

退火工艺对薄膜铂电阻性能及微观结构的影响

石鑫浩^{1,2}, 李慧千^{1,2}, 李若朋², 郭康贤^{1*}, 许玉方²

¹广州大学物理与材料科学学院, 广东 广州

²广州德芯半导体科技有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月9日; 录用日期: 2025年12月10日; 发布日期: 2025年12月22日

摘要

通过MEMS工艺在氧化铝陶瓷衬底上制备了薄膜铂电阻温度传感器, 对薄膜铂电阻进行不同温度和时间退火处理。结果表明, 薄膜铂电阻在1000℃退火1 h后的TCR值达到最大值3654 ppm/℃, 退火处理后样品的线性度和均匀性得到了显著提高; 随着退火温度的升高, 铂晶粒的尺寸不断增大, 薄膜表面的凹坑和孔洞也逐渐得到“修复”, 退火后薄膜的组织结构由疏松纤维状向等轴晶状转变, 晶粒更倾向沿着[111]晶向择优生长, 从而降低电阻率, 提高铂薄膜的TCR。

关键词

铂薄膜, 温度传感器, MEMS, 退火, TCR

The Effect of Annealing Process on the Properties and Microstructure of Thin-Film Platinum Resistors

Xinhao Shi^{1,2}, Huiqian Li^{1,2}, Ruopeng Li², Kangxian Guo^{1*}, Yufang Xu²

¹School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

²Guangzhou Dexin Semiconductor Technology Co. Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: November 9, 2025; accepted: December 10, 2025; published: December 22, 2025

Abstract

Thin-film platinum resistor temperature sensors were fabricated on alumina ceramic substrates using MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technology, and the thin-film platinum resistors were subjected to annealing treatments at different temperatures and durations. The results show

*通讯作者。

文章引用: 石鑫浩, 李慧千, 李若朋, 郭康贤, 许玉方. 退火工艺对薄膜铂电阻性能及微观结构的影响[J]. 仪器与设备, 2025, 13(4): 681-688. DOI: 10.12677/iae.2025.134082

that the Temperature Coefficient of Resistance (TCR) of the thin-film platinum resistor reaches a maximum value of 3654 ppm/°C after annealing at 1000°C for 1 h. Additionally, the linearity and uniformity of the samples are significantly improved after annealing. With the increase of annealing temperature, the size of platinum grains increases continuously, and the pits and holes on the film surface are gradually “repaired”. After annealing, the microstructure of the film transforms from a loose fibrous structure to an equiaxed crystalline structure, and the grains tend to grow preferentially along the [111] crystal orientation. This transformation reduces the resistivity and improves the TCR of the platinum thin film.

Keywords

Platinum Thin Film, Temperature Sensor, MEMS, Annealing, TCR

Copyright © 2025 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/>



Open Access

1. 引言

电阻式温度传感器是指利用导体或半导体的电阻值随温度变化而变化的一种测温元件。其中，铂的化学性质稳定，导电及导热性能良好，在高温高压[1]、强腐蚀等极端条件下也能稳定使用[2][3]，制成的铂电阻具有良好的电阻-温度线性关系[4][5]和可靠性，在温度测量领域有着广泛应用。随着半导体工艺的发展，微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术被广泛应用于石油、化工、食品、汽车工业等各个领域[6]。采用 MEMS 技术制备的薄膜铂电阻相比于传统的绕线式铂电阻，具有成本低、体积小、易于集成、工艺稳定性高、一致性好等优点[7]-[9]。目前，相关研究主要侧重于制备过程中的工艺参数对薄膜铂电阻关键性能参数电阻温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR)的影响，如衬底粗糙度[8]、薄膜制备中的溅射气压和功率[2]、退火温度和时间[10][11]等因素，这些研究得到的薄膜铂电阻温度传感器的 TCR 最大值从低到高分别为 2850, 3200, 3434, 3439 ppm/°C，与国际标准 3850 ppm/°C 仍有较大差距，且针对提高薄膜铂电阻芯片 TCR 机理的研究也十分缺乏。

本研究通过 MEMS 工艺在氧化铝陶瓷衬底上制备了薄膜铂电阻，研究了不同退火温度和时间下薄膜铂电阻 TCR 的变化情况和退火处理对薄膜铂电阻微观组织结构的影响并探讨其影响薄膜铂电阻 TCR 变化的机理。

