

可将煅烧炉、焙烧炉的烟气余热转化为蒸汽或热水，用于发电或厂区供暖，实现能源的梯级利用。例如，某炭素企业通过余热回收系统，将煅烧烟气温度从900℃降至200℃以下，年发电量可达数千万千瓦时，显著降低了外购电需求。

在铝电解工艺中，电解槽运行过程中产生的余热（约800-950℃）同样具有回收价值。通过余热回收装置，可将电解槽侧部与顶部的余热用于预热氧化铝原料或生产热水，减少燃料消耗与能源浪费。

4.3 协同效应：能源结构优化与低碳目标实现

绿电替代与余热回收的协同，可显著降低铝工业的碳排放强度，推动能源结构绿色转型。绿电替代直接减少了化石能源发电的碳排放，而余热回收则通过提高能源利用效率，间接降低了单位产品的能耗与排放。例如，在“绿电铝”生产中，结合余热回收技术，可使吨铝碳排放量从传统工艺的12吨以上降至5吨以下，降幅超过50%。此外，绿电与余热的协同还可降低生产成本，提升企业竞争力。

4.4 上下游产业联动：技术融合与边界拓展

上下游产业联动是铝工业实现技术突破与市场拓展的核心路径。炭素材料企业与铝电解企业需打破传统合作模式，通过联合研发平台共享数据与资源，共同开发适配性更强的新型材料与工艺。例如，炭素企业可根据电解槽的电流密度、热场分布等参数，定制化设计阳极炭块的孔隙结构与导电性能，而铝电解企业则可反馈实际生产中的材料损耗与能耗数据，推动炭素材料的持续优化。这种深度协同不仅提升了产品性能，还缩短了研发周期，降低了技术迭代成本。^[1]

在产业边界拓展方面，炭素材料的应用领域正从传统铝电解向储能、氢能等新兴产业延伸。例如，高性能炭素材料（如石墨化炭块）可作为锂离子电池的负极材料或氢能储运的载体，其高导电性、高稳定性与低成本优势为新能源产业提供了关键支撑。炭素企业与电池制造商、氢能企业的跨领域合作，可推动炭素材料在新能源场景中的规模化应用，形成“材料-器件-系统”的协同创新链。通过上下游联动，铝工业可突破单一产业链的限制，融入更广阔的绿色经济体系。^[4]

4.5 绿色供应链构建：标准认证与模块化发展

绿色供应链的构建是铝工业提升国际竞争力与可持续

性的关键举措。绿电铝认证体系的建立，通过追溯铝产品的全生命周期碳排放（包括电力来源、原料消耗、工艺能耗等），为低碳铝产品提供权威标识。这一体系不仅满足了国际市场对绿色产品的需求（如欧盟碳边境调节机制），还倒逼企业加速绿电替代与工艺优化，形成“绿色生产-绿色认证-绿色消费”的闭环。^[5]同时，推动炭素材料与铝电解工艺的标准化与模块化，可降低协同发展的技术门槛与成本。例如，制定统一的阳极炭块尺寸、电解槽接口标准与智能控制系统协议，使不同企业的设备与材料能够无缝对接，实现“即插即用”。模块化设计还可加速新技术的推广（如柔性电解槽、惰性阳极），降低中小企业的技术改造风险。通过标准化与模块化，铝工业的绿色转型将从“单点突破”转向“系统集成”，形成更具韧性的产业生态。

5 结语

绿色低碳背景下，炭素材料与铝电解工艺的协同发展是铝工业实现碳减排目标的关键路径。通过技术协同提升效率、资源协同促进循环、能源协同推动转型、产业协同拓展边界、政策协同提供保障，二者可形成互为支撑的绿色发展体系。未来，需进一步强化跨领域合作，加速新型材料与工艺的研发应用，同时完善政策标准与市场机制，推动铝工业在全球绿色供应链中发挥更大作用。协同发展不仅有助于铝工业的可持续发展，也将为全球能源转型与气候治理提供重要支撑。

参考文献

- [1] 张辉,黄子龙.点燃“绿色引擎”澎湃发展动能[N].许昌日报,2024-04-15(003).
- [2] 薛璇.铝用炭素：量价齐飞但要防止产能过剩[J].中国有色金属,2022,(20):70-71.
- [3] 周小淞,欧春予,邓翔,等.铝用炭素产业绿色低碳转型的技术探讨[J].轻金属,2022,(09):33-36.
- [4] 刘业飞,武静.大同宇林德：做炭素新材料产业绿色发展的引领者[N].山西经济日报,2022-05-23(007).
- [5] 李志刚.我国铝用炭素行业标准化概述[J].世界有色金属,2022,(02):5-7.

