

# 阳极氧化制备TiO<sub>2</sub>多孔薄膜及其气敏传感特性研究

许永康<sup>1\*</sup>, 罗锦鹏<sup>1\*</sup>, 时吉进<sup>1</sup>, 杨为家<sup>1,2#</sup>, 陈梅<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>五邑大学应用物理与材料学院, 广东 江门

<sup>2</sup>江门市柔性电极材料及其应用工程技术研究中心, 广东 江门

收稿日期: 2024年10月16日; 录用日期: 2024年11月12日; 发布日期: 2024年11月20日

## 摘要

二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)是一种气敏传感材料, 受到比表面积小的影响, TiO<sub>2</sub>薄膜型气敏传感器的性能普遍不理想。本研究采用阳极氧化制备了TiO<sub>2</sub>多孔薄膜, 以改善其气敏传感特性。SEM观察发现工作电压是影响TiO<sub>2</sub>多孔薄膜形貌的关键因素: 在醇溶液体系中, 45~60 V是制备TiO<sub>2</sub>多孔薄膜的理想工作电压。研究还发现, 0.05 mm的Ti片更有利于获得大孔径的TiO<sub>2</sub>多孔薄膜。XRD和Raman光谱都证实所制备的样品是TiO<sub>2</sub>多孔薄膜, 同时Raman光谱也确认了Pt修饰能够显著增强其光谱性能。气敏传感特性表明Pt修饰后TiO<sub>2</sub>多孔薄膜具有更加优异的气敏传感性能。

## 关键词

阳极氧化, TiO<sub>2</sub>, 多孔薄膜, 气敏传感

# Preparation of TiO<sub>2</sub> Porous Film by Anodic Oxidation and Its Gas Sensing Properties

Yongkang Xu<sup>1\*</sup>, Jinpeng Luo<sup>1\*</sup>, Jijin Shi<sup>1</sup>, Weijia Yang<sup>1,2#</sup>, Mei Chen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen Guangdong

<sup>2</sup>Jiangmen Flexible Electrode Materials and Its Application Engineering Technology Research Center, Jiangmen Guangdong

Received: Oct. 16<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 12<sup>th</sup>, 2024; published: Nov. 20<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) is a kind of gas sensing material, which is affected by the small specific

\*共同第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 许永康, 罗锦鹏, 时吉进, 杨为家, 陈梅. 阳极氧化制备 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜及其气敏传感特性研究[J]. 应用物理, 2024, 14(11): 713-720. DOI: 10.12677/app.2024.1411076

surface area. The performance of TiO<sub>2</sub> thin film gas sensor is generally not ideal. In this study, TiO<sub>2</sub> porous films were prepared by anodic oxidation to improve its gas sensing properties. SEM observation shows that the working voltage is the key factor affecting the morphology of TiO<sub>2</sub> porous films. In the alcohol solution system, 45~60 V is the ideal working voltage for the preparation of TiO<sub>2</sub> porous films. It is also found that 0.05 mm thick Ti sheet is more conducive to obtain large pore size TiO<sub>2</sub> porous film. Both XRD and Raman spectra confirmed that the prepared samples were TiO<sub>2</sub> porous films, and it was also confirmed that Pt modification could significantly enhance their spectral properties. The gas sensing properties show that the Pt modified TiO<sub>2</sub> porous film has more excellent gas sensing properties.

## Keywords

Anodic Oxidation, TiO<sub>2</sub>, Porous Film, Gas Sensing

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/>



Open Access

## 1. 引言

二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)是一种典型的直接带隙半导体材料,它具有良好的化学稳定性和较好的物理性能,在光催化[1]-[3]、紫外光电探测器[1]、气敏传感器[4]-[6]等领域具有广泛应用前景[7] [8]。在气敏传感器领域,纳米结构和大比表面积是影响器件性能的关键因素[6]。因此,制备大比表面积的 TiO<sub>2</sub> 纳米材料是 TiO<sub>2</sub> 气敏传感器的一个重要发展方向。

