

专题: 高压下的光电物性调控与原位表征 • 封面文章

压力诱导 WS_2 纳米管光电性能的显著提升*姜懿峰¹⁾ 岳磊^{1)†} 魏子寓²⁾ 赵晓续³⁾ 李全军^{1)‡} 刘冰冰¹⁾

1) (吉林大学高压与超硬材料全国重点实验室, 长春 130012)

2) (黑龙江大学物理科学与技术学院, 哈尔滨 150080)

3) (北京大学材料科学与工程学院, 北京 100871)

(2025 年 9 月 29 日收到; 2025 年 10 月 27 日收到修改稿)

探索功能材料光电性能优化的有效途径对于新一代光电子器件的发展至关重要. 然而现有调控策略常存在工艺复杂等问题, 且一维过渡金属硫族化合物 (TMDs) 在极端条件下的结构演化与光电性能提升的内在关系尚不明确, 制约了光电性能的进一步提升. 本研究通过压力调控实现了 WS_2 纳米管 (NT- WS_2) 光电响应特性的显著增强. 在 13.5 GPa 压力下, 器件响应度提升至 43.75 A/W, 较初始值提高近 2 个数量级, 外量子效率和比探测率也分别提高约 67 倍和 10 倍. 高压原位 X 射线衍射与拉曼光谱结果表明, NT- WS_2 光电性能的提升源于压力下层间作用增强导致的带隙收缩, 以及纳米管致密堆积改善了载流子输运性能. 本工作不仅深化了一维 TMDs 在极端条件下光电演化规律的理解, 也为高性能纳米光电子器件的设计与优化提供了新的思路.

关键词: 高压, 过渡金属硫族化合物, 纳米管, 光电响应**DOI:** 10.7498/aps.75.20251345**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251345

1 引言

在低维材料体系中, 一维 (1D) 纳米材料因其独特的几何结构和量子限域效应, 在高速传输、低能耗和高灵敏探测等方面展现出巨大潜力. 其中, WS_2 纳米管 (NT- WS_2) 自 1992 年实现可控合成以来便受到广泛关注^[1]. 除在摩擦学和复合材料增强领域的应用外^[2-4], NT- WS_2 在光电探测与光电子器件中的潜力逐渐显现. 已有研究表明, 基于单根 NT- WS_2 构建的光电探测器能够实现高灵敏度与宽谱响应^[5,6], 凸显出其在纳米光电子学中的独特优势. 然而, 要充分释放此类低维材料的潜力, 核心在于实现其光电性能的有效调控. 材料的晶体结

构与电子结构在很大程度上决定其光电特性^[7], 而带隙结构与光学跃迁机制的合理调控, 则是实现优异性能的关键途径. 传统方法如构建异质结^[8-10]、元素掺杂^[11,12], 虽能提升光电转换效率, 但往往伴随杂质引入与复杂界面的产生, 从而掩盖了材料的本征构效关系. 因此, 亟需探索清洁、高效且可控的物理手段, 以揭示低维半导体的电子结构演化并实现光电性能的精准优化.

高压作为一种“干净”且高效的外场手段, 能够在不引入杂质的情况下, 连续且可逆地调控晶体结构、能带分布及光学跃迁过程^[13-16], 从而实现显著的性能优化. 近年来, 高压调控已在过渡金属硫族化合物 (TMDs)^[17-22]、钙钛矿^[23-26] 及其他低维材料^[27] 中取得重要进展, 如实现带隙调节、载流子浓

* 国家自然科学基金 (批准号: 12274166)、黑龙江省省属高校基本科研业务费项目 (批准号: 2022-KYYWF-1118) 和国家重点研发计划 (批准号: 2024YFE0109200) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yuelei@jlu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: liquanjuan@jlu.edu.cn

度提升及光谱响应拓展等. 我们此前的研究表明, 在二维层状 WS_2 中, 外加压力可使光电流增强近 30 倍, 并将光响应范围扩展至 1450 nm, 凸显了高压在低维半导体光电调控中的独特优势^[28]. 在此基础上, 本研究将压力调控策略拓展至一维 WS_2 纳米管, 系统研究其在高压下的光电响应特性, 并探讨形貌维度对调控行为的影响. 实验结果显示, NT- WS_2 在 13.5 GPa 时光电流增强高达 84 倍. 结合原位高压 X 射线衍射与拉曼光谱分析, 揭示了光电流显著增强主要源于压力诱导的带隙收缩与纳米管壁间紧密堆积. 本研究不仅深化了一维 TMDs 在极端条件下光电演化规律的认识, 也为高性能纳米光电器件的设计与优化提供了新的思路.

2 实验方法

2.1 样品制备

WS_2 纳米管是通过自上而下的固相反应法合成^[29]. 本研究所用样品由以色列魏茨曼科学研究所 Reshef Tenne 教授及霍隆理工学院 Alla Zak 教授团队提供.

2.2 样品常压表征

样品的形貌通过 FEI Magellan 400 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 进行观察; 其微观结构利用 JEM-2200 FS 型透射电子显微镜 (TEM) 和高分辨透射电子显微镜 (HRTEM) 进行分析. 同时, 采用 X 射线衍射 (XRD) 与拉曼 (Raman) 光谱对其结构特征进行表征.

