

Bi 掺杂 InSe 晶体生长及性能研究

徐浩¹, 顾海涛¹, 吴鸿辉¹, 岳晓飞¹, 林思琪¹, 金敏^{1,2}

(1. 上海电机学院 材料学院, 上海 201306; 2. 乌镇实验室, 桐乡 314500)

摘要: 硒化铟(InSe)作为一种典型的层状 III-VI 族半导体, 因其高电子迁移率、可调控带隙以及卓越的塑性变形能力而备受关注, 成为下一代电子、光电子以及柔性器件的候选材料之一。近年来, 本征 InSe 晶体的可控制备技术已趋于成熟, 但针对掺杂 InSe 晶体制备的系统研究仍相对缺乏。实现高质量、成分可控的掺杂 InSe 晶体的稳定合成, 已成为推动 InSe 走向实际应用的关键驱动因素。本研究首先采用布里奇曼法生长出本征 InSe 晶体, 随后在原料合成阶段引入 Bi 元素, 成功制备出高质量的 Bi 掺杂 InSe 晶体。光学显微镜和扫描电子显微镜测试表明, 所得 Bi 掺杂 InSe 晶体表面光滑、单晶特性优异。拉曼光谱与 X 射线衍射分析进一步证实, 掺杂前后 InSe 晶体的物相结构保持一致, 均为 ϵ 相。化学腐蚀实验证实, 引入的 Bi 原子能够与晶体中的位错核心发生相互作用, 有效抑制其运动, 因此显著降低 InSe 晶体的位错密度。电学测试结果表明, Bi 元素掺杂在高温区可以明显提升 InSe 晶体的载流子浓度和迁移率, 这主要归因于引入额外载流子以及位错密度降低减弱了载流子散射效应。本研究成功制备出 Bi 元素掺杂的 InSe 晶体, 并证实其具有优于本征 InSe 的电学性能, 为优化 InSe 晶体特性、推动其在未来器件中的集成应用提供了理论依据与实验指导。

关键词: InSe 晶体; Bi 元素掺杂; 布里奇曼法; 位错

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)04-0493-07

Crystal Growth and Properties of Bi-doped InSe

XU Hao¹, GU Haitao¹, WU Honghui¹, YUE Xiaofei¹, LIN Siqi¹, JIN Min^{1,2}

(1. College of Materials, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 2. Wuzhen Laboratory, Tongxiang 314500, China)

Abstract: Indium selenide (InSe), a typical layered III-VI semiconductor, has attracted intense interest owing to its high electron mobility, tunable bandgap and exceptional plastic deformation capability, enabling it a promising candidate for next-generation electronic, optoelectronic and flexible devices. Recently, the controlled growth of

收稿日期: 2025-07-13; 收到修改稿日期: 2025-08-28; 网络出版日期: 2025-09-27

基金项目: 中国载人航天工程空间应用系统项目(KJZ-YY-NCL405); 国家自然科学基金(52371193, 52272006); 上海市晨光计划(22CG281); 上海市优秀学术带头人(23XD1421200); 上海启明星计划(23QA1403900); 上海市东方学者计划(TP2022122); 上海市东方英才项目(QNWS2023); 浙江省自然科学基金(LD25E020001)
Space Application System of China Manned Space Program (KJZ-YY-NCL405); National Natural Science Foundation of China (52371193, 52272006); Chengguang Program (22CG281); Shanghai Academic Research Leader (23XD1421200); Shanghai Rising-Star Program (23QA1403900); Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions (TP2022122); Shanghai Oriental Talented Youth Project (QNWS2023); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LD25E020001)

作者简介: 徐浩(1998-), 男, 硕士研究生. E-mail: xnddream@126.com

XU Hao (1998-), male, Master candidate. E-mail: xnddream@126.com

通信作者: 金敏, 教授. E-mail: jmaish@aliyun.com

JIN Min, professor. E-mail: jmaish@aliyun.com

intrinsic InSe crystals has been well developed, whereas doping InSe crystals with a third element remains relatively scarce. In this study, intrinsic InSe crystals were grown using the Bridgman method, and high-quality Bi-doped InSe crystals were then prepared through introducing Bi during the crystal synthesis stage. Optical microscopy and scanning electron microscopy observations indicate that the as-grown Bi-doped InSe crystals exhibit a smooth surface and excellent single-crystalline characteristic. Raman spectroscopy and X-ray diffraction analyses further demonstrate that, after Bi doping, their phase structure is consistent with former intrinsic crystals, exhibiting ϵ -InSe phase. Chemical etching experiments reveal that the doped Bi atoms can interact with dislocation cores within the crystal, effectively suppressing their motion and significantly reducing their dislocation density. Electrical measurements show that the Bi doping markedly increases carrier concentration and mobility of InSe crystal at high temperature, which is primarily attributed to the introduction of additional free carriers and suppression of carrier scattering resulting from the reduced dislocation density. Consequently, Bi-doped InSe crystal was successfully fabricated, and its superior performance compared to the intrinsic InSe was verified. This work provides theoretical insights and experimental guidance for optimizing properties of InSe crystals in application in future devices.

