

# $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ 铁电沟道场效应晶体管及其突触性能\*

胡辰<sup>1,2</sup>, 彭松昂<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院大学集成电路学院, 北京 100049

2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029

**摘要:** 利用机械剥离法制备  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  二维铁电材料, 通过原子力显微镜分析样品的结构特征, 并通过电子束光刻制备以  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  作为沟道的铁电沟道场效应晶体管。研究发现: 通过在顶栅电极施加正负脉冲可以有效激励  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  面外极化, 表现出增强和抑制的短程可塑性。并且, 随着栅极电压脉冲积累,  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  面外极化特性会使得沟道铁电极化加强, 对应的突触电流也会随之增加, 从而实现由短程可塑性向长程可塑性的转变。此外, 不同脉幅的激励信号可以调整长时程增强特性, 展现了器件应用于复杂突触学习行为的可行性。

**关键词:** 机械剥离法;  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  二维铁电材料; 面外极化; 铁电沟道场效应晶体管; 突触晶体管

**中图分类号:** TB34; TM23 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)03-0103-06

## Two-dimensional ferroelectric $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ channel transistors and their synaptic properties

HU Chen<sup>1,2</sup>, PENG Songang<sup>1,2</sup>

1. School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** Two-dimensional ferroelectric  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  was fabricated using the mechanical exfoliation method, and the structural characteristics of the samples were analyzed by atomic force microscopy (AFM). Ferroelectric channel transistors with  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  as the channel were prepared by electron beam lithography. This work reveals that the out-of-plane polarization of  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  can be effectively modulated by applying electrical pulses to the top-gate electrode, enabling the short-term plasticity (STP) through synaptic potentiation and depression. Significantly, cumulative gate voltage pulses amplify the ferroelectric polarization in the channel via domain alignment dynamics, resulting in a progressive enhancement of synaptic current, which facilitates transition from STP to long-term plasticity (LTP). Furthermore, the tunable LTP characteristics modified by pulse amplitude engineering demonstrate the capability of  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  device to emulate complex synaptic learning rules.

**Key words:** mechanical exfoliation; two-dimensional ferroelectric  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ ; out-of-plane ferroelectricity; ferroelectric channel transistors; synaptic transistors

\* 收稿日期: 2025-03-02

录用日期: 2025-03-13

网络首发日期: 2025-04-08

基金项目: 科技创新 2030 -“脑科学与类脑研究”重大项目(2022ZD0209200)

作者简介: 胡辰(2000年生), 男; 研究方向: 低维材料神经形态器件; E-mail: huchen@ime.ac.cn

通信作者: 彭松昂(1987年生), 男; 研究方向: 低维材料电子器件及电路;

E-mail: pengsongang@ime.ac.cn

全文阅读



ZR20250041

铁电性作为凝聚态物理领域的重要发现,其本质源于晶体原胞内原子偏离对称中心位置形成的本征电偶极矩。铁电材料在外电场作用下可实现偶极矩方向的可逆翻转,表现出非易失性的多态极化特性,因而被广泛应用于铁电随机存取存储器(FeRAM)等电子器件(Setter et al., 2006)。然而,传统铁电体在纳米尺度的应用面临两大核心瓶颈:(1)界面退极化效应:材料表面/界面处晶格对称性破缺与环境异质性导致极化电荷屏蔽不完全,诱发退极化场,迫使体系自发进入去极化态;(2)临界厚度限制:当薄膜厚度降至临界值(通常为几纳米量级)时,受去极化场增强、表面悬挂键和界面效应的制约,铁电性随之减弱甚至消失(Junquera et al., 2003)。

这一尺寸效应严重制约了铁电器件在超高密度存储与微型化逻辑电路中的进一步发展。近年来,二维原子晶体材料的兴起为突破上述限制提供了全新路径,二维铁电材料 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 不仅表现出室温铁电性,还表现出垂直/平行于界面的铁电性,这是由材料中不同层级原子位置的不对称性所导致的,其通过面内/面外极化耦合(Ding et al., 2017),使得薄膜中的偶极子的互锁效应保持稳定的铁电序(Cui et al., 2018; Wan et al., 2019; Xue et al., 2019; Wang et al., 2021),这些特性不仅推动了纳米电子学器件的革新,更为探索低维材料神经形态应用提供了平台(Wang et al., 2017)。

