

---

# 基于可编程梯度掺杂机制的二维可重构碲化钼器件

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/24936.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！*

基于可编程梯度掺杂机制的二维可重构碲化钼器件。

北京时间2023年11月14日，清华大学材料学院刘锴课题组在Nature

Electronics发表了题为Programmable graded doping for reconfigurable molybdenum ditelluride devices的研究论文。

可重构晶体管能够扩展集成电路的功能，减小器件的有效线宽，从而提升系统的集成度。然而硅基晶体管仅能通过控制电路和附加的存储单元实现芯片层级的可重构性，导致系统复杂性升高并使得制造成本增加。二维半导体材料具有实现晶体管器件可重构功能的巨大优势，但如何在低结构复杂度的器件上实现丰富的可重构功能，仍然是极具挑战性的难题。

在该论文中，作者利用双极性的二碲化钼（MoTe<sub>2</sub>）沟道材料，提出了一种基于沟道梯度掺杂机制的二维可重构器件构建方法。该方法在结构简单的单栅极晶体管器件中实现了迄今报道的最为丰富的可重构功能，包括极性可调的二极管，存储器，逻辑存储器，三端人工神经突触器件的生物同突触可塑性、异突触可塑性的稳态功能和异突触元可塑性，解决了可重构器件的低结构复杂度与丰富的可重构功能之间的矛盾难题。

自从集成电路发明以来，晶体管尺寸的不断微缩推动信息时代飞速发展。但是，随着制程节点进入亚10纳米，传统硅基场效应晶体管由于受到短沟道效应等限制，器件尺寸进一步缩小日渐困难。在后摩尔时代，为了不实际缩小器件尺寸而继续获得缩放的性能优势，人们提出了可重构晶体管的概念。可重构晶体管可以在单个晶体管器件上实现多种自由切换的功能，因此能够扩展集成电路的功能，减小器件的有效线宽，从而提升系统的集成度。然而，硅基晶体管难以实现单器件层级的可重构性；虽然可以通过控制电路和附加的存储单元实现芯片层级的可重构性，但是这些附加电路和存储单元导致系统复杂性升高、集成度下降、制造成本增加。因此，发展超越硅基的新型可重构器件成为集成电路领域发展的迫切需求。

以过渡金属硫族化物（TMDCs）为代表的二维半导体材料拥有原子级厚度、无悬挂键的层状结构和易被外场调控的电学性能，具有实现晶体管器件可重构功能的巨大优势。为了构建二维可重构器件，需要对二维半导体沟道材料进行可逆掺杂；为了进一步实现更多的可重构功能，则需要对可逆掺杂位点进行局域精细化调控。这使得器件的结构复杂度与可重构功能的丰富性之间存在天然的矛盾。例如，低结构复杂度的器件，如单栅极可重构器件，仅能实现两种或三种可重构功能；为了实现三种以上的可重构功能，人们发展出多栅极器件和离子型栅极器件，但多栅极或异质材料的引入又使得二维可重构器件像硅基可重构器件面临的困境一样，不可避免地增加了系统复杂性和制造成本。因此，使用具有低结构复杂度的器件实现丰富的可重构功能仍然极具挑战性。

。

针对上述关键问题，作者利用双极性的MoTe<sub>2</sub>沟道材料，提出了一种基于沟道梯度掺杂机制的二维可重构器件构建方法。该方法在结构最简单的单栅极晶体管器件中实现了迄今报道的最为丰富的可重构功能。其基本原理是在二维MoTe<sub>2</sub>器件两侧同时施加大源漏电压和大栅压，使得在沿沟道方向上引入梯度分布的有效栅压。该有效栅压能精准控制沟道表面的气体吸脱附，从而实现双极性MoTe<sub>2</sub>沟道的梯度掺杂和极性调控。通过控制在重构过程中施加的源漏电压和栅极电压，可以在沟道中引入不同的梯度掺杂分布，从而实现器件的多种可重构功能，包括极性可调的二极管、存储器、逻辑存储器、三端人工神经突触等丰富的功能（图1）。

