工程探索

# 液相激光植入：一种物理构筑微纳功能材料的新策略

孙 亮[1] 李 阳[2] 李嘉铭[3] 闫久江[2] 李祥友[4]

([1]海军工程大学基础部,湖北 武汉 430033;[2]海军工程大学电气工程学院,湖北 武汉 430033;
[3]华南师范大学光电科学与工程学院,广东 广州 510006;
[4]华中科技大学武汉光电国家研究中心,湖北 武汉 430074)

**摘 要** 在材料物理领域,精准构筑成分可控的半导体微纳功能材料,实现多元成分的协同调控,是提高半导体光催化性能的有效策略。传统的构筑方法主要依托湿化学法,它通过化学反应实现半导体成分的调控与配置,但该过程常伴随着化学基团和多余杂质,成为限制半导体光生载流子快速转移的障碍。近期,海军工程大学、华南师范大学和华中科技大学的研究人员合作提出了一种“液相激光植入”构筑半导体微纳功能材料的新策略,它利用瞬态的激光光热效应,对分散在液相中的前驱材料进行选择性加热,可将不同成分的前驱材料精准锚定在半导体材料表面及内部。通过物理方法精确构筑半导体微纳功能材料,避免了化学反应的参与,显著提升了半导体光催化降解性能,相关成果在线发表于 Small、Optics and Laser Technology 等国际高水平期刊。

**关键词** 液相激光植入;半导体微纳材料;光催化性能

**DOI** 10.27024/j.wlygc.2026.05.05.02 **中图分类号** G64,O4

# LASER EMBEDDING IN LIQUID: A NOVEL STRATEGY FOR PHYSICAL CONSTRUCTING THE MICRO-NANO FUNCTIONAL MATERIALS

**SUN Liang[1] LI Yang[2] LI Jiaming[3] YAN Jiujiang[2] LI Xiangyou[4]**

([1] Department of Basic Courses, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033;
[2] College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033;
[3] School of Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006;
[4] Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074)

**Abstract** In the field of materials physics, precisely fabricating semiconductor micro-nano functional materials with controllable composition and achieving coordinated regulation of multiple components is an effective strategy to enhance the photocatalytic performances of semiconductors. The traditional construction methods mainly rely on wet chemical methods, which achieve the regulation and configuration of semiconductor components through chemical reactions. However, this process often involves chemical groups and excess impurities, which become obstacles to prevent the rapid transfer of semiconductor photogenerated carriers. Re-

**收稿日期**: 2026-05-05; **修回日期**: 2026-07-05; **出版日期**: 2026-09-25

**基金项目**: 国家自然科学基金(批准号:12302210)和海军工程大学自主研发项目(批准号:2025504030)资助。

**通信作者**: 李阳,xiangyangliyang@foxmail.com;李嘉铭,jmli@m.scnu.edu.cn。

**引文格式**: 孙亮,李阳,李嘉铭,等. 液相激光植入:一种物理构筑微纳功能材料的新策略[J]. 物理与工程,2026,46(4):384-389.

**Cite this article**: SUN L, LI Y, LI J M, et al. Laser embedding in liquid: a novel strategy for physical constructing the micro-nano functional materials[J]. Physics and Engineering, 2026, 46(4): 384-389. (in Chinese)

cently, academic researchers from Naval University of Engineering, South China Normal University and Huazhong University of Science and Technology collaborated to propose a new strategy for fabricating semiconductor micro-nano functional materials by "laser embedding in liquid". This strategy utilizes the powerful laser photothermal effect to selectively heat the precursor materials dispersed in the liquid medium, allowing different components of the precursor materials to be precisely anchored on the surface and body of the semiconductor materials. By precisely fabricating semiconductor micro-nano functional materials through this physical method, the participation of chemical reactions is avoided, significantly improving the photocatalytic degradation performance of semiconductors. The related achievements were published online in international high-level journals, such as Small, Optics and Laser Technology.