Key words: InSe crystal; Bi elemental doping; Bridgman method; dislocation

InSe 是一种直接带隙层状材料, 因其高电子迁移率、可调控带隙和良好的柔性形变能力, 在电子器件、光学器件以及柔性器件等领域展现出巨大的应用潜力^[1-5]。近年来, 关于 InSe 半导体高质量制备与性能优化方面的研究受到越来越多的关注^[6-10]。实现 InSe 半导体物理性质的可控调节对拓展其应用具有重要意义。

北京大学张青等^[11]通过施加静水压力有效调控了 InSe 的电子带结构, 发现其在不同厚度区间展现出差异明显的发光特性。中国科学院国家纳米科学中心刘新风团队^[12]通过构建银立方体/金膜纳米腔结构, 极大增强了 InSe 的激子发射强度。尽管此类技术手段能够显著调控 InSe 的电子结构及其光学特性, 但通常依赖于外场的引入, 这在一定程度上增加了调控的复杂性, 也提高了实际应用的难度。相比之下, 在晶体生长过程中实现可控掺杂, 无需引入外场, 即可有效调节半导体材料的物理性质。因此, 该方法成为一种更为简便且被广泛采用的调控策略。中国科学院上海硅酸盐研究所刘学超团队^[13]采用 Al 掺杂 InSe 晶体, 实现了对 InSe 晶体的塑性和光电性能的可控调节。此外, Bi 元素掺杂也被证实是一种调控半导体性能的有效手段, 能够显著改善半导体材料的电子和光学特性。Benjamin 等^[14]通过溶剂热法合成 Bi 掺杂的 SnS 纳米棒, 成功将载流子浓度提升近两个数量级($1.22 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \rightarrow 8.92 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)。目前, 已有研究报道了 Bi 掺杂对 InSe 晶体微观结构和光学性能的调控作用^[15]。然而, 关于 Bi 元素掺杂对 InSe 晶体电学、力学及缺陷密度特性的系统性研究仍相

对较少。

鉴于 Bi 元素掺杂在调控晶体性能方面的独特优势, 本研究采用布里奇曼法制备高质量 InSe 晶体, 并在原料合成阶段通过熔融的方式引入 Bi 元素, 进一步制备出 Bi 掺杂的 InSe 晶体。这种掺杂方式既可以保证纯净的 InSe 晶体生长环境, 也可以精确控制 Bi 掺杂的化学计量比。为全面阐明 Bi 元素掺杂对 InSe 晶体性质的调控作用, 系统分析掺杂前后 InSe 晶体结构、力学性能、电学性能的变化情况至关重要。研究表明, 在 InSe 晶体中掺入的 Bi 原子能够有效钉扎位错并限制其运动, 从而改善 InSe 晶体的质量。同时, 在高温区间, Bi 掺杂使 InSe 晶体的载流子浓度和载流子迁移率均得到显著提升。本研究系统揭示了 Bi 掺杂对 InSe 晶体微观结构和物理性能的调控机制, 为 InSe 的物理化学性能优化提供了理论指导与实验支撑, 对拓展其在电子器件、光电器件等领域的潜在应用场景具有重要的科学意义。

1 实验方法

1.1 晶体生长

图 1(a)为 In-Se 二元相图。从图中可以看出, 当 In 与 Se 的摩尔比为 1:1 时, 在约 630 °C 处首先结晶生成 In_6Se_7 , 随后当温度降至约 600 °C 时, In_6Se_7 晶体与熔融态之间发生包晶反应, 生成 InSe 晶体。在本实验中, 化学计量比为 1:1 的 In 和 Se 元素颗粒(纯度为 99.99%)被置于内径 21 mm、外径 25 mm 的石英管中, 并在 10^{-3} Pa 真空环境下进行烧结密

封。随后, 将石英管水平放入摇摆炉中, 加热至 800 °C 并维持 3 h, 确保原料完全熔化, 之后摇摆 30 min 以使两种原料均匀混合。

在原料合成完成后, 采用布里奇曼法生长 InSe 晶体。图 1(b, c) 分别展示了 InSe 晶体生长炉体的示意图及炉温曲线。根据相图, InSe 晶体的生长温度设定为 700 °C, 升温时间为 8 h。为确保原料完全熔化, 在 700 °C 下保持 6 h。保温完成后, 设备开始下降, 并以 0.8 mm/h 的速度在约 30 °C/cm 的温度梯度下进行晶体生长。当炉温降至约 200 °C 时, 停止加热并停止下降, 随后进行自然冷却, 待冷却至室温后, 完成 InSe 晶体的生长过程。对于 Bi 掺杂 InSe 晶体的生长, 在原料合成阶段, 将 0.5% (摩尔分数) Bi 元素颗粒 (纯度为 99.99%) 与 In 和 Se 颗粒混合。需要注意的是, 在石英管密封过程中, 使用的氢氧火焰枪温度可达 2800 °C, 为防止 Bi 元素在高温下挥发而影响掺杂含量, 需将 Bi 颗粒置于 In 和 Se 颗粒的交界处, 待石英管封装完毕后, 轻轻摇匀。图 1(d, e) 分别为生长完成后从石英管中取出的本征和掺杂 Bi 的 InSe 晶体的光学照片。

