

金 - 紫磷异质结的构建及协同增强声动力性能研究

伏子睿, 吴淑毅*

苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州

收稿日期: 2026年5月9日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月18日

摘要

二维材料紫磷因其独特的层状结构、可调谐的带隙和本征压电性, 在声动力治疗领域展现出良好的应用潜力。然而, 单一紫磷纳米片在超声激发下产生的活性氧(ROS)量子产率较低, 严重限制了其治疗效能的临床转化。为突破这一瓶颈, 本研究采用原位还原策略, 成功将金纳米颗粒(Au NPs)负载于紫磷纳米片表面, 构建了Au@VP复合异质结体系。原子力显微镜显示金纳米颗粒均匀分布于紫磷表面, 样品厚度和表面粗糙度较未修饰紫磷明显增加。Zeta电位与动态光散射(DLS)分析进一步证实了金纳米颗粒的成功负载, 同时体系在生理环境中的分散稳定性得以有效维持。通过1,3-二苯基异苯并咪唑(DPBF)探针法对声动力性能进行定量评估, 结果表明, 金纳米颗粒的引入显著增强了紫磷在超声辐照下的活性氧生成能力, 且增强效果随金纳米颗粒负载量的增加呈现正相关趋势。机制分析表明, 金纳米颗粒作为空化核可降低空化阈值、增强局域声场, 从而提高紫磷的超声激发效率, 同时, 复合后紫磷的带隙减小促进了电子空穴的产生。本研究为构建高效声动力治疗体系提供了新策略, 在动脉粥样硬化等深部疾病治疗中具有潜在应用价值。

关键词

紫磷, 金纳米颗粒, 声动力治疗, 局域声场增强

Construction of Gold-Purple Phosphorus Heterojunction and Study on Synergistically Enhanced Sonodynamic Performance

Zirui Fu, Shuyi Wu*

School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu

*通讯作者。

文章引用: 伏子睿, 吴淑毅. 金-紫磷异质结的构建及协同增强声动力性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 56-64.
DOI: 10.12677/ms.2026.166138

Abstract

Two-dimensional material violet phosphorus shows great potential for application in the field of sonodynamic therapy due to its unique layered structure, tunable bandgap, and intrinsic piezoelectric properties. However, the low quantum yield of reactive oxygen species (ROS) generated by single violet phosphorus nanosheets under ultrasound excitation severely limits the clinical translation of their therapeutic efficacy. To overcome this bottleneck, this study successfully loaded gold nanoparticles (Au NPs) onto the surface of violet phosphorus nanosheets using an *in situ* reduction strategy, thereby constructing an Au@VP composite heterojunction system. Atomic force microscopy revealed that the Au NPs were uniformly distributed on the violet phosphorus surface, with significant increases in sample thickness and surface roughness compared to unmodified violet phosphorus. Zeta potential and dynamic light scattering (DLS) analyses further confirmed the successful loading of Au NPs, while the dispersion stability of the system in physiological environments was effectively maintained. The sonodynamic performance was quantitatively evaluated using the 1,3-diphenylisobenzofuran (DPBF) probe method. The results demonstrated that the introduction of Au NPs significantly enhanced the ROS generation capability of violet phosphorus under ultrasound irradiation, with the enhancement effect showing a positive correlation with increasing Au NP loading. Mechanistic analysis indicates that the Au NPs act as cavitation nuclei, reducing the cavitation threshold and enhancing the local acoustic field, thereby improving the ultrasound excitation efficiency of violet phosphorus. Additionally, the reduction in the bandgap of violet phosphorus after composite formation promotes the generation of electron-hole pairs. This study provides a new strategy for constructing highly efficient sonodynamic therapy systems and holds potential application value in the treatment of deep-seated diseases such as atherosclerosis.

Keywords

Violet Phosphorus, Gold Nanoparticles, Sonodynamic Therapy, Local Acoustic Field Enhancement

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

急性心血管事件的主要病理基础是动脉粥样硬化易损斑块破裂[1], 这类斑块具有薄纤维帽[2]、大坏死核心及大量炎性细胞浸润等特征, 对氧化应激高度敏感。当前临床采用的降脂药物与支架植入策略存在局限性, 包括药物副作用、对易损斑块干预能力不足以及术后再狭窄风险较高等。开发新型非侵入性、可精准靶向的治疗手段具有迫切需求。

声动力治疗[3]如图 1 作为一种新兴的非侵入性治疗方法, 通过超声激活声敏剂, 在目标区域产生活性氧, 进而诱导细胞凋亡并调节炎症反应。该技术具备组织穿透深度大、可聚焦定位、无电离辐射等优点, 尤其适合深部血管病变的治疗。声敏剂的选择是决定疗效的关键, 理想的声敏剂需兼顾声敏活性、稳定性与生物相容性[4]。

紫磷是磷同素异形体中热力学稳定性最高的结构[5], 其热分解温度达 512°C, 较黑磷高出 52°C。紫磷具有单斜晶系层状结构(空间群 $P_{2/n}$), 基本结构单元为 $-P_2-P_8-P_2-P_9-$ 循环构成的管状结构, 层间以范德华