**Key words** laser embedding in liquid; semiconductor micro-nano materials; photocatalytic performance

## 1 研究背景

在半导体光催化技术领域,通过精准构筑、定向调控半导体材料的组分以增强光生载流子活性,是提高半导体光催化材料高级氧化处理能力(Advanced Oxidation Process, AOP)的有效策略[1]。特别是,在光催化降解水体有机污染物的应用中,将贵金属纳米颗粒引入宽带隙半导体催化材料(例如 g-$C_3N_4$、$CeO_2$、$TiO_2$、$SnO_2$、ZnO等)[2-6],构筑一类具有协同效应的半导体微纳功能材料体系,可实现贵金属局域表面等离子体共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR)效应与半导体紫外光吸收特性的耦合,进而提高可见光的利用效率和可见光驱动下的半导体光催化降解性能。然而,在半导体光催化材料的成分修饰工程中,如何在微纳尺度下将贵金属纳米颗粒快速、精准地植入半导体材料表面及内部,仍面临技术挑战。传统的湿化学法可实现半导体材料成分的修饰和调控。但是,化学反应常伴随化学基团和多余杂质,其电荷特性也会成为光生载流子快速转移的障碍。因此,构筑一种物理制备半导体微纳功能材料的方法,实现产物的纯净可控制备,已成为当前提升半导体光催化性能的关键。

## 2 技术创新

近期,来自海军工程大学、华南师范大学和华中科技大学的研究人员合作提出了一种"液相激光植入"(Laser Embedding in Liquid, LEL)构筑半导体微纳功能材料的新策略。图1展示了其基本原理。将不同的前驱材料(如贵金属、半导体)均匀分散在液相媒介中,利用特定波长和能量密度的激光束辐照加热,由于激光的脉宽极短(通常仅为几个纳秒、皮秒或飞秒),因此不同的前驱材料在激光能量密度作用下将产生瞬态的激光光热效应。贵金属、半导体前驱材料的熔点、沸点存在显著差异,贵金属的熔点通常较低,因此贵金属将被"选择性"加热且率先熔化。在液相媒介冷却和磁力搅拌作用下,熔化的贵金属将精准锚定在半导体材料表面及内部,从而实现贵金属成分的精准植入与调控。该方法无需化学试剂和化学反应,贵金属成分的激光植入过程是通过激光加热下的物态变化实现的。

## 3 主要结果

首先,以 Ag 纳米颗粒为例,研究人员利用 Comsol 多物理场仿真构建了贵金属"选择性"加热的激光光热模型,如图2所示。数值模拟结果显示,激光作用下 Ag 纳米颗粒表面温度可达1415K,远超过 Ag 纳米颗粒的熔点,可实现微纳尺度下的"选择性"激光熔化,且对 g-$C_3N_4$、$TiO_2$等半导体材料的晶相结构无破坏(远低于半导体材料的熔点),从机理上保证了所构筑半导体微纳功能材料的高纯度。