2.3 高压测试

高压 XRD 和 Raman 光谱测量: 实验中所用金刚石的砧面直径均为 400 μm , 垫片预压后打孔, 孔径为 180 μm . 通过红宝石荧光峰位标定法对实验过程中的压力进行标定. 高压拉曼光谱测量所用的设备为 Horiba 拉曼光谱仪, 实验中的激发光源选用波长为 532 nm 的半导体泵浦固态 DPSS 绿色激光器. 高压 XRD 测量采用 $\text{Mo-K}\alpha$ 辐射 ($\lambda = 0.7107 \text{ \AA}$), 所使用设备与常压一致均为 Rigaku Synergy Custom FR-X. 高压光电特性测量: 本实验采用对称式金刚石对顶砧 (DAC) 施加高压, 所用金刚石砧面直径均为 400 μm . 实验中, 首先对钢

片进行预压并打孔, 在垫片表面填充环氧树脂以及在孔内填充立方氮化硼 (*c*-BN) 来实现垫片和导线之间的绝缘, 再次打孔制备样品腔, 直径为 250 μm . 采用双探针结构进行电学测试, 两个铂 (Pt) 电极平行放置并与样品表面接触. 整个测试未使用传压介质. 光源为氙灯, 通过滤光片获得特定波长的入射光. 光功率由 CEL-NP2000 激光功率计测量, 具体测量方式如图 S1 ([online](#)) 所示, 因功率计读数的漂移会造成微小误差, 因此取多次重复测量结果的平均值作为入射功率; 光电流由 Keithley 2461 综合数字源表进行测量, 采样频率为 5 Hz.

3 结果与讨论

3.1 材料表征

首先, 对实验所用的 NT- WS_2 纳米管在常压下进行系统表征. 图 1(a), (b) 所示为纳米管的 TEM 图像, 可见其为中空多壁结构, 管长为数微米. 图 1(c) 呈现了 NT- WS_2 的能量色散 X 射线谱 (EDS) 及其相应的元素分布图, 清晰表明组成元素 W 和 S 在整个样品中分布均匀. HRTEM 图像揭示了多层堆叠特征, 相邻层之间的层间距为 0.63 nm, 略大于文献^[30]中报道的块体 WS_2 层间距. 这一膨胀主要归因于纳米管弯曲点附近的局部应变, 在弯曲程度较小或较平坦的区域层间距相对减小, 但仍大于块体材料的层间距. 在局部尺度上, 每一层与典型单层 WS_2 结构类似: 每个 W 原子被 6 个 S 原子包围, 形成三棱柱构型. 此外, 先前研究表明, 多壁纳米管的各层具有不同手性, 单个多壁纳米管器件通常由之字型 (zigzag)、扶手椅型 (armchair) 和手性 (chiral) 单壁纳米管组成. 类似于氮化硼纳米管, 它们的点群分别为 C_{2nh} , C_{2nv} 和 C_n , 因此之字型 and 手性单壁纳米管本质上具有极性并呈非中心对称性, 这为其显著的体光伏效应提供了良好条件^[31]. 尽管如此, 纳米管的整体衍射特征仍高度类似于 2H 型块体 WS_2 . 值得注意的是, (002), (004) 和 (006) 衍射峰的微小偏移 (图 1(e)) 与 HRTEM 测量结果一致, 进一步表明纳米管的层间距略大于块体材料, 反映了卷曲与局部应变对晶格的影响. 此外, 对 NT- WS_2 进行常压 Raman 测试, 如图 1(f) 所示其中涉及 3 个活跃的振动模式分别为: 层内振动模式 E_g^1 (352 cm^{-1}) 涉及层内 W 原子和 S 原子在面内做反向剪切运动, 层间振

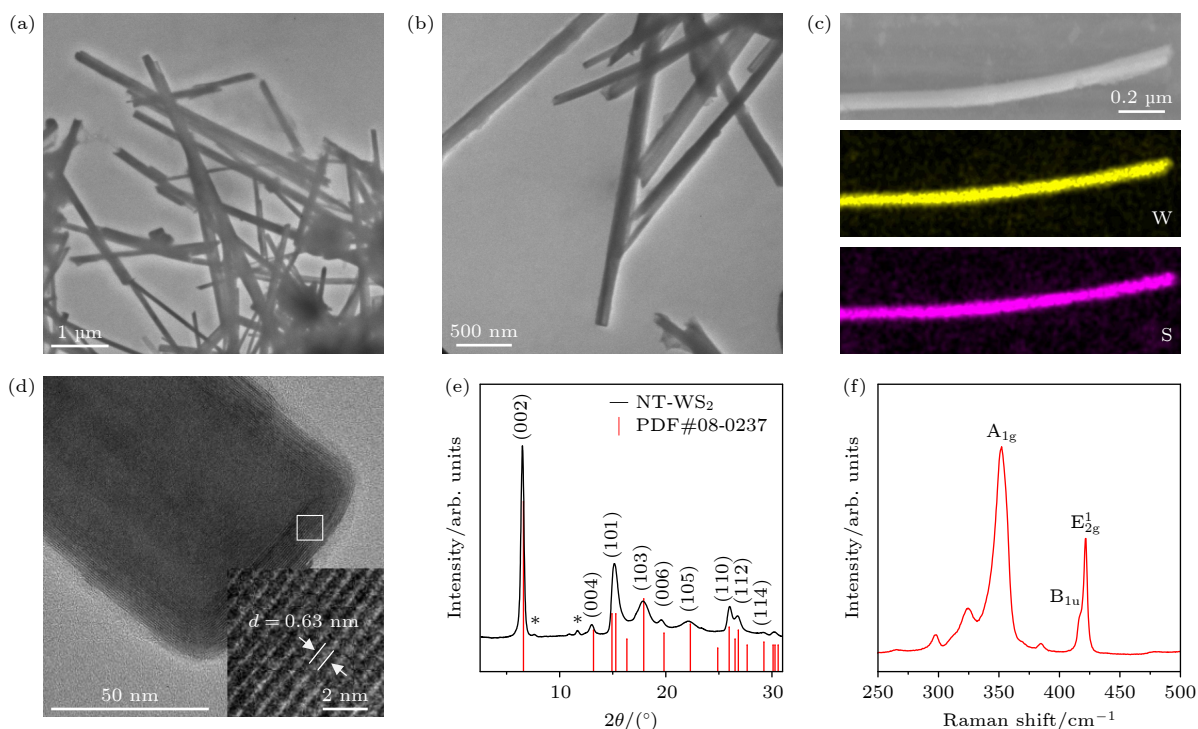


图 1 (a), (b) NT-WS₂ 的 TEM 图像; (c) NT-WS₂ 的 SEM 图像以及 EDS 分布; (d) NT-WS₂ 的 HRTEM 图像; (e) NT-WS₂ 的常压 XRD 图谱, 红色竖线为体材料 WS₂ 标准 PDF 卡片的衍射峰位, *标注的峰是合成过程中未转化的 WO_x 相, 可能是 W₁₈O₄₉ 或 WO₂; (f) NT-WS₂ 的常压 Raman 图谱

