

面向 SNN 神经元电路抗辐照性能优化的 Ag:Ta₂O₅ 基阈值开关忆阻器大气中子辐照损伤紧凑模型*

樊长飞¹⁾²⁾³⁾ 姚林燕¹⁾²⁾³⁾ 宋宏甲^{1)2)3)†} 钟向丽^{1)2)3)‡} 王金斌¹⁾²⁾³⁾

1) (湘潭大学材料科学与工程学院, 低维材料及其应用技术教育部重点实验室, 湘潭 411105)

2) (湘潭大学材料科学与工程学院, 特种功能薄膜材料国家地方联合工程实验室, 湘潭 411105)

3) (湘潭大学材料科学与工程学院, 薄膜材料及器件湖南省重点实验室, 湘潭 411105)

(2026 年 1 月 6 日收到; 2026 年 2 月 27 日收到修改稿)

高效、高速和高集成度的忆阻脉冲神经网络 (SNN) 芯片在空间信息处理系统应用展现出巨大的潜力。阈值开关忆阻器 (TSM) 是忆阻 SNN 硬件的重要组成部分。实验研究结果表明 TSM 在空间辐射效应下出现损伤。然而, 现阶段缺乏 TSM 辐照损伤模型, 这制约了忆阻 SNN 芯片的抗辐照设计。本文基于 Ag:Ta₂O₅ 阈值开关忆阻器大气中子辐照实验数据, 建立了一种大气中子辐照损伤的紧凑模型。基于该模型对辐照前后 Ag:Ta₂O₅ 阈值开关忆阻器 $I-V$ 特性进行仿真, 结果表明仿真结果与实验数据吻合较好, 决定系数 (R^2) 均大于 0.89。基于该模型, 本文对忆阻泄漏积分和激发 (leaky integrate-and-fire, LIF) 神经元电路进行了抗辐照优化设计, 优化后的忆阻 LIF 神经元电路仿真结果显示, 在辐照环境下的尖峰发放频率为 23.3 kHz, 与未辐照条件下的 25.0 kHz 相比基本持平。进一步将该优化方案应用于 SNN 中, 结果表明在辐照后最终的识别精度达 97.2%, 显著优于未优化方案下识别精度的 94.7%。本研究可为中子辐射环境中的忆阻 SNN 芯片设计提供一定基础。

关键词: 紧凑模型, 大气中子辐照, 忆阻泄漏积分和激发神经元, 脉冲神经网络

DOI: 10.7498/aps.75.20260026

CSTR: 32037.14.aps.75.20260026

1 引言

随着深空探测需求的持续攀升, 航天器必须具备更强的抗辐射能力, 并朝着智能化方向发展。相比于传统冯·诺依曼架构的芯片, 存算一体类脑芯片凭借高算力、低功耗等特点, 成为航天器智能化发展的重要选择。在众多的类脑芯片中, 忆阻类脑芯片凭借超高集成度而展现出突出的能效优势^[1,2]。

相较于忆阻人工神经网络 (ANN) 芯片的逐层全量计算方式, 忆阻脉冲神经网络 (SNN) 芯片利用事件驱动的稀疏计算范式, 可进一步降低计算复杂度与能耗, 而成为下一代航天器芯片的有力候选者。在空间应用中的忆阻 SNN 芯片不可避免地暴露于复杂的辐照环境中, 辐照环境中的高能粒子及射线在材料和器件中诱发辐照损伤^[3,4], 继而引发芯片功能退化, 甚至导致航天器故障, 带来难以估计的损失。因此, 为实现忆阻 SNN 芯片在空间环境中的

* 国家自然科学基金 (批准号: 12475283, 12275230 和 52472139) 和低维材料及其应用技术教育部重点实验室 (湘潭大学) 开放课题 (批准号: 2024YB02) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: hjsong@xtu.edu.cn

‡ 通信作者。E-mail: xlzhong@xtu.edu.cn

可靠应用, 必须开展忆阻 SNN 芯片的抗辐照设计.

忆阻神经元是忆阻 SNN 芯片的功能核心, 承担处理信息的任务^[5-7], 因此对忆阻 SNN 芯片进行抗辐照设计要首先考虑忆阻神经元. 而开展忆阻神经元电路抗辐照设计, 应掌握忆阻神经元电路中各部件 (以忆阻泄漏积分和激发 (leaky integrate-and-fire, LIF) 神经元为例, 包括积分电容 C_m 、突触电阻 R_s 、阈值开关忆阻器 (TSM) 部件, 如图 1 电路图所示) 的辐照损伤规律, 并构建各部件的辐照损伤紧凑模型, 进而在电路层面进行仿真和抗辐照设计. 忆阻神经元工作原理是^[8,9], 当累积膜电位超越其阈值电压时, TSM 由高阻态 (HRS) 急速切换至低阻态 (LRS), 驱动积分电容瞬间放电; 随着电容电压衰减, TSM 两端电位随之下降并恢复至 HRS, 这个过程在神经元的输出端产生一个规整的离散脉冲信号. 可见, TSM 的阻变行为是实现忆阻神经元功能的核心. 从物理机制上看, TSM 的阻变行为是通过顶部和底部电极之间活性金属导电细丝的形成和断裂来实现的^[10-12]. 然而, 在空间辐射环境中, 各种辐射粒子或射线会对 TSM 器件产生位移损伤^[13,14], 在氧化物层内引入新的缺陷, 这些缺陷极大程度阻碍着金属导电细丝的形成和断裂过程, 从而影响 TSM 的电学性能以及忆阻神经元的尖峰特性. 因此, 掌握 TSM 的位移损伤规律、建立

辐照损伤模型是忆阻神经元电路抗辐照设计和忆阻 SNN 芯片在空间可靠应用的基础.

目前, 研究人员已经对二氧化物 TSM 的辐射诱导位移效应进行了一系列研究. 例如, Taggart 等^[15]通过研究 Ag/Ge₃₀Se₇₀ 基忆阻器在中子辐照的位移损伤效应下的性能, 发现随着中子注量的增大, Ag/Ge₃₀Se₇₀ 基忆阻器的开关比电阻值比 (R_{ON}/R_{OFF}) 减小. Tao 等^[16]研究了中子辐照对 Ag/AgInSbTe/*a*-C 基忆阻器的初始电阻、形成电压 ($V_{forming}$)、直流电流-电压 (I - V) 曲线、高低阻态、置位/复位 (SET/RESET) 电压和保持性能的影响, 结果发现, 在 14 MeV 的中子辐照后, 器件的 HRS 电阻和 SET 电压中观察到轻微的参数漂移, 这种变化归因于 Ag 离子注入到 AgInSbTe/*a*-C 界面附近的 *a*-C 薄膜中. Taggart 等^[17]在不同中子注量下对 TSM 器件进行直流 I - V 扫描, 研究了 Ag-Ge₃₀Se₇₀ 导电桥接随机存取存储器 (CBRAM) 两种不同的位移损伤测试, 发现 CBRAM 的 LRS 和 HRS 随中子注量逐渐降低, 在注量达到 2.9×10^{12} n/cm² 后收敛. 总之, 中子辐照产生的位移效应影响 TSM 的关键性能, 包括阈值电压 (V_{th}) 和保持电压 (V_h)、HRS 和 LRS、开关速度, 这些性能的改变直接影响忆阻神经元尖峰特性和忆阻 SNN 芯片的整体性能, 因此, 进行抗辐照设计势在必行.

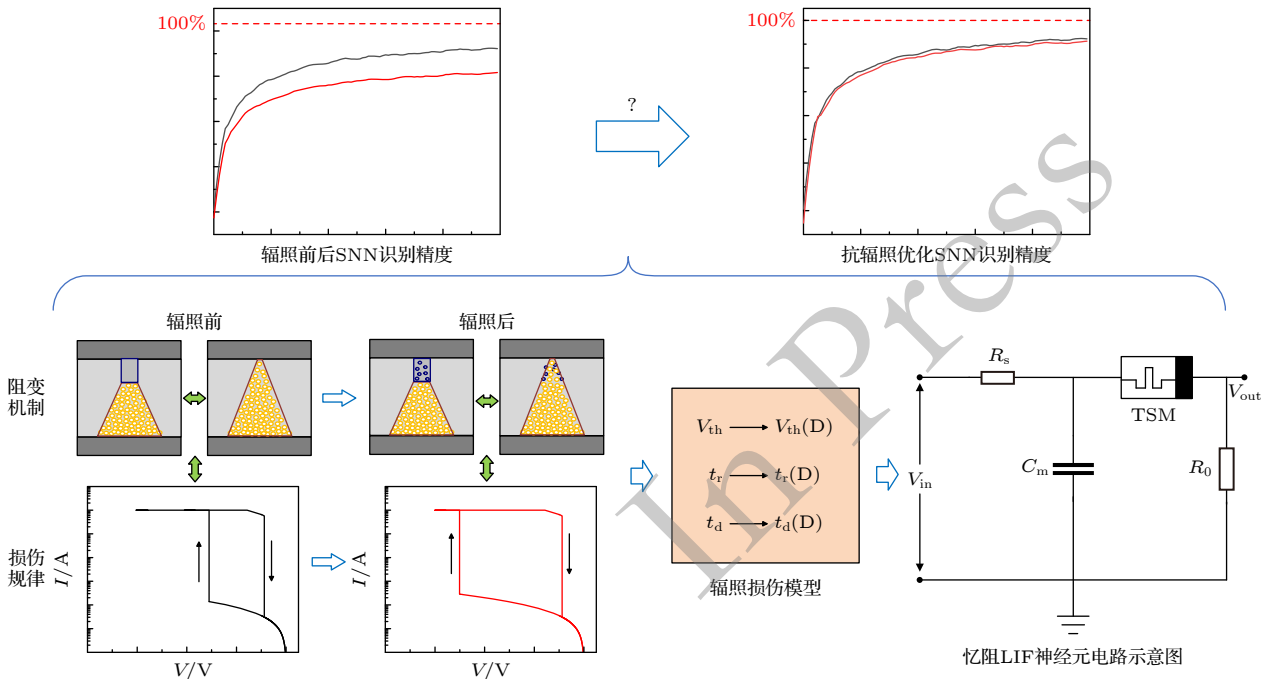


图 1 本文研究思路示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the research approach in this paper.

