文章编号:1674-2869(2026)01-0033-09

二维过渡金属材料自旋热电性能的研究进展

李 盛,卢海逸†,余子洋,熊 伦*
武汉工程大学光电信息与能源工程学院&数理学院,湖北 武汉 430205

摘 要:热自旋电子学源于对电子电荷与自旋的两种内在自由度的研究,在热电转换、废热回收和绿色能源利用等方面展现出广阔的应用前景。自旋热电效应指材料在自旋-轨道耦合以及温度梯度共同作用下产生的自旋-热流相互作用。当前研究的重点是通过自旋塞贝克(Seebeck)效应实现纯自旋流的产生,并提高热电转换效率。本文系统综述二维过渡金属材料的自旋热电研究进展,包括合成方法、机理探索及应用潜力。最新的研究表明,二维过渡金属材料在增强自旋流产生效率与优化热电性能方面具备显著优势,异质结构通过邻近效应实现多种特性协同作用,可有效弥补单个二维过渡金属材料的局限。未来研究应进一步阐述自旋-轨道耦合机制,并探索利用温度梯度增强自旋热电效应的有效策略。同时,发展新型二维过渡金属材料与优化现有材料的制备工艺,有助于推动热自旋电子学的实用化。建议加强学科材料科学、量子物理和工程技术的交叉合作,推动自旋热电技术面向应用落地,从而实现更高效的热电转换和能源利用。

关键词:热自旋电子学;二维过渡金属材料;自旋塞贝克效应;异质结构;热电转换;研究进展
中图分类号:O4 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202406024

Research progress of spin thermoelectric properties of two-dimensional transition metal materials

LI Sheng, *LU Haiyi*†, *YU Ziyang*, *XIONG Lun**
School of Optoelectronic Information and Energy Engineering & School of Mathematics and Physics, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Spin caloritronics, originating from the study of electron's dual degrees of freedom—charge and spin—offers broad prospects for thermoelectric conversion, waste heat recovery, and green energy utilization. The spin thermoelectric Seebeck effect depicts the interaction between spin and heat flow under the combined presence of spin-orbit coupling and thermal gradients. Current research focuses on generating pure spin currents via the spin Seebeck effect and improving thermoelectric conversion efficiency. This review summarizes the latest advances in two-dimensional transition metal materials, covering synthesis approaches, mechanistic exploration of the spin thermoelectric effect, and practical applications. Recent studies demonstrate that two-dimensional transition-metal materials systems can not only enhance spin-current generation but also offer new routes to optimize thermoelectric performance. Moreover, van der Waals heterostructures enable unprecedented opportunities through proximity effects, thereby overcoming limitations of individual two-dimensional transition metal materials. Future directions include in-depth understanding of spin-orbit coupling mechanisms, and effective use of thermal gradients to strengthen spin thermoelectric

收稿日期:2024-06-14
基金项目:国家自然科学基金(12404085);湖北省自然科学基金(2021CFD041)
作者简介:李 盛,硕士研究生。Email:18772311730@163.com
† 并列第一作者:卢海逸,硕士研究生。Email:1292873273@qq.com.
***通信作者**:熊 伦,博士,教授。Email:xionglun@wit.edu.cn.
引文格式:李盛,卢海逸,余子洋,等. 二维过渡金属材料自旋热电性能的研究进展[J]. 武汉工程大学学报,2026,48(1):33-41.

responses, alongside development of new two-dimensional transition metal materials and optimization of synthesis techniques for practical spin caloritronic devices. Interdisciplinary collaboration-integrating materials science, quantum physics, and engineering is recommended to accelerate translational progress in high-efficiency thermoelectric conversion and energy utilization.

Keywords: spin caloritronics; two-dimensional transition metal materials; spin Seebeck effect; heterostructure; thermoelectric conversion; research progress

传统的半导体电子学以电荷为信息的基本载体,利用其在材料中的运动和分布传递和处理信息。通过电场对高、低组态进行调控构成计算机二进制中的“1”和“0”态,该方法依赖电荷的状态变化,遵循1965年Gordon Moore提出的摩尔定律。然而,随着集成度的提高,晶体管的特征尺寸逼近量子尺度,量子效应导致热耗散持续增大,未来晶体管必然达到其物理尺度的极限。为了突破这一瓶颈,科研工作者开始探索热自旋电子学,热流、电荷流和自旋流三者相结合,在热电转换技术、能源领域、新型复合材料、生物医学探索和信息处理等方面展现出巨大的潜力,有着广泛的应用前景。自旋塞贝克(Seebeck)效应作为产生纯净自旋流的手段之一,是实现热电转换的重要途径,在铁磁绝缘体、铁磁半导体、Heusler化合物以及碳基系统中都能观察到自旋Seebeck效应。2019年,德国汉堡大学的Friesen和Krause的团队成功在原子尺度解析了隧道磁Seebeck效应,并提出一种废热驱动的自旋探测器的方案,使废热回收成为可能[1-3]。因此,提高材料的热能转换为电能的效率是实现热自旋电子器件实际应用的关键。

