

TC-SAW SiO₂ 温补层性能研究

贺 贞, 李 燕, 田本朗, 马晋毅, 肖 强, 梁柳洪

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:为制备高性能的 TC-SAW SiO₂ 温补层, 分别采用电子束蒸发镀膜和反应磁控溅射制备 SiO₂ 薄膜, 研究两种制备工艺对 SiO₂ 薄膜致密性、表面粗糙度及弹性模量的影响。采用扫描电子显微镜、原子力显微镜、X 线衍射仪对 SiO₂ 薄膜的形貌和晶体结构进行分析。采用椭偏仪测试薄膜折射率及腐蚀后的膜厚变化量, 并通过纳米压痕仪测量计算薄膜的硬度和弹性模量。结果表明, 反应磁控溅射制备的 SiO₂ 薄膜更致密、薄膜表面粗糙度更小、弹性模量更大。采用反应磁控溅射制备的 SiO₂ 薄膜作为 TC-SAW 温补层, 可以获得频率温度系数为 $-8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的 TC-SAW 器件。

关键词: TC-SAW; SiO₂ 温补层; 反应磁控溅射

中图分类号: TN384; TN65 **文献标识码:** A

Study on the Performance of SiO₂ Thermal Compensation Layer for Temperature-Compensated Surface Acoustic Wave

HE Zhen, LI Yan, TIAN Benlang, MA Jinyi, XIAO Qiang, LIANG Liuhong

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: To prepare high-performance SiO₂ thermal compensation layers for temperature-compensated surface acoustic wave (TC-SAW), SiO₂ thin films were prepared using electron beam evaporation coating and reactive magnetron sputtering. The effects of the two preparation processes on the density, surface roughness, and elastic modulus of SiO₂ thin films were studied. The morphology and crystal structure of SiO₂ films were analyzed using scanning electron microscopy, atomic force microscopy, and X-ray diffraction. The refractive index and thickness changes of the thin film after corrosion were measured using an ellipsometer and the hardness and elastic modulus of the thin film were calculated using a nano-tracer. The results show that SiO₂ prepared by reactive magnetron sputtering has a denser film, lower surface roughness, and higher elastic modulus. A TC-SAW device with a frequency temperature coefficient of $-8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ was obtained using a SiO₂ thin film prepared by reactive magnetron sputtering.

Key words: TC-SAW; SiO₂ temperature compensated films; reactive magnetron sputtering

0 引言

随着 5G 及物联网技术的不断发展, 传统声表面波(SAW)滤波器存在品质因数(Q)值低、插入损耗大和热稳定性差的特性, 难以满足市场对高性能滤波器的要求^[1]。而温度补偿型 SAW 滤波器(TC-SAW)能有效解决系统在恶劣温度环境下的抗干扰问题, 与传统 SAW 相比, TC-SAW 除具有优异的频率温度稳定性, 还具备更高的矩形度、更小插入损耗等特性。

TC-SAW 实现路径主要有两种: 一是采用键合片作为衬底; 二是在传统 SAW 器件结构基础上覆盖一层温补层。后者具有较高成本优势, 为行

业内常用的工艺路径。温补层的选择要求与压电材料存在相反的温度系数^[2-3]。目前 TC-SAW 温补层主要为 SiO₂ 薄膜, 也有报道采用 F 掺杂 SiO₂ 薄膜, 即 SiOF^[4-5], 其中对 TC-SAW SiO₂ 温补层制备工艺的报道研究较少, 而 SiO₂ 温补层薄膜特性对 TC-SAW 器件的性能起决定性作用。因此, 本文通过比较不同 SiO₂ 温补层制备工艺, 以得到高性能的 SiO₂ 温补层。同时考虑到声表面波滤波器器件原材料特性, 在制备工艺过程中因避免过高温度, 主要研究对比了电子束蒸发镀膜及反应磁控溅射镀膜对 SiO₂ 温补层性能的影响。

