

悬浮双层MoSe₂激子的机械和电学调控

高静文^{1,2},熊志仁^{1,2},李小茜^{1,2},张桐耀^{1,2*}

(1.量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西大学 光电研究所,山西 太原 030006;

2.极端光学协同创新中心,山西 太原 030006)

摘要:二维过渡金属硫族化合物(Transition metal dichalcogenides, TMDs)如二硒化钼MoSe₂等具有优异的电学、光学和机械性能,是研究纳米光机电耦合系统(Nano-opto-electro-mechanical coupling systems, NOEMS)的理想材料。由于二维激子的高效发光,基于通过NOEMS系统可对TMDs激子的吸收和发射特性进行动态调制。本文分别加工了悬浮结构的双层和单层MoSe₂纳米光机电器件,通过低温下机械共振测量发现,双层MoSe₂的机械共振线宽明显宽于单层MoSe₂,进而机械品质因子更小,且随栅压增大共振线宽变宽,品质因子随之减小;光致发光(Photoluminescence, PL)光谱表明,尽管悬浮区域双层MoSe₂层间激子的PL发射远低于单层MoSe₂层内激子的PL发射,但双层MoSe₂悬浮区域的层间激子PL强度高于硼氮衬底,并且观测到悬浮双层样品有衬底时淬灭的层内激子,且层内激子不受电压掺杂和应力的调控;此外,根据栅极电压调控的结果,我们发现在该悬浮系统中静电感应诱导的应变调控强于电压掺杂调控。

关键词:双层MoSe₂;激子调控;机械共振;光致发光光谱

中图分类号:O436

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)04-0809-06

Mechanical and Electrical Control of Excitons in Suspended Bilayer MoSe₂

GAO Jingwen^{1,2}, XIONG Zhiren^{1,2}, LI Xiaoxi^{1,2}, ZHANG Tongyao^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Optical Quantum Devices, Institute of Optoelectronics,

Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Extreme Optics Collaborative Innovation Center, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Two-dimensional transition metal chalcogenides (TMDs), such as molybdenum selenide (MoSe₂), have excellent electrical, optical and mechanical properties, and are ideal materials for the study of nano-opto-electro-mechanical coupling systems (NOEMS). The absorption and emission characteristics of TMDs excitons can be dynamically modulated based on the NOEMS system. In this paper, bilayer and monolayer MoSe₂ nano-opto-electro-mechanical devices with suspended structure are fabricated respectively. By measuring mechanical resonance at a cryogenic temperature of 10 K, it is found that the mechanical resonance linewidth of bilayer MoSe₂ is significantly wider, hence lower mechanical quality factor, than that of monolayer MoSe₂. PL photoluminescence of the inter-layer exciton in the suspended bilayer MoSe₂ exhibits enhanced intensity than bilayers supported by a hexagonal boron nitride (h-BN) substrate, yet is far lower than the that of intra-layer exciton in the monolayer case. The intra-layer excitons, seen in the suspended bilayer MoSe₂, however, are quenched in the h-BN-supported region. In addition, by applying a gate voltage, we find that the electrostatically-induced strain plays a more pronounced role than that of the electric doping in our suspended devices.

Key words: bilayer MoSe₂; exciton control; mechanical resonance; photoluminescence spectra

收稿日期:2023-02-06;接受日期:2023-04-17

基金项目:国家自然科学基金(U21A6004;12004389;62274180;12204287)

作者简介:高静文(1996-),女,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向为二维材料器件。E-mail:vawxbb@126.com

*通信作者:张桐耀(ZHANG Tongyao),E-mail:tongyao_zhang@sxu.edu.cn

引文格式:高静文,熊志仁,李小茜,等.悬浮双层MoSe₂激子的机械和电学调控[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(4):809-814. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023082