Physical properties research and application of tellurene van der Waals heterojunction

Jingwen Jiang

Jiangmen Polytechnic guangdong province jiangmen city, Jiangmen, Guangdong, 529000, China

Abstract

As a highly promising emerging two-dimensional material in the post-graphene era, tellurene exhibits enormous application potential in next-generation electronic and optoelectronic devices, attributed to its distinctive helical chain layered crystal structure, tunable bandgap characteristics, high carrier mobility, and superior mid-infrared photoelectric response as well as thermoelectric performance. Van der Waals heterojunctions, which enable precise stacking of diverse two-dimensional materials via non-covalent interactions, offer an innovative strategy to overcome the performance limitations of single-component materials, achieve interface engineering regulation, and realize multi-functional integration. This paper systematically reviews the research advances in tellurene-based van der Waals heterojunctions, elaborates on their construction principles and classification systems, and dissects core mechanisms including interfacial charge transfer and energy band alignment. Moreover, it clarifies the modulation rules of external field regulation and defect engineering on key physical properties such as electron transport and photoelectric conversion. The application explorations in field-effect transistors, mid-infrared detectors, and energy storage devices. are introduced. Furthermore, the current challenges in large-area high-quality fabrication, precise interface regulation, stability enhancement, and device-scale integration are summarized. Finally, the prospect of achieving practical breakthroughs in 5G/6G communications, infrared imaging, new energy, and other high-tech fields through multi-component heterojunction design and advanced fabrication/characterization technology innovation is presented, providing comprehensive insights for fundamental research and application translation in this domain.

Keywords

Tellurene; Van der Waals heterojunction; Electronic device

碲烯范德华异质结的物性研究与应用

江靖雯

江门职业技术学院, 中国 · 广东 江门 529000

摘要

碲烯作为后石墨烯时代极具潜力的新兴二维材料, 凭借其独特的螺旋链层状晶体结构、可调带隙特性、高载流子迁移率及优异的中红外光电响应与热电性能, 在新一代电子与光电器件领域展现出巨大应用前景。范德华异质结通过非共价键作用力将不同二维材料精准堆叠, 为突破单一材料性能瓶颈、实现界面工程调控与多功能集成提供了创新途径。本文系统梳理碲烯范德华异质结研究进展, 阐述其构建原理与分类, 剖析界面电荷转移、能带对齐等核心机制, 及外场与缺陷工程对电子输运、光电转换等物性的调制规律。介绍其在场效应晶体管、中红外探测器、储能器件等领域的应用探索, 总结制备、界面调控、稳定性及集成方面的挑战, 展望通过多元设计与技术创新推动其在 5G/6G、红外成像等领域实用化突破, 为基础研究与应用转化提供参考。

关键词

碲烯; 范德华异质结; 电子器件

1 引言

自 2004 年曼彻斯特大学 Geim 小组成功采用微机械剥离法, 从高定向热解石墨中分离出单原子层的石墨烯 (Graphene) 以来^[1], 二维材料家族迅速扩充, 迄今实验上

可获取的二维材料已达数百种。其构成元素涵盖了周期表中的诸多元素, 结构类型丰富多样, 囊括了原子级薄的碳基材料 (如石墨烯、石墨炔)、六方氮化硼 (h-BN)、过渡金属硫族化合物 (如 MoS₂、WS₂、MoSe₂、WSe₂)、黑磷、硅烯、锗烯及其饱和形式, 乃至稀土二维材料、过渡金属卤化物, 以及以共价有机框架为代表的合成有机二维材料等。相比于三维体材料, 二维材料的物理化学性质发生了变化, 获得了更多的性能, 展现了许多同类体材料所没有的电子和光学特性, 比如: i) 强的平面共价键以及纳米级别的材料厚度展现出了优越的机械柔性和光学透明度; ii) 其具有超高

【基金项目】感谢广东省普通高校特色创新项目 (项目编号: 2023KTSCX371)。

【作者简介】江靖雯 (1993-), 女, 中国湖南新化人, 博士, 讲师, 从事半导体材料设计与研究。

的比表面积,可应用于表面催化和超级电容器等领域;iii) 二维材料表面原子的高度暴露使其可被通过外部条件(如:应力、压强、掺杂和吸附等)进行性能调控。从而,二维材料引起了光电探测器^[2]、太阳能电池^[3]、低功耗逻辑电路^[4]、非易失性光电子存储^[5]和高容量储能器件^[6]等多个领域的广泛研究。因此,二维材料被认为是解决器件微型化同时又满足高性能要求的突破口。

碲烯作为 VA 族原子薄层材料的代表,由于其独特的结构和电子特性引起了人们的广泛关注。作为一种准 2D 层状半导体,碲(Te)具有高载流子迁移率、可调带隙(0.35-1.2 eV)、高线性二向色性、室温下出色的环境稳定性、光电导特性、热电特性和磁输运特性等优异的独特特性。^[7-8]因此,碲烯在传感器、储能、光电子器件和自旋电子学器件等方向具有重要的应用前景,是延伸摩尔定律重要的候选材料。

