

# Au负载量对TiO<sub>2</sub>/Au光阳极光吸收能力的影响研究

聂宗昊, 闫伯涵, 祝孝栋, 李秀玉

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月15日

## 摘要

为了研究Au负载量对TiO<sub>2</sub>/Au光阳极的光吸收能力的影响, 本文采用水热法和柠檬酸钠还原法制备了TiO<sub>2</sub>/Au材料, 通过刮涂法制备光阳极。利用紫外-可见吸收、X射线衍射(XRD)、透射电子显微镜(TEM)等手段对不同Au负载量的TiO<sub>2</sub>/Au材料和TiO<sub>2</sub>/Au光阳极进行表征分析。结果表明, Au负载量在1.0 wt%时, TiO<sub>2</sub>/Au光阳极的光吸收能力最佳; 低于1.0 wt%时, Au负载量提高, TiO<sub>2</sub>/Au光阳极的光吸收能力也随之提高; 高于1.0 wt%时, Au负载量提高, TiO<sub>2</sub>/Au光阳极的光吸收能力随之降低。

## 关键词

光阳极, TiO<sub>2</sub>, Au纳米颗粒, N719染料

# Research on the Effect of Au Loading on the Light Absorption Capacity of TiO<sub>2</sub>/Au Photoanodes

Zonghao Nie, Bohan Yan, Xiaodong Zhu, Xiuyu Li

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: March 31, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 15, 2026

## Abstract

In this paper, in order to investigate the effect of Au loading on the light absorption ability of TiO<sub>2</sub>/Au photoanode, TiO<sub>2</sub>/Au materials were prepared by hydrothermal method and sodium citrate reduction method, and photoanode was prepared by scratch coating method. Characterization and analysis of TiO<sub>2</sub>/Au materials and TiO<sub>2</sub>/Au photoanodes with different Au loadings were carried

out using UV-visible absorption, X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), and other methods. The results showed that the  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  photoanode had the best light absorption capacity when the Au loading was 1.0 wt%; when the Au loading was below 1.0 wt%, the light absorption capacity of  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  photoanode also increased with the increase of Au loading; when the Au loading exceeded 1.0 wt%, the light absorption capacity of  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  photoanode decreased as the Au loading increased.

## Keywords

Photoanodes,  $\text{TiO}_2$ , Au Nanoparticles, N719 Dye

Copyright © 2026 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

局域表面等离子共振效应(LSPR)是贵金属纳米材料的一种光学特性[1]。贵金属纳米材料由于其光学可调谐、表面化学与功能化平台、化学稳定性等特点,在生物医学[2]、光催化[3]、太阳能电池[4]、光电信息[5]等领域具有广泛的应用前景和研究价值。贵金属纳米材料在入射光场,也就是电磁场的驱动下,振荡的电场作用于贵金属纳米材料中的自由电子。在电场的驱动下,自由电子云会相对带正电的金属离子发生偏移。偏移的自由电子云在库伦力的作用下,回到平衡位置,集体振荡现象将在电子云中产生。当入射光的振动频率与自由电子云的固有振荡频率相同时,产生局域表面等离子共振效应[6]。表面等离子共振效应可以在贵金属纳米材料周围产生增强的局域电磁场,将其应用在光阳极中可以显著增强贵金属纳米材料附近的染料分子的光吸收,提高染料对太阳光的利用,从而产生更多光生电子[7]。此外,贵金属纳米材料可以散射入射光,增加了入射光的光程,从而提高染料的光吸收能力。Au纳米颗粒是常用的贵金属纳米材料,通过控制其直径来制取不同共振吸收波长的Au纳米颗粒。Au纳米颗粒已经在光阳极中得到广泛应用。Muduli等[8]通过水热法将Au纳米颗粒负载在锐钛矿 $\text{TiO}_2$ 纳米颗粒上,合成 $\text{TiO}_2\text{-Au}$ 复合纳米材料。Naphade等[9]采用原位还原的方法,将Au纳米颗粒负载在 $\text{TiO}_2$ 纳米纤维上作为光捕获层,显著改善了 $\text{TiO}_2$ 纳米纤维的光捕获能力。然而目前的研究中,没有研究Au纳米颗粒的负载量对 $\text{TiO}_2/\text{Au}$ 光阳极的光吸收能力的影响。

