

SnSe/SnSe₂异质结的界面结构

任昊烜¹, 谭伟², 张晓娜^{2*}, 曹立民³

¹北京工业大学物理与光电工程学院, 北京

²北京工业大学材料科学与工程学院, 北京

³武汉大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年4月3日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年5月22日

摘要

半导体异质结是现代半导体器件中极其重要的功能结构单元, 其界面处的能带不连续可为器件设计提供丰富的“能带工程”。本文采用温度梯度熔融结晶法制备范德华半导体SnSe/SnSe₂异质结, 使用透射电镜技术深入研究了不同降温速率下SnSe/SnSe₂异质结的界面结构, 发现慢冷制备的(冷却速率低于0.1 °C/min) SnSe/SnSe₂异质结两侧晶体具有固定排列和取向的结构[011]SnSe//[100]SnSe₂、(100)SnSe//(001)SnSe₂。而较快冷却速度(>1.0 °C/min)下SnSe和SnSe₂范德华原子晶面取向不固定, 且相界面附近SnSe₂晶体内出现大量随机分布的堆垛层错, 研究表明其源自于界面处的晶格失配与热应力。本实验为可控制备和调控大面积SnSe/SnSe₂异质结结构提供指导。

关键词

范德华异质结, 硒化锡, 二硒化锡, 堆垛层错

Interface Structure of SnSe/SnSe₂ Heterojunction

Haoxuan Ren¹, Wei Tan², Xiaona Zhang^{2*}, Limin Cao³

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

³School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: April 3, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 22, 2026

Abstract

Semiconductor heterojunctions represent an exceptionally important functional structural unit in

*通讯作者。

文章引用: 任昊烜, 谭伟, 张晓娜, 曹立民. SnSe/SnSe₂ 异质结的界面结构[J]. 应用物理, 2026, 16(5): 517-525.

DOI: 10.12677/app.2026.165047

modern semiconductor devices, where the energy band discontinuity at the interface provides abundant “band engineering” opportunities for device design. In this work, van der Waals semiconductor SnSe/SnSe₂ heterojunctions were fabricated using a temperature-gradient melt crystallization method. The interfacial structures of SnSe/SnSe₂ heterojunctions prepared under different cooling rates were systematically investigated by transmission electron microscopy. It was found that the crystals on both sides of the SnSe/SnSe₂ heterojunction prepared with a slow cooling rate (below 0.1°C/min) exhibit a fixed crystallographic orientation relationship: [011]SnSe//[100]SnSe₂ and (100)SnSe//(001)SnSe₂. In contrast, for a relatively fast cooling rate (greater than 1.0°C/min), the orientations of the van der Waals atomic planes of SnSe and SnSe₂ are not fixed, and a large number of randomly distributed stacking faults appear in the SnSe₂ crystal near the phase interface. These stacking faults are attributed to lattice mismatch and thermal stress at the interface. This work provides guidance for the controllable fabrication and structural tuning of large-area SnSe/SnSe₂ heterojunctions.

Keywords

Van der Waals Heterojunction, Tin Selenide, Tin Diselenide, Stacking Fault

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

二维材料(two-dimensional materials)由于其新颖的电子[1]-[4]、光学[5]-[7]、磁学[8]-[10]和光催化[11]性质而引起了科学界的广泛关注。二维材料的迅速发展也带动了范德华(van der Waals, vdW)异质结的研究。二维金属材料、半导体和绝缘体可以堆叠形成各种垂直的范德华异质结构,可应用于不同的领域,包括二极管[12]、晶体管[13]和光电探测器[14]等。二维材料中强的共价键提供了面内稳定性,而弱的范德华相互作用提供了层与层之间良好的连接。传统的半导体异质结受到组分晶格相似性的限制,而范德华异质结由于相邻层之间的弱相互作用,缓解了晶格匹配的限制。此外,原子级锐利的界面和可人为排列的堆叠顺序赋予了范德华异质结构更多的灵活性。

作为 IV_A~VI_A 族的重要成员, SnSe 和 SnSe₂ 是由 IV 族元素 Sn 和 VI 族元素 Se 构成的典型范德华层状结构半导体,具有稳定结构。SnSe 呈现典型 p 型半导体特性,具有合适的带隙值和优异的电、光和热电性能,同时还具有其他独特特性(如面内铁电性)[15]-[19]。而 SnSe₂ 呈现典型 n 型半导体特性,具有优异的电学和光学性能和较大的光学带隙,具有较低电子亲和势和较高的电子迁移率,具有良好的光电响应性能,在光电器件和高性能传感器等方面具有巨大的应用前景[20]-[24]。目前,对 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结的研究很少。本文将使用温度梯度熔融结晶法制备 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结,并对其晶体结构和缺陷进行电子显微学研究,探讨降温速率对异质结结构的影响。

