged general view of magnetron sputtering process

根据GB/T 5270-2005中规定的拉伸剥离测试方法,采用K-50型手摇式测力计对膜基结合强度进行测试,取10个分散测点的平均值^[9];采用安捷伦E5071C型网络分析仪测镀膜耦合器的电性能。

3 试验结果与讨论

3.1 耦合器的电性能

3.1.1 耦合度、隔离度和端口驻波

内壁电镀纯银的6 dB耦合器的耦合度、隔离度和端口驻波值标准分别为5.5~6.5 dB,20 dB和19 dB。

由表1可以看出,内壁沉积银/铜双层膜耦合器的耦合度在5.65~6.27 dB以内,隔离度均可超过28 dB,端口驻波均可超过23 dB,其电性能完全可以达到内壁电镀纯银耦合器的性能要求。其中,3号耦合器的端口驻波性能最好,2号耦合器的耦合度和隔离度均优于其它耦合器的,但其端口驻波性能略低于3号耦合器的,但均优于其它耦合器的。因此综合来看,2号耦合器的耦合度、隔离度和端口驻波性能最好。

表1 内壁沉积银/铜双层膜耦合器的电性能

Tab.1 Electrical performance of Cu/Ag double-layered coupled cavity

耦合器 编号	膜层结构	耦合度 /dB	隔离度 /dB	端口驻波 /dB
1	2 μm Ag/1 μm Cu	5.65~6.26	29.86	23.11
2	2 μm Ag/2 μm Cu	5.75~6.20	31.02	24.43
3	2 μm Ag/3 μm Cu	5.68~6.20	30.09	25.01
4	1 μm Ag/1 μm Cu	5.65~6.27	28.87	24.39
5	1 μm Ag/2 μm Cu	5.69~6.27	28.39	24.09
6	1 μm Ag/3 μm Cu	5.70~6.22	29.12	24.27

3.1.2 插入损耗

微波腔体耦合器的插入损耗是指在信号传输过程中,腔体内部电路的传输损耗。在试验中,由于腔体内部的介质为空气,其损耗可忽略不计,则插入损耗是对腔体内壁传输损耗的表征,可直接反映腔体内壁膜层性能的优劣。

由表2可以看出,内壁沉积银/铜双层膜的耦合器的插入损耗均在1.36~1.40 dB之间,优于内壁电镀纯银耦合器的插入损耗要求(1.70 dB)^[12]。其中,2号耦合器的插入损耗最低,为1.36 dB,即在工作频率范围内,沉积有2 μm 银膜/2 μm 铜膜的2号耦合器的传输性能最好。

表2 内壁沉积银/铜双层膜耦合器的插入损耗和膜基结合强度

Tab.2 Insertion loss and film-substrate adhesion strength of Cu/Ag double-layered coupled cavity

耦合器编号	1	2	3	4	5	6
插入损耗/dB	1.37	1.36	1.37	1.40	1.39	1.39
结合强度/MPa	5.2	4.9	4.5	5.1	5.4	4.3

3.2 膜基结合强度

膜层与基体的结合强度是评价耦合器性能和质量的一个重要指标。

从表2可以看出,内壁沉积银/铜双层膜的耦合

器的膜基结合强度都集中在5 MPa附近,均优于内壁电镀纯银膜耦合器的指标(3.8 MPa)。这是因为,溅射粒子具有较高的能量,能够与基体表面的原子产生化学吸附,所以溅射膜层与基体的结合强度远大于电镀膜层与基体的^[12]。此外,银与铝合金无论是热膨胀系数还是晶格常数都是不匹配的,而加入的铜层既是功能层也是过渡层,能增强银层与耦合器基体的结合强度^[13]。

虽然2号耦合器的膜基结合强度并不是最好的,但与其它耦合器的差距在10%以内。综合分析认为2号耦合器的膜系配比最优,可作为磁控溅射产品加工的指导参考。

3.2 成本和环保性

与电镀3 μm 的纯银膜相比,采用磁控溅射工艺在工作频率为800~2 500 MHz的耦合腔内壁沉积2 μm 铜膜/2 μm 银膜可以减少银的用量。更重要的是,现有的电镀治理系统并不能完全达到零排放,其污染物处理过程也需消耗大量的人力、物力^[14-15]。而磁控溅射工艺是一种物理气相沉积技术,在生产过程中不会产生有毒、有害的废液、废气,相对于电镀工艺具有明显的环保优势,同时也在后续处理上节省了成本。

4 结 论

(1) 采用溅射工艺沉积在微波腔体耦合器内壁沉积了铜/银双层膜,膜基结合强度在5.0 MPa左右;其中,内壁沉积有2 μm 铜膜/2 μm 银膜的耦合器的插入损耗小于1.70 dB,耦合度、隔离度、端口驻波等电性能均能达到电镀银膜的指标。

(2) 磁控溅射工艺可以避免电镀工艺带来的污染问题,可替代电镀工艺对微波腔体耦合器等通信用微波器件进行内表面功能镀层的制备。

参考文献:

- [1] HASHIMOTO S, HIRANO T O. Development of coating materials of high conductivity Ag layer for electroplating technologies[C]//MRS Proceedings.[S.l.]:Materials Research Society, 2012:195-200.
- [2] 高晓明,孙嘉奕,胡明,等. 低温沉积银和银铜膜的耐原子氧性能[J]. 机械工程材料,2013,37(11):55-59.
- [3] 陈步明,郭忠诚. 化学镀研究现状及发展趋势[J]. 电镀与精饰,2011,33(11):11-15.
- [4] PARLIAMENT E U, COUNCIL E U. Directive 2002/95/EC on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment[J]. Official J Eur Union, 2003, 46: 19-23.