Fig. 1. (a), (b) TEM images of NT-WS₂; (c) SEM images and EDS distribution of NT-WS₂; (d) HRTEM images of NT-WS₂; (e) XRD patterns of NT-WS₂ at ambient pressure, with the red vertical lines indicating the diffraction peak positions of bulk WS₂ from the standard PDF card, the marked peaks correspond to the unconverted WO_x phase formed during the synthesis process, and may correspond to W₁₈O₄₉ or WO₂; (f) Raman spectra of NT-WS₂ at ambient pressure.

动模式 A_{1g} (421 cm⁻¹) 涉及相邻层间沿 *c* 轴做同步伸缩运动, 以及“静默模式” B_{1u} (416 cm⁻¹) 涉及相邻层间沿 *c* 轴做反向伸缩运动. 其中 B_{1u} 模式在体材料中很弱, 而在纳米材料中因结构无序显著增强, 是区分纳米管与体相的特征模式^[32], 这与人所得结果相一致^[33].

3.2 NT-WS₂ 的高压光电性质

为了系统研究 NT-WS₂ 在高压下光电性质的演化, 利用两电极法对其进行高压原位光电响应测量. 在测试过程中, 使用氙灯作为光源, 其光斑尺寸大于样品腔, 以确保样品受到均匀照射. 实验过程中, 入射光功率保持在 1.6 mW/cm², 偏置电压固定为 0.1 V. 图 2(a) 展示了 NT-WS₂ 光电流随压力的变化. 在实验压力范围内, NT-WS₂ 均表现出明显的光电响应. 初始压力下, 光电流约为 416 nA. 随着压力升高, 光电流持续增大, 并在实验最高压力 13.5 GPa 时达到 34.98 μA, 相较初始压力增大 84 倍, 显著高于块体 2H-WS₂ 的压致

增幅^[28]. 这表明一维纳米管在高压下具有独特的光电调控潜力. 为进一步量化其光电响应性能特性, 计算了光电流密度 J_{ph} 和响应度 R , 公式如下:

$$J_{ph} = \frac{I_{ph}}{S}, \quad (1)$$

$$R = I_{ph}/(P_{in}S), \quad (2)$$

其中, 净光电流 $I_{ph} = I_{light} - I_{dark}$, I_{light} 为光照时输出的电流, I_{dark} 为无光照时输出的电流; S 为有效照射面积 5 × 10⁻⁴ cm², P_{in} 为入射光功率密度 1.6 mW/cm². 初始压力下的 J_{ph} 和 R 分别是 0.80 mA/cm² 和 0.50 A/W. 随着压力增大, 光电流密度和响应度均持续增长, 在 13.5 GPa 时, J_{ph} 达到 70 mA/cm², R 达到 43.75 A/W. 与体相 WS₂ 在压力下光电性能相比 (5 V, 20.1 GPa, 692.9 A/W)^[28], NT-WS₂ 在更低偏压和更低压力下即可展现出优异的响应 (0.1 V, 13.5 GPa, 43.75 A/W), 凸显出其在能耗与灵敏度方面的综合优势. 值得注意的是, NT-WS₂ 的光电流响应速度相对较慢 (见图 S2 (online)), 这可能与纳米材料易形成缺陷有关. 缺陷导致载流子