传统的铁电场效应晶体管使用铁电体作为栅介质层,通常只能提供极化束缚电荷一种调控器件电导的方式(Si et al., 2019),而以 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 作为沟道层,同时具有极化束缚电荷和自由移动电荷两种调控机制。国内外科研人员对于 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 材料物理特性进行了不少研究(Chen et al., 2023; Urakami et al., 2024; Wang et al., 2024),并对其在神经形态的应用提出了诸多建议(Wan et al., 2019; Wang et al., 2022; Yin et al., 2024),但在利用二维 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 薄膜的半导体特性构建电子器件方面,特别是通过其面内/面外极化特性调控器件突触仿生功能的研究体系尚未完善。为此,本研究构筑了以 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 为沟道的场效应晶体管(FeCTs, ferroelectric channel transistors),系统探究激励信号的数量和激励信号的强弱对突触可塑性的调控机制。该工作旨在突破传统铁电器件受制于界面退极化效应与临界厚度限制的困境,通

过构建可以实现短时程向长时程转变的新型人工突触元器件,为发展高密度集成的类脑芯片提供解决方案。

## 1 实验方法

### 1.1 样品制备及表征

传统的铁电场效应晶体管采用铁电材料作为栅介质层通常需要严格的实验条件来稳定铁电特性,且在制备过程中有高温退火和较高初始电压稳定介质层铁电性的要求,给器件带来不确定性。采用机械剥离法制备的二维铁电材料 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 作为沟道材料,可以有效避免高温退火工艺,并且相较于传统铁电场效应晶体管引入了一种自由移动电荷的机制。机械剥离法是一种高效、便捷地制备层状二维材料的方法(Huang et al., 2020)。相比于液相剥离法等化学方法制备的样品,此种方法制备的样品表面更干净,样品相对缺陷更少。

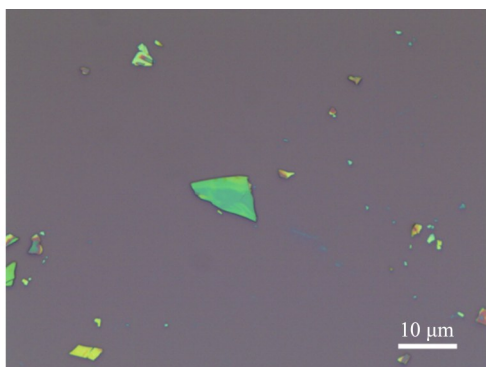
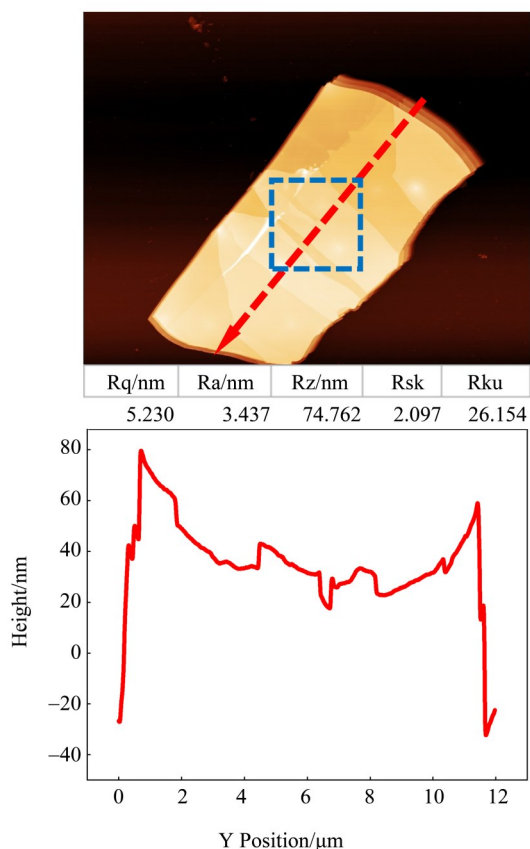
采用购自于深圳六碳科技公司的二维 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 材料晶体进行机械剥离。通过低黏性PE蓝胶反复对折的方式使得大块材料减薄,以将蓝胶放置在显微镜下观察的方式,以样品颜色确认 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 层状材料厚度。然后,将减薄后的样品转移到带有十字标记的氧化硅衬底上,为了使更多样品得以转移至衬底上,可以将带蓝胶氧化硅衬底在100 °C热板上加热后,再进行剥离操作,一般合适厚度的样品将在氧化硅衬底上呈现蓝绿色。最后,在光学显微镜下寻找硅基底上合适厚度的样品,可以通过样品的颜色来判断其厚度是否合适。

