

基于二维材料的压电光电子学器件

杨晨 杨咪咪 周苇苇 谭运财 高凤

安徽绿海商务职业学院信息工程学院

DOI:10.32629/etd.v7i8.21650

[摘要] 压电光电子学效应融合压电特性、半导体性能及光激发过程,实现机械信号对光电行为的动态调控,为新型光电子器件开发开辟革命性途径。二维材料凭借原子级超薄结构、本征压电性及优异光电性能,成为构建高性能器件的理想平台。本文详细阐释基本原理,探讨典型材料特性,深入分析光电探测器等领域的器件设计与优化策略,并通过实验数据阐明应变调控机制的核心作用。同时概述大规模制备等挑战,展望柔性集成等未来方向,提供理论及技术参考。

[关键词] 二维材料; 压电光电子学; 应变调控; 光电探测器; 异质结器件

中图分类号: TN36 **文献标识码:** A

Piezoelectric optoelectronic devices based on two-dimensional materials

Chen Yang Mimi Yang Weiwei Zhou Yuncai Tan Feng Gao

College of Information Engineering, Anhui Lvhai Vocational College of Business

[Abstract] The piezoelectric optoelectronic effect integrates the piezoelectric properties, semiconductor performance, and the light excitation process, achieving dynamic control of the photoelectric behavior by mechanical signals, and opening up a revolutionary path for the development of new optoelectronic devices. Two-dimensional materials, with their atomic-scale ultrathin structure, intrinsic piezoelectricity, and excellent photoelectric properties, have become an ideal platform for constructing high-performance devices. This paper elaborates on the basic principles, discusses the characteristics of typical materials, deeply analyzes the design and optimization strategies of devices in fields such as photoelectric detectors, and clarifies the core role of the strain regulation mechanism through experimental data. At the same time, it outlines the challenges of large-scale fabrication and looks forward to future directions such as flexible integration, providing theoretical and technical references.

[Key words] Two-dimensional materials; Piezoelectric optoelectronics; Strain regulation; Photoelectric detector; Heterojunction device

引言

在信息科技高速发展的驱动下,光电子器件正向微型化、柔性化及低功耗方向进步。传统三维材料受限于界面散射和机械柔韧性,难以满足下一代高性能需求。二维材料凭借层状结构和原子级厚度,展现出高迁移率、可调带隙等卓越特性,应用前景广阔。王中林院士提出的压电光电子学利用应变诱导压电势调控载流子输运,为性能调制开辟新路径^[1]。尽管该方法已经取得阶段性成果,但在规模化制备和长期稳定性等方面仍面临挑战,亟需深入探索。

1 二维材料压电光电子学基础理论

1.1 二维材料的压电特性

二维压电材料相比较于传统的诸如三维压电材料(就像ZnO、AlN这些),其在压电效应方面有着独特的优势,典型的二维

压电材料如下图1所示:

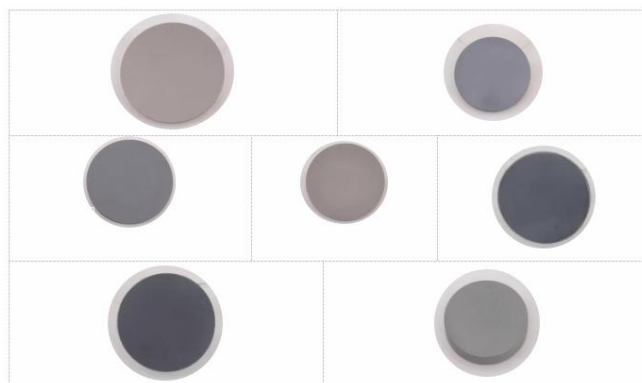


图1 典型的二维压电材料

1. 2压电光电子学效应的调控机理

在金属-半导体接触中, 应变诱导的压电极化电荷改变界面电荷分布, 引起肖特基势垒高度偏移。正向应变降低SBH并提升载流子注入效率, 反向应变则抬高SBH阻碍传输^[2]。在p-n结中, 压电势形成的内建电场改变结区能带弯曲, 在II型异质结中增强光生电子-空穴对分离并降低复合, 如MoS₂/MoTe₂器件实现高线性光电响应^[3], 该机制实现了器件电学性能的动态调控。

