

首次实现读写对称的自旋存内计算器件

2022-12-09

基于电子自旋的磁随机存储器具有非易失性、超长耐久度、超快读写速度和超低功耗等优点，被视为是未来实现新型存储和计算的潜在技术之一。目前，磁随机存储器的构筑主要依赖于垂直磁各向异性的磁隧道结单元。器件磁状态的写入依赖于自旋转移转矩或者外加磁场辅助的自旋轨道转矩，而器件磁状态的读取则需要利用隧穿磁电阻效应。这种不对称的读写方式以及外加磁场的辅助极大地限制了器件的功耗降低、级联与小型化。构筑新型的自旋电子器件结构、并且探索电荷-自旋之间的全新转换机制被认为是解决上述挑战的有效途径。

面向上述挑战，近日，南京大学物理学院缪峰教授、梁世军副教授与南京理工大学程斌教授合作团队另辟蹊径，将范德华铁磁体和拓扑半金属以“原子乐高”的方式搭建出新型范德华自旋轨道量子材料，利用低对称性和强自旋轨道耦合效应所诱导的非正交电荷-自旋转换机制，首次构筑了具有对称读写功能的可级联自旋轨道逻辑器件（图1），并以此为新型器件单元，构建出可重构的存内逻辑电路，为低能耗、可大规模级联的新型自旋计算器件的开发提供了全新的材料体系和可行的技术途径。