本研究采用水热法和柠檬酸钠还原法[10]制备了分级 $\text{TiO}_2$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Au}$ 材料,并制备了其光阳极。利用紫外-可见吸收、X射线衍射(XRD)、透射电子显微镜(TEM)等手段对不同Au纳米颗粒负载量的 $\text{TiO}_2/\text{Au}$ 材料和 $\text{TiO}_2/\text{Au}$ 光阳极进行表征分析。

## 2. 实验部分

### 2.1. 分级 $\text{TiO}_2$ 的合成

将24 g NaOH颗粒放入60 mL去离子水中,搅拌10分钟;将0.1 g P25粉体加入已制备的NaOH溶液中,分别搅拌和超声10分钟,重复4次;之后将液体转移到聚四氟乙烯内胆中,向其中滴加4 mL的过氧化氢,将聚四氟乙烯内胆放入水热釜中,在 $150^\circ\text{C}$ 下进行90分钟的水热处理;水热结束后,将水热产物用稀硝酸清洗并离心,重复3次,之后用去离子水将样品清洗并离心3次;随后,将样品放入真空干燥箱中,在 $60^\circ\text{C}$ 环境下干燥12小时,最后,用马弗炉将干燥完成的样品在 $450^\circ\text{C}$ 下煅烧2小时。

## 2.2. TiO<sub>2</sub>/Au 的合成

将 200 mg 已制备的 TiO<sub>2</sub> 加入 40 mL 去离子水中, 搅拌 10 分钟, 超声 10 分钟; 之后, 将 400 mg 柠檬酸钠加入其中, 搅拌 10 分钟; 将液体在 95℃ 下加热 15 分钟, 之后, 向液体加入 0.54 mL 的 HAuCl<sub>4</sub> 溶液(25 mM), 继续 95℃ 加热搅拌 15 分钟, 之后在室温下, 持续搅拌 20 小时; 之后, 用无水乙醇与去离子水按 1:3 体积比配置清洗液, 清洗离心样品, 最后, 在 60℃ 环境下干燥 12 小时。

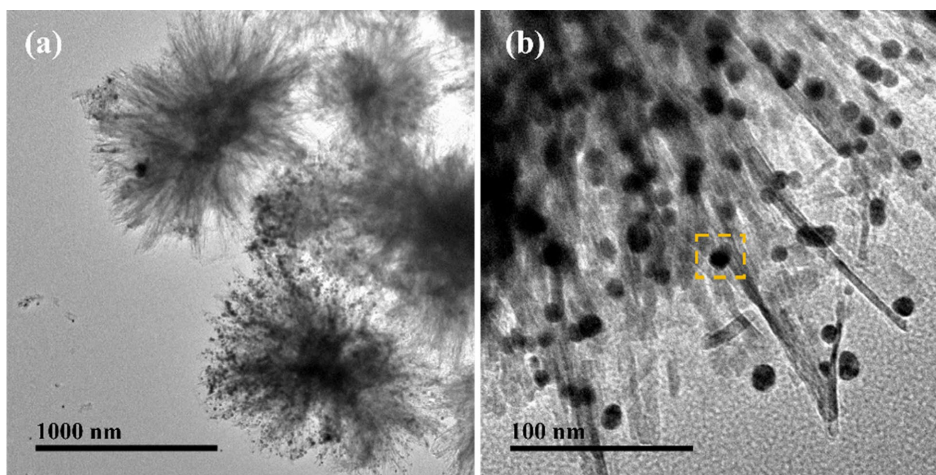
## 2.3. TiO<sub>2</sub>/Au 和 P25 光阳极的制备

先将 1 mL 乙醇与 0.14 mL 松油醇混合搅拌, 直到充分混合, 之后分别取 40 mg TiO<sub>2</sub>/Au 和 40 mg P25, 加入两份上述溶液中。将混合液体搅拌 5 分钟, 再将混合液体用超声设备超声 10 分钟。最后将 66.6 mg 乙基纤维素分别加入混合液体, 在室温下持续搅拌 24 小时, 制成粘性浆料。使用胶带在导电玻璃上留下 0.5 mm × 0.5 mm 的窗口。将粘性浆料滴在上面, 用刀刮法将粘性浆料在窗口中刮涂均匀; 此后将涂有浆料的导电玻璃放入干燥箱中 80℃ 干燥 10 分钟, 再次重复以上刮涂步骤两次。最后将涂有浆料的导电玻璃放入马弗炉中, 在 450℃ 下煅烧 30 分钟, 得到光阳极。将光阳极放在 0.4 mmol/L 的 N719 染料溶液中浸泡 24 小时, 将敏化光阳极取出, 用无水乙醇缓慢冲洗, 洗去没吸附的 N719 染料。