0 引言

二维过渡金属硫族化合物(Transition metal dichalcogenides, TMDs)的化学式是 MX_2 , M是指过渡金属元素(如:钼、钨、铌、铪、钛), X是指硫族元素(如:硫、硒、碲)^[1]。TMDs的层间范德瓦尔斯力很弱,平面内是较强的共价键,当一些TMDs从多层转变成单层时,其能带结构由间接带隙转变成直接带隙,可以提高发光效率,从而为制备高性能光电器件带来了契机^[2-3]。同时,由于晶格失配效应不明显,使得TMDs与其他二维材料形成的异质结光电器件有望在更广泛的光谱范围内表现出良好的性能^[4-5]。TMDs中过渡金属原子具有强烈的自旋-轨道耦合,自旋-能谷的锁定使其在新型自旋/能谷电子学器件中具有广泛的潜力^[6]。相比于单层仅能形成层内激子,双层的TMDs中由于强电子-空穴库仑相互作用,可产生不同层束缚的空间分离电子-空穴对,即层间激子^[7-10]。层间激子具有长达数百纳秒的寿命^[11-12];还可产生面外的永久电偶极矩,对其光学与输运进行电控制^[13-14]。这些特殊的属性为研究多体效应、激子器件等提供了良好的平台^[15-16]。近年来,研究人员在双层 MoSe_2 的层间激子中也取得了一些研究进展,如Helmrich等采用二维相干电子谱,发现由于额外低能谷的出现导致了声子辅助的谷间散射,双层二硒化钼(Molybdenum selenide, MoSe_2)中激子的退相干明显快于单层^[17]。Hornig等通过共焦反射光谱观察到双层 MoSe_2 中层间激子和层内激子共存,且双层 MoSe_2 中的层间激子具有153 meV的大激子结合能和19 meV的窄线宽^[18]。

随着器件不断小型化发展,纳米光机电系统(Nano-opto-electro-mechanical coupling systems, NOEMS)的应用越来越宽泛,涵盖了包括电子、医学、环境等诸多领域。而随着TMDs不断地研究与发展,其在电学、光学、机械等方面卓越的表现,已成为未来NOEMS器件的重要候选材料之一。近年来,基于TMDs的NOEMS微纳器件也得到了广泛地关注与研究^[19-20]。如Adrian Bachtold等制备了基于单层 WSe_2 的纳米谐振器,其品质因子在液氮温度下达到 1.6×10^4 ,在液氮温度下达到 4.7×10^4 ,且

在3.5 K以下纳米谐振器的光学检测不受激光加热的影响,从而可以用低激光功率检测机械运动^[21]。Philip X.-L. Feng等发现单层、双层和三层 MoS_2 的纳米机电系统具有高达约120 MHz的频带,且具有出色的电可调谐性和大动态范围^[22]。尽管以单层和多层TMDs为基础的纳米谐振子得到了比较广泛的关注,然而悬浮双层TMDs结构特别是对其中激子效应的调控的研究仍然十分缺乏,这限制了同质双层TMDs中层间激子的应用发展,因此需要对其电学调控性能做更深入的研究。

本文主要研究了悬浮双层 MoSe_2 器件中激子的机械和电学调控。利用单步微雕法将以少层石墨为接触电极的六方氮化硼(Hexagonal boron nitride, h-BN)与少层 MoSe_2 异质结悬浮加工为纳米机械谐振子,并通过机械共振和低温微区荧光光谱,分别研究机械振子固有频率模式的电学调控以及层间、层内激子在应力和静电场作用下调制效应。本项研究为双层TMDs层间载流子动力学以及层间耦合的光机电器件研究提供了实验基础。

1 器件的制备与实验方法

我们采用机械剥离法将高质量的块体单晶解离至原子极限,通过光学显微镜、原子力显微镜等表征手段分别获得单层 MoSe_2 、双层 MoSe_2 、少层石墨(Graphite, 简称Gr)、h-BN(20 nm~50 nm)、h-BN(约300 nm),如图1(a)所示,该图为双层 MoSe_2 的光学图片。随后将通过干式转移法获得的h-BN/Gr/少层 MoSe_2 异质结悬浮于预先图形化的标准孔洞h-BN(约300 nm)阵列表面上,完成谐振器的堆垛结构,图1(b)为异质结构的剖面示意图,其中,采用少层石墨作为接触电极,值得注意的是,异质结中悬浮区域仅为h-BN/ MoSe_2 双层异质结;Au底栅作为谐振子的门电压及栅极调制电极;通过标准的微纳加工技术,如电子束曝光、刻蚀、电子束蒸发等工艺进行电极蒸镀,最终得到如图1(c)所示的纳米谐振器。通过原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)形貌表征(图1(d)),可以看出,h-BN/Gr/少层 MoSe_2 异质结完好地悬浮于孔洞表面,未出现塌陷断