其次,在实验中成功制备了成分可控的半导体微纳功能材料。图3为实验制备的 Ag/$TiO_2$

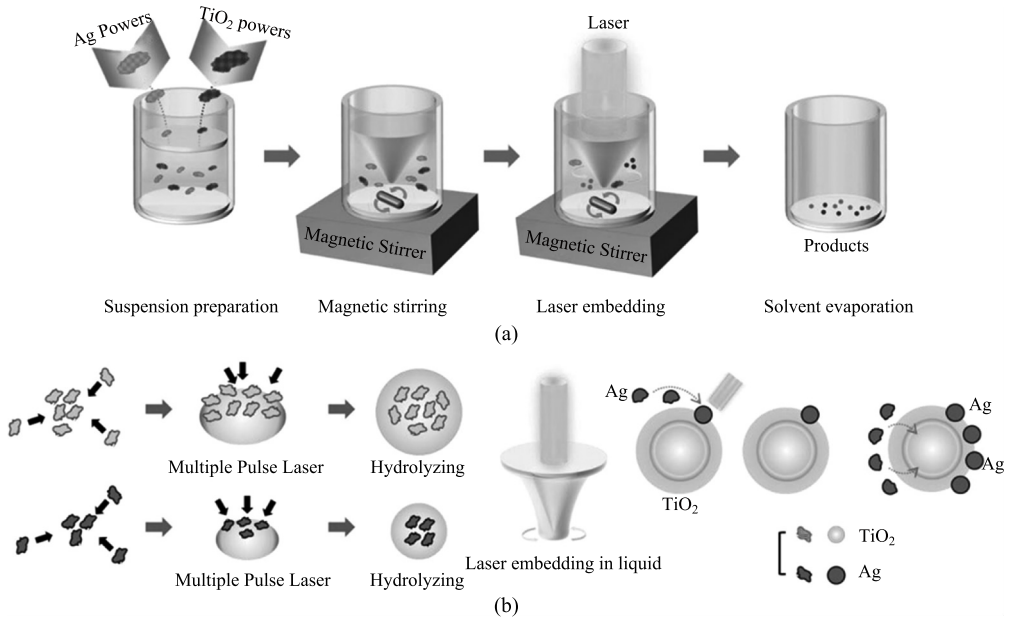



图 1 液相激光植入技术的基本原理示意图

(a) 液相激光植入流程示意图；(b) 半导体微纳功能材料的激光植入机理示意图

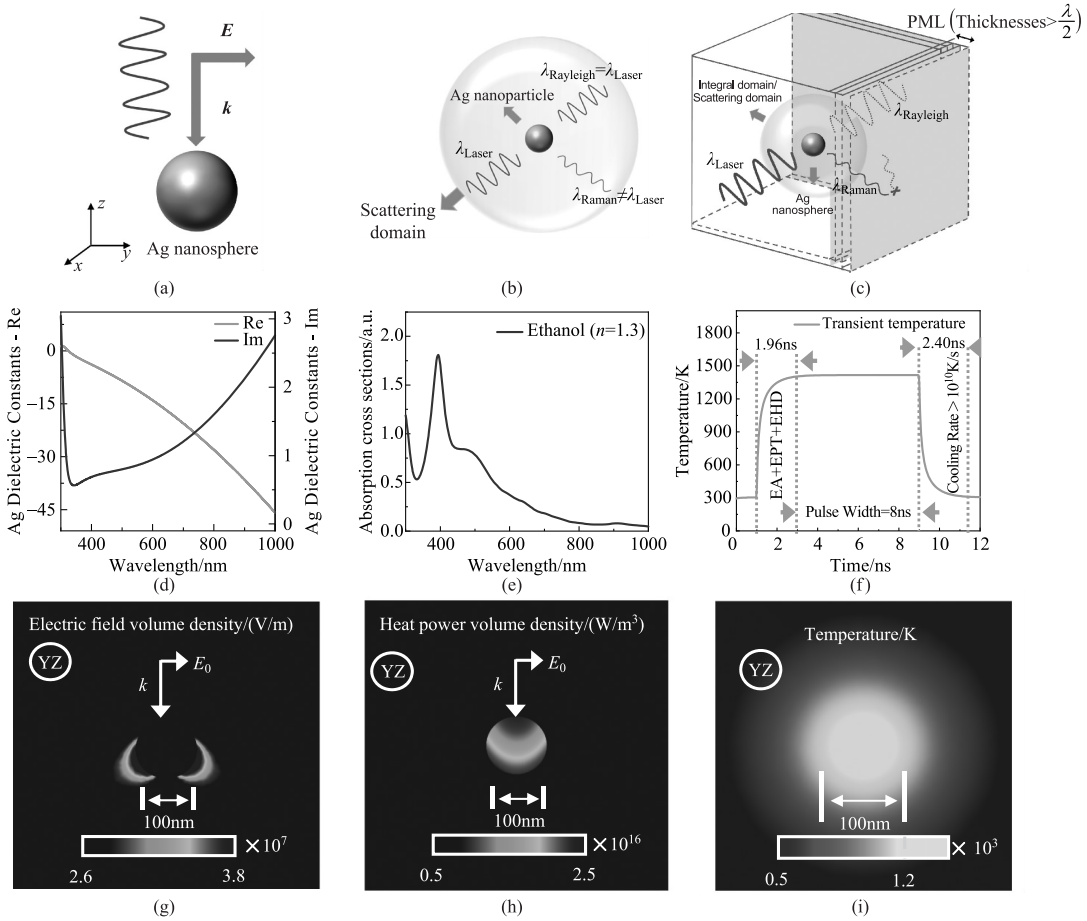



图 2 基于 Comsol 多物理场仿真的激光光热模型构建与数值模拟

(a) 电场强度矢量与激光波矢的近场建模；(b) 电磁场散射过程与散射截面；(c) 采用散射边界条件的完美匹配层(PML)；(d) Ag 纳米颗粒的介电常数；(e) Ag 在液相环境中的吸收截面；(f) Ag 纳米颗粒的瞬态温度；(g) *YZ* 平面内归一化至散射电磁强度的电场近场强度；(h) *YZ* 平面内的热功率体密度($Q_e$)；(i) 波长 $\lambda=532$nm 时 *YZ* 平面内的温度平衡分布