然而, 忆阻神经元和相应的 SNN 硬件的抗辐照设计很少报道.

建立 TSM 的电路仿真模型是忆阻神经元和相应的 SNN 硬件的抗辐照设计的基础. 研究人员通过以下两种方式建立了 TSM 模型, 一方面基于阻态转变的相关物理机制, 另一方面是利用数学函数对 TSM 器件的 $I-V$ 曲线进行分段拟合. 其中, 在基于阻态转变的相关物理机制方面, Dai 等^[18] 基于直接隧穿效应向 F-N(Fowler-Nordheim) 隧穿效应转变这一机制构建了 TSM 模型, 具体地, 忆阻器的外部刺激逐渐增大时, 金属簇间的距离减小, 有效导电丝长度增大, 活性金属颗粒与功能层间存在的准阶梯势垒逐渐变为准三角形势垒, 电子在每个活性金属簇间的传输由直接隧穿效应切换为 F-N 隧穿效应, TSM 器件从高阻态转为低阻态, 高低阻态的 $I-V$ 关系分别满足直接隧穿效应和 F-N 隧穿效应的 $I-V$ 关系; Li 等^[19] 根据 TaO_x 忆阻器的高阻态遵循空间电荷限制电流 (SCLC) 传导机制这一原理构建了 TSM 模型, 具体为, 器件高阻态的 $I-V$ 特性在低电压区域遵循欧姆定律, 随电压升高, 器件遵循 $I \propto V^2$ 的查尔德平方定律, 在更高的电压区域的 $\log I-V$ 曲线的斜率急剧增加至约 3, SCLC 三个过程下 $I-V$ 特性随电压和温度的变化而改变来表示器件阻态间的切换过程; Wang 等^[20] 通过器件内形成的导电丝长度、断裂后的残留长度和通道横截面的动态特性构建了扩散忆阻器模型, 对器件施加电压并逐渐增大, 来控制内部传导通道路径上 Ag⁺ 的漂移速度超过扩散速度, 形成传导通道, 实现 TSM 器件从高阻态向低阻态的转变, 模型中表现为导电丝长度和通道截面的增大, 并依据该变化构建了 $I-V$ 关系; Fyrisos 等^[21] 基于漂移、扩散和热扩散 3 种相互作用的效应构建了易失性忆阻器模型, 该模型中器件阻态总体由氧化物间隙长度、导电细丝的几何尺寸确定, 而这些几何参数由漂移、扩散和热扩散 3 种相互作用的效应确定: 外加电压在器件内部形成电压降, 导致金属离子的漂移和扩散通量指向相同, 金属导电细丝尺寸增大, 随着输入电压的增大, 金属导电细丝半径和长度增加, 氧化物间隙长度减小, 最终连通上下电极, 此时变为低阻态; 变为低阻态后器件阻值骤减, 金属离子漂移通量显著减小, 而此时出现显著焦耳热效应, 这时热扩散效应占主导会使导电路径逐渐断裂, 金属导电细丝半径和长度减小, 上下电极连通状态断

开, 氧化物间隙长度增大, 变回高阻态. 在基于数学函数对 $I-V$ 曲线分段拟合方面, Nabil 等^[22] 用分段函数给出器件在不同电压或电流范围内的电阻值, 并分别对银基易失性忆阻器和 Mott 忆阻器进行了验证; 方子良^[23] 基于在不同电压范围内器件具有不同的状态变量值来控制高低阻态的切换; Ostrovskii 等^[24] 根据 Ag 纳米点阈值开关器件的特性, 构建了基于电压控制阈值开关的一阶易失性忆阻器模型, 具体地, 针对特定电压范围, 利用特定的指数函数来表示状态变量的变化, 不同的电压范围内的指数函数不同, 进而控制器件高低阻态的切换. 上述 TSM 模型中, 基于阻态转变相关物理机制的 TSM 模型的参量可以很好地对应器件物理参数, 基于数学函数分段拟合的 TSM 与实验 $I-V$ 曲线的贴合较好. 然而上述模型的构建过程中, 并没有考虑辐照后器件内部的损伤规律, 无法准确模拟出辐照环境下的器件特性, 这阻碍着忆阻 SNN 硬件在电路级的抗辐照设计.

在基于 Ag 导电丝形成断裂机制的 Ta₂O₅ 基阈值开关忆阻器中, 从电极向 Ta₂O₅ 层注入的 Ag⁺ 具有低迁移势垒、高扩散系数^[25] 的优势, 展示了优异的性能. 通过在 Ta₂O₅ 层中掺杂 Ag 源, 进一步降低 Ag 在 Ta₂O₅ 层中的成核能^[26,27], 显著加速导电丝形成断裂的进程, 实现了纳秒级的超低开关速度. 这些优势使 Ag:Ta₂O₅ 忆阻器在忆阻 SNN 芯片中具有突出的应用前景. 本研究的整体思路如图 1 所示, 为实现 Ag:Ta₂O₅ 基忆阻 SNN 芯片的抗辐射加固, 如抑制识别精度的衰退, 基于 Ag:Ta₂O₅ 阈值开关忆阻器的大气中子辐照损伤机理和规律, 建立了阈值开关忆阻器大气中子辐照损伤的紧凑模型, 该模型考虑了大气中子注量与关键电学性能参数之间的关系, 包括 HRS/LRS, V_{th}/V_b 及开启时间和关闭时间, 并基于该模型优化了忆阻 LIF 神经元电路的抗辐照性能, 实现了 SNN 识别精度的抗辐照优化.

2 辐照下 Ag:Ta₂O₅ 基阈值开关忆阻器紧凑模型的建立

本文首先对阈值开关模型进行优化, 构建了常态下的 Ag:Ta₂O₅ 基阈值开关忆阻器模型; 随后, 在该优化模型的基础上引入辐射效应, 进一步建立了 Ag:Ta₂O₅ 基阈值开关忆阻器的大气中子辐照

损伤紧凑模型.

2.1 常态下 Ag:Ta₂O₅ 基阈值开关忆阻器模型优化

一般地, 流经忆阻器的电流由施加在器件两端的电压以及其本身的阻值来决定, I - V 关系可表示为

$$I(t) = \frac{V(t)}{R_m(V(t), X(t))}, \quad (1)$$

其中 I 表示电流, V 为施加的电压激励信号, t 表示时间, X 是内部状态变量, R_m 是忆阻器电阻, 其是 V 和 X 的函数. 内部状态变量 X 的取值范围为 $[0, 1]$, $X = 0$ 时表示高阻态, $X = 1$ 时表示低阻态, X 的变化反映了导电丝的形成程度. 金属导电细丝机制主导了 Ag:Ta₂O₅ 基忆阻器的阻态演变^[28,29]. 器件电阻 R_m 由上下极间形成的截锥形导电丝的几何形状决定^[30,31], 如图 1 所示. 因此器件电阻 R_m 可表示为

$$R_m(V(t), X(t)) = \frac{1}{1 + e^{\alpha_1(X(t) - X_m)}} \cdot R_{\text{off}}(V(t)) + \frac{1}{1 + e^{\alpha_2(X_m - X(t))}} \cdot R_{\text{on}}, \quad (2)$$

其中, X_m 为状态变量 X 取值范围的中间值, α_1 是 HRS 到 LRS 的动力学参数, α_2 是 LRS 到 HRS 的动力学参数. $R_{\text{off}}(V(t))$ 为激励下的高阻态:

$$R_{\text{off}}(V(t)) = R_1 \left[\frac{\rho_{\text{Ag}}(L - d)}{\pi \cdot rR \cdot r} + \frac{\rho_{\text{Ta}_2\text{O}_5} \cdot d}{\pi \cdot r \cdot r} \exp(\alpha \cdot |V(t)|) \right], \quad (3)$$

R_{on} 为激励下的低阻态,

$$R_{\text{on}} = R_2 \frac{\rho_{\text{Ag}} \cdot L}{\pi \cdot rR \cdot r}, \quad (4)$$

其中, R_1 是器件在激励下高阻态的拟合参数, ρ_{Ag} 是 Ag 基导电细丝的电阻率^[32], $\rho_{\text{Ta}_2\text{O}_5}$ 是中间层材料 Ta₂O₅ 的电阻率^[33], L 为导电丝长度, d 是间隙区域宽度, α 是电压激励下非线性 I - V 特性的曲率参数. rR 是形成的截锥形导电丝的底部半径, r 是形成的截锥形导电丝的顶部半径. R_2 是器件在电压激励下低阻态的拟合参数. 调节 R_1 和 R_2 的值, 可以使 R_{off} 和 R_{on} 的仿真值与实验值更好地吻合.

