

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层对高温下 Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 电极导电稳定性的影响

刘兴鹏, 彭斌, 张万里, 朱俊

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 本工作研究了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层的厚度对高温下声表面波器件电极导电稳定性的影响, 采用激光分子束外延方法在 Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 电极上制备了不同厚度的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层。通过测量样品高温环境中的实时电阻, 发现 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 缓冲层的厚度对电极在高温下的导电稳定性的影响非常大。结果表明, 没有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层时, Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 电极的电阻升温至 800 °C 时开始急剧地增加。当包覆 40 nm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层时, 电极在升温至 900 °C 以上才出现电阻值剧烈增加的现象。而随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层厚度的增加, 电极的电阻在高温下的导电性能也更加稳定。SEM 测试结果表明, 经过 1000 °C、1 h 的高温测试后, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层越薄的 Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 电极, 结块形成的 Pt 颗粒越大与不连续的 Pt 空洞更多。这些结果为制备高温下稳定工作的声表面波器件提供了一条新的思路。

**关键词:** 高温; 导电稳定性; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层; 硅酸镓铟

中图分类号: O4 文献标识码: A

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating Layer on the High Temperature Conductive Stability of Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Film Electrode

LIU Xing-Peng, PENG Bin, ZHANG Wan-Li, ZHU Jun

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** To investigate the effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layers on the conductive stability of surface acoustic wave electrodes working at high temperature, laser molecular beam epitaxy was carried out to deposit a series of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multilayer electrodes coated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers of different thicknesses. The real-time resistance measurements of these samples were performed in the heat treatment. It can be found that the conductive stabilities of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples were significantly related to the thickness of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layers. For the sample without Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layer, its resistance began to increase when the temperature rose up to 800 °C. However, its resistances began to increase at 900, 1100 and 1150 °C, at the thickness of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layers of 40, 80 and 120 nm respectively. For the samples with 160 nm and 200 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layers, the resistances almost remained stable during the whole heating process. According to the surface topographies of these samples, it found that the sample without Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layer formed isolated Pt grains after high-temperature measurement. As a comparison, the samples with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layers did not form isolated Pt grains after high-temperature resistance measurement. After high-temperature measurement, the less discontinuous Pt voids appeared at the surface of the sample with a relative thicker Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layer. XRD tests of these samples, performed before and after high-temperature measurement, showed that Pt recrystallization at high temperature can be inhibited by the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating layer, and the thicker layer

收稿日期: 2018-08-13; 收到修改稿日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61223002) National Natural Science Foundation of China (61223002)

作者简介: 刘兴鹏(1987-), 男, 博士研究生. E-mail: tadyliu@outlook.com

通讯作者: 彭斌, 教授. E-mail: bpeng@uestc.edu.cn

could inhibit its recrystallization more effectively. These results provide a new way to prepare SAW devices which can work stably at high temperature.

**Key words:** high temperature; conductivity;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating layer;  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$

随着科技的进步,人们对高温下微型电子元器件的应用需求也越来越高<sup>[1-6]</sup>。声表面波器件作为一种常见的器件,以其高频化、高数字化、高性能与高可靠性而受到广泛关注<sup>[7-9]</sup>。但是,传统的声表面波器件在 800 °C 以上会失效<sup>[10]</sup>,这就导致其在高温环境中的应用局限性。声表面波传感器通常是由叉指换能器电极与压电衬底两部分组成。其中,硅酸镓镧压电材料( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , LGS)作为一种成熟的声表面波器件压电衬底,即使升温至 1400 °C 也不发生相变<sup>[11]</sup>。因此,高温下电极的导电稳定性就成了决定声表面波器件能否在高温下稳定工作的关键因素,并且国外已经对金属电极在高温下的导电性能与微观结构之间的关系开展研究。比如 Thompson<sup>[12]</sup>发现金属薄膜会在高温下发生结块,从而使其丧失导电性能。Sakharov 等<sup>[13]</sup>和 Aubert 等<sup>[14-15]</sup>制备了以 Ir 为基础的复合材料电极,发现它们能够在 800 °C 以上稳定工作。Rane 等<sup>[16-17]</sup>采用了钨作为电极材料,有效地阻止了 LGS 衬底中 Ga、Si 等原子的扩散,制备了能够在 800 °C 以上稳定工作的电极。Moulzolf 等<sup>[18]</sup>制备了能在 1000 °C 下稳定工作 4 h 的 Pt-ZrO<sub>2</sub> 与 Pt-HfO<sub>2</sub> 复合材料电极。除此之外, Aubert 等<sup>[19-22]</sup>使用 Ta 作为电极材料的黏附层,制备了能够在 1000 °C 下稳定工作至少半小时的声表面波器件。

