电子束蒸发Cu膜的厚度均匀性和准确性的研究

郭俊寒,季鸿雨,于海洋,孟腾飞,张玉涛,常子硕,遆 鹏,陈 瑞

北京航天微电科技有限公司,北京

收稿日期: 2024年9月4日; 录用日期: 2024年10月10日; 发布日期: 2024年12月11日

摘要

采用BAK761电子束蒸发设备制备Cu膜,研究了Dist.shield的形貌对Cu膜片内均匀性的影响。实验表明, 未增加Dist.shield时,Cu膜的厚度从靠近晶振侧向远离晶振侧逐渐增大。采用现有挡板蒸发Cu膜,行星 架内圈基片表面Cu膜厚度的片内均匀性约为0.8%。通过调节挡板宽度,使得Cu膜片内均匀性达到0.4% 左右。同时通过采用"公转加自转"的方法,可以有效分散镀膜误差,最终将膜厚均匀性优化至0.3%。 同时,通过修正工具因子,可以将实际膜厚值与目标膜厚值的偏差从约±1.5%降为±1%以内。实时调整 工具因子,以应对挖坑效应造成的厚Cu膜和薄Cu膜准确性偏差问题。

关键词

电子束蒸发,Cu薄膜,片内均匀性,准确性

Study on Thickness Uniformity and Accuracy of Electron Beam Evaporation Cu Thin Film

Junhan Guo, Hongyu Ji, Haiyang Yu, Tengfei Meng, Yutao Zhang, Zishuo Chang, Peng Ti, Rui Chen

Beijing Aerospace Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Sep. 4th, 2024; accepted: Oct. 10th, 2024; published: Dec. 11th, 2024

Abstract

Cu films were prepared by BAK761 electron beam evaporation equipment. The effect of the appearance of Dist. shield on the homogeneity of Cu films is studied. The experimental results show that the thickness of Cu film increases gradually from the side near the crystal oscillator to the side away from the crystal oscillator when the shield is not added. The thickness uniformity of Cu film on the surface of the inner ring substrate is about 0.8% by using the exiting shield to vaporize Cu film. By adjusting the width of the shield, the uniformity in the Cu diaphragm, reaches about 0.4%. At the same time, by

文章引用: 郭俊寒, 季鸿雨, 于海洋, 孟腾飞, 张玉涛, 常子硕, 遆鹏, 陈瑞. 电子束蒸发 Cu 膜的厚度均匀性和准确性的研究[J]. 仪器与设备, 2024, 12(4): 527-534. DOI: 10.12677/iae.2024.124069

using the method "revolution and rotation", the coating error can be effectively dispersed, and the film thickness uniformity can be optimized to 0.3%. At the same time, the deviation between the actual film thickness and the target film thickness can be reduced from about $\pm 1.5\%$ to less than $\pm 1\%$ by modifying the tooling factor. At the same time, the tooling factor is corrected to deal with the accuracy deviation of thick Cu film and thin Cu film caused by the digging effect.

Keywords

Electron Beam Evaporation, Cu Film, In-Chip Uniformity, Accuracy

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC ① Open Access

1. 引言

随着移动通信技术的飞速发展,声表面波滤波器(SAW)作为射频领域的关键元器件,其可以对叉指 电极的设计进行信号处理,实现高效滤波等功能,在雷达、无线通信、导航和电子对抗等领域的应用日 渐广泛。同时,SAW 滤波器具有尺寸小、重量轻、制作简单、抗干扰以及设计灵活等优点,使其在现代 电子中有着十分广泛的应用需求[1]。

镀膜工序是制造高性能 SAW 滤波器的关键工序之一,镀膜质量的优劣会直接影响到 SAW 滤波器的 性能指标。并且 SAW 滤波器的工作机理是依靠压电材料中的压电效应进行信号转换,所以器件性能会 受到膜层厚度的影响。因此,如何提高膜层的片内均匀性和膜层厚度准确性,成为了当前制备 SAW 滤波 器需要解决的问题。