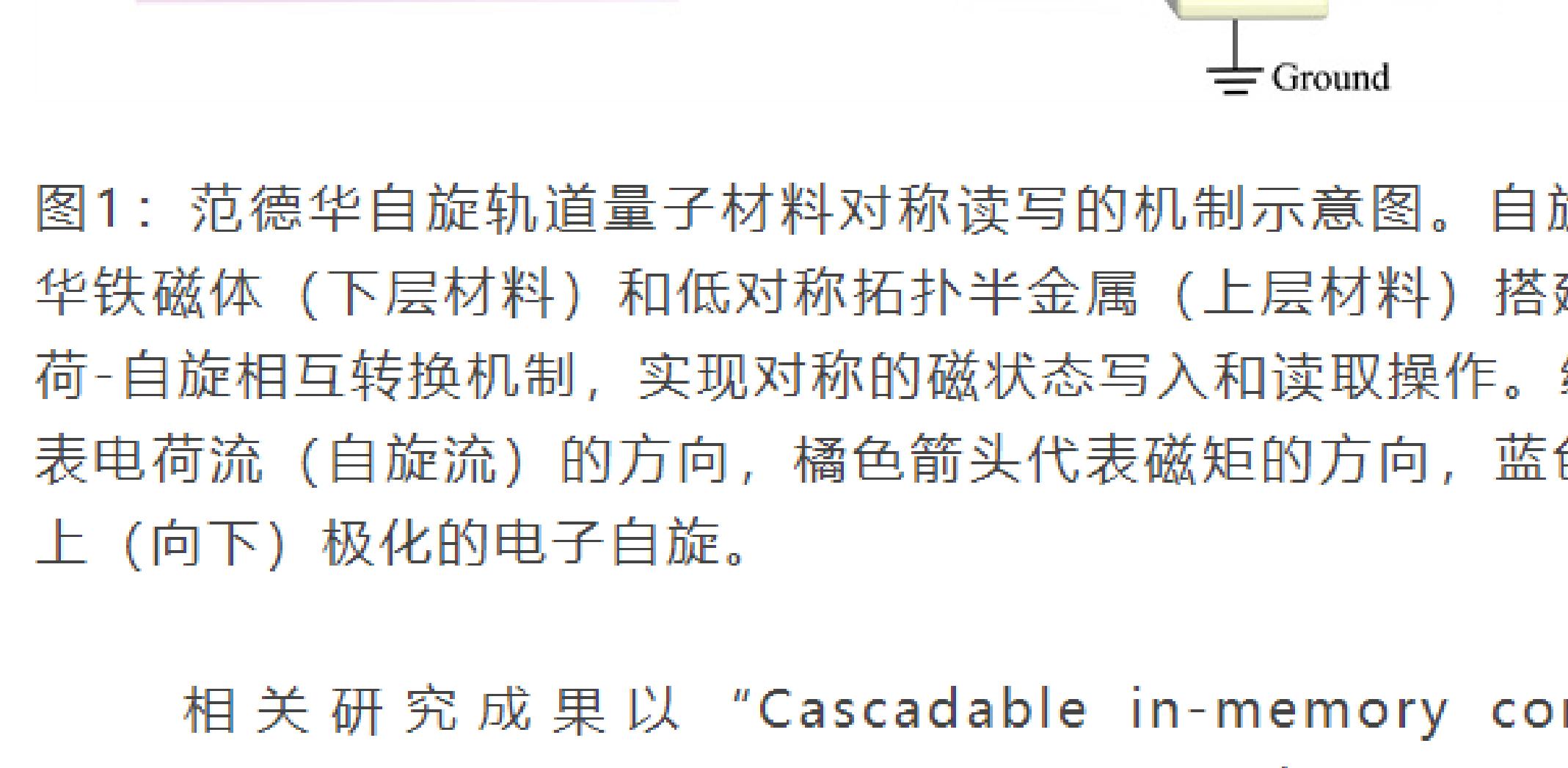


图1：范德华自旋轨道量子材料对称读写的机制示意图。自旋轨道量子材料由范德华铁磁体（下层材料）和低对称拓扑半金属（上层材料）搭建而成，基于非正交电荷-自旋相互转换机制，实现对称的磁状态写入和读取操作。绿色（黄色）长箭头代表电荷流（自旋流）的方向，橘色箭头代表磁矩的方向，蓝色（红色）箭头代表向上（向下）极化的电子自旋。

相关研究成果以“Cascadable in-memory computing based on symmetric writing and readout”（基于对称读写的可级联存内计算）为题于2022年12月9日在线发表在著名学术期刊*Science Advances*《科学进展》上。我校物理学院博士生王利铮和熊俊林为论文共同第一作者，缪峰教授、梁世军副教授与南京理工大学程斌教授为论文的共同通讯作者，南京大学物理学院张海军教授与博士生王福毅为论文的理论合作者。南京大学物理学院王振林教授课题组在样品的光学表征方面提供了帮助，中科院物理所石友国教授和博士生肖静静，以及美国Rutgers大学的Sang-Wook Cheong教授和博士生Xianghan Xu提供了实验所需样品。该工作得到了国家优秀青年科学基金、国家自然科学基金重点项目/面上项目、中科院先导B项目、中央高校基本科研业务费、以及固体微结构物理国家重点实验室、人工微结构科学与技术协同创新中心等的支持。

在这项工作中，研究团队首先利用二维材料异质结转移技术人工搭建了具有垂直磁各向异性自旋轨道（perpendicular-anisotropy spin-orbit (PASO)）的人工量子材料WTe₂/Fe₃GeTe₂（图2A和2B）。搭建的人工量子材料不仅保留了Fe₃GeTe₂垂直磁各向异性的特点，在不同温度下表现出稳定的反常霍尔电阻（图2C），而且，该量子材料中的低对称结构和强轨道自旋耦合效应通过共同作用，能够诱导产生非正交电荷-自旋转换效应，打破传统高对称材料中电荷流、自旋流、自旋极化三者必须正交的限制。利用这种全新的转换机制，使得通过在PASO量子材料（图1左），在无外磁场辅助下实现脉冲电流诱导的垂直磁矩翻转（图2D）。