力结合, 可通过液相剥离制备少层纳米片[6]。作为直接带隙半导体, 体相紫磷带隙约 1.44 eV, 单层约 1.73 eV, 可匹配超声空化产生的声致发光光谱[7]。在物理性质方面, 紫磷是一种直接带隙半导体, 体相紫磷带隙约 1.44 eV, 单层紫磷带隙约 1.73 eV, 这一带隙范围使其能够响应超声空化产生的声致发光光谱。密度泛函理论计算表明, 紫磷的导带电势约为-0.26 eV (相对于标准氢电极), 高于 O_2/O_2^- 的还原电位(-0.16 eV), 表明其在热力学上具有催化氧气产生超氧阴离子自由基的潜力[8]。基于这些特性, 紫磷在声动力治疗领域展现出良好的应用潜力。然而, 单一紫磷纳米片存在光生载流子复合率高、超声能量利用效率偏低等问题[9], 限制了其声动力性能。

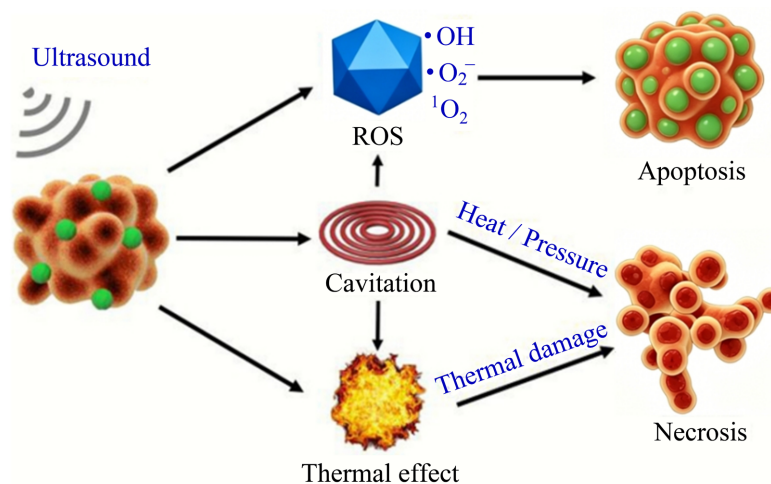


Figure 1. Basic principles of sonodynamic therapy
图 1. 声动力疗法的基本原理

在声敏剂表面负载金属纳米颗粒是提升性能的一种有效手段[10]。金纳米颗粒因高原子序数、高密度及良好生物相容性而备受关注。已有研究显示, 金纳米颗粒可作为空化核降低空化阈值[11]、增强局域声场[12], 从而提高声敏剂的激发效率。同时, 金与半导体界面处形成的异质结有助于光生载流子分离[13]。据此, 本研究采用原位还原法将金纳米颗粒负载于紫磷纳米片表面, 构建金修饰的复合体系。

基于上述思路, 本研究通过原位生长策略将金纳米颗粒负载于紫磷纳米片表面, 构建了 Au@VP 复合体系。本研究通过原子力显微镜(AFM)、Zeta 电位与动态光散射(DLS)对复合体系进行形貌及表面电荷表征, 利用 DPBF 探针法考察不同金负载量下的声动力性能, 结合电子自旋共振波谱(EPR)探讨其协同增强机制, 并探讨局域声场增强机制。本研究为开发物理增强型声动力治疗体系提供了新路径, 在动脉粥样硬化等深部病灶治疗中具有潜在应用价值。

2. 实验部分

取块体紫磷晶体置于玛瑙研钵中充分研磨, 得到紫磷粉末, 将粉末加入超纯水中配制成 0.2 mg/mL 的分散液。将分散液置于超声设备中剥离 6 小时以上设定超声功率 45 W, 频率 50 kHz, 每半小时摇晃试管 10 秒, 冷水循环控制温度低于 45°C。超声后先以 2000 rpm 低速离心去除未剥离的块状材料, 取上清液再以 10,000 rpm 超速离心, 收集沉淀即得紫磷纳米片。

金纳米颗粒的负载采用原位还原策略。取紫磷分散液用去离子水重悬至 0.5 mg/mL, 分取 3 份各 2 mL (含紫磷 1 mg), 分别设置紫磷与金元素质量投料比为 1:0.1、1:0.2 和 1:0.5。在磁力搅拌下向各样品中缓慢滴加计算体积的氯金酸溶液(10 mmol/L), 室温搅拌 30 分钟使金离子充分吸附。随后将样品加热至

80℃, 快速加入 1 mL 柠檬酸三钠溶液, 继续反应 30 分钟。反应结束后自然冷却, 10,000 rpm 离心 15 分钟, 沉淀用去离子水洗涤三次, 即得 Au@VP-0.1、Au@VP-0.2 和 Au@VP-0.5, 重悬于无水乙醇中 4℃ 保存备用。

