

探秘二维材料忆阻器：从器件物理到多元应用的深度剖析

一、引言

1.1 研究背景与意义

在当今信息时代，信息技术的飞速发展深刻地改变着人们的生活与工作方式。从智能手机、智能家居到大数据分析、人工智能，各类信息技术应用如雨后春笋般涌现，对数据处理和存储能力提出了前所未有的高要求。随着数据量的呈指数级增长以及对计算速度和效率需求的不断攀升，传统计算系统面临着严峻的挑战，亟需新型计算系统来满足时代发展的需求。

传统的冯·诺伊曼计算架构自诞生以来，在很长一段时间内推动了计算机技术的发展。然而，随着摩尔定律逐渐逼近其物理极限，冯·诺伊曼架构的局限性日益凸显。在该架构中，计算单元和存储单元相互分离，数据在两者之间的传输需要消耗大量的时间和能量，形成了所谓的“冯·诺伊曼瓶颈”。这一瓶颈严重限制了计算速度的提升和能耗的降低，使得传统计算机在面对大规模数据处理和复杂计算任务时显得力不从心。例如，在人工智能领域的深度学习任务中，大量的数据需要在存储和计算单元之间频繁传输，导致计算效率低下，能耗大幅增加，这已成为制约人工智能进一步发展的关键因素之一。

忆阻器作为一种新型的电子器件，自 2008 年惠普实验室成功研制出首个纳米级忆阻器以来，受到了学术界和工业界的广泛关注。忆阻器具有独特的电阻记忆特性，其电阻值能够根据施加的电压或电流历史而变化，并且在断电后仍能保持其电阻状态，这一特性使其能够同时实现数据存储和计算功能。忆阻器的出现为突破冯·诺伊曼瓶颈提供了新的可能，有望构建出计算和存储一体化的新型计算系统，从而大幅提高计算效率，降低能耗。将忆阻器应用于神经网络中，可以模拟生物神经元和突触的行为，实现高效的并行计算和低功耗运行，为人工智能的发展注入新的活力。

在忆阻器的研究中，二维材料展现出了巨大的应用潜力。二维材料是指原子在平面内呈二维排列的材料，其厚度通常在原子层级别，具有许多独特的物理性质。与传统的体材料相比，二维材料具有极高的载流子迁移率，这使得电子在其中传输时受到的散射较小，能够实现高速的数据传输和处理。二维材料的原子级厚度使其具有极大的比表面积，这有利于与其他材料或器件进行集成，提高器件的集成度。二维材料还具有良好的柔韧性和光学特性等，为忆阻器的应用拓展了更多的可能性。

基于二维材料的忆阻器在性能上展现出诸多优势。二维材料的原子级厚度和高载流子迁移率有助于实现忆阻器的高速开关特性，能够在短时间内完成电阻状态的切换，从而提高数据处理速度。二维材料的高比表面积和良好的界面兼容性有利于提高忆阻器的稳定性和可靠性，减少器件性能的波动。二维材料忆阻器还具有低功耗的特点，符合当前信息技术对绿色节能的要求。在物联网设备中，低功耗的忆阻器可以延长设备的电池续航时间，降低维护成本。

二维材料忆阻器的研究对于推动新型计算系统的发展具有重要意义。它不仅为解决传统计算架构的瓶颈问题提供了新的途径，还为未来的人工智能、大数据处理、物联网等领域的发展奠定了坚实的基础。通过深入研究二维材料忆阻器的器件物理和应用基础，可以进一步挖掘其性能潜力，优化器件结构和性能，实现更高的集成度、更低的功耗和更快的运算速度，为构建新一代高性能计算系统提供有力支撑。

1.2 忆阻器研究进展

1971 年，蔡少棠教授从理论上提出了忆阻器的概念，他通过对电路基本元件的对称性分析，指出在电阻、电容和电感之外，还应该存在一种能够描述电荷与磁通之间关系的元件，即忆阻器。当时，这一理论并未得到广泛的实验验证和实际应用，处于理论探索阶段。直到 2008 年，惠普实验室成功研制出首个基于二氧化钛 (TiO_2) 的纳米级忆阻器，才证实了忆阻器的物理存在，引发了学术界和工业界对忆阻器的广泛关注和研究热潮。