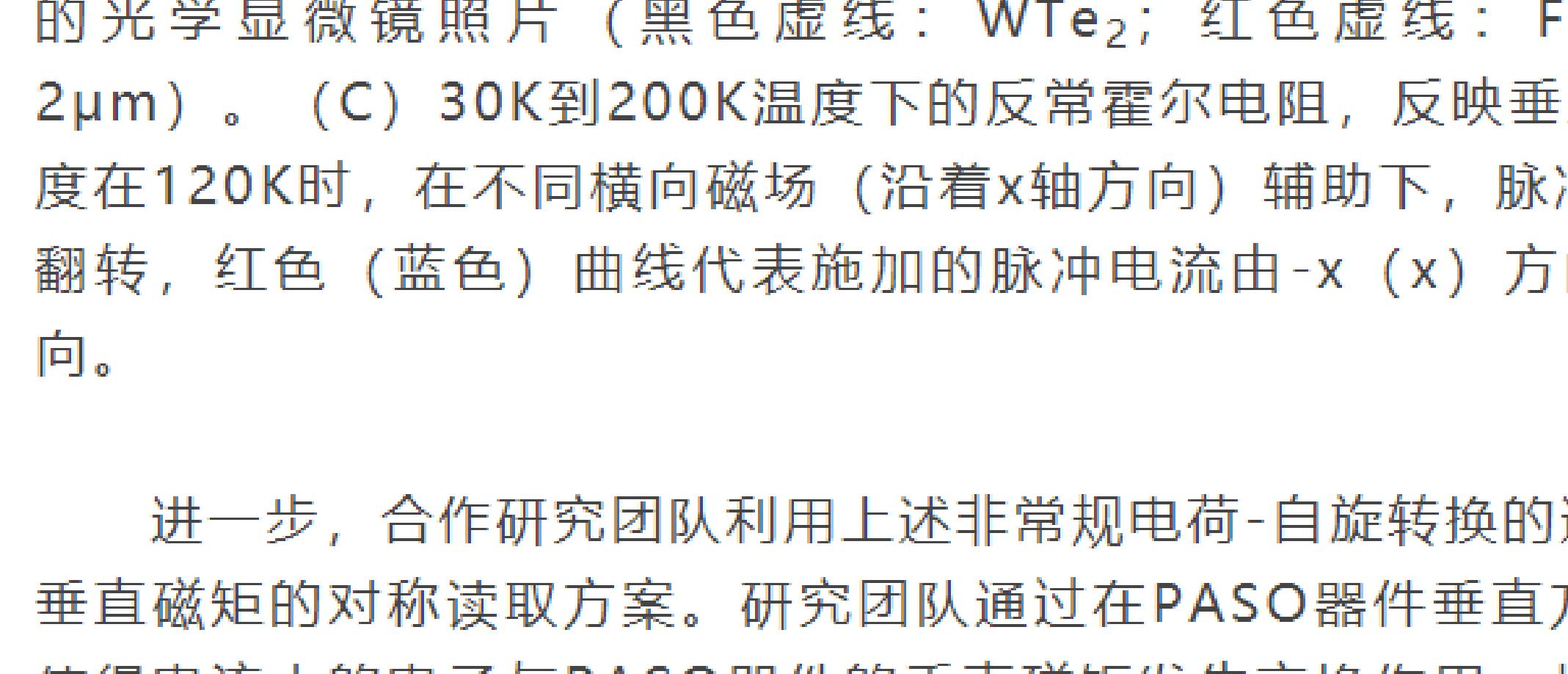


图2：器件结构和电流诱导的磁翻转。（A）PASO器件示意图，器件由范德华材料WTe₂和Fe₃GeTe₂组装构成。电学输运测试时，沿着x轴方向施加电流，在y轴方向探测霍尔电阻。插图：WTe₂和Fe₃GeTe₂的晶格结构示意图。（B）PASO器件的光学显微镜照片（黑色虚线：WTe₂；红色虚线：Fe₃GeTe₂；比例尺：2μm）。（C）30K到200K温度下的反常霍尔电阻，反映垂直磁矩状态。（D）温度在120K时，在不同横向磁场（沿着x轴方向）辅助下，脉冲电流诱导垂直磁矩的翻转，红色（蓝色）曲线代表施加的脉冲电流由-x（x）方向逐渐变成x（-x）方向。