电子束蒸发镀膜已经被广泛地应用于多种芯片制备过程中,关于提高电子束蒸发镀膜的均匀性问题也已经被广泛研究[2]-[5]。本文以 Cu 作为电极的 SAW 滤波器为例,探讨 Cu 膜片内均匀性和膜层厚度准确性的影响因素及优化方法。通过理论分析和实验验证,重点研究了 Dist. shield 对 Cu 膜均匀性的影响,并通过调节 Dist. shield 的形貌来对均匀性进行优化;后续探索了工具因子在膜层设定值和膜层实际值之间起到的作用,并对不同膜层厚度区间设定不同的工具因子以应对挖坑效应造成的 Cu 膜层准确性偏差的问题。

2. 电子束蒸发镀膜原理

电子束蒸发镀膜是直接利用电子束加热蒸发材料,使蒸发材料气化后凝结在基片表面形成膜,其中 蒸发材料会放入水冷铜坩埚中,防止物料和坩埚发生反应。本文介绍的 BAK761 电子束镀膜机采用 e 型 电子枪,整个工作流程示意图如图 1 所示。电子枪内部包含加热的阴极,一旦其加热温度足够高,则会 释放出电子形成电子束,在电场加速后又会通过磁场,使得电子束可以准确地轰击到预设的坐标点位置 处。此时蒸发源表面的原子或分子会吸收电子束的能量,从而被激发,蒸发或者升华。在高真空的腔体 内部,蒸汽会向基片移动,并在基片表面沉积,逐渐形成薄膜[6]。在整个镀膜过程中,可以通过调节电 子束的能量,束斑尺寸和位置等参数来精确地控制薄膜的沉积速率,厚度,均匀性以及化学组成等。电 子束蒸发镀膜是真空镀膜技术中的一种重要的方法,特别适合制备熔点低、纯度高的薄膜材料。

3. 高均匀性 Cu 膜制备技术研究

3.1. Cu 膜厚度对器件性能影响的 Comsol 仿真研究

为确定膜层厚度偏差对器件性能的影响情况,使用 Comsol 软件对谐振器进行了 2.5D 有限元建模仿

真。如表 1 所示,材料确认为 131°Y LiNbO₃,电极宽度 a 为 0.5 μm,周期 λ 为 2.0 μm,声孔径 W 为 40.0 μm,电极厚度以 0.2 μm 为基础,电极材料分别为 Al 和 Cu,以厚度向上偏差 1%的误差进行仿真并与基础厚度进行对照。

最终的仿真结果如图 2 所示,其中图 2(a)为 Al 电极,电极厚度为 0.2 μm,谐振频率为 1.8803 GHz; 当 Al 膜厚度偏差了 1%,电极厚度达到 0.202 μm 时,由于厚度的提升,电极重量得到提高,相应的谐振 频率呈现下降趋势,如图 2(b)所示,其谐振频率降至 1.8789 GHz,频率差为 1.4 MHz,以此模型为例的



Figure 1. Schematic diagram of the working principle of electron beam evaporation 图 1. 电子束蒸发工作原理图

Table 1. Model geometric parameters

 表 1. 模型几何参数

电极材料	电极宽度 a (μm)	周期λ(µm)	声孔径 W (μm)	电极厚度 d (μm)
Al	0.5	2.0	40.0	0.2/0.202
Cu	0.5	2.0	40.0	0.2/0.202





Figure 2. (a), (b) Vibration shape diagrams of Al electrode at resonant frequency. (c) Admittance curves of Al electrodes with different thicknesses. (d), (e) Vibration shape diagrams of Cu electrode at resonant frequency. (f) Admittance curves of Cu electrodes with different thicknesses

图 2. (a), (b) Al 电极谐振频率下的振型图。(c) 不同厚度 Al 电极的导纳曲线。(d), (e) Cu 电极谐振频率下的振型图。(f) 不同厚度 Cu 电极的导纳曲线