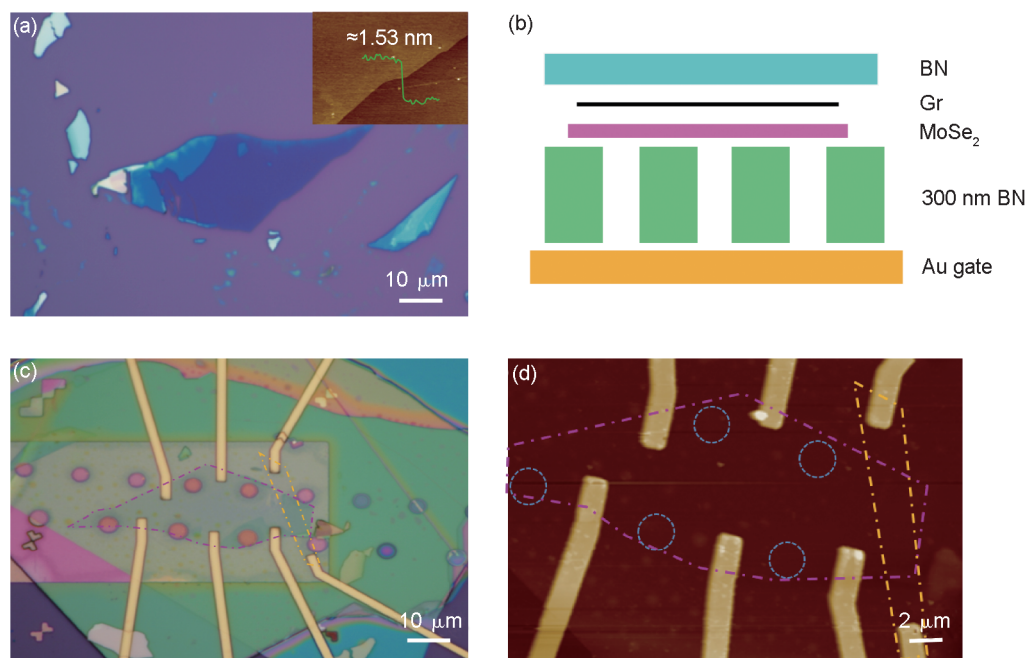


图1 典型少层MoSe₂纳米机械谐振子结构图

(a)双层MoSe₂的光学图片,插图是AFM对其形貌扫描以相应的台阶高度;(b)基于少层MoSe₂异质结的结构示意图;(c)制备完成后器件的光学图片;(d)对制备完成的器件进行AFM形貌表征;其中,图(c)、(d)中紫色虚线轮廓为MoSe₂,黄色虚线轮廓为Gr,圆圈表示孔洞

Fig. 1 Structure of typical few-layered MoSe₂ nano-mechanical oscillator

(a) Optical image of bilayer MoSe₂. The inset is the morphology measured by AFM and its corresponding step height. (b) Structural schematics based on few-layered MoSe₂ heterojunction. Optical image (c) and AFM image (d) of a device after fabrication. In (c) and (d), the purple dash-dotted lines, yellow dash-dotted lines, and circle dashed lines, indicate MoSe₂, Gr, and holes, respectively

裂等现象。由于孔洞上方存在硼氮(BN)层,AFM针的应力可能不足以使悬浮异质结形变,因此AFM无法呈现孔洞的形貌。

光机电耦合系统制备完成后,我们将其装入光学恒温室中,在 $T=10$ K温度下开展低温悬浮双层MoSe₂激子的研究。首先采用光学干涉法进行机械共振的测量。其基本思想是通过源表为样品提供直流电压,矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)输出端提供交流电压,利用偏置器将直流信号和交流信号混合起来并将此混合信号施加在Au底栅上。Au底栅可以在悬浮的MoSe₂薄膜中感应到电荷并产生静电力,从而破坏机械器件的镜像对称性,同时产生的静电力可以改变和控制器件的刚度来实现频率调谐^[23]。在交流电信号的驱动下h-BN/MoSe₂异质结薄膜会发生谐振,激光照射在样品上,并在异质结薄膜处和Au底栅处分别发生反射,两束反射光会发生干涉,用光电探测器接收该携带薄膜振动信息的干涉信

号,并进一步输入VNA分析h-BN/MoSe₂异质结的振动特性^[24]。

随后,我们通过光致发光光谱技术对单、双层MoSe₂在悬浮区域和BN衬底处激子及相应的电学、机械调控性进行直接对比。实验中采用532 nm固体激光器,分别测试了单、双层MoSe₂在悬浮区域和BN衬底处的PL光谱。其中激发双层MoSe₂的激光功率被设置为 $50 \mu\text{W}$,激发单层MoSe₂的激光功率为 $5 \mu\text{W}$,积分时间为5 s,栅压范围为 $-10 \text{ V} \sim 10 \text{ V}$,步长为 0.2 V 。