进一步，合作研究团队利用上述非常规电荷-自旋转换的逆效应，设计并实现了垂直磁矩的对称读取方案。研究团队通过在PASO器件垂直方向施加电流的方法，使得电流中的电子与PASO器件的垂直磁矩发生交换作用，从而产生与电子运动方向平行的自旋极化。该具有共线特征的自旋流通过非正交的自旋-电荷转换机制，转换为平行于范德华界面的电荷流（图1右），最终在开路的条件下以电压的信号被探测到（如图3A所示）。当器件磁矩方向翻转时，注入电子的自旋极化方向同样发生翻转，这使得通过自旋-电荷转换效应产生的电流方向发生相应改变，因此可以通过探测横向电信号实现对垂直磁矩状态的读取。该对称读取操作中的输出电流可以直接被用来驱动下一级器件单元中磁状态的写入操作，展现出器件的高度可级联性，为进一步构建低能耗、可重构存内计算器件提供了物理基础。

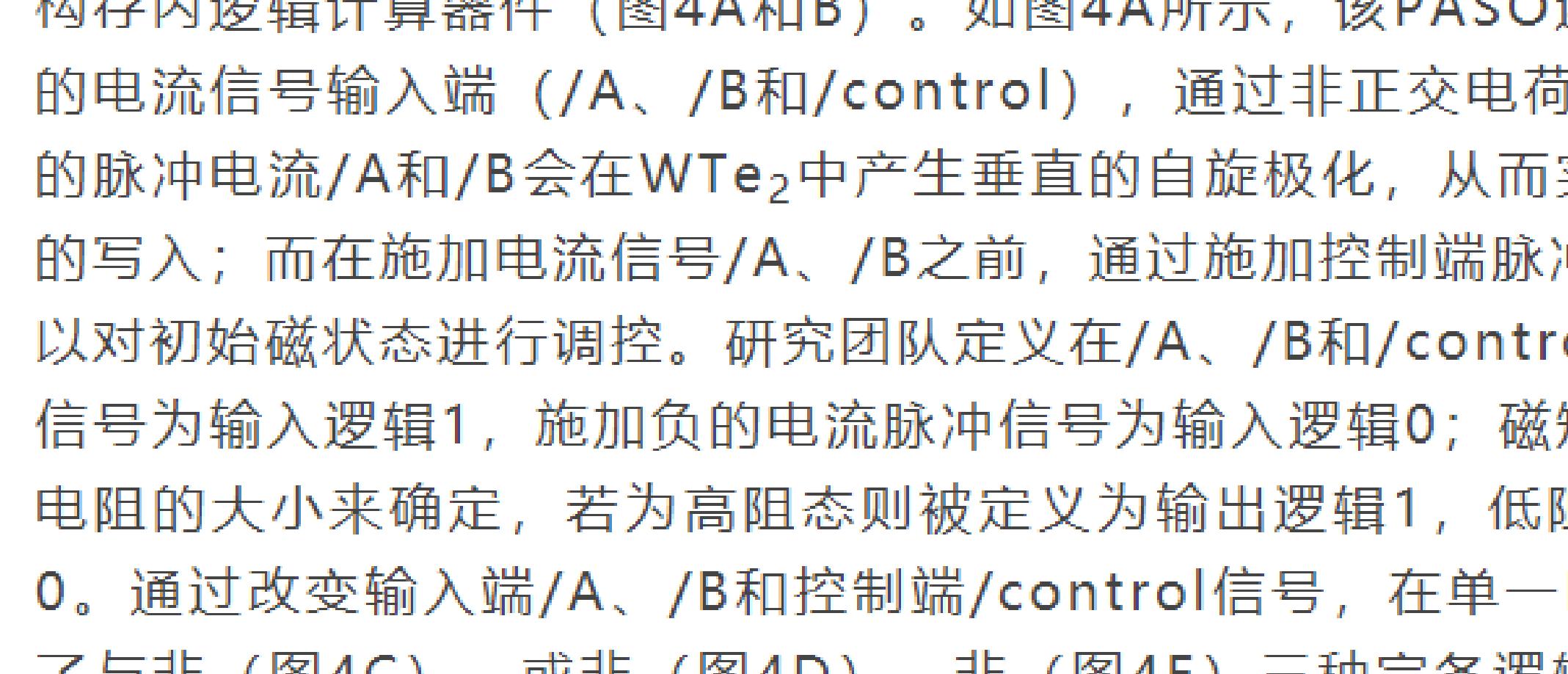


图3：垂直磁矩的对称性读取。（A）上图：对称性读取器件的示意图，器件由范德华材料WTe₂和Fe₃GeTe₂组装构成，橘色的箭头代表Fe₃GeTe₂磁矩的方向。在实验中，沿着垂直方向施加电流，通过利用WTe₂上的开路电压信号表征非正交自旋-电荷转换机制产生的横向电流。下图：对称性读取器件的光学显微镜图（黑色虚线：WTe₂；红色虚线：Fe₃GeTe₂；白色虚线：用来施加输入电流的电极；比例尺：5μm）。（B-C）施加垂直向下（B）和垂直向上（C）的电流时，所测电阻（水平开路电压除以垂直注入电流）和外加垂直磁场的关系，红色（蓝色）曲线代表外加磁场方向由垂直向下（向上）逐渐变成垂直向上（向下），表现出该器件对垂直磁矩读取的能力。