本实验采用 AFM 观察样品形貌和厚度; 采用马尔文电位粒度仪测定样品的 Zeta 电位和水合粒径; 采用 EPR 检测超声辐照下活性氧的种类。声动力性能测试采用 DPBF 探针法, 将 DPBF 溶于 DMSO 配制成 1 mg/mL 储备液, 在石英比色皿中加入 2 mL 样品溶液(20 μg/mL)和 20 μL DPBF 储备液, 混匀后置入于聚焦超声仪(频率 500 kHz、占空比 50%)中超声处理。将处理过的样品置于酶标仪中检测, 记录 425 nm 处吸光度变化, 吸光度下降速率反映单线态氧产率。

3. 结构与讨论

为表征所制备紫磷纳米片的形貌和结构, 利用 AFM 对修饰前后的紫磷纳米片样品的形貌和结构进行了表征。本征紫磷纳米片如图 2(a), (b)所示, 可知纳米片的厚度大约为 12~15 nm 横向尺寸为 50~80 nm。再根据大约为 0.52 nm 的层间距离, 就可以计算得到紫磷纳米层约为 10~20 层。这一数据直接验证了紫磷的纳米级层状堆叠特性以及超薄结构通常具有更高的表面活性, 易与水和氧气反应。AFM 结果显示紫磷纳米层的超薄结构, 属于超小纳米颗粒范畴[14], 理论上易通过肾脏快速清除。

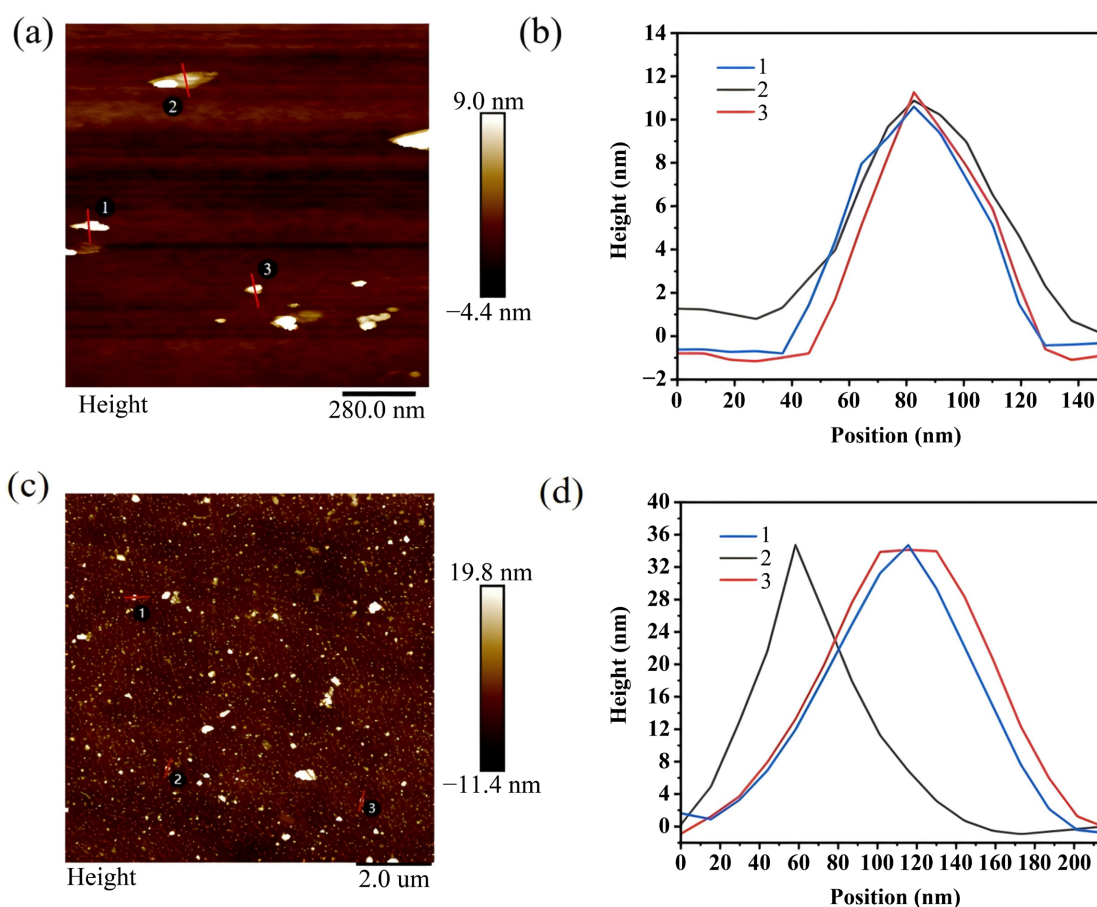


Figure 2. AFM images and dimensions of intrinsic violet phosphorus nanosheets (a), (b) and violet phosphorus nanosheets modified with gold nanoparticles (c), (d)

图 2. 本征紫磷纳米片(a), (b)以及修饰了金纳米颗粒紫磷纳米片(c), (d)的 AFM 图和尺寸

将紫磷纳米片和金纳米颗粒的混合液滴在硅片上,经烘干箱烘干后利用 AFM 对 Au@VP 结构的形貌和结构进行了表征。如图 2(c), (d)所示,根据图 2(c)图中选取的 1、2、3 点位的形貌数据画图得到图 2(d)图,由图 2(d)图的三个点位的厚度为 30~36 nm,横向尺寸约为 200 nm。再根据前面所测紫磷纳米片厚度为 12~15 nm 可知厚度增加主要源于金纳米颗粒的附着。假设金颗粒平均高度约 20 nm,叠加在紫磷纳米片上,总厚度可达约 35 nm,与实测值一致。所以金颗粒的引入通过物理叠加和界面效应显著增加整体厚度,同时扩展横向尺寸分布。