忆阻器状态变量 X 随时间的变化的关系式如下:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} = & f_1(X(t)) \cdot \{1 - \tanh[a \cdot (V(t) + V_{\text{th}})]\} \\ & \times \frac{1}{m} + f_2(X(t)) \cdot \{-\tanh[b \cdot (V(t) \\ & - V_{\text{h}})] - 1\} \cdot \frac{1}{n}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, V_{th} 是用于打开器件的阈值电压, V_{h} 是用于关闭器件的保持电压^[24]; m 和 n 是 TSM 器件开启时间和关闭时间的拟合参数, 调 m 和 n 的值, 可以调节 HRS 向 LRS 相互转变过程的开启时间和关闭时间; a 和 b 是 SET 和 RESET 的电压常数, 调 a 和 b 的值, 可以使阈值电压和保持电压的仿真值与实验值更好地吻合.

$f_1(X(t))$, $f_2(X(t))$ 函数用于限制状态变量 X 的变化范围, 严格约束于 $[0, 1]$, 表达式为

$$f_1(X(t)) = \frac{1}{1 + \exp[\beta_1 \cdot (X(t) - X_{\text{max}})]}, \quad (6)$$

$$f_2(X(t)) = \frac{1}{1 + \exp[\beta_2 \cdot (X_{\text{min}} - X(t))]}, \quad (7)$$

其中, X_{min} , X_{max} 为状态变量变化的边界值, $X_{\text{min}} = 0$ 代表未形成导电丝通道, $X_{\text{max}} = 1$ 代表形成了导电丝通道; β_1 和 β_2 是动力学常数, 调节 β_1 和 β_2 的值, 可以改变状态变量从 $X_{\text{min}} - X_{\text{max}}$ 和 $X_{\text{max}} - X_{\text{min}}$ 的变换速度.

2.2 Ag:Ta₂O₅ 基阈值开关忆阻器大气中子辐照损伤紧凑模型的建立

在辐照环境下, 金属氧化物中产生的缺陷以固定陷阱 (fixed traps, FT) 为主^[34,35]. 其中器件的阈值电压偏移 ΔV_{th} 主要是由固定陷阱引起的^[36], 保持电压 V_{h} 几乎与辐照无关, 原因在于细丝的断裂由细丝本身的表面最小能量或者焦耳热主导, 这与吉布斯-汤姆孙效应有关^[37]. 阈值电压偏移 ΔV_{th} 和辐照剂量 D 之间的依赖关系一般为^[34]

$$\Delta V_{\text{th}} = A \cdot D, \quad (8)$$

其中, A 是常数, 表示器件的辐射灵敏度, 主要受到氧化层电场、辐射能量、氧化层厚度、吸收剂量等的影响^[38]. 因此本文将阈值电压 V_{th} 与剂量 D 考虑为线性关系:

$$V_{\text{th}}(D) = V_{\text{th}}(0) + A \cdot D. \quad (9)$$

导电丝的形成动力学主要受开启时间 (t_{d}) 调控, 其断裂过程则取决于关闭时间 (t_{c}). 根据场致

成核理论^[39-41], t_d 可表示为

$$t_d = \exp\left(\frac{W_0 \cdot \theta^{3/2} \cdot E_0 \cdot h}{k \cdot T \cdot V}\right), \quad (10)$$

其中, W_0 为零场时的成核势垒能, E_0 为与外场或温度无关的电压加速因子, h 为器件介电厚度, θ 是一个几何因子, 主要受到成核粒子的影响, T 为环境温度, k 为玻尔兹曼常数, V 为外加电压.

在大气中子辐照环境下, TSM 器件因位移损伤而引入了更多缺陷^[42-45], Ag^+ 在迁移过程中, 受到缺陷阻碍的作用, 这会导致 Ag 导电丝通道形成的动力学下降. 而且在 $\text{Ag}:\text{Ta}_2\text{O}_5$ 体系中, 缺陷浓度会随注量增大而逐渐饱和, 因此成核能 W_0 会随辐照注量 D 的增大而增大并逐渐饱和, 可将其看作随注量的自然对数依赖关系. 因此 t_d 与辐照注量 D 呈线性依赖关系:

$$t_d = \exp\left[\frac{W_0(0) \cdot \ln(D) \cdot \theta^{3/2} \cdot E_0 \cdot h}{k \cdot T \cdot V}\right]. \quad (11)$$

导电丝自发断裂过程取决于关闭时间 (t_r), t_r 主要由导电丝的尺寸和形态决定^[46,47], t_r 依赖于导电丝尺寸并遵循赫林缩放定律^[48]:

$$t_r \propto r_0^4, \quad (12)$$

其中 r_0 是导电丝的半径.

导电丝尺寸随辐照注量的增大而增大^[49,50], 可将其看作随注量的线性关系变化:

$$r_0(D) = r_0(0) \cdot D. \quad (13)$$

因此 t_r 与辐照注量 D 的函数关系如下:

$$t_r(D) \propto D^4. \quad (14)$$

在模型中, 时间常数 m , n 对应导电丝形成断裂的动力学参数, 其中 m 与开启时间 t_d 相关, n 与关闭时间 t_r 相关. 从而将模型参数 m 表达为辐照注量 D 的线性关系, 将模型参数 n 表达为辐照注量 D 的多项式函数关系:

$$m(D) \propto D, \quad (15)$$

$$n(D) \propto D^4. \quad (16)$$

上述模型参数与大气中子辐照注量的函数关系具有普适性, 这要求必须在氧化物材料器件中发生, 且阻变由金属导电细丝引起; 并且, 辐照注量对氧化物材料不能产生晶体结构的变化. 在中子辐照下, 当其注量范围达到 10^{21} n/cm² 时^[51], 会影响氧化物材料的晶格结构, 可能会出现晶格损伤, 严重

影响器件性能, 此时上述函数关系可能不再适用.

3 结果与讨论

3.1 $\text{Ag}:\text{Ta}_2\text{O}_5$ TSM 器件的 $I-V$ 曲线仿真

本文实验数据的辐照实验条件是大气中子辐照^[52], 辐照实验是在中国散裂中子源 (CSNS) 的大气中子辐照光谱仪 (ANIS) 上进行的^[53,54], 全能谱的积分中子注量率为 1.7×10^6 n/(cm²·s), 实验装置保持在室温空气中, 且没有实施主动温度控制. 在大气中子辐照后, 对 $\text{Ag}:\text{Ta}_2\text{O}_5$ 忆阻器件测试的多组实验数据, 取 10 个器件参数波动后统计的数据均值, 作为仿真模拟的实验 $I-V$ 数据. 为了验证所建立的辐照损伤模型, 首先, 本文基于大气中子辐照前的实验 $I-V$ 数据确定了模型中的参数, 包括 V_{th} , V_h , R_1 , R_2 , a , b , m , n , β_1 和 β_2 , 并进行辐照前的 $I-V$ 曲线仿真. 随后, 基于不同大气中子注量辐照后的实验 $I-V$ 数据确定了模型参数 V_{th} , m 和 n , 这些参数随辐照注量而变化, 而模型中其他参数 V_h , R_1 , R_2 , a , b , β_1 和 β_2 不变, 并对辐照后的 $I-V$ 曲线进行仿真. 在仿真中施加与实验一致的三角波激励信号源参数进行模拟 (幅值 1 V 或 2 V, 周期 2 μ s). 将 $\text{Ag}:\text{Ta}_2\text{O}_5$ 器件在大气中子辐照前后的 $I-V$ 实验曲线与模型仿真结果进行比较, 如图 2 所示. 我们采用决定系数 R^2 来描述模拟结果与实验结果之间的吻合度, 其定义如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (17)$$

其中, N 为数据点总数, y_i 为第 i 个数据点的实验测量值, \hat{y} 为模型对第 i 个实验数据点的模型模拟值, \bar{y} 为所有数据点实验测量值的均值. 所用的实验数据是经过统计得来的, 每个注量下取 10 组实验参数的平均值, 对实验参数和辐照注量进行对应函数关系的曲线拟合, 并进行迭代操作, 直至拟合至收敛. 每个注量下的实验参数均匀分布在对应的函数关系曲线周围, 从而验证了函数关系的可靠性.