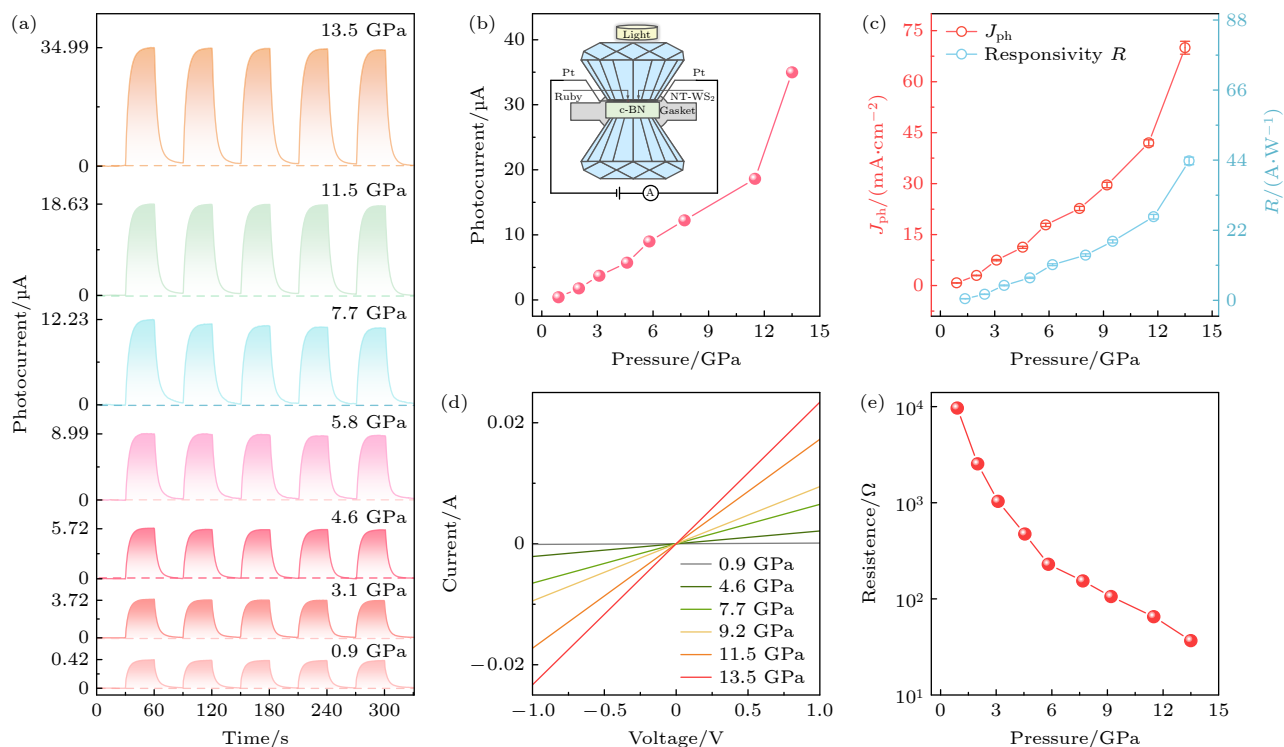


图2 在氙灯照射下, 0.1 V 偏压时, 在 13.5 GPa 压力范围内, NT-WS₂ 的光电特性在压缩过程中的变化 (a) 不同压力时的光响应情况; (b) NT-WS₂ 的光电流 (插图为实验装置示意图); (c) 光电流密度和响应度; (d) I - V 特性曲线; (e) 电阻变化情况

Fig. 2. Evolution of the photoelectric properties of NT-WS₂ during compression under xenon lamp irradiation with 0.1 V bias, within the pressure range of 13.5 GPa: (a) Photoresponse at different pressures; (b) photocurrent of NT-WS₂ (inset shows the schematic of the experimental setup); (c) photocurrent density and responsivity; (d) I - V characteristic curves; (e) variation of resistance.

寿命延长, 从而增强光电导增益, 但以牺牲响应速度为代价^[34]. 此外, 为评估电极与 NT-WS₂ 的接触情况, 我们在暗态下测量了 I - V 曲线 (见图 2(d)). 结果显示电流-电压关系呈线性特征, 表明 NT-WS₂ 与 Pt 电极之间形成了良好的欧姆接触. 这种线性关系在整个加压过程中保持不变, 排除了接触电阻对光响应的影响, 验证了光电流随压力变化是源自 NT-WS₂ 的本征特性. 通过对 I - V 曲线拟合得到的电阻随压力变化结果表明, 随着压力增大, NT-WS₂ 的电阻迅速下降, 在 13.5 GPa 时较初始值下降约两个数量级. 此外, 将 NT-WS₂ 卸压至 0.8 GPa 后与加压过程中 0.9 GPa 时的光电响应图像进行比较 (见图 S3 (online)), 结果表明卸压后该光电响应特性可逆, 表现出良好的恢复性.

为了揭示不同波长入射光对光电流的贡献情况, 我们还对可见光范围内不同波长光照下 (400, 500, 600, 650 nm) 的光电响应特性进行测量. 图 3(a) 显示了加压过程中各波长光照下的光电流曲线. 结果表明: 在相同压力下, 500 nm 光源激发的光电流最大; 当压力升至 13.5 GPa 时, 各波长

光激发的光电流均较初始压力下的光电流增强数十倍, 与全光谱照射下观察到的趋势一致. 外量子效率 EQE 和比探测率 D^* 同样作为表征光电性能的关键参数, 其计算公式如下:

$$\text{EQE} = R \frac{hc}{e\lambda}, \quad (3)$$

$$D^* = R \sqrt{\frac{S}{2eI_d}}, \quad (4)$$

其中, I_d 是暗电流; h 是普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s; c 是光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s; e 是电子电荷, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C; λ 为对应的波长. 计算结果表明, 随着压力的增加, NT-WS₂ 光响应的外量子效率和响应度都迅速增大, 增幅约 67 倍. 比探测率 D^* 作为光电器件的灵敏度的关键指标, 在 0.9—13.5 GPa 范围内呈稳步上升趋势, 由初始 3.24×10^9 Jones 提升至 1.25×10^{10} Jones. 由此可见, 压力不仅显著提升了 WS₂ 纳米管光响应度, 还增强了其光电转化效率和器件灵敏度. 这些结果表明, 高压能够显著增强 NT-WS₂ 的光电性能, 并充分体现了一维纳米管在极端条件下优异的光电调控能力.