二维过渡金属材料在电子迁移率和自旋极化方面展现出卓越性能,这些特性使得它们在热自旋电子学领域具有潜在的应用价值[4-5]。二维过渡金属材料独特的结构特征,如层状结构和量子限域效应,为热电转换提供了新的机制和可能性。这些特征使得二维材料在热电效应的研究中展现出显著的优势和潜力[6-7]。此外,二维过渡金属材料在热电发电、废热回收和可穿戴电子设备等领域具有广阔的应用前景。通过研究二维过渡金属材料中的自旋热电性能[8-11],可以实现更高效的热电转换效率,为能源的有效利用和节能减排做出贡献,因此,深入研究二维过渡金属材料中的自旋热电性能,不仅有助于人们更深入地理解热电转换的物理机制,还为设计和制备高性能的热电材料提供理论指导和实验依据[12-14]。

同时,能源危机和环境问题对热自旋电子学的发展提出了迫切的需求。随着全球能源消耗的不断增加和环境污染的日益严重,寻找一种高效、清洁、可持续的能源转换和利用方式显得尤为重要。热自旋电子学作为一种新兴的能源转换技术,有望为实现这一目标提供新的思路和解决方案[15-17]。传统热电材料受静电效应与热导率之间的折衷所限制,这种权衡关系使得材料在实现高效热电转换时面临诸多挑战。由于材料内部或表面电荷的分布不均匀会产生静电效应,而这种效应通过影响电子的迁移行为和载流子的分布增强电导性能,从而促进电荷的有效传输,有助于提高材料的电导率进而提高热电转换效率,但是较高的热导率则会导致热量的快速散失,从而降低热电转换效率。这种相互制约的特性使得传统热电材料在实际应用中难以达到理想的性能,限制了其在能源转换和热电领域的广泛应用。热自旋电子学的引入,为解决这一难题提供了新的思路。自旋的存在为材料提供了额外的信息传递渠道,使得热电效应的实现更加高效。自旋-热传导相互作用使得热量的传递可以通过自旋流的方式进行,从而减少传统热导率对热电效率的负面影响。这种机制允许热电材料在传导电流的同时,有效地管理热流,降低热耗散。此外,通过优化材料的微观结构和自旋特性,可以进一步增强自旋流的稳定性和传导效率[18-19]。自旋电子学是一门研究电子自旋自由度及其与电荷自由度相互作用的学科,自旋电子学的发展为热自旋电子学的研究提供了新的理论和实验方法。随着纳米技术的快速发展,科研工作者可以更加精确地控制材料的结构和性能,实现对热电转换过程的调控。纳米技术的进步为热自旋电子学的研究提供了新的可能性和应用前景。

综上所述,二维过渡金属材料在自旋电子学领域展现出巨大潜力,其相关研究不仅为解决传统热电材料效率瓶颈的问题提供了新思路,也为深入理解与提升热电转换效率开辟了新的途径。随着研究的不断深入和技术的进一步发展,二维过渡金属材料中的自旋热电性能研究有望在热自旋电子学领域取得重大突破。同时,热自旋电子

学的发展也将为能源危机和环境问题提供新的解决方案，为人类社会的可持续发展做出贡献。

1　二维过渡金属材料的两种合成方法

二维过渡金属材料是一类具有单层或几层原子厚度的材料，具有特殊的电子结构和物理性质。目前，常用的合成方法包括机械剥离法、化学气相沉积法和溶液剥离法等。这些方法可以制备出高质量的二维过渡金属材料，为后续的自旋热电性能研究提供了基础。

1.1　机械剥离法

机械剥离法是一种物理剥离方法，属于一种“自上而下”的策略，通过物理手段将已存在的三维金属材料“剥离”或“压缩”，破坏块状晶体片层之间微弱的范德华力，而不会破坏每层平面内的共价键，从而得到二维金属材料。这种方法利用材料表面微小凸起和凹槽之间的机械相互作用，将材料逐渐剥离成连续、均匀、平整的二维薄膜。机械剥离法简单易行且对设备要求低，适用于多种高质量单层或少层材料的制备。

2017年，Kezerashvili等[20]首先将铜箔置于液氮中，然后采用机械剥离法快速拉伸铜箔使其断裂，从而得到超薄的二维铜膜。这种方法的关键在于控制拉伸速度和温度，以确保薄膜的平整度和质量。

通过机械剥离法制备的样品结晶度高，适用于电子器件和基础物性研究；不使用化学试剂，材料表面洁净无污染。但同时伴随产率低、剥离尺寸和厚度难以控制等缺点。机械剥离法是一种环保、经济、高效的方法，可以广泛应用于制备各种二维金属（如铝、镁、钛等）薄膜材料。这些薄膜材料在电子、光电、能源、生物医学等领域具有广泛的应用前景。

1.2　化学气相沉积法

化学气相沉积法的原理过程是：将两种或两种以上的气态原材料导入到一个反应室内，气态原材料之间发生化学反应，形成一种新的材料，并沉积于衬底表面。先将反应物加热到一定温度，达到足够高的蒸汽压，以氩气或氢气为载气送入反应器（在反应器内，被涂材料可以以多种形式存在，例如用金属丝悬挂，放在平面上，沉没在粉末的流化床中，或者本身就是流化床中的颗粒）。化学反应器中，化学反应生成的产物沉积到衬底表面，所需生成产物的成核速率遵循式（1），成核过程涉及从无序状态到有序状态的转变。

$$J = Z\exp\left(-\frac{\Delta G^*}{RT}\right) \tag{1}$$

式（1）中：J是成核速率，代表单位时间内单位体积中能稳定生长的新相核心数量，成核速率越高，系统越容易发生相变；Z是成核因子，与系统的微观结构和表面能有关；ΔG^*是临界成核自由能，与过饱和度（$\Delta\mu$）和表面能（γ）相关；R和T分别为理想气体常数和绝对温度。反应器中产生的废气多为HCl或HF，这些废气会被导向碱性吸收装置或冷阱进行处理，以减少环境污染。除目标固态沉积物外，化学反应的其他产物均须为气态，并具备足够低的饱和蒸汽压，以确保其在反应及沉积全程不凝结，从而使目标物质沉积于加热的衬底表面[21]。过程可概括为以下4个主要的反应阶段：（1）反应气体向衬底表面扩散；（2）反应气体被吸附于衬底表面；（3）在材料表面发生化学反应；（4）气态副产物脱离材料表面。这种方法在制备高质量、大面积、连续的二维金属薄膜方面具有独特的优势。

