宁波市青年科技创新奖公示

(2024年度)

一、被提名人基本情况

项目编号：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 提名者 | 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 | | | | |
| 姓 名 | 朱小健 | 性 别 | 男 | 联系电话 | 15088849280 |
| 证件类型 | 身份证 | 证件号码 | 321281198810057158 | | |
| 国 籍 | 中国 | 民 族 | 汉 | 政治面貌 | 党员 |
| 院 士 | 否 | | | 当选时间 |  |
| 从事专业 | 材料物理与化学 | 最高学历 | 博士研究生 | 最高学位 | 博士 |
| 技术职称 | 正高 | | | 职 务 | 无 |
| 学科分类名称 | 1 | 材料物理与化学 | | 代 码 | 080501 |
| 2 | 微电子学与固体电子学 | | 代 码 | 080903 |
| 3 |  | | 代 码 |  |
| 工作单位 | 名 称 | 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 | | | |
| 通讯地址 | 浙江省宁波市镇海区中官西路1219号 | | | |
| 联 系 人 | 庞琳 | | 联系电话 | 15545156609 |
| 受高等教育情况：  2002-09至2005-07，江苏省泰州中学，学生  2005-09至2009-07，苏州大学，物理学，学士  2009-09至2014-07，中国科学院大学，材料物理与化学，博士 | | | | | |

四、被提名人的主要科学技术成就和贡献

自上世纪以来，硅基晶体管等电子器件的发明，极大地推动了信息技术的革命与人类社会的进步。近年来，大数据与人工智能等新兴技术快速发展，对信息器件的处理能力提出了更高要求。如何研制智能化、多功能集成（存储、计算与感知）的新型信息器件已成为重要挑战。忆阻器是一种以离子半导体为材料，具有独特电阻转变特性的纳米信息器件。外加电场下忆阻器中的离子可发生迁移，改变材料的电阻状态，模仿人脑神经元的智能化信息存储、计算与感知功能，在人形机器人、脑机接口、智能穿戴等领域具有重要应用潜力。然而，由于缺少精确控制忆阻器中离子迁移的方法，器件的电阻状态难以有效调控，导致信息存储容量小、计算速度慢与感知能力弱等问题，严重阻碍其研发进程。

针对以上问题，申请人聚焦忆阻器的基础理论与关键技术研究，通过创新发展离子迁移过程的精准控制方法，实现了电阻状态的多级、快速、高灵敏调控，突破了忆阻器的存储容量、计算速度与感知能力瓶颈，为大数据和人工智能技术的发展提供有力支撑。共发表SCI论文70 余篇，第一/通讯作者论文发表在Nature Materials、Nature Communications、Advanced Materials、ACS Nano、Nano Letters等期刊，总引用4000余次，研究成果多次被Science、Nature Electronics、Nature Nanotechnology等期刊正面评价，受到Science Daily等国际科技媒体专题报道。入选国家高层次青年人才计划，主持国家自然科学基金2项（重大研究计划-培育项目、面上）、浙江省自然科学基金1项（重大）、中国科学院上海分院青年攀登计划、宁波市科技项目2项。作为课题负责人承担中国科学院稳定支持青年团队、国自然联合基金重点项目。获浙江省自然科学一等奖（2021）、中国电子学会科学技术二等奖（2018）、宁波市科学技术一等奖（2018）、宁波市科学技术二等奖（2015）、中国电子学会优博论文奖（2016）、中国科学院优博论文奖（2015）、中国科学院院长优秀奖（2014），担任浙江省青年高层次人才协会新材料专家委员会委员以及Nature Electronics等期刊审稿人。

**主要学术成果如下：**

**一、针对忆阻器存储容量小的问题，提出了局域电场控制原子尺度下离子分布的新策略，建立了基于多级电导调控的数据存储新原理，为实现大容量信息存储提供重要科学依据。**

忆阻器可利用电场控制离子分布形成纳米尺寸的导电通道，通过控制其通/断，产生高/低电阻状态，实现数据存储。然而，高/低两态仅能用于“0/1”二值存储，存储容量难以提升。为此，申请人提出了“利用局域电场在原子尺度控制离子分布，控制导电通道通断”的新策略，采用纳米导电探针施加局域电场控制银离子的分布，在忆阻器中构筑了一维单原子银导电通道。由于通道尺寸接近原子大小，其电子能级分裂，器件的电导值集中在整数或者半整数倍G0【G0 = 2e2/h，e-电子带电量，h-普朗克常数】，进而在国际上首次发现了忆阻器的电导量子化效应。进一步，提出“通过精确施加脉冲电场，逐级调节导电通道尺寸”的新方法，实现了电阻状态的多级调制，在单个忆阻器中获得了10个稳定的量子电导态，相比于传统“二值”存储，容量提升5倍。该忆阻器具有良好的稳定性，可用于模仿大脑神经元的存储与记忆特性，其人工神经网络能够执行十种不同图像的分类任务，识别准确率达89%，为构筑高精度、微型化人工智能芯片提供有效支撑。

相关论文发表于Advanced Materials、ACS Nano、Journal Of Physics D: applied Physics、Applied Physics Reviews等期刊。获浙江省自然科学一等奖（2021）、中国电子学会科学技术二等奖（2018）、中国电子学会优博论文奖（2016）、中国科学院院长优秀奖（2014）等。