1 试验

1.1 薄膜制备

通过电子束蒸发镀膜及反应磁控溅射在 P 型 (100)晶向硅片上制备 SiO₂ 薄膜。其中电子束蒸发镀膜选用纯度为 4N 的 SiO₂ 颗粒,粒径约为 Ø2 mm。磁控溅射镀膜采用纯度为 5N 的 Si 靶,通入高纯氩气及氧气进行反应制备。表 1 为详细的制备参数。

表 1 SiO₂ 薄膜制备参数

成膜参数	电子束蒸发镀膜	反应磁控溅射
气体流量/(mL·s ⁻¹)	/	Ar : 1.5;O ₂ : 3
成膜气压/Pa	8×10 ⁻⁴	0.5
温度/°C	50	50
电源参数	10 kV;40 mA	RF 200 W
成膜速率/(nm·s ⁻¹)	0.5	0.4
源基距/cm	120	6

1.2 结构表征及性能测试

通过射扫描电子显微镜(Helios 5CX)分析薄膜结构,其加速电压为 15 kV。采用 AFM 原子力显微镜(SPM-9700)分析薄膜表面粗糙度。采用 X 线衍射仪(X'pert PRO)检测薄膜晶态结构,XRD 采用 Cu Kα 辐射,其加速入射电压为 40 kV,电流为 40 mA,扫描速度为 0.05 °C/s。通过纳米压痕法测量薄膜的硬度及弹性模量,压入深度是膜厚的 1/10,避免了基材对测试的影响。

腐蚀速率为腐蚀前后 SiO₂ 薄膜的膜厚变化量除以腐蚀时间,腐蚀采用体积比 V(NH₄F) : V(乙二醇) = 3.5 : 4 的溶液,腐蚀时间为 10 min。通过椭偏仪(SE850)测试 SiO₂ 膜厚及折射率,测试波长为 400~800 nm,去边 5 mm,自动测试 49 点。

2 结果与讨论

2.1 薄膜结构

图 1 为 XRD 测得的 SiO₂ 薄膜衍射图。由图可知,电子束蒸发镀膜和磁控溅射镀膜的图谱重合,且均表现为非晶态结构。其中磁控溅射制备图谱在 32.8°处存在衍射峰,其为 Si 基底峰。

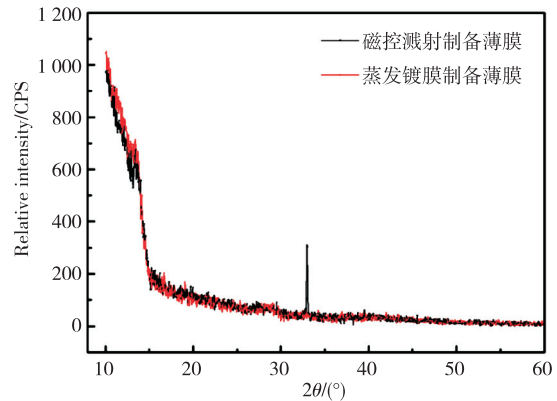


图 1 SiO₂ 薄膜的 XRD 图谱

图 2 为薄膜对叉指换能器指条的填充情况。由图可见,电子束蒸发镀膜存在空隙等结构缺陷,而反应磁控溅射填充紧密,无结构缺陷。差异存在的原因与两种设备的制备原理及不同的镀膜腔体结构相关。根据声表面波滤波器的工作原理,空隙等结构缺陷会影响声波的传输,增大器件损耗。