2. 薄膜铂电阻的制备及表征测试

2.1. 薄膜铂电阻制备工艺流程

采用 MEMS 工艺制备薄膜铂电阻，工艺流程如图 1 所示。主要包括：(a) 使用丙酮、异丙醇清洗氧化铝陶瓷基片上的杂质；(b) 采用磁控溅射在氧化铝陶瓷衬底上溅射厚度为 800 nm 的 Pt 薄膜，铂靶材的纯度为 99.9999%，溅射功率为 200 W，氩气压力为 30 mtorr，腔室背景真空度为 5×10^{-4} Pa；(c) 通过旋涂的方式将正性光刻胶涂在基片表面；(d) 通过紫外曝光和显影得到铂电阻图形；(e) 采用离子束刻蚀将无光刻胶覆盖的铂层去除，得到所需的铂电阻图案；(f) 通过等离子体清洗去除剩余的光刻胶。

2.2. 表征及电阻测试方法

通过高分辨率场发射扫描电镜(FE-SEM; 日立 SU8220)来表征铂薄膜表面的微观形貌，使用场发射扫描电子显微镜(蔡司 SIGMA500)搭配电子背散射衍射仪(牛津 Nordlys Max3)对铂薄膜截面的组织结构和晶

体的生长取向进行分析。

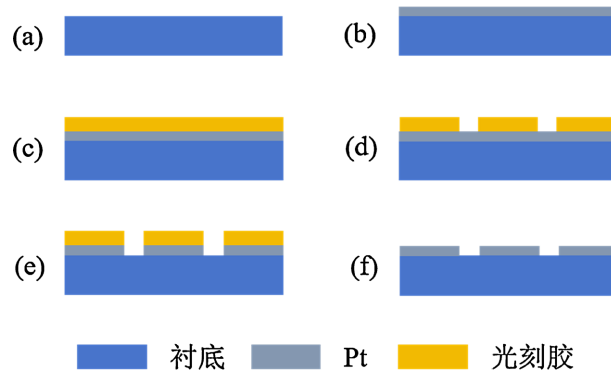


Figure 1. Fabrication process flow of thin-film platinum resistors
图 1. 薄膜铂电阻的制备工艺流程

在加热台上测试了 20℃~100℃ 下铂电阻的电阻值，在 Origin 中拟合得到电阻 - 温度依赖关系，薄膜铂电阻关键电性能参数 TCR 通过以下公式计算得出：

$$TCR = \frac{(R_1 - R_0)}{R_0 \cdot (T_1 - T_0)} = \frac{dR}{R_0 \cdot dT} = \frac{d\rho}{\rho_0 \cdot dT}$$