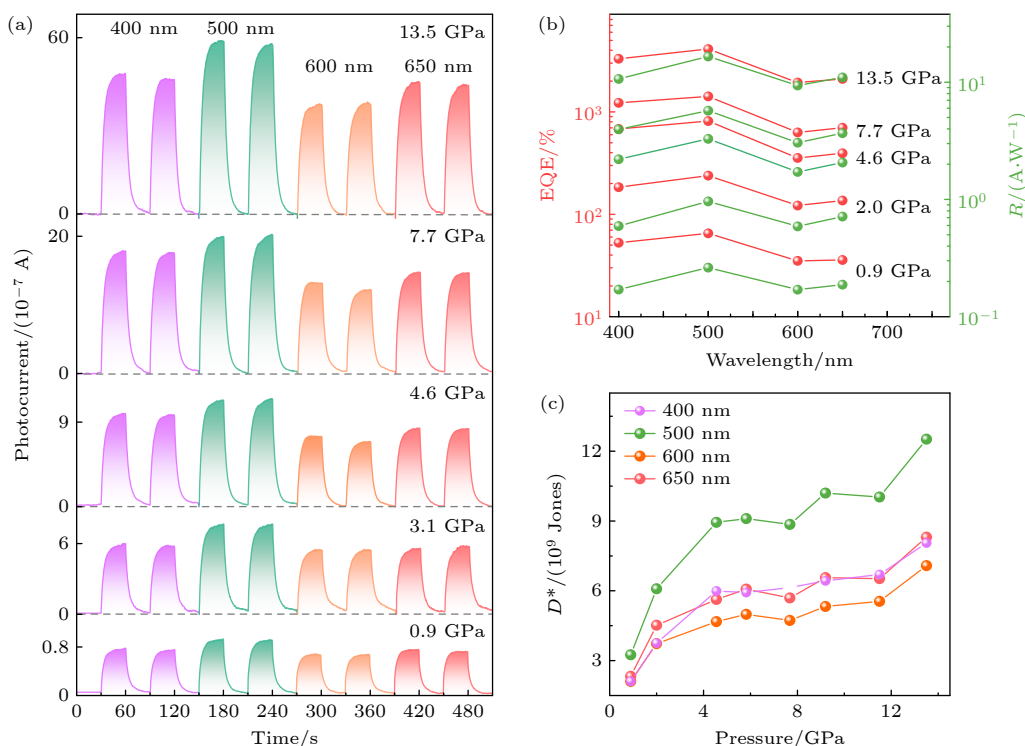


图3 (a) NT-WS₂ 在选定压力, 400, 500, 600, 650 nm 的入射光照射时的光电流响应情况; (b), (c) NT-WS₂ 的外量子效率、响应度、比探测率随压力的变化趋势

Fig. 3. (a) Photocurrent response of NT-WS₂ under incident light irradiation at 400, 500, 600, and 650 nm at selected pressures; (b), (c) the variations of the external quantum efficiency, responsivity and specific detectivity of NT-WS₂ with applied pressure.

3.3 NT-WS₂ 的高压结构

为研究压力诱导的结构演化行为, 对 NT-WS₂ 在 0—15.5 GPa 范围内进行高压 XRD 测试 (图 4(a)). 随压力升高, 所有衍射峰整体向高角度移动, 表明晶胞发生压缩. 同时, 部分衍射峰出现展宽并伴随强度减弱, 反映出纳米管晶格结构在压力下产生畸变. 在实验压力范围内未观察到新衍射峰的出现, 说明无结构相变发生. 卸压后, 衍射图谱能够恢复至初始状态, 表明 NT-WS₂ 在所研究压力范围内结构演化是可逆的. 为进一步获得晶胞参数与体积的压力依赖关系, 利用 GSAS 软件对 XRD 数据进行了 Rietveld 精修 (图 4(b), (c), (d)). 结果显示, 在压力作用下 c 轴压缩率显著高于 a 轴. 在 15.5 GPa 时, c 轴与 a 轴分别缩短约 12% 和 4%, 该各向异性压缩行为差异可直接归因于 NT-WS₂ 的层内原子间通过强共价键结合, 而层间依靠弱范德瓦耳斯相互作用维系的晶体结构特征.

为进一步理解压力对 NT-WS₂ 光电性能增强的调控作用, 我们测试了 1.1—15.8 GPa 范围内的原位拉曼光谱 (图 5(a)), 可见 3 种特征振动模式 (E_{2g}^1 , B_{1u} , A_{1g}) 均随压力升高呈现持续硬化趋势

(图 5(b)), 且无新峰出现, 进一步佐证了无结构相变的发生. 与此前利用硅油作为传压介质实验测到的结果一致, 表明压力环境不会改变相变路径 [35]. 值得注意的是, 由 15.8 GPa 卸压至常压后, 拉曼图谱与初始状态完全重合, 表明压缩过程中的结构变化具有可逆性. 这一现象与本研究高压 XRD 分析中 c 轴具有更高压缩性的结论相吻合, 共同证实了加压过程中层间 S—S 原子间相互作用的显著增强. 定量分析显示, E_{2g}^1 , B_{1u} , A_{1g} 模式的压力系数分别是 1.47, 1.37, 2.73 $\text{cm}^{-1}\cdot\text{GPa}^{-1}$, 三者的硬化趋势表明压力下 NT-WS₂ 的层内与层间相互作用均增强, 而 A_{1g} 模式具有显著更高的压力系数, 凸显其对压力的响应敏感性尤为突出.

先前的理论研究表明, 在二维层状 WS₂ 中, 压力诱导的层间距缩短会增强层间相互作用, 并加剧 W-5d 轨道与 S-3p 轨道的耦合, 导致价带和导带色散程度增加, 从而引发带隙持续收缩 [28]. 与此类似, NT-WS₂ 在压力下层间距的减小同样会造成带隙缩小, 降低电子跃迁的能垒, 促进价带电子的光激发并产生大量电子-空穴对, 从而显著增强其光电响应性能. 值得注意的是, 与块体 WS₂ 相比