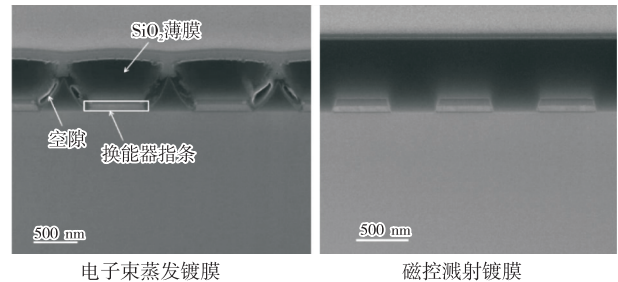


图 2 SiO₂ 填充图

图 3 为 SiO₂ 薄膜表面形貌图。

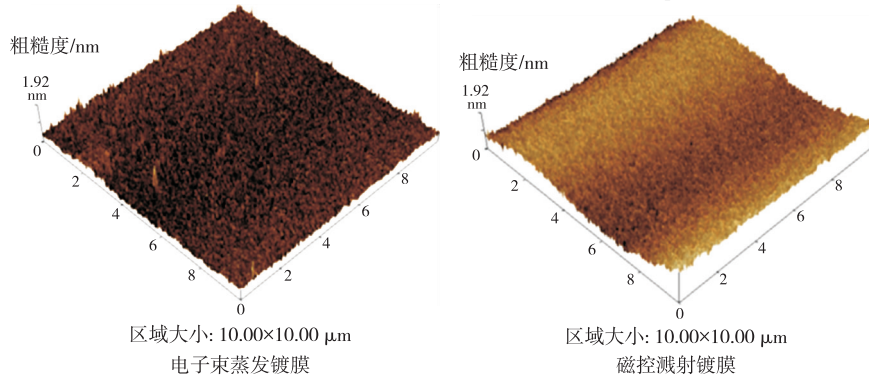


图 3 SiO₂ 表面形貌

由图3可见,电子束蒸发镀膜制备的SiO₂薄膜表面粗糙度为0.9 nm,反应磁控溅射制备的SiO₂薄膜表面粗糙度为0.1 nm。根据Anders^[6]提出的薄膜生长区域结构模型,薄膜表面粗糙度与成膜时的温度、动能相关,反应磁控溅射镀膜时成膜粒子能量远大于蒸发镀膜,能量越高,表面粗糙度越低。

2.2 薄膜折射率、弹性模量

通过椭偏仪测试薄膜的折射率,拟合结果如图4所示。由图可见,电子束蒸发镀膜制备的SiO₂薄膜折射率为1.45,反应磁控溅射制备的SiO₂薄膜折射率为1.47。反应磁控溅射制备的SiO₂薄膜越致密,可能SiO₂薄膜中含有更多的多晶硅,导致其折射率偏大^[7]。