在形貌表征的基础上,进一步通过 Zeta 电位和 DLS 分析金纳米颗粒负载对紫磷表面电荷及分散状态的影响。如图 3(a)所示,未修饰紫磷的 Zeta 电位为-41.8 mV,呈现强负电性,这源于紫磷表面磷原子的孤对电子。单独金纳米颗粒的 Zeta 电位为-9.34 mV。负载金颗粒后,Au@VP 样品的电位升至-23.3 mV,介于两者之间,表明金颗粒成功负载并改变了紫磷表面的电荷状态。从图 3(b)可见,未修饰紫磷的粒径分布峰位于约 110 nm 处,峰形狭窄对称,表明紫磷纳米片在水溶液中具有较好的分散性。负载金纳米颗粒后,粒径分布峰右移至约 205 nm,峰宽略有增加但保持单峰分布,证实金颗粒成功负载于紫磷表面且体系未发生明显聚集。

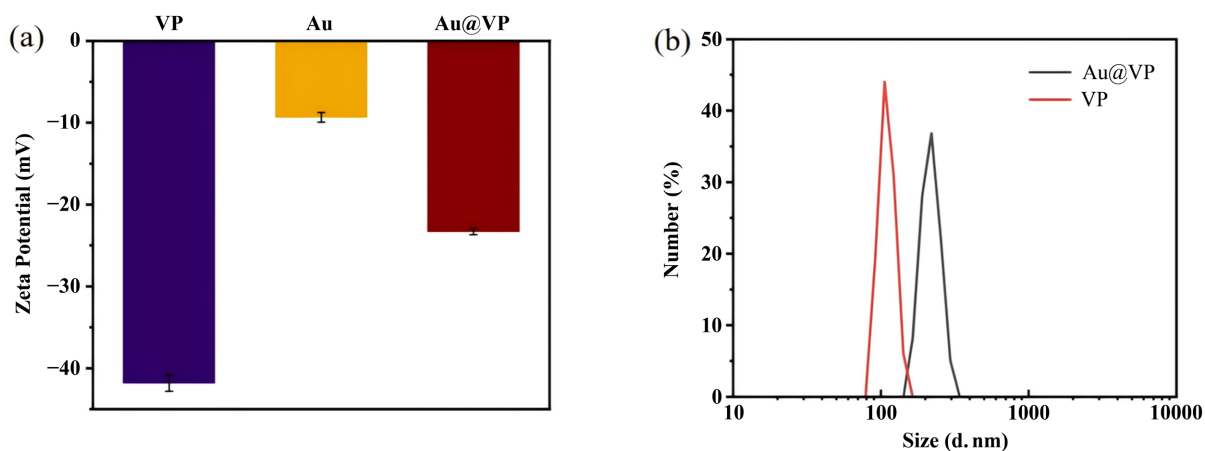


Figure 3. (a) Zeta potential analysis after Au modification; (b) Hydrodynamic diameter distribution curves of VP and Au@VP
图 3. (a) Au 修饰下的 Zeta 电位分析; (b) VP 与 Au@VP 的水合粒径分布曲线

综上所述,AFM 表征,Zeta 电位以及水合粒径分析证实了金纳米颗粒成功吸附于紫磷纳米片表面,修饰后样品保持二维片状形貌,厚度增加源于样品表面生长金纳米颗粒的贡献。

图 4(a)展示了不同条件下单线态氧的 EPR 检测结果。在未添加紫磷纳米材料的纯水对照组中,无论是否施加超声辐照,均可检测到微弱的 TEMPONE 特征三重峰信号。这一现象可归因于水溶液在超声空化作用下产生的声致发光效应以及溶解氧在空化泡崩溃瞬间的高温高压条件下可能发生的激发态转变,导致少量单线态氧的本底生成。当加入紫磷纳米材料后,在不施加超声的条件下,TEMPONE 信号强度较纯水组略有增强,表明紫磷纳米片在无外界物理刺激时即具有一定的本底活性氧产生能力,这可能与紫磷表面缺陷位点对溶解氧的活化作用有关。施加超声辐照后,金纳米颗粒 + 超声组信号与水无异,说明金纳米颗粒本身并没有声动力性能,紫磷 + 超声组呈现出显著增强的三重峰信号,信号强度约为纯水超声组的 2.2 倍,证实超声可有效激发紫磷纳米片产生大量单线态氧。值得注意的是,紫磷 + 超声组与纯水超声组信号峰形一致,均为典型的三重峰,表明所检测到的活性氧物种确为单线态氧,而非其他自由基的干扰信号。