频率变化率约为 0.07%。图 2(d)为 Cu 电极,电极厚度为 0.2 μm,谐振频率为 1.6332 GHz,相较于 Al 材料, Cu 材料有更大的密度,同等厚度的情况下其重量更大,相应的谐振频率更低。当 Cu 膜厚度偏差了 1%,电极厚度达到 0.202 μm 时,谐振频率降至 1.6296 GHz,如图 2(e)所示。厚度变化前后的频率差为 3.6 MHz,以此模型为例的频率变化率约为 0.22%。如图 2(c)和图 2(f)分别为 Al 膜作为电极和 Cu 膜作为 电极的导纳曲线,膜层厚度的偏移除了会影响谐振频率以外还会造成 Q 值的变化,其他谐振杂波的强度 变化等不利因素。综上所述,Cu 膜相较于 Al 膜的厚度偏差对频率起到更大的影响,膜层厚度的片内均 匀性和准确性在 SAW 滤波器的制备过程中至关重要。

3.2. Dist. shield 的形貌修正

如图 3 黑色曲线所示, Cu 膜的厚度从靠近晶振侧向远离晶振侧逐渐增大。为了提升 Cu 膜层的片内 均匀性, BAK761 设备自带了一个均匀性挡板"Dist. shield",当在镀膜过程中存在 Dist. shield,能够有 效地减弱膜层厚度不断提高的趋势,整个基片表面的 Cu 膜厚度均匀性得到了显著的提高,但是还没有达

到非常理想的效果。基于此,后续对 Dist. shield 的形貌进行了修正。



Figure 3. Thickness distribution of Cu film without Dist. shield (black) and with Dist. shield (red) 图 3. 无 Dist. shield 的 Cu 膜厚度分布(黑)和无 Dist. shield 的 Cu 膜厚度分布(红)

在这里我们提出了一种"光照模拟蒸发"的策略,可以在非工作状态下,观察挡板和基片之间的遮 挡关系。如图 4(a)所示,将发散的光源置于蒸发源之上,光线传播的过程中被挡板遮挡,在基片表面观察 阴影情况,并找到基片顶端和底边阴影部分对应在挡板的位置。实验采用的 4 寸基片,其直径约为 10 cm, 挡板对于内圈基片的遮挡有效长度为 8 cm,如图 4(b)所示。



Figure 4. (a) Schematic diagram of light-induced evaporation. (b) Schematic diagram of the Dist. shield morphology 图 4. (a) 光照模拟蒸发示意图。(b) Dist. shield 形貌示意图

基片从上至下选取十个区域进行 Cu 膜层厚度测量,同时测量 Dist. shield 对应区域的厚度。从表 2 中不难看出,不同区域挡板宽度的变化对膜层的影响并不一致,并且没有特殊的函数关系。后续针对十个 区域内挡板添加前后的 Cu 膜厚度以及对应区域的挡板宽度,计算出了每一个区域的厚度变化率。由于提 高挡板宽度会导致相应区域的膜层厚度降低,反之则会提高膜层厚度,在现有的基础上对挡板形貌进行 修改。使其变窄操作更为容易,所以以添加挡板之后膜层最厚区域为基准,对其他区域的挡板进行修剪。 每个区域根据厚度变化率进行计算,并进行相应的修剪,具体修剪宽度如下表2所示。

位置	加挡板前厚度(µm)	加挡板后厚度(μm)	挡板宽度(cm)	厚度变化率(nm/cm)	修剪宽度(cm)
1	512	498	1.15	12.17	0.99
2	514	501	1.35	9.63	0.94
3	516	505	1.55	7.10	0.70
4	518	507	1.75	6.29	0.48
5	519	507	1.95	6.15	0.49
6	519	509	2.25	4.44	0.23
7	523	510	2.55	5.10	0
8	524	509	2.95	5.08	0.20
9	526	510	3.65	4.38	0
10	528	503	4.35	5.75	1.20