Lee等[22]采用化学气相沉积法制备了超薄的二维金膜：将衬底置于含有金元素的有机金属前驱体中，在高温下使前驱体分解，并沉积在衬底上形成二维金膜。化学气相沉积法的关键在于控制温度和压力，以确保薄膜的均匀性和质量。

化学气相沉积法在合成二维材料方面展现出显著优势，能够实现大面积、厚度均匀且结晶度高的材料生长。得益于其良好的成分调控性，通过调节元素比例，该方法也广泛应用于合成合金及异质结构。但化学气相沉积法由于需要精准调控温度、气压等，实验条件要求苛刻，且操作设备成本和操作复杂度都较高。

化学气相沉淀法的原理与机械剥离法有所不同，化学气相沉积法是通过化学反应在衬底表面生成所需的二维金属材料[23]，而机械剥离法则是通过机械相互作用将材料逐渐剥离成二维薄膜。但是，两种方法都能够在制备大面积、连续的二维金属薄膜方面取得成功，为相关领域的研究和应用提供了重要的材料基础。

2　自旋热电效应的机制

自旋Seebeck效应是一种利用自旋流产生电效应的现象，由德国科学家于2008年首次发现。在自旋热电效应中，温度梯度会在自旋电子的热运动中产生自旋流，进而在金属/半金属界面产生电压。自旋流是指自旋极化电流，即电子的自旋

方向与电流方向一致的电流[24]。如图1(a)所示，两金属导体A和B用导线相互连接，由于不同的Seebeck系数，在两导体接触点产生了电压V。由于在不同的温度下(存在温度梯度∇T)，考虑电子内部的自旋属性，金属磁体中的自旋向上和自旋向下的传导电子具有不同的浓度和散射率[25-26]，这种差异导致它们在热电效应中的Seebeck系数也不同。由于自旋向上的电化学势$\mu_{\uparrow}$和自旋向下的电化势μ不同，进而产生自旋压，即$\mu_{\uparrow}-\mu_{\downarrow}$，如图1(b)所示。高温和低温端出现一端自旋向上电子较多，而另一端自旋向下的电子较多，出现了自旋极化，这是产生自旋Seebeck效应的前提。类似于2个具有不同Seebeck系数的金属导体A和B存在同一个金属磁体当中，在此金属磁体两端施加一定的温度梯度∇T，温度的变化让不同自旋轨道的电子受到了大小不同的驱动力，该电子驱动力诱导了不同大小的自旋流，从而产生了由温度梯度诱导的自旋Seebeck效应。

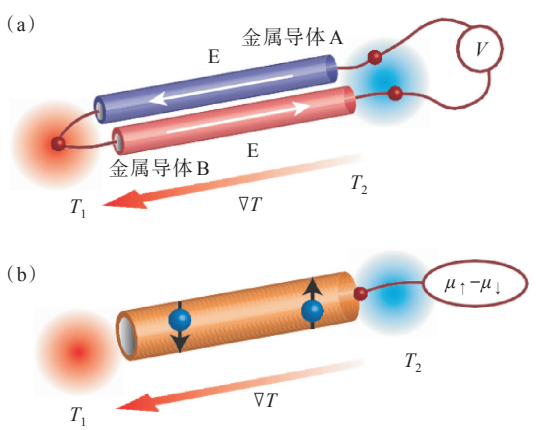


图1 自旋Seebeck效应早期模型：(a)金属导体A和B构成的热电偶，(b)自旋Seebeck效应原理示意图

Fig. 1 Early models of the spin Seebeck effect: (a) the thermocouple composed of metal conductors A and B connected to each other, (b) the schematic illustration of the principle of the spin Seebeck effect

在温度梯度的作用下，自旋向上的电子从高温区向低温区扩散，而自旋向下的电子从低温区向高温区扩散，从而形成一个自旋流。该过程类似于常规的热电效应，但此时产生的是自旋流而不是电流。当自旋流从金属流入半金属时，由于金属和半金属的磁化方向不同，自旋流的自旋方向将会发生改变。这种自旋方向的改变会在金属/半金属界面产生自旋电压，从而产生电效应。通过测量金属/半金属的分界面电压，可以确定自旋热电效应的大小。在实验中，通常将金属/半金属制成微米尺度的薄片，并将其置于加热器上，通过测量加热器温度梯度产生的电压研究自旋热电效应[27]。

自旋Seebeck效应的研究为热电材料的性能提升和新型自旋电子器件的发展提供了重要的理论基础与实验依据。自旋Seebeck效应的实现与调控，不仅为温度梯度下的自旋流提供了新的视角，也为开发高效能的热电材料开辟了新的途径。

3 二维过渡金属材料中的自旋热电性能研究进展

研究人员对二维过渡金属材料中的自旋热电性能的研究中发现，二维过渡金属材料具有较高的自旋极化率和热电效应，这使得该类型材料在自旋电子学和热电器件方面具有潜在的应用价值。