其中 R_0 和 R_1 分别是 T_0 和 T_1 温度下铂电阻的电阻值。

3. 结果与讨论

3.1. 退火处理后的电性能测试

将样品放置于马弗炉内，在空气中进行退火，退火温度为 700℃~1200℃，升温速率 10℃/min，保温时间 1 h。

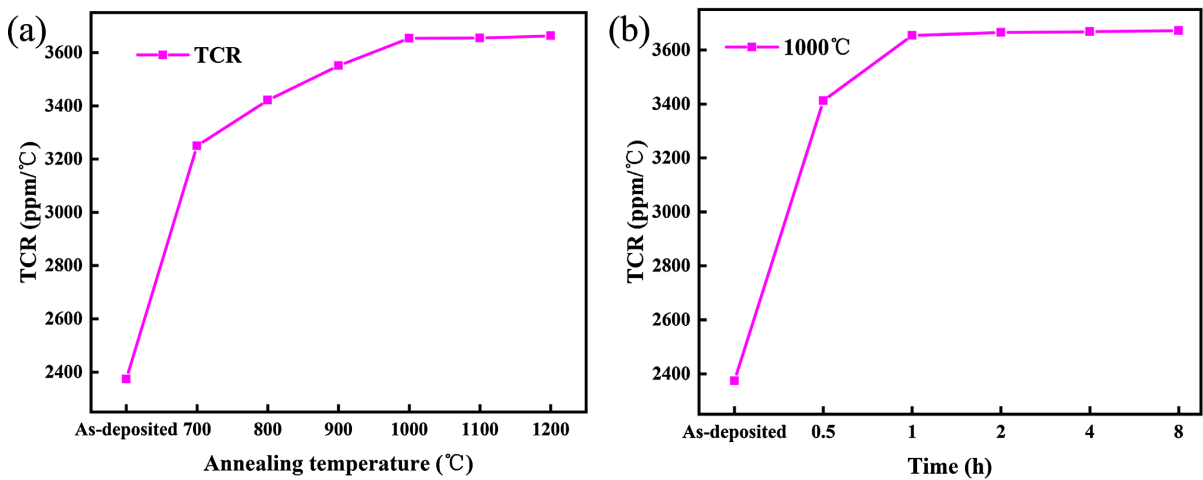


Figure 2. TCR variation curves of thin-film platinum resistors at different annealing temperatures (a) and times (b)
图 2. 不同退火温度(a)和时间(b)下薄膜铂电阻的 TCR 变化曲线

所得结果如图 2(a)所示，未退火时薄膜铂电阻的 TCR 在 2370 ppm/℃ 左右，在进行退火处理后，样品的 TCR 值均显著增大，在 700℃~1000℃ 的范围内，薄膜铂电阻的 TCR 会随着退火温度的升高而增大。

但当退火温度达到 1000°C 以上时, TCR 几乎没有变化, 这是因为铂薄膜的晶粒会随着退火温度的升高而长大, 当退火温度达到 1000°C 时, 晶粒生长已经达到了饱和状态, 继续提高温度, 晶粒的生长速率变得非常缓慢甚至停滞, 晶界等微观结构已基本稳定, 内部应力已基本得到释放, TCR 不会再出现明显变化。除了退火温度以外, 适宜的退火时间也非常重要, 时间过短会导致材料内部原子扩散、晶粒生长和缺陷修复等过程不够充分, 材料的微观结构无法达到预期的稳定状态; 时间过长可能会使晶粒过度长大, 导致材料性能下降。因此, 对铂薄膜在 1000°C 下进行不同时间的退火处理, 退火时间设置为 $0.5\sim 8\text{ h}$ 。其 TCR 变化曲线如图 2(b) 所示, 当退火时间从 0.5 h 增加到 1 h 时, 薄膜铂电阻的 TCR 变化显著, 从 $3412\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 增大到了 $3654\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, 继续增加退火时间, TCR 只有略微变化, 最大增长也只有 $20\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 左右, 说明在 1000°C 下退火 1 h 足够薄膜完成上述结构调整和物理化学过程, 在 $1\sim 8\text{ h}$ 内, 继续延长退火时间也不会使薄膜铂电阻的 TCR 发生显著变化。

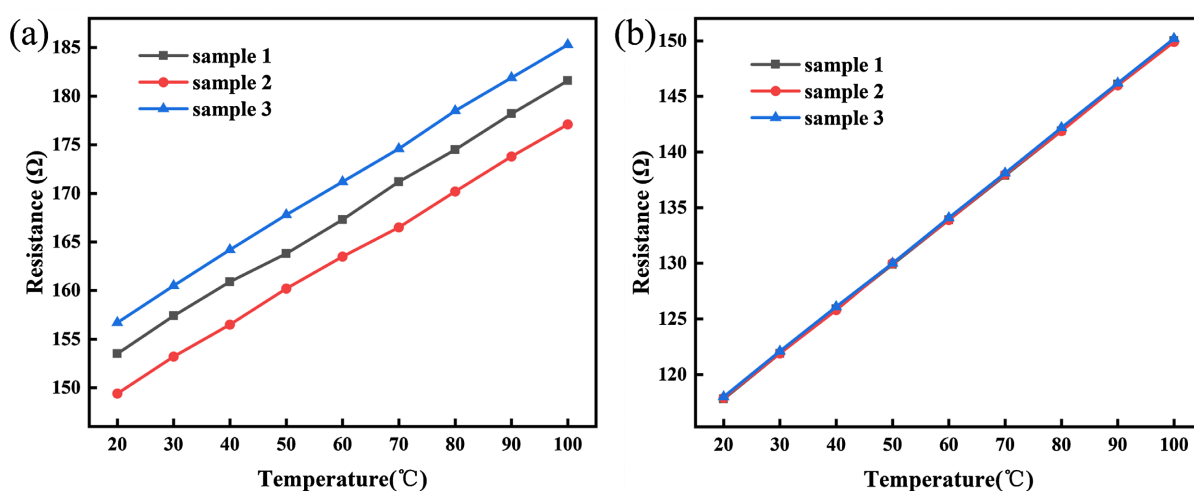


Figure 3. R-T relationships of samples (a) unannealed and (b) annealed at 1000°C for 1 h