图 4(b)展示了羟基自由基的 EPR 检测结果。在纯水对照组中, 无论是否施加超声辐照, 均未检测到 DMPO/ $\cdot\text{OH}$ 的特征四重峰信号, 表明在无紫磷存在时超声本身难以直接诱导水分子裂解产生羟基自由基。紫磷纳米材料在不施加超声的条件下也未能检测到明显的 $\cdot\text{OH}$ 信号, 说明紫磷单独存在时缺乏直接产生羟基自由基的催化途径。金纳米颗粒 + 超声组也没有检出明显的信号, 说明金本身并不能产生羟基自由基。然而, 当紫磷纳米片与超声辐照共同作用时, EPR 谱图中出现了典型的四重峰信号, 其强度比约为 1:2:2:1, 超精细分裂常数与 DMPO/ $\cdot\text{OH}$ 加合物的标准特征完全吻合。这一结果明确证实紫磷在超声激发下能够有效催化产生羟基自由基。结合单线态氧的检测结果, 表明紫磷的声动力效应涉及多种活性氧物种的协同产生, 其中羟基自由基的生成可能源于超声空化产生的局部高温高压条件下紫磷表面催化水分子裂解, 或通过紫磷激发态电子转移至溶解氧生成超氧阴离子后进一步转化而来。

如图 4(c)在固定功率 1.34 W/cm^2 条件下不同金 - 紫磷比例的样品(1:0.5、1:0.2、1:0.1)及纯紫磷的 DPBF 吸收值随时间(0~120 秒)呈现显著下降趋势。1:0.5 的样品初始吸收值为 1.695, 随时间逐步降低至 120 秒的 0.229, 降幅达 86.5%。1:0.2 的样品吸收值从 1.703 降至 0.289, 降幅 83.0%。1:0.1 样品: 吸收值从 1.754 降至 0.398, 降幅 77.3%。而紫磷: 吸收值仅从 1.81 降至 0.715, 降幅 60.5%显著弱于 Au@VP 样品。

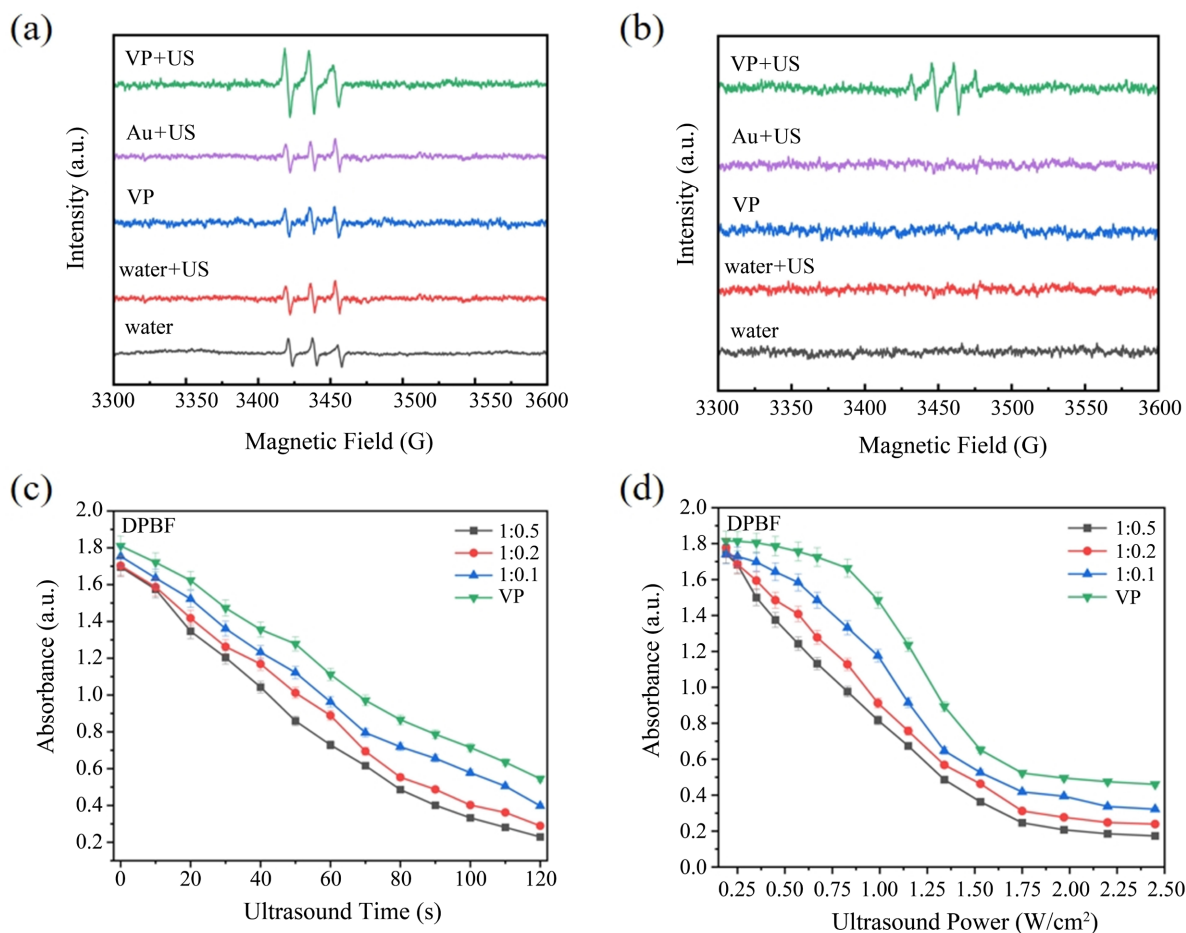


Figure 4. (a) EPR detection results of singlet oxygen ($^1\text{O}_2$); (b) EPR detection results of hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$); (c), (d) Detection of $^1\text{O}_2$ generation from Au-modified violet phosphorus samples using DPBF as a specific probe under (c) different time intervals and (d) different ultrasound power densities