1. 3二维材料的关键性能参数

二维的压电光电子学方面的器件它的性能受到材料的压电特性、光电特性以及机械特性这些特性综合起来的影响, 典型二维压电材料的关键性能参数详细可见于表1。

表1 典型二维压电材料的关键性能参数

材料类型	层数	压电系数 d_{33} (pm V ⁻¹)	带隙宽度 E_g (eV)	载流子迁移率 μ (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	光谱响应范围 (nm)
MoS ₂	单层	1.9-3.7	1.8	200-500	400-800
	双层 (应变)	24.80	1.65	350-600	400-900
MoTe ₂	少层	2.5-4.2	1.1	800-1200	405-1600
WS ₂	单层	1.5-3.2	2.0	150-400	400-750
黑磷	少层	3.0-5.1	0.3-2.0	1000-5000	400-2500

2 基于二维材料的压电光电子学器件设计与进展

2. 1压电增强型光电探测器

2. 1. 1肖特基结型探测器

肖特基结型探测器主要是利用金属-二维半导体接触界面的势垒特性来实现光电的转换。



图2 肖特基结型探测器

由中国科学院开发的Au/MoS₂肖特基结型探测器, 利用应变诱导压电势调控肖特基势垒。在635nm的光照条件下, 其应变从0%增至1.5%, 响应度从0.12A/W升至0.85A/W, 探测率由2.1×10¹¹Jones增至1.4×10¹²Jones, 响应速度稳定在50μs内, 有效地抑制载流子复合^[4]。

2. 1. 2范德华异质结探测器

范德华异质结通过非共价键层叠构建, 有效地克服了晶格失配的挑战, 为能带工程赋予了更强的适应能力。当暴露于

635nm激光时, 其响应度达到0.5A/W, 探测率为1.6×10¹²Jones, 其反应时间约为3ms; 在一次电荷注入以后, 该设备能持续运行十年以上, 响应度维持在67%^[5]。

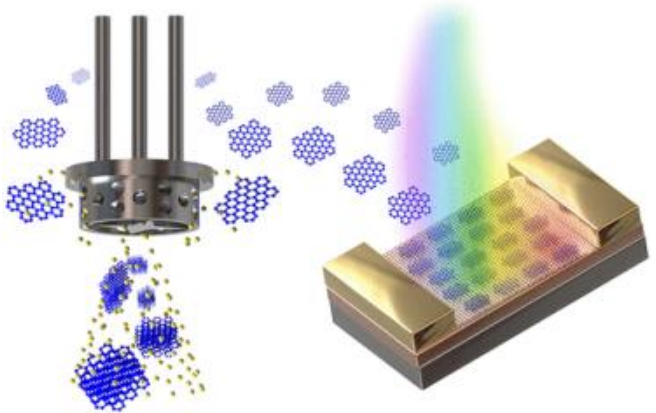


图3 范德华异质结探测器

2. 2压电辅助型光电催化器件

光电催化效应在水分解应用和污染物降解应用中具有显著的价值, 光电催化效应的核心难点是抑制光生载流子复合以提升效率。由于二维材料的表面积大且活性位点丰富, 因此, 二维材料是理想的载体, 在结合了应变调控的压电光电子学效应以后, 可进一步优化性能^[6]。

2. 3压电敏化型气体传感器

环境监测以及工业安全对气体传感器的需求日益增长, 众所周知, 传统传感器深受灵敏度和响应速度等诸多方面的限制。而基于二维材料的压电光电子学传感器则是依靠气体吸附与压电效应之间相互协同配合工作的机制, 能够实现更高效的检测性能和检测能力。



图4 NO₂传感器

2. 4压电调控型太阳能电池

将单层二硫化钼用作电子传输层时, 1.0%拉伸应变使开路电压升至1.05V, 短路电流密度增至24.8mA/cm², 效率达21.7%。这源于压电势调整界面能带弯曲, 降低了电子注入障碍。

2. 5器件性能对比分析

在评估器件的性能参数、核心优势以及区分各自不同的应

用场景时,不同类型的二维压电光电子学器件之间显示出明显的差别,各种器件的性能参数对比可以参考如下表2所示。

表2 二维压电光电子学器件性能对比

器件类型	核心材料	关键性能指标	应变调控效果	应用场景
光电探测器	MoTe ₂ /hBN/graphene	响应度: 1.57A/W 探测率: 4.28×10 ¹⁰ Jones 响应速度: 30 μs	响应度提升 3.2 倍 线性动态范围扩展 40dB	宽带成像 光通信
光电催化器件	少层 MoS ₂	析氢过电位: 120mV 电流密度: 1.0mA/cm ² 循环稳定性: 90% (50 次)	过电位降低 33% 催化活性提升 2.3 倍	水分解制氢 污染物降解
气体传感器	MoSe ₂	响应值: 89 (1ppmNO ₂) 响应时间: 8s 检测下限: 5ppb	响应值提升 2.5 倍 响应速度加快 62%	环境监测 工业安全
太阳能电池	WS ₂ /Si	光电转换效率: 17.8% 开路电压: 0.68V 弯曲稳定性: 93% (1000 次)	效率提升 17% 界面电阻降低 28%	柔性能源 便携式电源