在图 2 中, 氧化物材料和导电丝材料的相关参数在 TSM 辐照损伤模型中是不变的, 包括 $L = 3 \times 10^{-7}$ m, $d = 5 \times 10^{-8}$ m, $rR = 5 \times 10^{-8}$ m, $r = 4 \times 10^{-10}$ m, $\rho_{\text{Ta}_2\text{O}_5} = 14 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_{\text{Ag}} = 8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,

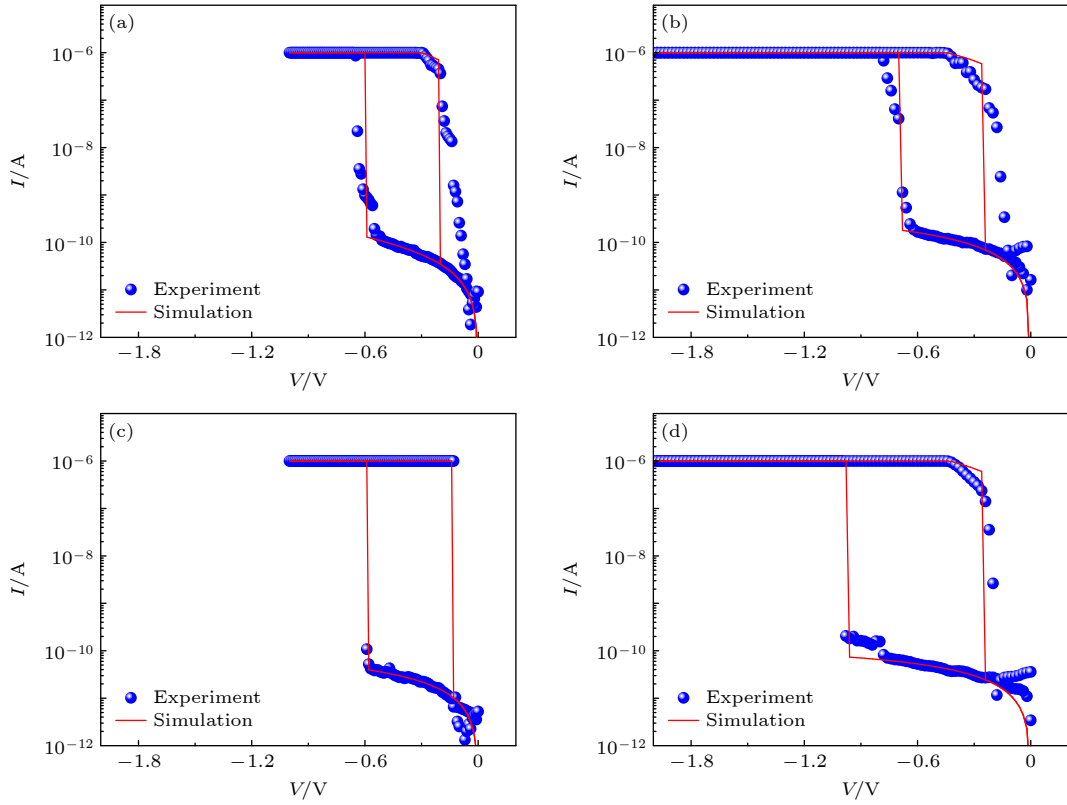


图 2 不同中子注量下实验结果和模拟结果的 I - V 曲线 (a) 0 n/cm^2 ; (b) $9.53 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$; (c) $1.78 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$; (d) $2.7 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$

Fig. 2. I - V curves from experimental and simulated results under different neutron irradiation doses: (a) 0 n/cm^2 ; (b) $9.53 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$; (c) $1.78 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$; (d) $2.7 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$.

模型中的常数参数包括 $a_1 = 10^4$, $a_2 = 10^4$, $a = 10^4$, $b = 10^4$, $\beta_1 = 10^4$, $\beta_2 = 10^4$; 剩下的拟合参数中, 有些随大气中子注量的变化而改变, 包括 V_{th} , m , n ; 有些是由于器件性能的非理想而变化, 包括 V_{h} , R_1 , R_2 , α . 其中图 2(a) 中相关参数的具体值为 $V_{\text{th}} = 0.6 \text{ V}$, $V_{\text{h}} = 0.2 \text{ V}$, $R_1 = 4.6 \times 10^{-3}$, $R_2 = 32$, $\alpha = -0.6$, $m = 7.24 \times 10^{-8}$, $n = 8 \times 10^{-8}$; 图 2(b) 中相关参数的具体值为 $V_{\text{th}} = 0.67 \text{ V}$, $V_{\text{h}} = 0.26 \text{ V}$, $R_1 = 2.2 \times 10^{-3}$, $R_2 = 46$, $\alpha = 0.2$, $m = 7.14 \times 10^{-8}$, $n = 8.85 \times 10^{-8}$; 图 2(c) 中相关参数的具体值为 $V_{\text{th}} = 0.57 \text{ V}$, $V_{\text{h}} = 0.15 \text{ V}$, $R_1 = 9 \times 10^{-3}$, $R_2 = 14$, $\alpha = 0.3$, $m = 8.4 \times 10^{-8}$, $n = 8.93 \times 10^{-8}$; 图 2(d) 中相关参数的具体值为 $V_{\text{th}} = 0.95 \text{ V}$, $V_{\text{h}} = 0.28 \text{ V}$, $R_1 = 6.4 \times 10^{-3}$, $R_2 = 45$, $\alpha = 0.4$, $m = 9.61 \times 10^{-8}$, $n = 11.24 \times 10^{-8}$.

从图 2(a)–(d) 可以看到, 随着辐照注量的升高, 阈值电压 (V_{th}) 的偏移量单调增大, 保持电压 (V_{h}) 基本保持不变, 高阻态和低阻态基本保持不变. 模型仿真结果与实验数据高度吻合, 决定系数 (R^2) 均大于 0.89 (具体为 0.8911, 0.89621, 0.95756,

0.96305), 成功展示了阈值电压 V_{th} 随中子注量演化的规律. 开启时间和关闭时间在 I - V 曲线对应着 SET 和 RESET 过程, 大气中子辐照后, TSM 器件的开启时间和关闭时间略微延长, 但均在 20 ns 左右, 辐照后两者的略微增加对 I - V 曲线拟合的影响极小. TSM 的辐照损伤模型不止适用于 Ag:Ta₂O₅ 体系, 同时可扩展至其他氧化物基导电桥的阈值开关忆阻器. 当活性金属由 Ag 更换为 Cu 时, 需要修改模型中参数 ρ_{Ag} 的值, 其作为金属导电桥的电阻率, 需要将 ρ_{Ag} 的值改为 ρ_{Cu} 的值, 同时若是其他的氧化物体系, 需要修改模型中参数 $\rho_{\text{Ta}_2\text{O}_5}$ 的值, 使模型来匹配实验 I - V 曲线中不同阻态的对应区域, 并修改参数 R_1 和 R_2 的值, 使模拟结果更贴合实验结果的 I - V 曲线.

大气中子对氧化物基忆阻器最常见的影响是位移损伤, 实验上分析了大气中子辐射对 TSM 器件的损伤机制, 测量了 TSM 器件中 Ag:Ta₂O₅ 薄膜的 XPS 谱, 如图 3 所示. 结果显示: 随着辐照注量的增大, Ag:Ta₂O₅ 薄膜的 Ag 4f_{5/2} 峰逐渐正向偏移, 这表明 Ag₂O 分解为金属 Ag, 导致间隙 Ag

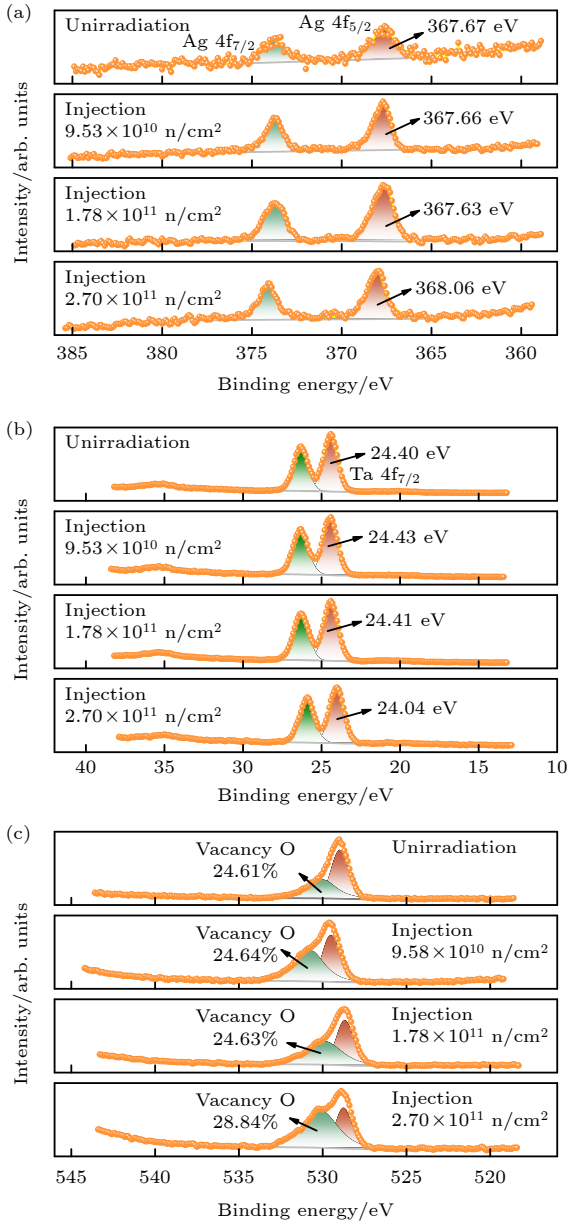


图3 0, 9.53×10^{10} , 1.78×10^{11} 和 2.7×10^{11} n/cm² 的大气中子注量辐照后 TSM 器件的 XPS 能谱 (a) Ag 3d 能级; (b) Ta 4f 能级; (c) O 1s 能级

Fig. 3. XPS spectrum of TSM devices irradiated by atmospheric neutron fluences of 0, 9.53×10^{10} , 1.78×10^{11} 和 2.7×10^{11} n/cm²: (a) Ag 3d energy level; (b) Ta 4f energy level; (c) O 1s energy level.

