

专题: 半导体物理与器件

利用范德瓦耳斯工程定制具有全新发光各向异性的二维异质结*

文婷^{1) #} 苏子洛^{2) #} 王雅兰^{2) #} 蔡霜^{2) #} 巫佳琦²⁾ 秦嘉泽²⁾
焦陈寅²⁾ 王曾晖^{2) †} 张泽娟^{2) ‡} 裴胜海^{2) ††} 夏娟^{2) †††}

1) (湖州学院电子信息学院, 湖州 313000)

2) (电子科技大学基础与前沿研究院, 成都 610054)

(2025年8月19日收到; 2025年9月11日收到修改稿)

二维材料的发光特性与各向异性构成了微纳偏振发光器件实现与性能优化的物理基础. 然而, 并非所有天然二维材料体系同时具备强本征发光与强各向异性, 这在很大程度上限制了其在偏振可控发光器件中的应用潜力. 针对这一问题, 本研究基于范德瓦耳斯工程策略, 构建了由单层 MoS_2 与低对称性 NbIrTe_4 组成的异质结, 从而实现了高效发光特性与强各向异性响应的协同耦合. 角分辨偏振光致发光测试结果表明, NbIrTe_4 中固有的各向异性势场能够有效地改变单层 MoS_2 的面内晶格对称性, 诱导其光致发光过程呈现明显的偏振依赖性, 并显著地提升激子的各向异性辐射强度. 本研究不仅揭示了范德瓦耳斯异质结中发光各向异性产生的微观物理机制, 还为新一代高性能偏振发光器件的结构设计与性能调控提供了可行的理论指导与实验依据.

关键词: 各向异性, 范德瓦耳斯异质结, 角分辨光致发光**PACS:** 13.88.+e, 42.25.Ja, 73.40.Lq, 68.35.Ja**DOI:** 10.7498/aps.74.20251120**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251120

1 引言

二维材料因其结构(原子级厚度, 各向同性/异性)与物理性质(发光特性, 晶格振动等)的独特性, 在新一代功能器件中展现出广阔应用前景^[1-6]. 其中, 单层 MoS_2 作为典型的直接带隙半导体, 其光致发光 (photoluminescence, PL) 处于可见光波

段、强度高且峰位可调; 此外, 其电子结构对外界环境的电场、应变以及界面作用高度敏感, 这些为实现光学功能调控提供了优越的平台^[7,8].

与此同时, 低对称性二维材料因其独特的晶格结构而表现出显著的面内各向异性, 在光吸收、折射率、介电响应以及载流子输运等方面均呈现出明显的方向依赖性行为^[9,10]. NbIrTe_4 作为典型的低对称性二维半金属^[11,12], 不仅在电学与光学响应上

* 国家自然科学基金(批准号: T2325007, 62450003, U21A20459, 62104029)、浙江省自然科学基金(批准号: ZCLQN25A0407)、四川省自然科学基金杰出青年科学基金(批准号: 25NSFJQ0277)和亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室(燕山大学)开放课题(批准号: 202504)资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: zenghui.wang@uestc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zejuanzhang@uestc.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: shpei@uestc.edu.cn

††† 通信作者. E-mail: juanxia@uestc.edu.cn

均表现出强各向异性, 还具备优良的界面耦合特性, 因此是调控二维材料各向异性的重要候选材料^[13,14].

然而, 天然二维材料中很少有体系能够同时具备强本征发光与强各向异性(如 MoS₂ 与 NbIrTe₄ 分别在这两方面表现突出). 这种“特性分离”在一定程度上限制了二维材料在偏振可控发光器件等领域的进一步应用^[15-17]. 虽然在已有的研究中人们构筑异质结可以在一定程度上弥补单一二维材料所不具备的物性^[18-21], 但其效果大多体现为“加法”, 即新构筑异质结的光谱特性通常是不同组分材料的简单叠加^[22-24]; 如果希望实现材料物性的“乘法”, 即一种材料的独特物性能够对另一材料的不同物理维度进行有效调控^[25], 则需要有针对性地挑选二维材料来构筑异质结.

对此, 本研究利用范德瓦耳斯工程定制了具有全新发光各向异性的 1L-MoS₂/NbIrTe₄ 异质结. 该异质结通过界面耦合效应, 实现了将 MoS₂ 的强本征发光与 NbIrTe₄ 的强各向异性以“乘法”而非“加法”的方式进行结合, 从而获得了全新的具有强发光各向异性的异质结. 通过角分辨偏振 PL 光谱测量, 我们系统揭示了 NbIrTe₄ 诱导的强各向异性局域场能够有效地改变 MoS₂ 的层内对称性, 并显著地增强其激子的各向异性辐射行为. 本研究不仅丰富了范德瓦耳斯异质结的光学调控机理, 也为高性能偏振发光器件的材料设计提供了新的思路与理论支撑.