在众多纳米结构当中,规则纳米多孔薄膜是实现高性能气敏传感器的一种理想结构[6]。目前制备纳米多孔薄膜的方法有多孔 Si 模板法[9]、AAO 模板法[10]、自组装法[8]、阳极氧化等[11] [12]。在上述方法当中,阳极氧化具有设备简单、工艺简单、技术稳定且成本相对较低等优点[11],因此它受到了研究人员的青睐。过去的研究中,人们比较关注工作电压、电解液配方、工作温度、搅拌等因素对阳极氧化效果的影响[11]。在阳极氧化制备 TiO<sub>2</sub> 纳米多孔薄膜的研究中,Zhang 等人发现[13],Ti 的材质同样会起到关键作用:即使是相同的工艺,由于 Ti 片的厂家不同,最终得到了 TiO<sub>2</sub> 纳米多孔薄膜、纳米管等不同形貌。成本控制是实际生产当中必须面临的问题。就 Ti 片而言,其厚度越小,越有利于控制成本。因此,在阳极氧化制备 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜中,研究 Ti 片厚度对阳极氧化结果的影响规律是具有实际应用价值的。

本研究以氟化铵醇溶液为基础,研究了 Ti 材质和厚度(磁控溅射的 Ti 薄膜(300 nm)、0.05 mm 与 0.2 mm Ti 片)对阳极氧化制备 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的影响。研究发现,0.05 mm 的 Ti 片在高电压 60 V 更有利于获得大孔径 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜。此外,Pt 修饰可以显著提升 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的气敏传感特性:在 325℃ 工作温度下,对 50 ppm 乙醇的响应/恢复时间为 12/36 s。

## 2. 实验部分

### 2.1. 样品制备

首先将磁控溅射的 Ti 薄膜和钛片剪裁至 2.5 × 3 cm<sup>2</sup> 大小,置于乙醇溶液中超声清洗 15 min,超声清洗完成后,取出放置在培养皿中,放入烘箱干燥。干燥完成后,得到洁净的钛片。配置 100 mL 糖基电解质溶液:取 0.3 g NH<sub>4</sub>F (0.27 wt%),溶解在乙二醇和去离子水(体积比为 49:1),在磁力搅拌下搅拌 15 min,得到糖基电解质溶液。利用直流稳压电源进行阳极氧化。阳极氧化采用 15~60 V 的电压,氧化 5~15 min。

之后, 阳极氧化完成后, 钛片表面形成二氧化钛纳米多孔结构, 用镊子夹住样品在去离子水中轻轻清洗, 清除样品表面的残余反应溶液。为防止未充分氧化, 在完成后将器材裸露放于加热器上进行退火操作: 先在 200℃ 保温 10 min, 再升温至 400℃ 保温 20 min。同时, 减小二氧化钛多孔样品因为阳极氧化而导致的残余应力。

## 2.2. Pt 纳米颗粒修饰

将 45 V~15 min 所制备的二氧化钛多孔样品转移到喷金仪当中, 在 10 mA 电流下溅射 Pt 粒子 30 s。并在 400 摄氏度下退火 5 分钟, 从而获得 Pt 纳米颗粒修饰的二氧化钛多孔薄膜样品。

## 2.3. 气敏传感器的制备

将 Pt 纳米颗粒修饰的二氧化钛多孔薄膜样品转移到蒸镀机中, 利用模板真空蒸镀 200 nm 的 Ag 电极。电极的宽度为 200 微米, 电极间距为 1.8 mm。所制备的 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜气敏传感器如图 1 所示。

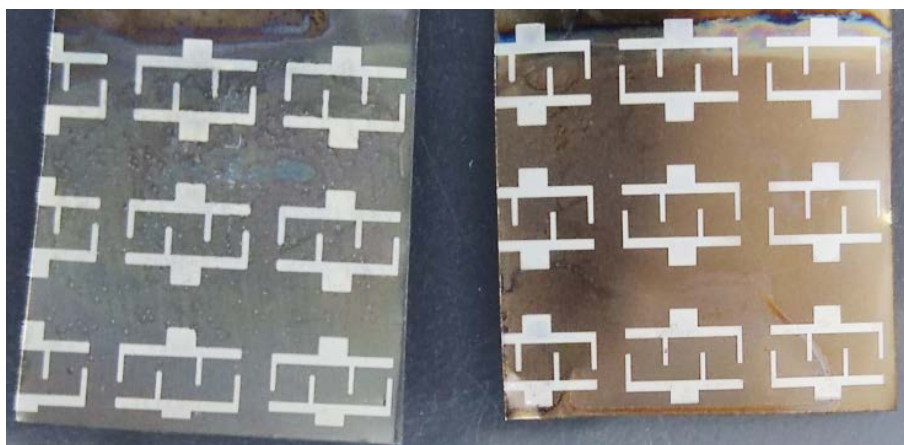


Figure 1. Photos of TiO<sub>2</sub> porous thin film gas sensor  
图 1. TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜气敏传感器实物照片