2023年，Park等[28]在对自旋热电效应的研究中，探讨了单层二硫化钼(molybdenum disulfide，MoS_2)中的自旋Seebeck效应，发现在低温条件下MoS_2表现出显著的自旋Seebeck效应，且该自旋Seebeck效应与温度存在一定的依赖关系。该发现为深入理解二维过渡金属硫族化合物的自旋热电性能提供了新的视角。如图2所示，Ding等[29]使用磁性MoS_2纳米管有效产生自旋流，根据其边缘的Mo—S键呈平行排列/锯齿排列构建扶手椅型磁性纳米管(armchair magnetic nanotubes，AMN)/锯齿型磁性纳米管(zigzag magnetic nanotubes，ZMN)，显示出卓越自旋Seebeck效应和双极磁性半导体的热诱导自旋过滤效应。如图3(a)所示，ZMN中的自旋电流约为AMN中的自旋电流的4倍，ZMN较AMN具有更好的传输特性。如图3(b)所示，在温度梯度均为250 K的情况下，ZMN的自旋相关电流谱$J(E)$是AMN的10倍，表明ZMN中Mo^{4+}和S^{2-}的转化效率更高，因此双极磁性半导体是自旋热电子应用的候选者。

研究发现，通过调控材料的结构和组成，可有效改变材料的自旋热电性能。例如，通过引入杂质或掺杂，可以增强材料的自旋极化率和热电效应。此外，研究人员还发现二维过渡金属材料的自旋热电性能与其晶格结构、电子结构和自旋-轨道耦合强度等因素密切相关。

Avsar等[30]使用单层WSe_2石墨烯实现了自旋注入，并利用偏振相关测量证明自旋起源于单层WSe_2，如图4(a)所示。研究人员通过对双层WSe_2

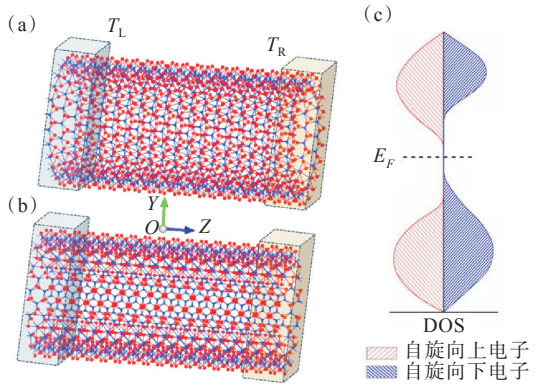


图2　基于锯齿型(a)和扶手椅型(b)磁性MoS_2的纳米管器件模型(T_L和T_R分别表示源极和漏极的温度)；(c)双极磁性半导体态密度的示意图

Fig. 2　Models of nanotube devices based on zigzag (a) and armchair (b) magnetic MoS_2 (where T_L and T_R represent the temperatures of the source and the drain, respectively); (c) Schematic diagram of the density of states for a bipolar magnetic semiconductor

的研究发现，在堆叠过程中其结构恢复了反转对称性，因此不会产生自旋极化现象。这一结果与观测到自旋极化电流的石墨烯体系形成了明确对照，从而证实了石墨烯中的自旋极化电流来源于激光注入过程。

Cheng等[31]利用飞秒激光在Co电极中形成远离平衡的自旋分布，并成功将自旋极化电流直接注入单层MoS_2半导体中，如图4(b)所示。他们还发现自旋电流密度达到10^6~10^8 A·cm^{-2}，较典型的自旋电流注入半导体的强度高一个数量级(例如，使用自旋泵的自旋电流密度的大小为10^2~10^3 A·cm^{-2}，通过隧道结自旋电流密度的大小为10 A·cm^{-2})。随着入射的飞秒激光垂直照射在Co电极上，铁磁Co中生成了远离平衡的自旋。当激发载流子扩散时，它们的能量发生弛豫[32]。此外，由于Co中存在强自旋不对称性，多数自旋电子在高能态下会持续存在较长时间。由此可以得出，唯有能量高于半导体导带底的多数自旋电子方有可能隧穿至半导体层，如图4(b)底部所示。

Vaklinova等[33]展示了从拓扑绝缘体Bi_2Te_2Se向石墨烯中注入自旋极化电流的实验，如图4(c)所示，这种拓扑绝缘体的二维表面态中存在无质量的狄拉克费米子，其在多组实验中实现了最高10%的自旋注入极化率。虽然对自旋信号的来源存在争议——可能来自拓扑绝缘体的表面态，也可能来自由邻近效应诱导的自旋霍尔效应，但该结果已展现出显著的研究价值，为了厘清信号来源，研究人员基于非局域自旋信号在不同条件下的演变趋势分析了信号来源，基本确定信号来源