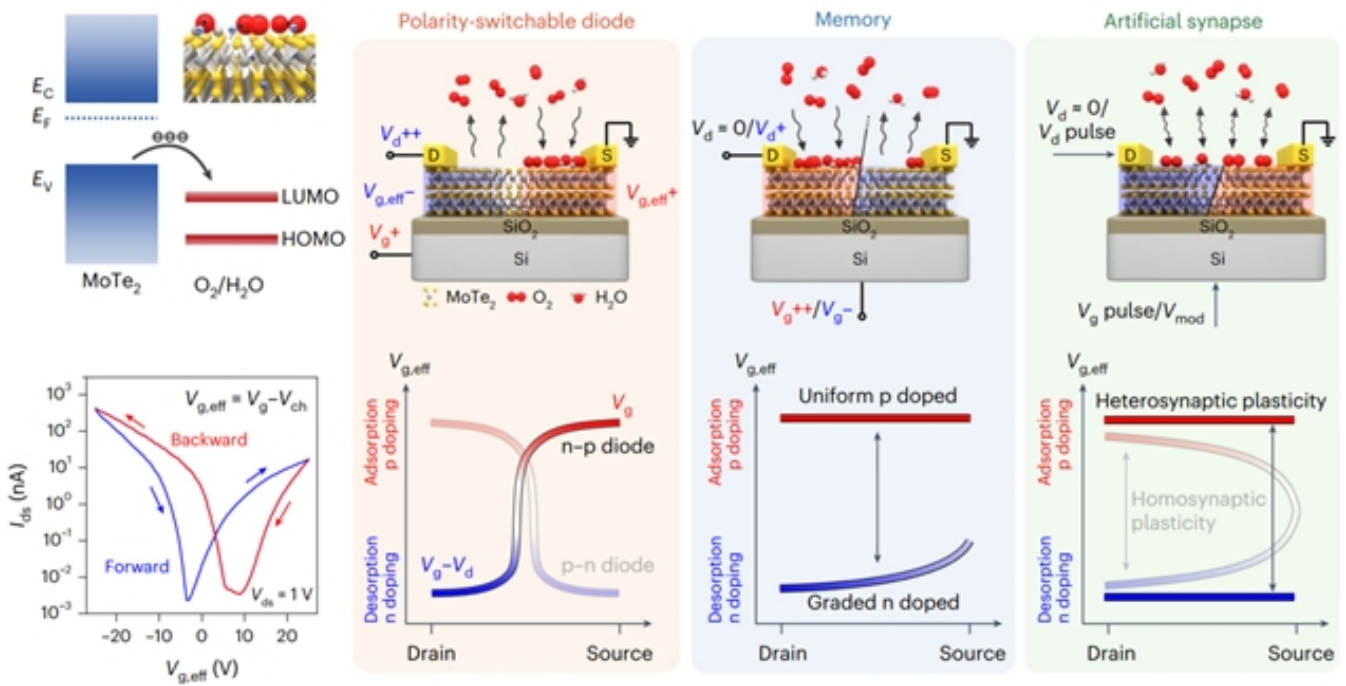


图1. 单栅极可重构MoTe<sub>2</sub>器件的掺杂机理和基本工作原理

开尔文探针力显微图像显示，通过精确调控的梯度掺杂，可以分别将可重构MoTe<sub>2</sub>器件重构为np结和pn结、p掺杂和n掺杂四种状态，从而实现极性可调的二极管功能和存储器功能。在二极管状态下，器件的整流比可达10<sup>4</sup>，并且拥有光电探测能力；作为存储器，器件拥有约25 V的存储窗口，存储比超过10<sup>3</sup>，保持时间超过36 h（图2）。