图 4. (a) 单线态氧的 EPR 检测结果; (b) 羟基自由基的 EPR 检测结果; 使用 DPBF 作为特异性探针检测修饰了 Au 后紫磷样品在 (c) 不同时间和 (d) 不同超声功率密度下 $^1\text{O}_2$ 的产生

在图 4(d)中 1:0.5 样品表现出最优性能,在 2.5 W/cm^2 时 DPBF 吸收值降至 0.173,相对于初始值(1.743)降低 90.1%。这表明高比例的金纳米颗粒掺杂显著增强了活性氧释放能力。1:0.2 和 1:0.1 比例的样品在相同功率下的 DPBF 吸收值分别为 0.239 和 0.322,表明金含量降低导致催化性能的降低。而纯紫磷样品(无金掺杂)的性能最弱,DPBF 吸收值仅降至 0.475。这表明金纳米颗粒的等离子体共振效应可增强超声场中的能量吸收,同时异质界面促进载流子分离,从而提高单线态氧($^1\text{O}_2$)的生成效率。高金含量的异质结构(1:0.5)提供了更多活性位点,进一步优化了这一过程。

为进一步探究金纳米颗粒负载对紫磷能带结构的影响及其与声动力性能的关联,采用紫外-可见漫反射光谱对修饰前后样品的能带结构进行分析,并通过 Tauc plot 法[15]计算直接带隙值。

如图 5(a)所示,未修饰紫磷的直接带隙为 1.80 eV。负载金纳米颗粒后如图 5(b), Au@VP-0.5 的直接带隙降至 1.72 eV,降低了 0.08 eV。这一带隙减小可归因于金纳米颗粒与紫磷之间形成的异质界面效应:当金颗粒负载于紫磷表面时,两者的费米能级发生重新平衡,导致紫磷能带向下弯曲,有效带隙减小。

带隙的降低意味着电子从价带跃迁到导带所需能量减小[16]。在相同超声激发条件下(频率 1.0 MHz,功率密度 1.5 W/cm^2),带隙较小的 Au@VP-0.5 可产生更多电子-空穴对,进而促进活性氧的生成。这一能带调控机制从半导体物理层面为金纳米颗粒增强紫磷声动力性能提供了直接证据,带隙降低 0.08 eV 对应电子跃迁所需能量减少约 4.4%,有利于提高超声激发效率,这与前述 DPBF 实验中 Au@VP-0.5 活性氧产率显著提升的结果相一致。因此,Au 修饰带来的能带调控可以促进 VP 声动力性能的增强。

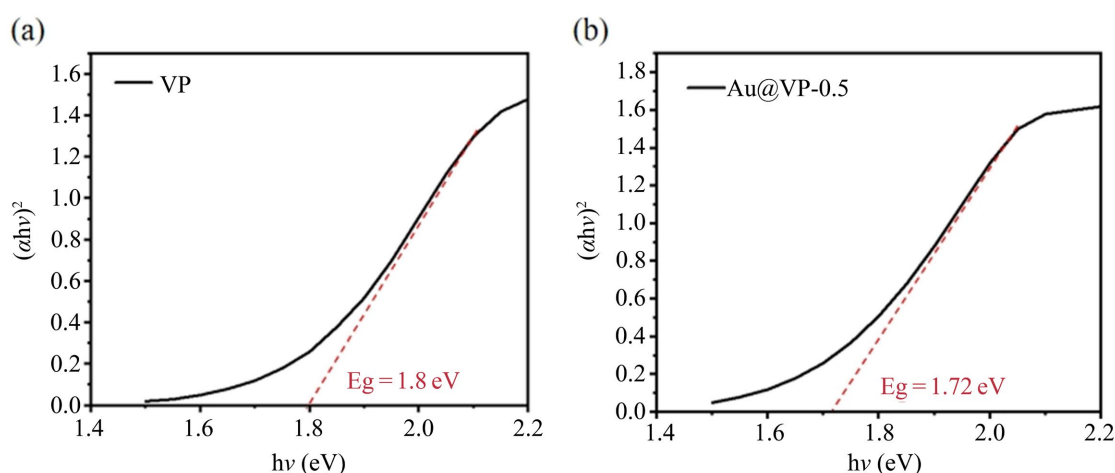


Figure 5. Tauc plots and band gap comparison of unmodified violet phosphorus (a) and Au@VP-0.5 (b)