2. 实验方法

本文样品采用温度梯度熔融结晶法制备。按化学计量比 Sn:Se = 1:1.5 精确称量,满足总质量 40 g,即 20.02 g 锡(Sn)粉、19.98 g 硒(Se)粉,所用锡粉和硒粉纯度均≥99.99%。将混合原料在高真空条件下(<10⁻⁵ Torr)封装在双层石英管中,然后放入温度梯度为 0.5°C/cm 的多温区管式炉中,以 1°C/min 的升温速率加热到 950°C 后,保温 48 h。降温过程采用慢冷和快冷两种降温速率,慢冷样品以 0.1°C/min 的降温速率从

950℃降温至 500℃，然后在管式炉内自然冷却至室温。快冷样品的冷却速度 > 1.0 °C/min，也是降温至 500℃后，在管式炉内自然冷却至室温。

使用 FEI Helios Nanolab 650i 型聚焦离子束(FIB)设备制备 TEM 样品。使用 FEI-Tecni-Talos-F200 型透射电子显微镜(TEM)获得样品低倍 STEM-HAADF 图像和 EDS 能谱数据，使用 FEI Titan G2 60-300 球差校正透射电子显微镜系统表征样品的高倍 STEM-HAADF 原子像。FEI-Tecni-Talos-F200 透射电子显微镜的加速电压为 200 KV，STEM 模式下最高分辨率可达到 0.16 nm，配备 Super-X 能谱仪(EDS)，能量分辨率最高为 136 eV，EDS 立体角为 0.9 sr，有效探测面积达到 120 mm，可以实现对微区的线扫、面扫和定性定量分析。FEI Titan G2 60-300 球差校正透射电子显微镜的最高加速电压为 300 kV，STEM 模式下点分辨率可达 0.08 nm。

3. 实验结构与分析

3.1. 慢冷样品中的 SnSe/SnSe₂ 异质结

图 1 为慢冷样品 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结的典型 TEM 图像。SnSe/SnSe₂ 相界面非常平直，没有观察到明显的生长台阶。图 1(b)~(d)分别对应图 1(a)中 1、2、3 三处位置的选区电子衍射图谱，经过分析发现，

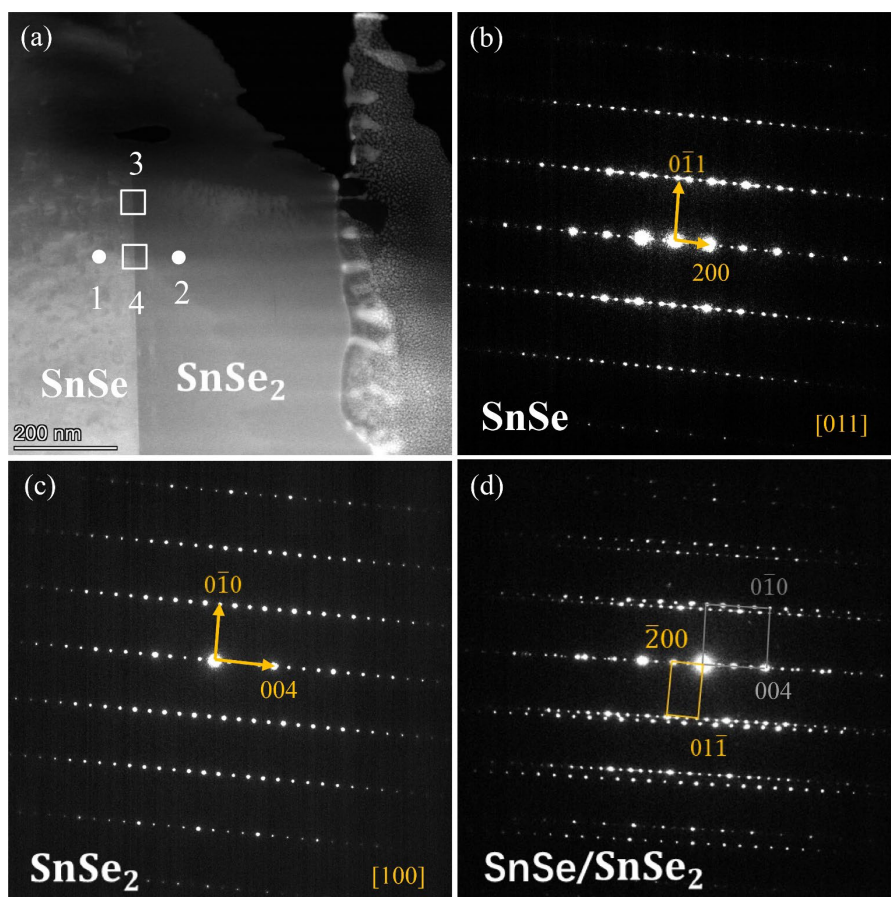


Figure 1. STEM-HAADF images of the SnSe/SnSe₂ van der Waals heterojunction in the slowly cooled sample. (a) Morphology of the SnSe/SnSe₂ heterojunction; (b) Selected area electron diffraction (SAED) pattern of the SnSe phase; (c) SAED pattern of the SnSe₂ phase; (d) SAED pattern acquired at the interface between the SnSe and SnSe₂ phases