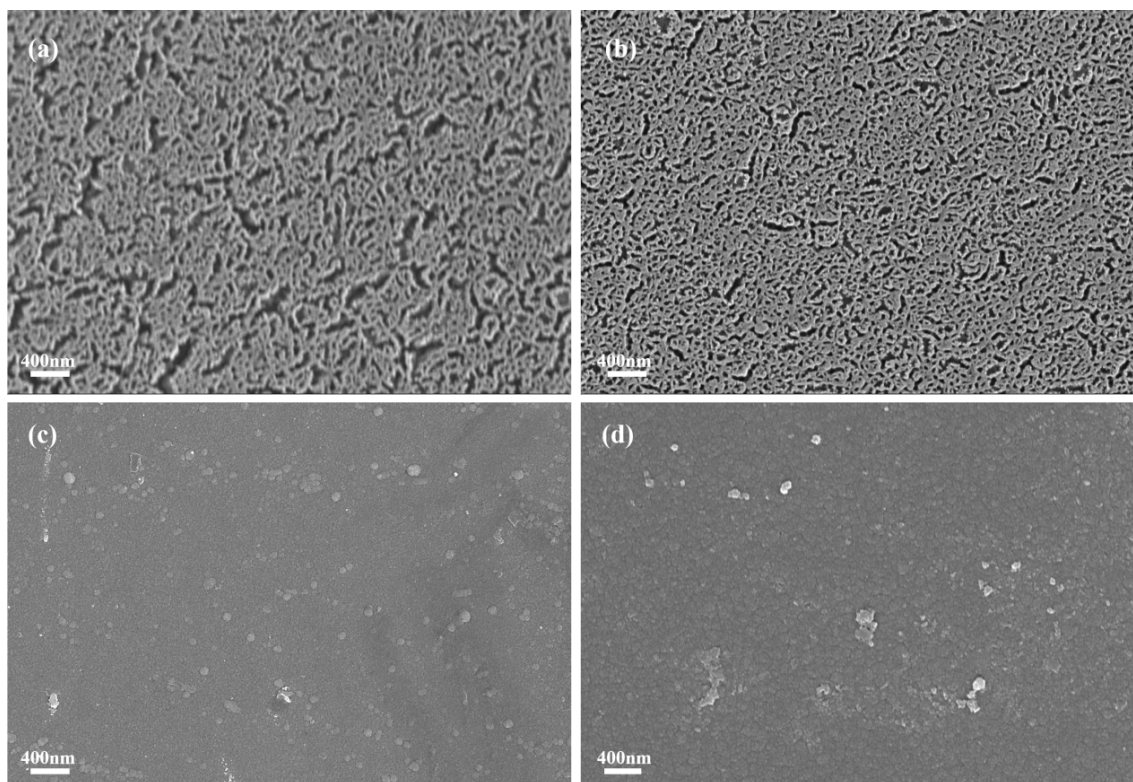
## 2.4. 材料与器件表征

使用 X 射线粉末衍射(X-Ray Diffraction, XRD, 荷兰)表征 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜和 Pt 颗粒的晶体结构, 扫描电子显微镜(Scanning Electronic Microscopy, SEM, SEISS, Sigma 500, 德国)观察 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的表面形貌和微观结构, 使用拉曼光谱分析 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的光学性能和残余应力。利用气湿敏传感器综合测试系统研究 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的气敏传感特性。