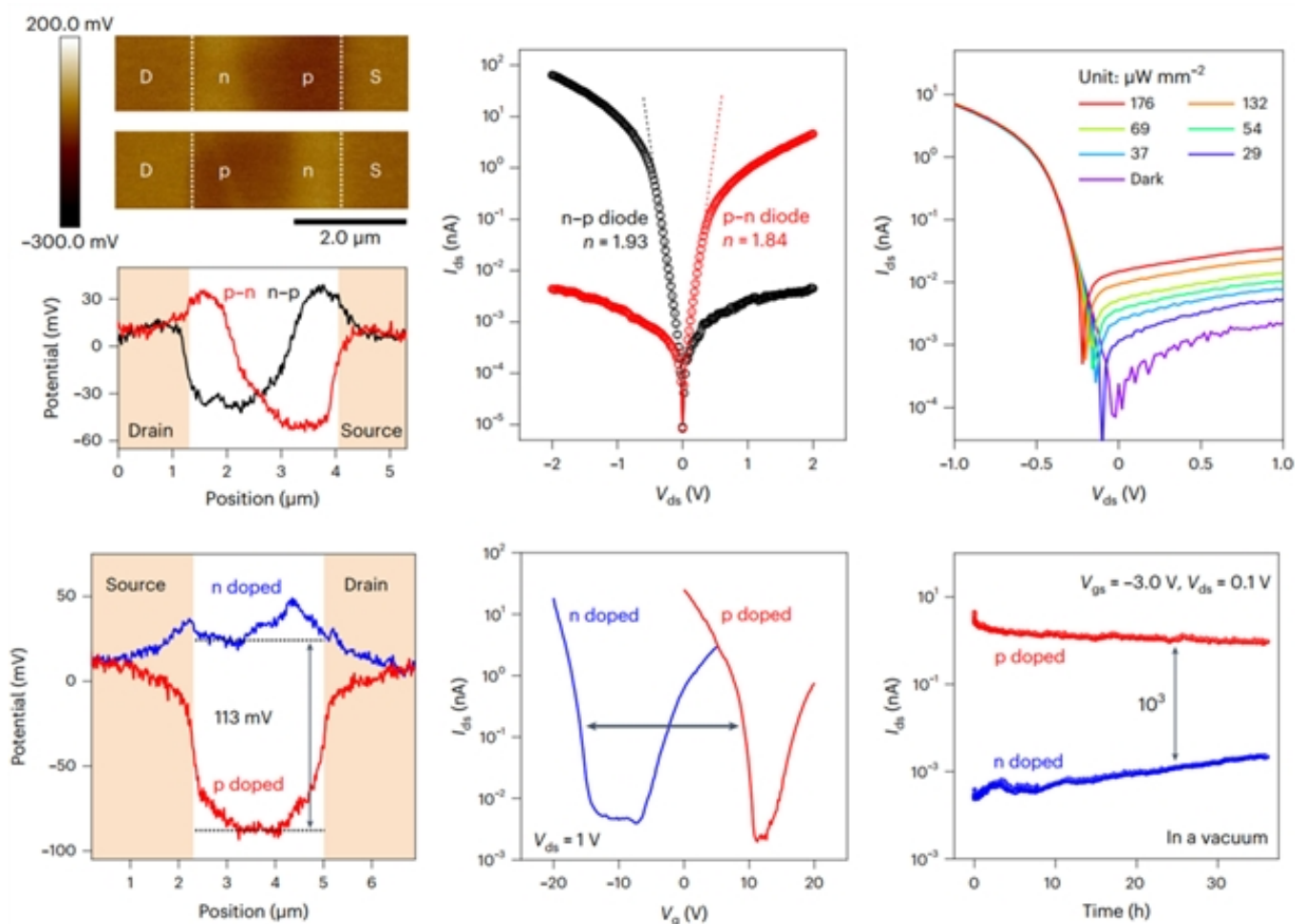


图2. 基于有效栅压调控的梯度掺杂实现极性可调的MoTe2二极管和存储器

生物可塑性是生物学习和记忆的基础。本研究报道的可重构MoTe2器件可以作为人工神经突触，模拟生物突触的多种可塑性功能（包括生物同突触可塑性、异突触可塑性的稳态功能和异突触元可塑性功能），这对构建高稳定性、强特异性的新型人工神经网络十分有利。在模拟生物异突触元可塑性时，该器件同时拥有低至7.3 fW的调制功耗，优于之前报道的拥有元可塑性的二维人工神经突触（图3）。