(下转第105页)

来,有的 CNTs 则是一端嵌在基体中,一端被拔出而露出外缘(如箭头 3 和 4)。在磨损过程中,这些裸露出的 CNTs 减少了复合材料和盘试样之间的直接接触。箭头 5 所指微裂纹处的 CNTs 能有效阻止磨损过程中裂纹的扩展和表层磨屑的剥落,从而提高了复合材料的耐磨性能。CNTs 的抗裂纹扩展能力也是其增强作用的一个重要体现。

3% CNTs/AZ91 复合材料在 50 N 载荷下磨损后,其磨屑的拉曼光谱中存在 CNTs 的 D 峰和 G 峰,如图 5(b)所示,这说明磨损后的磨屑中存在 CNTs。

3 结 论

(1) 在干滑动条件下,随着 CNTs 质量分数和载荷增加,复合材料的摩擦因数逐渐降低。

(2) 在 CNTs 质量分数相同的条件下,随着载荷增加,复合材料的磨损量增大;在相同的载荷条件下,随着 CNTs 质量分数增加,复合材料的磨损量逐渐减小,这是因为具有良好自润滑和增强作用的 CNTs 降低了复合材料磨损面的塑性变形程度。

(3) AZ91 镁合金的磨损机制为疲劳磨损和磨粒磨损;当 CNTs 的质量分数较低(1%)时,复合材料的磨损机制为轻微的粘着磨损和磨粒磨损,当 CNTs 的质量分数较高时(3%,5%),复合材料的磨损机制以磨粒磨损为主。

参考文献:

- [1] 于化顺.金属基复合材料及其制备技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [2] CHAWLA N, CHAWLA K K. Metal matrix composites [M].

New York: Springer, 2006: 1.

- [3] 杨益,杨盛良.碳纳米管增强金属基复合材料的研究现状及展望[J].材料导报,2007,21(5):182-184.
- [4] 陈文亮,黄春平,柯黎明.碳纳米管增强铜基复合材料的研究进展[J].机械工程材料,2012,36(6):5-8.
- [5] CHEN H, ALPAS A T. Sliding wear map for the magnesium alloy Mg-9Al-0.9 Zn (AZ91) [J]. Wear, 2000, 246(1/2): 106-116.
- [6] 姜靖雯,彭峰.碳纳米管应用研究现状与进展[J].材料科学与工程学报,2002,21(3):464-468.
- [7] 许玮,胡锐,高媛,等.碳纳米管增强铜基复合材料的载流摩擦磨损性能研究[J].摩擦学学报,2010,30(3):303-307.
- [8] 姜金龙,戴剑锋,袁晓明,等.纳米碳管/铝基复合材料的制备及摩擦磨损性能研究[J].摩擦学学报,2007,27(3):219-223.
- [9] 李维学,徐莺歌,郝远,等.碳纳米管增强 AZ91D 镁基复合材料的力学性能研究[J].甘肃科学学报,2010,22(2):34-37.
- [10] LIU S Y, GAO F P, ZHANG Q Y, *et al.* Fabrication of carbon nanotubes reinforced AZ91D composites by ultrasonic processing [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(7): 1222-1227.
- [11] MINA M B, AMAL M E, ABDALLA W. Friction and wear behavior of Al-CNT composites [J]. Wear, 2013, 307: 164-173.
- [12] ZHANG Z, CHEN D L. Consideration of Orowan strengthening effect in particulate reinforced metal matrix nanocomposites: a model for predicting their yield strength [J]. Scripta Materialia, 2006, 54(7): 1321-1326.
- [13] LI H P, KANG J L, HE C N, *et al.* Mechanical properties and interfacial analysis of aluminum matrix composites reinforced by carbon nanotubes with diverse structures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 577: 120-124.
- [14] KIM I Y, LEE J H, LEE G S, *et al.* Friction and wear characteristics of the carbon nanotube-aluminum composites with different manufacturing conditions [J]. Wear, 2009, 267(1/4): 593-598.

(上接第 67 页)

- [5] 刘仁志.波导产品银镀层厚度的确定[J].电镀与精饰,2006,28(3):31-34.
- [6] HIRAOKA T, TOKUMITSU T, AIKAWA M. Very small wide-band MMIC magic T's using microstrip lines on a thin dielectric film [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1989, 37(10): 1569-1575.
- [7] 梁昌举.多层金属镀膜导波结构传输特性的研究[D].西安:西安电子科技大学,2010:22-23.
- [8] 马远远.铁氧体陶瓷无害金属化技术的研究[D].杭州:浙江大学,2008:26-28.
- [9] 王德苗,岑嘉宝.钛酸钡基 PTC 陶瓷溅射金属化研究[J].真空,2010(2):78-80.
- [10] BRAUN R, LANGE A, HOVSEPIAN P. Oxidation behaviour of TiAlN/CrN and CrAlN/CrN nanoscale

multilayer coatings with Al₂O₃ topcoat deposited on gamma-TiAl alloys [J]. Materials at High Temperatures, 2011, 28(4): 324-335.

- [11] 沈小虎,王德苗.铁氧体表面耐高温 Ni-V/Ag 复合金属化薄膜的研究[J].真空科学与技术学报,2013,34(3):266-271.
- [12] LUNDIN D, SARAOKINOS K. An introduction to thin film processing using high-power impulse magnetron sputtering [J]. Journal of Materials Research, 2012, 27(5): 780-792.
- [13] 孙向明.微量 Ag 对无氧铜性能的影响[J].机械工程材料,2002,26(2):31-34.
- [14] 胡如南,张立茗.我国电镀工艺环保现状及其发展建议[J].材料保护,2000,33(1):46-50.
- [15] 陈志良,赵述华,周建民,等.典型电镀污染场地重金属污染特征与生态风险评价[J].环境污染与防治,2013,35(10):1-4,11.