根据本课题组前期研究可知,插入 ZnO 缓冲层与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  势垒层使得 Pt 电极具有更好的结晶质量,从而更有效地阻止高温下 Pt 结块<sup>[23]</sup>。通过该方法制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  电极能够在 1100 °C 下稳定地工作至少 3 h<sup>[24]</sup>。而本工作则主要立足于研究  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度对  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  电极在高温下导电性能稳定性的影响,测试了不同厚度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层所覆盖的 Pt/ZnO/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  电极在 1000 °C 下的导电稳定性,并分析得出了高温下电极微观结构变化与导电稳定性的关系。

## 1 实验方法

实验采用激光分子束外延方法沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  多层薄膜电极。在 LGS 衬底上依次溅射 60 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  势垒层、10 nm ZnO 缓冲层、30 nm Pt 电极层以及不同厚度的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层。溅射前, LGS 基片依次用丙酮与无水乙醇超声清洗 5 min 并使用

$\text{N}_2$  吹干。溅射时激光能量为 2.5 J/cm<sup>2</sup>, 激光频率为 3 Hz, 气压为  $3 \times 10^{-5}$  Pa, 沉积温度为 150 °C。所制备的电极尺寸为 4 mm × 9 mm, 采用 4 探针法实时测试电阻, 升温速率保持在 5 °C/min, 取 10 个样品的测试结果。

采用透射电子显微镜(TEM)与 X 射线衍射(XRD)分析薄膜的微观结构, 采用电子探针显微分析仪(EPMA)分析薄膜的成分分析, 并通过扫描电子显微镜(SEM)观察薄膜的表面形貌。

## 2 结果与讨论

当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度为 160 nm 时, 所制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜电极的横截面 TEM 照片, 如图 1 所示。由图 1(a)可以看出各层薄膜的准确厚度。图 1(b)为  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  界面处的高分辨晶格照片, 可以看到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层为非晶态, ZnO 层与 Pt 层都有很明显的层状特征, 表明 ZnO 与 Pt 都具有较强的择优取向。

制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  电极在高温下的导电稳定性随温度升高的变化关系如图 2(a)所示, 其中  $R_{\text{rt}}$  表示制备态时电极的电阻,  $\Delta R$  表示温度  $T$  下的电阻与室温下的电阻  $R_{\text{rt}}$  的差值。由图中可知, 在室温至 800 °C 范围内, 不同厚度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层所覆盖电极的电阻随温度的变化几乎一致, 都呈现出随温度升高而缓慢增加的趋势。这一阶段电极电阻值的增加是由高温下自由电子散射的增强所决定的, 与 Pt 在高温下的结块现象无关。对于无  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层的 Pt/ZnO/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  电极电阻升温至 800 °C 以上开始迅速增加, 当温度达到 900 °C 时, 电极已完全丧失导电性能。对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度为 40 nm 的电极, 电阻从 800 °C 开始慢慢增加, 当温度达到 1000 °C 以上时迅速增加, 并很快丧失导电性。对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度为 80 与 120 nm 的电极样品, 电阻会分别在 1100 及 1150 °C 下开始剧烈地变化。而对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度为 160 及 200 nm 的电极, 电阻在整个升温过程中都没有观察到显著的变化现象。

图 2(b)给出了不同厚度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层所覆盖 Pt/ZnO/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  电极在 1000 °C 保温时, 其电阻值随时间的变化关系。  $R_0$  表示温度刚刚升至 1000 °C 并开始保温时的电阻值,  $\Delta R$  表示在 1000 °C 保温一段时