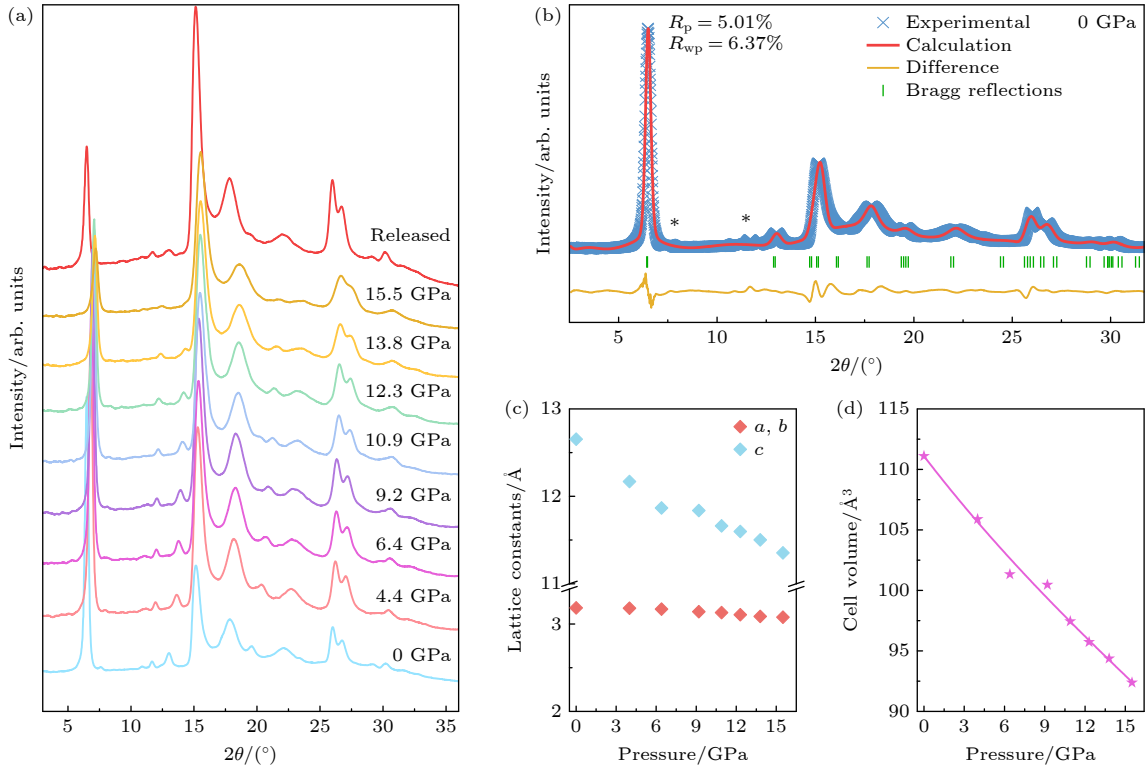


图 4 (a) 在 15.5 GPa 压力范围内 NT-WS₂ 的高压 XRD 图谱; (b) NT-WS₂ 在常压条件下的 XRD 精修谱图; (c), (d) 晶胞参数 a , b , c 及 V 随压力变化趋势

Fig. 4. (a) High-pressure XRD patterns of NT-WS₂ within the pressure range of 15.5 GPa; (b) XRD Rietveld refinement pattern of NT-WS₂ under ambient pressure; (c), (d) variations of unit cell parameters (a , b , c , and V) of NT-WS₂ with pressure.

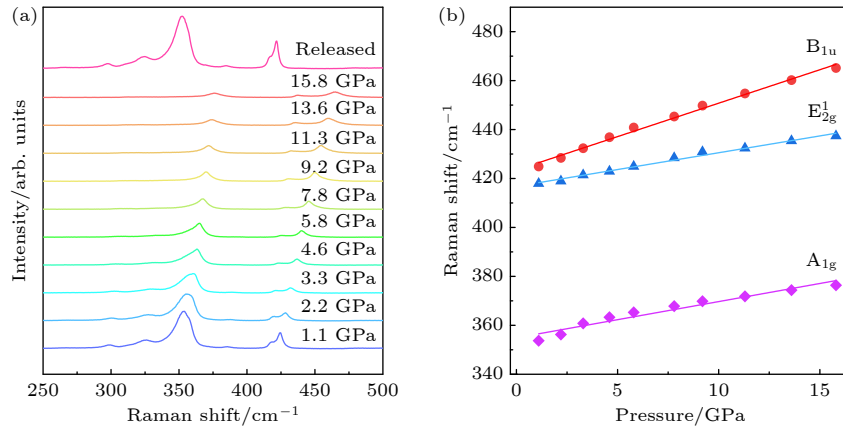


图 5 532 nm 激光激发下, NT-WS₂ 的高压拉曼表征 (a) 高压拉曼图谱; (b) 拉曼振动模式随压力变化趋势

Fig. 5. High-pressure Raman characterization of NT-WS₂ under 532 nm laser excitation: (a) High-pressure Raman spectra; (b) evolution of Raman vibrational modes with pressure.

(21.8 GPa 下 c 轴收缩约 11%、 a 轴压缩约 4%), NT-WS₂ 表现出更强的压力敏感性, 这一结构响应差异为其优于块体材料的性能提升提供了合理的物理解释. 此外, 原本在低压下呈疏松分布的纳米管在加压过程中逐渐趋于紧密堆积 [36], 从而构建更为高效的电荷传输通道, 并显著改善载流子的输运性能. 综合来看, 带隙收缩与载流子输运性能提升的协同效应共同驱动了 NT-WS₂ 在压力下光电

响应的显著提升, 为其在高性能光电子器件中的应用奠定了重要基础.

4 结 论

本研究通过压力调控显著提升了 WS₂ 纳米管的光电响应性能. 在 13.5 GPa 条件下, 器件响应度提高近两个数量级, 外量子效率和比探测率分别

提升约 67 倍和 10 倍, 增幅远超块体 WS_2 , 凸显了一维纳米结构在性能调控中的独特优势. 高压 XRD 和拉曼光谱分析表明, 这一显著增强主要源于压力诱导的层间相互作用增强导致的带隙收缩, 以及纳米管间载流子高效输运的协同作用. 研究进一步揭示了 NT- WS_2 在高压下的结构-性能关系, 并为低维过渡金属二硫族化合物的功能调控及高性能光电子器件设计提供了新的思路.