1.2 性能测试与表征

通过 X 射线衍射仪 (XRD, Bruker D8, 德国) 测量 InSe 晶体的相结构和晶体取向, X 射线辐射波长

为 0.15406 nm。为精准确定 InSe 晶体的晶型, 进一步采用拉曼光谱仪 (WITec Alpha300R, 德国) 进行判断, 实验中激发波长为 532 nm。通过扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM, Hitachi S-3400, 日本) 表征 InSe 晶体的表面形貌。通过 SEM 配套的能谱仪 (EDS) 分析晶体的化学成分。通过激光导热仪 (NETZSCH LFA-467, 德国) 测试热扩散系数, 升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 测量温度为 300~700 K。使用带金刚石方锥压头的维氏显微硬度仪 (Wilson Wlpert-Tukon 2100B, 美国) 完成硬度测试, 在 0.09807 N (25 gf) 载荷下压头在晶体表面保持 15 s, 以诱导形成压痕。通过化学腐蚀分析 InSe 晶体表面缺陷, 腐蚀液由 30 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、50 mL H_2SO_4 和 300 mL 蒸馏水配制而成, 腐蚀时间为 30 min。腐蚀完成后, 使用白光共聚焦显微镜 (ZEISS Smart Proof 5, 德国) 观察样品的缺陷分布情况并拍摄全域光学图像。将光学图像划分为若干 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的子区域, 并通过 ImageJ 图像处理软件统计不同子区域中位错坑的分布密度。在 InSe 晶体的电学性能测试中, 为保证实验结果的可靠性, 统一采用 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1.2\text{ mm}$ 的样品。采用自建的霍尔系数测量平台, 使用四根 Ag 电极, 以范德堡法在 300~700 K 区间进行测试 (无磁场)。

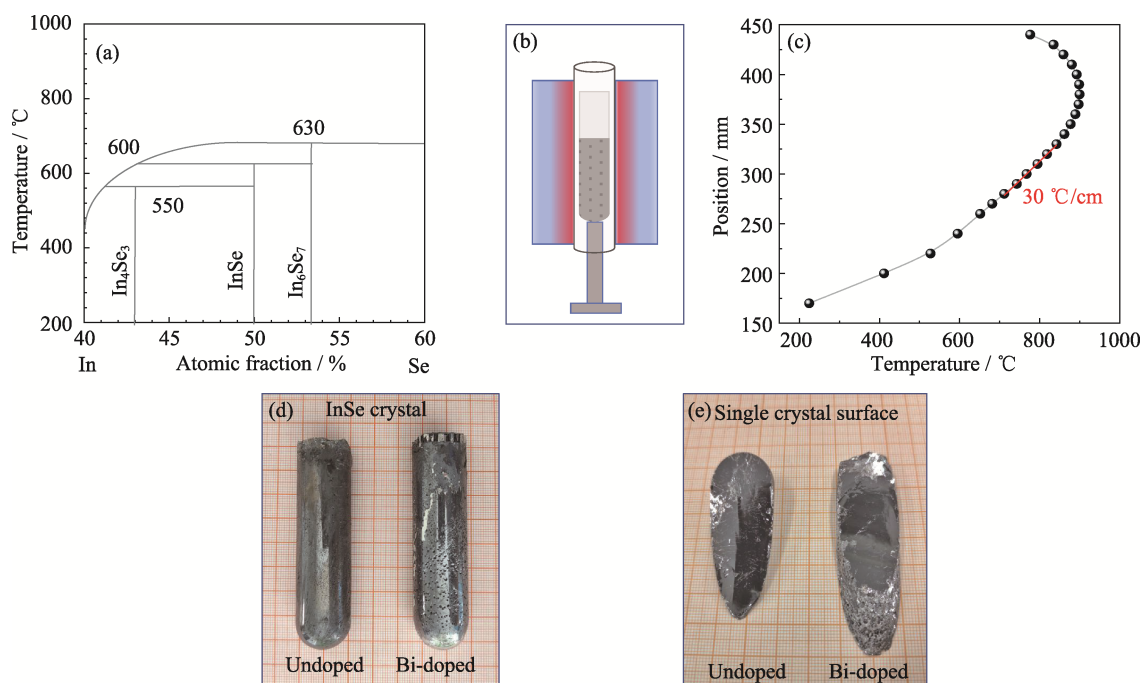


图 1 InSe 晶体生长

Fig. 1 InSe crystals growth

- (a) Two-dimensional phase diagram of In-Se; (b) Schematic diagram of the furnace for crucible descent method; (c) Furnace temperature profile for InSe crystal growth; (d) Optical image of the grown InSe crystals; (e) Optical image of the dissociation tablets of InSe corresponding to (d)

2 结果与讨论

2.1 物相分析

InSe 晶体是一种层状半导体材料, 其层内原子通过强共价键连接, 而层与层之间则通过弱范德瓦耳斯力相互作用^[16]。因此, 通过简单的机械剥离方法, 便可获得 InSe 晶体的解离薄片。宏观上, 生长的 InSe 晶体解离片呈现光亮的金属光泽, 且表面光滑如镜面, 如图 1(e)所示。图 2(a, b)分别展示了两种 InSe 晶体解离面的 SEM 照片和元素分布, 可以观察到两种 InSe 晶体解离面平整且无明显缺陷, 表明晶体质量良好。通过 EDS 分析, 可以确认掺杂后 InSe 晶体中存在 Bi 元素, 在两种晶体中, In : Se 摩尔比与前期配制的元素含量一致。图 2(c, d)分别展示了 InSe 多晶及单晶形态的 XRD 图谱。结果显示, 各衍射峰位置与标准 PDF 数据库中的参考卡片 PDF#34-1431 匹配良好, 且在 InSe 解离片的 XRD 图谱中仅观察到(001)晶面的衍射峰, 表明其具有良好的单晶特征, 证实了本研究成功生长了 InSe 单晶。