# 3. 结果与讨论

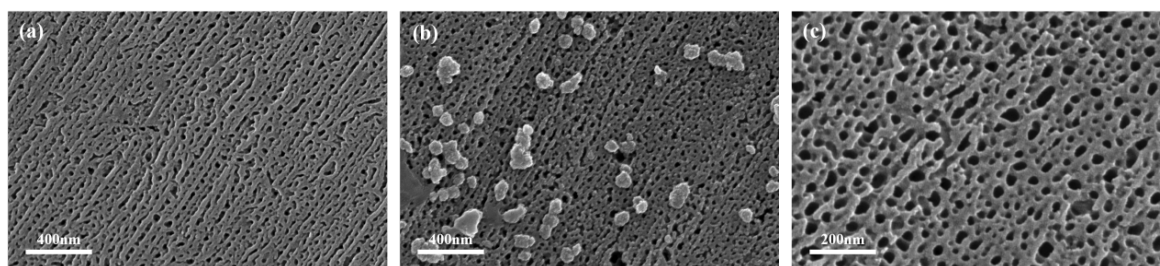
## 3.1. 材料表征

使用 SEM 观察阳极氧化后的样品的微观形貌。如图 2 所示, 当工作电压为 45~60 V 时, 获得二氧化钛多孔薄膜。而工作电压低于 45V 时, 形成的致密的薄膜, 表面没有明显的孔洞。60 V 时, 如图 2(a)所示, 孔洞直径较大, 主要分布在 24~136 nm 区间, 局部区域还出现了沟壑, 长约为 280~1400 nm, 宽为 80~250 nm。随着电压的降低, 孔洞的直径减小至 10~120 nm, 沟壑也同时呈现明显的缩小和变短。孔径减小的原因可以归结为电压的降低导致腐蚀速率减小。由此可知, 45~60 V 是氟化铵醇溶液体系制备二氧化钛多孔薄膜的理想工作电压。这与 Zhang 等人的研究结果是相一致的[13]。



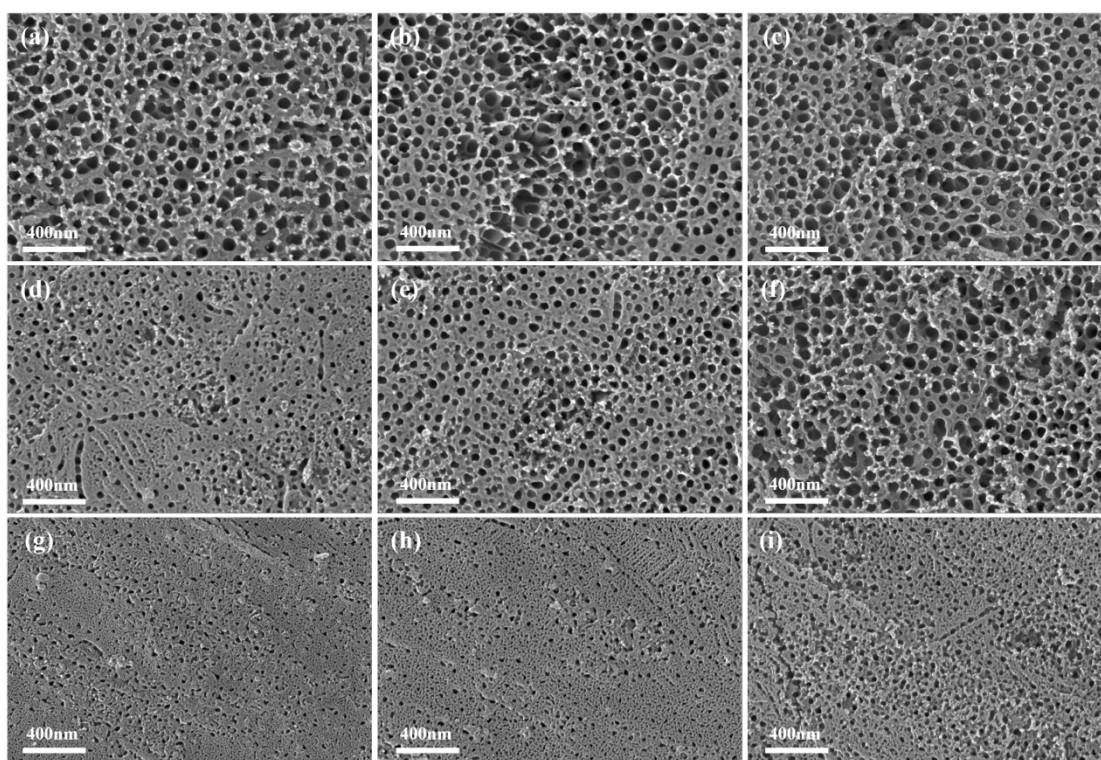
**Figure 2.** SEM images of  $\text{TiO}_2$  etched by magnetron sputtering Ti film for 5 min: (a) 60 V; (b) 45 V; (c) 30 V; (d) 15 V  
**图 2.** 磁控溅射的 Ti 薄膜腐蚀 5 min 的  $\text{TiO}_2$  的 SEM 图像: (a) 60 V; (b) 45 V; (c) 30 V; (d) 15 V