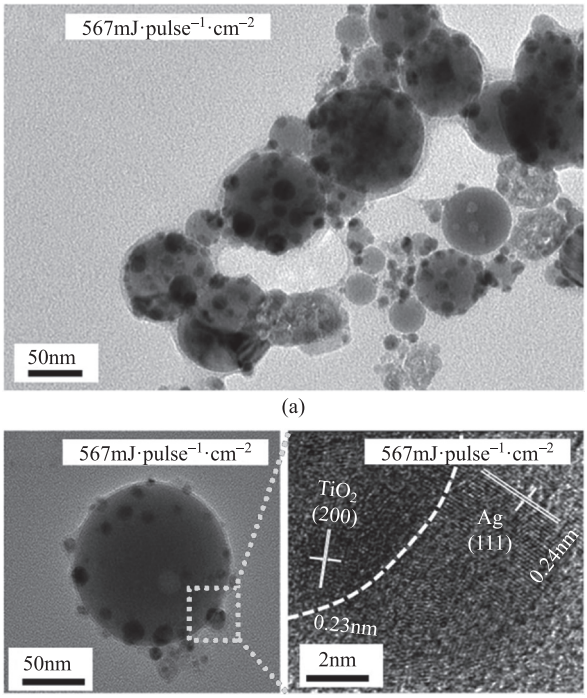



图 3 Ag/$TiO_2$ 形貌图

(a)(b) TEM 图像；(c) HR-TEM 图像

复合材料形貌图。在液相媒介中，激光与贵金属、半导体前驱材料相互作用产生瞬态的激光光热效应，可将贵金属组分成功植入半导体材料表面及内部。利用透射电子显微镜（Transmission Electron Microscope，TEM）和能谱分析仪（Energy Dispersive Spectroscopy，EDS）依次采集了产物的高分辨形貌及能谱图像，如图 4 所示。在激光能量密度为 567mJ·pulse·$cm^{-2}$ 条件下，Ag/$TiO_2$ 复合材料得到了成功制备，形成了复合界面的晶格结构，且 Ag 纳米颗粒成分精准植入在 $TiO_2$ 上。

最后，以光催化降解亚甲基蓝为例，对构筑的半导体微纳功能材料进行了光催化性能测试。如图 5 所示，测试流程主要包括：半导体微纳功能材料的激光植入构筑，制备光催化剂；在半导体微纳功能材料中添加亚甲基蓝溶液，构建光催化预降解系统；实施光催化降解等步骤。