2 实验与结果

本文采用商用的共聚焦显微系统(图 1)^[26,27] 表征了通过范德瓦耳斯工程构建的新型 1L-MoS₂/NbIrTe₄ 异质结的发光特性. 图 2 展示了本文所测试样品的晶体结构及其基础表征信息. 图 2(a) 为 MoS₂ 的晶体结构示意图, 其中黄色和紫色圆球分别表示 S 原子和 Mo 原子. 从图 2(a) 可以看出, MoS₂ 呈现出典型的层状六方晶体结构, 原子排列高度有序, 表现出平面内的各向同性晶体对称性. 这种对称性决定了其在平面内不具备线性二色性等各向异性光学响应特征^[28,29]. 并且, 1L-MoS₂ 作为二维过渡金属硫化物中典型的直接带隙半导体材料, 其能带结构如图 2(c) 所示^[30,31]. 由于其 d 轨道电子存在显著的自旋-轨道耦合作用, 使得价带

顶和导带底在 *K* 点附近发生能带劈裂^[32]. 这种劈裂导致其在光学激发过程中出现两类不同能量的激子态, 分别对应于 X_A 和 X_B 激子跃迁^[30,31], 如图 2(f) 中蓝线所示. 这两类激子在实际光谱中具有清晰可辨的吸收或发射峰, 是研究 MoS₂ 激发态动力学的重要光谱特征^[33,34].

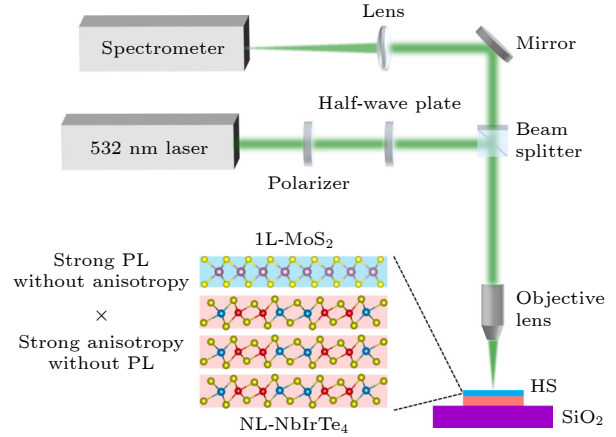


图 1 实验装置示意图. 其激发光源为波长 532 nm 的线偏振激光, 通过旋转半波片调节激发光偏振方向, 实现角偏振 PL 测量. 激光束经 100 倍物镜聚焦于样品表面, 激发功率控制在 0.1 mW 以下, 以有效抑制光致加热效应. 插图 为 1L-MoS₂ 与 NbIrTe₄ 薄片堆叠的异质结侧视图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup. A linearly polarized laser with a wavelength of 532 nm serves as the excitation source, and a rotating half-wave plate is used to control the polarization angle for angle-resolved polarization-dependent PL measurements. The laser beam is focused onto the sample surface using a 100× objective lens, and the excitation power keep below 0.1 mW to effectively suppress photoinduced heating effects. Inset: side view of the crystal structure of 1L-MoS₂/NbIrTe₄ heterostructure.

图 2(b) 展示了 NbIrTe₄ 的晶体结构. 该材料为层状三明治结构, Nb(青色球体) 和 Ir(红色圆球) 原子位于中间层, 沿 *b* 轴形成平行的“之”字形链. 每个 Nb 或 Ir 原子被六个 Te(深黄色圆球) 原子配位, 构成扭曲的八面体结构. NbIrTe₄ 属于正交晶系, 其空间群为非中心对称的 *Pmn*2₁, 具有明显的晶体各向异性. 同时, 该材料被认为是 II 类 Weyl 半金属^[35]. 图 2(d) 展示了其能带结构中能带交叉和 Weyl 节点的存在, 预示其在电子输运与光学响应中的拓扑性质, 并且证实了其不存在 PL 光谱信号^[36].

为系统地研究界面耦合对激子行为的影响, 在相同激发条件下, 分别对 1L-MoS₂ 及 1L-MoS₂/NbIrTe₄ 异质结(图 2(e)) 进行了 PL 光谱表征, 结果

