

二维硒化铟晶圆：未来半导体新材料

秦彪^{1,2} 刘灿³ 刘开辉^{1,*}

(1 北京大学物理学院 人工微结构和介观物理全国重点实验室 北京 100871)

(2 重庆大学物理学院 量子材料与器件研究中心 重庆 401331)

(3 中国人民大学物理学院 北京 100872)

2025-08-27收到

* email: khlui@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250906

CSTR: 32040.14.wl20250906

1 半导体硅的发展与物理极限

过去七十余年间，硅作为半导体材料的核心，深刻塑造了现代电子技术的基本格局。1954年，美国德州仪器公司成功研制出第一块硅基晶体管，其物理基础在于p-n结中的载流子调控机制。肖克利、巴丁与布拉顿因在晶体管方面的开创性工作获得了1956年诺贝尔物理学奖。晶体管的发明不仅推动了集成电路的诞生，也奠定了现代微电子学的基础。

1965年，摩尔提出的“摩尔定律”指出，集成电路的晶体管数目大约每18—24个月翻一番，性能随之提升而成本下降。这一经验规律不仅成为半导体技术演进的重要参照，也与工艺缩放、光刻精度和能耗控制等物理因素密切相关。从英特尔第一代4004微处理器，到IBM大型计算机，再到个人电脑与智能终端，硅基器件逐步奠定了信息社会的硬件根基。

然而，晶体管尺寸缩小至纳米级别后，硅基器件逐渐显现出固有的物理限制。当晶体管的栅极长度逐渐逼近十纳米甚至更小的尺度时，硅材料表面悬挂键缺陷的影响越来越大，其内在局限开始显现。首先，短沟道效应使得晶体管难以完全“关断”，功耗显著增加；其次，量子隧穿效应让电子像“幽灵”般穿过势垒，造成漏电；此外，硅有限的电子迁移率和相对较窄的带隙，使其难以在极小尺度下同时实现高速与低能耗的要求。

虽然摩尔定律在几十年内推动了硅基技术的繁荣，但随着物理极限的逼近，即便是英特尔、台积电和三星等龙头企业，也面临性能增益减缓、制造成本提升以及器件散热难等多重挑战。

2 二维半导体材料的物理特性

在硅逐渐接近极限的背景下，二维材料成为新型半导体的重要候选。2004年，海姆与诺沃肖洛夫利用机械剥离方法首次获得单层石墨烯，引发了凝聚态物理和材料科学领域的广泛研究^[1]。

二维材料通常由单层或少层原子层构成，受量子限域作用影响，其能带结构、载流子输运性质和光学跃迁行为均与三维块体显著不同；这些性质可通过层数、外加应变或电场加以调节，体现出三维半导体材料所不具备的可调控性。更重要的是，二维材料在平面外没有悬挂键缺陷，其完美性质的保持性可以薄到单原子层。在基于二维材料的场效应晶体管中，原子级厚度的沟道能

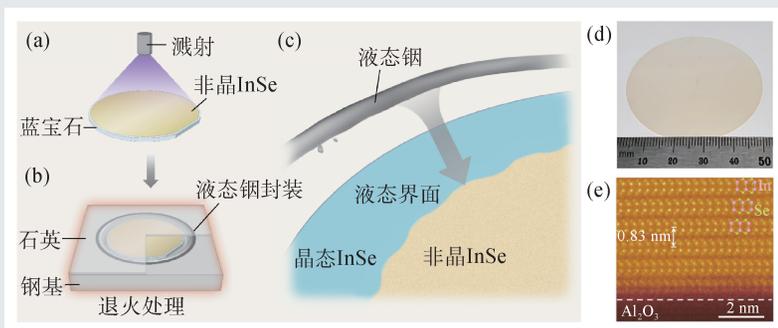


图1 用于硒化铟晶膜生长的固-液-固策略 (a)通过磁控溅射在单晶蓝宝石基底上沉积非晶硒化铟薄膜；(b)退火装置示意图：钢底座中心凹槽放置晶圆，外围凹槽容纳液态铟，顶部覆盖熔融石英板。液态铟用于密封硒化铟晶圆；(c)生长机制放大图：液态铟蒸发形成非晶与晶体硒化铟间的富铟界面，非晶态在此界面持续转化为晶体薄膜；(d)制备的两英寸硒化铟晶膜；(e)蓝宝石衬底上硒化铟的高角度环形暗场扫描透射电子显微镜(HAADF-STEM)截面图，揭示了ABC堆垛结构