图1为机械剥离后得到的 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 样品的光学显微镜照片。为了验证机械剥离的 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 样品厚度满足极化强度达到饱和和所需厚度,对样品薄片进行AFM测试。如图2所示,样品沿红色虚线测试 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 薄膜高度,箭头表示测试方向为薄膜右上方至薄膜左下方,蓝色区域为沟道区域,AFM样品图片下方附表为粗糙度统计数据。通过蓝胶机械剥离得到的 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 材料厚度在60~100 nm,此厚度满足极化强度饱和和所需厚度(两个5原子层即可满足极化强度饱和),适用于器件制备。

### 1.2 器件制备

本器件制备采用以下关键工艺步骤:

(1) 铁电沟道层制备:通过机械剥离法获取厚度均匀的 $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ 薄层样品,原子力显微镜表征厚度约为90 nm,如图2所示蓝色虚线沟道材料区域内材料表面粗糙度(Ra)为3.437 nm,表明机械

图1  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  薄膜光学显微镜图Fig. 1 Optical microscopy image of  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  film prepared图2  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  薄膜 AFM 图Fig. 2 The AFM result of  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  samples

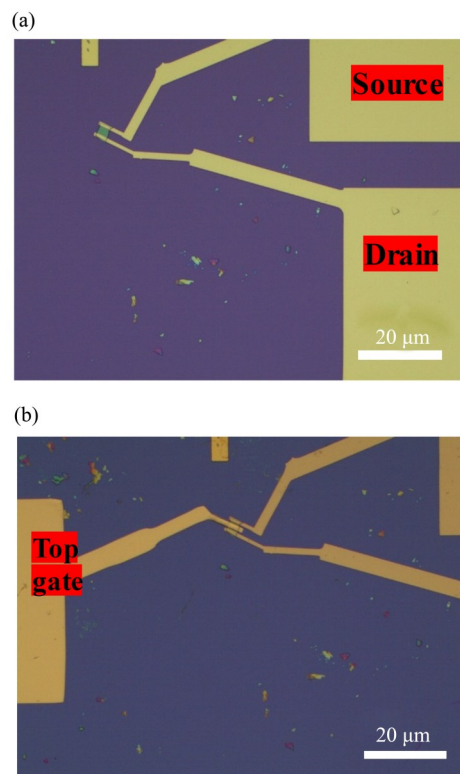
剥离的  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  纳米片表面较为均匀。

(2) 源漏接触电极制备: 采用无掩模版电子束光刻技术定义电极图形, 电子束光强 BI 设置为 6, 剂量设置为  $100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 曝光因子设置为 3。随后通过电子束蒸发依次沉积钛 (Ti) 20 nm/金 (Au) 100 nm 双层金属作为欧姆接触电极, 并经剥离工艺 (lift-off) 形成源漏接触电极, 这种光刻方式的优势在于可以根据衬底上材料的形貌和颜色, 在合适厚度区域制备器件。

(3) 栅介质层沉积: 利用原子层沉积在沟道

表面生长 5 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  栅介质层, 以三甲基铝作为铝源, 生长温度  $200^\circ\text{C}$ , 43 次循环即可获得 5 nm 薄膜。