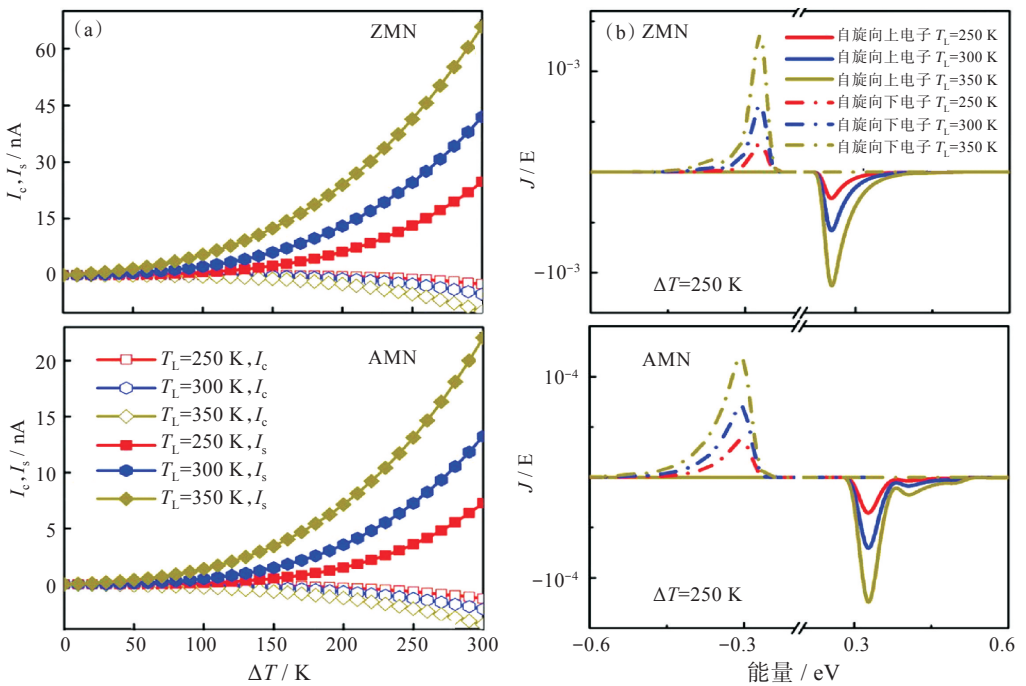


图3　(a)计算出的锯齿型磁性纳米管(ZMN)和扶手椅型磁性纳米管(AMN)的总自旋电流(I_s)和电荷电流(I_c)作为温度偏置(ΔT)的函数；(b)ΔT=250 K时不同T_L的自旋相关电流谱

Fig. 3　(a) Calculated total spin current (I_s) and charge current (I_c) of zigzag magnetic nanotubes (ZMN) and armchair magnetic nanotubes (AMN) as a function of temperature bias (ΔT); (b) Spin-resolved current spectrum at different T_L values when ΔT=250 K

于拓扑绝缘体的表面态，并最终通过透明接触检测该非局域自旋信号。此外，Safeer等[34]通过结合霍尔探针与铁磁电极[构型见图4(d)]，并改变实验温度，观测到随温度恢复至室温，石墨烯中的自旋霍尔效应依然存在，从而证实该效应源自邻近的双金属MoS_2。此外，理论计算表明，与MoS_2、WSe_2或$MoSe_2$上的石墨烯相比，WS_2可以最大化石墨烯中的自旋邻近效应[34]。为了增强自旋邻近效应，应寻求最高的界面质量。Yan等[35]发现Pt作为一种重金属，具有与MoS_2类似的强自旋轨道耦合，并且Pt中的自旋霍尔效应可以于室温下在少层石墨烯通道中产生纯自旋电流[35]，如图4(e)所示。