研究表明，经激光植入改性后的半导体微纳功能材料表现出优异的光催化降解性能。如图 6 所示，研究人员先利用电子顺磁共振波谱仪（Electron

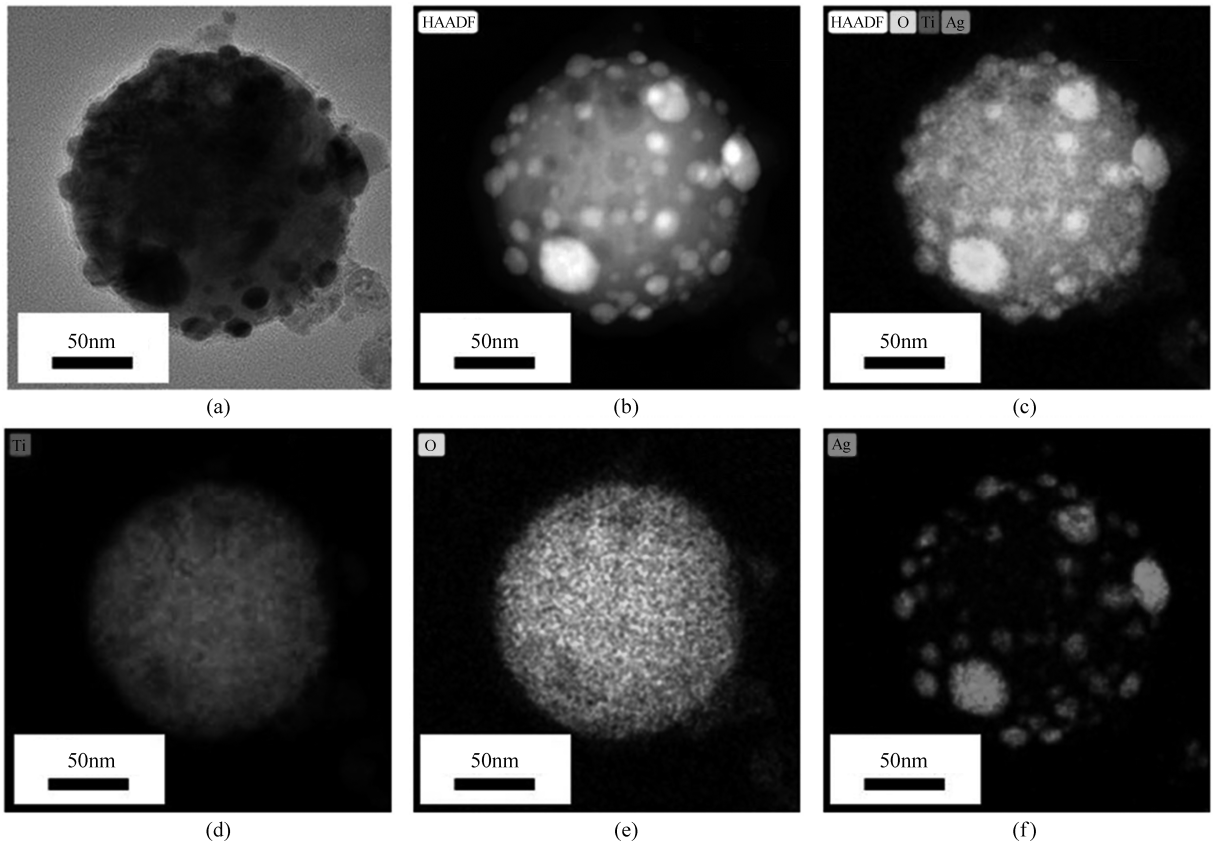



图 4 Ag/$TiO_2$ 复合材料的能谱分析

(a)～(c) HAADF 图像；(d)～(f) Ti、O、Ag 元素分布

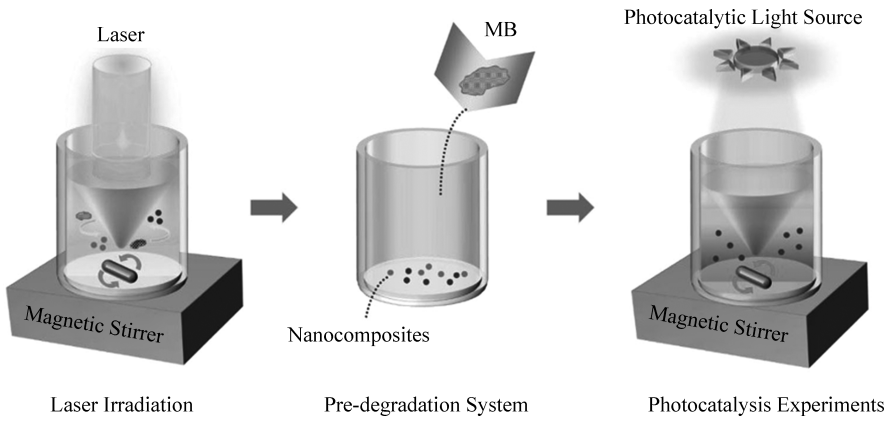



图 5 半导体微纳功能材料的光催化降解实验流程示意图

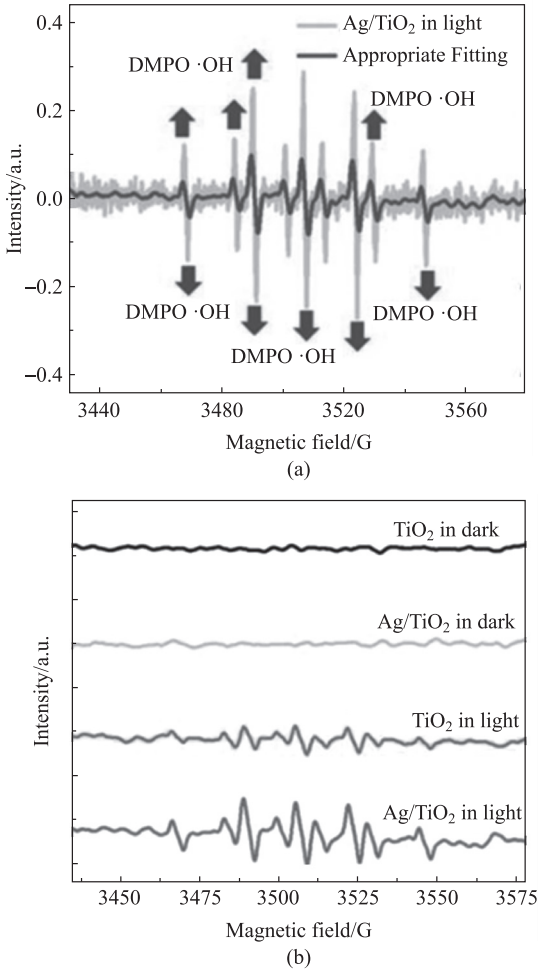



图 6 $Ag/TiO_2$ 复合材料的 EPR 图谱

(a) 羟基自由基特征信号拟合；(b) 光照与黑暗条件下，半导体微纳功能材料的羟基自由基生成信号强度对比

Paramagnetic Resonance，EPR）对各环境条件下（如光照、黑暗）半导体微纳功能材料的羟基自由基生成能力进行了测试。结果显示，在光照条件下，经激光植入改性后的半导体微纳功能材料具有更强的羟基自由基生成能力，这说明该材料具有更强的光生载流子分离能力，能够在光催化系统中形成更多具有强氧化分解能力的羟基自由基，从而有助于提升其光催化降解亚甲基蓝的性能。