图 3. (a) 未退火和 (b) 1000°C 退火 1 h 后样品的 R-T 关系

为了对比退火前后薄膜铂电阻的性能变化情况, 将未退火和在 1000°C 退火 1 h 后的各三组样品放入恒温加热台中测试 $20^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 下的电阻值, 随后在 Origin 中线性拟合后得到电阻 - 温度依赖关系。结果如图 3 所示, 在 $20^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内, 未退火的三组样品拟合后的 R-T 曲线均具有良好的线性度, 其线性相关系数 R^2 在 0.9996 左右, 而经过 1000°C 退火 1 h 后的三组样品相比于未退火的样品具有更佳的线性度, 其线性相关系数达到了 0.99998 左右。未退火的三组样品拟合后的 R-T 曲线斜率接近, 但初始阻值偏差较大, 这表明退火前样品的均匀性较差, 相比之下, 1000°C 退火 1 h 后的三组样品拟合后的曲线几乎重合, 样品的均匀性得到极大改善。

3.2. 退火工艺对铂薄膜微观组织形貌的影响

通过对样品进行 SEM 表征测试来进一步观察退火工艺对铂薄膜微观组织的影响, 不同退火状态下的样品的显微组织形貌如图 4 所示。未退火的铂薄膜表面虽然有凹坑和孔洞存在, 但薄膜仍是较为连续且完整的, 在高放大倍率下, 可以看到薄膜由许多非常细小的铂晶粒组成, 晶粒尺寸在几十纳米左右。经过 700°C 退火处理后, 在较低放大倍率下的图像中可以看到, 薄膜表面的缺陷有被修复的趋势, 凹坑和孔洞被逐渐“填补”, 相比于退火之前的样品晶粒尺寸也较大, 说明退火过程中晶粒的长大有利于薄膜表面缺陷的修复。进一步提高退火温度, 从图 4(e)~(j) 可以看到, 在 800°C 以上进行高温退火后, 薄膜表面