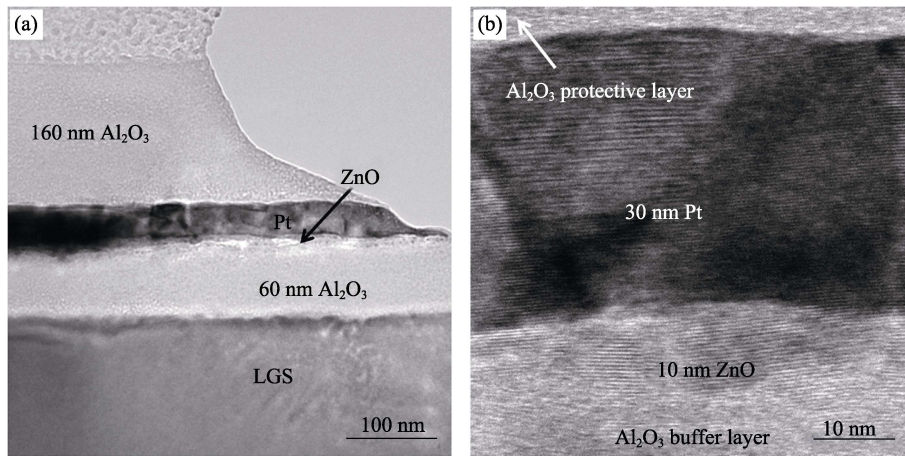


图 1 160 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层所覆盖的 Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 电极的横截面 TEM 照片

Fig. 1 (a) Cross-sectional TEM images of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film electrodes with 160 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer (b) the corresponding enlarged cross-sectional TEM image

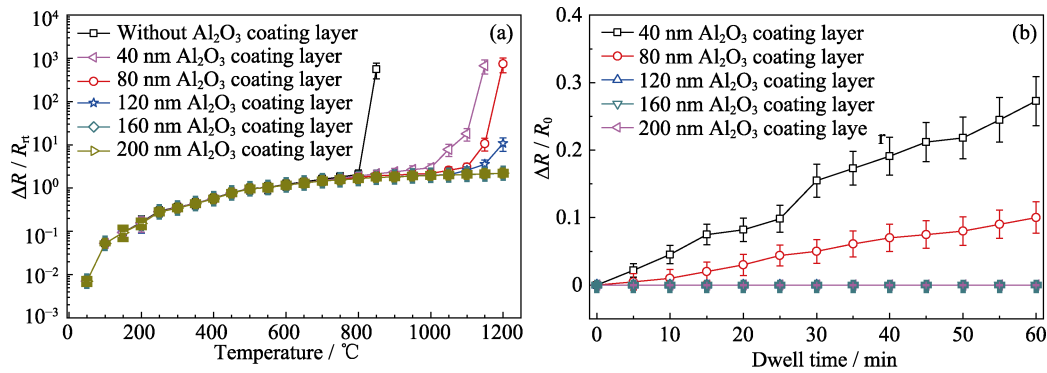


图 2 (a) 从室温升温至 1000 °C 过程中不同厚度的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层对 Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 电极导电性能的影响和(b)不同保护层厚度对电极在 1000 °C 下保温 1 h 的电阻影响

Fig. 2 Changes of resistances for the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film electrodes coated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers of different thicknesses as functions of (a) temperature and (b) dwell time at 1000 °C

间的电阻与  $R_0$  的差值。对于 40 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层的电极而言, 其电阻值随时间延长而缓慢增加, 在 1000 °C 下保温 1 h 后, 电阻值增加约 0.3 倍。而 80 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层的电极在 1000 °C 下保温时, 其电阻值的增加速率是小于 40 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层的薄膜电极的。除此以外, 120、160 以及 200 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层的 Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜电极的电阻值在保温过程中几乎不变。

图 3 为薄膜电极经 1000 °C 保温 1 h 后的表面形貌随 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层厚度的变化。当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层厚度为 200 nm 时, 高温退火后的电极表面仍然非常平整, 如图 3(a) 所示。当保护层厚度为 160 nm 时, 退火电极表面形成了一些很小的颗粒, 如图 3(b) 所示。当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层厚度为 120 nm 时, 高温退火后的电极表面会形成一些更大的 Pt 颗粒, 并且出现一些不连续的 Pt 空洞, 如图 3(c) 所示。随着保护层厚度进一步减小, 80 nm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层会导致制备的电极经高温退火后形成更多的 Pt 不连续空洞, 尺寸