## 2.4. 材料表征

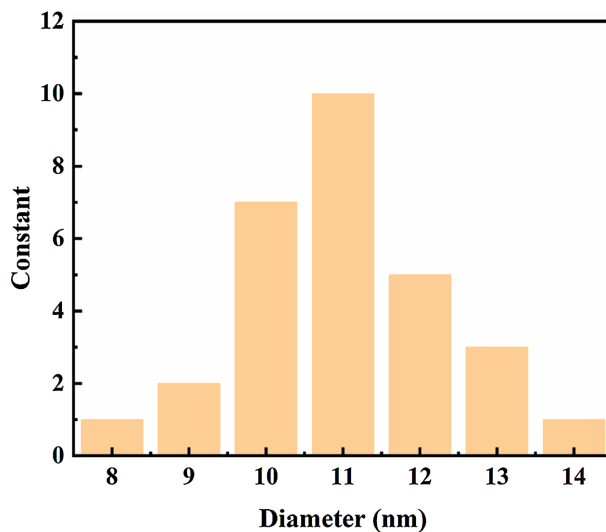
通过透射电子显微镜(Tecnai-G2-20)研究材料的形貌和证明材料的成功制备。用 X 射线衍射仪(XD6)研究样品的晶相。用紫外 - 可见分光光度计(Agilent Carry-5000)研究不同 Au 负载量的 TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极的光吸收特性。用电化学工作站(CS350)研究 TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极的电化学阻抗谱。

## 3. 结果与讨论



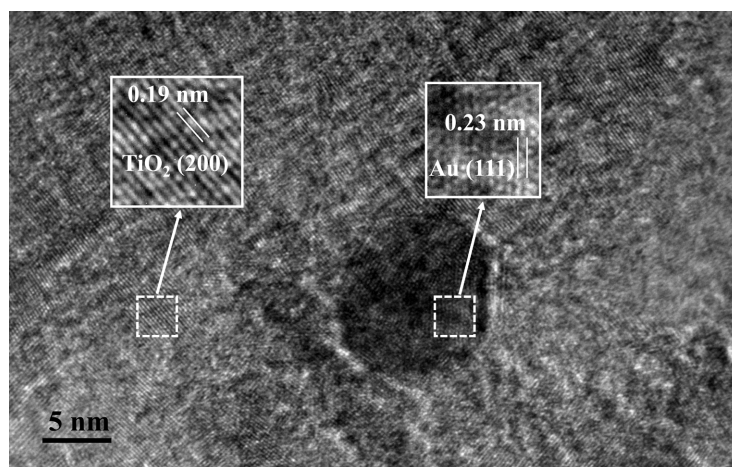
**Figure 1.** Characterization of TiO<sub>2</sub>/Au morphology. (a) TEM image of TiO<sub>2</sub>/Au; (b) TEM local enlarged image of TiO<sub>2</sub>/Au  
**图 1.** TiO<sub>2</sub>/Au 形貌表征。(a) TiO<sub>2</sub>/Au 的 TEM 图; (b) TiO<sub>2</sub>/Au 的 TEM 局部放大图

图 1(a)为 TiO<sub>2</sub>/Au 复合光阳极材料的透射电子显微镜(TEM)图片。从图中可以观察到 TiO<sub>2</sub>/Au 复合光阳极材料中 TiO<sub>2</sub> 的形貌依旧保持海胆分级结构, 而且整体尺寸、直径及刺的长度也比较均一。未出现明显的形貌或结构改变, 表明 Au 纳米颗粒负载过程未对海胆 TiO<sub>2</sub> 的微观形貌产生显著破坏。图 1(b)是 TiO<sub>2</sub>/Au 复合光阳极材料的 TEM 局部放大图片, 在 TiO<sub>2</sub> 海胆结构的刺状分支表面, 可观察到分布均匀的黑色纳米颗粒, 且黑色纳米颗粒的平均直径约为 10 nm, 显示出良好的分散性。