够增强栅极电场对沟道的控制作用，从而有效抑制短沟道效应，使器件在亚1 nm尺度下仍能维持较强的静电控制能力。

此外，二维材料层间主要依赖范德瓦耳斯相互作用堆叠，而非化学键晶格匹配，这一特性使其可以构建异质结与人工超晶格，为研究新型量子输运机制、隧穿器件及非线性光学效应等提供实验平台。基于这些优势，MoS₂、WS₂、WSe₂等过渡金属硫族化物(TMDs)、黑磷(BP)、氧硒化物(Bi₂O₂Se)以及硒化铟(InSe)等多类二维半导体相继成为研究热点^[2-8]。

3 InSe 材料的优势与挑战

在诸多二维半导体候选材料中，InSe 因在带隙、有效质量和输运性质方面的综合优势而受到关注。其电子有效质量仅为0.14m₀(m₀是电子的静止质量)，比硅(0.19m₀)和多数TMDs(0.3m₀—

0.6m₀)更低，意味着载流子在其中能够以更快的速度运动；它的热速度超过1.3×10⁷ cm/s，高于硅(1.2×10⁷ cm/s)和TMDs(小于0.8×10⁷ cm/s)，有助于高速信号传输；InSe的理论室温迁移率可达1000 cm²/V·s，远超过多数二维半导体；同时，其具备约1.26 eV的适中带隙，既能满足低功耗逻辑电路的需求，又适用于光电子器件应用^[3,9]。这些优势使InSe在二维半导体材料中脱颖而出，成为理论上能够兼顾高性能和低功耗的理想材料。实验研究也证明，通过机械剥离获得的微米级InSe薄片，其晶体管器件在关键性能指标上超过硅的水平^[10]。

然而，In-Se二元体系的热力学与动力学复杂性为大面积InSe的可控外延生长带来挑战。首先，In-Se体系的相图极为复杂。除了InSe本身，还可能生成In₂Se₃、In₄Se₃以及In₆Se₇等多种稳定相，只要化学计量稍有偏差，就会形成杂相，显著劣化器件性能^[11]。其次，在典型的生长温度下，硒的蒸气压比铟高出7个数量级，要想维持严格的1:1化学计量十分困难，这导致薄膜中缺陷密布、结晶质量欠佳^[12]。即便使用金属有机化学气相沉积、分子束外延等先进方法，所获得的InSe薄膜在电学性能上仍落后于机械剥离样品^[11, 13]。