可达 0.5 μm, 如图 3(d) 所示。当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层厚度为 40 nm 时, 高温退火后形成的不连续 Pt 空洞的尺寸增大至 1 μm, 如图 3(e) 所示。没有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层时, Pt/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 电极经 1000 °C 保温 1 h 后会形成完全隔绝的 Pt 颗粒, 如图 3(f) 所示。结合图 2 的电学性能分析, 高温退火后出现的不连续 Pt 空洞是导致所制备的薄膜电极高温电阻值增加的原因。

图 4(a) 为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层厚度为 80 nm 时的电极在 1000 °C 下退火 1 h 后的 SEM 表面形貌。采用电子探针显微分析仪(EPMA)测试了图 4(a) 红色方框区域中 Pt 元素的含量分布情况, 如图 4(b) 所示。图中蓝色表示该处几乎不存在 Pt 元素, 而红色表明此处 Pt 含量最高。通过对比蓝色区域所在的位置与图 4(a) 中深色的 Pt 空洞位置, 可以发现 SEM 照片中出现空洞的地方即为 Pt 元素缺失的区域, 证明高温退火后电极薄膜中存在不连续的 Pt 空洞。

由图 5(a~b) 的 XRD 结果可知, 在 1000 °C 高温退火 1 h 后, Pt(111) 衍射峰强度随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层厚

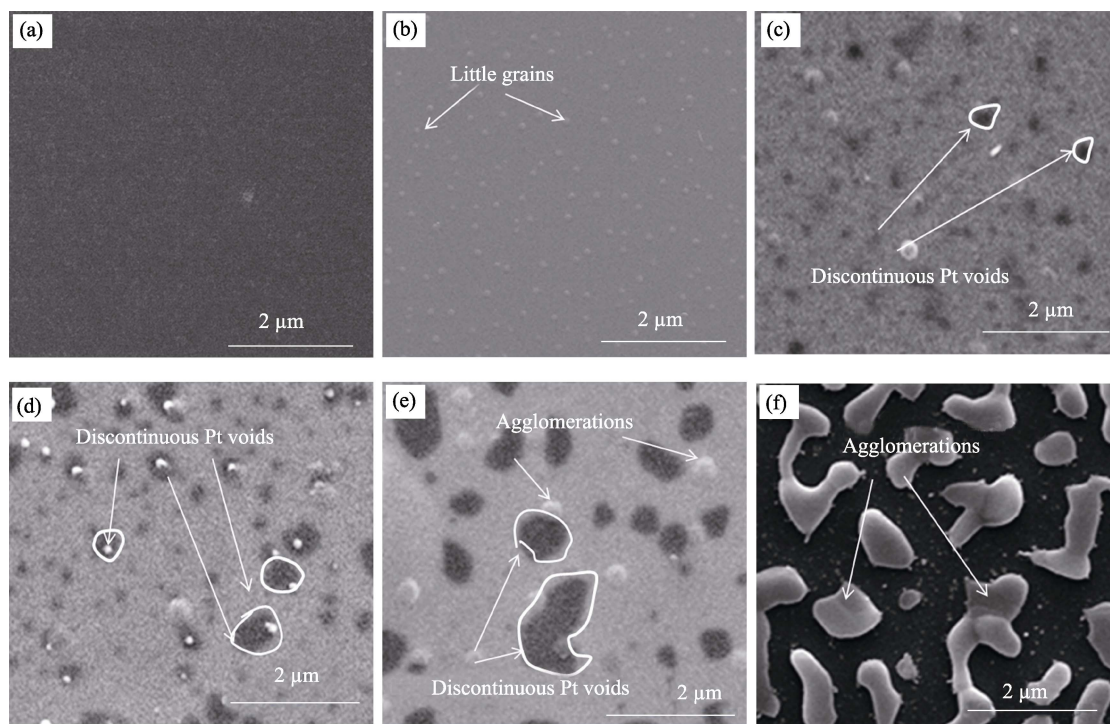


图 3 不同厚度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层的  $\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  电极在  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  下保温 1 h 后的 SEM 照片  
 Fig. 3 SEM surface topographies of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  film electrodes coated with (a) 200, (b) 160, (c) 120, (d) 80, (e) 40 nm, and (f) without  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layers after annealing at  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  for 1 h