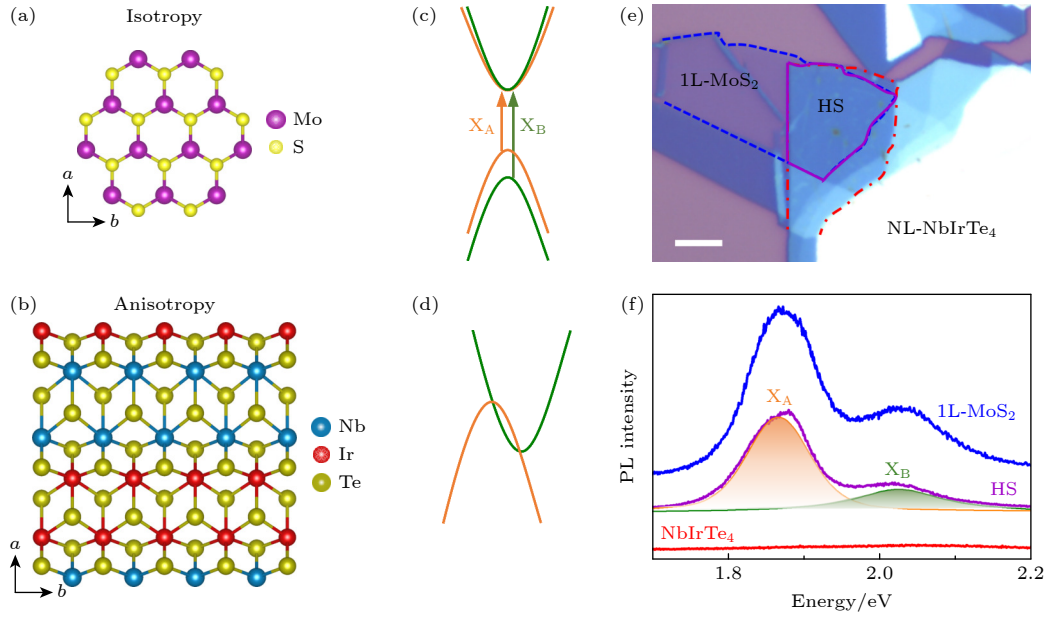


图2 样品的基本结构与光学表征 (a), (b) 分别为 MoS_2 和 NbIrTe_4 的晶体结构示意图; (c), (d) 分别展示了 1L- MoS_2 与 II 类 Weyl 半金属 NbIrTe_4 的能带结构示意图, 突出其典型的电子态特征; (e) 1L- MoS_2 / NbIrTe_4 异质结的光学照片, 我们采用机械剥离法分别制备 1L- MoS_2 和 NbIrTe_4 薄片, 并通过干法转移技术依次将 NbIrTe_4 与 1L- MoS_2 转移至 Si/SiO_2 基底, 堆叠形成 1L- MoS_2 / NbIrTe_4 异质结 (Heterostructure, HS). 随后, 异质结构样品被放置于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 的真空环境中退火 6 h, 以增强界面接触与稳定性. 其中, 蓝色虚线标示 1L- MoS_2 区域, 红色点划线标示 NbIrTe_4 区域, 紫色实线标示异质结区域, 比例尺为 $5\text{ }\mu\text{m}$; (f) 1L- MoS_2 , 异质结和纯 NbIrTe_4 的 PL 光谱, 橙色与绿色包络曲线分别对应激子峰 X_A 与 X_B

Fig. 2. Structural and optical characterization of the samples: (a), (b) Crystal structures of MoS_2 and NbIrTe_4 , respectively. (c), (d) Schematic band structures of monolayer MoS_2 and the type-II Weyl semimetal NbIrTe_4 , highlighting their representative electronic features. (e) Optical image of the 1L- MoS_2 / NbIrTe_4 heterostructure (HS). 1L- MoS_2 and NbIrTe_4 flakes are prepared separately via mechanical exfoliation. A dry-transfer technique is then used to sequentially transfer NbIrTe_4 and 1L- MoS_2 onto a Si/SiO_2 substrate, forming a stacked 1L- MoS_2 / NbIrTe_4 HS. The HS sample is subsequently annealed in a vacuum environment at $120\text{ }^\circ\text{C}$ for 6 h to enhance interfacial contact and structural stability. The white dashed outline indicates the region of monolayer MoS_2 , the red dotted outline marks the NbIrTe_4 region, and the purple solid line outline indicates the region of heterostructure. Scale bar: $5\text{ }\mu\text{m}$. (f) PL spectra of monolayer MoS_2 , the 1L- MoS_2 / NbIrTe_4 heterostructure and NbIrTe_4 . The orange and green shaded areas correspond to the exciton X_A and X_B , respectively.

如图 2(f) 所示. 两者 PL 光谱的峰位基本一致, 这表明异质结构建过程中 MoS_2 的结构应变可能小于 0.2% [37,38]. 然而, 两者的 PL 强度表现出明显差异, 异质结体系的 PL 强度显著增强, 这主要归因于界面相互作用引发的电荷转移导致的激子辐射效率提升 [39,40]. 为更精确提取激子发射特征, 我们通过 Voigt 函数拟合分析, 提取出 MoS_2 的两个特征激子峰分别位于 1.87 eV (X_A , 紫色) 和 2.03 eV (X_B , 绿色) [41]. 这些激子特征来源于 MoS_2 独特的能带结构 (图 2(c)), 其中, X_A 峰对应于价带分裂后较低能级与导带间的激子跃迁, 而 X_B 峰则源于较高能级的价带与导带间的跃迁 [42]. 这两个特征激子是自旋-轨道耦合效应与能带结构共同作用的结果, 反映了二维过渡金属硫族化合物中典型的激子物理行为.

为探究 NbIrTe_4 对 MoS_2 激发态性质的调控

作用, 我们采用角分辨偏振 PL 光谱对 1L- MoS_2 及其与 NbIrTe_4 构成的范德瓦耳斯异质结进行了系统研究. 如图 3 所示, 与本征 1L- MoS_2 表现出的 PL 各向同性响应 (图 3(a), (b)) 不同的是, 异质结中的 X_A 与 X_B 激子能量均表现出显著的角度依赖性 (图 3(c), (d)), 表明界面耦合诱导了光学各向异性增强效应, 相当于将 NbIrTe_4 中各向异性和 1L- MoS_2 中发光性能实现了“乘法”方式的结合. 这一实验现象直接证实异质结界面有效打破了 MoS_2 本征的面内对称性, 界面引入的各向异性局域电场、应变场及载流子再分布可能成为主导机制, 从而实现对激子辐射过程的有效调控. 此外, 实验未观测到明显的峰位变化, 这可能是因为界面应变幅度较小 (小于 0.2%), 其导致的能量变化量被掩盖在 MoS_2 的热展宽之下, 从而使峰位的角度依赖性难以在实验中清晰分辨 [37-39].