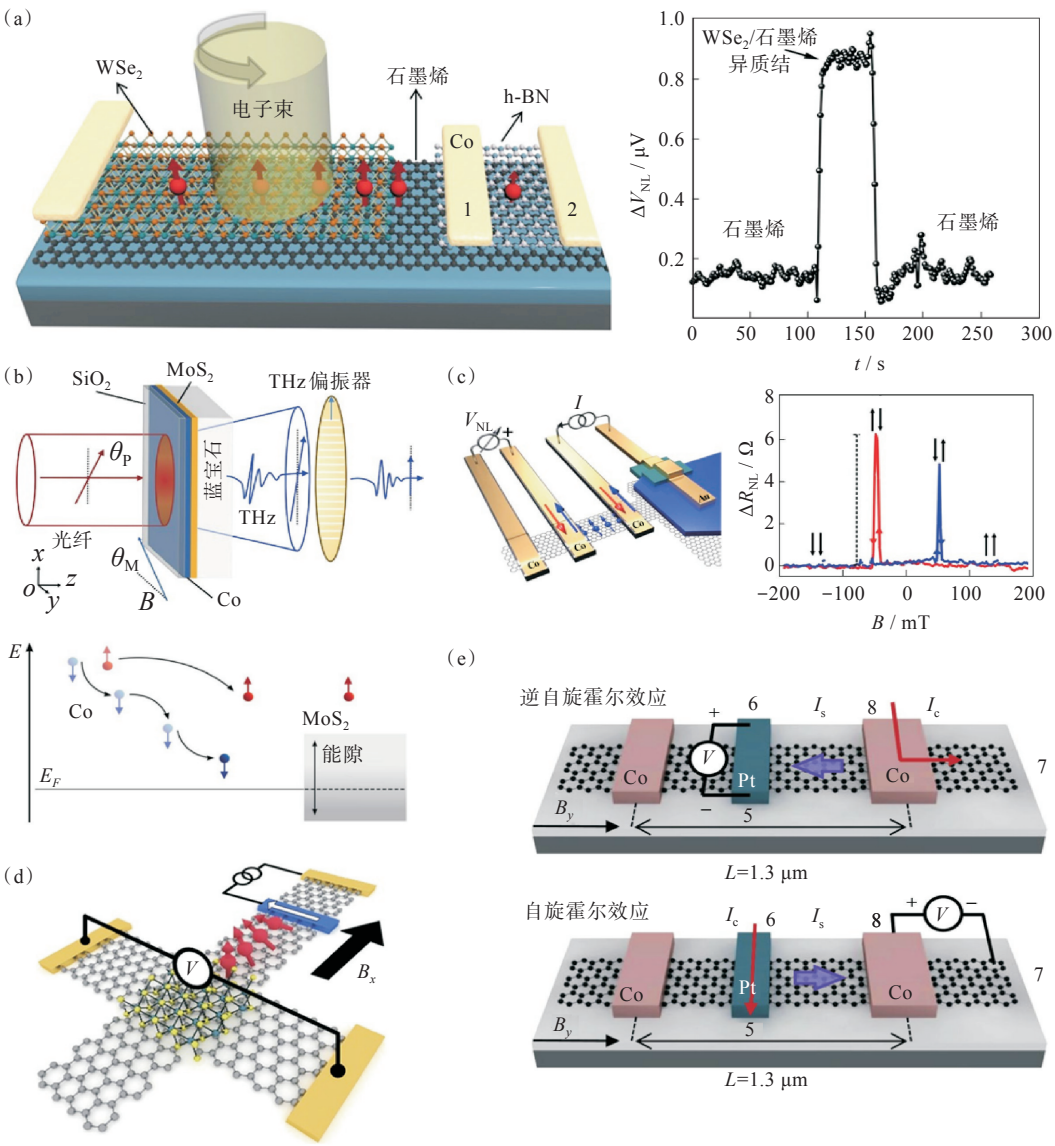


图4 （a）WSe_2的光学注入结构示意图。利用圆偏振光，将在WSe_2中会产生自旋极化的电子，然后扩散到石墨烯中并引起非局域自旋信号，当没有光时，信号处于初始状态。一旦有光，信号就会迅速上升（如右图）；(b) Co/MoS_2异质结构和实验配置示意图，底部图描述了自旋注入的原理；(c)Bi_2Te_2Se/石墨烯异质结构自旋注入和非局域自旋信号的示意图；(d)室温下石墨烯中的自旋霍尔效应示意图；(e)三层石墨烯/ Pt横向异质结构中的自旋-电荷转换。逆自旋霍尔效应（上）和自旋霍尔效应（下）测量配置示意图

Fig. 4 (a) Schematic of the optical injection structure with WSe_2. Utilizing circularly polarized light, the spin-polarized electrons will generate in WSe_2, and then diffuse into graphene and cause non-local spin signals. When there is no light, the signal is in its initial state. And once there is light, the signal rises rapidly (as shown on the right). (b) Schematic of Co/MoS_2 heterostructure and experimental configuration. The figure below describes the principle of spin injection. (c) Schematic of Bi_2Te_2Se/graphene heterostructure spin injection and the non-local spin signals. (d) Schematic of spin Hall effect in graphene with MoS_2 at room temperature. (e) Spin-to-charge conversion in a trilayer graphene/Pt lateral heterostructure. Sketch of the inverse spin Hall effect (top) and spin Hall effect (bottom) measurement configurations

4　自旋热电效应的应用

二维过渡金属材料中的自旋热电效应具有广泛的应用前景,既可以用于自旋电子学器件(如自旋晶体管和自旋阻挡器等)的制备,又可以用于热电能量转换器件(如热电发电器和热电制冷器等)的制备。这些应用在信息技术、能源转换和环境保护等领域发挥重要作用[36]。自旋电子器件利用自旋极化电流实现信息的存储和传输,具有低功耗、高速度和高可靠性等优点。而热电转换器件可以将热能转换为电能,具有高效、环保和可持续性等优点。

自旋电子器件主要采用化学气相沉积法或剥离技术,将二维过渡金属材料转移到目标衬底上。Dong等[37]利用过渡金属硫化物制备了自旋场效应晶体管,并观察到明显的自旋极化电流。Lee等[38]通过精确控制材料厚度和界面性质,提高了自旋电子器件的性能。Dong和Lee的团队制备的自旋电子器件展现出高稳定性、低能耗和长寿命的特点,为未来的信息技术提供了新的发展方向。热电转换器件通常采用直接生长或转移印刷技术,将二维过渡金属材料组装成热电模块。2022年,Jobayr等[39]研究了单层二硫化物的热电性能,并发现其自旋热电优值(thermoelectric figure of merit,ZT)远高于传统材料。赵欣等[40]通过异质结结构设计,优化了二维过渡金属材料的热电性能,并利用其优异的自旋热电效应制备出高性能热电转换器件,该器件在能量回收和温度控制方面的卓越表现,为可穿戴设备及微型系统的能源供给提供了创新思路。

Wang等[41]通过将一种具有较高电导率的材料TiS_2与C_{60}(C_{60}以其极高的Seebeck系数和低热导率著称)进行复合,C_{60}分子可以嵌入TiS_2的层间,形成稳定的复合结构,该复合结构对降低TiS_2电导率的影响极小,但是能够显著提升TiS_2的Seebeck系数并降低热导率,并且该复合结构的ZT值显著高于纯TiS_2材料,这种复合方式显著增强了复合材料的热电性能。Li等[42]将二维SnS_2纳米片引入$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$基体中,成功构建了均匀分布的纳米级异质结构,该复合材料在450 K时的ZT值达到0.93,ZT值的提升和第二相元素的引入对载流子和声子传输特性的显著改善有关。Li等[43]将贵金属(包括银Ag、金Au、铂Pt以及钯Pd)纳米颗粒与通过机械剥离法得到的MoS_2纳米片进行复合,合成Ag/MoS_2复合材料的电导率和Seebeck系数较纯MoS_2薄膜分别提升了1.24倍和1.14倍。此外,所得复合材料的最佳功率因子达到30.3 $\mu W\cdot m^{-1}\cdot K^{-2}$,较纯$MoS_2$薄膜提高了约75%。贵金属的引入显著增强了材料的电荷传输能力,同时优化热电效应,使得复合材料具有良好的热电转换效率[43]。