图 1. 慢冷样品中 SnSe/SnSe₂ 范德瓦尔斯异质结 STEM-HAADF 图像。(a) SnSe/SnSe₂ 异质结形貌；(b) SnSe 相的选区电子衍射图谱；(c) SnSe₂ 相的选区电子衍射图谱；(d) SnSe 相和 SnSe₂ 相界面处的选区电子衍射图谱

图 1(a)中界面左侧为 SnSe 相、右侧为 SnSe₂。SnSe 与 SnSe₂ 两相存在以下取向关系： $[011]\text{SnSe}/[100]\text{SnSe}_2$ 、 $(100)\text{SnSe}/(001)\text{SnSe}_2$ ，如图 1(d)所示。

图 2 为慢冷样品中 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结界面结构的高倍的高角环形暗场(high-angle annular dark-field, HAADF)原子像。界面左侧的 SnSe 为 $[110]$ 带轴，右侧的 SnSe₂ 为 $[100]$ 带轴。在 SnSe₂ 相中，为便于描述，本文对层的类型作如下定义：若两个相邻层具有相同的取向，则定义为 A 层；反之，若取向不同，则定义为 B 层。经过观察发现，SnSe₂ 相层与层之间呈现规则的 AAB 排列。实验观察发现，界面处实际存在 SnSe-A 和 SnSe-B 两种连接形式，分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

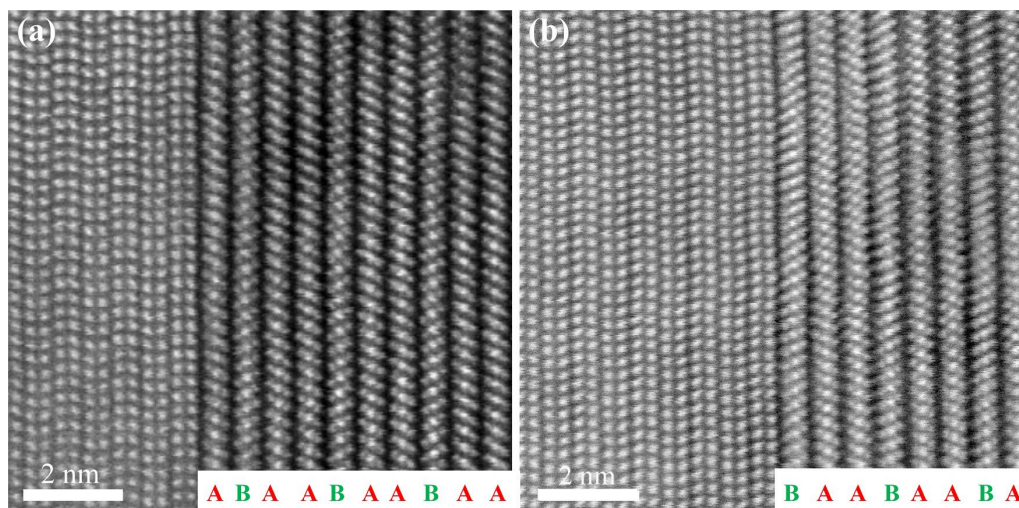


Figure 2. Interfacial structure of the $[011]\text{SnSe}/[100]\text{SnSe}_2$ van der Waals heterojunction in the slowly cooled sample. (a) SnSe-A interface connection; (b) SnSe-B interface connection

图 2. 慢冷样品中 $[011]\text{SnSe}/[100]\text{SnSe}_2$ 范德瓦尔斯异质结的界面结构。(a) SnSe-A 界面连接；(b) SnSe-B 界面连接