原子增大; Ta 4f_{7/2} 峰强度降低, 表明 Ta—O 键断裂; Ag:Ta₂O₅ 薄膜中的 O 1s 峰强度增大, 表明氧空位含量随辐照注量而显著增大. Ag:Ta₂O₅ 器件在大气中子辐照下阻变机制的相关变化与脉冲堆中子辐照^[5]下的极为相似, 脉冲堆中子辐照和大气中子辐照都会导致位移效应, 但由于辐照注量的不同, 对 Ag:Ta₂O₅ 器件的影响程度不同, 本文大气中子辐照后的 Ag:Ta₂O₅ 器件内间隙 Ag 原子增加

量更多、断裂的 Ta—O 键更多以及氧空位含量增大的更少. TSM 器件内部辐照诱导增大的氧空位会形成正电荷中心, 排斥带正电的 Ag⁺离子^[56-58], 改变其运动路径, 从而抑制其迁移. 辐射将银离子还原成银原子, 而银原子不能直接参与导电丝的形成. 它们必须首先电离成银离子, 以便在电场的影响下迁移并参与导电丝的形成^[59,60]. 因此, 氧空位缺陷引起的 Ag⁺迁移的散射以及 Ag 原子的电离导致需要更大的电场, 导致器件的 V_{th} 升高、开启时间和关闭时间延长. 需要注意的是, 保持电压 V_h 几乎与注量无关, 这是由于细丝的断裂由细丝本身的表面最小能量或者焦耳热主导, 而这些本征属性对外部辐照不敏感. 此外, 由于辐照作用在 Ag 导电丝形成路径上产生了氧空位阻碍导电丝形成, 形成的细丝更为脆弱, 导致导电丝通道稳定性下降, 因此表现为 I-V 曲线中 SET 和 RESET 过程的数据点减少、斜率升高. 该模型准确模拟了大气中子辐照下器件的电学性能, 模拟结果有效地捕捉了辐照效应下关键特性的变化, 为研究辐照下忆阻神经元尖峰特性的退化提供了依据.

3.2 忆阻 LIF 神经元抗辐照优化设计

为了促进 TSM 辐照损伤模型在抗辐照优化设计中的应用, 本文基于该模型进行忆阻神经元电路的抗辐照优化设计. LIF 神经元模型不仅能够捕捉到神经元活动的核心特征, 而且具有结构较为简洁的优点, 因此本文采用 LIF 神经元模型.

为了研究大气中子辐照对忆阻 LIF 神经元的发放尖峰特性的影响, 本文建立了基于 TSM 辐照损伤模型的忆阻 LIF 神经元电路 (如图 1 所示). 其中, 单个 TSM 与定值电阻 ($R_0 = 100 \Omega$) 串联构成一个人工树突; TSM 并联积分电容 ($C_m = 20$ pF), 充当人工轴突, 通过积分电容来产生电压尖峰. 输入脉冲经突触电阻 R_s (10 M Ω) 注入, 对应生物突触. 而在输出端串联的定值电阻 R_0 , 将尖峰电流线性转换为尖峰电压信号, 实现电流和电压的输出.

我们模拟了 TSM 器件在未辐照和最大注量大气中子辐照 (2.7×10^{11} n/cm²) 条件下, 忆阻 LIF 神经元电路尖峰特性的变化. 图 4(a), (b) 显示了忆阻 LIF 神经元电路在辐照前后的一系列电压脉冲振幅 5.0 V, 脉冲宽度 20 μ s, 脉冲间隔 20 μ s (V_{in}) 下的尖峰发放行为. 可以看出, 忆阻 LIF 神经

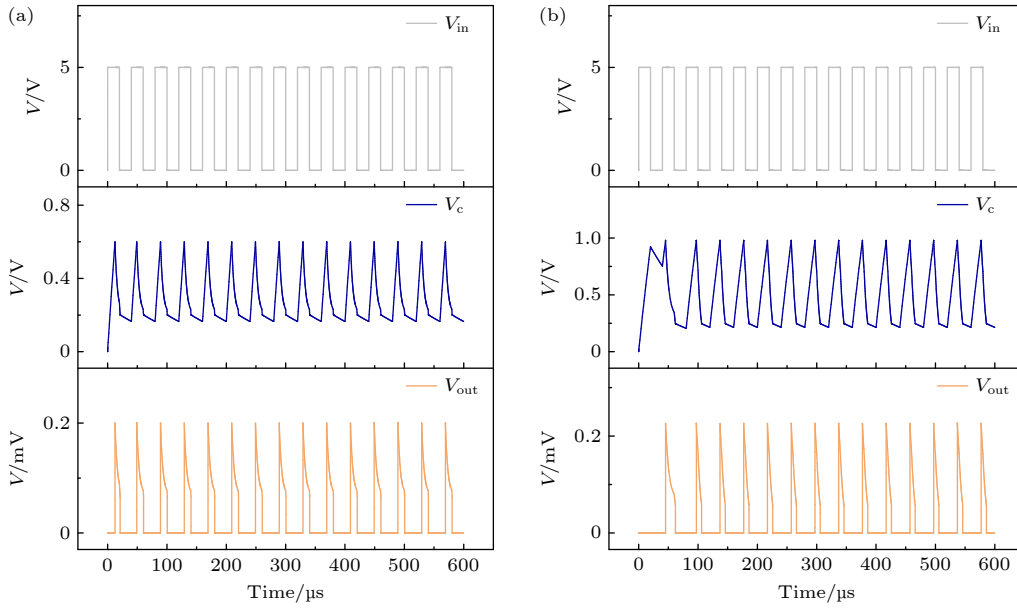


图 4 忆阻神经元电路在幅值 5.0 V, 脉冲宽度 20 μs , 脉冲间隔 20 μs 的连续脉冲电压下的阈值驱动尖峰行为 (a) 辐照前; (b) 辐照后

Fig. 4. Threshold driven spike behavior of memristive neuron circuit under continuous pulse voltage with amplitude of 5.0 V, pulse width of 20 μs , and pulse interval of 20 μs : (a) Before irradiation; (b) after irradiation.

元在辐照后的发放频率明显降低, 由辐照前的 23.3 kHz 降至 11.7 kHz. 这是由于高中子注量使器件阈值电压 (V_{th}) 发生偏移, 积分电容需更长时间达到新阈值电压, 导致脉冲周期延长、发放频率下降. 随着中子注量升高, 高中子注量通过最大化器件阈值电压的偏移, 导致忆阻 LIF 神经元的尖峰发放频率的显著下降. 忆阻神经元电路的尖峰发放频率在 23.3 kHz 左右, 对应的时间范围在 40 μs 以上, 所以辐照后 TSM 器件开启时间和关闭时间的略微延长对忆阻 LIF 神经元电路尖峰性能退化的影响极小, 因此忆阻神经元电路设计及其尖峰特性的研究可忽略开启时间和关闭时间的影响.

为实现 LIF 忆阻神经元电路的抗辐照性能优化, 本文通过协同调控突触电阻 R_s 与积分电容 C_m , 对神经元电路的发放尖峰频率特性进行优化. 图 5(a), (b) 给出了辐照前后忆阻 LIF 神经元电路在相同的脉冲电压激励下的尖峰响应, 其中输入脉冲幅值 $V_{\text{in}} = 5.0 \text{ V}$, 脉宽为 20 μs , 脉冲宽度 20 μs ; 积分电容 $C_m = 14 \text{ pF}$, 突触电阻 $R_s = 7 \text{ M}\Omega$. 抗辐照优化的神经元电路中, 即使 TSM 器件在辐射下发生参数退化, 积分电容和突触电阻的协同调控, 仍可将神经元电路的时间常数 ($\tau = R_s \times C_m$) 降至更低水平, 使膜电压在更短时间达到 TSM 的阈值电压, 触发尖峰行为. 由此, 阈值电压的微小偏移对

尖峰发放行为的影响被显著削弱, 从而实现了抗辐照优化设计. 可以看出, 经抗辐照优化后, 忆阻 LIF 神经元电路的尖峰频率由辐照后的 11.7 kHz, 显著回升至 23.3 kHz, 仅比辐照前 (25 kHz) 降低 7% 左右, 辐照诱导的尖峰行为退化得到了有效改善.