5　结语与展望

二维过渡金属材料中的自旋热电性能是一个新兴的研究领域,具有重要的科学和应用价值。通过对材料的合成方法和自旋热电效应机制的研究,可以进一步提高材料的自旋热电性能。未来的研究应该注重材料的结构调控和性能优化,以实现二维过渡金属材料在自旋电子学和热电器件方面的应用。

未来二维过渡金属材料的应用领域包括但不限于以下几个方面:

(1)能源领域。二维过渡金属材料的优异热电性能使其在能源转换和存储领域具有广阔的应用前景。通过优化材料结构和提高热电性能参数,可以实现高效、环保的能源利用。

(2)传感领域。二维过渡金属材料具有优异的磁学和电学性能,可用于开发高灵敏度、低能耗的传感器。例如磁场传感器、气体传感器和光电探测器等,可以用于环境监测、生物医学和安全防护等领域。

(3)电子学领域。二维过渡金属材料因其较高的载流子迁移率和优异的机械性能而备受关注。这些特性使其成为柔性电子器件与可穿戴设备的理想候选材料,具体应用可涵盖柔性显示、太阳能电池及高性能晶体管等多个方向。

(4)生物医学领域。二维过渡金属材料具有良好的生物相容性和生物可降解性,可以应用于生物成像、药物传递和组织工程等领域。通过与生物分子相互作用和调控细胞行为,可以实现个性化医疗和精准医学治疗等应用。

(5)复合材料领域。二维过渡金属材料可以与其他材料复合形成功能复合材料,如纳米复合涂层、功能薄膜和复合结构等。通过优化复合材料的组成和结构,可以获得具有优异力学、光学、磁学和电学性能的复合材料,应用于航空航天、汽车和建筑等领域。

参考文献

[1] UCHIDA K, TAKAHASHI S, HARII K, et al. Observation of the spin Seebeck effect [J]. Nature, 2008, 455(7214): 778-781.

[2] ADACHI H, UCHIDA K I, S AITOH E, et al. Theory of the spin Seebeck effect [J]. Reports on Progress in Physics, 2013, 76(3): 036501.

[3] UCHIDA K, XIAO J, ADACHI H, et al. Spin Seebeck insulator [J]. Nature Materials, 2010, 9(11): 894-897.

[4] XIAO D, LIU G B, FENG W X, et al. Coupled spin and valley physics in monolayers of MoS_2 and other group-VI dichalcogenides [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(19): 196802.

[5] ZHANG Y, CHANG T R, ZHOU B, et al. Direct observation of the transition from indirect to direct bandgap in atomically thin epitaxial $MoSe_2$ [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(2): 111-115.

[6] WANG Q H, KALANTAR-ZADEH K, KIS A, et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(11): 699-712.

[7] ZHOU J, JENA P. Giant valley splitting and valley polarized plasmonics in group V transition-metal dichalcogenide monolayers [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2017, 8(23): 5764-5770.

[8] KENFACK-SADEM C, TEGUIMFOUET A K, MOUBISSI A B, et al. Magnetic barrier and electric field effects on exciton-polaron relaxation and transport properties in transition metal dichalcogenide monolayers [J]. Physical Review B, 2023, 107(7): 075134.

[9] SHOKRI A, SALAMI N. Thermoelectric properties in monolayer MoS_2 nanoribbons with Rashba spin-orbit interaction [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(1): 467-482.

[10] BHARADWAJ S, RAMASUBRAMANIAM A, RAM-MOHAN L R. Lateral transition-metal dichalcogenide heterostructures for high efficiency thermoelectric devices [J]. Nanoscale, 2022, 14(32): 11750-11759.

[11] 唐晶晶,孙彩云,丛大龙,等.碲化铋热电材料掺杂研究进展[J].半导体技术,2022,47(11):845-853,872.

[12] 李彩云,何文科,王东洋,等.通过插层Cu实现$SnSe_2$的高效热电性能[J].物理学报,2021,70(20):208401.

[13] LI D L, GONG Y N, CHEN Y X, et al. Recent progress of two-dimensional thermoelectric materials [J]. Nano-Micro Letters, 2020, 12: 36.

[14] MARCHENKOV V V, IRKHIN V Y. Magnetic states and electronic properties of manganese-based intermetallic compounds Mn_2YAl and Mn_3Z (Y=V, Cr, Fe, Co, Ni; Z=Al, Ge, Sn, Si, Pt) [J]. Materials, 2023, 16(19): 6351.

[15] WEI S R, TANG X, LIAO X Q, et al. Recent progress of spintronics based on emerging 2D materials: CrI_3 and Xenes [J]. Materials Research Express, 2019, 6(12): 122004.

[16] ZHANG G, ZHANG Y W. Thermoelectric properties of two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(31): 7684-7698.