其中，横向读取电阻定义为横向读取电压和施加电流的比值。插图：垂直磁矩读取机制的示意图，黑色长箭头代表施加电流的方向，橘色箭头代表Fe₃GeTe₂磁矩的方向，蓝色（红色）箭头代表向上（向下）极化的电子自旋。

利用PASO器件的对称读写机制，合作研究团队进一步设计了一种新型的可重构存内逻辑计算器件（图4A和B）。如图4A所示，该PASO逻辑器件具有三个独立的电流信号输入端（/A、/B和/control），通过非正交电荷-自旋转换效应，输入的脉冲电流/A和/B会在WTe₂中产生垂直的自旋极化，从而实现Fe₃GeTe₂磁状态的写入；而在施加电流信号/A、/B之前，通过施加控制端脉冲电流信号/control可以对初始磁状态进行调控。研究团队定义在/A、/B和/control中施加正的电流脉冲信号为输入逻辑1，施加负的电流脉冲信号为输入逻辑0；磁矩的状态通过反常霍尔电阻的大小来确定，若为高阻态则被定义为输出逻辑1，低阻态被定义为输出逻辑0。通过改变输入端/A、/B和控制端/control信号，在单一PASO器件中分别实现了与非（图4C）、或非（图4D）、非（图4E）三种完备逻辑运算功能，以及这些逻辑功能的重构。将此存内逻辑器件作为基本构筑单元，合作研究团队进一步提出了存内逻辑计算电路方案，并通过器件级联实现了更复杂的半加器的存内逻辑计算功能（图4F和G），展示了PASO器件实现任意复杂存内逻辑计算功能的潜力。该工作为开发超低功耗、可大规模集成的自旋计算器件提供了全新的思路，有望未来应用于高能效存内计算与类脑计算电路中。