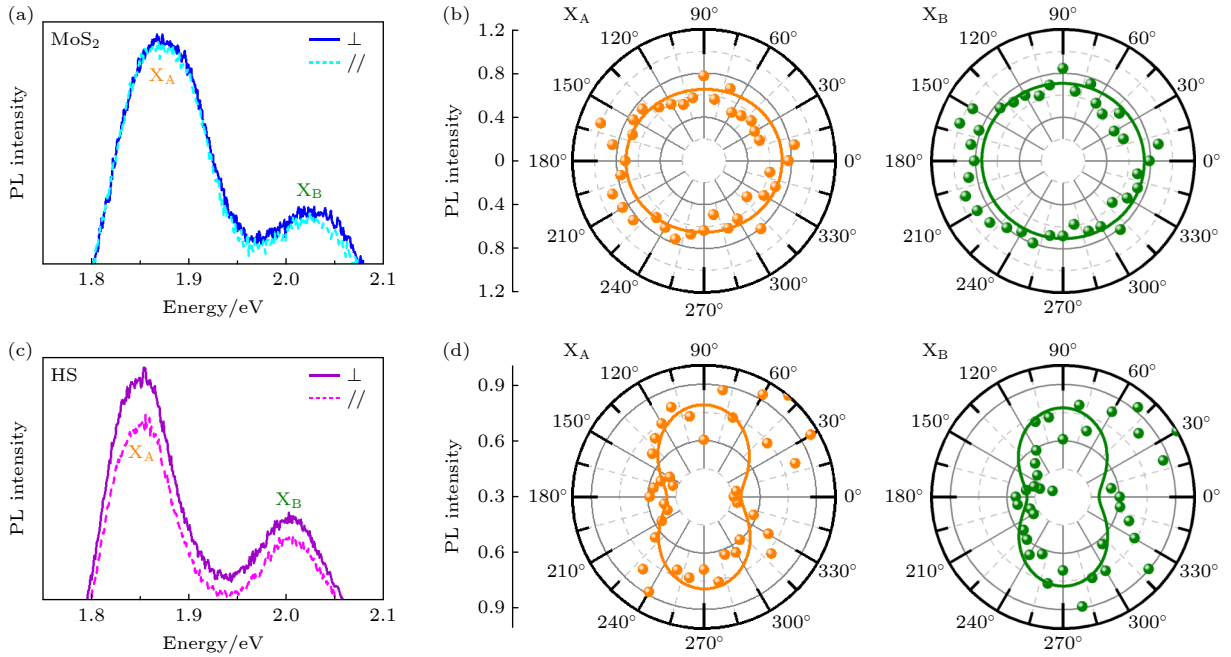


图3 1L-MoS₂与1L-MoS₂/NbIrTe₄异质结的角偏振PL光谱特性 (a) 1L-MoS₂在线性激发光平行(0°)和垂直(90°)于*b*轴时的PL光谱; (b) 1L-MoS₂中激子峰X_A(橙色)与X_B(绿色)的PL强度随偏振角变化的极坐标图, 圆点为实验测量值, 实线为拟合曲线; (c) 1L-MoS₂/NbIrTe₄异质结在激发光偏振方向平行(0°)和垂直于(270°)*b*轴时的PL光谱; (d) 异质结中激子峰X_A与X_B的PL强度角度依赖关系, 对应的极坐标图展示了其光学各向异性行为

Fig. 3. Angle-resolved polarized PL spectra of monolayer MoS₂ and 1L-MoS₂/NbIrTe₄ heterostructure: (a) The PL spectra of 1L-MoS₂ with the linear excitation light is parallel and perpendicular to the *b* axis; (b) polar plots of the PL intensity of exciton X_A (purple) and X_B (green) in monolayer MoS₂, where the dots represent experimental data and the solid lines correspond to fitted curves; (c) the PL spectra of the 1L-MoS₂/NbIrTe₄ heterostructure with the linear excitation light is parallel and perpendicular to the *b* axis; (d) polar plots showing the angular dependence of PL intensity for excitons X_A and X_B in the heterostructure, indicating pronounced optical anisotropy.