图 5. 未修饰紫磷 (a)与 Au@VP-0.5 (b)的 Tauc plot 及带隙对比

Au 对紫磷声动力的增强效应也可以从金纳米颗粒增强局域声场[17]的机制得到合理解释。金作为高原子序数、高密度的金属元素[18],在超声场中具有独特的物理响应特性。首先,金纳米颗粒可作为有效的空化核,降低液体中空化泡形成的阈值。当超声波传播至金颗粒表面时,金与介质之间的声阻抗差异导致局部声压增强,促进空化泡在颗粒表面优先成核[19]。空化泡崩溃瞬间在局部产生高温高压,并伴随声致发光增强,为紫磷提供更多激发光源。

其次,金纳米颗粒的表面等离子体共振效应虽主要在光场中发挥作用,但在超声场中,金颗粒可作为声波散射中心,增强局域声场强度[20]。有限元模拟研究表明,金纳米颗粒周围的声压幅值可比入射声场提高数倍,这种局域声场增强效应可显著提升紫磷受到的超声能量密度,进而提高其激发效率和活性氧产率。此外,金颗粒与紫磷基底形成的异质界面可能产生局域电场,进一步促进光生载流子的分离和

迁移[21]。

本研究中, Au@VP-0.5 样品金颗粒负载密度最高, 金颗粒间距最小, 颗粒间可能产生声场耦合效应, 进一步增强局域声场强度, 因此表现出最佳的声动力性能。金纳米颗粒通过增强局域声场显著提升了紫磷的声动力性能。动脉粥样硬化斑块内新生血管结构脆弱、炎性细胞浸润密集, 对声动力产生的活性氧和物理效应具有较高的敏感性[22]。Au@VP 体系在超声辐照下可实现高效、可控的活性氧产生, 有望用于斑块局部的精准治疗, 减少对周围正常血管组织的损伤。

4. 结论

本研究通过原位还原策略成功将金纳米颗粒负载于紫磷纳米片表面, 构建了金纳米颗粒修饰的紫磷复合体系。原子力显微镜显示金纳米颗粒均匀分布于紫磷表面, 样品厚度和表面粗糙度明显增加; Zeta 电位从 -41.8 mV 升至 -23.3 mV, 水合粒径从 110 nm 增至 205 nm, 证实了金纳米颗粒的成功负载。声动力性能评估表明, Au@VP 体系产生的活性氧为单线态氧和羟自由基, 金纳米颗粒的引入显著增强了紫磷在超声辐照下的活性氧产率, 且增强效果与金负载量呈正相关, Au@VP-0.5 样品的相对 ROS 产率约为未修饰紫磷的 1.6 倍。机制分析表明, 金纳米颗粒可作为空化核降低空化阈值、增强局域声场, 从而提高紫磷的超声激发效率, 其次, 金修饰紫磷的带隙由 1.80 eV 降低至 1.72 eV, 促进了电子-空穴对的产生与分离。本研究为构建物理增强型声动力治疗体系提供了新策略, 在生物医学领域, 尤其是在深部肿瘤或疾病治疗中具有潜在应用价值。

参考文献

- [1] Zhang, L., Huang, H., Zhang, B., Gu, M., Zhao, D., Zhao, X., *et al.* (2020) Structure and Properties of Violet Phosphorus and Its Phosphorene Exfoliation. *Angewandte Chemie International Edition*, **59**, 1074-1080. <https://doi.org/10.1002/anie.201912761>
- [2] Zhang, L., Li, X., Yao, F., Li, L., Huang, H., Zhao, X., *et al.* (2022) Fast Identification of the Crystallographic Orientation of Violet Phosphorus Nanoflakes with Preferred In-Plane Cleavage Edge Orientation. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2111057. <https://doi.org/10.1002/adfm.202111057>
- [3] Tian, H., Wang, J., Lai, G., Dou, Y., Gao, J., Duan, Z., *et al.* (2023) Renaissance of Elemental Phosphorus Materials: Properties, Synthesis, and Applications in Sustainable Energy and Environment. *Chemical Society Reviews*, **52**, 5388-5484. <https://doi.org/10.1039/d2cs01018f>
- [4] Mei, Y., Cao, Y. and Wang, W. (2025) Emerging Violet Phosphorus Nanomaterial for Biomedical Applications. *Advanced Healthcare Materials*, **14**, Article ID: 2403576. <https://doi.org/10.1002/adhm.202403576>
- [5] Zhao, C., Han, X., Wang, S., Pan, Z., Tang, X. and Jiang, Z. (2023) Violet Phosphorus Nanosheet: A Biocompatible and Stable Platform for Stimuli-Responsive Multimodal Cancer Phototherapy. *Advanced Healthcare Materials*, **12**, Article ID: 2201995. <https://doi.org/10.1002/adhm.202201995>
- [6] Qi, M., Zhao, X., Zhao, X., Zhang, H., Li, Z., Zhang, X., *et al.* (2023) Violet Phosphorene Nanosheets and Cold Atmospheric Plasma for Synergetic Cancer Therapy. *Chemical Engineering Journal*, **475**, Article ID: 145884. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145884>
- [7] Zhang, H., Zhang, Y., Zhang, Y., Li, H., Ou, M., Yu, Y., *et al.* (2024) Catalytic Activity of Violet Phosphorus-Based Nanosystems and the Role of Metabolites in Tumor Therapy. *Nature Communications*, **15**, Article No. 6783. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50769-0>
- [8] Shen, Q., Kang, J., Zhao, X., Lou, W., Li, Z., Zhang, L., *et al.* (2024) Bacterial Elimination via Cell Membrane Penetration by Violet Phosphorene Peripheral Sub-Nanoneedles Combined with Oxidative Stress. *Chemical Science*, **15**, 4926-4937. <https://doi.org/10.1039/d3sc05517e>
- [9] Hong, L., Li, W., Qi, M., Dong, W., Liu, C., Li, M., *et al.* (2024) Enhanced Antimicrobial Efficiency of Gold Nanoclusters via Improved Sonodynamic Activity and Out-Membrane Crossing Capacity. *Nano Letters*, **24**, 15547-15556. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c03503>
- [10] Wang, D., Li, J., Wang, M., Jin, B., Wang, X., Zheng, Y., *et al.* (2024) Insight into Sonodynamic Activities of Gold Nanoparticles with Different Morphologies. *ChemistrySelect*, **9**, e202401230. <https://doi.org/10.1002/slct.202401230>

