镓基薄膜的诱导契合生长

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41185.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

镓基薄膜的诱导契合生长。导读

当前，高质量半导体薄膜的制备主要依赖于晶格匹配的外延生长或复杂转移技术，这些方法通常工艺繁琐且对衬底要求苛刻，难以在非晶或柔性衬底上实现高性能半导体薄膜的大规模集成，严重制约了其在柔性光电和神经形态计算等前沿领域的应用。镓基半导体作为重要的功能材料，在发展高速电子器件、宽谱光电探测和类脑芯片等方面具有显著优势，因此亟需开发一种弱衬底依赖且可扩展的薄膜生长新方法。近日，山东大学物理学院杨再兴教授、陈峰教授及李伟峰教授课题组联合香港城市大学何颂贤教授课题组提出一种创新的半导体薄膜生长策略—诱导契合生长，利用非晶GaOx薄膜表面富镓的特性，在多种衬底上成功实现GaSb、GaSe、GaAs等多种镓基半导体薄膜的生长。该方法生长的薄膜结晶性良好、表面平整致密。得益于GaOx独特的界面特性，所制备的镓基半导体晶体管表现出突触行为模拟能力；同时薄膜还具备宽谱、快速与稳定的光响应，适用于柔性红外成像与探测。该策略突破了传统外延对单晶衬底和高温工艺的限制，为发展下一代柔性电子、智能传感和低功耗类脑器件提供了新的材料平台与工艺路径。相关研究成果以Induced fit growth of Ga-based semiconductor thin films for brain-inspired electronics and optoelectronics，为题发表于《Light: Science Applications》。

研究背景

目前，高质量半导体薄膜的生长通常依赖于晶格匹配的衬底或缓冲层，依赖外延生长或合成后组装等工艺。然而，这类复杂的工艺、较高的生长温度难以完全满足现代物联网应用对半导体薄膜的多样化需求。现有技术制备的半导体薄膜在光电器件的高效光电转换、柔性全向器件所需的鲁棒柔韧性与高透明度，以及神经形态器件中的突触行为模拟等方面仍面临重大挑战。镓基半导体薄膜作为在高速电子器件、宽带光电探测、多色发光二极管和神经形态计算等领域广泛应用的重要材料，开发其弱衬底依赖的新型生长方法，对推动镓基半导体薄膜的多功能性与可扩展性具有重要意义。

研究亮点

受分子生物学中诱导契合概念的启发，本文提出了一种创新的薄膜生长策略，通过利用非晶GaOx薄膜表面富镓的特性，成功在多种功能性衬底上实现了镓基半导体薄膜的均匀生长。其中，所制备的GaSb薄膜表面光滑、致密（图1a），粗糙度低至5.76 nm（图1b）。高分辨透射电子显微镜（HRTEM）截面分析进一步表明，该薄膜结晶性良好。值得注意的是，在衬底与GaSb薄膜之间观察到一个明显的非晶中间层（图1c），经能谱（EDS）分析确认，该中间层成分为GaOx（图1d）。这一发现为理解薄膜生长机制及其界面特性提供了重要依据。