 Table 2. Thickness change and correction width before and after adding baffle

 表 2. 加挡板前后的厚度变化及修正宽度

3.3. 基片自转提高 Cu 膜均匀性

如 6(a)的箱线图中的"before"和"after"所示,通过上述的改进,Cu 膜的片内均匀性得到了显著的提高。为了进一步优化Cu 膜的片内均匀性,我们提出一种基片"公转加自转"的方法,并对行星架进行了改动。如图 5 所示,(a)和(b)分别为对行星架改进的示意图和实物图,在行星架表面增加一个驱动电机,并将承载基片的载盘边缘进行"齿轮化"处理,具体细节如图(c)所示。



Figure 5. Schematic diagram and physical picture of the improved planetary carrier 图 5. 行星架改进的示意图和实物图

在整个镀膜过程中,行星架不断公转,来分散不同空间区域的膜层误差;而基片表面同一纬度膜层 厚度基本一致,而以基片圆心为中心的圆环各点膜层厚度会略有不同,在引入了基片自转之后,可以有 效地分散镀膜误差。如图 6(a)的 "coating"所示,引入了基片自转之后,均匀性又得到了进一步的提高。 如图 6(b)所示,利用公式: uniformity = (max value - min value)/(2 * average value) * 100%计算可得,在修 正挡板和未引入自转之前,片内均匀性约为 0.8%,优化之后减小了每一个区域的镀膜误差,且把剩余镀 膜误差通过旋转操作分散,最终将均匀性显著提升至 0.3%。



Figure 6. (a) Thickness distribution of Cu film before and after adjustment. (b) Uniformity within the Cu film before and after adjustment 图 6. (a) 调节前后的 Cu 膜厚度分布。(b) 调节前后的 Cu 膜片内均匀性

4. 工具因子修正

工具因子(tooling factor)是一个比例因子,用于修正产品与晶振片在镀膜过程中的厚度差异,其大小等于晶振监控仪读数与实际膜厚的比值。由于对挡板进行了形貌上的修正,在实际镀膜操作过程中,往往膜厚的设定值和膜厚的实测值有着较大的偏差,此时就需要对工具因子进行修正。以Ti膜10nm,Cu膜500nm为例,在调节工具因子之前,膜厚较厚,平均值约为524nm,如图7黑色曲线所示。增大工具因子数值,并不断测试,最终修正后的膜层厚度平均值约为510nm,和设定总膜厚较为一致,如图7红色曲线所示。





图 7. 调节工具因子前的 Cu 膜厚度分布(黑)和调节工具因子后的 Cu 膜厚度分布(黑)

5. 结束语

综上所述,本文通过修正 Dist. shield,使得 Cu 膜厚度的片内均匀性从 0.8%提高到了 0.4%;增加基

片旋转装置,又进一步将均匀性提高到 0.3%;最后通过修正工具因子的操作,将实际膜厚值与目标膜厚值的偏差从约±1.5%降为±1%以内。实时调整工具因子,以应对挖坑效应造成的厚 Cu 膜和薄 Cu 膜准确性偏差问题。这些改进可以有效地减少镀膜工艺中的镀膜误差,大幅度提高了器件的成品率。

参考文献

- [1] 白涛, 兰敏. 一些声表面波器件的市场应用及发展[J]. 压电与声光, 2006, 28(5): 502-505.
- [2] 付学成, 乌李瑛, 栾振兴, 等. 用于电子束蒸镀金属银膜的钨坩埚改造[J]. 真空, 2022, 59(3): 41-45.
- [3] 潘永刚, 刘政, 王奔, 等. 电子束蒸发球面夹具系统膜厚均匀性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 331-335.
- [4] 李维源,朱蓓蓓,孙权权,等. 基于电子束蒸发沉积的曲面纳米薄膜均匀性研究[J]. 飞控与探测, 2019, 2(2): 64-70.
- [5] 毕军. 电子束蒸发镀膜膜厚均匀性的修正方法[P]. 中国专利, CN1718844. 2008-01-01. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=e9041405852b0747c5bcbf3851970f66&site=xueshu_se
- [6] 邓坤. Evatec BAK761 电子束真空蒸发镀膜系统基本结构原理及维护[J]. 电声技术, 2021, 45(9): 27-29, 33.