(4) 顶栅电极集成: 利用电子束光刻定义顶栅区域, 重复 Ti/Au 金属沉积与剥离工艺形成顶栅结构, 最终获得基于  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  的铁电沟道顶栅晶体管, 源极 (Source)、漏极 (Drain) 和栅极 (Top gate) 分布如图 3 所示。

图3  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  铁电沟道顶栅晶体管光镜图Fig. 3 Optical image of FeCTs based on  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ 

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物突触短程可塑性模拟

在神经科学中, 突触可塑性是突触在外界激励刺激下使突触连接强度得到突然增强或减弱的的能力。在接收到激励信号刺激后, 突触强度的变化会以一定的时间常数逐渐衰退, 激励的作用效果可以在较长时间内保持, 在神经科学上常被称为长时程记忆, 而激励产生的响应只能保持较短时间的情况, 则被称为短时程记忆, 通常在生物神经系统中, 短时程记忆的时间尺度一般为几十毫秒, 而长时程的时间尺度可以到几个小时 (Chen et al., 2018)。

本文利用单个正负栅压脉冲激励, 测试了采

用机械剥离法制备的  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  器件的突触性能。

针对  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  的面外极化特性, 提出以下理论解释其高/低阻态的产生。当栅电极上施加一个 5 V 的正压时, 铁电薄膜内部极化方向为由上向下, 内部带正电的极化束缚电荷聚集在铁电薄膜下表面, 而分别分布在下表面和上表面的正负可移动电荷则会形成内建电场以保持极化束缚电荷。同时, 聚集在铁电薄膜下表面的自由电子被  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  衬底界面的氧空位捕获, 从而导致  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  薄膜中的载流子浓度下降, 器件电导变低, 此时表现为高阻态(HRS); 而在顶栅电极上施加一个 -5 V 的负压时, 铁电薄膜内部极化方向变化为由下向上, 内部带正电的极化束缚电荷聚集在铁电薄膜上表面, 同时薄膜内部的自由电子远离  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  铁电薄膜下表面, 并在外部电场的驱动下定向移动, 此时器件表现为低阻态(LRS)。

在固定脉宽为 100 ms, 脉冲幅度(peak)分别为  $\pm 5$  V 的情况下, 从栅极对器件分别施加单个脉冲, 结果如图 4 所示。如图 4(a)所示, 当脉冲激励信号结束时, 检测得到的突触后膜电流(PSC)比激励信号施加之前的初始值高了  $0.86 \mu\text{A}$ , 该差值定义为  $\Delta\text{PSC}$  ( $0.86 \mu\text{A}$ ), 以表示突触响应施加在顶栅电极上的正脉冲激励信号而产生的增强行为。图 4(b)具体显示了在激励信号激发下的抑制行为, 检测得到的  $\Delta\text{PSC}$  为  $-1.16 \mu\text{A}$ , 代表了突触响应该激励信号而产生的抑制行为, 这证实基于  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  的铁电沟道场效应晶体管可以实现短程可塑性。

从图 4(a)和 4(b)的结果可以看出,  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  铁电沟道场效应晶体管对于正向电压脉冲和反向电压脉冲产生的激励信号的突触响应行为是完全相反的。

## 2.2 生物突触长程可塑性模拟

此外, 在生物神经系统中, 在连续施加激励信号刺激后, 所产生的总的突触响应增强会在一个较长的时间内保持, 即实现由短时程记忆向长时程记忆的转变(Chang et al., 2011)。如图 5(a)和 5(b)所示, 在连续施加多个脉冲激励(peak = -3 V, 20 ms; peak = 3 V, 20 ms)后, 器件发生了从短时程记忆向长时程记忆的转变, 并在停止脉冲激励后, 实现较长时程突触响应保持。