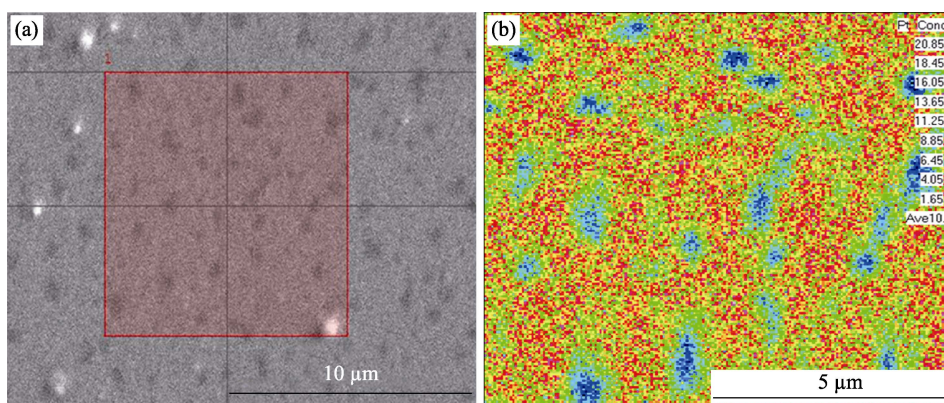


图 4  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  下保温 1 h 后, 80 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层的  $\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  电极的 (a) SEM 表面形貌照片和 (b) 电子能谱图  
 Fig. 4 (a) SEM and (b) EPMA images of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  film electrode coated with 80 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer after annealing at  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  for 1 h

度的增加而减小, 其摇摆曲线的半高宽随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度的增加而增加。结果表明,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层的厚度对 Pt 的高温重结晶影响明显, 更厚的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层能够更有效地阻止 Pt 的高温重结晶。图 5(c) 给出了在  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  下高温退火 1 h 前后,  $\text{Pt}(111)$  的  $2\theta$  衍射峰的半高宽与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度的关系, 由图中可以看出, 当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度不同时, 升温至  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  保温 1 h 后  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  电极的  $\text{Pt}(111)$  衍射峰峰半高宽随保护层厚度增加而降低, 相应的晶粒尺寸可用谢乐公式<sup>[25]</sup>来计算:

$$D = K\lambda / \beta \cos\theta \quad (1)$$

其中  $\beta$  为衍射峰的半高宽,  $D$  为沿着晶粒衍射面法线的晶粒尺寸,  $K$  为常数 0.9,  $\lambda$  为所用 X 射线的波长 ( $0.154056\text{ nm}$ ),  $\theta$  为布拉格衍射角。计算得到的沿着  $\text{Pt}(111)$  面法线的晶粒大小, 如图 5(d) 所示。经过  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  退火 1 h 后, 拥有更厚  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层的电极薄膜的 Pt 晶粒尺寸更小, 这是由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层越厚, 阻止 Pt 的重结晶越有效。除此之外, 还可以将晶粒的长大与图 3 中的 Pt 空洞的形成联系起来, 这是由于 Pt 的总量是一定的, 当 Pt 晶粒沿着  $\text{Pt}(111)$  面法线方向长大聚集时, 增加的那一部分 Pt 原子恰恰就是来源于原 Pt 空洞区域的原子的转移。