【学术评价与影响】：韩国科学技术研究院（KAST）Hyunsang Hwang院士【Small 2021,17,2006760】评价：“（该成果）为实现单原子逻辑电路和存储器提供了新方法”；英国伦敦大学学院A. J. Kenyon教授【Sci. Rep. 2013,3,2708】评价：“不仅为深入研究电荷输运和物理起源提供了可能，对研发半导体多态存储器、量子信息处理器件以及神经仿生器件具有重大意义”。

**二、针对忆阻器计算速度慢的问题，创制了基于快离子半导体的忆阻半导体材料，发展了基于电导弛豫与积分的时序信号计算新方法，为实现高速动态信号处理提供重要技术。**

忆阻器可利用离子扩散产生的电阻弛豫特性，对动态电激励信号进行非线性变换和时间积分计算，模仿大脑神经元对复杂时序信号的处理方式。该方法计算效率高、泛化能力强，在目标监测、语音识别等方面具有重要应用。然而，传统忆阻器采用氧离子半导体等材料构筑，离子扩散缓慢，电阻弛豫时间长达分钟至小时，难以用于高速信息处理。为此，申请人提出“创制基于快离子半导体的新型动态忆阻材料，利用离子快速扩散加快电导弛豫”的新策略，选用具有超低离子激活能（0.2 ev）的快离子半导体钙钛矿碘化铯铅材料（CsPbI3）和高电化学活性的金属银（Ag）电极相结合，构建了高速动态忆阻器。在幅值为100 毫伏、脉宽为2毫秒的电脉冲下，碘离子可快速迁移，并在电脉冲撤去后快速扩散，电阻弛豫时间≤100毫秒。该器件能够以毫秒级精度提取复杂脑电信号的频率、时间间隔等特征参数，对脑神经信号的多种放电模式进行实时监测与识别，用于脑机接口研究。进一步提出了“构建多端晶体管结构的忆阻器，对多通道动态信息并行处理”的新思路，通过器件结构设计，对多组输入信号并行解析，实现了对人体运动时产生丰富生理信号（如步态、呼吸、心跳等）的实时计算分析，并成功预测了帕金森综合征等疾病，准确率87%。该成果为研制高速智能可穿戴设备，实时、便捷监测人体健康状态和预防疾病提供重要手段。

相关论文发表于Nature Materials、Nature Communications、Advanced Science、ACS Nano 等期刊，单篇论文最高他引540次，被Science Daily等国际科技媒体专题报道。

【学术评价与影响】：阿卜杜拉国王科技大学Mario Lanza教授【Science 2022, 376, 1066】评价：“基于钙钛矿材料的动态忆阻器实现了神经信号的实时分析”；中国科学院院士黄如教授【Nat. Electron. 2022, 5, 761】认为我们“在忆阻器处理时序数据方面取得了显著进展”；美国工程院院士、艺术与科学院院士、西北大学Mark C Hersam教授【Nat. Nanotechnol. 2020, 15, 517】评价认为该器件“实现了多输入、原位时空信息处理”。

**三、针对忆阻器感知灵敏度低的问题，提出了利用电场、光照协同调节离子空位浓度与电荷俘获的新策略，发展了光电导的高灵敏和可重构调控新方法，为模仿人眼视觉神经元的注意力感知功能提供关键技术。**

忆阻器中的离子空位可俘获空间电荷，在光照下被激发，产生光电导响应，模仿人眼视觉神经元的感知功能。然而，传统忆阻器受光照激发时，光电导动态变化范围仅有数倍大小，对光刺激的响应灵敏度较低。为此，申请人提出“采用电场控制离子空位聚集形成导电通道，增强俘获电荷对光照响应能力”的新策略，利用电场驱动碘离子空位聚集，形成纳米导电通道，发现光照下导电通道中碘离子空位俘获的电荷被激发可促使导电通道断裂，光电导的变化幅值高达106。该器件能够有效模仿人眼视觉神经元的对光照的感知行为，灵敏度提升3个数量级以上。进一步，提出“利用电压调节离子空位浓度，获得灵敏度可调节光电导”的新思路，通过外加电压驱动离子空位的迁移与分布，调节离子空位的浓度，实现了光响应灵敏度的可逆调控，动态范围高达1400%。该忆阻器适用于模仿人眼视觉神经元的注意力感知机制，通过自适应调节光响应灵敏度，实现对目标物的光感知增强和对冗余物的光感知抑制，将人脸图像识别准确率提高13%。该成果为研制高灵敏、自适应类人视觉感知系统提供了全新的思路与方法。

相关论文发表于Advanced Materials、ACS Nano、Nano Letters等期刊。

【学术评价与影响】： 波兰克拉科夫 AGH科技大学的 K. Szacilowski 教授【Nanoscale, 2019, 11, 1080】评价本工作： “交叉了光电子学和忆阻器技术，开辟了一片全新的研究领域”；美国斯坦福大学鲍哲南院士【Sci. Adv. 2018,4,eaat7387】评价：“光感知将成为仿生电子器件的重要功能”；中国科学院院士杨德仁教授【Nano Energy. 2019,63,103859】评价：“将光引入到忆阻器操作中，不仅显著拓宽器件的光带宽，还有效缓解了器件的互连问题”。