2 实验结果及讨论

在测量悬浮双层(2L)MoSe₂和悬浮单层(1L)MoSe₂机械共振时,将交流驱动功率固定在 -30 dBm ,激光功率控制在 $50 \mu\text{W} \sim 100 \mu\text{W}$,栅压范围为 $-10 \text{ V} \sim 10 \text{ V}$ 。固定栅压为 $V_g = -5.5 \text{ V}$ 时,2L、1L MoSe₂的机械振幅随驱动频率的变化如图2(a)所示,1L MoSe₂的线宽约

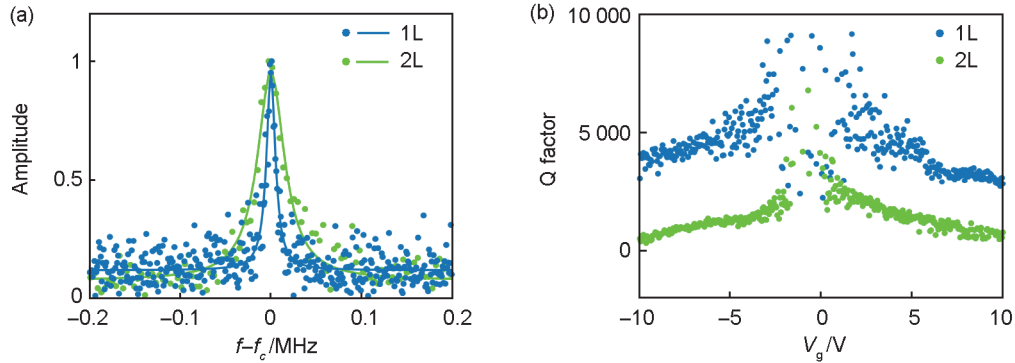


图2 双层和单层MoSe₂纳米机械谐振子机械共振的结果

(a) 1L、2L MoSe₂的振幅随驱动频率的变化关系,此时 $V_g = -5.5$ V,其中 f_c 为共振中心频率,Amplitude为归一化的薄膜振动幅度;(b) 1L、2L MoSe₂的品质因子(Q)随栅压(V_g)的变化关系

Fig. 2 Mechanical resonance results of bilayer and monolayer MoSe₂ nano-mechanical resonator

(a) The resonance amplitude versus driving frequency of 1L and 2L MoSe₂ mechanical resonators for $V_g = -5.5$ V, respectively. f_c is the resonance center frequency, whereas Amplitude is the normalized resonance amplitude. (b) Quality factor (Q) versus gate voltage (V_g) of 1L and 2L MoSe₂, respectively

0.1 MHz,而2L MoSe₂的线宽约0.2 MHz。由此可知2L MoSe₂的振动线宽更宽,在与1L MoSe₂共振频率 f_c 相近的情况下,1L MoSe₂振动品质更优异。改变 V_g ,我们得到不同直流栅压下两种样品的机械品质因子(见图2(b)),可以看出在 $V_g = 3$ V时,1L MoSe₂的品质因子(Q)接近6 000,而2L MoSe₂的Q数值约2 200,可见1L MoSe₂的品质因子明显高于2L MoSe₂,这表明1L MoSe₂储存机械谐振能量的时间更长。在两类纳米机械谐振子制备参数完全相同的前提下,上述结果意味着仅仅一个原子层MoSe₂的增加就对悬浮异质结的机械参数产生了显著的影响,进一步展现了双层TMDs与单层TMDs在力学性能上的本质差异。

随后,采用微区荧光光谱光学装置对1L MoSe₂和2L MoSe₂的光致发光光谱(PL)进行了研究。图3(a)分别展示了双层MoSe₂在悬浮区域和BN衬底处的PL光谱以及单层MoSe₂在悬浮区域的PL光谱,对应的 $V_g = 0$ V。对比1L和2L MoSe₂器件悬浮区域的PL光谱,尽管都出现层内激子峰,然而1L器件的PL强度远高于2L MoSe₂器件悬浮区域,这是能带结构随层数变化的自然结果;对于2L MoSe₂器件来说,在1.41 eV附近两种类型区域都观察到了层间激子,有趣的是悬浮区域的层间激子PL强度高于BN衬底处。结合文献[25]和我们在1L MoSe₂器件中的悬浮区域与BN衬底对比结果