另一方面,不同层状二维半导体材料堆叠后的异质结由于其特殊的构型,不仅可以降低纯半导体材料载流子复合率,调整其能带结构,而且在保持原有材料性能的基础上,还会出现单层材料所不具备的新颖性能,为材料的改性提供了一个可行的方法,并极大地扩展了单一材料在太阳能电池、光电探测器、光催化剂等领域的应用。近几年来关于碲烯与其他二维材料构建的异质结如碲烯/CdS^[2],碲烯/MoS₂^[4]等均表现出优异的电学、光学性能,在二维材料领域得到了广泛应用。因此找寻晶格匹配的其他二维材料与碲烯构建范德华异质结来进一步改善碲烯性能以及扩大碲烯应用领域具有实际意义。

2 碲烯范德华异质结的物性研究进展

朱志立教授及其团队成员凭借深厚的理论功底与先进的计算模拟手段,在二维碲烯的基础研究方面取得了重要突破。他们通过精密的理论计算和模型构建,发现半导体相的二维碲烯具备远高于过渡金属硫化物的载流子迁移率。这一特性意味着在电子器件应用中,二维碲烯能够实现更高效、更快速的电荷传输,大大提升器件的运行速度与性能。同时,相较于黑磷,二维碲烯在稳定性方面表现更为出色,有效克服了黑磷在实际应用中因稳定性欠佳而面临的诸多挑战。此外,朱志立教授团队还通过严谨的理论预测,揭示了二维碲烯存在三种不同的晶体结构,分别命名为 α 相、 β 相和 γ 相,这三种相态在原子排列方式、电子云分布以及相应的

物理化学性质上均存在显著差异,为后续针对不同应用场景对二维碲烯进行材料设计与性能调控提供了丰富的理论基础,相关研究成果发表在^[9-10],如图一所示。其理论预测激发了全球范围内众多科研团队对二维碲烯的实验探索热情,推动了该领域研究的快速发展。

吴文卓教授等科研人员则致力于将二维碲烯从理论研究推向实验制备与实际器件应用阶段。他们创新性地采用溶液法,成功合成出大面积(50 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$)的高质量二维碲烯片。^[11]这种制备方法具有操作相对简便、成本可控且易于规模化生产的优势,为二维碲烯的工业化应用开辟了一条可行路径。以所制备的二维碲烯片作为沟道构建的晶体管(沟道长度为 3 μm),展现出了令人瞩目的性能。在热稳定性方面,该晶体管能够在较宽的温度范围内保持稳定运行,极大地拓展了其在不同工作环境下的适用性;其开关比高达 $\sim 10^6$,这意味着晶体管能够在导通和截止两种状态之间实现极为清晰、高效的切换,有效降低了信号干扰与误判的可能性;载流子迁移率达到 $700 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$,经对比,这一数值是同样大小和结构的黑磷晶体管载流子迁移率的 23 倍,充分彰显了二维碲烯在晶体管应用中的显著优势。这些实验结果不仅验证了理论上对二维碲烯优异性能的预测,更为二维碲烯在下一代高性能晶体管及相关集成电路领域的实际应用奠定了坚实基础。

S. Berweger 等科研工作者另辟蹊径,聚焦于二维碲烯在双载流子晶体管领域的应用研究。他们精心设计并成功制备出以碲烯作为沟道的碲烯双载流子晶体管,这一创新性的器件结构充分利用了二维碲烯独特的电学特性,能够实现电子和空穴两种载流子的有效操控,为拓展晶体管的功能与应用范围提供了新的思路。为深入探究该晶体管的内部工作机制与微观载流子特性,S. Berweger 团队采用了先进的近场微波扫描显微镜技术。这种技术能够在纳米尺度下对晶体管内部的局域载流子分布、传输特性以及相关电导特性进行高分辨率的测量与分析。通过对实验数据的深入挖掘与分析,他们揭示了碲烯双载流子晶体管在不同工作条件下的载流子输运规律,为进一步优化器件性能、提升器件稳定性提供了关键的实验依据^[12]。这一研究成果不仅加深了科研人员对二维碲烯电学性质在复杂器件结构中应用的理解,更为开发基于二维碲烯的新型多功能电子器件提供了重要的技术支撑与理论指导。

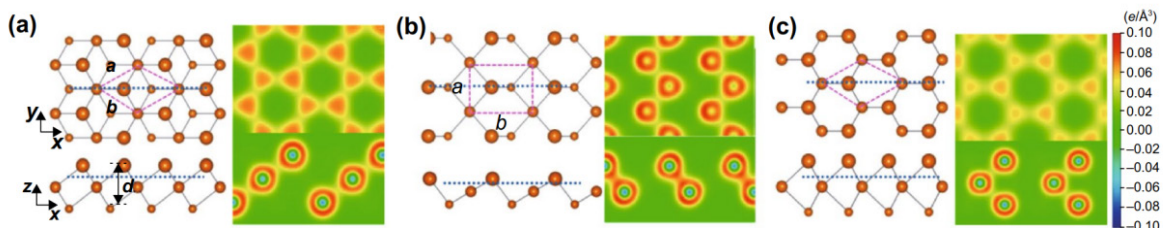


图 1 α -Te (a)、 β -Te (b) 和 γ -Te (c) 晶体结构示意图