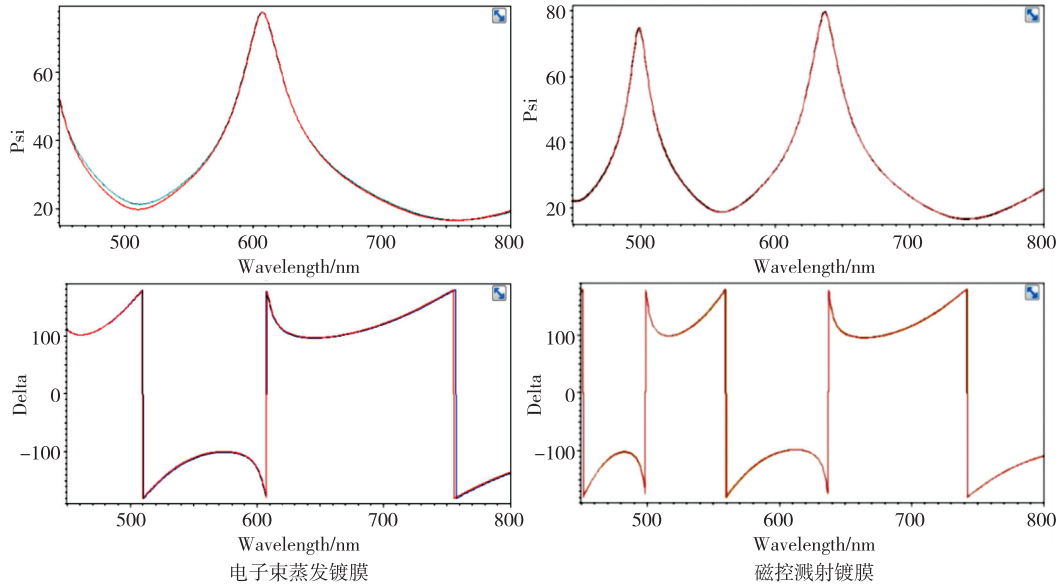


图4 SiO₂ 折射率测试拟合图

图5为纳米压痕测试结果。由图可见,电子束蒸发镀膜制备的SiO₂薄膜弹性模量为60.7 GPa,

硬度为5.37 GPa;反应磁控溅射制备的SiO₂薄膜弹性模量为81.2 GPa,硬度为9.88 GPa。

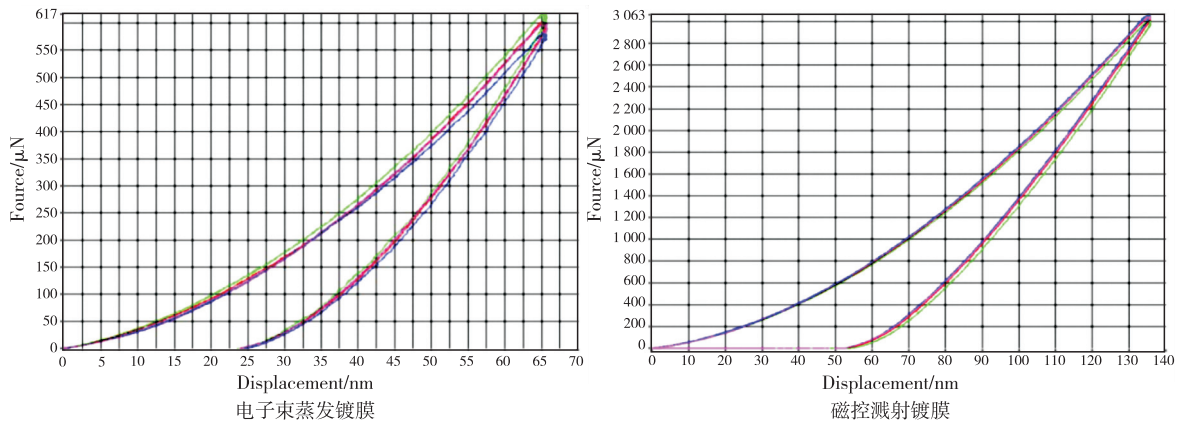


图5 SiO₂ 应力-应变测试图

2.3 薄膜腐蚀速率

采用HF溶液腐蚀10 min,测试SiO₂薄膜厚度减少量,如图6所示。由图可知,腐蚀10 min后,电子束蒸发SiO₂镀膜平均去除量为228 nm,腐蚀

速率为22.8 nm/min,而磁控溅射去除量为83 nm,腐蚀速率为8.3 nm/min,腐蚀速率更低。腐蚀速率与薄膜的致密度密切相关,薄膜越致密,腐蚀速率越低。

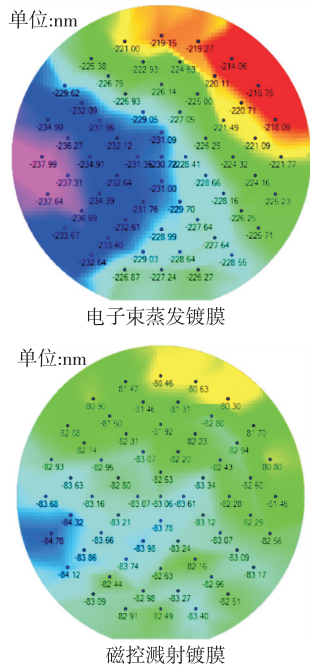


图 6 SiO₂ 腐蚀去除量

经上述分析可知,反应磁控溅射制备的 SiO₂ 薄膜更致密,粗糙度更小,弹性模量也越大,更适用作 TC-SAW SiO₂ 温补层。

2.4 TC-SAW 滤波器研制

基于上述对磁控溅射制备 SiO₂ 薄膜的研究,设计并制备了 TC-SAW 滤波器,并对其温补性能进行测试,测试结果如图 7 所示。由图可知,器件测试中心频率为 567.5 MHz, -55~85 °C 时频率共偏移 1.07 MHz,温度系数为 $-13.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