此后，忆阻器的研究取得了显著进展，各种类型的忆阻器被相继开发出来。基于金属氧化物的忆阻器，如 TiO_2 、氧化铪 (HfO_2) 等，是研究最早且较为成熟的一类忆阻器。其工作原理主要基于离子迁移和导电细丝的形成与断裂。在电场作用下，金属氧化物中的氧空位等带电离子会发生迁移，当离子迁移形成连续的导电细丝时，忆阻器处于低阻态；当导电细丝断裂时，忆阻器回到高阻态。

· 通过这种方式实现电阻状态的切换，从而用于数据存储和计算。这类忆阻器具有良好的稳定性和较高的开关比，在非易失性存储器等领域展现出广阔的应用前景，已经在一些商业化的存储产品中得到应用。

相变忆阻器则是利用材料的相变特性来实现电阻变化。典型的相变材料如硫系化合物，在不同的温度和电场条件下，能够在晶态和非晶态之间快速转变。晶态时材料具有低电阻，非晶态时电阻较高，通过精确控制材料的相变过程，就可以实现忆阻器的阻变功能。相变忆阻器具有高速读写、长寿命等优点，适合应用于对读写速度要求较高的存储场景，如固态硬盘（SSD）的缓存等。

磁性忆阻器基于磁隧道结效应，利用磁性材料的磁矩方向变化来改变电阻。在磁性忆阻器中，两个磁性层之间夹着一层薄的绝缘层，当两个磁性层的磁矩方向平行时，电子能够较容易地隧穿通过绝缘层，器件处于低阻态；当磁矩方向反平行时，隧穿电阻增大，器件处于高阻态。磁性忆阻器具有非易失性、低功耗和高速读写等优势，在高密度存储和逻辑运算等方面具有潜在的应用价值，有望成为下一代存储和计算技术的重要候选者。

随着材料科学的不断发展，二维材料在忆阻器领域展现出独特的优势，成为忆阻器研究的新热点。石墨烯作为最早被发现的二维材料，具有优异的电学性能，如超高的载流子迁移率和良好的导电性。基于石墨烯的忆阻器能够实现快速的电阻切换，其开关速度可达到皮秒量级，远远超过传统忆阻器的响应速度。这使得基于石墨烯的忆阻器在高速数据处理和通信等领域具有巨大的应用潜力，能够满足对数据处理速度要求极高的场景，如高速计算机内存和通信芯片中的缓存等。

过渡金属硫族化合物（TMDs）也是一类重要的二维材料，如二硫化钼（ MoS_2 ）、二硫化钨（ WS_2 ）等。这些材料具有丰富的物理性质，如可调带隙、良好的光学和电学性能等。基于TMDs的忆阻器不仅具有较高的开关比，还能够在柔性衬底上制备，实现柔性忆阻器的功能。这种柔性忆阻器在可穿戴电子设备、柔性显示器等领域具有广阔的应用前景，能够满足未来电子设备对轻薄、可弯曲的需求，为可穿戴设备的集成化和小型化提供了可能。

二维材料异质结忆阻器则结合了不同二维材料的优势，通过构建异质结构，实现了更加优异的性能。将 MoS_2 与 WS_2 构建成异质结忆阻器，利用两种材料界面处的电荷转移和能带调控，实现了开关比高达 10^4 、循环次数超过120次的稳定忆阻性能。这种异质结忆阻器不仅提高了器件的稳定性和可靠性，还为实现多功能、高性能的忆阻器提供了新的思路，在未来的人工

智能、物联网等领域具有重要的应用价值，可用于构建高性能的神经形态计算芯片，模拟生物神经元和突触的功能，实现高效的并行计算和低功耗运行。

1.3 二维材料概述

二维材料是指原子在平面内呈二维排列，厚度仅为原子层级别（通常在几纳米以下）的一类材料。这类材料由于其独特的原子结构和维度特性，展现出许多与传统三维体材料截然不同的物理性质，在电子器件、能源、传感器等众多领域都展现出了巨大的应用潜力。

从结构上看，二维材料的原子通过共价键、离子键或范德华力等相互作用，在二维平面内形成稳定的晶格结构。以石墨烯为例，它是由碳原子以 sp^2 杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的二维碳纳米材料，其碳原子之间通过共价键紧密相连，形成了一个平整且稳定的二维平面结构。这种独特的结构使得石墨烯具有优异的力学性能，能够承受较大的拉伸应力而不发生断裂。二硫化钼（ MoS_2 ）则是由硫原子和钼原子通过共价键结合，形成了类似三明治的结构，其中钼原子位于中间层，两侧被硫原子层包裹。这种层状结构使得 MoS_2 在层间通过较弱的范德华力相互作用，易于剥离成单层或少数层的二维材料。