如图 7 所示，光催化降解亚甲基蓝溶液的实验表明，经激光植入改性后的 $Ag/TiO_2$ 半导体微纳功能材料，其光催化性能相较于激光植入前纯 $TiO_2$ 对照组提升了 2.93 倍，该结果与 EPR 测试结果相一致。

## 4 总结与展望

综上所述，该工作所展示的“液相激光植入”策略深化了激光先进制造技术在微纳功能材料设计与合成方面的应用，利用激光光热效应实现微纳功能材料成分的选择性构筑，为复合半导体微纳功能材料的精准设计与制备提供了全新思路。与传统的湿化学法相比，该方法是一种新颖的物理方法，不涉及化学试剂的使用和化学反应附加物的生成，突破了传统湿化学方法纯度低、界面可控性差的瓶颈，为精准、绿色、可控制备半导体微纳功能材料提供了全新技术路径。现阶段，该方法的不足之处在于，受实验条件的限制（如激光光斑辐照面积小、前驱样品数量少），单次所能制备的产物产量较低，仅为毫克量级。因此，未来研究方向可聚焦产物的批量化制备目标，在激光设备上，利用高功率激光器作为激光辐照光源，通过光束整形扩大激光光斑的辐照加热面积；在前驱样品的配制方面，可探索人工智能赋能样品配制的