因此，实现大面积、纯相、高结晶性InSe薄膜的可控制备，是其能否真正进入产业化应用的关键科学与工程问题。

4 固—液—固界面生长策略与“蒸笼”方法

针对以上难题，我们提出了一种固—液—固界面生长策略，首次在晶圆尺度上制备出高结晶性、纯相的InSe薄膜^[14]。其核心思想是“先非晶，后结晶”。通

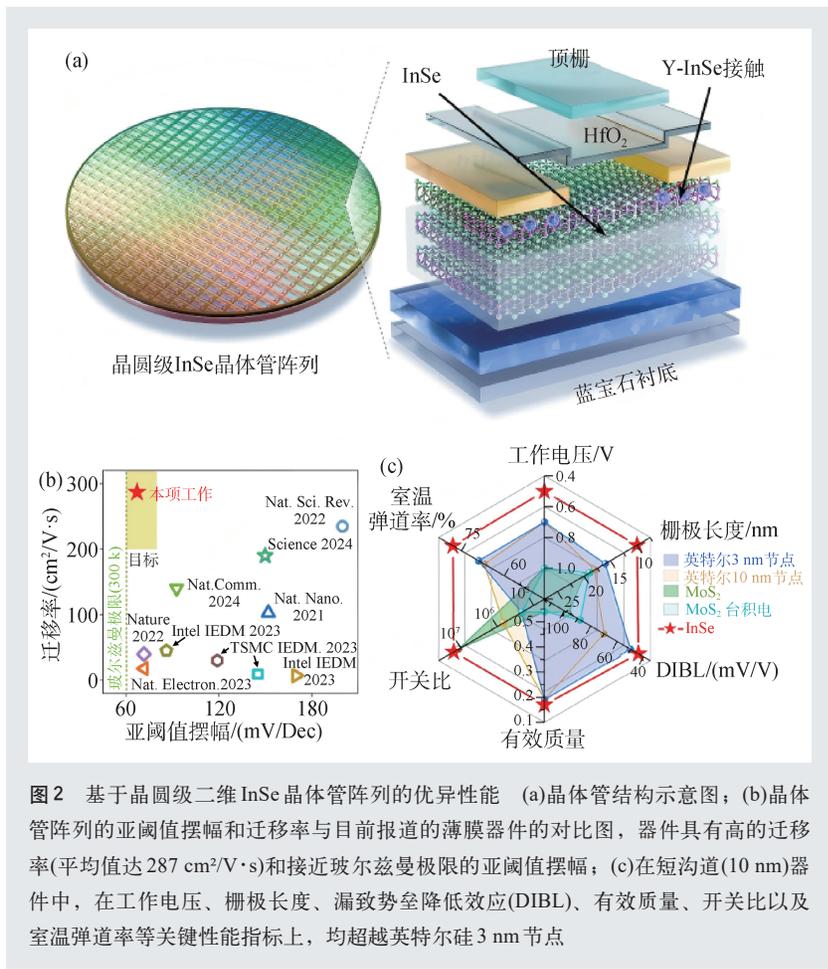


图2 基于晶圆级二维InSe晶体管阵列的优异性能 (a)晶体管结构示意图；(b)晶体管阵列的亚阈值摆幅和迁移率与目前报道的薄膜器件的对比图，器件具有高的迁移率(平均值达287 cm²/V·s)和接近波尔兹曼极限的亚阈值摆幅；(c)在短沟道(10 nm)器件中，在工作电压、栅极长度、漏致势垒降低效应(DIBL)、有效质量、开关比以及室温弹道率等关键性能指标上，均超越英特尔硅3 nm节点

过磁控溅射在蓝宝石衬底上沉积均匀的非晶 InSe 薄膜, 以保证整体化学计量比准确。随后, 将非晶 InSe 薄膜放入特制的“蒸笼”装置中, 样品被钢槽与石英片覆盖, 并在边缘用液态铟密封, 防止成分挥发。高温退火环境下, 液态铟中部分原子进入固态 InSe 非晶薄膜, 形成富铟液态界面。在该密闭反应体系中, 非晶 InSe 在这一界面处快速溶解一再结晶, 从而逐渐转化为高度有序的晶体结构(图 1)。该方法通过精准源控制, 结合“蒸笼”密封装置, 维持系统铟和硒的 1:1 计量比。同时, 富铟液态界面为原子迁移和结构重组提供了“活跃”的界面, 从而有效提升结晶质量。

基于该策略, 我们实现了 2 英寸 InSe 晶圆, 在整个晶圆范围内, 光谱学及电子显微成像表征结果都显示出材料的高结晶性和单一相结构。在器件性能方面, 我们制备的场效应晶体管显示出的平均迁移率为 $287 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、亚阈值摆幅为 $67 \text{ mV}/\text{Dec}$, 刷新了二维薄膜器件的新纪录; 在短沟道器件中, 其关键参数均优于硅基晶体管, 表明其在逻辑器件中的应用潜力(图 2)。