InSe 晶体具有 β 、 γ 和 ϵ 三种物相结构^[17], 仅依靠 XRD 测试结果来区分不同物相存在一定的局限

性。因此, 进一步采用拉曼光谱测试来确认所生长 InSe 晶体的晶型。图 2(e)展示了两种 InSe 晶体在 532 nm 波长激发下的拉曼光谱。从图中可以明显观察到 InSe 晶体的四个典型特征峰, 分别对应于 115 cm^{-1} 的 $A_1(\Gamma_2^-)$ 振动模式、 176 cm^{-1} 的 $E(\Gamma_3^-)$ 和 $E(\Gamma_3^-)$ -TO 振动模式、 199 cm^{-1} 的 $A_1(\Gamma_1^-)$ -LO 振动模式以及 226 cm^{-1} 的 $A_1(\Gamma_1^-)$ 振动模式^[7]。值得注意的是, $A_1(\Gamma_1^-)$ -LO 振动模式通常被认为是 InSe 晶体无中心对称性的 γ 相或 ϵ 相的显著特征, 因此排除了本研究中 InSe 晶体是 β 相(具有中心对称性)的可能性^[18-20]。由于 ϵ 相和 β 相的 XRD 图谱几乎相同, 确定本研究通过布里奇曼法生长的 InSe 晶体为 ϵ 相。此外, 位于 226 cm^{-1} 的 $A_1(\Gamma_1^-)$ 振动模式通常对载流子浓度变化较为敏感^[21], 从图 2(e)可以看出, Bi 掺杂的 InSe 晶体中该振动模式出现了轻微蓝移, 表明 Bi 元素掺杂可能引起了 InSe 晶体中载流子浓度的变化。

2.2 性能分析

通常情况下, 晶锭底部区域表现出更为良好的晶体质量, 但在 InSe 晶体中, 由于包晶反应的影响, 晶锭底部常伴有 In_6Se_7 残余物。为避免其他物相的干扰, 本研究所有性能测试均选取 InSe 晶锭中部区域的单晶解离片。为确保实验数据的可靠性, 所有对比实验的取样大小和厚度基本保持一致。

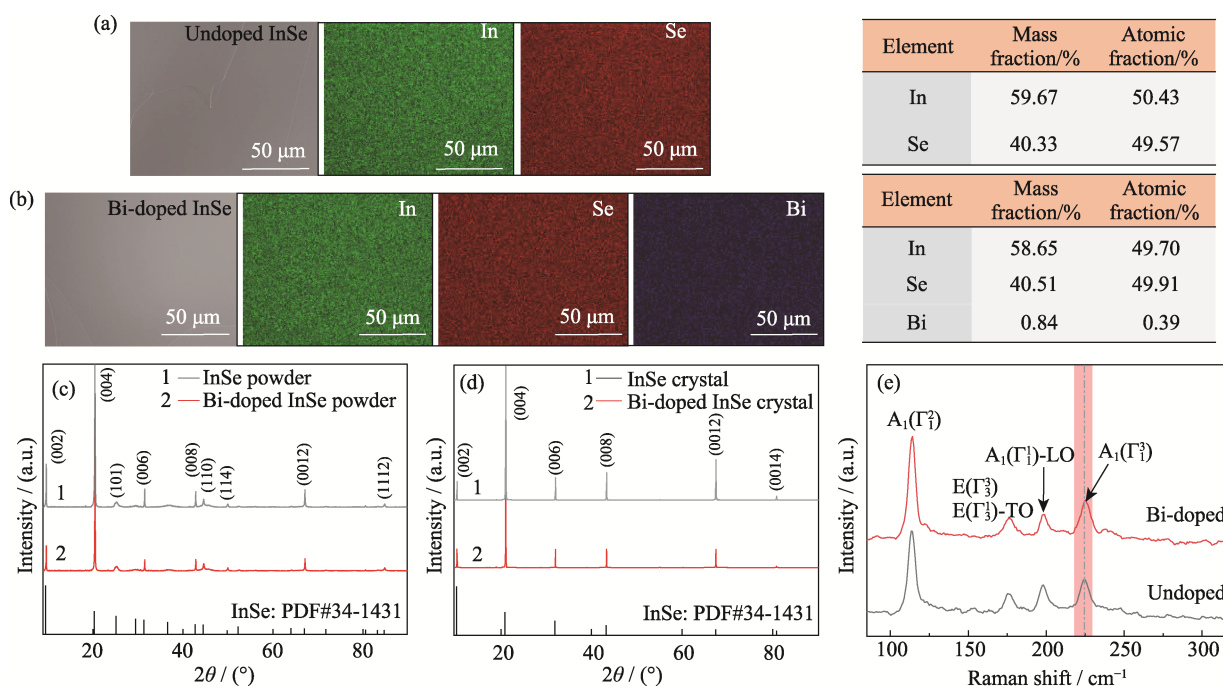


图 2 InSe 晶体物相表征

Fig. 2 Physical characterization of InSe crystals

(a, b) SEM images and EDS analyses of (a) intrinsic InSe crystals and (b) Bi-doped InSe crystals;
(c) Polycrystalline XRD patterns of InSe crystals; (d) Single crystal XRD patterns of InSe crystals;
(e) Raman spectra of InSe crystals