短时程记忆向长时程转变的原因可能为(Jeon et al., 2025): 结合 Landau-Khalatnikov 方程模型分

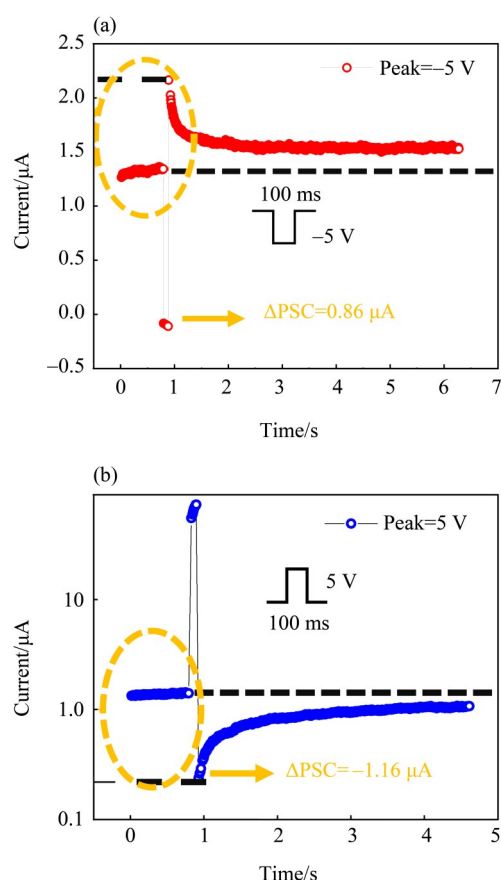


图 4  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  器件对于单个正负栅极脉冲激励的响应行为  
Fig. 4 The response of the device to single positive and negative pulse excitation from gate electrode

析, 铁电薄膜中的退极化场会抑制极化的稳定性, 而不断施加的栅脉冲使得自由可移动电荷重新分布, 并在铁电薄膜上下表面不断积累, 从而抵消一部分退极化场的影响, 增强极化强度及其稳定性, 进而实现了短时程向长时程的转变。

图 6 所示为在经历  $N = 80$  次连续脉冲激励后, 于固定源漏电压 ( $V_{\text{DS}} = 1$  V) 下的电学响应特性。结果表明,  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  铁电沟道场效应晶体管可以在  $\geq 60$  s 的时间尺度内维持高/低阻态窗口值  $> 10$ , 揭示了易失性和非易失性的共存与演化, 映射生物神经系统中短时程可塑性向长时程可塑性转化的突触动力学特征。

图 7 展示了  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  器件在脉宽为 20 ms, 脉冲幅度分别为 -3 V 和 -5 V 的条件下的长时程增强特性, 结果进一步阐明了这种长时程可塑性通过精确调制施加在栅极的脉冲激励强弱, 可调控器件的长时程增强响应行为, 以实现多模态的突触行为。

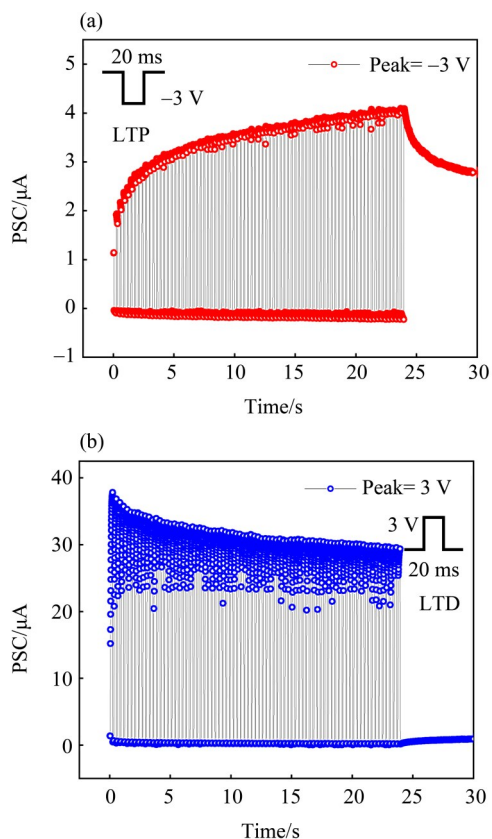


图5  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  器件对于多个 ( $N = 80$ ) 正负栅脉冲激励的响应行为