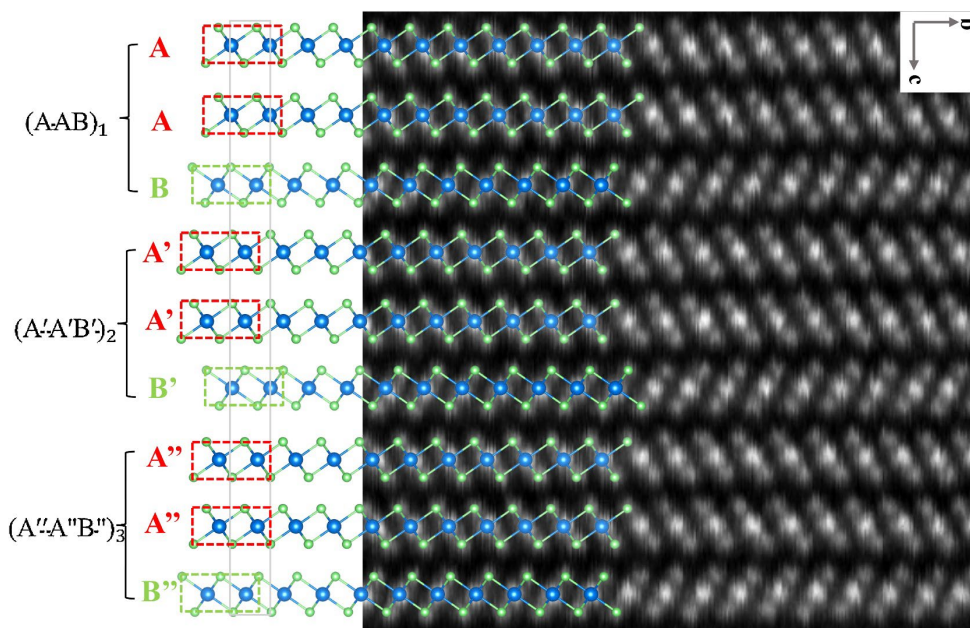


Figure 3. HAADF atomic image of the SnSe₂ phase along the $[100]$ zone axis in the slowly cooled sample. The blue and green spheres represent Sn and Se atoms, respectively

图 3. 慢冷样品中 SnSe₂ 相在 $[100]$ 带轴下的 HAADF 原子像。其中蓝色小球为 Sn 原子，绿色小球为 Se 原子

图 3 所示为慢冷样品 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结样品的 SnSe₂ 相在[100]晶带轴下的 HAADF 原子像。图中较亮的原子柱对应 Sn 原子，较暗的原子柱对应 Se 原子，两层 Se 原子夹持一层 Sn 原子，形成“三明治”结构。无论是 A 层与 A 层之间，还是 A 层与 B 层之间，均发生了相对滑动，且这些滑动并非无序，而是呈现出明显的周期性。具体而言，这些层遵循(AAB)₁(A'A'B')₂(A''A''B'')₃的规则排列，每三层构成一个小周期，每九层构成一个大周期，与文献中报道的 18R 相结构相同[25] [26]。

3.2. 快冷样品中 SnSe/SnSe₂ 异质结相界面

与慢冷样品不同，快冷样品中的 SnSe 的厚度相对较薄，一般为 10~100 纳米。图 4(a)给出了一个典型的低倍 HAADF 形貌。对该区域进行 EDS 面扫分析，发现中间狭窄条带的 Se 含量偏低，Sn 含量偏高，分别如图 4(b)和图 4(c)所示。经过 EDS 点扫进一步确定，狭窄条带处的 Sn、Se 原子百分比接近 1:1，两侧的 Sn、Se 原子百分比接近 3:7，狭窄条带为 SnSe 相，其两侧为 SnSe₂ 相。因此，该区域构成了一个 SnSe₂/SnSe/SnSe₂ 三明治结构。这种三明治结构的形成与凝固过程中溶质浓度的变化有关，SnSe₂ 的析出降低了固液界面处的 Se 溶质浓度，进而促进了 SnSe 的析出。图 4(d)、图 4(e)分别为图 4(a)白色方框 1、2 处的高倍 STEM-HAADF 图像，通过标定发现，左侧相界面和右侧相界面处都出现了不规则的堆垛层错。