的凹坑和孔洞基本得到修复，随之出现的由大晶粒团聚在一起形成的团聚体，其密度也在逐渐增加。

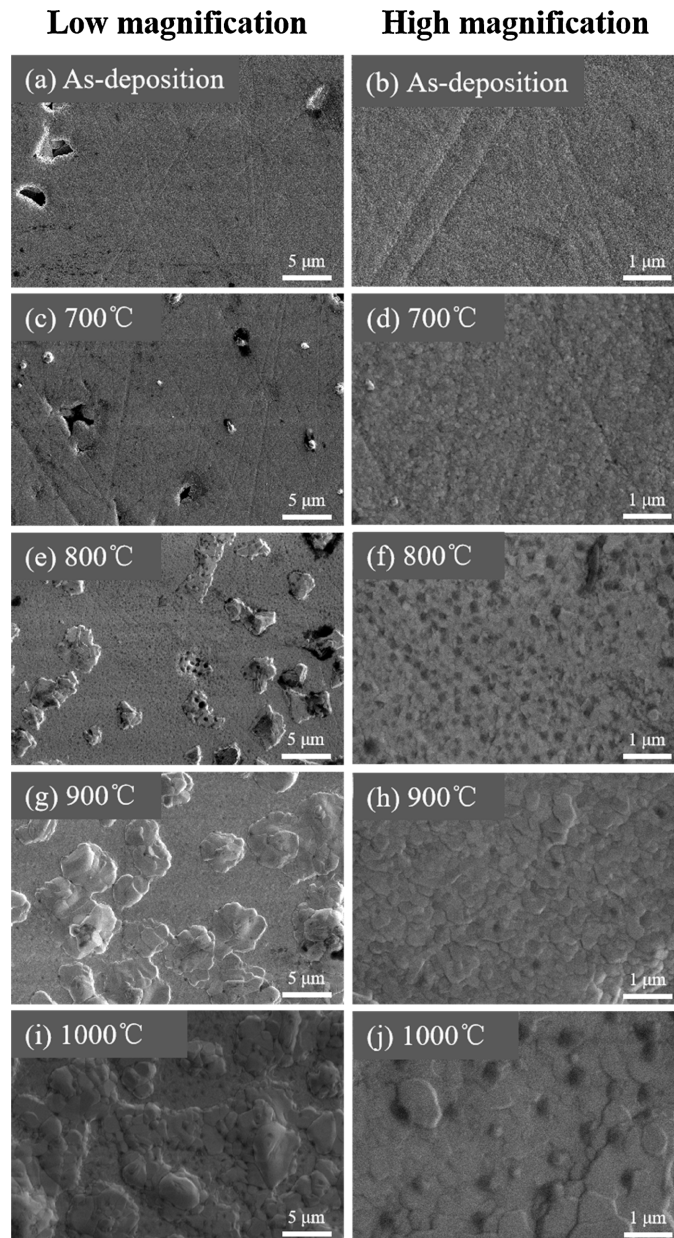


Figure 4. SEM images at low magnification: (a) unannealed; (c) 700°C; (e) 800°C; (g) 900°C; (i) 1000°C; and SEM images at high magnification: (b) unannealed; (d) 700°C; (f) 800°C; (h) 900°C; (j) 1000°C

图 4. 低放大倍率下的 SEM 图像: (a) 未退火; (c) 700°C; (e) 800°C; (g) 900°C; (i) 1000°C 和高放大倍率下的 SEM 图像: (b) 未退火; (d) 700°C; (f) 800°C; (h) 900°C; (j) 1000°C

在高放大倍率下，能明显看到随着退火温度升高，晶粒的尺寸在逐渐增大，到 1000°C 时最大的晶粒粒径已经达到了 1 μm 左右，这是由于在高温退火时，原子的表面活动能力增加，有足够的能量进行快速扩散，薄膜中的原子会克服晶格能垒，从晶界等位置向能量较低的晶粒内部迁移，使得小晶粒逐渐长大，同时长大的晶粒也会不断吞并周围的小晶粒使得其尺寸进一步增大，从而减小晶界面积，降低薄膜的总能量。由于单位体积内相对晶界面积减小，导致晶界对电子运动的阻碍作用减弱，因此薄膜电阻率会降

低,从而使得 TCR 增大。

为了更好地观察晶粒的生长情况,通过 EBSD 测试来观察未退火和 1000℃退火 1 h 后铂薄膜截面的晶体结构和取向信息。如图 5 所示,未退火的薄膜表面十分平整,厚度均匀,而在 1000℃退火后薄膜表面凹凸不平,不同区域的厚度也有所差别,由前文可知这是退火后晶粒长大和大晶粒团聚现象引发的表面粗糙度增加。从退火前后的花样质量图可以看到,未退火时薄膜的组织结构是由疏松纤维状的晶粒组成,在 1000℃退火 1 h 后晶粒逐渐长大,薄膜组织由等轴状晶粒构成。

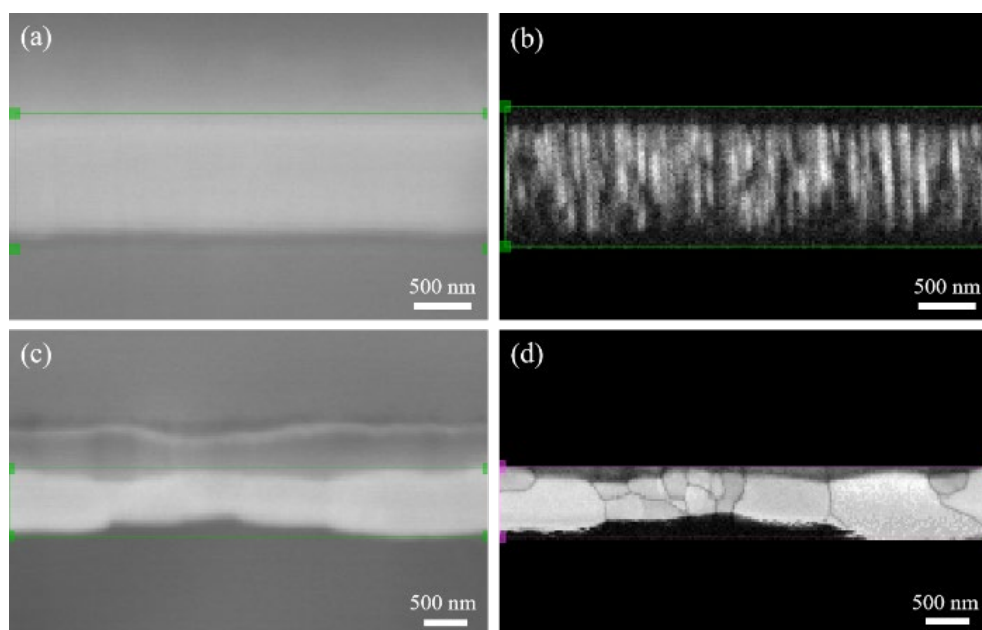


Figure 5. Microscopic morphology images of the platinum film cross-section: (a) unannealed; (c) annealed at 1000°C for 1 h; and pattern quality images: (b) unannealed; (d) annealed at 1000°C for 1 h