**Figure 2.** Particle size distribution map of Au nanoparticles  
**图 2.** Au 纳米颗粒的粒径分布图

为明确图 1(b)中黑色纳米颗粒的粒径尺寸及其分布特征, 本研究对该图像中全部黑色纳米颗粒开展了系统的粒径统计分析, 所得粒径分布结果如图 2 所示。由粒径分布图可见, 所制备的黑色纳米颗粒粒径主要分布于 8 nm 至 14 nm 区间内, 整体呈现出较窄的尺寸分布范围; 其中粒径为 10 nm 与 11 nm 的颗粒占比最高, 为该体系中的主导粒径。



**Figure 3.** High resolution TEM image of TiO<sub>2</sub>/Au  
**图 3.** TiO<sub>2</sub>/Au 的高分辨率 TEM 图

为进一步确认图 1(b)中的黑色纳米颗粒是 Au 纳米颗粒, 对图 1(b)中黄色虚框部分进行高分辨率透射电镜(HRTEM)表征, 结果如图 3 所示。通过对图 3 中白色虚框部分进行晶格条纹分析, 可以观察到黑色纳米颗粒区域的晶面间距为 0.23 nm, 与面心立方结构 Au 的(111)晶面标准晶面间距高度吻合[11]; 黑色纳米颗粒附近区域的晶面间距为 0.19 nm, 符合锐钛矿 TiO<sub>2</sub> 的(200)晶面的间距[12]。通过以上表征结果可以证实, 海胆 TiO<sub>2</sub> 尖刺上的黑色纳米颗粒是 Au 纳米颗粒, 表明本研究成功在海胆 TiO<sub>2</sub> 上附着 Au 纳米颗粒, 制备得到 TiO<sub>2</sub>/Au 复合光阳极材料。

接下来, 为了研究不同 Au 纳米材料的负载量对 TiO<sub>2</sub>/Au 晶相的影响, 本研究制备并测试了 TiO<sub>2</sub> 与

Au 质量分数分别为 0.5 wt%、1.0 wt%、1.5 wt%、2.0 wt% 的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  的 X 射线衍射谱, 结果如图 4 所示。从图中可以观察到,  $\text{TiO}_2$  和 Au 的衍射峰位没有发生偏移, 不同 Au 纳米材料的负载量不影响  $\text{TiO}_2$  和 Au 的晶体结构, 并且随着 Au 质量比的提高, Au 的衍射峰也随之增强, 由不明显逐渐变得明显, 这是因为材料的相对含量会影响 XRD 谱的峰强, 相对含量即质量比越大则峰越强。

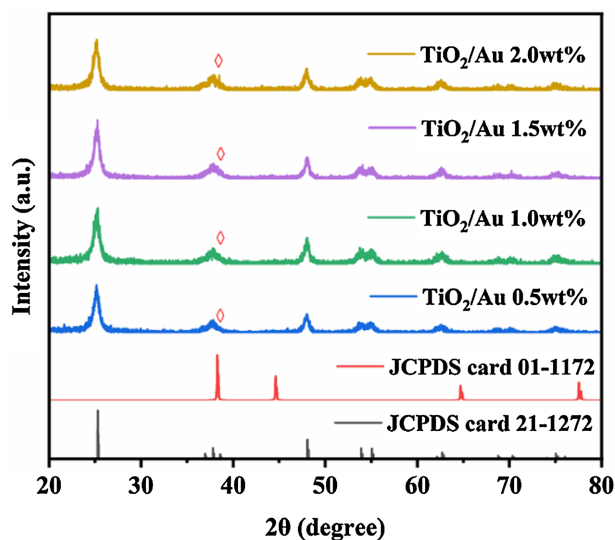


Figure 4. XRD patterns of  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  with different Au loadings mass fractions  
图 4. 不同 Au 负载质量分数的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  的 XRD 图

