

学科撷珍

中北大学刘俊教授课题组在国家自然科学基金创新研究群体、国家重大科研仪器研制项目、重点基金、科技部重点研发计划等支持下,聚焦极限精度感知测量技术,致力于以量子机制突破现有传感测量精度极限,以极端尺度制造构筑超高性能量子功能结构,从底层机理到顶层器件系统性解决量子器件在前沿科技和工程产业应用难题,连续在 Science、Cell 系列子刊上发表多篇成果,以下精选6篇报道。

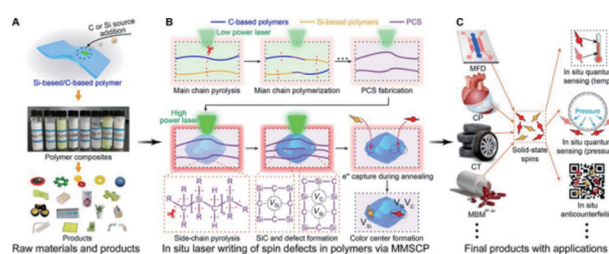
聚合物激光直写制造自旋结构

秦岳,郭浩,唐军,刘俊

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室,山西 太原 030051)

固态自旋缺陷作为突破物理量精密测量精度极限和跨越信息编码密度/维度上限的核心功能单元/信息载体,在量子传感测量、量子计算、量子通信和编码等领域具有广泛的应用前景。然而,自旋结构主要形成在金刚石、碳化硅、氮化镓等昂贵的高品质单晶基材中,受晶体结构、配置以及制造工艺等严格要求,使量子功能材料难以通用化、民生化应用。本文通过聚合物主链和侧链操纵策略(MMSCP),揭示了聚合物分子合成碳化硅自旋晶体结构的分子动力学过程,提出了光-气-电协同调控分子/原子选择性交联制造自旋结构机制,在各类聚合物中均实现了量子自旋结构原位制造,并进行了传感和加密功能验证。得益于激光直写的最小损伤和材料的稳定共价键,该方法有效地在微流控器件、心脏贴片

和药瓶中制造了自旋缺陷,并将其应用于传感和防伪,为量子器件、量子网络节点、量子计算载体等量子技术在柔性基材、橡胶制品等基础民生用品中普适化应用拉开序幕。



Science Advances, 2025, 11(31): eadv1848.

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adv1848>

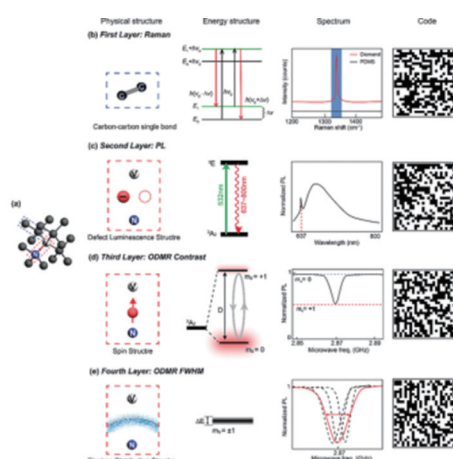
引用格式: 秦岳,郭浩,唐军,等. 聚合物激光直写制造自旋结构[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 643. doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025091

基于金刚石多种结构的多级编码物理不可克隆函数

郭浩,秦岳,唐军,刘俊

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室,山西 太原 030051)

多级编码方案是提高物理不可克隆函数防伪加密能力的有效方法,由于编码层之间存在相关性,编码容量难以实现数量级的提升。鉴于此,开发了基于金刚石氮空位色心的高独立性多级物理不可克隆函数。将金刚石晶体结构中的4种非相关结构(碳-碳单键、缺陷发光结构、自旋结构和电子能级分布结构)用于多级编码物理不可克隆函数的设计。并将含有氮空位色心的微金刚石嵌入聚二甲基硅氧烷中,制备了多级不可克隆函数结构,使用光学成像系统读取4种非相关结构构成的4种编码图像,计算得到其组间汉明距离为 0.496 ± 0.02 ,验证了该四级编码结构的非相关性,并将编码容量以指数级提升至 $24 \times 10\,000 / (100 \text{ 像素})^2$ 。同时,基于氮空位色心能级的自旋编码方法不依赖于物理结构参数,可有效抵御结构建模攻击,具有更高安全性。



Advanced Functional Materials, 2024, 34: 2304648.