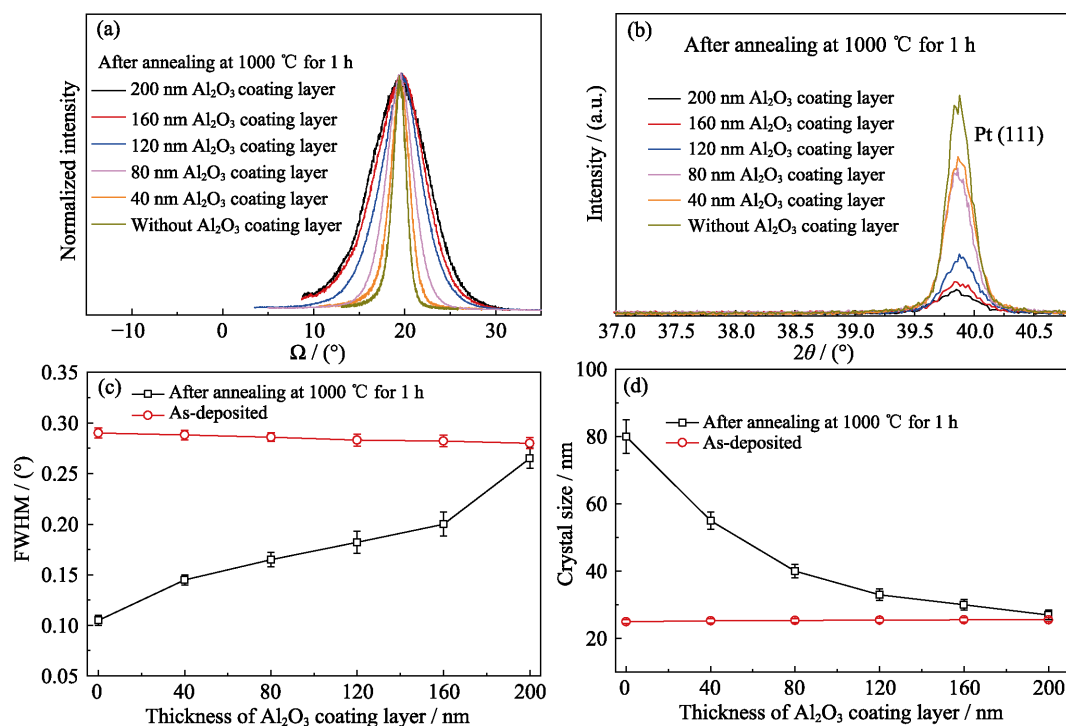


图 5 经过 1000 °C 高温退火 1 h 的不同厚度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层的电极薄膜的 XRD 分析结果  
 Fig. 5 XRD results of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  /Pt/ZnO/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  film electrodes coated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating layers of different thicknesses after annealing at 1000 °C for 1 h  
 (a) Rocking curves of Pt (111) peaks; (b)  $2\theta$ - $\theta$  scans of the Pt (111) peaks;  
 (c) Extracted FWHM from Fig.(b); (d) Pt grains size in the direction perpendicular to the Pt (111) plane

### 3 结论

在 LGS 衬底上制备了具有不同厚度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层的 Pt/ZnO/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜电极, 发现薄膜电极高温下的导电稳定性随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度的增加而增强。SEM 与 EPMA 的测试结果表明, 在高温下形成的不连续 Pt 空洞的数目与面积也随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层厚度的增加而减少。除此之外, XRD 结果表明 Pt 薄膜结块形成不连续的 Pt 空洞的过程中伴随着 Pt 的重结晶。而在高温环境中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层可以抑制 Pt 的重结晶与结块, 并且抑制效果随保护层厚度的增加而增强。因此,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层对制备电极的高温导电稳定性有着重大的影响。