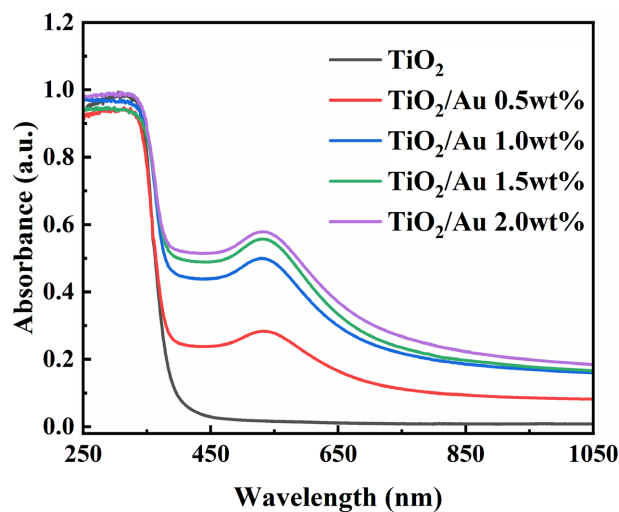
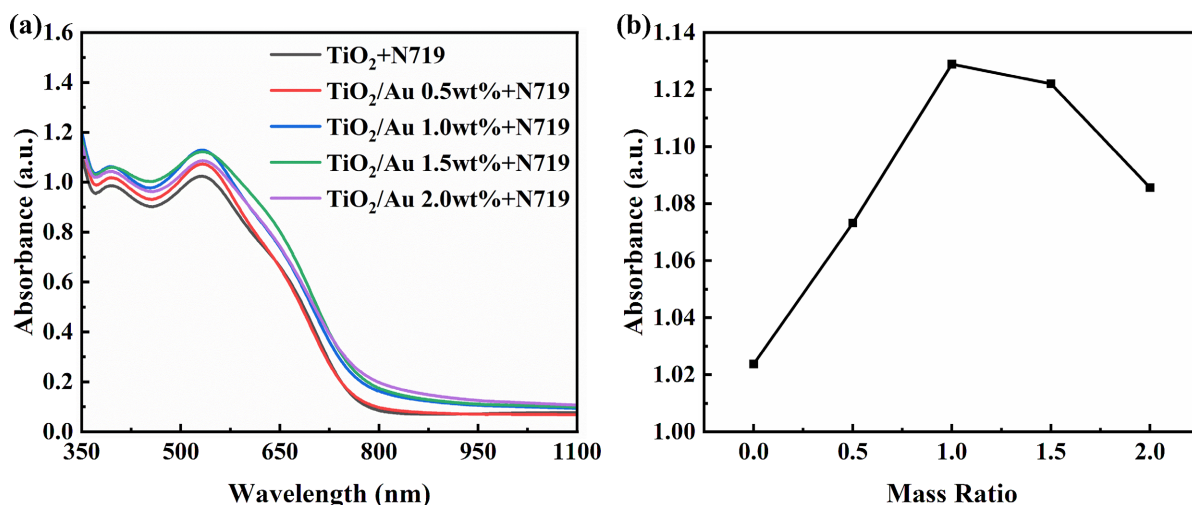


Figure 5. UV-visible absorption spectra of  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  with different loadings of Au nanoparticles  
图 5. 不同 Au 纳米颗粒负载量的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  的紫外 - 可见吸收光谱

图 5 展示了不同 Au 纳米颗粒负载量的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  复合光阳极材料的紫外 - 可见吸收光谱。本研究制备了 Au 理论质量分数为 0.5 wt%、1.0 wt%、1.5 wt%、2.0 wt% 四种  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  复合样品, 并测试其吸收光谱。可以观察到所有样品均在 532 nm 附近呈现出显著的可见光吸收增强, 该吸收峰源于 Au 纳米颗粒的表面等离子体共振效应[13]。随着 Au 理论质量分数的提升, 532 nm 附近的光吸收强度逐渐增强, 表明更多 Au 纳米颗粒的负载可有效增强材料对可见光的吸收。然而, 吸收增强趋势没有随着 Au 理论质量分数线性增长, 而是呈现出逐渐饱和的现象, 这可归因于海胆  $\text{TiO}_2$  对 Au 纳米材料的负载能力存在上限。随

着 Au 理论质量分数的提高, 实际有效负载在  $\text{TiO}_2$  上的 Au 纳米材料量没有随之等量提高。根据吸收光谱分析结果, Au 理论质量分数为 2.0 wt% 的样品已接近负载饱和阈值。