进一步, 我们对 1L-MoS₂/NbIrTe₄ 异质结中界面耦合的各向异性进行了定量分析, 发现激子 X_A 与 X_B 对应的各向异性比 $R(R = I_{\max}/I_{\min})$ 分别约为 1.58 和 1.57, 对应的线性偏振度 (degree of linear polarization, DOLP, 其具体表达式为 $[(I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min})] \times 100\%$)^[43] 分别为 22.63% 和 22.27%. 而作为对照, 在未存在界面耦合作用时 (即 1L-MoS₂ 样品中), 相应参数分别为 $R = 1.09$ (X_A), 1.05 (X_B), DOLP 为 4.50% (X_A), 2.37% (X_B). 这些定量结果揭示了两个关键的物理现象: 1) 通过界面耦合作用, NbIrTe₄ 有效地打破了 MoS₂ 的对称性, 将其本征的各向异性传递至本征各向同性的二维材料 MoS₂ 中; 2) X_A 与 X_B 激子表现出高度一致的各向异性响应 (相对偏差 < 2%), 表明二者对界面调制具有近似的敏感性. 这种一致性可能源于它们在布里渊区中相近的能带构型, 使其对由 NbIrTe₄ 引入的各向异性势场和应变场具备类似的响应机制和相当的响应系数^[42].

为深入阐明 1L-MoS₂/NbIrTe₄ 异质结中界面

耦合的物理机制, 在图 4 中构建了系统的物理模型. NbIrTe₄ 具有显著的结构各向异性, 其晶格常数分别为 $a = 3.79 \text{ \AA}$, $b = 12.52 \text{ \AA}$ ($b \gg a$), 这种本征的晶格不对称性导致其电子结构、光学效应和力学性能均呈现强烈的面内各向异性特征^[13]. 在异质结体系中, NbIrTe₄ 的低对称晶格结构在异质结界面可引入方向依赖的局域势场, 该势场通过范德瓦耳斯相互作用诱导 MoS₂ 层内原子间的微小位移, 从而形成定向的局域应变场, 破坏了 1L-MoS₂ 的本征对称性, 从而诱导出其沿特定晶轴方向的晶格畸变^[42,44]. 这种对称性破缺进一步调制了激子的能谷结构与偶极矩分布, 使激子辐射过程表现出强烈的角度依赖性, 最终表现为 PL 信号的显著各向异性特征^[44], 从而能够使得 NbIrTe₄ 中各向异性和 1L-MoS₂ 中发光性能以“乘法”方式相结合.

值得注意的是, 这种异质界面对激子动力学的各向异性调控效应表现出显著的材料体系依赖性. 通过对比不同异质结体系的实验数据, 我们可以发

现明显的调控效率差异. 例如在 $\text{MoS}_2/\text{CrOCl}$ 异质结构中, 激子态的光学各向异性比仅为 1.25^[45] (本文 $\text{MoS}_2/\text{NbIrTe}_4$ 异质结的各向异性比约为 1.58), 这一差异直接反映了不同衬底材料对 MoS_2 激发态动力学行为的调控效率存在显著差异. 此外, 在 WSe_2/BP 与 WS_2/ReS_2 异质结中, 由于 BP 与 ReS_2 分别具有较强的面内电场梯度与晶体各向异性, 对激子的调制更为显著, 其对应的光学各向异性比分别达到了约 1.48 与 1.64^[9,46]. 这些差异不仅取决于界面耦合强度, 还与激子的初始波矢分布、局域介电环境变化以及应变的传导方式等因素密切相关^[44,47].

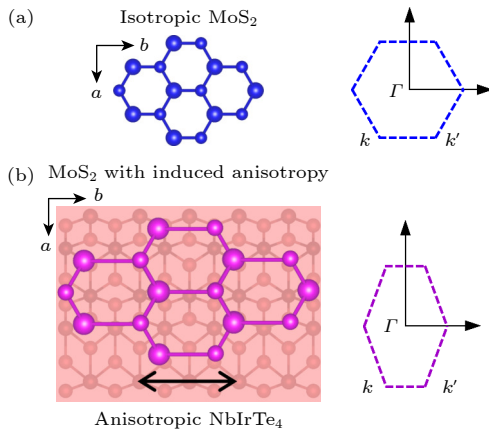


图 4 (a) 1L- MoS_2 的面内晶格结构示意图及其面内晶格投影出的布里渊区; (b) 1L- $\text{MoS}_2/\text{NbIrTe}_4$ 异质结的层间耦合作用打破 MoS_2 晶格结构面内对称性及其晶格结构投影出的布里渊区示意图

Fig. 4. (a) In-plane lattice of monolayer MoS_2 and corresponding Brillouin zone projected from in-plane lattice of monolayer MoS_2 ; (b) schematic diagram of the interlayer coupling regulation mechanism of 1L- $\text{MoS}_2/\text{NbIrTe}_4$ heterostructure and corresponding Brillouin zone projected from anisotropy MoS_2 .

综上所述, 二维范德瓦耳斯异质结构中激子的光学各向异性受多种因素耦合影响, 既与材料本征的晶体对称性相关, 也受到界面调控机制的显著制约. 通过在范德瓦耳斯界面引入内建各向异性势场和应力场, 可实现对激子行为的定向调控, 为设计高灵敏度、方向可调的偏振发光器件提供了理论基础和策略指导.