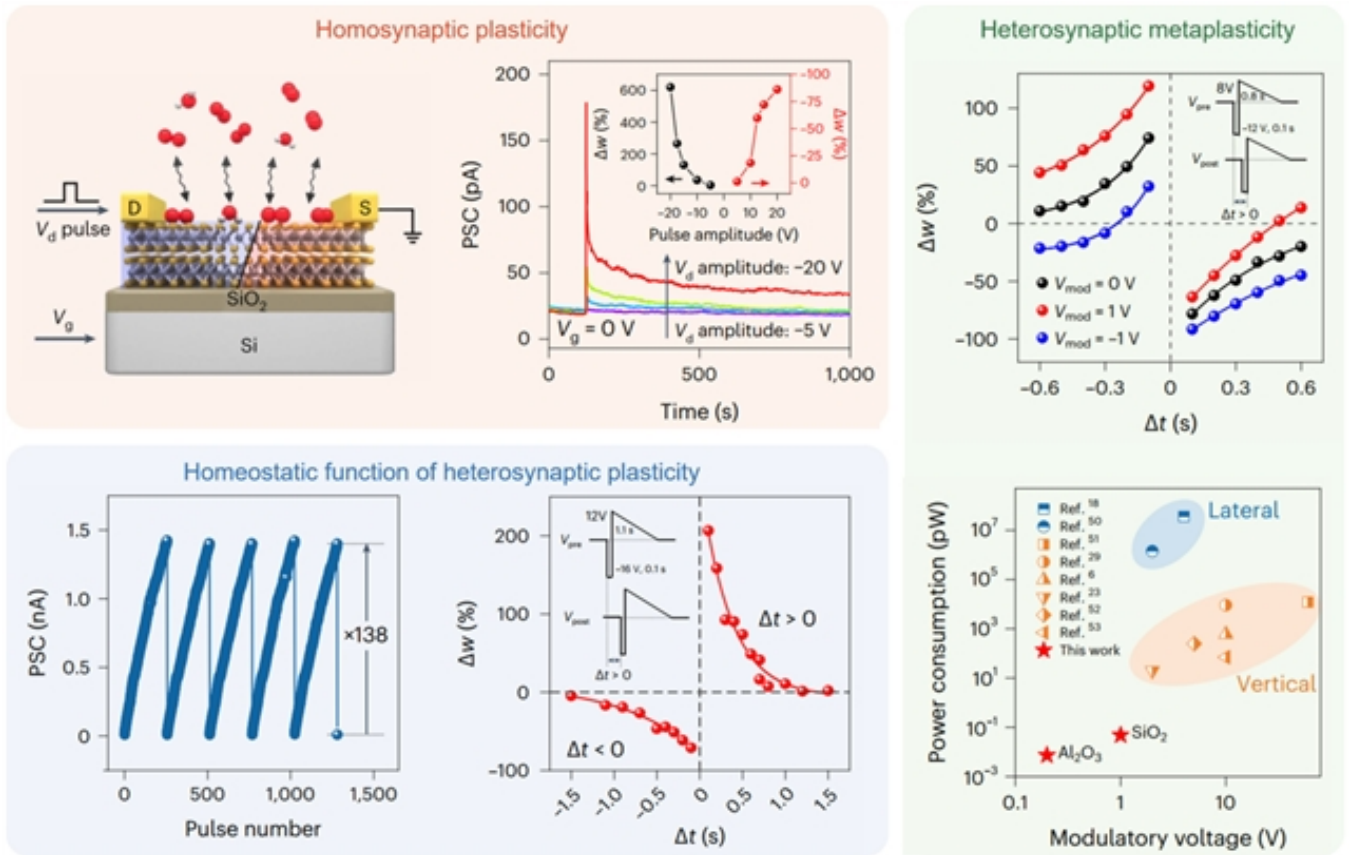


图3. 基于有效栅压调控的梯度掺杂模拟生物同突触可塑性、异突触可塑性的稳态功能和异突触元可塑性功能

作者进一步展示了可重构MoTe2器件的连续重构能力。该器件可以在多种可重构功能之间连续切换，并且在经过100次的重构后，依然保持性能稳定（图4）。

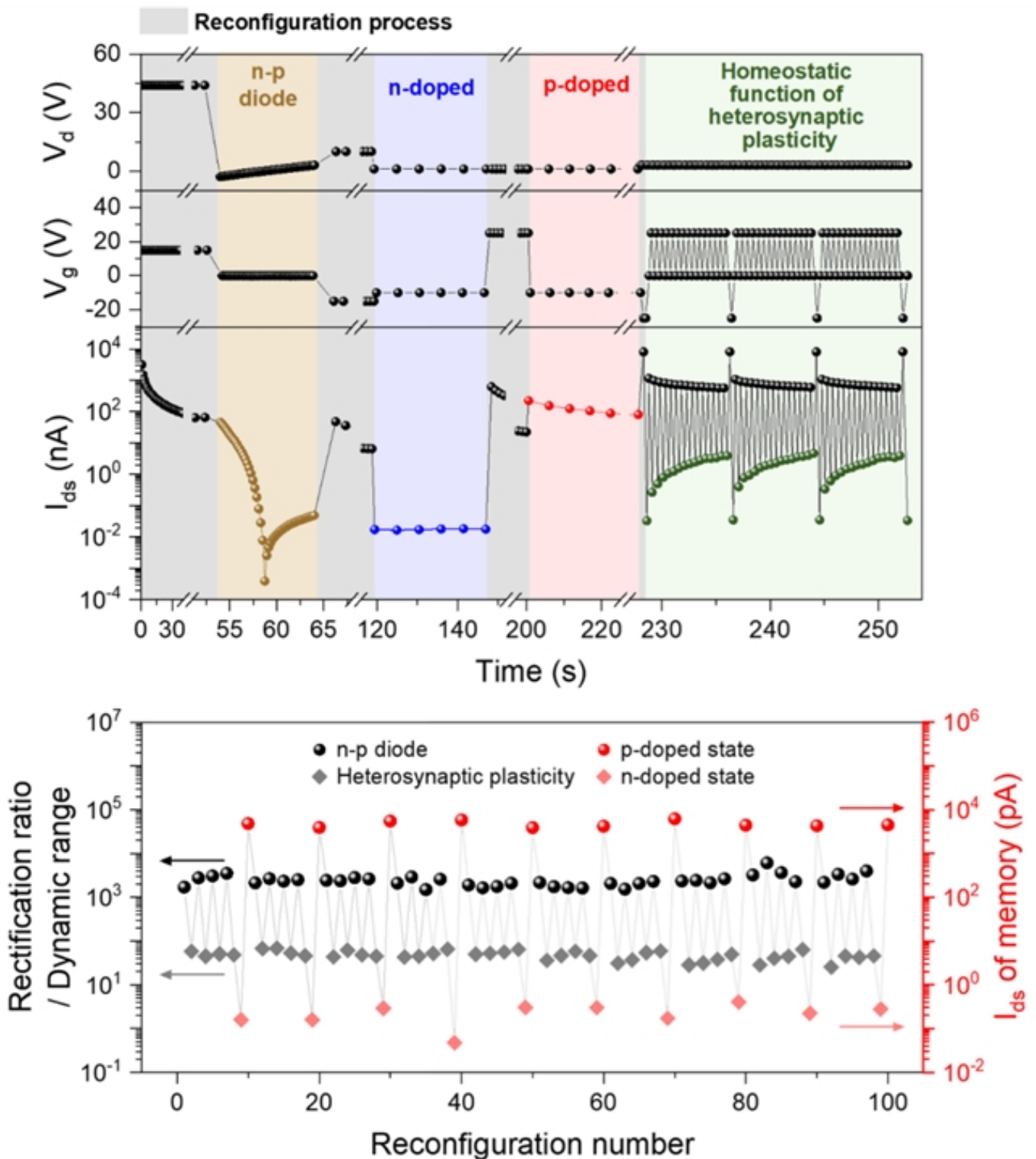


图4. 可重构MoTe2器件的连续可重构操作

总之，该研究深化了人们对二维半导体材料和器件中有效栅压和梯度掺杂概念的理解，解决了可重构器件的低结构复杂度与丰富的可重构功能之间的矛盾难题，为多功能、高性能二维可重构器件的构建提供了全新的思路。

清华大学材料学院刘锴副教授为本文通讯作者，清华大学材料学院2019级博士生彭瑞轩为本文第

---

一作者。论文的其他重要合作者包括清华大学物理系范守善院士，复旦大学微电子学院周鹏教授，清华大学材料学院宋成教授、王琛副教授，香港科技大学范智勇教授，清华大学材料学院2019级博士生吴永煌等。（来源：科学网）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41928-023-01056-1>

作者：刘锴等 来源：《自然—电子学》

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](https://www.iikx.com)转发