(未在本文展示),即便BN衬底拥有原子级的平整度,支撑层仍然能够减弱电子-空穴的复合发光。

进一步地,我们对2L MoSe₂器件施加栅压,分别得到悬浮区域(图3(c))和BN衬底上(图3(d))的PL与 V_g 的二维映射关系图,可以发现在图3(c)中1.63 eV附近的层内激子几乎不随 V_g 的调控而变化,而图3(d)没有观测到层内激子的PL峰,意味着BN衬底上2L MoSe₂层内激子淬灭;在1.41 eV附近图3(c),(d)均观察到栅压调制的层间激子,意味着 V_g 有效地调控了2L MoSe₂层内激子的发射强度。我们考虑2L MoSe₂器件中层间激子受外场的调控效应,对层间激子PL计数求和,分别得到悬浮区域和BN衬底处的层间激子发射强度随栅压的变化(如图3(b))。可以看出施加负向栅压时,悬浮区域的层间激子PL强度高于BN衬底,且随栅压增大,BN衬底上的层间激子几乎没有变化,而悬浮区域的层间激子强度则显著降低,意味着增强的非辐射跃迁;而施加正向栅压时,结果发生了逆转,悬浮区域的层间激子PL强度弱于BN衬底处,这表明相同的静电栅压对两个区域的样品产生了不同的影响。对于BN衬底上的2L MoSe₂,栅压 V_g 的作用主要为产生静电场和对样品进行电荷掺杂;而对于悬浮区域,栅压 V_g 诱导的感应电荷还可以与Au栅极发生相互作用,通过静电力对悬浮异质

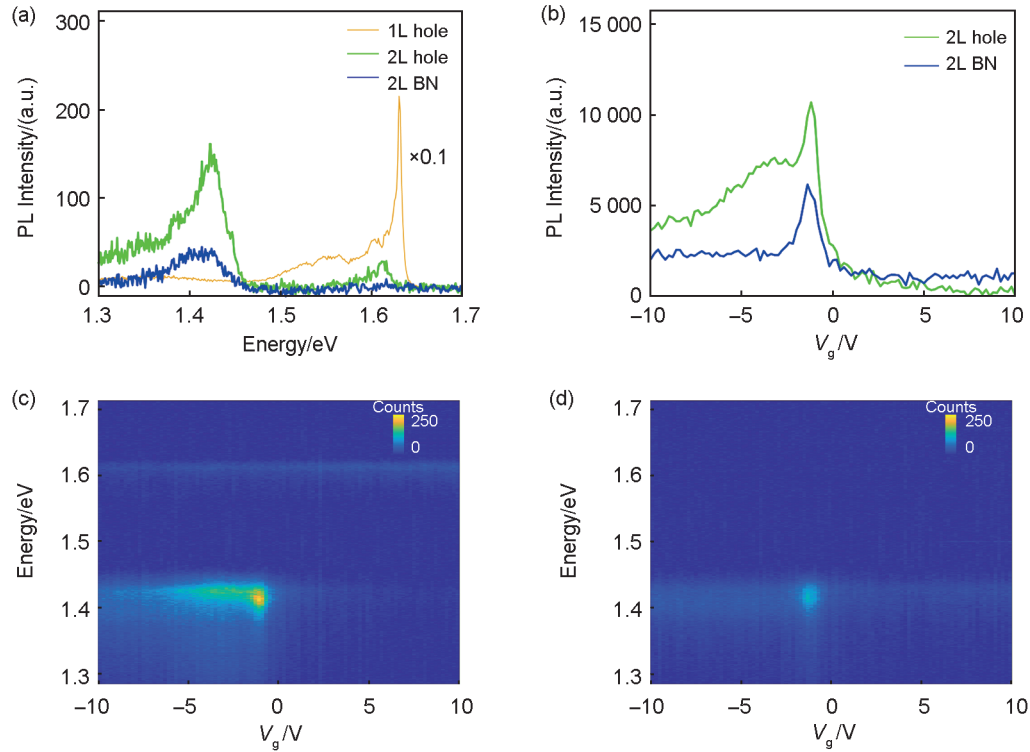


图3 单层和双层 MoSe₂ 悬浮纳米结构低温微区 PL 结果

(a) $V_g=0$ V 时 2L MoSe₂ 样品分别在 BN 衬底、悬浮区域, 以及 1L MoSe₂ 样品悬浮区域的 PL 光谱; (b) 2L MoSe₂ 样品悬浮区域和 BN 衬底上的 PL 强度随 V_g 的变化; (c) 2L MoSe₂ 样品悬浮区域的 PL 与 V_g 的二维映射关系图; (d) 2L MoSe₂ 样品 BN 衬底上的 PL 与 V_g 的二维映射关系图