该固—液—固界面生长策略通过引入液态中间相, 实现对化学计量和相稳定性的调控, 从而提升了晶体质量, 为其他二维半导体材料的可控外延提供了普适性路径。

5 总结与展望

二维 InSe 晶圆的实现标志着二维半导体从实验室微米级样品迈向可扩展至工业级应用的重要进展。其在电子器件性能上的优势, 证明了二维半导体在后摩尔时代逻辑器件与光电子器件中的潜在应用价值(图 3)。

但同时, InSe 的大规模应用仍需解决若干关键问题。首先, 与现有 CMOS 工艺的兼容性尚需进一步验证, 特别是在金属接触、电极工艺和介质沉积方面。其次, InSe 薄膜在空气中的化学稳定性有限, 易受氧化和环境作用影响, 需借助界面封装或材料修饰提升稳定性。此外, 更大规模均匀性与工艺成本控制仍是产业化面临的瓶颈。

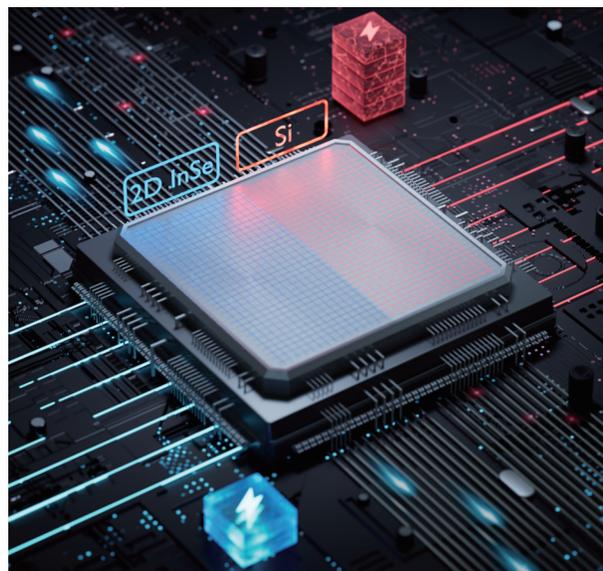


图 3 超越硅基极限的高能效二维硒化铟芯片的概念图

若这些问题逐步得到解决, InSe 有望在人工智能加速芯片、低功耗边缘计算、高速光通信与光电探测等领域展现独特性能。同时, 固—液—固界面生长策略作为一种普适的二维半导体生长方法, 也可能为 MoS_2 、BP、 WSe_2 等材料提供可行的扩展路径, 有望推动二维材料体系整体走向规模化应用。

参考文献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* *Science*, 2004, 306 (5696): 666
- [2] Li M Y, Su S K, Wong H S P *et al.* *Nature*, 2019, 567(7747), 169
- [3] Bandurin D A, Tyurnina A V, Yu G L *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2017, 12(3), 223
- [4] Li L, Wang Q Q, Wu F F *et al.* *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 1825
- [5] Wang J H, Xu X Z, Cheng T *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17(1): 33
- [6] Li L, Yu Y, Ye G J *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9(5): 372
- [7] Wu R, Tao Q, Li J *et al.* *Nat. Electron.*, 2022, 5(8): 497
- [8] Tan C, Yu M, Tang J *et al.* *Nature*, 2023, 616(7955): 66
- [9] Marin E G, Marian D, Iannaccone G *et al.* *IEEE Electr. Device Lett.*, 2018, 39(4), 626
- [10] Jiang J F, Xu L, Qiu C G *et al.* *Nature*, 2023, 616(7957): 470
- [11] Song S, Jeon S, Rahaman M *et al.* *Matter*, 2023, 6(10): 3483
- [12] Wu C H, Huang Y C, Ho Y T *et al.* *Nanomaterials-Basel*, 2022, 12(14): 2435
- [13] Salhi A, Abutaha A, Zekri A *et al.* *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2025, 7(4): 1398
- [14] Qin B, Jiang J, Wang L *et al.* *Science*, 2025, 389(6757): 299