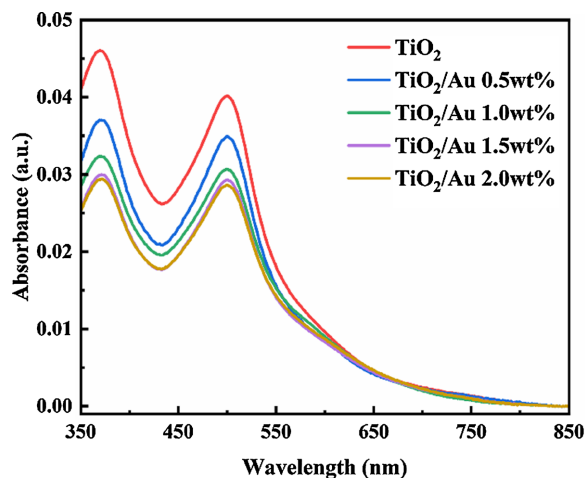
**Figure 6.**  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  photoanode absorption spectra. (a) UV-visible absorption spectra of  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  photoanodes with different mass fractions after dye adsorption; (b) Point line graph of  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  photoanode absorption intensity at 532 nm

**图 6.**  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极吸收光谱。(a) 不同质量分数的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极吸附染料后的紫外 - 可见吸收光谱; (b) 532 nm 处  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极吸收强度点线图

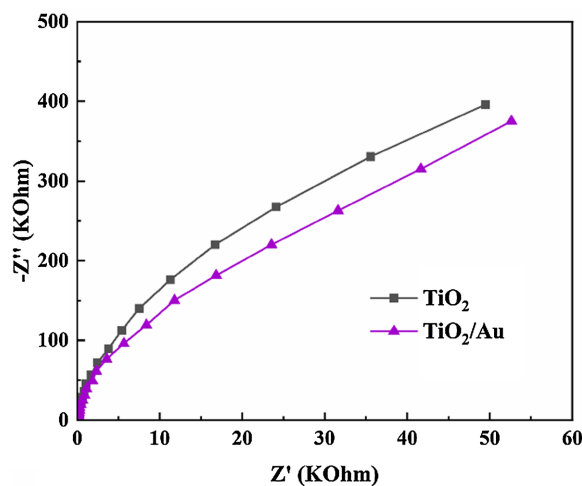
图 6(a) 展示了不同 Au 质量分数的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极吸附 N719 染料后的紫外 - 可见吸收光谱。对比未吸附染料的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  样品可见, 吸附染料后的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极的紫外 - 可见吸收光谱出现了属于 N719 染料的特征吸收峰, 并且吸附染料后  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极的光吸收强度显著高于吸附染料后  $\text{TiO}_2$  光阳极的光吸收强度。这一现象表明, Au 纳米材料的表面等离子共振效应, 在其表面产生增强的电磁场, 增强了其附近染料的光吸收能力, 实现了光阳极光吸收性能的提升。图 6(b) 是 532 nm 处  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极吸收强度的点线图, 展示不同 Au 质量分数的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极在 532 nm 处的光吸收强度演变趋势。结果显示, 随着 Au 纳米颗粒质量分数的增加,  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极的光吸收强度先升高后降低的现象, 呈现出非单调变化的规律。该趋势可归因于 Au 纳米颗粒的负载对染料吸附行为的双重影响, 在低至中等 Au 负载范围内, LSPR 效应的增强作用占据主导地位, 显著提升了光吸收能力; 而当 Au 负载量过高时, 过量的 Au 纳米颗粒会占据  $\text{TiO}_2$  表面的位置, 限制了 N719 染料分子的有效吸附量, 进而导致整体光吸收强度出现下降。

为探究 Au 纳米颗粒的负载对  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  复合光阳极吸附染料性能的影响, 我们将吸附染料后不同 Au 质量分数的  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极进行染料脱附实验, 并对相应解吸液进行紫外 - 可见吸收光谱表征, 结果如图 7 所示。由吸收光谱曲线可以看出, 随着光阳极中 Au 质量分数的逐步提升, 对应解吸液在特征吸收波段的紫外 - 可见吸收强度呈现出持续降低的趋势。上述结果表明, Au 纳米颗粒在  $\text{TiO}_2$  表面的负载会占据部分 N719 染料分子的吸附位点, 进而导致光阳极对染料的有效吸附量下降, 从光谱层面证实了 Au 负载对  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极染料吸附能力的竞争作用。