图 5. 铂薄膜截面的显微形貌图: (a) 未退火; (c) 1000℃退火 1 h 和花样质量图: (b) 未退火; (d) 1000℃退火 1 h

根据薄膜的结构区域模型,在低温的条件下沉积薄膜时,由于沉积粒子的能量较低,吸附原子的扩散速率较小,成核数目有限,容易生长成这种疏松纤维状的组织结构。从图 5(b)中可以看到,晶粒边界处十分疏松,晶粒之间有明显的空隙,这种结构缺陷密度较高,残余应力也较大。经过 1000℃高温退火后,吸附原子的扩散速率增加,晶粒逐渐长大,出现由等轴晶粒形成的薄膜结构。如图 5(d)中所示,这种结构非常致密,晶粒与晶粒之间的边界清晰可见,部分晶粒的尺寸甚至会生长到贯穿薄膜厚度的大小,导致薄膜表面凹凸不平。

对未退火和 1000℃退火 1 h 后的样品截面进行了晶体取向分析,绘制出的反极图如图 6 所示。可以看到,未退火时薄膜中晶粒的生长缺乏足够的能量来进行充分的调整和重排,因此晶粒中呈现出多种不同的取向,在某些特定方向上的取向分布并没有占据优势,而在 1000℃退火 1 h 后的样品中表现出明显的择优取向,在[111]晶向上取向的晶粒相对更多。由于铂是面心立方晶体结构,其(111)面是密排面,原子排列最为紧密,表面能最低。根据能量最低原理,晶体在生长过程中会倾向于形成表面能低的晶面,以降低系统的总能量,因此退火时铂晶粒容易沿着[111]方向生长,形成[111]取向的晶粒。

由于[111]晶向上的原子排列紧密,原子间结合力强,外力作用下,原子沿[111]晶向滑移难度较大,使铂在该方向上具有较高的屈服强度,而且[111]晶向是电子传输的有利方向,电子散射几率小,退火促使铂晶粒沿[111]晶向生长,可降低电阻率,提高铂薄膜的 TCR,使其电性能更加优异。

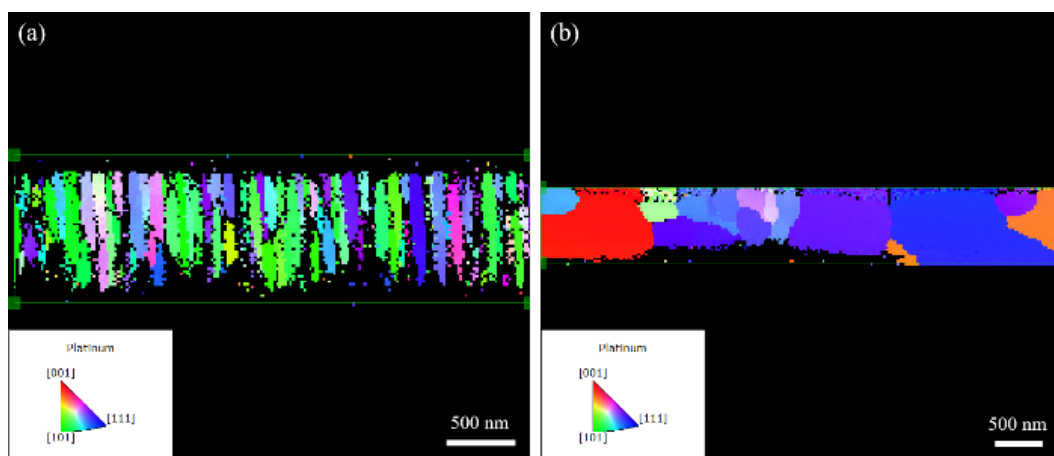


Figure 6. Inverse pole figures (IPF) of the platinum film cross-section: (a) unannealed; (b) annealed at 1000°C for 1 h
图 6. 铂薄膜截面的反极图(IPF): (a) 未退火; (b) 1000°C退火 1 h