Fig. 5 The response of the device to multiple positive and negative pulse ( $N = 80$ ) excitation from gate electrode

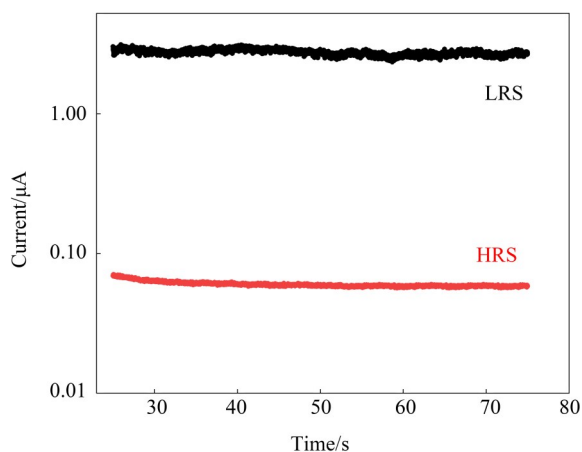


图6  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  器件保持特性

Fig. 6 Retention characteristic of FeCTs based on  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$

### 3 结论

针对铁电器件在超高密度存储和微型化逻辑电路中的发展需求, 提出了一种基于二维铁电材料  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  的铁电沟道场效应晶体管, 旨在利用其

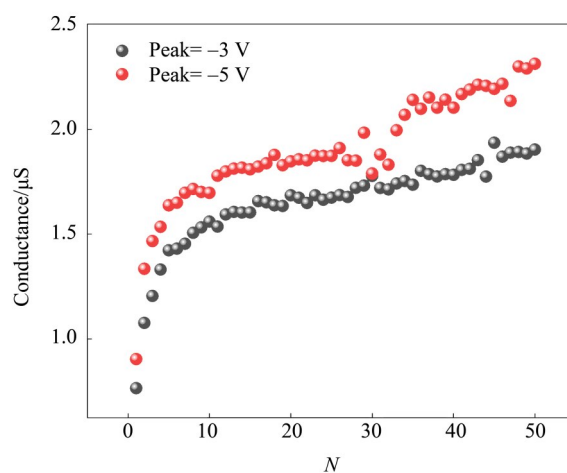


图7  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  器件在不同脉幅下的长时程增强特性

Fig. 7 Long-term potentiation characteristics of  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  devices under various pulse amplitudes

能在室温以及原子级厚度下保持铁电性和面内面外极化耦合的特性, 制备一种低成本、高集成密度且可以实现短时程向长时程转变的新型人工突触元器件。

相较于应用广泛的基于  $\text{HfO}_2$  的突触器件, 本文的铁电沟道场效应晶体管不需要提前进行电预处理以及退火处理, 简化了实际应用场的需求。并且,  $\text{HfO}_2$  的突触器件会由于导电细丝形成与断裂过程中产生焦耳热以及扩散机制而存在可靠性问题。相较之下, 本文器件通过自由移动电荷积累增强了极化稳定性, 进而实现短程可塑性向长程可塑性的转变; 而通过脉冲幅值调控长时程可塑性的行为, 可以适用于脉冲神经网络(SNN)中的图像识别功能; 通过强化重要特征的突触权重(比如: 人脸关键识别特点), 实现了分类鲁棒性的提升(Yuan et al., 2017; Zhang et al., 2021; Wang et al., 2024)。

总而言之, 本文利用机械剥离法制备  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  薄膜, 并采用电子束光刻定点制备  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  铁电沟道场效应晶体管, 基于  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  内部同时存在极化束缚电荷和自由移动电荷的特点, 使得样品展现出稳定可调节的短程可塑性突触性能。并且, 随着电压脉冲积累, 铁电极化得到增强, 实现由短程可塑性向长程可塑性的转变, 并且实现了不同脉幅对长时程增强行为的调控, 为发展高密度集成的类脑芯片于提供了解决方案。