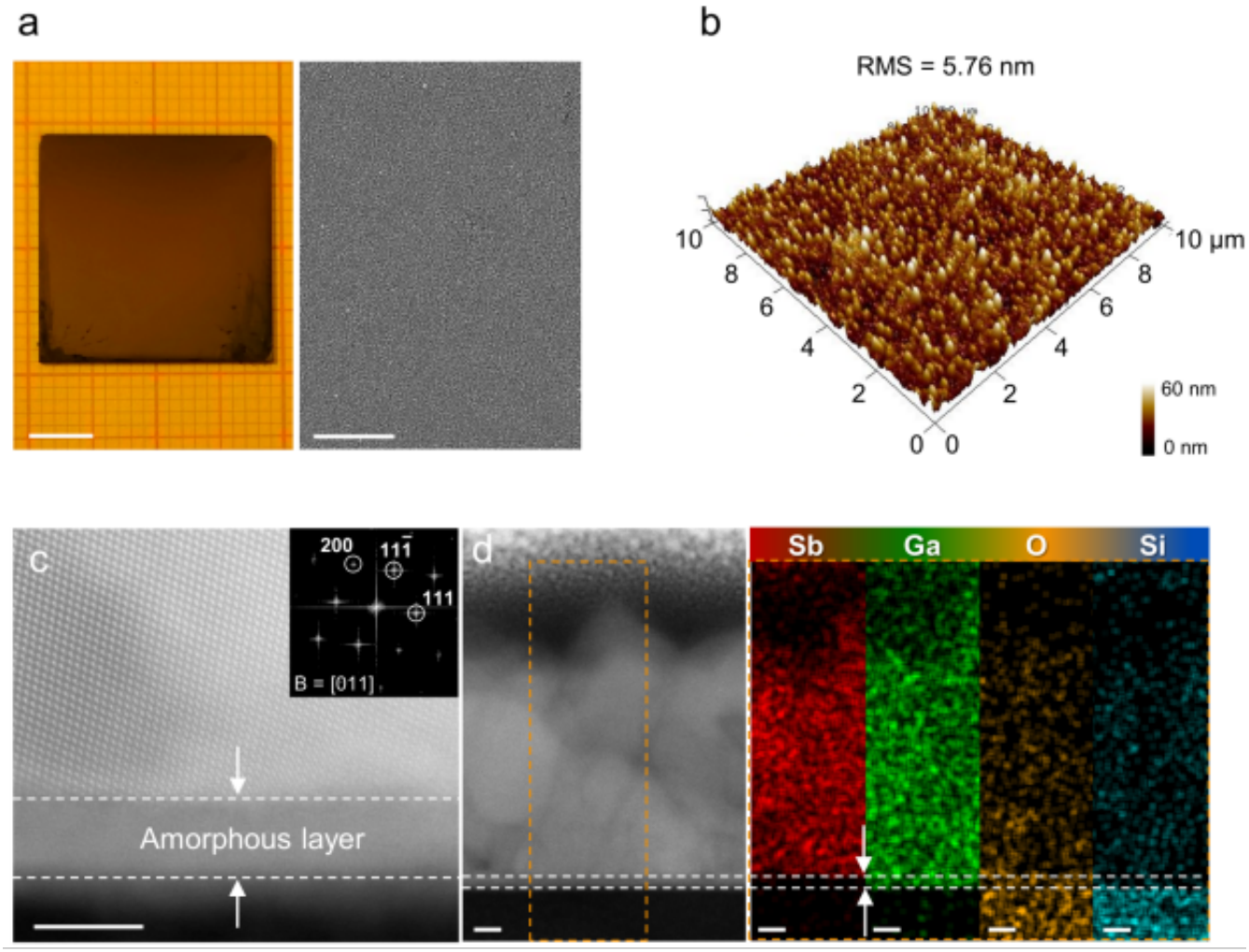


图1: (a) 所制备GaSb薄膜的光学图像与SEM图像；(b) 所制备GaSb薄膜的表面粗糙度；(c) 截面HRTEM图像；(d) 截面STEM图像与EDS mapping图像

研究团队进一步采用刻蚀深度依赖的X射线光电子能谱（XPS）与第一性原理计算相结合的方法，对镓基半导体薄膜的生长机制进行了验证。XPS结果表明，GaOx薄膜表面具有富Ga特性（图2a）；通过对所制备的GaSb薄膜进行刻蚀分析，发现GaOx薄膜表面的富Ga位点有效促进了Sb蒸气原子的沉积，从而促进GaSb薄膜的生长（图2b）。理论模拟揭示，随时间推移，Ga原子倾向于向外扩散，而O原子则从表面向体内渗透，共同导致富Ga的GaOx表面层的形成（图2c）。为探究Sb蒸气原子在诱导拟合生长过程中的热力学行为，团队还模拟了单个Sb原子分别趋近GaOx表面随机选取的三个O原子和Ga原子的过程。结果表明，Sb与Ga之间的结合能始终低于Sb与O之间的结合能，说明Sb原子更倾向于与Ga结合而非O（图2d），从能量角度证实了Ga在镓基半导体薄膜成膜过程中的主导作用。