图 3(a)展示了两种 InSe 晶体在宏观弯曲测试中的表现。从图中可以看出, 掺杂与未掺杂 Bi 的 InSe 晶体均表现出良好的可塑性和柔韧性。为了探讨 Bi 掺杂对 InSe 晶体力学性能的影响, 本研究采用带金刚石方锥压头的硬度测试设备, 在 0.09807 N (25 gf) 载荷下将压头保持在晶体表面 15 s, 以诱导形成压痕。显微维氏硬度通过材料表面压痕单位面积所承受的载荷来表示。在材料表面施加一定载荷, 使其形成一个正四棱锥形的压痕, 随后使用显微镜观察并测量压痕对角线的长度。维氏硬度由载荷与压痕面积的比值来计算, 其中压痕面积 F 可通过公式(1)计算, 维氏硬度 HV 可由公式(2)计算。

$$F = \frac{d^2}{2\sin 68^\circ} \quad (1)$$

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (2)$$

式中, d 为压痕对角线长度, F 为压痕面积, P 为施加载荷, HV 为维氏硬度。对 InSe 单晶解离面进行五次施压, 测试结果如图 3(b)所示。本征 InSe 晶体的维氏硬度平均值为 7.52 MPa, 而掺杂 Bi 的 InSe 晶体

的维氏硬度平均值为 8.68 MPa。结果表明, 引入 Bi 元素能够略微提升 InSe 晶体的硬度。这可能与钉扎效应相关: Bi 的原子半径(约 0.16 nm)大于基质(In: 0.144 nm, Se: 0.117 nm), 当 Bi 作为溶质原子进入晶格时, 会引发局部晶格膨胀和畸变, 进而产生弹性应变场。这种应变场会阻碍位错的滑移或攀移, 从而提高材料对塑性变形的抵抗能力^[22]。

位错是塑性变形的载体, 位错密度越低, 晶体在应力作用下发生永久变形所需的临界应力越高, 意味着材料能够在更高应力下保持弹性行为。同时, 位错及其周围的应力场会成为载流子的散射中心。因此, 降低位错密度能够显著减少载流子散射, 提高载流子迁移率。图 3(c, d)分别展示了本征 InSe 和 Bi 掺杂 InSe 单晶片的化学腐蚀对比实验。图 3(c₁)为经化学腐蚀后本征 InSe 单晶解离片的宏观光学照片, 图 3(c₂)为高倍镜下本征 InSe 单晶解离片完整的表面微观形貌图, 图 3(c₃)为图 3(c₂)的局部放大图。可以看出, 腐蚀坑主要杂乱分布于单晶片的边缘区域, 且具有连续的螺旋生长台阶, 该形貌是晶体表面螺型位错的典型特征。图 3(d₁)为 Bi 掺杂 InSe