忆阻器抗辐照方法一般是通过冗余的设计来实现, 例如, Jahan 等^[61] 通过将每个导电桥接随机存取存储器 (CBRAM) 的存储单元复制为 3 份独立的副本, 当 3 个冗余单元中的一个单元因辐射引发单粒子翻转等瞬态故障时, 其余两个正常单元的输出仍能确保多数表决结果正确, 从而有效屏蔽单点错误, 实现 100% 的故障覆盖. 该方法基于 1T1R 结构设计, 3 个忆阻器并联后接一个多数表决器, 再与晶体管串联, 相比于单个忆阻器单元与晶体管串联的结构, 在电路面积上增加了开销; 由于使用 3 倍数量的忆阻器, 功耗上有所上升. Cirakoglu 等^[62] 采用了电路级与布局级相结合的混合加固方法: 首先, 在电路层面将传统的 1T1R 单元改进为 2T1R 结构, 通过增加一个额外的 NMOS 晶体管来隔离 RRAM 器件, 显著提高单事件效应 (SEE) 的耐受性; 其次, 将这个额外的 NMOS 晶体管设计为环形栅晶体管 (ELT), 以降低浅槽隔离区电荷积累对阈值电压的影响, 从而提升总电离剂量 (TID) 的耐受性. ELT 器件虽然增强了 TID 防护能力,

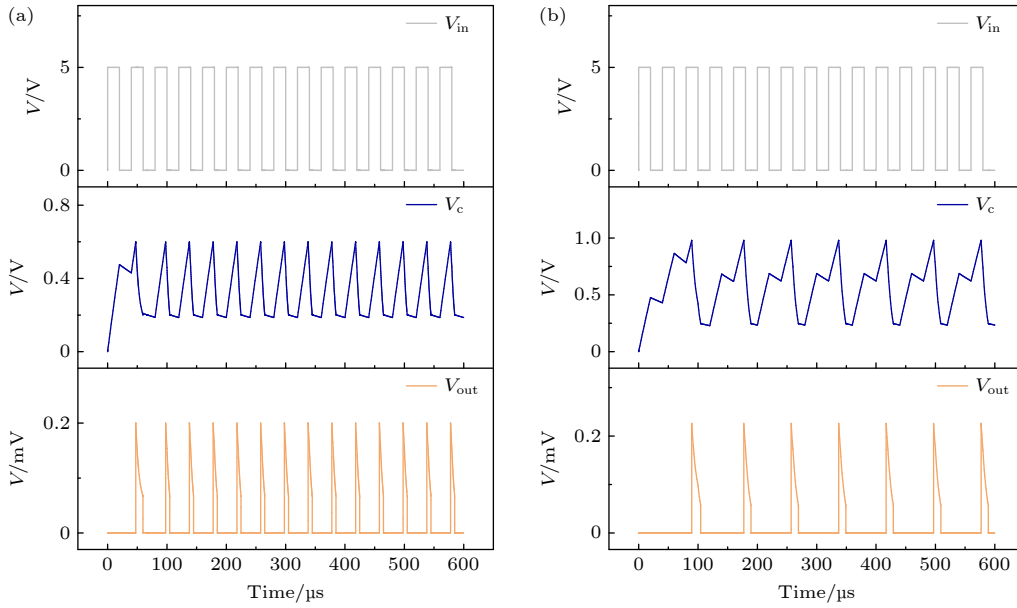


图 5 抗辐照优化的忆阻神经元电路在幅值 5.0 V, 脉冲宽度 20 μs , 脉冲间隔 20 μs 的连续脉冲电压下的阈值驱动尖峰行为 (a) 辐照前; (b) 辐照后

Fig. 5. Threshold-driven spike behavior of the radiation-resistant optimized memristive neuron circuit under continuous pulse voltage with an amplitude of 5.0 V, a pulse width of 20 μs , and a pulse interval of 20 μs : (a) Before irradiation; (b) after irradiation.

但其较大的敏感区域反而会导致软错误率 (SER) 上升. 总体来说, 2T1R 结构仍能在面积显著增大的前提下, 使忆阻器电路的抗辐射能力有了明显的提升. 相比于通过冗余的方法对神经形态电路进行抗辐射加固设计, 我们的抗辐照优化方案没有增大额外的电路和能耗开销. 此方案为忆阻 LIF 神经元提供可扩展的抗辐照设计空间, 从而提升忆阻 SNN 在辐射环境下的稳定性与可靠性.

3.3 SNN 数据集识别任务

本文基于忆阻 LIF 神经元构建脉冲神经网络 (SNN) 并开展图像识别测试, 所使用的数据集为 MNIST 手写数据集^[63], 以验证经抗辐照优化的忆阻 LIF 神经元电路在忆阻神经网络硬件应用层面的有效性. 整个测试依托 CPU 平台展开, 以 PyTorch 作为后端支撑, 采用 SpikingJelly 框架构建并实现的 SNN^[64,65], 其中测试集为 60000 张手写数字图片, 用于训练网络, 验证集为 10000 张手写数字图片, 用于测试网络在训练后对验证集手写图片的识别能力. SNN 由输入层、隐藏层和输出层共同构成, 如图 6(a) 所示. 在网络运行过程中, 输入层负责将接收信号转化, 隐藏层进行特征分析, 输出层进行判断决策, 最终实现图像数据集的识别任务. 具体来说, 在输入层, 将 MNIST 手写数据集中的

手写数字图片转换成 SNN 能够理解的信号, 输入图像的编码规则为基于频率的泊松编码, 将每张图片静态的 28×28 像素通过 784 个神经元转化为离散的、随时间变化的脉冲序列, 其中脉冲频率与像素强度成正比. 隐藏层是网络的核心计算单元, 负责提取输入数据中的时空特征模式并分析, 经 196 个神经元, 将提取的特征转化输出为特定的离散脉冲. 输出层根据特征信号做出最终的判断和决策, 将结果输出, 其中 10 个神经元对应 10 个数字类别. 本文将忆阻 LIF 神经元电路脉冲发放特性行为映射到 SNN 中, 采用了基于时间的反向传播算法进行训练和测试. 具体来说, $\text{Ag:Ta}_2\text{O}_5$ 基忆阻 LIF 神经元的阈值电压 V_{th} 和电路参数 R_s , C_m 等直接影响神经元的尖峰特性行为, 进而影响整个网络的学习和处理能力. 其中, 辐照主要影响 V_{th} ; 而本文 3.2 节通过优化电路参数 R_s , C_m , 提高了 $\text{Ag:Ta}_2\text{O}_5$ 基忆阻 LIF 神经元的抗辐照性能.

辐照前后及神经元电路优化前后的 SNN 经过 200 个周期 (epochs) 训练后, 在测试集上进行数字图像识别的结果如图 6(b) 所示. 抗辐照优化的忆阻 LIF 神经元电路在辐照前表现出较高的尖峰频率, 最高识别精度可达 97.4%, 辐照后, 尖峰频率略微下降, 识别准确率仍保持 97.2% 以上. 相比之下, 基于未优化的忆阻 LIF 神经元电路的 SNN,

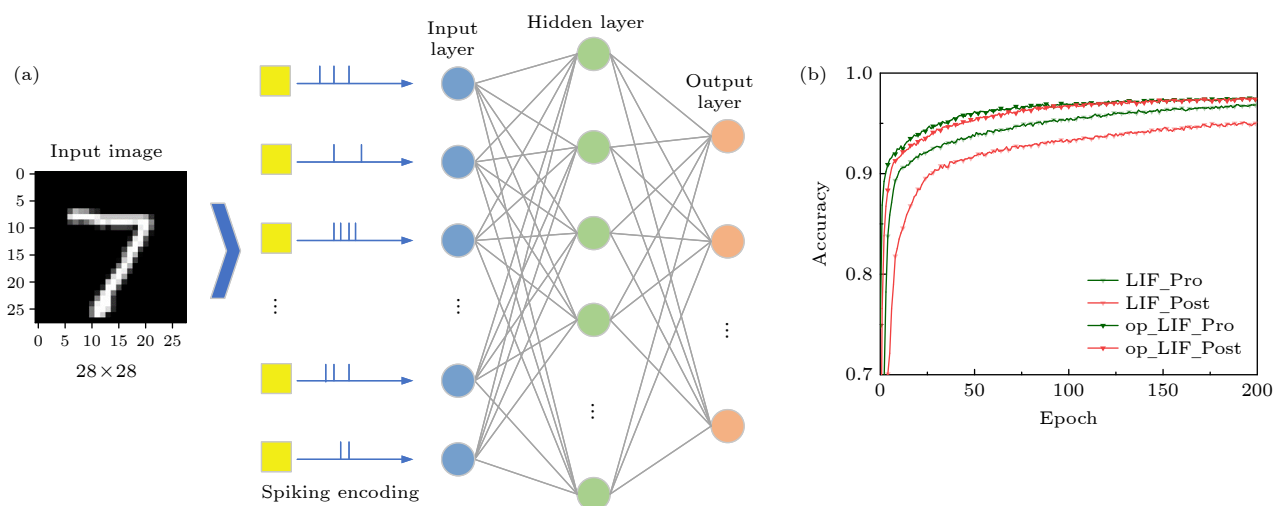


图 6 (a) 识别数字图像“7”的全连接 SNN 的基本结构; (b) 优化前后的 LIF 神经元电路在辐照前后的数字图像识别精度比较
Fig. 6. (a) The basic structure of a fully connected SNN for recognizing the digit image “7”; (b) comparison of digital image recognition accuracy in LIF neuronal circuits before and after optimization, prior to and following irradiation.