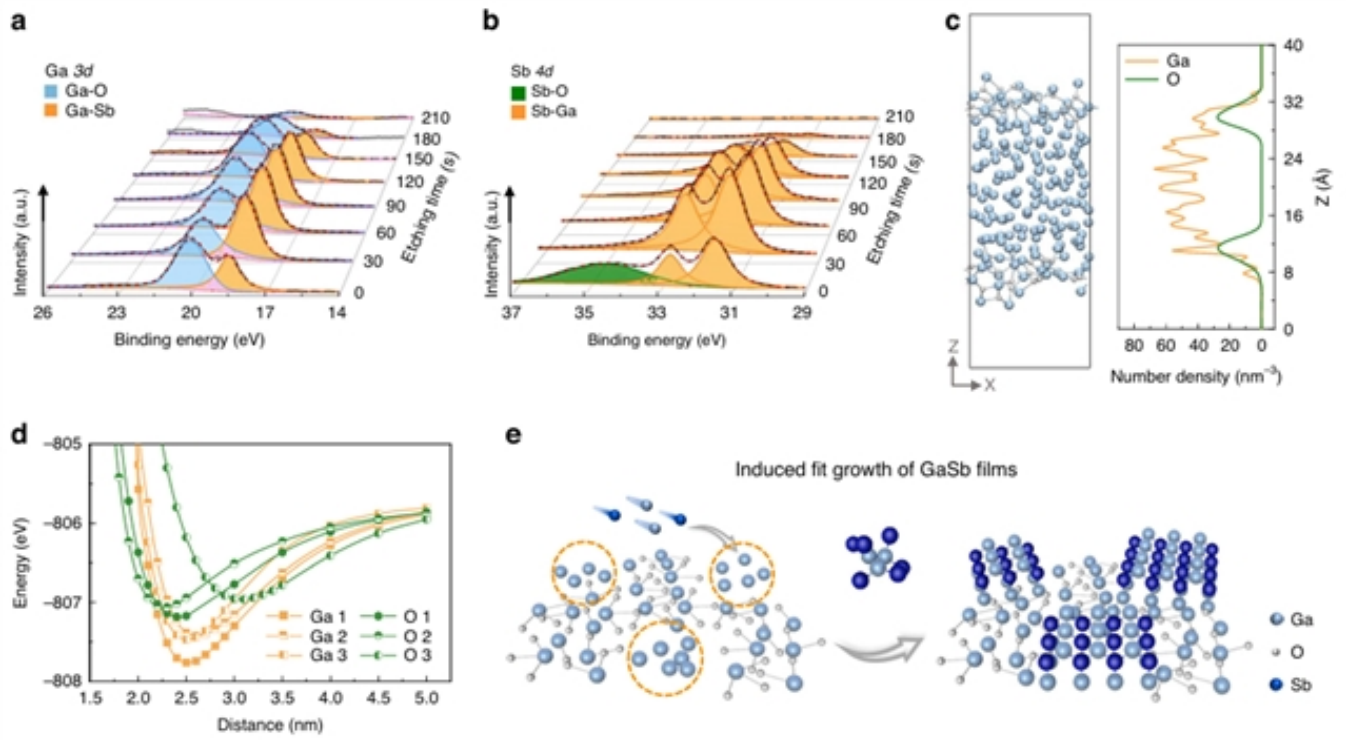


图2: (a-b) 刻蚀时间依赖的GaSb薄膜的Ga 3d和Sb 4d的XPS光谱；(c) 优化后的GaOx晶胞中Ga和O原子沿z轴的数目密度分布示意图; (d) 引入的Sb原子逐渐接近选定的三个Ga或O原子时的能量变化曲线; (e) 诱导拟合生长GaSb薄膜示意图

在成功制备GaSb薄膜的基础上，研究团队进一步实现了薄膜的图案化，并基于该薄膜制备出性能优异的晶体管阵列。电学测试结果表明，所制备的GaSb薄膜晶体管展现出良好的p型特性（图3a）。此外，凭借GaOx中间层的独特界面效应，该晶体管成功模拟出了生物突触行为（图3b），显示出在神经形态计算中的应用潜力。同时，研究团队还展示了GaSb薄膜阵列在红外成像中的应用，且该薄膜表现出优异的宽谱光电探测能力（图3c），进一步凸显了其在光电子器件领域的应用价值。