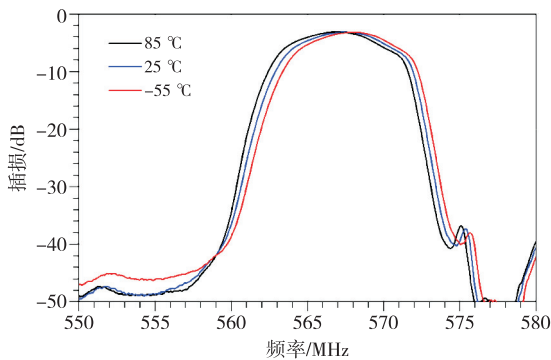


图 7 三温测试曲线

通过进一步优化磁控溅射镀膜工艺参数,制备出在 -55~85 °C 时频率偏移为 0.68 MHz,温度系数为 $-8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的 TC-SAW 滤波器。测试响应如图 8 所示。

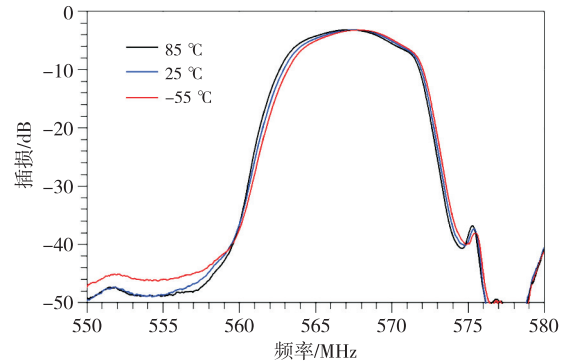


图 8 优化镀膜工艺后三温测试曲线

3 结束语

本文分别对电子束蒸发镀膜和反应磁控溅射制备的 SiO₂ 薄膜进行研究,包括薄膜结构、折射率、弹性模量、腐蚀速率等。测试结果表明,两种制备方式得到的 SiO₂ 薄膜均为非晶态,磁控溅射制备的 SiO₂ 薄膜比电子束蒸发镀膜具备更加致密的膜层结构、更小的表面粗糙度、更大的弹性模量、更小的腐蚀速率。根据反应磁控溅射制备了 SiO₂ 温补层,研制的滤波器在 -55~85 °C 时的频率漂移为 $-8.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] CHEN Pu, LI Guangxi, ZHU Zhiyuan. Development and application of SAW filter [J]. Micromachines, 2022,13,656.
- [2] 吴国建. 腔体滤波器的小型化研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [3] 王巍,滕洪波,王方,等. 高频低温漂 TC-SAW 滤波器设计[J]. 压电与声光 2023,45(4):544-553.
- [4] MATSUDA S, HARA M, MIURA M, et al. Application of fluorine doped SiO₂ films for temperature compensated SAW devices [C] // USA: IEEE, 2011: 76-78.
- [5] MATSUDA S, MIURA M, MATSUDA T, et al. Correlation between fluorine-doped SiO₂ films properties and the propagation loss for temperature compensated SAW devices[C]//USA:IEEE,2012: 1256.
- [6] ANDERS A. A structure zone diagram including plasma based deposition and ion etching [J]. Thin Solid Films, 2010, 518(15): 4087-4090.
- [7] 张剑,陈文革. 直流磁控溅射制备二氧化硅薄膜及其性能[J]. 中国表面工程,2013,26(1):34-39.