<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.202304648>

引用格式: 郭浩,秦岳,唐军,等. 基于金刚石多种结构的多级编码物理不可克隆函数[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 644. doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025093

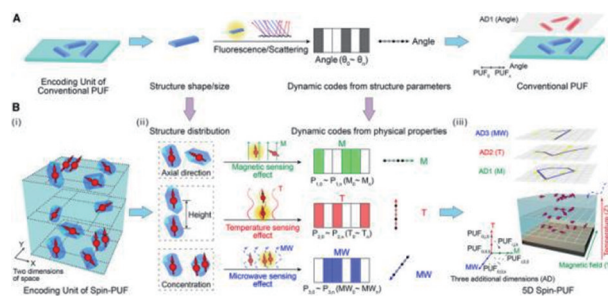
五维动态自旋物理不可克隆函数器件

郭浩, 秦岳, 唐军, 刘俊

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

面向物联网信息安全对大容量物理不可克隆函数器件的发展需求, 针对基于结构形状参数的编码机制对物理不可克隆函数编码容量上限制约的难题, 以及防伪/加密动态性差的技术瓶颈, 提出一种基于3种自旋传感效应和2种自旋空间参数的五维自旋不可克隆函数。采用自主研发的激光诱导技术制造了五维编码自旋基元, 实现了自旋结构晶体方向、高度和纳米晶浓度随机分布制造。并构建了温度、磁场和微波等3个物理量操控自旋状态的编码策略, 将物理不可克隆函数质询-响应对的数量实现了指数增长, 编码容量创纪录达到1027310000。同时, 凭借自旋结构优异的特异性、稳定性和低空间自相关性, 基于DenseNet的物理不可克隆函数的识别准确率超过94%。除此之外, 该技术具有独特实时防伪能力。利用自旋物理不可克隆函数的磁场、温度和微波3个编码维度分别保护产品的交易次数、维护

次数和损耗程度的3种状态信息, 可解决产品在整个生命周期中随着交易次数、维护和修改次数以及产品损耗等多维状态信息数据篡改导致的商品价值/寿命评估失败的难题, 为下一代安全策略提供了一种新方案。



Cell Reports Physical Science, 2024, 5(4):101924.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386424001735>

引用格式: 郭浩, 秦岳, 唐军, 等. 五维动态自旋物理不可克隆函数器件[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 643. doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025092

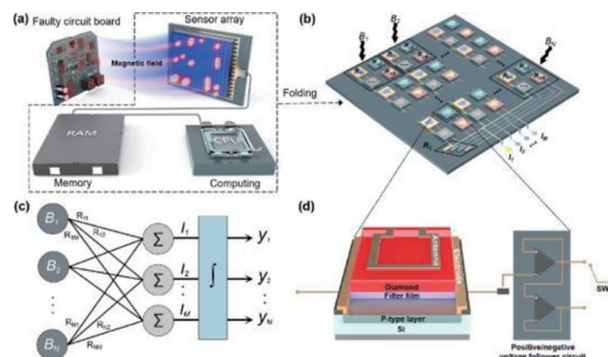
用于电路故障超快检测及识别的金刚石神经网络磁传感器

高伟, 郭浩, 唐军, 刘俊

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

针对空间站、航空航天精密电子电路、地下/空中线缆等电子故障快速、精准检测及识别技术需求, 及现有I/O端口检测式黑箱检测溯源难、信息采集与计算处理分离模式识别慢且不准等难题, 提出了一种金刚石自旋神经网络量子磁传感器, 通过自旋神经网络阵列结构检测电子电路辐射的微弱磁场信号, 实现对电子电路故障非接触式检测及故障类型识别。该传感器包括一个金刚石自旋传感阵列, 其中每个金刚石都充当一个自旋磁传感器, 其磁场响应灵敏度可通过正负电压跟随单元进行调节, 并用该金刚石自旋阵列构成人工神经网络器件阵列, 同时进行磁场信号传感并运行识别算法, 解决了传感信息感知到计算识别过程中数据传输耗时及信息延时问题, 极大提高了磁场信息感知识别响应时间。通过对该传感阵列器件进行故障分类训练, 器件对

电子故障的识别响应时间达到137.1 ns, 不仅实现了对电子故障的快速识别, 而且实现了对故障模式的准确检测, 为电子故障快速、精准、智能检测识别提供了全新技术途径。



Photonics Research, 2025, 13: 3228-3239.