最高识别准确率在辐照前为 96.4%; 辐照后, SNN 的识别精度下降至 94.7% 左右, 且在短训练周期下, 辐照后 SNN 的识别准确率上升缓慢, 难以进行图像识别任务. 上述结果表明, 基于抗辐照优化的忆阻 LIF 神经元电路在 SNN 实现了较高的图像识别精度, 并表现出优异的抗辐照性能.

4 结 论

本文构建了 $\text{Ag:Ta}_2\text{O}_5$ 基阈值开关忆阻器的大气中子辐射损伤紧凑模型, 基于该模型对忆阻 LIF 神经元电路进行抗辐照优化设计, 并通过全连接 SNN 验证了这一设计的有效性. 结果表明, 该辐照损伤紧凑模型与实验数据吻合较好, 大气中子辐照前后的 $I-V$ 特性的决定系数 (R^2) 均大于 0.89. 对忆阻 LIF 神经元电路进行抗辐照优化设计, 辐照后尖峰频率维持在 23.3 kHz, 与辐照前 (25 kHz) 基本持平, 显著优于未优化电路的尖峰频率 (11.7 kHz). 并将 LIF 神经元电路映射到全连接 SNN 进行验证, 其中基于优化的忆阻 LIF 神经元电路的 SNN 的识别准确率在辐照后达到 97.2%, 而忆阻 LIF 神经元电路的 SNN 的识别准确率在辐照后为 94.7%. 本文的辐照损伤紧凑模型和 LIF 神经元电路参数可灵活调整, 扩展到模拟其他的导电丝主导的 TSM 并进行忆阻神经元电路设计, 为空间级抗辐照忆阻神经网络硬件提供可扩展的设计方案与基础.

参考文献

- [1] Xiao Y K, Gao C, Jin J C, Sun W L, Wang B W, Bao Y K, Liu C, Huang W, Zeng H, Yu Y F 2024 *Adv. Dev. Instrum.* **5** 0044
- [2] Wang X J, Zhu Y X, Zhou Z L, Chen X, Jia X J 2025 *Nanomaterials* **15** 1130
- [3] Gao B, Yu X F, Ren D Y, Li Y D, Cui J W, Li M S, Li M, Wang Y Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 036106 (in Chinese) [高博, 余学峰, 任迪远, 李豫东, 崔江维, 李茂顺, 李明, 王义元 2011 *物理学报* **60** 036106]
- [4] Zheng Q W, Cui J W, Wang H N, Zhou H, Yu D Z, Wei Y, Su D D 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 076102 (in Chinese) [郑齐文, 崔江维, 王汉宁, 周航, 余德昭, 魏莹, 苏丹丹 2016 *物理学报* **65** 076102]
- [5] Choi Y, Jeong S, Jeong H, Han S, Ko J, Yu S E, Xu Z, Chae M S, Son M, Meng Y, Xu S, Kang J H 2025 *npj Unconv. Comput.* **2** 8
- [6] Moon T, Soh K, Kim J S, Kim J E, Chun S Y, Cho K, Yang J J, Yoon J H 2024 *Mater. Horiz.* **11** 4840
- [7] Xia Z P, Sun X, Wang Z L, Meng J L, Jin B Y, Wang T Y 2025 *Nano-Micro Lett.* **17** 217
- [8] Ke S W, Tong F J, Jin Y Y, Xiao Y Y, Meng J H, Chen S Q, Zhang Z H, Wang J H, Ye C 2024 *IEEE Trans. Electron Device* **71** 7911
- [9] Lee D, Kwak M, Moon K, Choi W, Park J, Yoo J, Song J, Lim S, Sung C, Banerjee W, Hwang H 2019 *Adv. Electron. Mater.* **5** 1800866
- [10] Chekol S A, Naeke R, Aussen S, Hoffmann-Eifert S 2023 *Micromachines (Basel)* **14** 571
- [11] Covi E, Wang W, Lin Y H, Farronato M, Ambrosi E, Ielmini D 2021 *IEEE Trans. Electron Device* **68** 4335
- [12] Chekol S A, Menzel S, Ahmad R W, Waser R, Hoffmann-Eifert S 2021 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2111242
- [13] Chen W, Barnaby H J, Kozicki M N, Edwards A H, Gonzalez-Velo Y, Fang R, Holbert K E, Yu S, Yu W 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2404
- [14] Pattnaik D P, Andrews C, Cropper M D, Gabbitas A, Balanov A G, Savel'ev S, Borisov P 2023 *Nanoscale* **15** 15665
- [15] Taggart J L, Jacobs-Gedrim R B, McLain M L, Barnaby H J, Bielejec E S, Hardy W, Marinella M J, Kozicki M N, Holbert