[17] ZHOU B Z, WANG X C, MI W B. Superior electronic structure of two-dimensional 3d transition metal dicarbides for applications in spintronics [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(15): 4290-4299.

[18] HE J, TRITT T M. Advances in thermoelectric materials research: looking back and moving forward [J]. Science, 2017, 357(6358): eaak9997.

[19] PU J, KANAHASHI K, CUONG N T, et al. Enhanced thermoelectric power in two-dimensional transition metal dichalcogenide monolayers [J]. Physical Review B, 2016, 94(1): 014312.

[20] KEZERASHVILI R Y, SPIRIDONOVA A. Magnetoexcitons in transition metal dichalcogenides monolayers, bilayers, and van der Waals heterostructures [J]. Physical Review Research, 2021, 3(3): 033078.

[21] LI X S, CAI W W, AN J, et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils [J]. Science, 2009, 324(5932): 1312-1314.

[22] LEE W Y, PARK N W, KIM G S, et al. Enhanced spin Seebeck thermopower in Pt/holey $MoS_2/Y_3Fe_5O_{12}$ hybrid structure [J]. Nano Letters, 2020, 21(1): 189-196.

[23] 李赞,李怡,蒋朵,等.铜离子掺杂聚乙烯亚胺/碳纳米管热电薄膜的制备与表征[J].武汉工程大学学报,2024,46(4):398-403.

[24] TAN C L, CAO X H, WU X J, et al. Recent advances in ultrathin two-dimensional nanomaterials [J]. Chemical Reviews, 2017, 117(9): 6225-6331.

[25] JI Y J, YANG M Y, LIN H P, et al. Janus structures of transition metal dichalcogenides as the heterojunction photocatalysts for water splitting [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(5): 3123-3129.

[26] WANG B L, LUO H, WANG X W, et al.

Bifunctional NbS_2-based asymmetric heterostructure for lateral and vertical electronic devices [J]. ACS Nano, 2020, 14(1): 175−184.

[27] 党阿磊，方成林，赵曌，等. 新型二维纳米材料MXene的制备及在储能领域的应用进展[J]. 材料工程，2020，48(4)：1−14.

[28] PARK C, CHOI J W, PARK N W, et al. Role of two-dimensional monolayer MoS_2 interlayer in the temperature-dependent longitudinal spin Seebeck effect in Pt/YIG bilayer structures [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(22): 11831−11839.

[29] DING G Q, HU Y L, LI D F, et al. Spin Seebeck effect in bipolar magnetic semiconductor: a case of magnetic MoS_2 nanotube [J]. Journal of Advanced Research, 2020, 24: 391−396.

[30] AVSAR A, UNUCHEK D, LIU J W, et al. Optospintronics in graphene *via* proximity coupling [J]. ACS Nano, 2017, 11(11): 11678−11686.

[31] CHENG L, WANG X B, YANG W F, et al. Far out-of-equilibrium spin populations trigger giant spin injection into atomically thin MoS_2 [J]. Nature Physics, 2019, 15(4): 347−351.

[32] BATTIATO M, HELD K. Ultrafast and gigantic spin injection in semiconductors [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(19): 196601.

[33] VAKLINOVA K, HOYER A, BURGHARD M, et al. Current-induced spin polarization in topological insulator-graphene heterostructures [J]. Nano Letters, 2016, 16(4): 2595−2602.

[34] SAFEER C K, INGLA-AYNÉS J, HERLING F, et al. Room-temperature spin hall effect in graphene/MoS_2 van der Waals heterostructures [J]. Nano Letters, 2019, 19(2): 1074−1082.

[35] YAN W J, SAGASTA E, RIBEIRO M, et al. Large room temperature spin-to-charge conversion signals in a few-layer graphene/Pt lateral heterostructure [J]. Nature Communications, 2017, 8: 661.

[36] ZHU Z Y, CHENG Y C, SCHWINGENSCHLÖGL U. Giant spin-orbit-induced spin splitting in two-dimensional transition-metal dichalcogenide semiconductor [J]. Physical Review B, 2011, 84(15): 153402.

[37] DONG L, LOU J, SHENOY V B. Large in-plane and vertical piezoelectricity in Janus transition metal dichalchogenides [J]. ACS Nano, 2017, 11(8): 8242−8248.

[38] LEE S K, LEE W Y, KIKKAWA T, et al. Enhanced spin Seebeck effect in monolayer tungsten diselenide due to strong spin current injection at interface [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(35): 2003192.

[39] JOBAYR M R, SALMAN E M T. Investigation of the thermoelectric properties of one-layer transition metal dichalcogenides [J]. Chinese Journal of Physics, 2021, 74: 270−278.

[40] 赵欣，唐桂华，李一斐，等. 双轴应变对MoS_2/WS_2异质结热电性能的影响[J]. 工程热物理学报，2021，42(9)：2455−2460.

[41] WANG L M, ZHANG Z M, GENG L X, et al. Solution-printable fullerene/TiS_2 organic/inorganic hybrids for high-performance flexible n-type thermoelectric [J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(5): 1307−1317.

[42] LI S K, LIU X R, LIU Y D, et al. Optimized hetero-interfaces by tuning 2D SnS_2 thickness in $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$/SnS_2 nanocomposites to enhance thermoelectric performance[J]. Nano Energy, 2017, 39: 297−305.

[43] LI X, WANG T Z, JIANG F X, et al. Optimizing thermoelectric performance of MoS_2 films by spontaneous noble metal nanoparticles decoration [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 744−750.

本文编辑：苗　变