4. 结论

采用 MEMS 工艺在氧化铝陶瓷衬底上制备了薄膜铂电阻, 并分别对薄膜铂电阻进行了不同温度和时间退火处理, 最终得到的薄膜铂电阻 TCR 最大值达到了 3654 ppm/°C, 且线性度和均匀性相较于退火前得到了显著提高, 有利于薄膜铂电阻温度传感器的批量化生产; 同时对于提升薄膜铂电阻 TCR 的机理进行了研究, 铂晶粒沿着[111]晶向择优生长, 可降低薄膜铂电阻的电阻率, 提高其 TCR 值, 对后续薄膜铂电阻性能的优化提供一些理论支持。

参考文献

- [1] Vasiliev, A.A., Pislakov, A.V., Sokolov, A.V., Samotaev, N.N., Soloviev, S.A., Oblov, K., *et al.* (2016) Non-Silicon MEMS Platforms for Gas Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **224**, 700-713. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.10.066>
- [2] Schmidl, G., Dellith, J., Kessler, E. and Schinkel, U. (2014) The Influence of Deposition Parameters on Ti/Pt Film Growth by Confocal Sputtering and the Temperature Dependent Resistance Behavior Using SiO_x and Al₂O₃ Substrates. *Applied Surface Science*, **313**, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.203>
- [3] Kumar, M., Kumar, T., Pandey, R.K., Pathak, S., Vandana, and Kumar, R. (2021) Roughening and Sputtering Kinetics of Pt Thin Films at Different Angles of Ion Irradiation. *Materials Letters*, **303**, Article ID: 130474. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130474>
- [4] Wang, L., Jin, Z., Paeng, D., Rho, Y., Long, J., Eliceiri, M., *et al.* (2019) Laser Machined Ultrathin Microscale Platinum Thermometers on Transparent Oxide Substrates. *Sensors and Actuators A: Physical*, **300**, Article ID: 111657. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111657>
- [5] Molina-Lopez, F., de Araújo, R.E., Jarrier, M., Courbat, J., Briand, D. and de Rooij, N.F. (2014) Study of Bending Reliability and Electrical Properties of Platinum Lines on Flexible Polyimide Substrates. *Microelectronics Reliability*, **54**, 2542-2549. <https://doi.org/10.1016/j.micrel.2014.06.015>
- [6] Rusanov, R., Rank, H., Fuchs, T., Mueller-Fiedler, R. and Kraft, O. (2015) Reliability Characterization of a Soot Particle Sensor in Terms of Stress- and Electromigration in Thin-Film Platinum. *Microsystem Technologies*, **22**, 481-493. <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2576-6>
- [7] Lok, R., Karacali, H., Varol, A., Camli, U. and Yilmaz, E. (2022) Fabrication and Characterization of Resistance Temperature Detector by Smart Mask Design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **122**, 147-158. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09041-2>
- [8] Lv, W., Wang, Y., Shi, W., Cheng, W., Huang, R., Zhong, R., *et al.* (2022) Role of Micro-Nano Fabrication Process on the Temperature Coefficient of Resistance of Platinum Thin Films Resistance Temperature Detector. *Materials Letters*, **309**, Article ID: 131313. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131313>
- [9] Shao, L., Zhao, X., Gu, S., Ma, Y., Liu, Y., Deng, X., *et al.* (2021) Pt Thin-Film Resistance Temperature Detector on

- Flexible Hastelloy Tapes. *Vacuum*, **184**, Article ID: 109966. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109966>
- [10] Jiao, R., Wang, K., Xin, Y., Sun, H., Gong, J., Yu, L., *et al.* (2023) Enhancing the Temperature Coefficient of Resistance of Pt Thin Film Resistance-Temperature-Detector by Short-Time Annealing. *Ceramics International*, **49**, 12596-12603. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.12.122>
- [11] Pang, Y., Zhao, N., Ruan, Y., Sun, L. and Zhang, C. (2023) Effects of Oxygen Partial Pressure and Thermal Annealing on the Electrical Properties and High-Temperature Stability of Pt Thin-Film Resistors. *Chemosensors*, **11**, Article 285. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11050285>