- K 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 69
- [16] Tao Y, Li X H, Wang Z Q, Li G, Xu H Y, Zhao X N, Lin Y, Liu Y C 2021 *J. Semicond.* **42** 014103
- [17] Taggart J L, Fang R, Gonzalez-Velo Y, Barnaby H J, Kozicki M, Pacheco J L, Bielejec E S, McLain M L, Chamele N, Mahmud A, Mitkova M 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 2300
- [18] Dai Y H, Zou J X, Feng Z, Li X, Wang X, Hu G Y, Zhu Y L, Wu Z H 2022 *Semicond. Sci. Technol.* **37** 095001
- [19] Li X, Feng Z, Zou J X, Wang X, Hu G Y, Wang F F, Ding C, Zhu Y L, Yang F, Wu Z H, Dai Y H 2022 *J. Appl. Phys.* **132** 064904
- [20] Wang T, Zhao R Y, Xu Y C, Zhuo Y, Williams R S, Yang J J 2024 *IEEE Trans. Circuits Syst. Artif. Intell.* **1** 141
- [21] Fyrgios I A, Chatzinikolaou T P, Ntinis V, Kitsios S, Bousoulas P, Tsompanas M A, Tsoukalas D, Adamatzky A, Rubio A, Sirakoulis G C 2022 *IEEE Int. Symp. Circuits Syst.* **2022** 2237
- [22] Nabil A, Kumar T N, Almurib H A F 2024 *Phys. Scr.* **99** 125031
- [23] Fang Z L 2023 *M. S. Thesis* (Baoding: Hebei University) (in Chinese) [方子良 2023 硕士学位论文(保定: 河北大学)]
- [24] Ostrovskii V, Karimov T, Rybin V, Bobrova Y, Arlyapov V, Butusov D 2025 *Neurocomputing* **624** 129454
- [25] Oh S, Lee S, Hwang H 2021 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **9** 864
- [26] Long F L, Zhang Y C, Qu Z Z, Lv P W, Zhang B L 2023 *J. Nanomater.* **2023** 6675683
- [27] Zhang Y C, Long F L, Qu Z Z, Xu Z X, Lv P W, Zhang B L 2023 *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.* **34** 1226
- [28] Farronato M, Melegari M, Ricci S, Hashemkhani S, Bricalli A, Ielmini D 2022 *Adv. Electron. Mater.* **8** 2101161
- [29] Zhao M M, Wang S S, Li D W, Wang R, Li F F, Wu M Q, Liang K, Ren H H, Zheng X R, Guo C C, Ma X H, Zhu B W, Wang H, Hao Y 2022 *Adv. Electron. Mater.* **8** 2101139
- [30] Chatzinikolaou T P, Fyrgios I A, Tsiouostas C, Bousoulas P, Tsompanas M A, Tsoukalas D, Sirakoulis G C 2022 *Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET)* Tripolis, Greece Republic, December 2-3, 2022 p1
- [31] Zhao Y, Fang C, Zhang X M, Xu X X, Gong T C, Luo Q, Chen C Y, Liu Q, Lv H B, Li Q, Zhang F, Li L, Liu M 2018 *IEEE Trans. Electron Devices* **65** 4290
- [32] Stewart I E, Kim M J, Wiley B J 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 1870
- [33] Bao K F, Meng J J, Poplawsky J D, Skowronski M 2023 *J. Non-Cryst. Solids* **617** 122495
- [34] Ashrafi S, Eslami B 2016 *Nucl. Sci. Tech.* **27** 144
- [35] Pejović M M 2017 *Radiat. Phys. Chem.* **130** 221
- [36] Zhu W L, Guo H X, Li Y F, Ma W Y, Zhang F Q, Bai R X, Zhong X L, Li J F, Cao Y H, Ju A A 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 056101 (in Chinese) [朱文璐, 郭红霞, 李洋帆, 马武英, 张凤祁, 白如雪, 钟向丽, 李济芳, 曹彦辉, 琚安安 2025 物理学报 **74** 056101]
- [37] Wang Z R, Joshi S, Savel'ev S E, Jiang H, Midya R, Lin P, Hu M, Ge N, Strachan J P, Li Z Y, Wu Q, Barnell M, Li G L, Xin H L, Williams R S, Xia Q F, Yang J J 2017 *Nat. Mater.* **16** 101
- [38] Pejovic M M, Pejovic M M, Jaksic A B 2012 *Sens. Actuator Phys.* **174** 85
- [39] Yoo J, Park J, Song J, Lim S, Hwang H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 063109
- [40] Li Y J, Tang J S, Gao B, Sun W, Hua Q L, Zhang W B, Li X Y, Zhang W R, Qian H, Wu H Q 2020 *Adv. Sci.* **7** 2002251
- [41] Karpov V G, Niraula D 2018 *Sci. Rep.* **8** 1
- [42] Ma L Y, Li Y D, Guo Q, Ai Er-Ken, Wang H J, Zeng J Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154217 (in Chinese) [玛丽娅, 李豫东, 郭旗, 艾尔肯, 王海娇, 曾骏哲 2015 物理学报 **64** 154217]
- [43] Chung Y L, Cheng W H, Jeng J S, Chen W C, Jhan S A, Chen J S 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 164502
- [44] Yang Y T, Zhang C H, Song Y, Zhang L Q, Gou J, Meng Y C, Zhang H Q, Ma Y Z 2014 *Vacuum* **99** 115
- [45] Yang Y T, Zhang C H, Li B S, Zhang L Q, Xu C L, Jia X J 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **268** 3529
- [46] Dutta M, Brivio S, Spiga S 2024 *Adv. Electron. Mater.* **10** 2400221
- [47] Chekol S A, Menzel S, Waser R, Hoffmann-Eifert S 2022 *Adv. Electron. Mater.* **8** 2200549
- [48] Wang W, Wang M, Ambrosi E, Bricalli A, Laudato M, Sun Z, Chen X D, Ielmini D 2019 *Nat. Commun.* **10** 81
- [49] Varma R S, Kothari D C, Choudhari R J, Kumar R, Tewari R, Dey G K 2009 *Surf. Coat. Technol.* **203** 2468
- [50] Patel M K, Nagare B J, Bagul D M, Haram S K, Kothari D C 2005 *Surf. Coat. Technol.* **196** 96
- [51] Leon M, Giacomazzi L, Girard S, Richard N, Martin P, Martin-Samos L, Ibarra A, Boukenter A, Ouerdane Y 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 1522
- [52] Zhong S L, Li J J, Li X, Fu W L, Deng Y X, Lei Z F, Peng C, Zhang H, Zhang Z G, He Y J, Ma T, Zhou L D, Lu X 2026 *Appl. Phys. Lett.* **128** 023501
- [53] Li H D, Zhang H, Jiao Y, Lei Z F, Yang W K, Li H, Lu G G, Zhang Z G 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 030817 (in Chinese) [李鸿德, 张鸿, 焦扬, 雷志锋, 杨炜坤, 李惠, 路国光, 张战刚 2026 物理学报 **75** 030817]
- [54] Hu Z L, Mo L H, Zhou B, Yi T C, Li M Z, Zhao Q, Liang T J 2026 *Acta Phys. Sin.* **74** 192901 (in Chinese) [胡志良, 莫莉华, 周斌, 易天成, 李梦朝, 赵齐, 梁天骄 2025 物理学报 **74** 192901]
- [55] Yao L Y, Song H J, Ma C, Ju A A, Fu Z, Guo H X, Shen Z C, Wang J B, Zhong X L, Ouyang X P 2026 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **73** 71
- [56] Dandamudi P, Mahmud A, Gonzalez-Velo Y, Kozicki M N, Barnaby H J, Roos B, Alford T L, Ailavajhala M, Mitkova M, Holbert K E 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 3432
- [57] Yuan F, Zhang Z G, Wang J C, Pan L Y, Xu J, Lai C S 2014 *Nanoscale Res. Lett.* **9** 452
- [58] Ryan J T, Lenahan P M, Kang A Y, Conley J F, Bersuker G, Lysaght P 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2272
- [59] Liu Q, Sun J, Lv H B, Long S B, Yin K B, Wan N, Li Y T, Sun L T, Liu M 2012 *Adv. Mater.* **24** 1844
- [60] Celano U, Goux L, Belmonte A, Opsomer K, Franquet A, Schulze A, Detavernier C, Richard O, Bender H, Jurczak M, Vandervorst W 2014 *Nano Lett.* **14** 2401
- [61] Jahan I, Jamuna S, Bharti G K, Kavva R, Ibrahim S A, Amphawan A 2025 *Multimedia University Engineering Conference (MECON)* Cyberjaya, Malaysia Republic, July 21-23, 2025 p1
- [62] Cirakoglu A, Serb A, Zwolinski M, Prodromakis T 2024 *IEEE Interregional NEWCAS Conference (NEWCAS)* Sherbrooke, Canada, June 16-19, 2024 p158
- [63] Lecun Y, Bottou L, Bengio Y, Haffner P 2002 *Proc. IEEE* **86** 2278
- [64] Yuan R, Duan Q X, Tiw P J, Li G, Xiao Z J, Jing Z K, Yang K, Liu C, Ge C, Huang R, Yang Y C 2022 *Nat. Commun.* **13** 3973
- [65] Fang W, Chen Y Q, Ding J H, Yu Z F, Masquelier T, Chen D, Huang L W, Zhou H H, Li G Q, Tian Y H 2023 *Sci. Adv.* **9** eadi1480

Compact model of atmospheric neutron irradiation damage for Ag:Ta₂O₅-based threshold switching memristors faced to optimization of radiation-resistant performance in SNN neuron circuits*

FAN Changfei¹⁾²⁾³⁾ YAO Linyan¹⁾²⁾³⁾ SONG Hongjia^{1)2)3)†}

ZHONG Xiangli^{1)2)3)‡} WANG Jinbin¹⁾²⁾³⁾

1) (*Key Laboratory of Low Dimensional Materials & Application Technology of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*National-Provincial Laboratory of Special Function Thin Film Materials, School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

3) (*Hunan Provincial Key Laboratory of Thin Film Materials and Devices, School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

(Received 6 January 2026; revised manuscript received 27 February 2026)

Abstract

Memristive spiking neural network (SNN) chips with high energy efficiency, high speed, and high integration density are highly promising for space information processing system applications. The memristive neuron circuit is a core component in memristive SNN hardware. Within these circuits, threshold switching memristors (TSMs) are fundamental to realizing spiking behavior. Experiments have shown that TSM devices are susceptible to various types of radiation in space environments, which can disrupt the spiking characteristics of neural circuits and degrade the performance of SNN chips. Therefore, it is particularly important to implement radiation-hardening design for memristive SNN chips. However, the current absence of TSM radiation damage models presents a major challenge for the radiation-hardening design of memristive neuron circuits and memristive SNN chips. In this work, we developed a compact damage model based on the experimental data of atmospheric neutron irradiated Au/Ag:Ta₂O₅/Pt threshold switching memristors. Using this model, we simulated the *I-V* characteristics of the threshold switching memristors to compare their performance before and after irradiation. The simulation results are in strong agreement with the experimental data, as evidenced by coefficients of determination (R^2) consistently exceeding 0.89 (specifically 0.8911, 0.89621, 0.95756, and 0.96305). Subsequently, this validated model was employed to guide the radiation-hardening optimization of the memristive leaky integrate-and-fire (LIF) neuron circuit. The memristive LIF neuron circuit reveals significant differences between its unoptimized and optimized versions in simulations. Specifically, for the unoptimized circuit, the spike firing frequency decreases dramatically after irradiation, dropping from 23.3 kHz to 11.6 kHz. In stark contrast, the spike firing frequency of the optimized circuit exhibits only a slight decrease after irradiation, dropping from 25 kHz to 23.3 kHz, indicating its excellent radiation tolerance. When this optimized circuit was applied to an SNN, the results indicate that its final recognition accuracy after irradiation reaches 97.2%, significantly higher than the 94.7% under the unoptimized design. This work lays the groundwork for the design of memristive SNN chips in neutron radiation environments.

Keywords: compact model, atmospheric neutron irradiation, memristive LIF neuron, SNN

DOI: [10.7498/aps.75.20260026](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260026)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260026](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260026)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 1247528312275230, 52472139) and the Open Program of the Key Laboratory of Low Dimensional Materials and Application Technology (Xiangtan University) of the Ministry of Education (Grant No. 2024YB02).

† Corresponding author. E-mail: hjsong@xtu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xlzhong@xtu.edu.cn