为分析 Ti 材料本身对阳极氧化的影响, 采用同样的配方和工艺, 对厚度为 0.2 mm 的 Ti 片进行阳极氧化。如图 3(a)所示, 阳极氧化 30 min 后, 样品表面可以观察到许多明显的小孔洞, 其直径主要分布在之间。当阳极氧化时间增加到 45 min 时, 从图 3(b)中可以清楚看到, 样品表面存在较多的纳米颗粒(40~200 nm), 这可能是阳极氧化在表面形成  $\text{TiO}_2$  产物。同时, 孔洞的直径呈现一定程度的增大趋势。60 min 时,  $\text{TiO}_2$  多孔薄膜中的孔洞继续增加, 如图 3(c)所示。综上, 当 Ti 片的厚度为 0.2 mm 时, 阳极氧化所获得  $\text{TiO}_2$  多孔薄膜的孔洞相对偏小。这与前人的研究结果存在较大的差异[13]。这可能是由四个方面的因素造成的。一是本文的电解液配方和电极距离与文献[13]的存在差异, 这对腐蚀速率会产生较大的影响。二是不同厂家生产对 Ti 片在相同的配方和腐蚀工艺中的腐蚀速率也是不一样的[13]。三是本工作所采用的 Ti 片没有进行高温热处理, 其晶体择优取向不高。四是本工作所采用的 Ti 片内部的残余应力较小, 阳极氧化时腐蚀速率相对慢。



**Figure 3.** SEM images of 0.2 mm thick titanium sheet corroded at 45 V for (a) 30 min; (b) 45 min; (c) 60 min.  
**图 3.** 0.2 mm 厚钛片 45 V 腐蚀(a) 30 min; (b) 45 min; (c) 60 min 的 SEM 图片

本研究中所使用的 Ti 片均是压制成型的。Ti 片厚度越小, 压制的次数越多, 其内部残余应力理论上会更大。因此, 为了更好地分析残余应力对阳极氧化的影响, 本研究选取了厚度更小的 0.05 mm 的 Ti 片进行阳极氧化研究, 所制备的样品形貌如图 4 所示。从图中可以清楚看到, 在 30~60 V 的工作电压下, 均可以得到多孔薄膜; 随着电压的增大, 多孔薄膜孔洞的直径逐步增大, 从 30 V 的 22~41 nm 先增大到 45 V 的 45~70 nm, 然后再增大到 60 V 的 60~90 nm。此外, 随着阳极氧化时间的延长, 阳极氧化效果增加: 孔洞显著增大。这种现象在 30~45 V 的工作电压下可以清晰的观察到。与磁控溅射制备的 Ti 薄膜不同, 当工作电压低至 30 V 时, 在 Ti 片上同样可以获得多孔薄膜。当工作电压为 60 V、阳极氧化时间为 10 min 时, 如图 4(b) 所示, 在样品的局部区域形成纳米管。可能是阳极氧化速率较快的原因, 如图 4(a)~(c) 所示, 工作电压 60 V 阳极氧化所制的样品表面普遍存在一些不规则的小颗粒, 导致样品表面较为粗糙, 没有形成典型阳极氧化的光滑平面。

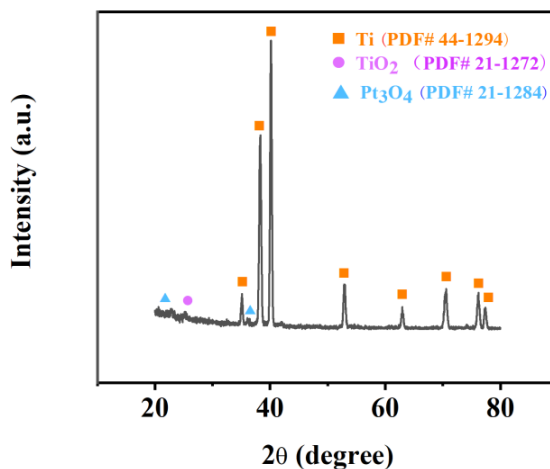


**Figure 4.** (a)~(i) SEM images of anodic oxidation of titanium sheets with thickness of 0.05 mm at 60 V~5 min, 60 V~10 min, 60 V~15 min, 45 V~5 min, 45 V~10 min, 45 V~15 min, 30 V~5 min, 30 V~10 min, 30 V~15 min, respectively

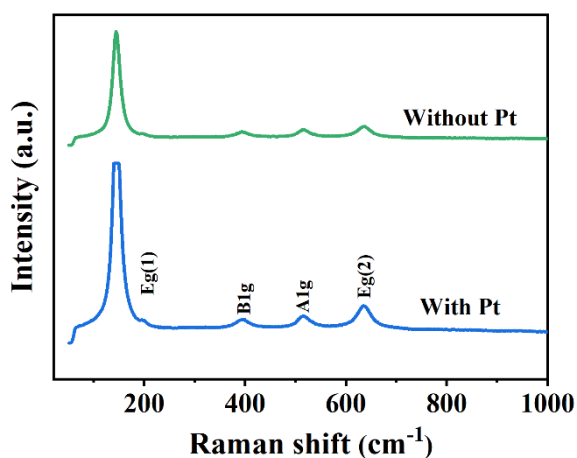
**图 4.** (a)~(i) 分别为 0.05 mm 厚的钛片在 60 V~5 min、60 V~10 min、60 V~15 min、45 V~5 min、45 V~10 min、45 V~15 min、30 V~5 min、30 V~10 min、30 V~15 min 阳极氧化的 SEM 图片