- [11] Huang, L., Wei, L., Li, D., Zhang, W. and Liu, L. (2025) Enhanced Sonodynamic Therapy via Au Nanoclusters Deposited on TiO₂ Nanosheets. *International Journal of Nanomedicine*, **20**, 6121-6131. <https://doi.org/10.2147/ijn.s516314>
- [12] Deepagan, V.G., You, D.G., Um, W., Ko, H., Kwon, S., Choi, K.Y., *et al.* (2016) Long-circulating Au-TiO₂ Nanocomposite as a Sonosensitizer for Ros-Mediated Eradication of Cancer. *Nano Letters*, **16**, 6257-6264. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b02547>
- [13] Liang, S., Deng, X., Ma, P., Cheng, Z. and Lin, J. (2020) Recent Advances in Nanomaterial-Assisted Combinational Sonodynamic Cancer Therapy. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: 2003214. <https://doi.org/10.1002/adma.202003214>
- [14] Canavese, G., Ancona, A., Racca, L., Canta, M., Dumontel, B., Barbaresco, F., *et al.* (2018) Nanoparticle-Assisted Ultrasound: A Special Focus on Sonodynamic Therapy against Cancer. *Chemical Engineering Journal*, **340**, 155-172. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.060>
- [15] Xu, Z., Xu, J.Y. and Liu, X.J. (2010) Dynamical Process of Cavitation Bubble Adsorbed in Gold Nanoparticle under Combined Irradiations of Laser and Ultrasound. *Acta Acustica*, **35**, 14-18.
- [16] Li, F. and Liu, M. (2024) Gold-Titanium Dioxide Heterojunction-Enhanced Sonodynamic Biofilm Removal and Its Application in Peri-Implantitis Treatment. *Proceedings of the 16th Academic Conference of the Chinese Stomatological Association Periodontology Committee*, Xi'an, China, 19-22 June 2024, 121.
- [17] Kong, N., Zhang, H., Feng, C., Liu, C., Xiao, Y., Zhang, X., *et al.* (2021) Arsenene-Mediated Multiple Independently Targeted Reactive Oxygen Species Burst for Cancer Therapy. *Nature Communications*, **12**, Article No. 4777. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24961-5>
- [18] Tang, Z., Liu, Y., Ni, D., Zhou, J., Zhang, M., Zhao, P., *et al.* (2020) Biodegradable Nanoprodugs: "Delivering" ROS to Cancer Cells for Molecular Dynamic Therapy. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: 1904011. <https://doi.org/10.1002/adma.201904011>
- [19] Liu, Y., Zhen, W., Wang, Y., Liu, J., Jin, L., Zhang, T., *et al.* (2019) One-Dimensional Fe₂P Acts as a Fenton Agent in Response to NIR II Light and Ultrasound for Deep Tumor Synergetic Theranostics. *Angewandte Chemie International Edition*, **58**, 2407-2412. <https://doi.org/10.1002/anie.201813702>
- [20] Gong, F., Cheng, L., Yang, N., Gong, Y., Ni, Y., Bai, S., *et al.* (2020) Preparation of TiH_{1.924} Nanodots by Liquid-Phase Exfoliation for Enhanced Sonodynamic Cancer Therapy. *Nature Communications*, **11**, Article No. 3712. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17485-x>
- [21] Wang, S., Zhao, X., Liu, Z., Yang, X., Pang, B., Gao, Y., *et al.* (2023) Violet Phosphorus-Fe₃O₄ as a Novel Photocatalysis-Self-Fenton System Coupled with Underwater Bubble Plasma to Efficiently Remove Norfloxacin in Water. *Chemical Engineering Journal*, **452**, Article ID: 139481. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139481>
- [22] Yu, Q., Zhang, Q., Zhou, Y., Yan, S., Li, J., Yang, C., *et al.* (2025) Acid-Responsive Nanoregulators Elicit Hydrogen Sulfide-Mediated Tumor Oxygenation and Selective Sonosensitization for Hypoxic Tumors. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article ID: 2419386. <https://doi.org/10.1002/adfm.202419386>