#### 参考文献:

- [1] ALEEE C, VULPESCU L, COUSSEAU P, *et al.* Microsystem for high-temperature gas phase reactions. *Meas. Control.*, 2000, **33**(9): 265–268.
- [2] ARANA L R, SCHAEVITZ S B, FRANZ A J, *et al.* A microfabricated suspended-tube chemical reactor for thermally efficient fuel processing. *Micr. Syst.*, 2003, **12**(5): 600–612.
- [3] PATEL S V, DIBATTISTA M, GLAND J L, *et al.* Survivability of a silicon-based microelectronic gas-detector structure for high-temperature flow applications. *Sens. Actu. B*, 1996, **37**(1/2): 27–35.
- [4] BRIAND D, BEAUDOIN F, COURBAT J, *et al.* Failure analysis of micro-heating elements suspended on thin membranes. *Micr. Reli.*, 2005, **45**(9/10/11): 1786–1789.
- [5] COURBAT J, BRIAND D, DE ROOIJ N F, *et al.* Reliability improvement of suspended platinum-based micro-heating elements. *Sens. Actu. A*, 2008, **142**(1): 284–291.
- [6] ESCH H, HUYBERECHTS G, MERTENS R, *et al.* The stability of Pt heater and temperature sensing elements for silicon integrated tin oxide gas sensors. *Sens. Actu. B*, 2000, **65**(1/2/3): 190–192.
- [7] KANG A, ZHANG C R, JIA X J, *et al.* SAW-RFID enabled temperature sensor. *Sens. Actu. A Phys.*, 2013, **201**: 105–113.
- [8] RODRIGUEZ-MADRID J G, IRIARTE G F, WILLIAMS O A, *et al.* High precision pressure sensors based on SAW devices in the GHz range. *Sens. Actu. A*, 2013, **189**: 364–369.
- [9] SHU L, PENG B, YANG Z B, *et al.* High-temperature SAW wireless strain sensor with langasite. *Sensors*, 2015, **15**(11): 28531–28542.
- [10] MROSK J W, BERGER L, ETTL C, *et al.* Materials issues of SAW sensors for high-temperature applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2001, **48**(2): 258–264.
- [11] BAO S M, KE Y B, ZHENG Y Q, *et al.* A method for achieving monotonic frequency–temperature response for langasite surface-acoustic-wave high-temperature sensor. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2016, **55**(2): 027301–1–5.
- [12] THOMPSON C V. Solid-state dewetting of thin films. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2012, **42**: 399–434.
- [13] SAKHAROV S, ZABELIN A, MEDVEDEV A, *et al.* Technological Process and Resonator Design Optimization of Ir/LGS High Temperature SAW Devices. IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2014: 1632–1635.
- [14] AUBERT T, ELMAZRIA O, BARDONG J, *et al.* Iridium Interdigital Transducers for Ultra-high-temperature SAW Devices. IEEE

- International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2011: 2065–2068
- [15] TAGUETT A, AUBERT T, LOMELLO M, *et al.* Ir-Rh thin films as high-temperature electrodes for surface acoustic wave sensor applications. *Sens. Actu. A*, 2016, **243**: 35–42.
- [16] RANE G K, SEIFERT M, MENZEL S, *et al.* Tungsten as a chemically-stable electrode material on Ga-containing piezoelectric substrates langasite and catangasite for high-temperature SAW devices. *Materials*, 2016, **9(2)**: 101.
- [17] RANE G K, MENZEL S, SEIFERT M, *et al.* Tungsten/molybdenum thin films for application as interdigital transducers on high temperature stable piezoelectric substrates  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  and  $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ . *Materials Science and Engineering B*, 2015, **202**: 31–38.
- [18] MOULZOL S C, FRANKEL D J, PEREIRA DA CUNHA M, *et al.* Electrically conductive Pt-Rh/ $\text{ZrO}_2$  and Pt-Rh/ $\text{HfO}_2$  nanocomposite electrodes for high temperature harsh environment sensors. *Proc. of SPIE*, 2013, **8763**: 87630F.
- [19] AUBERT T, ELMAZRIA O, ASSOUAR B, *et al.* Surface acoustic wave devices based on AlN/sapphire structure for high temperature applications. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96(20)**: 203503–1–3.
- [20] AUBERT T, ELMAZRIA O, ASSOUAR B, *et al.* Behavior of platinum/tantalum as interdigital transducers for SAW devices in high-temperature environments. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, **58(3)**: 603–610.
- [21] AUBERT T, ELMAZRIA O, ASSOUAR B, *et al.* Investigations on AlN/Sapphire piezoelectric bilayer structure for high-temperature SAW applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, **59(5)**: 999–1005.
- [22] ELMAZRIA O, AUBERT T. Wireless SAW sensor for high temperature applications: material point of view. *Proc. of SPIE*, 2011, **8066**: 806602–1–10.
- [23] LIU X P, PENG B, ZHANG W L, *et al.* Novel AlN/Pt/ZnO electrode for high temperature SAW sensors. *Materials*, 2017, **10(1)**: 69.
- [24] LIU X P, PENG B, ZHANG W L, *et al.* Improvement of high-temperature stability of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  film electrode for SAW devices by using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  barrier layer. *Materials*, 2017, **10(12)**: 1377.
- [25] KHODAIR Z, KAMIL A A, ABDALAAH Y K. Effect of annealing on structural and optical properties of  $\text{Ni}_{(1-x)}\text{Mn}_x\text{O}$  nanostructures thin films. *Physica B: Condensed Matter*, 2016, **503**: 55–63.