参考文献

- [1] Tenne R, Margulis L, Genut M E, Hodes G 1992 *Nature* **360** 444
- [2] Rapoport L, Bilik Y, Feldman Y, Homyonfer M, Cohen S, Tenne R 1997 *Nature* **387** 791
- [3] Kaplan-Ashiri I 2004 *AIP Conf. Proceed.* **723** 306
- [4] Wang M S, Kaplan-Ashiri I, Wei X L, Rosentsveig R, Wagner H D, Tenne R, Peng L M 2008 *Nano Res.* **1** 22
- [5] Pelella A, Kumar A, Intonti K, Durante O, De Stefano S, Han X, Li Z, Guo Y, Giubileo F, Camilli L, Passacantando M, Zak A, Di Bartolomeo A 2024 *Small* **20** 2403965
- [6] Wang F C, Wei S J, Jin W Y, He X L, Wang W F, Wang F J, Li F, Zhang X Y, An Q W, He X B, Xu J P 2025 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **58** 195103
- [7] Wu X Q, Wang L R, Yuan Y F, Ma L, Guo H Z 2023 *Chin. J. High Press. Phys.* **37** 050103 (in Chinese) [吴学仟, 王玲瑞, 袁亦方, 马良, 郭海中 2023 高压物理学报 **37** 050103]
- [8] Zhang Y J, Onga M, Qin F, Shi W, Zak A, Tenne R, Smet J, Iwasa Y 2018 *2D Mater.* **5** 035002
- [9] Faella E, Lozzi L, Camilli L, Zak A, Giubileo F, Bartolomeo A D, Passacantando M 2025 *Nanotechnology* **36** 325501
- [10] Li C K, Zhu J L 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 176802 (in Chinese) [李辰恺, 朱金龙 2025 物理学报 **74** 176802]
- [11] Xia H, Lu Z Y, Li T X, Parkinson P, Liao Z M, Liu F H, Lu W, Hu W D, Chen P P, Xu H Y 2012 *Acs Nano* **6** 6005
- [12] Gao L F, Wang L D, Kuklin A V, Gao J, Yin S C, Ågren H, Zhang H 2021 *Small* **17** 2105683
- [13] Li Z L, Li H Y, Liu N N, Du M Y, Jin X L, Li Q J, Du Y, Guo L, Liu B B 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2101163
- [14] Li Z L, Jia B X, Fang S X, Li Q J, Tian F Y, Li H Y, Liu R, Liu Y C, Zhang L J, Liu S Z, Liu B B 2022 *Adv. Sci.* **10** 2205837
- [15] Li Z L, Li Q J, Li H Y, Tian F Y, Du M Y, Fang S X, Liu R, Zhang L J, Liu B B 2022 *Small Methods* **6** 2201044
- [16] Yue L, Tian F Y, Liu R, Li Z L, Li R X, Li C Y, Li Y C, Yang D L, Li X D, Li Q J, Zhang L J, Liu B B 2025 *Natl. Sci. Rev.* **12** nwae419
- [17] Zhang X T, Liu B, Liu S, Li J Y, Liu R, Wang P, Dong Q, Li S J, Tian H, Li Q J, Liu B B 2021 *J. Alloys Compd.* **867** 158923
- [18] Chen S X, Li Z L, Li S C, Xu K B, Ma N, Yue L, Jin X L, Liu R, Dong Q, Li Q J, Liu B B 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** 2500250
- [19] Yan X L, Feng Z B, Yu L, Liu C L 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 177801 (in Chinese) [闫晓丽, 冯振豹, 于蓝, 刘才龙 2025 物理学报 **74** 177801]
- [20] Chi Z H, Zhao X M, Zhang H D, Goncharov A F, Lobanov S S, Kagayama T, Sakata M, Chen X J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 036802
- [21] Ma X L, Fu S H, Ding J W, Liu M, Bian A, Hong F, Sun J T, Zhang X X, Yu X H, He D W 2021 *Nano Lett.* **21** 8035
- [22] Wang P, Wang Y G, Qu J Y, Zhu Q, Yang W G, Zhu J L, Wang L P, Zhang W W, He D W, Zhao Y S 2018 *Phys. Rev. B* **97** 235202
- [23] Lü X J, Wang Y G, Stoumpos C C, Hu Q Y, Guo X F, Chen H J, Yang L X, Smith J S, Yang W G, Zhao Y S, Xu H W, Kanatzidis M G, Jia Q X 2016 *Adv. Mater.* **28** 8663
- [24] Zhang J K, Ji S H, Ma Y Z, Guan R Q, Wu X X, Qu X, Yan B M, Zhang D Z, Zhao J L, Yang J H 2019 *Nanoscale* **11** 11660
- [25] Guo S H, Bu K J, Li J W, Hu Q Y, Luo H, He Y H, Wu Y H, Zhang D Z, Zhao Y S, Yang W G, Kanatzidis M G, Lü X J 2021 *J. Am. Chem. Soc.* **143** 2545
- [26] Wu S Y, Ma S L, Zhao C Y, Li S X, Ye M Y, Qi M Y, Zhao X B, Wang L R, Cui T 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 178503 (in Chinese) [吴姝颖, 马帅领, 赵春燕, 李世新, 叶梅艳, 戚梦瑶, 赵行斌, 王玲瑞, 崔田 2025 物理学报 **74** 178503]
- [27] Liu T B, Bu K J, Zhang Q, Zhang P J, Guo S H, Liang J Y, Wang B H, Zheng H Y, Wang Y G, Yang W G, Lü X J 2022 *Materials* **15** 3845
- [28] Zhang X T, Dong Q, Li Z L, Jing X L, Liu R, Liu B, Zhao T T, Lin T, Li Q J, Liu B B 2022 *Mater. Res. Lett.* **10** 547
- [29] Zak A, Sallacan-Ecker L, Margolin A, Feldman Y, Popovitz-Biro R, Albu-Yaron A, Genut M, Tenne R 2010 *Fuller. Nanotub. Carbon Nanostruct.* **19** 18
- [30] Bandaru N, Kumar R S, Baker J, Tschauner O, Hartmann T, Zhao Y, Venkat R 2014 *Int. J. Mod. Phys. B* **28** 1450168
- [31] Zhang Y J, Ideue T, Onga M, Qin F, Suzuki R, Zak A, Tenne R, Smet J H, Iwasa Y 2019 *Nature* **570** 349
- [32] Krause M, Virsek M, Remškar M, Kolitsch A, Möller W 2009 *Phys. Status Solidi (b)* **246** 2786
- [33] Staiger M, Rafailov P, Gartsman K, Telg H, Krause M, Radovsky G, Zak A, Thomsen C 2012 *Phys. Rev. B* **86** 165423
- [34] Yue L, Cui D D, Tian F B, Liu S, Li Z L, Liu R, Yao Z, Li Y C, Yang D L, Li X D, Li Q J, Du Y, Liu B B 2024 *Acta Mater.* **263** 119529
- [35] Yue L, Xu D, Wei Z Y, Zhao T T, Lin T, Tenne R, Zak A, Li Q J, Liu B B 2022 *Materials* **15** 2838
- [36] O'Neal K R, Cherian J G, Zak A, Tenne R, Liu Z, Musfeldt J L 2016 *Nano Lett.* **16** 993