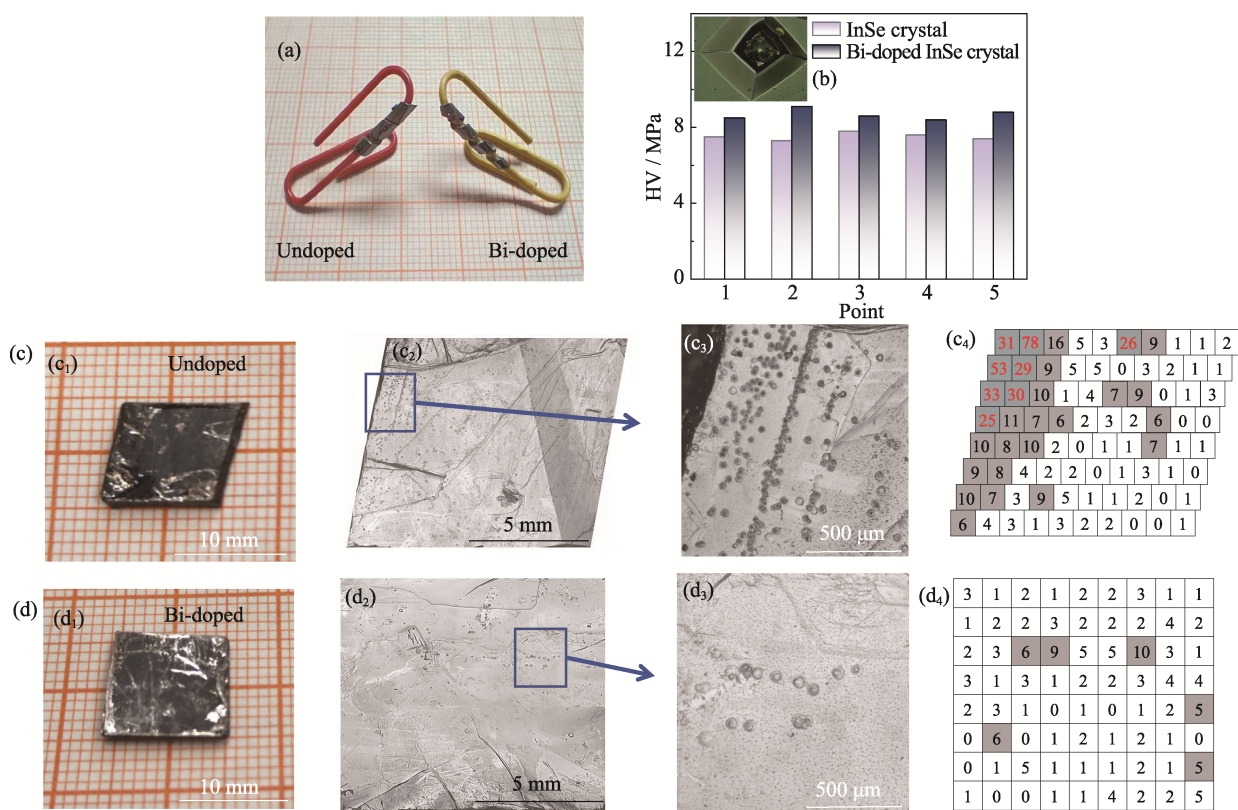


图 3 InSe 晶体力学性能及化学腐蚀形貌对比

Fig. 3 Comparison of mechanical properties and chemical corrosion morphologies between undoped and Bi-doped InSe crystals

(a) Macro-mechanical characterization of InSe crystals; (b) Mechanical comparison of InSe crystals under micro-hardness tester; (c, d) Dislocation density statistics of (c) intrinsic InSe crystal and (d) Bi-doped InSe crystal after corrosion. Colorful figures are available on website

单晶解离片经化学腐蚀后的低倍光学照片, 图 3(d₂, d₃) 为其高倍镜下的表面微观形貌图。从图中可以明显看出, 掺杂 Bi 元素后, InSe 单晶解离片中的螺旋位错腐蚀坑尺寸增大, 但数量明显减少。这是由于掺入的 Bi 原子与位错核心相互作用并钉扎位错, 抑制了其运动。图 3(c₄, d₄) 分别为经 ImageJ 软件处理的本征 InSe 与 Bi 掺杂 InSe 中位错腐蚀坑的密度分布图, 直观展示了掺杂前后 InSe 晶体中位错密度的变化情况。总结来说, Bi 掺杂导致的位错密度降低不仅减小了缺陷态对载流子的俘获作用, 还降低了非辐射复合中心数量。这种缺陷抑制效应对提升 InSe 晶体的电学性能及后续器件制备的可靠性具有重要意义。

图 4 展示了本征 InSe 晶体与 Bi 掺杂 InSe 晶体的载流子浓度、载流子迁移率、电阻及热扩散系数的对比曲线。从图 4(a) 中可见, 在升温初期, 两种 InSe 晶体的载流子浓度整体呈下降趋势, 而在 400 K 之后, 载流子浓度随温度升高而持续增加。该现象可能是由于在升温初期, 载流子发生复合, 局域化的概率增加, 进而降低了自由载流子浓度^[23]。随着温度超过 400 K, 热激发效应进一步增强并成为主导因素, 此时更多载流子被激发到导带中, 导致载流子浓度随温度升高而持续增加。值得注意的

是, 在经 Bi 元素掺杂后, InSe 晶体中的载流子浓度明显增加(400~700 K), 这可能是由于 Bi 元素掺杂在 InSe 晶体中引入了较浅的杂质能级, 在热激发作用下提供了额外的载流子^[24]。图 4(b) 进一步展示了两种 InSe 晶体载流子迁移率随温度的变化情况, 随着温度升高, 载流子迁移率相较于室温有所提高。如预期一般, 经过 Bi 掺杂后, InSe 晶体的载流子迁移率同样获得明显提升(420~700 K)。这一现象主要归因于两个方面: 一方面, Bi 掺杂增加了晶体内部的载流子浓度; 另一方面, Bi 掺杂有效改善了晶体中的位错密度, 降低了载流子被散射的概率, 从而显著提高了载流子迁移率。通过图 4(c) 可以看出本征 InSe 晶体在室温附近电阻较大, 在升温初期, 其电阻几乎不变, 而当温度由 550 K 升至 700 K 时, InSe 晶体电阻逐渐降低。这是由于在 300~500 K 区间, 载流子浓度较低, 温度的变化对载流子的激发作用不明显; 而在 500~700 K 区间, 晶体进入“本征区”, 热振动能量足以激发价带电子至导带, 产生大量电子-空穴对, 此时载流子浓度随温度升高快速增长, 导致本征 InSe 晶体在此温度区间内电阻骤降。而在掺杂 Bi 元素后, InSe 晶体在室温下的电阻显著降低, 这是由于 Bi 掺杂会引入浅能级杂质, 在室温下这些杂质能级很容易被热激发, 使更多载