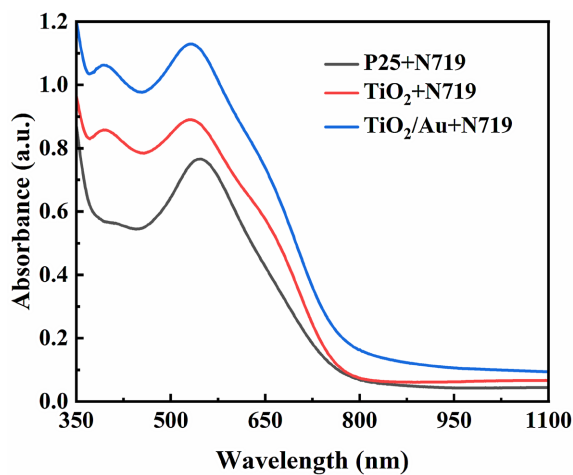
图 8 是  $\text{TiO}_2$  和  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极的电化学阻抗谱。为了衡量  $\text{TiO}_2$  和  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  的光生电荷的分离效率, 本研究对  $\text{TiO}_2$  和  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  光阳极进行了电化学阻抗测试。从电化学阻抗图可以观察到,  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  的曲线半径小于  $\text{TiO}_2$  的曲线半径, 而电化学阻抗曲线半径代表材料的电荷传输阻抗, 曲线半径越小则阻抗越小, 因此  $\text{TiO}_2/\text{Au}$  的阻抗小于  $\text{TiO}_2$  的阻抗。以上测试结果可以证明 Au 纳米颗粒与  $\text{TiO}_2$  半导体形成肖特基结, 阻碍了光生电子 - 空穴对的复合, 促进了光生电子 - 空穴分离, 提高了电荷传输效率。



**Figure 7.** UV-visible absorption spectra of desorption liquids from TiO<sub>2</sub>/Au photoanodes with different mass fractions  
**图 7.** 不同质量分数的 TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极的解吸液的紫外 - 可见吸收光谱图



**Figure 8.** Electrochemical impedance spectroscopy of TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>/Au photoanodes  
**图 8.** TiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极的电化学阻抗谱



**Figure 9.** Absorption spectra of P25, hierarchical TiO<sub>2</sub>, and TiO<sub>2</sub>/Au photoanodes after dye adsorption  
**图 9.** P25、分等级结构 TiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极吸附染料后的吸收光谱

图 9 是 P25、TiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极吸附染料后的吸收光谱。根据公式  $\eta = (A_1 - A_0)/A_0$ ,  $\eta$  是光俘获能力提高百分比,  $A_1$  是吸附 N719 染料后 TiO<sub>2</sub> 或 TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极在 532 nm 处的光吸收强度,  $A_0$  是吸附 N719 染料后 P25 光阳极在 532 nm 处的光吸收强度, 可以计算光俘获能力提高百分比。通过计算, 可以得到分等级结构 TiO<sub>2</sub> 光阳极相对 P25 光阳极的光俘获能力提高了 17.2%, TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极相对 P25 光阳极的光俘获能力提高了 47.5%。本研究制备的 TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极通过分级结构 TiO<sub>2</sub> 大比表面积的特性和 Au 纳米颗粒的局域表面等离子共振效应, 提高了染料的吸附量和染料的光吸收能力, 两者共同作用显著提高了光阳极的光俘获能力。

#### 4. 结论

本研究采用水热法和柠檬酸钠还原法制备了不同 Au 负载量的 TiO<sub>2</sub>/Au 材料, 并用刮涂法制备了 TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极。通过 TEM 和 XRD 证明了 TiO<sub>2</sub>/Au 材料的成功制备, 通过紫外-可见吸收光谱研究出了 TiO<sub>2</sub>/Au 中 Au 纳米颗粒的最佳负载质量分数是 1 wt%, TiO<sub>2</sub>/Au 光阳极的光吸收能力相比传统 P25 光阳极提高了 47.5%, 成功实现了光阳极光吸收能力的提高。