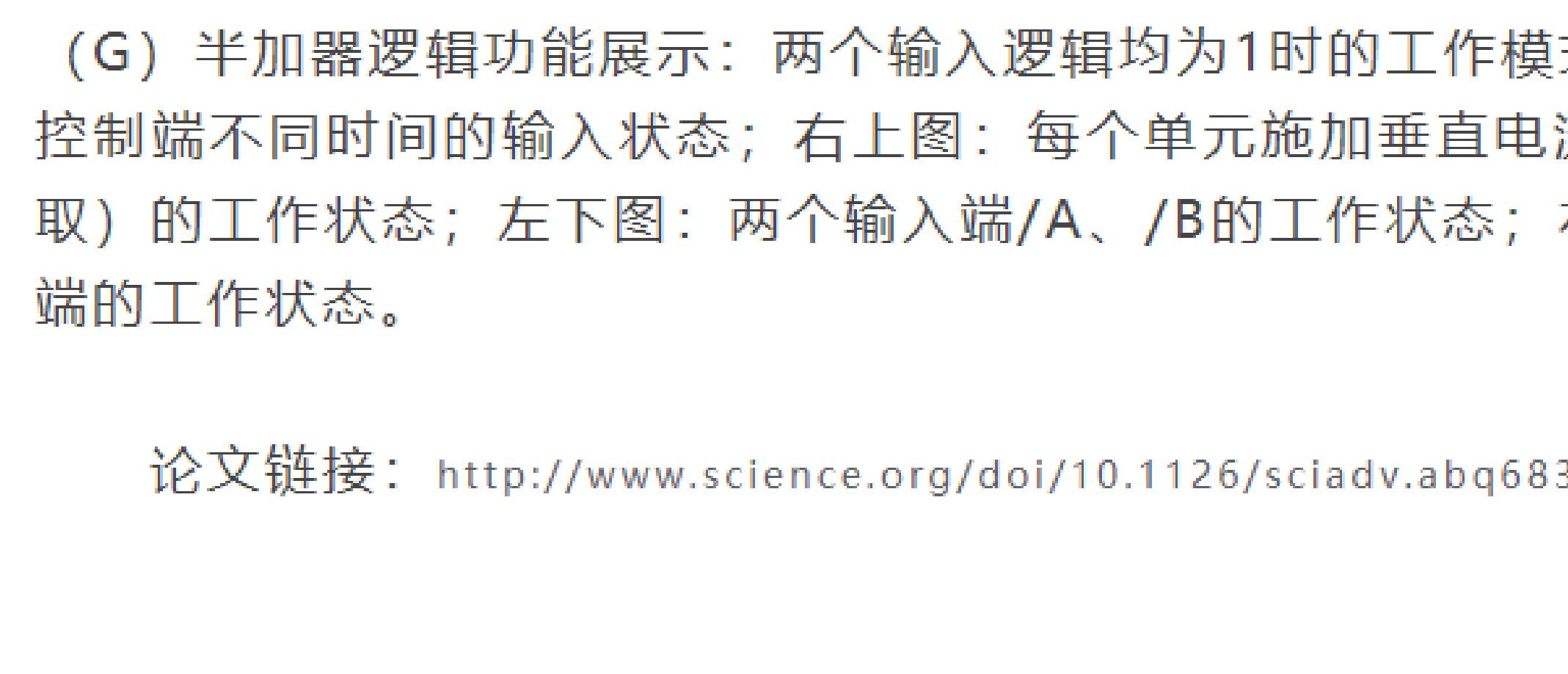


图4：基于对称读写的可级联存内逻辑计算器件与电路。（A）左图：单一PASO逻辑器件示意图，其具有三个独立的电流输入端（/A、/B和/control），用来实现磁状态的写入。右图：PASO逻辑器件的示意简图。（B）PASO器件的逻辑功能表（与非、非、或非）。（C）与非逻辑功能展示。定义/A、/B和/control中施加向上（向下）的电流脉冲为输入逻辑1（0），定义反常霍尔电阻处于高（低）阻态时为输出逻辑1（0）。（D）或非逻辑功能展示。（E）非逻辑功能展示。（F）基于四个PASO逻辑器件的半加器电路示意图，每个器件单元的逻辑功能进行了标出。（G）半加器逻辑功能展示：两个输入逻辑均为1时的工作模式。左上图：每个单元控制端不同时间的输入状态；右上图：每个单元施加垂直电流（进行磁矩状态的读取）的工作状态；左下图：两个输入端/A、/B的工作状态；右下图：两个最终输出端的工作状态。

论文链接：<http://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abq6833>

通知公告

ANNOUNCEMENTS

08 MAR
通知
中国物理学会-华为MindSpore
Quantum学术奖励基金申请指南

07 MAR
通知
第七届全国热传导研讨会
(WTT 2023) 第一轮通知

03 MAR
通知
中国物理学会第三期“蒲公英
计划”基地学校”申报通知

14 FEB
决定
关于同意核物理分会、内耗与
力学谱专业委员会、高能物理
分会换届报告的决定

28 DEC
通知
中国物理学会谢希德物理奖延
长推荐截止日期的通知

图片新闻

PICTURE



更多 +