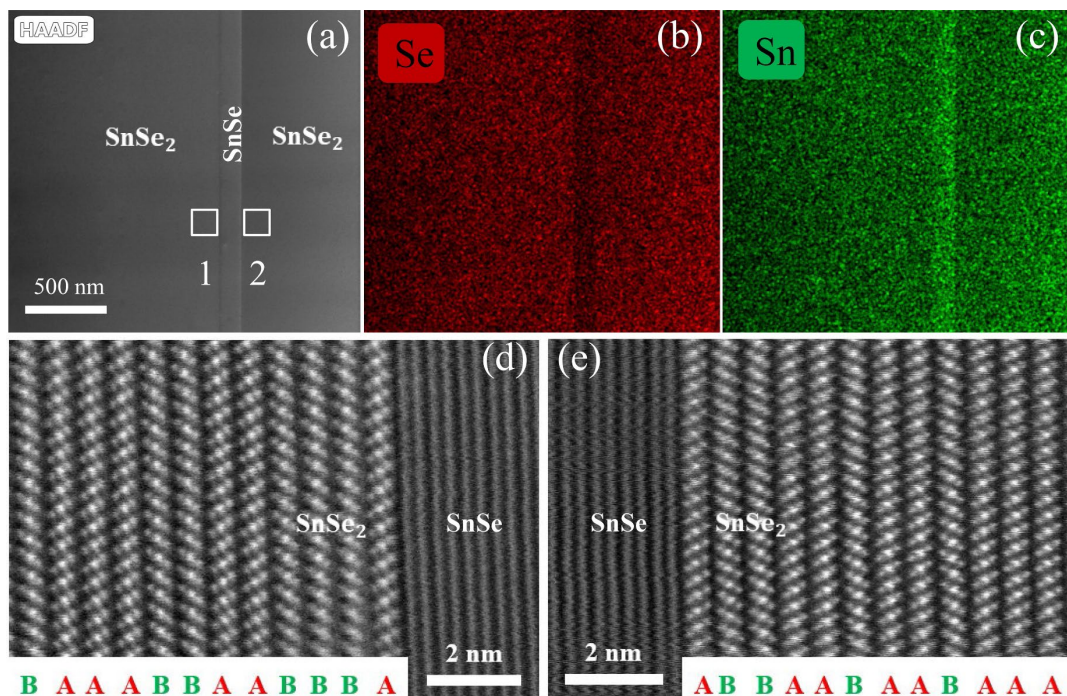


Figure 4. STEM-HAADF images and EDS spectra of the SnSe/SnSe₂ van der Waals heterojunction in the rapidly cooled sample. (a) Low-magnification STEM-HAADF image; (b) (c) EDS spectra corresponding to (a); (d) High-magnification STEM-HAADF image of the interface indicated by white box 1 in (a); (e) High-magnification STEM-HAADF image of the interface indicated by white box 2 in (a)

图 4. 快冷样品中 SnSe/SnSe₂ 范德瓦尔斯异质结的 STEM-HAADF 像和 EDS 能谱。(a) 低倍 STEM-HAADF 像；(b) (c) 对应(a)的 EDS 能谱图；(d) 为(a)中白色方框 1 相界面处的高倍 STEM-HAADF 像；(e) 为(a)中白色方框 2 相界面处的高倍 STEM-HAADF 像

进一步表征 SnSe 相两侧的界面区域，分别在距离界面 50 nm、100 nm、150 nm 和 200 nm 位置处拍摄 SnSe₂ 相中的 HAADF 原子像。图 5 为图 4(a)中白色方框 1 位置(SnSe 相的左侧)的高倍 HAADF 原子像。通过标定发现，距离超过 200 nm 后，SnSe₂ 相中的排列均为(AAB)₁(A'A'B')₂(A''A''B'')₃的 18R 结构。

而在距离界面 50 nm、100 nm、150 nm 处都发现了堆垛层错。

图 6 为图 4(a)中白色方框 2 位置(SnSe 相的右侧)的高倍 HAADF 原子像。通过标定发现, 距离超过 100 nm 后, SnSe₂ 相中的排列均为(AAB)₁(A'A'B')₂(A''A''B'')₃ 的 18R 结构。只在距离相界面 50 nm 范围内

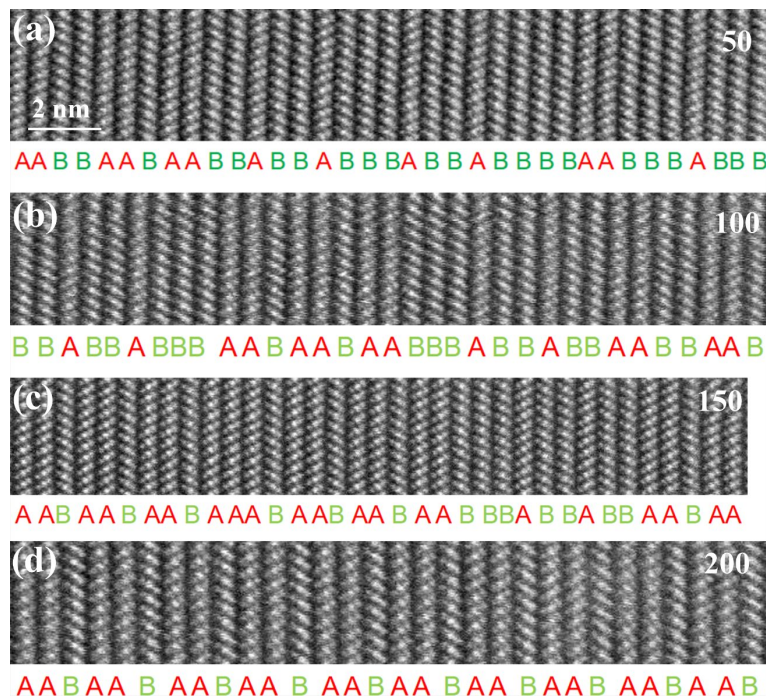


Figure 5. High-magnification STEM-HAADF image of the left side of the phase interface in the SnSe/SnSe₂ van der Waals heterojunction in the rapidly cooled sample