3 材料制备与器件加工技术

3.1 二维压电材料的制备方法

各种二维压电材料的制备方法以及所具备的特性如下所述:

(1)机械剥离法:利用胶带剥离体相晶体以获得单层或少层材料,该方法操作简便,可制备MoS₂等高结晶度及高质量材料。但产量低、尺寸不均一,难以满足大规模应用需求。

(2)化学气相沉积法(CVD):利用金属源和硫族源在高温下反应生成薄膜,能够制备大面积、高质量的TMDCs薄膜,如单层MoS₂的覆盖率能超过95%。通过调节相关的制备参数可以精准地控制二维压电材料的层数和形貌。因此,化学气相沉积法的应用前景非常广阔。

(3)溶液法:包含液相和化学剥离法,利用溶剂或化学反应制备纳米片。溶液法成本低、容易形成规模化,但更易导致材料的缺损,需要优化、升级工艺水平以提升制备的质量。

3.2 器件加工与集成工艺

3.2.1 转移技术

转移过程的核心是利用范德华力(VW)实现二维材料与目标衬底的结合,同时克服其与原始生长衬底(如蓝宝石、铜箔)之间的吸附力。当PMMA/二维材料复合体与目标衬底接触时,范德华力开始作用,此时形成新的界面。转移的成功与否取决于新旧界面能的差值:

$$E_{\text{adhesion}} = \gamma_{\text{2D/sustrate}} - (\gamma_{\text{2D/PMMA}} + \gamma_{\text{PMMA/substrate}})$$

E_{adhesion} 是吸附能, γ 代表各界面或表面的表面能。为了实现良好转移,需要 E_{adhesion} 为较大的负值,即二维材料与目标衬底的结合能远大于其与PMMA的结合能。

3.2.2 关于电极制备

按照肖特基-莫特模型而言,在理想的情形之下,金属和半导体之间的势垒高度 Φ_b 是由金属的功函数 Φ_m 以及半导体的电子亲和势 χ 所决定的:

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi$$

4 结论

基于二维材料的压电光电子学器件通过机械耦合、光电效应,能突破传统器件的性能瓶颈,具有重要的应用前景。本文系统梳理了基础理论与调控机制,重点探讨了探测器等典型应用的设计策略及性能优势。研究表明,过渡金属硫化物等核心材料结合应变工程,可使器件的关键参数提升2至3倍。尽管面临着制备复杂和稳定性低等方面的挑战,但是随着相关工艺技术及器件技术越来越成熟,该类器件将在柔性电子及清洁能源等领域实现产业化应用。

[基金项目]

安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类重点项目)《基于机器视觉的电子元器件表面缺陷快速检测技术优化及生产线适配应用研究》(2025AHGXZK30821);安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类重点项目)《射频超声融合室内定位技术应用基础研究》(2025AHGXZK30325);安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类重点项目)《集成深度学习与迁移学习的脸部情感识别算法研究》(2025AHGXZK30619);安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类重点项目)《基于小样本学习的学习行为监测与分析模型研究》(2025AHGXZK30673);安徽绿海商务职业学院省级质量工程立项项目《校企合作生产性共建共享实训基地》(2024xqjd057)。

[参考文献]

[1]贾萌萌,郭鹏文,翟俊宜,等.基于二维材料的压电光电子学器件[J].中国科学:技术科学,2023,53(6):892-901.
[2]王昊.基于二维材料的范德瓦尔斯异质结的制备及其电子学特性[D].中国科学院大学(中国科学院物理研究所),2023.
[3]林凯风,钟叮,邵嘉惠,等.二维材料复合光纤调制器件研究进展[J].物理化学学报,2023,39(10):90-109.
[4]朱亚彤,张昊,徐涛,等.电子束辐照诱导二维氧化钨纳米片生长的原位电镜研究[J].电子显微学报,2023,42(3):275-282.
[5]徐英添,刘恒,张贺,等.基于二维材料可饱和吸收器件的飞秒脉冲激光输出特性研究[J].中国科技成果,2025(9):3.
[6]朱来攀,翟俊宜,王中林.基于第三代半导体的压电电子学和压电光电子学器件[J].科学通报,2020,65(25):14.

作者简介:

杨晨(1987—),男,汉族,安徽合肥人,硕士,讲师、工程师,研究方向:物联网应用技术、无线通信技术。