<https://opg.optica.org/prj/fulltext.cfm?uri=prj-13-11-3228>

引用格式: 高伟, 郭浩, 唐军, 等. 用于电路故障超快检测及识别的金刚石神经网络磁传感器[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 644. doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025094

七维高动态自旋多路复用

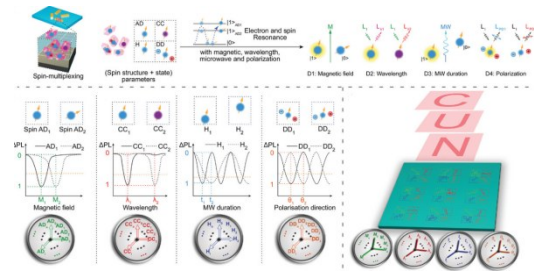
秦 岳, 郭 浩, 唐 军, 刘 俊

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

复用技术通过创建出多个相互正交的数据通道和维度来实现高密度信息编码, 而由于光与材料结构参数之间相互作用的自由度有限, 复用维度的提升方法仍然存在困惑。故提出一种七维自旋复用技术。基于自旋结构构建了具有四个独立属性(色心类型、自旋轴向、空间分布和偶极子方向)的编码基本单元, 基于自旋物理效应, 将四个独立属性相应的光致发光波长、磁场、微波和偏振特性转化为四个相互正交的多路复用维度, 并结合空间三维特性, 建立了七维复用方法, 解决了传统结构特征复用通道上限制约难题。同时, 该技术还具有高度动态复用特性, 用于在收集大量 X 文件(包括外星档案、太空探索档案、军事设备的设计图纸、古代文明书籍等)后立即归档/传输过程中对其进行加密/打水印。

引用格式: 秦岳, 郭浩, 唐军, 等. 七维高动态自旋多路复用[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 645. doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025095

通过调控自旋状态自由转换动态复用模式, 并与光学成像系统结合, 生成动态密钥, 以高频度实时对视觉图像进行加密/水印处理, 实现了自旋信息与图像信息像素级融合直接加密, 突破了传统像素字节串行加密模式对加密速度、容量、动态性能的限制。



Advanced Science, 2024, 11: 2402378.

<https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adv.202402378>

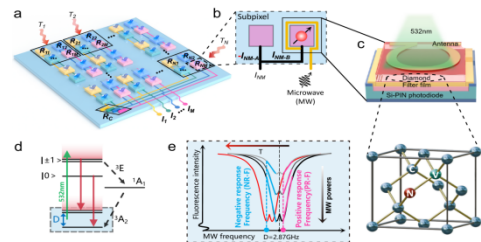
温度场金刚石阵列量子传感器超快探测及识别

高 伟, 郭 浩, 唐 军, 刘 俊

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

针对器件/系统热故障、细胞/器官病变热异常和环境热异常等领域对温度异常场快速成像检测及异常模式识别的需求, 而现有温度场感知与图像数据计算成像分离架构导致的热故障检测识别慢且不准等难题, 提出了一种基于金刚石自旋传感阵列的神经网络器件, 在传感器内计算架构中集成了温度场感知和模式识别计算功能。利用金刚石中氮空位色心自旋结构零场分裂效应构建温度传感机制, 通过多参数微波调制自旋态布局, 实现温度响应度和正负快速调控, 采用温度强度和响应度的矩阵向量乘法, 结合基尔霍夫定律求和计算, 直接实现对温度感测数据进行神经网络计算, 系统单次检测并识别时间达到

196.8 μ s, 实现了温度场超快感知和异常模式智能识别, 解决了传统温度成像和图像计算方式(包括离散传感阵列、数据存储单元和外部处理器)重复模数转换和感算分离架构存在的数据冗余、反复传输导致的耗时和延迟问题。



Microsystems & Nanoengineering, 2025, 11.

<https://doi.org/10.1038/s41378-025-01076-1>

引用格式: 高伟, 郭浩, 唐军, 等. 温度场金刚石阵列量子传感器超快探测及识别[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 645. doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025096