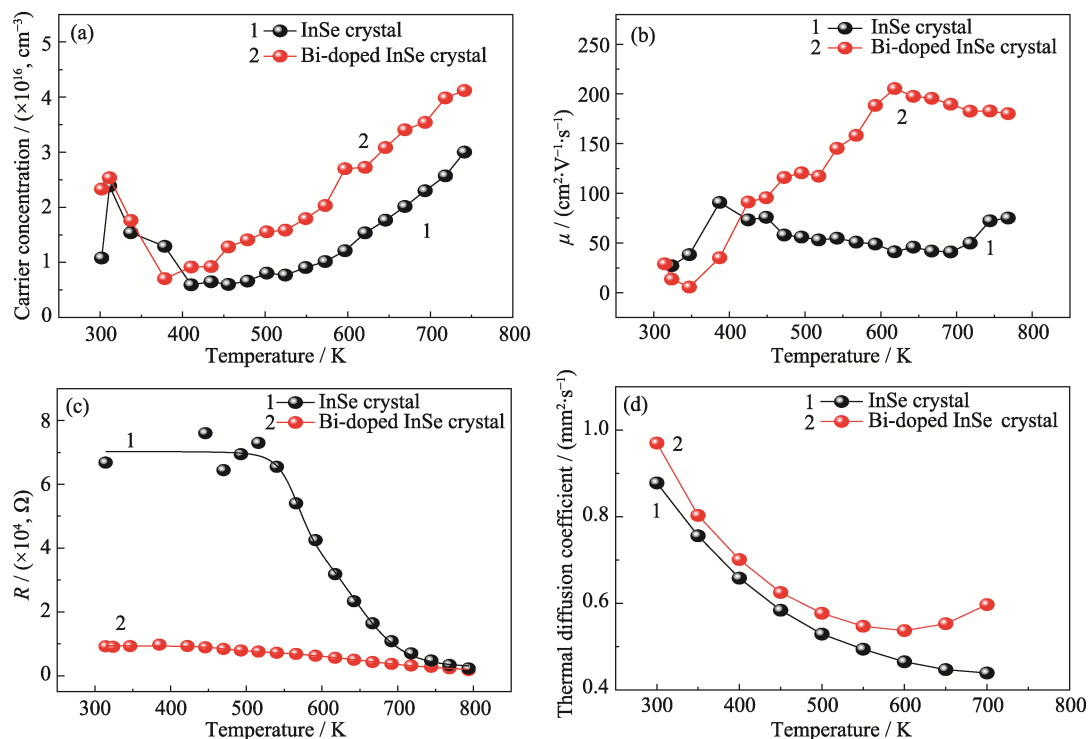


图 4 InSe 晶体电学性能和热学性能对比

Fig. 4 Comparison of electrical and thermal properties between undoped and Bi-doped InSe crystals
(a) Carrier concentration of InSe crystals; (b) Carrier mobility (μ) of InSe crystals; (c) Resistance (R) of InSe crystals;
(d) Thermal diffusion coefficient of InSe crystals

流子跃迁到导带,增加了自由载流子的浓度^[25],从而使得InSe晶体电阻在室温下显著降低。之后随着温度的升高,电阻逐渐降低,在温度达到700 K时电阻达到最小值,约为3700 Ω 。通过图4(a~c)的分析可以得出结论,Bi掺杂对改善InSe晶体的电学性能有显著作用。从图4(d)可以看到,本征InSe晶体的热扩散系数随着温度的升高而降低,然而Bi掺杂的InSe晶体在温度达到600 K后,热扩散系数反而随着温度升高而增大。在Bi掺杂晶体中,高温区热扩散系数的回升主要归因于两方面:一是Bi元素引入浅杂质能级,在高温下可激发大量自由载流子贡献额外的电子热导;二是Bi掺杂有效抑制了位错形成,降低了其在高温下对声子的散射。而在本征晶体中,由于缺乏额外的电子热导贡献,且位错密度较高,因此热扩散系数即使在高温区间也未出现上升趋势^[26-27]。

3 结论

本研究采用布里奇曼法生长了化学计量比1:1的InSe晶体,并通过掺杂0.5%(摩尔分数)Bi对其性能进行调控。研究发现,掺杂Bi前后,所生长的InSe晶体表面平整,具有良好的单晶特征。掺杂前后InSe晶体的物相结构保持一致,均为 ϵ 相。通过腐蚀实验观察到,Bi掺杂显著降低了InSe晶体中的位错密度,有效提升了晶体质量。此外,掺杂Bi后,InSe晶体的电学性能得到了显著提升。在600 K时,载流子浓度由 $1.21 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 提升至 $2.70 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,载流子迁移率由 $41 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升至 $205 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。综上,本工作成功生长出高质量Bi掺杂InSe晶体,明显优化了InSe晶体的电学性能及缺陷浓度,为InSe半导体材料的发展提供了实验指导。

参考文献:

- [1] JIANG J F, XU L, QIU C G, *et al.* Ballistic two-dimensional InSe transistors. *Nature*, 2023, **616**(7957): 470.
- [2] LEI S D, GE L H, NAJMAEI S, *et al.* Evolution of the electronic band structure and efficient photo-detection in atomic layers of InSe. *ACS Nano*, 2014, **8**(2): 1263.
- [3] SUN R H, LIU Y, CHEN Y, *et al.* Efficient enhancement of photoluminescence and second-harmonic generation of few-layer InSe coupled with surface-plasmonic Ag prism array. *Science China Materials*, 2023, **66**(7): 2788.
- [4] WANG J J, CAO F F, JIANG L, *et al.* High-performance photodetectors of individual InSe single crystalline nanowire. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, **131**(43): 15602.
- [5] DAI M J, GAO C F, NIE Q F, *et al.* Properties, synthesis, and device applications of 2D layered InSe. *Advanced Materials Technologies*, 2022, **7**(12): 2200321.
- [6] 何峰, 白旭东, 陆欣昱, 等. III-VI族InSe半导体晶体生长研究进展. *人工晶体学报*, 2022, **51**(9): 1722.
- [7] SUN M J, WANG W, ZHAO Q H, *et al.* ϵ -InSe single crystals grown by a horizontal gradient freeze method. *CrystEngComm*, 2020, **22**(45): 7864.
- [8] BANDURIN D A, TYURNINA A V, YU G L, *et al.* High electron mobility, quantum hall effect and anomalous optical response in atomically thin InSe. *Nature Nanotechnology*, 2017, **12**(3): 223.
- [9] WEI T R, JIN M, WANG Y C, *et al.* Exceptional plasticity in the bulk single crystalline van der Waals semiconductor InSe. *Science*, 2020, **369**(6503): 542.
- [10] JIN M, MA Y P, WEI T R, *et al.* Growth and characterization of large size InSe crystal from non-stoichiometric solution via a zone melting method. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, **39**(5): 554.
- [11] ZHAO L Y, JIANG Y J, LI C, *et al.* Probing anisotropic deformation and near-infrared emission tuning in thin-layered InSe crystal under high pressure. *Nano Letters*, 2023, **23**(8): 3493.
- [12] BAO X T, WU X X, KE Y X, *et al.* Giant out-of-plane exciton emission enhancement in two-dimensional indium selenide via a plasmonic nanocavity. *Nano Letters*, 2023, **23**(9): 3716.
- [13] 郑权, 刘学超, 王浩, 等. 铝掺杂对硒化铟晶体结构与性能的影响. *人工晶体学报*, 2024, **53**(9): 1528.
- [14] BENJAMIN H B, NIRMAL T, SHAJAN N, *et al.* Effect of Bi doping in tuning the structural, morphological and optoelectronic properties of solvothermal synthesized SnS nanorods. *Materials Today Communications*, 2024, **39**: 109041.
- [15] SUI F R, JIN M, ZHANG Y Y, *et al.* Atomic insights into the influence of Bi doping on the optical properties of two-dimensional van der Waals layered InSe. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2022, **34**: 224006.
- [16] 苗瑞霞, 谢妙春, 程开, 等. Te掺杂对二维InSe抗氧化性以及电子结构的影响. *物理学报*, 2023, **72**(12): 123101.
- [17] SEGURA A. Layered indium selenide under high pressure: a review. *Crystals*, 2018, **8**(5): 206.
- [18] GRIMALDI I, GERACE T, PIPITA M M, *et al.* Structural investigation of InSe layered semiconductors. *Solid State Communications*, 2020, **311**: 113855.
- [19] SONG C Y, FAN F R, XUAN N N, *et al.* Drastic enhancement of the raman intensity in few-layer InSe by uniaxial strain. *Physical Review B*, 2019, **99**(19): 195414.
- [20] WU M, XIE Q Y, WU Y Z, *et al.* Crystal structure and optical performance in bulk γ -InSe single crystals. *AIP Advances*, 2019, **9**(2): 025013.
- [21] CHAKRABORTY B, BERA A, MUTHU D V S, *et al.* Symmetry-dependent phonon renormalization in monolayer MoS₂ transistor. *Physical Review B*, 2012, **85**: 161403.
- [22] WANG L G, LIU T C, WU T P, *et al.* Strain-retardant coherent perovskite phase stabilized Ni-rich cathode. *Nature*, 2022, **611**: 61.
- [23] GEBRAMICHAEL G E. Effects of temperature on the free carrier traps of Shockley read hall recombination mechanisms for gallium sulfide (GaS) semiconductor. *Universal Journal of Materials Science*, 2020, **8**(1): 11.
- [24] SHANKAR M R, PRABHU A N, SRIVASTAVA T. Bismuth and tellurium co-doping: a route to improve thermoelectric efficiency in InSe polycrystals. *Materials Advances*, 2024, **5**(24): 9823.
- [25] SONG Q C, ZHOU J W, LAUREEN M, *et al.* The effect of shallow vs. deep level doping on the performance of thermoelectric materials. *Applied Physics Letters*, 2016, **109**(26): 263902.
- [26] 谢敏, 宋希文, 周第, 等. Er³⁺掺杂对Nd₂Zr₂O₇相结构及热物理性能的影响. *稀土*, 2016, **37**(4): 51.
- [27] TREFON-RADZIEJEWSKA D, BODZENTA J. Investigation of thermal diffusivity dependence on temperature in a group of optical single crystals doped with rare earth ions. *Optical Materials*, 2015, **45**: 47.