## 参考文献:

- CHANG T, JO S H, LU W, 2011. Short-term memory to long-term memory transition in a nanoscale memristor [J]. *ACS Nano*, 5(9): 7669–7676.
- CHEN Y, YU H, GONG J, et al, 2018. Artificial synapses based on nanomaterials [J]. *Nanotechnology*, 30 (1) : 012001.
- CHEN Y, ZHANG M, LI D, et al, 2023. Bidirectional synaptic phototransistor based on two-dimensional ferroelectric semiconductor for mixed color pattern recognition[J]. *ACS Nano*, 17(13): 12499–12509.
- CUI C, HU W J, YAN X, et al, 2018. Intercorrelated in-plane and out-of-plane ferroelectricity in ultrathin two-dimensional layered semiconductor  $\text{In}_2\text{Se}_3$  [J]. *Nano Lett*, 18(2): 1253–1258.
- DING W, ZHU J, WANG Z, et al, 2017. Prediction of intrinsic two-dimensional ferroelectrics in  $\text{In}_2\text{Se}_3$  and other III2–VI3 Van Der Waals materials [J]. *Nat Commun*, 8(1): 14956.
- HUANG Y, PAN Y H, YANG R, et al, 2020. Universal mechanical exfoliation of large-area 2D crystals [J]. *Nat Commun*, 11(1): 2453.
- JEON Y R, KIM D, BISWAS C, et al, 2025. Enhanced synaptic memory window and linearity in planar  $\text{In}_2\text{Se}_3$  ferroelectric junctions [J]. *Adv Mater*, 37(6): 2413178.
- JUNQUERA J, GHOSEZ P, 2003. Critical thickness for ferroelectricity in perovskite ultrathin films [J]. *Nature*, 422(6931): 506–509.
- SETTER N, DAMJANOVIC D, ENG L, et al, 2006. Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications [J]. *J Appl Phys*, 100(5): 051606.
- SI M, SAHA A K, GAO S, et al, 2019. A ferroelectric semiconductor field-effect transistor [J]. *Nat Electron*, 2 (12): 580–586.
- URAKAMI N, OZAKI S, HASHIMOTO Y, 2024. Bulk photovoltaic effect of an alpha-phase indium selenide ( $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ ) crystal along the out-of-plane direction [J]. *Appl Phys Lett*, 125(7): 073102.
- WAN S, LI Y, LI W, et al, 2019. Nonvolatile ferroelectric memory effect in ultrathin  $\alpha$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  [J]. *Adv Funct Mater*, 29(20): 1808606.
- WANG S, LIU L, GAN L, et al, 2021. Two-dimensional ferroelectric channel transistors integrating ultra-fast memory and neural computing [J]. *Nat Commun*, 12 (1): 53.
- WANG S, LIU X, ZHOU P, 2022. The road for 2D semiconductors in the silicon age [J]. *Adv Mater*, 34 (48): 2106886.
- WANG Y, ZHAY, BAO C, et al, 2024. Monolithic 2D perovskites enabled artificial photonic synapses for neuromorphic vision sensors [J]. *Adv Mater*, 36(18): 2311524.
- WANG Z, JOSHI S, SAVEL' E V S E, et al, 2017. Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing [J]. *Nat Mater*, 16 (1) : 101–108.
- XUE F, HE X, RETAMAL J R D, et al, 2019. Gate-tunable and multidirection-switchable memristive phenomena in a Van Der Waals ferroelectric [J]. *Adv Mater*, 31(29) : 1901300.
- YIN L, CHENG R, DING J, et al, 2024. Two-dimensional semiconductors and transistors for future integrated circuits [J]. *ACS Nano*, 18(11): 7739–7768.
- YUAN F, ZHANG Z, LIU C, et al, 2017. Real-time observation of the electrode-size-dependent evolution dynamics of the conducting filaments in a  $\text{SiO}_2$  layer [J]. *ACS Nano*, 11(4): 4097–4104.
- ZHANG Y, MAO G Q, ZHAO X, et al, 2021. Evolution of the conductive filament system in  $\text{HfO}_2$ -based memristors observed by direct atomic-scale imaging [J]. *Nat Commun*, 12(1): 7232.

(责任编辑 王海蓉)