二维材料的物理性质十分独特。在电学方面，许多二维材料具有高载流子迁移率，如石墨烯的载流子迁移率在室温下可达 $200,000\text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 以上，这使得电子在其中传输时几乎不受散射，能够实现高速的电子输运，为制备高性能的电子器件提供了可能。部分二维材料还具有可调带隙，如 MoS_2 在块体状态下为间接带隙半导体，带隙约为 1.2 eV ，而当剥离成单层时，转变为直接带隙半导体，带隙增大到约 1.8 eV 。这种带隙的可调节性使得二维材料在半导体器件领域具有重要的应用价值，可用于制备高性能的晶体管、逻辑电路等。

在光学性质上，二维材料表现出与体材料不同的特性。由于其原子级厚度，二维材料具有较高的光吸收系数，能够在较薄的厚度下实现对光的有效吸收。单层 MoS_2 在可见光范围内的光吸收效率可达 10% 左右，这使得它在光电器件如光电探测器、发光二极管等方面具有潜在的应用前景。二维材料还具有独特的光发射特性，能够实现与传统材料不同的发光机制，为新型光电器件的开发提供了新的思路。

在力学性能方面，二维材料虽然厚度极薄，但却展现出了令人惊讶的力学强度。石墨烯的理论杨氏模量可达 1.0 TPa ，与钢铁相当，能够承受较大的拉伸应变而不发生断裂。这种优异的力学性能使得二维材料在柔性电子器件中具有重要的应用价值，能够满足器件在弯曲、拉伸等变形条件下的稳定性和可靠性要求。

在电子器件领域，二维材料展现出了巨大的应用潜力。在忆阻器中，二维材料的应用为器件性能的提升带来了新的机遇。石墨烯由于其优异的电学性能和高载流子迁移率，能够实现忆阻器的快速开关特性。当基于石墨烯制备忆阻器时，在施加电压的瞬间，石墨烯中的载流子能够迅速响应，实现电阻状态的快速切换，其开关速度可达到皮秒量级，远远超过传统忆阻器的响应速度。这使得基于石墨烯的忆阻器在高速数据处理和通信等领域具有巨大的应用潜力，能够满足对数据处理速度要求极高的场景，如高速计算机内存和通信芯片中的缓存等。

过渡金属硫族化合物（TMDs）如 MoS_2 、 WS_2 等也是常用于忆阻器的二维材料。这些材料具有丰富的物理性质，如可调带隙、良好的光学和电学性能等。基于 TMDs 的忆阻器不仅具有较高的开关比，还能够在柔性衬底上制备，实现柔性忆阻器的功能。这种柔性忆阻器在可穿戴电子设备、柔性显示器等领域具有广阔的应用前景，能够满足未来电子设备对轻薄、可弯曲的需求，为可穿戴设备的集成化和小型化提供了可能。以基于 MoS_2 的忆阻器为例，通过精确控制 MoS_2 的层数和制备工艺，可以实现开关比高达 10^3 以上的忆阻性能，并且在多次循环测试中保持良好的稳定性。在可穿戴健康监测设备中，柔性的 MoS_2 忆阻器可以贴合人体皮肤，实现对生理信号的实时监测和存储，为健康管理提供重要的数据支持。

二维材料异质结在忆阻器中也展现出了独特的优势。通过将不同的二维材料组合成异质结结构，可以充分利用各材料的优势，实现更加优异的性能。将 MoS_2 与 WS_2 构建异质结忆阻器，利用两种材料界面处的电荷转移和能带调控，实现了开关比高达 10^4 、循环次数超过 120 次的稳定忆阻性能。这种异质结忆阻器不仅提高了器件的稳定性和可靠性，还为实现多功能、高性能的忆阻器提供了新的思路，在未来的人工智能、物联网等领域具有重要的应用价值，可用于构建高性能的神经形态计算芯片，模拟生物神经元和突触的功能，实现高效的并行计算和低功耗运行。

1.4 研究内容与方法

本研究聚焦于基于二维材料的忆阻器，旨在深入探究其器件物理特性与应用基础，为新型计算系统的发展提供理论支持与技术基础。研究内容主要涵盖以下几个关键方面：

1. 二维材料忆阻器的器件物理研究

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/558070140052007036>

2.