XRD 被应用来分析  $\text{TiO}_2$  样品的结晶度和物相。如图 5 所示, 45 V~15 min 阳极氧化所制备的  $\text{TiO}_2$  样品的衍射峰与  $\text{TiO}_2$  (JCPDS 21-1272) 标准锐钛矿相一致。同时, XRD 还确认了 Pt 的存在。如图 6 所示, Pt 修饰  $\text{TiO}_2$  样品前后均在 144、394、515 和 637  $\text{cm}^{-1}$  处均出现 4 个峰, 分别对应典型锐钛矿型  $\text{TiO}_2$  相的  $E_g$ 、 $B1g$ 、 $A1g$  和  $E_g$  峰拉曼峰[3] [14]。由此可以证实, 本研究工作所制备的是锐钛矿型  $\text{TiO}_2$ , 这与 XRD 结果一致。此外, Pt 修饰之后, 样品的拉曼峰得到了显著增强, 144  $\text{cm}^{-1}$  处  $E_g$  振动峰强度超过了测试设备的极限值, 而 637  $\text{cm}^{-1}$  处  $E_g$  振动峰强度则是没有修饰之前的 3.5 倍。这主要归因于 Pt 优异的等离激元效应[4] [14]。由此可以说明, Pt- $\text{TiO}_2$  在光催化、光电探测、气敏传感等领域具有良好的潜在应

用前景。



**Figure 5.** XRD patterns of Pt modified 45 V~15 min anodized TiO<sub>2</sub>  
**图 5.** Pt 修饰后的 45 V~15 min 阳极氧化的 TiO<sub>2</sub> XRD 图谱

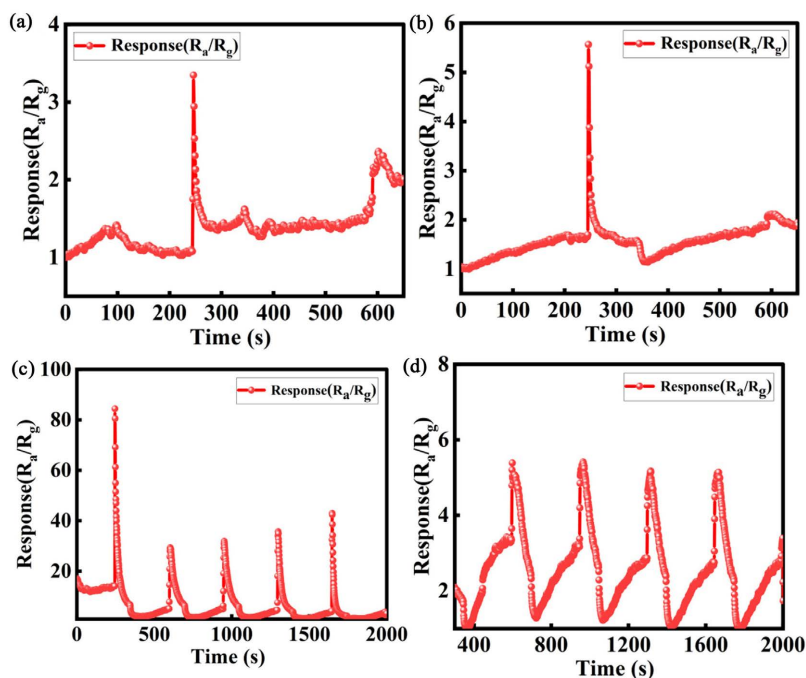


**Figure 6.** Raman spectra of 45 V~15 min anodized TiO<sub>2</sub> before (green line) and after (blue line) Pt modification  
**图 6.** Pt 修饰前(绿线)后(蓝线)的 45 V~15 min 阳极氧化的 TiO<sub>2</sub> 拉曼图谱