#### 参考文献

- [1] Domingues, R.P., Rodrigues, M.S., Proença, M., Costa, D., Alves, E., Barradas, N.P., *et al.* (2018) Thin Films Composed of Au Nanoparticles Embedded in AlN: Influence of Metal Concentration and Thermal Annealing on the LSPR Band. *Vacuum*, **157**, 414-421. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.09.013>
- [2] Jain, P.K., Huang, X., El-Sayed, I.H. and El-Sayed, M.A. (2008) Noble Metals on the Nanoscale: Optical and Photothermal Properties and Some Applications in Imaging, Sensing, Biology, and Medicine. *Accounts of Chemical Research*, **41**, 1578-1586. <https://doi.org/10.1021/ar7002804>
- [3] Chen, J., Wu, J.C.S., Wu, P.C. and Tsai, D.P. (2012) Improved Photocatalytic Activity of Shell-Isolated Plasmonic Photocatalyst Au@SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> by Promoted LSPR. *The Journal of Physical Chemistry C*, **116**, 26535-26542. <https://doi.org/10.1021/jp309901y>
- [4] Hu, X., Liao, S., Song, Q., Zhang, X., Jin, G., Wang, X., *et al.* (2026) An Interfacial Modification Strategy of Gold Nanoparticles to Enhance the Performance of Kesterite Solar Cells. *Solar Energy*, **303**, Article ID: 114157. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.114157>
- [5] Liu, S.L., Fei, G.T., Xu, S.H., Gao, X.D. and Li, H. (2021) All-Optical-Input Transistors with Light-Controlled Enhancement and Fast Stabilization of Hot-Electron Photocurrent. *The Journal of Physical Chemistry C*, **125**, 18887-18895. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c03364>
- [6] Wang, M., Ye, M., Iocozzia, J., Lin, C. and Lin, Z. (2016) Plasmon-Mediated Solar Energy Conversion via Photocatalysis in Noble Metal/Semiconductor Composites. *Advanced Science*, **3**, Article ID: 1600024. <https://doi.org/10.1002/advs.201600024>
- [7] Butt, M.T.Z., Ameen, S., Ali, M.H., Tahir, A., ul Haq, T., Hussain, S.Z., *et al.* (2025) A Facile One-Step, Additive-Free Method for *In-Situ* Deposition of Gold Nanoparticles for High-Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of Power Sources*, **656**, Article ID: 238027. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238027>
- [8] Muduli, S., Game, O., Dhas, V., Vijayamohan, K., Bogle, K.A., Valanoor, N., *et al.* (2012) TiO<sub>2</sub>-Au Plasmonic Nanocomposite for Enhanced Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Performance. *Solar Energy*, **86**, 1428-1434. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.002>
- [9] Naphade, R.A., Tathavadekar, M., Jog, J.P., Agarkar, S. and Ogale, S. (2014) Plasmonic Light Harvesting of Dye Sensitized Solar Cells by Au-Nanoparticle Loaded TiO<sub>2</sub> Nanofibers. *Journal of Materials Chemistry A*, **2**, 975-984. <https://doi.org/10.1039/c3ta13246c>
- [10] Kimling, J., Maier, M., Okenve, B., Kotaidis, V., Ballot, H. and Plech, A. (2006) Turkevich Method for Gold Nanoparticle Synthesis Revisited. *The Journal of Physical Chemistry B*, **110**, 15700-15707. <https://doi.org/10.1021/jp061667w>
- [11] Liu, T., Bai, X., Miao, C., Dai, Q., Xu, W., Yu, Y., *et al.* (2014) Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Au Upconversion Nanocomposites with Broad-Band Excitation for Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry C*, **118**, 3258-3265. <https://doi.org/10.1021/jp408501k>
- [12] Zhang, S., Huang, Y., Xiong, Y., Ågren, H., Zhang, J. and Guo, X. (2024) Multifunctional Composite Photoanode

Containing a TiO<sub>2</sub> Microarchitecture with Near-Infrared Upconversion Nanoparticles for Dye-Sensitized Solar Cells. *ACS Applied Nano Materials*, **7**, 6851-6860. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c05595>

- [13] Chou, H., Huang, W., Wu, T., Yu, Y. and Hsu, H. (2017) LSPR Effects of Au Nanoparticles/ZnO Nano-Composite Films. *Sensing and Bio-Sensing Research*, **14**, 17-20. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2017.04.003>