Fig. 3 Microscopic PL measurements of suspended 1L and 2L MoSe₂ nanostructures at low temperature

(a) PL spectra of 2L MoSe₂ at BN substrate, suspended region, and 1L MoSe₂ at suspension region for $V_g=0$ V, respectively. (b) The PL intensity versus V_g of 2L MoSe₂ at suspended region and BN substrate, respectively. Two-dimensional mapping of PL and V_g at suspended region (c), and BN substrate (d) of 2L MoSe₂ sample, respectively

结产生应变, 从而在电场调控外增加了机械调控的自由度。从图 3(b) 悬浮区域增强的外场对 PL 调控性可见双层样品静电感应诱导的应变调控强于电压掺杂调控。

3 结论

本文设计了一种基于少层 MoSe₂ 的纳米光机电耦合器, 在 $T=10$ K 的低温下研究了双层 MoSe₂/BN 异质结的机械振动和激子调控特性。双层 MoSe₂ 的品质因子 Q 低于单层 MoSe₂, 但共振线宽更宽; 通过分析双层 MoSe₂ 样品的光致发光光谱, 我们发现悬浮区域层间激子的 PL 强于 BN 衬底, 而层内激子则在有衬底时发生淬灭, 且不受应力和电压掺杂的调控。此研究成果为悬浮少层 TMD 的机械振动和激子性质的研究提供了理论依据, 为未来扭曲 TMD 系统

中莫尔激子的应变调控研究奠定了一定的基础。

参考文献:

- [1] LIU E F, FU Y J, WANG Y J, *et al.* Integrated Digital Inverters Based on Two-dimensional Anisotropic ReS₂ Field-effect Transistors[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 6991. DOI: 10.1038/ncomms7991.
- [2] ZHAO H, GUO Q S, XIA F N, *et al.* Two-dimensional Materials for Nanophotonics Application[J]. *Nanophotonics*, 2015, **4**(1): 128–142. DOI: 10.1515/nanoph-2014-0022.
- [3] ISLAND J O, KUC A, DIEPENDAAL E H, *et al.* Precise and Reversible Band Gap Tuning in Single-layer MoSe₂ by Uniaxial Strain[J]. *Nanoscale*, 2016, **8**(5): 2589–2593. DOI: 10.1039/c5nr08219f.
- [4] LI Y, DUERLOO K A N, WAUSON K, *et al.* Structural Semiconductor-to-semimetal Phase Transition in Two-dimensional Materials Induced by Electrostatic Gating[J].