3 结论

本研究通过范德瓦耳斯工程构建了 1L- MoS_2 与低对称性半金属 NbIrTe_4 的范德瓦耳斯异质结,

实现了 NbIrTe_4 的各向异性势场与 MoS_2 的本征强发光能力在空间上的“乘法”耦合, 使得 $\text{MoS}_2/\text{NbIrTe}_4$ 异质结获得全新的发光各向异性. 实验结果表明, NbIrTe_4 通过界面耦合在 1L- MoS_2 中诱导出显著的发光各向异性, 使原本各向同性的激子 X_A 与 X_B 呈现明显的方向依赖行为. 该调控效应源于 NbIrTe_4 独特的各向异性晶格结构所引发的界面局域电场与应力场, 有效地打破了 MoS_2 的本征对称性, 实现对激子辐射过程的精确调控. 研究揭示了范德瓦耳斯异质结中发光各向异性产生的微观物理机制, 为利用低对称性材料实现二维发光器件的偏振可控提供了新思路. 该方法在新一代高性能偏振发光器件等领域具有广阔的应用潜力, 为未来通过原子级尺度的材料设计实现光学性能的多维调控奠定了坚实的理论与实验基础.

4 展望

本文通过范德瓦耳斯工程构建的 1L- $\text{MoS}_2/\text{NbIrTe}_4$ 异质结实现了两类材料不同物性的“乘法”叠加, 为同时获取强本征发光与显著光学各向异性的二维材料体系提供了新的设计路径. 该方法不仅突破了天然二维材料在特性上的“分离”限制, 也为探索界面诱导下的激子对称性破缺效应提供了可验证的平台.

基于上述结果, 后续研究可进一步围绕不同类型异质结构中各向异性调控效应的系统对比展开. 例如, 对比同一二维材料与不同衬底 (或同一衬底与不同二维材料) 构建的异质结, 并研究此类体系在晶格匹配程度与界面势场构型变化下对激子行为的影响, 有望揭示界面诱导机制的普适性与材料依赖性. 此外, NbIrTe_4 等各向异性材料的层数变化可能显著地改变其界面调控能力, 因此可以进一步系统评估其临界厚度、界面电荷重构及极化强度等参数对激子各向异性的具体影响. 另一方面, 除了主激子态外, 间接激子、束缚态激子等在各向异性场下的响应特性仍缺乏深入探索, 特别是在强耦合条件下其能谱重构与辐射选择性调控机制仍不明确. 通过引入温度、电场或应力等外部控制手段, 有望实现对激子各向异性行为的动态调节, 为二维材料中的激发态调控提供更多策略. 在此过程中, 通过实验 (角分辨光学、电学测试等) 与理论 (第一性原理计算等) 的结合, 将进一步加深对界面耦合

机制的理解。

综上所述, 构建并调控具有各向异性特征的二维异质结构, 不仅为研究激子动力学和界面物理提供了有力平台, 也为发展高灵敏度、可调谐的偏振光器件及新型低维量子光学元件奠定了重要基础。