图 5. 快冷样品中 SnSe/SnSe₂ 范德瓦尔斯异质结相界面左侧的高倍 STEM-HAADF 像

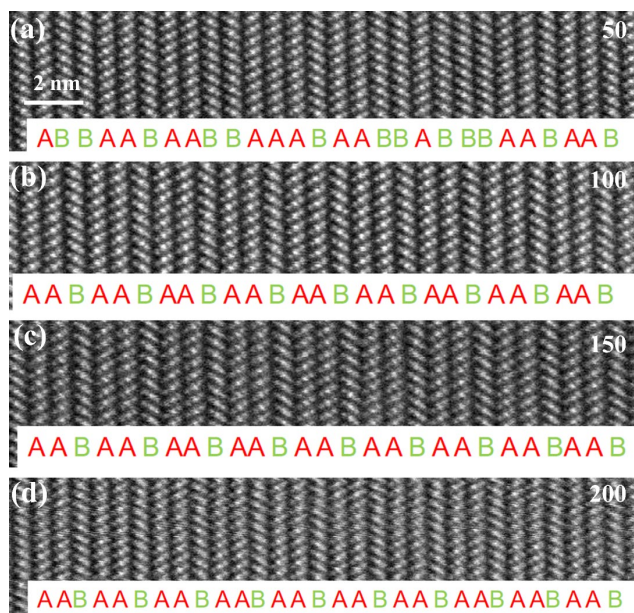


Figure 6. High-magnification STEM-HAADF image of the right side of the phase interface in the SnSe/SnSe₂ van der Waals heterojunction in the rapidly cooled sample

图 6. 快冷样品中 SnSe/SnSe₂ 范德瓦尔斯异质结相界面右侧的高倍 STEM-HAADF 像

观察到了堆垛层错。

3.3. 分析与讨论

对比慢冷条件和快冷条件的 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结界面的原子结构, 可以发现, 快速冷却可以在异质界面附近 SnSe₂ 相内引入层错区。慢冷条件下形成的界面附近的 SnSe₂ 相均为典型的 18R 结构, 没有观察到层错。我们认为, 这主要源于热应力(主因)与晶格失配(次因)的共同驱动。

在 0 GPa 和 550 K 下, SnSe 的热膨胀系数为 $23.57 (10^{-5}/\text{K})$; 在 4 GPa 和 550 K 下, SnSe 的热膨胀系数为 $8.68 (10^{-5}/\text{K})$ [27]。在 0 GPa 和 550 K 下, SnSe₂ 的热膨胀系数为 $18.589 (10^{-5}/\text{K})$; 在 4 GPa 和 550 K 下, SnSe₂ 的热膨胀系数为 $7.412 (10^{-5}/\text{K})$ [28]。SnSe 和 SnSe₂ 的热膨胀系数的差异, 使得在高温生长后冷却至室温时, 两相收缩程度不一, 在界面处产生热应力。与此同时, 正交 SnSe ($a = 4.15 \text{ \AA}, b = 11.50 \text{ \AA}$) 与六方 SnSe₂ ($a = b = 3.81 \text{ \AA}, c = 6.14 \text{ \AA}$) 在构建异质结时采用 [011]SnSe//[100]SnSe₂、(100)SnSe/(001)SnSe₂ 的取向关系, 导致界面存在显著的晶格失配。上述热应力与结构的不匹配构成了层错形成的宏观驱动力。在传统的共价键合或离子键合半导体材料中, 主要的应力释放机制是产生失配位错。但是, 由于范德华异质结界面的剪切模量极低, 层间滑移所需的能量远低于产生体相位错核心的能量。因此, 当界面承受较大的晶格失配或热应力时, 系统更倾向于通过产生一系列堆垛层错和摩尔超晶格来吸收晶格失配与热应力[29]。这是一种能量上更有利的弛豫方式。

4. 结论

本文使用透射电镜系统表征了温度梯度熔融结晶法生长出的垂直堆叠的 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结的显微结构, 结论如下:

(1) 与文献中提到的(001)SnSe/(001)SnSe₂ 不同, 通过标定选区电子衍射的方法, 结合原子级 STEM-HAADF 图像发现, SnSe 相与 SnSe₂ 相之间存在以下取向关系: [011]SnSe//[100]SnSe₂、(100)SnSe/(001)SnSe₂。

(2) 本文通过调节降温速率发现, 在慢冷条件下生长的 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结的 SnSe₂ 相中不会出现堆垛层错, 而在快冷条件下生长的 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结的 SnSe₂ 相中会出现大量不规则堆垛层错。

本研究为 SnSe/SnSe₂ 范德华异质结的可控制备和调控大面积 SnSe/SnSe₂ 异质结结构提供实验数据和指导。

参考文献

- [1] Kar, M., Rajbanshi, B., Pal, S. and Sarkar, P. (2018) Engineering the Electronic Structure of Tin Sulfide Nanoribbons: A Computational Study. *The Journal of Physical Chemistry C*, **122**, 5731-5741. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b11453>
- [2] Mak, K.F., He, K., Shan, J. and Heinz, T.F. (2012) Control of Valley Polarization in Monolayer MoS₂ by Optical Helicity. *Nature Nanotechnology*, **7**, 494-498. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.96>
- [3] Fiori, G., Bonaccorso, F., Iannaccone, G., Palacios, T., Neumaier, D., Seabaugh, A., *et al.* (2014) Electronics Based on Two-Dimensional Materials. *Nature Nanotechnology*, **9**, 768-779. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.207>
- [4] Zhao, W., Ghorannevis, Z., Chu, L., Toh, M., Kloc, C., Tan, P., *et al.* (2012) Evolution of Electronic Structure in Atomically Thin Sheets of WS₂ and WSe₂. *ACS Nano*, **7**, 791-797. <https://doi.org/10.1021/nn305275h>
- [5] Bianchi, M.G., Risplendi, F., Re Fiorentin, M. and Cicero, G. (2023) Engineering the Electrical and Optical Properties of WS₂ Monolayers via Defect Control. *Advanced Science*, **11**, Article ID: 2305162. <https://doi.org/10.1002/adv.202305162>
- [6] Wang, Y.Y., Gao, R.X., Ni, Z.H., He, H., Guo, S.P., Yang, H.P., *et al.* (2012) Thickness Identification of Two-Dimensional Materials by Optical Imaging. *Nanotechnology*, **23**, Article ID: 495713. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/49/495713>
- [7] Wang, Q.H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J.N. and Strano, M.S. (2012) Electronics and Optoelectronics of

- Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides. *Nature Nanotechnology*, **7**, 699-712. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.193>
- [8] Obeid, M.M., Jappor, H.R., Al-Marzoki, K., Hoat, D.M., Vu, T.V., Edrees, S.J., *et al.* (2019) Electronic and Magnetic Properties of Single-Layer Boron Phosphide Associated with Materials Processing Defects. *Computational Materials Science*, **170**, Article ID: 109201. <https://doi.org/10.1016/j.commat.2019.109201>
- [9] Gibertini, M., Koperski, M., Morpurgo, A.F. and Novoselov, K.S. (2019) Magnetic 2D Materials and Heterostructures. *Nature Nanotechnology*, **14**, 408-419. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0438-6>
- [10] Shukla, V. (2020) The Tunable Electric and Magnetic Properties of 2D MXenes and Their Potential Applications. *Materials Advances*, **1**, 3104-3121. <https://doi.org/10.1039/d0ma00548g>
- [11] Shahid, I., Ahmad, S., Shehzad, N., Yao, S., Nguyen, C.V., Zhang, L., *et al.* (2020) Electronic and Photocatalytic Performance of Boron Phosphide-Blue Phosphorene vdW Heterostructures. *Applied Surface Science*, **523**, Article ID: 146483. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146483>
- [12] Cheng, R., Li, D., Zhou, H., Wang, C., Yin, A., Jiang, S., *et al.* (2014) Electroluminescence and Photocurrent Generation from Atomically Sharp WSe₂/MoS₂ Heterojunction *p-n* Diodes. *Nano Letters*, **14**, 5590-5597. <https://doi.org/10.1021/nl502075n>
- [13] Kim, S., Konar, A., Hwang, W., Lee, J.H., Lee, J., Yang, J., *et al.* (2012) High-Mobility and Low-Power Thin-Film Transistors Based on Multilayer MoS₂ Crystals. *Nature Communications*, **3**, Article No. 1011. <https://doi.org/10.1038/ncomms2018>
- [14] Tao, J., Jiang, J., Zhao, S., Zhang, Y., Li, X., Fang, X., *et al.* (2021) Fabrication of 1D Te/2D ReS₂ Mixed-Dimensional Van Der Waals *p-n* Heterojunction for High-Performance Phototransistor. *ACS Nano*, **15**, 3241-3250. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c09912>
- [15] Shi, W., Gao, M., Wei, J., Gao, J., Fan, C., Ashalley, E., *et al.* (2018) Tin Selenide (SnSe): Growth, Properties, and Applications. *Advanced Science*, **5**, Article ID: 1700602. <https://doi.org/10.1002/advs.201700602>
- [16] Li, F., Wang, H., Huang, R., Chen, W. and Zhang, H. (2022) Recent Advances in SnSe Nanostructures Beyond Thermoelectricity. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2200516. <https://doi.org/10.1002/adfm.202200516>
- [17] Wei, P., Bhattacharya, S., He, J., Neeleshwar, S., Podila, R., Chen, Y.Y., *et al.* (2016) The Intrinsic Thermal Conductivity of SnSe. *Nature*, **539**, E1-E2. <https://doi.org/10.1038/nature19832>
- [18] Zhao, L., Lo, S., Zhang, Y., Sun, H., Tan, G., Uher, C., *et al.* (2014) Ultralow Thermal Conductivity and High Thermoelectric Figure of Merit in SnSe Crystals. *Nature*, **508**, 373-377. <https://doi.org/10.1038/nature13184>
- [19] Chandra, S., Dutta, P. and Biswas, K. (2021) High-Performance Thermoelectrics Based on Solution-Grown SnSe Nanostructures. *ACS Nano*, **16**, 7-14. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c10584>
- [20] Mukhokosi, E.P., Krupanidhi, S.B. and Nanda, K.K. (2017) Band Gap Engineering of Hexagonal SnSe₂ Nanostructured Thin Films for Infra-Red Photodetection. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 15215. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15519-x>
- [21] Zhou, X., Gan, L., Tian, W., Zhang, Q., Jin, S., Li, H., *et al.* (2015) Ultrathin SnSe₂ Flakes Grown by Chemical Vapor Deposition for High-performance Photodetectors. *Advanced Materials*, **27**, 8035-8041. <https://doi.org/10.1002/adma.201503873>
- [22] D'Olimpio, G., Farias, D., Kuo, C., Ottaviano, L., Lue, C.S., Boukhvalov, D.W., *et al.* (2022) Tin Diselenide (SnSe₂) Van Der Waals Semiconductor: Surface Chemical Reactivity, Ambient Stability, Chemical and Optical Sensors. *Materials*, **15**, Article 1154. <https://doi.org/10.3390/ma15031154>
- [23] Huang, Y., Xu, K., Wang, Z., Shifa, T.A., Wang, Q., Wang, F., *et al.* (2015) Designing the Shape Evolution of SnSe₂ Nanosheets and Their Optoelectronic Properties. *Nanoscale*, **7**, 17375-17380. <https://doi.org/10.1039/c5nr05989e>
- [24] Camargo Moreira, Ó.L., Cheng, W., Fuh, H., Chien, W., Yan, W., Fei, H., *et al.* (2019) High Selectivity Gas Sensing and Charge Transfer of SnSe₂. *ACS Sensors*, **4**, 2546-2552. <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b01461>
- [25] Wu, Y., Li, W., Faghaninia, A., Chen, Z., Li, J., Zhang, X., *et al.* (2017) Promising Thermoelectric Performance in Van Der Waals Layered SnSe₂. *Materials Today Physics*, **3**, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2017.10.001>
- [26] Ge, B., Li, C., Lu, W., Ye, H., Li, R., He, W., *et al.* (2023) Dynamic Phase Transition Leading to Extraordinary Plastic Deformability of Thermoelectric SnSe₂ Single Crystal. *Advanced Energy Materials*, **13**, Article ID: 2300965. <https://doi.org/10.1002/aenm.202300965>
- [27] He, X., Shen, H., Wang, W., Wang, Z., Zhang, B. and Li, X. (2013) The Mechanical and Thermo-Physical Properties and Electronic Structures of SnS and SnSe in Orthorhombic Structure. *Journal of Alloys and Compounds*, **556**, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.12.085>
- [28] He, X. and Shen, H. (2012) *Ab Initio* Calculations of Band Structure and Thermophysical Properties for SnS₂ and SnSe₂.

Physica B: Condensed Matter, **407**, 1146-1152. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.01.102>

- [29] Mukhopadhyay, T., Mahata, A., Adhikari, S. and Asle Zaeem, M. (2018) Probing the Shear Modulus of Two-Dimensional Multiplanar Nanostructures and Heterostructures. *Nanoscale*, **10**, 5280-5294. <https://doi.org/10.1039/c7nr07261a>