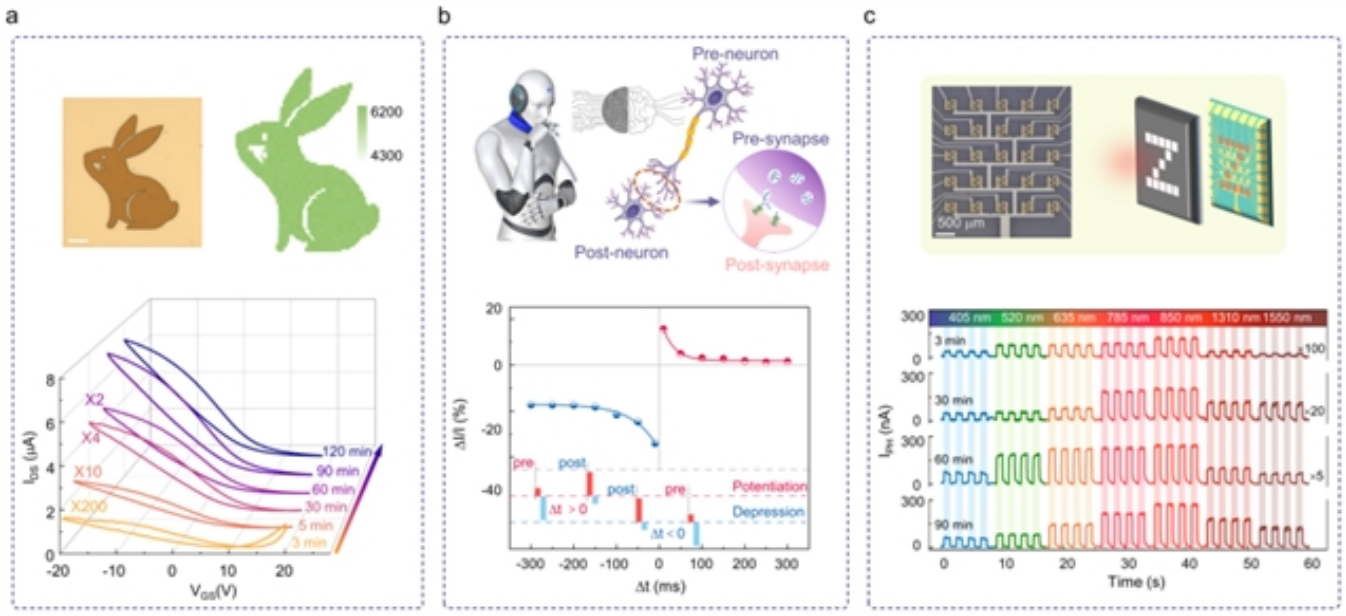


图3: (a) GaSb薄膜的图案化和转移曲线；(b) GaSb薄膜制备的突触器件; (c) GaSb薄膜制备的光电探测器阵列和宽谱探测性能

得益于GaOx薄膜表面富镓的特性，研究团队进一步成功制备了多种镓基半导体薄膜，包括GaSe、GaAs和GaAsSb。图4a所示，所有这些薄膜均表现出光滑且致密的表面形貌。以GaAsSb薄膜为例，以其为沟道材料的晶体管成功实现了突触功能的模拟（图4b）。此外，GaSe、GaAs及GaAsSb薄膜均展现出快速且稳定的光电响应（图4c-4d），证明了其优异的光电特性。以上结果表明，本文所提出的诱导契合生长策略具有良好的普适性，能够用于制备多种高质量的镓基半导体薄膜，为其在电子与光电子器件领域的广泛应用奠定了基础。