- Nat Commun*, 2016, **7**: 10671. DOI: 10.1038/ncomms10671.
- [5] LI H, WU J, YIN Z Y, *et al.* Preparation and Applications of Mechanically Exfoliated Single-layer and Multilayer MoS₂ and WSe₂ Nanosheets[J]. *Acc Chem Res*, 2014, **47** (4): 1067–1075. DOI: 10.1021/ar4002312.
- [6] CAO T, WANG G, HAN W P, *et al.* Valley-selective Circular Dichroism of Monolayer Molybdenum Disulphide[J]. *Nat Commun*, 2012, **3**: 887. DOI: 10.1038/ncomms1882.
- [7] JIANG Y, CHEN S L, ZHENG W H, *et al.* Interlayer Exciton Formation, Relaxation, and Transport in TMD van Der Waals Heterostructures[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10** (1): 72. DOI: 10.1038/s41377-021-00500-1.
- [8] WILSON N R, NGUYEN P V, SEYLER K, *et al.* Determination of Band Offsets, Hybridization, and Exciton Binding in 2D Semiconductor Heterostructures[J]. *Sci Adv*, 2017, **3**(2): e1601832. DOI: 10.1126/sciadv.1601832.
- [9] RIVERA P, SCHAIBLEY J R, JONES A M, *et al.* Observation of Long-lived Interlayer Excitons in Monolayer MoSe₂-WSe₂ Heterostructures[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 6242. DOI: 10.1038/ncomms7242.
- [10] REGAN E C, WANG D Q, PAIK E Y, *et al.* Emerging Exciton Physics in Transition Metal Dichalcogenide Heterobilayers[J]. *Nat Rev Mater*, 2022, **7**(10): 778–795. DOI: 10.1038/s41578-022-00440-1.
- [11] MILLER B, STEINHOFF A, PANO B, *et al.* Long-lived Direct and Indirect Interlayer Excitons in van Der Waals Heterostructures[J]. *Nano Lett*, 2017, **17**(9): 5229–5237. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b01304.
- [12] JIANG C Y, XU W G, RASMITA A, *et al.* Microsecond Dark-exciton Valley Polarization Memory in Two-dimensional Heterostructures[J]. *Nat Commun*, 2018, **9** (1): 753. DOI: 10.1038/s41467-018-03174-3.
- [13] NAGLER P, PLECHINGER G, BALLOTTIN M V, *et al.* Interlayer Exciton Dynamics in a Dichalcogenide Monolayer Heterostructure[J]. *2D Mater*, 2017, **4**: 025112. DOI: 10.1088/2053-1583/aa7352.
- [14] JAUREGUI L A, JOE A Y, PISTUNOVA K, *et al.* Electrical Control of Interlayer Exciton Dynamics in Atomically Thin Heterostructures[J]. *Science*, 2019, **366** (6467): 870–875. DOI: 10.1126/science.aaw4194.
- [15] UNUCHEK D, CIARROCCHI A, AVSAR A, *et al.* Room-temperature Electrical Control of Exciton Flux in a Van Der Waals Heterostructure[J]. *Nature*, 2018, **560**(7718): 340–344. DOI: 10.1038/s41586-018-0357-y.
- [16] RIVERA P, YU H Y, SEYLER K L, *et al.* Interlayer Valley Excitons in Heterobilayers of Transition Metal Dichalcogenides[J]. *Nat Nanotechnol*, 2018, **13**(11): 1004–1015. DOI: 10.1038/s41565-018-0193-0.
- [17] HELMRICH S, SAMPSON K, HUANG D, *et al.* Phonon-assisted Intervalley Scattering Determines Ultrafast Exciton Dynamics in MoSe₂ Bilayers[J]. *Phys Rev Lett*, 2021, **127**(15): 157403. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.157403.
- [18] HORNG J, STROUCKEN T, ZHANG L, *et al.* Observation of Interlayer Excitons in MoSe₂ Single Crystals [J]. *Phys Rev B*, 2018, **97**: 241404. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.241404.
- [19] MORELL N, TEPsic S, RESERBAT-PLANTEY A, *et al.* Optomechanical Measurement of Thermal Transport in Two-dimensional MoSe₂ Lattices[J]. *Nano Lett*, 2019, **19**(5): 3143–3150. DOI: 10.1021/acs.nanolett.9b00560.
- [20] YILDIRIM T, ZHANG L L, NEUPANE G P, *et al.* Towards Future Physics and Applications via Two-dimensional Material NEMS Resonators[J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(44): 22366–22385. DOI: 10.1039/D0NR06773C.
- [21] MORELL N, RESERBAT-PLANTEY A, TSIOUTSIOS I, *et al.* High Quality Factor Mechanical Resonators Based on WSe₂ Monolayers[J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(8): 5102–5108. DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b02038.
- [22] LEE J, WANG Z H, HE K L, *et al.* Electrically Tunable Single- and Few-layer MoS₂ Nanoelectromechanical Systems with Broad Dynamic Range[J]. *Sci Adv*, 2018, **4**(3): eaa06653. DOI: 10.1126/sciadv.aa06653.
- [23] XIE H C, JIANG S W, RHODES D A, *et al.* Tunable Exciton-optomechanical Coupling in Suspended Monolayer MoSe₂[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(6): 2538–2543. DOI: 10.1021/acs.nanolett.0c05089.
- [24] ZHANG T Y, WANG H W, XIA X X, *et al.* A Monolithically Sculpted Van Der Waals Nano-opto-electromechanical Coupler[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 48. DOI: 10.1038/s41377-022-00734-7.
- [25] ZHOU Y, SCURI G, SUNG J, *et al.* Controlling Excitons in an Atomically Thin Membrane with a Mirror[J]. *Phys Rev Lett*, 2020, **124**(2): 027401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.027401.