参考文献

- [1] Huang S, Wang C, Xie Y, Yu B, Yan H 2023 *Photonics Insights* **2** R03
- [2] Wen T, Li J, Deng Q, Jiao C, Zhang M, Wu S, Lin L, Huang W, Xia J, Wang Z 2022 *Small* **18** 2108028
- [3] Qiu H, Yu Z, Zhao T, et al. 2024 *Sci. China Inform. Sci.* **67** 160400
- [4] Xu B, Zhu J K, Xiao F, Jiao C Y, Liang Y C, Wen T, Wu S, Zhang Z J, Lin L, Pei S H, Jia H, Chen Y, Ren Z M, Wei X Y, Huang W, Xia J, Wang Z H 2023 *Small* **19** 2300631
- [5] Wen T, Zhang M D, Li J, Jiao C Y, Pei S H, Wang Z H, Xia J 2023 *Nanoscale Horiz.* **8** 516
- [6] Zhang M D, Jiao C Y, Wen T, Li J, Pei S H, Wang Z H, Xia J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 140702 (in Chinese) [张茂笛, 焦陈寅, 文婷, 李靛, 裴胜海, 王曾晖, 夏娟 2022 *物理学报* **71** 140702]
- [7] Eda G, Yamaguchi H, Voiry D, Fujita T, Chen M, Chhowalla M 2011 *Nano Lett.* **11** 5111
- [8] Chakraborty B, Matte H R, Sood A K, Rao C N R 2013 *J. Raman Spectrosc.* **44** 92
- [9] Akamatsu T, Ideue T, Zhou L, Dong Y, Kitamura S, Yoshii M, Yang D, Onga M, Nakagawa Y, Watanabe K, Taniguchi T, Laurienzo J, Huang J, Ye Z, Morimoto T, Yuan H, Iwasa Y 2021 *Science* **372** 68
- [10] Chaudhary K, Tamagnone M, Rezaee M, Bediako D K, Ambrosio A, Kim P, Capasso F 2019 *Sci. Adv.* **5** eaau7171
- [11] Xu J P, Liu C, Wang M X, Ge J, Liu Z L, Yang X, Chen Y, Liu Y, Xu Z A, Gao C L, Qian D, Zhang F C, Jia J F 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 217001
- [12] Gao W, Kahn A 2002 *Org. Electron.* **3** 53
- [13] Shojaei I A, Pournia S, Le C, Ortiz B R, Jnawali G, Zhang F C, Wilson S D, Jackson H E, Smith L M 2021 *Sci. Rep.* **11** 8155
- [14] Lee J E, Wang A, Chen S, Kwon M, Hwang J, Cho M, Son K, Han D, Choi J W, Kim Y D, Mo S, Petrovic C, Hwang C, Park S Y, Jang C, Ryu H 2024 *Nat. Commun.* **15** 3971
- [15] Bi X, Zhang Y, Ao L, Li H, Huang J, Qin F, Yuan H 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2415988
- [16] Jiao C, Pei S, Wu S, Wang Z, Xia J 2023 *Rep. Prog. Phys.* **86** 114503
- [17] Zhang Z, Jiao C, Pei S, Zhou X, Qin J, Zhang W, Zhou Y, Wang Z, Xia J 2024 *Sci. China Phys. Mech.* **67** 288211
- [18] Jiao C, Pei S, Zhang Z, Li C, Zhu J, Qin J, Zhang M, Wen T, Zhou Y, Wang Z, Xia J 2024 *Appl. Phys. Rev.* **11** 031417
- [19] Pei S, Wang Z, Xia J 2022 *ACS Nano* **16** 11498
- [20] Li X, Xie X, Wu B, Chen J, Li S, He J, Liu Z, Wang J, Liu Y 2024 *Nano Res.* **17** 6749
- [21] Zhao M, Zhang W, Liu M, Zou C, Yang K, Yang Y, Dong Y, Zhang L, Huang S 2016 *Nano Res.* **9** 3772
- [22] Guo Y, Zhang Y, Liu Q L, Zhou Z, He J, Yuan S, Heine T, Wang J 2024 *ACS Nano* **18** 11732
- [23] Chen D, Lian Z, Huang X, Su Y, Rashetnia M, Ma L, Yan L, Blei M, Xiang L, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Smirnov D, Wang Z, Zhang C, Cui Y T, Shi S F 2022 *Nat. Phys.* **18** 1171
- [24] Lian Z, Chen D, Ma L, Meng Y, Su Y, Yan L, Huang X, Wu Q, Chen X, Blei M, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Zhang C, Cui Y T, Shi S F 2023 *Nat. Commun.* **14** 4604
- [25] Sierra J F, Světlík J, Saverio Torres W, Camosi L, Herling F, Guillet T, Xu K, Reparaz J S, Marinova V, Dimitrov D, Valenzuela S O 2025 *Nat. Mater.* **24** 876
- [26] Ali S A, Irfan A, Mazumder A, Balendhran S, Ahmed T, Walia S, Ulhaq A 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 193104
- [27] Schrenkova V, Kapitán J, Bour P, Chatziadi A, Sklenar A, Kaminsky J 2024 *Anal. Chem.* **96** 18983
- [28] Yang D, Sandoval S J, Divigalpitiya W M R, Irwin J C, Frindt R F 1991 *Phys. Rev. B* **43** 12053
- [29] Guo H H, Yang T, Tao P, Zhang Z D 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017201
- [30] Yazzev O V, Kis A 2015 *Mater. Today* **18** 20
- [31] Newaz A K M, Prasai D, Ziegler J I, Caudel D, Robinson S, Haglund Jr R F, Bolotin K I 2013 *Solid State Commun.* **155** 49
- [32] Splendiani A, Sun L, Zhang Y, Li T, Kim J, Chim C Y, Galli G, Wang F 2010 *Nano Lett.* **10** 1271
- [33] Kaplan D, Gong Y, Mills K, Swaminathan V, Ajayan P M, Shirodkar S, Kaxiras E 2016 *2D Mater.* **3** 015005
- [34] Sun J, Gu Y J, Lei D Y, Lau S P, Wong W T, Wong K Y, Chan H L W 2016 *ACS Photonics* **3** 2434
- [35] Schönemann R, Chiu Y C, Zheng W, Quito V L, Sur S, McCandless G T, Chan J, Balicas L 2019 *Phys. Rev. B* **99** 195128
- [36] Soluyanov A A, Gresch D, Wang Z, Wu Q, Troyer M, Dai X, Bernevig B A 2015 *Nature* **527** 495
- [37] Conley H J, Wang B, Ziegler J I, Haglund Jr R F, Pantelides S T, Bolotin K I 2013 *Nano Lett.* **13** 3626
- [38] He K, Poole C, Mak K F, Shan J 2013 *Nano Lett.* **13** 2931
- [39] Yu Y, Hu S, Su L, Huang L, Liu Y, Jin Z, Purezky A A, Geohagan D B, Kim K W, Zhang Y, Cao L 2015 *Nano Lett.* **15** 486
- [40] Chou H C, Zhang X Q, Shiau S Y, Chien C H, Tang P W, Sung C T, Chang Y C, Lee Y H, Chen C 2022 *Nanoscale* **14** 6323
- [41] Kim M S, Nam G, Park S, Kim H, Han G H, Lee J, Dhakal K P, Leem J Y, Lee Y H, Kim J 2015 *Thin Solid Films* **590** 318
- [42] Mak K F, Lee C, Hone J, Shan J, Heinz T F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 136805
- [43] Shaw J A 1999 *Appl. Opt.* **38** 3157
- [44] Tong L, Duan X, Song L, Liu T, Ye L, Huang X, Wang P, Sun Y, He X, Zhang L, Xu K, Hu W, Xu J, Zang J, Cheng G J 2019 *Appl. Mater. Today* **15** 203
- [45] Zheng X, Wei Y, Zhang X, Wei Z, Luo W, Guo X, Liu J, Peng G, Cai W, Huang H, Lv T, Deng C, Zhang X 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2202658
- [46] Xie X, Ding J, Wu B, Zheng H, Li S, He J, Liu Z, Wang J, Liu Y 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 222101
- [47] Robinson B J, Giusca C E, Gonzalez Y T, Kay N D, Kazakova O, Kolosov O V 2015 *2D Mater.* **2** 015005