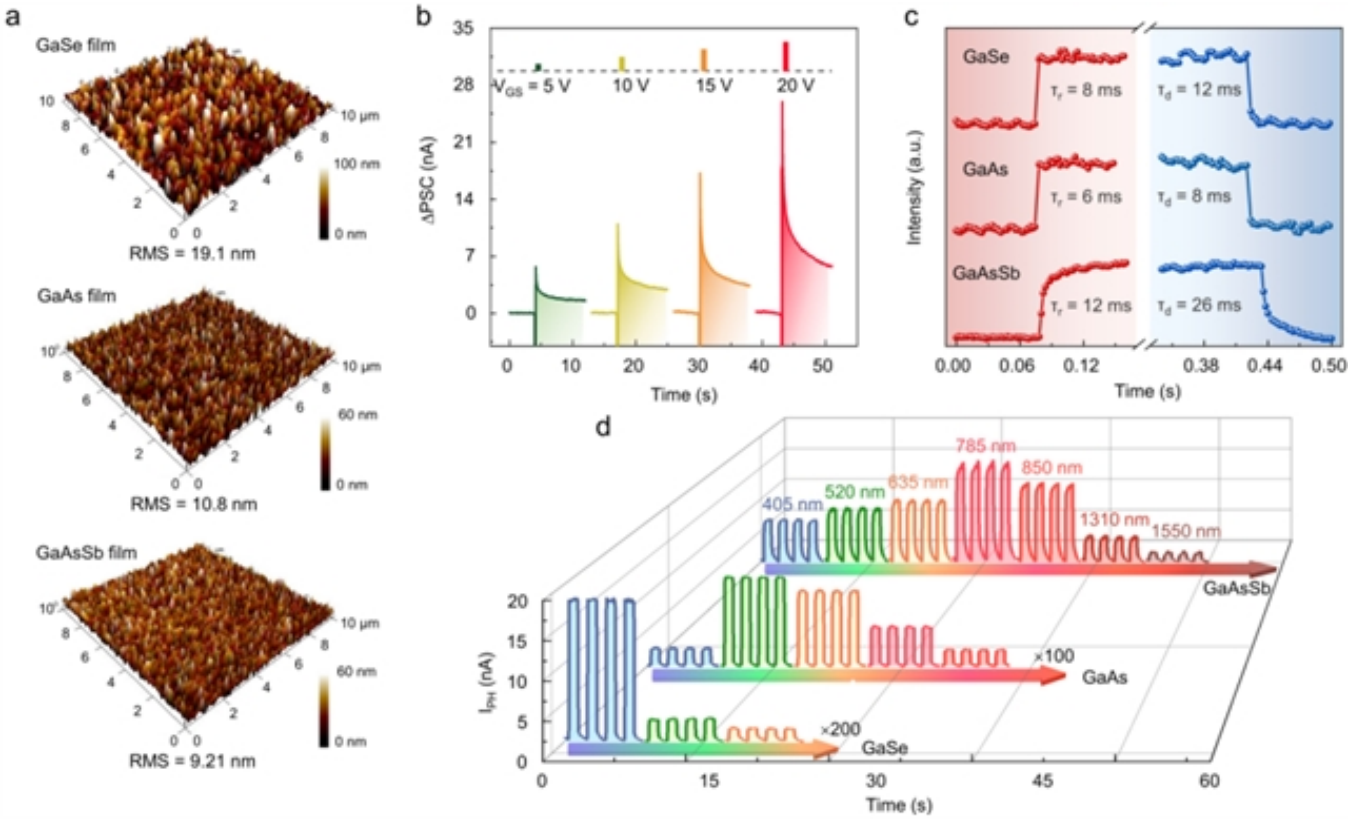


图4: ：(a) 制备的GaSe、GaAs和GaAsSb薄膜的三维AFM图像; (b) GaAsSb薄膜晶体管的突触可塑性; (c-d) 制备的GaSe、GaAs和GaAsSb薄膜光电探测器的响应时间和波长依赖的宽谱探测行为

总结与展望

本研究提出了一种基于诱导契合生长策略方法，实现了多种镓基半导体薄膜（包括GaSb、GaSe、GaAs和GaAsSb）在不同衬底上的大规模、可控制备。实现了对薄膜厚度和表面粗糙度的有效控制，并成功实现薄膜图案化、构筑了p型导电特性与突触功能的晶体管。所制备的全向柔性光电探测器在极低入射角及多次弯折条件下仍保持稳定光响应，显示出卓越的环境适应性与弯折鲁棒性。该生长策略为镓基半导体薄膜的可控制备与多功能集成提供了简单而高效的途径。

展望未来，本研究提出的诱导适配生长方法可进一步拓展至更大面积、更多元半导体材料体系，实现在非晶、柔性乃至异质衬底上的高性能器件集成，从而突破传统外延技术对晶格匹配与高温工艺的依赖。该策略有望推动镓基半导体薄膜在高效光电转换、柔性电子、神经形态计算等方向的实际应用，为下一代物联网、智能传感、可穿戴设备等领域提供核心材料与工艺基础。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-02096-2

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：杨再兴等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发