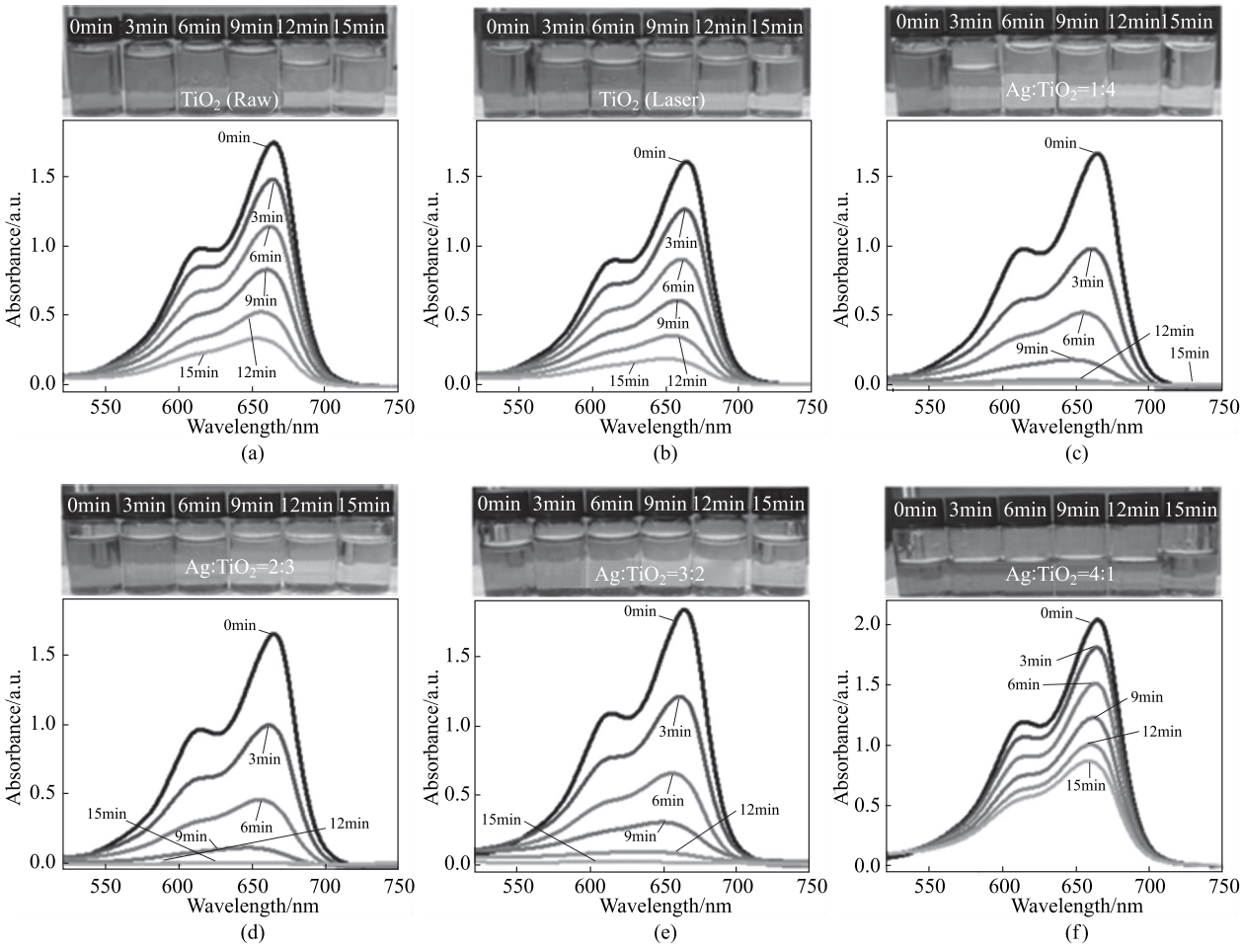



图 7 光催化降解亚甲基蓝性能及其紫外可见吸收光谱演化

(a)～(b) 激光处理前后纯 $TiO_2$ 的光催化降解亚甲基蓝浓度曲线；(c)～(f) 不同 Ag:$TiO_2$ 成分配比条件下(如 1∶4、2∶3、3∶2、4∶1)，经激光植入处理的 Ag/$TiO_2$ 复合材料光催化降解亚甲基蓝浓度曲线

有效途径，通过自动化的生产线，提高前驱材料样品的制备效率，实现产物产量的连续倍增，服务于国家功能材料制备的产业化应用需求。

## 参 考 文 献

[1] TAN J, LIU J T, LI Y, et al. Developing a bybrid photocatalyst by laser embedding in liquid: Case study on Ag-doped $TiO_2$ nanocrystal[J]. Small, 2026, https://doi.org/10.1002/smll.202512701.

[2] TAN J, LIU J T, YU P K, et al. Selective laser-induced photothermal effect in a semiconductor-based nanocomposite for boosting the photocatalytic performance in degradation of organic pollutant[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 190: 113125.

[3] LI Y, LI S H, ZHOU R, et al. Selective laser welding in liquid: A strategy for preparation of high-antibacterial activity nanozyme against staphylococcus aureus[J]. Journal of Advanced Research, 2023, 44: 81-90.

[4] LI Y, LI S H, ZHU Z K, et al. Constructing a hybrid high-performance photocatalyst by selective laser precisely heating in nanoscale[J]. Applied Surface Science, 2022, 588: 152946.

[5] LI Y, LI S H, LI J M, et al. Preparation of spherical silver and tin dioxide nanocomposites with the high photocatalytic performance by laser-induced deposition in liquid medium [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 900: 163522.

[6] LI Y, LI S H, HE C, et al. Selective laser-induced preparation of metal-semiconductor nanocomposites and application for enhanced photocatalytic performance in the degradation of organic pollutants[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 867: 159062.

■