### 3.2. 气敏传感特性研究

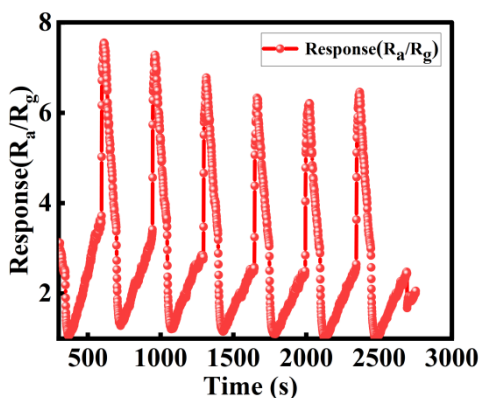
通过气湿敏综合测试系统来分析 Pt 修饰阳极氧化制备的 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的气敏传感特性。在 Pt 修饰之前, 阳极氧化制备的 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的气敏传感性能并不明显, 经过多轮的测试, 依然没有找到响应气体。参考前人的工作和课题组的研究基础, 本研究采用 Pt 修饰增强阳极氧化制备的 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜的气敏传感性能。如图 7(a)、图 7(b)所示, 在 275~325℃ 工作温度范围内, 所制备 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜传感器对 1000 ppm 乙醇气体产生明显响应, 响应值在 3.1~3.3 之间, 响应/恢复时间为 3/18 s。测试中还发现当工作温度超过 325℃ 时, 器件的电阻值会出现较大的波动, 严重干扰测试的准备度。因此, 该器件的工作温度不宜超过 325℃。综合考虑, 325℃ 是理想的工作温度。此外, 还探索了该气敏器件在不同乙醇气体浓度下的响应规律, 其结果如图 7(c)、图 7(d)所示。2 ppm 下的高响应, 可能是由于测试刚开始阶段气体的不稳定造成; 在 5~50 ppm 的范围内, 气敏传感器的响应值、响应时间均随着浓度的增加而显著提升: 响应值由

5.5 提升到 11.1, 而响应时间则由 25 s 快速减小至 12 s。而在 100~500 ppb 的范围内, 该器件响应值呈现轻微的上升趋势。Priyanka 等人[4]报道了基于  $\text{TiO}_2$  纳米结构的气敏传感器, 在  $350^\circ\text{C}$  工作温度对 100 ppm 乙醇气体的响应值为 4384, 响应/恢复时间为 11/2 s。本论文所制备的器件在  $325^\circ\text{C}$  对 50 ppm 乙醇的响应值为 11.1, 响应/恢复时间为 12/36 s。与之相比, 本研究的所制备的器件在响应时间方面基本相当(升高温度会加快响应), 但是响应值和恢复时间方面存在较大的差距。这可能是由于器件的电极距离过大和孔径偏小(比表面积小)造成。此外, 在  $325^\circ\text{C}$  下对 100 ppb 乙醇进行了 6 个周期的循环测试, 如图 8 所示, 其响应表现出几乎相同的趋势, 重复性好。由此证实, 该器件均有较好的稳定性。



**Figure 7.** (a)~(b) The response of Pt nanoparticles modified porous  $\text{TiO}_2$  nanoporous thin film devices to 1000 ppm ethanol at  $275^\circ\text{C}$  and  $325^\circ\text{C}$ , respectively. (c) The response diagram of the device to 2-5-10-20-50 ppm ethanol at  $325^\circ\text{C}$ ; (d) The response of the device to 100-200-300-400-500 ppb ethanol at  $325^\circ\text{C}$

图 7. (a)~(b) 分别为 Pt 纳米粒子修饰多孔  $\text{TiO}_2$  纳米多孔薄膜器件在  $275^\circ\text{C}$  和  $325^\circ\text{C}$  下对 1000 ppm 乙醇的响应图; (c)  $325^\circ\text{C}$  下器件对 2-5-10-20-50 ppm 乙醇的响应图; (d) 器件在  $325^\circ\text{C}$  下对 100-200-300-400-500 ppb 乙醇的响应图



**Figure 8.** The six-cycle response of the device to 100 ppm ethanol at  $325^\circ\text{C}$

图 8. 器件在  $325^\circ\text{C}$  下对 100 ppm 乙醇的 6 个周期循环响应图

## 4. 结论

本工作采用经典的醇溶液体系和两电极恒压工作法对 Ti 薄膜/片进行阳极氧化, 成功制备了 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜。研究发现, 45~60 V 是制备 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜较为理想的工作电压, 局部区域还形成了 TiO<sub>2</sub> 纳米管。研究还发现, 在无抛光步骤的阳极氧化当中, 与 0.2 mm 相比, 0.05 mm 的 Ti 片更有利于形成孔洞更大的多孔薄膜。Pt 修饰之前, TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜对乙醇气体没有明显响应; Pt 修饰之后, 在 325℃ 工作温度下, TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜对 50 ppm 乙醇具有良好的响应, 响应/恢复时间为 12/36 s, 响应值为 11.1, 最低检测限为 100 ppb。