SPECIAL TOPIC—High-pressure modulation and in situ characterization of optoelectronic properties • COVER ARTICLE

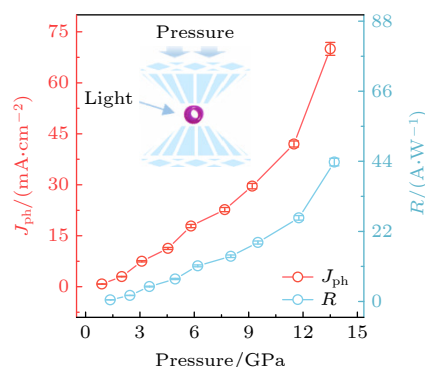
Significant enhancement of photoelectronic properties in pressure-induced WS₂ nanotubes*JIANG Yifeng¹⁾ YUE Lei^{1)†} WEI Ziyu²⁾ ZHAO Xiaoxu³⁾LI Quanjun^{1)‡} LIU Bingbing¹⁾¹⁾ (State Key Laboratory of High Pressure and Superhard Materials, Jilin University, Changchun 130012, China)²⁾ (College of Physical Science and Technology, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)³⁾ (School of Materials Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 29 September 2025; revised manuscript received 27 October 2025)

Abstract

Exploring effective method to optimize the photoelectronic properties of functional materials is crucial for advancing the next-generation optoelectronic devices. However, existing modulation strategies are frequently plagued by drawbacks including complex fabrication processes. However, traditional regulation approaches often suffer complex processing, and the intrinsic relationship between structural evolution and performance enhancement in one-dimensional transition-metal dichalcogenides (TMDs) under extreme conditions is still unclear, thereby hindering further performance improvement. In this study, high pressure is used as a continuously tunable and clean external field to regulate the structural and photoelectric properties of one-dimensional transition-metal dichalcogenide nanotubes (NT-WS₂). Utilizing a diamond anvil cell (DAC) combined with *in situ* high-pressure photocurrent measurements, Raman spectroscopy, and X-ray diffraction (XRD), we systematically investigate the pressure-dependent evolution of the crystal structure and photoelectric performance. The results show a remarkable pressure-driven enhancement in the optoelectronic response of NT-WS₂. With the increase of pressure, the device responsivity exhibits a dramatic rise from the initial 0.53 A/W to 43.75 A/W at 13.5 GPa—nearly two orders of magnitude higher. Correspondingly, the external quantum efficiency (EQE) and specific detectivity (D^*) are enhanced by approximately 67-fold and 10-fold, respectively.

The synergistic *in situ* spectroscopic and structural analyses indicate that this significant improvement arises from pressure-induced bandgap narrowing caused by strengthened interlayer interactions, along with improved carrier transport enabled by the compact stacking of nanotubes. This work not only deepens the understanding of the optoelectronic evolution mechanisms of 1D TMDs under extreme conditions but also provides a novel regulatory strategy to guide the design and optimization of high-performance nano-optoelectronic devices.

**Keywords:** high pressure, transition metal dichalcogenides, nanotube, photoelectric response**DOI:** 10.7498/aps.75.20251345**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251345

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12274166), the Basic Scientific Research Projects of Provincial Colleges and Universities in Heilongjiang Province, China (Grant No. 2022-KYYWF-1118), and the National Key R & D Program of China (Grant No. 2024YFE0109200).

† Corresponding author. E-mail: yueleijlu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: liquanjun@jlu.edu.cn



压力诱导WS₂纳米管光电性能的显著提升

姜懿峰 岳磊 魏子寓 赵晓续 李全军 刘冰冰

Significant enhancement of photoelectronic properties in pressure-induced WS₂ nanotubes

JIANG Yifeng YUE Lei WEI Ziyu ZHAO Xiaoxu LI Quanjun LIU Bingbing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 030803 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251345

CSTR: 32037.14.aps.75.20251345

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251345>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压调控过渡金属硫族化合物及异质结构的光电性质

Optoelectronic properties of high pressure regulated transition metal chalcogenides and their heterostructures

物理学报. 2025, 74(17): 176802 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250498>

基于过渡金属硫族化合物同质结的光电探测器

Photodetectors based on homojunctions of transition metal dichalcogenides

物理学报. 2021, 70(17): 177301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210859>

利用Li⁺插层调控WS₂光电器件响应性能研究

Li intercalation modulated photocurrent response in WS₂ optoelectronic devices

物理学报. 2023, 72(22): 226801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231000>

过渡金属硫族化合物模所有Davydov组分的室温拉曼检测

Room-temperature Raman detection of all Davydov components of mode in transition metal dichalcogenides

物理学报. 2025, 74(20): 206301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250960>

双金属/TiO₂纳米管复合结构中增强的光电流

Enhanced photocurrent in bimetallic/TiO₂ nanotube composite structures

物理学报. 2021, 70(3): 038103 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201134>

高压下二维材料结构和光电性能研究进展

Recent progress of structures and photoelectric properties of two-dimensional materials under high pressure

物理学报. 2025, 74(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251034>