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

Customizing two-dimensional heterojunction with novel luminescent anisotropy using van der Waals engineering*

WEN Ting^{1) #} SU Ziluo^{2) #} WANG Yalan^{2) #} CAI Shuang^{2) #} WU Jiaqi²⁾
 QIN Jiaze²⁾ JIAO Chenyin²⁾ WANG Zenghui^{2) †} ZHANG Zejuan^{2) ‡}
 PEI Shenghai^{2) ††} XIA Juan^{2) ††}

1) (*School of Electronic Information, Huzhou College, Huzhou 313000, China*)

2) (*Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054 China*)

(Received 19 August 2025; revised manuscript received 11 September 2025)

Abstract

Luminescence and anisotropy in two-dimensional (2D) materials have important implications for both fundamental material physics and potential applications such as polarized light-emitting devices. However, many natural-occurring 2D materials typically exhibit either luminescence or anisotropy, but not both. In this work, we utilize van der Waals (vdW) engineering to construct a heterostructure (HS) with anisotropic luminescent properties, which is composed of isotropic monolayer (1L) MoS₂ (with strong intrinsic luminescence) and low-symmetry NbIrTe₄ (strong anisotropy without photoluminescence). Experimentally, we characterize the optical response of the HS by using angle-resolved PL spectroscopy. The results indicate that the intrinsic anisotropic potential field of NbIrTe₄ at the interface effectively breaks the in-plane isotropic symmetry of MoS₂, inducing a pronounced polarization-dependent emission of A and B excitons. The anisotropy ratio is enhanced to ~ 1.58 , corresponding to a linear polarization degree of approximately 22%. This work provides new insights into 2D interfacial coupling and offers useful guidance for the design and engineering of next-generation high-performance, tunable polarized light-emitting devices.

Keywords: anisotropy, van der Waals heterostructures, angle-resolved photoluminescence

PACS: 13.88.+e, 42.25.Ja, 73.40.Lq, 68.35.Ja

DOI: 10.7498/aps.74.20251120

CSTR: 32037.14.aps.74.20251120

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. T2325007, 62450003, U21A20459, 62104029), the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Grant No. ZCLQN25A0407), the Sichuan Provincial Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars, China (Grant No. 25NSFJQ0277), and the State Key Laboratory of Meta-stable Materials Science and Technology (Yanshan University), China (Grant No. 202504).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: zenghui.wang@uestc.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zejuanzhang@uestc.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: shpei@uestc.edu.cn

‡‡ Corresponding author. E-mail: juanxia@uestc.edu.cn



利用范德瓦耳斯工程定制具有全新发光各向异性的二维异质结

文婷 苏子洛 王雅兰 蔡霜 巫佳琦 秦嘉泽 焦陈寅 王曾晖 张泽娟 裴胜海 夏娟

Customizing two-dimensional heterojunction with novel luminescent anisotropy using van der Waals engineering

WEN Ting SU Ziluo WANG Yalan CAI Shuang WU Jiaqi QIN Jiaze JIAO Chenyin WANG Zenghui ZHANG Zejuan PEI Shenghai XIA Juan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 241302 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251120

CSTR: 32037.14.aps.74.20251120

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251120>

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

CuPc/MoS₂范德瓦耳斯异质结荧光特性

Photoluminescence properties of CuPc/MoS₂ van der Waals heterostructure

物理学报. 2022, 71(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220132>

Sb/SnC范德瓦耳斯异质结光电性质的层间转角依赖性及其应用

Interlayer angle dependence of photoelectric properties of Sb/SnC van der Waals heterojunction and its application

物理学报. 2024, 73(22): 227101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241138>

石墨烯/C₃N范德瓦耳斯异质结的可调电子特性和界面接触

Tunable electronic structures and interface contact in graphene/C₃N van der Waals heterostructures

物理学报. 2023, 72(14): 147302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230318>

外尔半金属调制的范德瓦耳斯声子极化激元色散性质

Dispersion properties of van der Waals phonon polaritons modulated by Weyl semimetals

物理学报. 2023, 72(19): 197102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230167>

As/HfS₂范德瓦耳斯异质结电子光学特性及量子调控效应

Electronic and optical properties and quantum tuning effects of As/HfS₂ van der Waals heterostructure

物理学报. 2022, 71(17): 177304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220371>

二维平面和范德瓦耳斯异质结的可控制备与光电应用

Controllable preparation and photoelectric applications of two-dimensional in-plane and van der Waals heterostructures

物理学报. 2021, 70(2): 027901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201419>