## 基金项目

五邑大学大学生创新创业训练项目(202311349320; 202311349317); 广东省创新平台与重点项目——新一代电子信息(半导体)重点领域专项(2023ZDZX1031); 五邑大学横向项目(HX23068); 广东省 2022 年度教育科学规划课题(高等教育专项)(2022GXJK354)。

## 参考文献

- [1] Li, Z., Li, Z., Zuo, C. and Fang, X. (2022) Application of Nanostructured TiO<sub>2</sub> in UV Photodetectors: A Review. *Advanced Materials*, **34**, Article ID: 2109083. <https://doi.org/10.1002/adma.202109083>
- [2] Selcuk, H., Sarikaya, H.Z., Bekbolet, M. and Anderson, M.A. (2006) Bromate Formation on the Non-Porous TiO<sub>2</sub> Photoanode in the Photoelectrocatalytic System. *Chemosphere*, **62**, 715-721. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.086>
- [3] Zhang, L., Liu, T., Liu, T., Hussain, S., Li, Q. and Yang, J. (2023) Improving Photocatalytic Performance of Defective Titania for Carbon Dioxide Photoreduction by Cu Cocatalyst with SCN-Ion Modification. *Chemical Engineering Journal*, **463**, Article ID: 142358. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142358>
- [4] Priyanka, K.P., Vattappalam, S.C., Sankararaman, S., Balakrishna, K.M. and Varghese, T. (2017) High-Performance Ethanol Gas Sensor Using TiO<sub>2</sub> Nanostructures. *The European Physical Journal Plus*, **132**, Article No. 306. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2017-11581-x>
- [5] Topalian, Z., Smulko, J.M., Niklasson, G.A. and Granqvist, C.G. (2007) Resistance Noise in TiO<sub>2</sub>-Based Thin Film Gas Sensors under Ultraviolet Irradiation. *Journal of Physics: Conference Series*, **76**, Article ID: 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/76/1/012056>
- [6] Ramanavicius, S., Tereshchenko, A., Karpicz, R., Ratautaite, V., Bubniene, U., Maneikis, A., et al. (2019) TiO<sub>2-x</sub>/TiO<sub>2</sub>-Structure Based 'Self-Heated' Sensor for the Determination of Some Reducing Gases. *Sensors*, **20**, Article 74. <https://doi.org/10.3390/s20010074>
- [7] 贺凤龙, 王苹, 黄彦民. 骨架结构多孔 TiO<sub>2</sub> 薄膜增强染料敏化太阳能电池性能[J]. 无机化学学报, 2015, 31(11): 2174-2180.
- [8] 汪洋. 超级电容器中 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜电极界面特性机理研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [9] 王宇. 基于硅纳米孔柱阵列的多孔 TiO<sub>2</sub> 复合薄膜湿敏特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020.
- [10] 王曼丽. 有序多孔 TiO<sub>2</sub>-AAO 复合薄膜的光学、介电特性研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北师范大学, 2020.
- [11] 陆飞, 丁孝飞, 王赫, 刘永林, 康瀚月, 代畅, 等. 阳极氧化法制备 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜及其光电化学性能研究[J]. 电镀与精饰, 2015, 37(10): 1-5, 23.
- [12] 李菲晖, 巩运兰, 李闯, 李明辉, 张丹丹, 张弘青. 电化学制备 TiO<sub>2</sub> 多孔纳米薄膜的影响因素研究[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(6): 1-3.
- [13] Zhang, M., Zhou, X., Wang, C., Chen, Z. and Li, H. (2021) Evaluation of the Titanium Substrate Effect on the Morphology of Anodic TiO<sub>2</sub> Nanotubes. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, **10**, Article ID: 083008. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac1d61>
- [14] Cheng, Q., Yuan, Y., Tang, R., Liu, Q., Bao, L., Wang, P., et al. (2022) Rapid Hydroxyl Radical Generation on (001)-Facet-Exposed Ultrathin Anatase TiO<sub>2</sub> Nanosheets for Enhanced Photocatalytic Lignocellulose-to-H<sub>2</sub> Conversion. *ACS Catalysis*, **12**, 2118-2125. <https://doi.org/10.1021/acscatal.1c05713>